

การทดลองผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชในเมทานอลภาวะเหนือวิกฤตโดยกระบวนการ  
แบบต่อเนื่อง



นางสาว สุกัญญา มากมี

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค


คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974 – 17 – 0976 - 5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EXPERIMENTAL PRODUCTION OF BIODIESEL FROM VEGETABLE OIL AS PREPARED  
IN SUPERCRITICAL METHANOL BY CONTINUOUS PROCESS



Miss Sukunya Magmee

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement  
for the Degree of Master of Science in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974 – 17 – 0976 - 5

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การทดลองผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชในเมทานอลภาวะเหนือวิกฤตโดยกระบวนการแบบต่อเนื่อง	
โดย	นางสาว สุกัญญา	มากมี
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค	
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ. กัญญา	บุญเกียรติ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รศ. ดร. สมเกียรติ	งามประเสริฐสิทธิ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
( รองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย โพธิ์พิจริต )

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
( รองศาสตราจารย์ ดร. ธาราพงษ์ วิทิตสานต์ )

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
( รองศาสตราจารย์ กัญญา บุญเกียรติ )

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
( รองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์ )

..... กรรมการ  
( อาจารย์ ดร. เพ็ญพรรณ ทศคร )

..... กรรมการ  
( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปราโมช รั้งสรรพวีจิตร )

สุกัญญา มากมี : การทดลองผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชในเมทานอลภาวะเหนือวิกฤตโดยกระบวนการแบบต่อเนื่อง. ( EXPERIMENTAL PRODUCTION OF BIODIESEL FROM VEGETABLE OIL AS PREPARED IN SUPERCRITICAL METHANOL BY CONTINUOUS PROCESS ) อ. ที่ปรึกษา : รศ. กัญจนา บุญเกียรติ , อ. ที่ปรึกษาร่วม : รศ. ดร. สมเกียรติ งามประเสริฐสุทธิ , 157 หน้า. ISBN 974 – 17 0976 – 5.

งานวิจัยนี้ศึกษาภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวและน้ำมันเมล็ดในปาล์มในเมทานอลภาวะเหนือวิกฤตโดยกระบวนการแบบต่อเนื่อง เครื่องปฏิกรณ์เป็นชนิดท่อไหล (plug flow reactor) โดยทดลองที่อุณหภูมิ 270 300 และ 350 องศาเซลเซียส ความดัน 19 เมกะพาสกัล อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันพืชต่อเมทานอลอยู่ในช่วง 1:6 ถึง 1:42 และศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันพืชทั้งสองเพื่อหาค่าคงที่อัตราเร็ว

พบว่าภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลิตเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันมะพร้าวและน้ำมันเมล็ดในปาล์มคืออุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมล 1:24 โดยกรณีใช้น้ำมันมะพร้าวเป็นสารตั้งต้นได้ร้อยละผลได้ 90 ส่วนน้ำมันเมล็ดในปาล์มได้ 85 ที่เวลาสเปซ 400 วินาที สำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันมะพร้าวและน้ำมันเมล็ดในปาล์มเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งโดยอัตราเร็วของปฏิกิริยาของน้ำมันพืชทั้งสองเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและความเข้มข้นของไตรกลีเซอไรด์ โดยเมทิลเอสเทอร์ที่ได้มีสมบัติทางเชื้อเพลิงอยู่ในส่วนกำหนดของมาตรฐานไบโอดีเซลและน้ำมันดีเซลหมุนช้า

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา...เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่อ.....  
สาขาวิชา..เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ปีการศึกษา...2545.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

# # 4372451623 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORDS : BIODIESEL / TRANSESTERIFICATION / SUPERCRITICAL METHANOL / CONTINUOUS PROCESS / PRODUCTION

SUKUNYA MAGMEE : EXPERIMENTAL PRODUCTION OF BIODIESEL FROM VEGETABLE OIL AS PREPARED IN SUPERCRITICAL METHANOL BY CONTINUOUS PROCESS. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF.KUNCHANA BUNYAKIAT, THESIS CO-ADVISOR : ASSOC.PROF.SOMKIAT NGAMPRASERTSITH, Dr.de l' INPT , 157 pp. ISBN 974 - 17 - 0976 - 5.

Experimental production of biodiesel (fatty acid methyl esters) from coconut oil and palm kernel oil were studied in supercritical methanol without using any catalyst by continuous process. Experimentals were carried out in a plug flow reactor and reactions were studied at 270 , 300 and 350 °C , at a pressure of 19 MPa with various oil to methanol mole ratios ranging from 1:6 to 1:42.

It was found that the best condition to produce methyl esters from coconut oil and palm kernel oil was reaction temperature of 350 °C with a molar ratio of vegetable oil to methanol being 1:24 ,methyl esters yields at 90 % and 85 % conversion for coconut oil and palm kernel oil respectively at a space time of 400 seconds.The rate of transesterification of both vegetable oils was found to be first order and increased with temperature and triglycerides concentration. The produced methyl ester fuel properties met the requirement of biodiesel and low speed diesel fuel standards.

Department/Program...Chemical Technology... Student's signature.....

Field of study...Chemical Technology..... Advisor's signature.....

Academic year...2002..... Co-advisor's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ กัญญา บุญยเกียรติ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสุทธิ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ในการวิจัยด้วยดีมาตลอด รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่าน ในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำ

ขอขอบคุณ บริษัทน้ำมันพีซีซีวมงคล ที่ให้ความอนุเคราะห์น้ำมันเมล์ดในปาล์ม โรงงานน้ำมันมะพร้าวทับสะแกที่ให้ความอนุเคราะห์น้ำมันมะพร้าว และบริษัทสยามน้ำมันละหุ่ง ที่ให้ความอนุเคราะห์น้ำมันละหุ่งมาใช้ในการทดลอง

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการทุกท่านที่อำนวยความสะดวกในการวิจัยเป็นอย่างดี ขอขอบคุณ คุณปณิธาน ฐปถมพงศ์ ที่ช่วยเหลือในการสร้างเครื่องมือ และขอบคุณ เพื่อนๆ น้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิค ที่ให้การสนับสนุนช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ กองวิจัยพีชน้ำมัน กรมวิชาการเกษตร ที่ให้ความช่วยเหลือและแนะนำเกี่ยวกับการวิเคราะห์พีชน้ำมัน

ขอขอบคุณ ภาควิชาเคมีเทคนิค โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านเชื้อเพลิง ภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ศูนย์ปิโตรเลียมและเทคโนโลยีปิโตรเคมี บัณฑิตวิทยาลัย ทบวงมหาวิทยาลัย และสำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ ที่สนับสนุนทุนวิจัยตลอดการศึกษา

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ญาติพี่น้องที่เป็นกำลังใจเสมอมา จนสำเร็จการศึกษา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
บทที่	
1    บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.4 ขอบเขตและวิธีดำเนินการวิจัย.....	2
2.    ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 แนวคิดและทฤษฎี.....	4
2.1.1 ลิปิด.....	4
2.1.2 ประเภทลิปิด.....	4
2.1.3 ไชมันและน้ำมัน.....	5
2.1.4 กรดไขมัน.....	6
2.1.5 ฟอสโฟลิปิด.....	8
2.1.6 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมัน.....	8
2.1.7 กรรมวิธีการผลิตไขมันและน้ำมัน.....	14
2.1.8 การวิเคราะห์ทางเคมี.....	15
2.1.9 การจำแนกประเภทไขมัน.....	16
2.1.10 พืชไขมันในประเทศไทย.....	17
2.1.11 ไบโอดีเซล.....	20
2.1.12 การผลิตไบโอดีเซล.....	20
2.1.13 ความหมายของไบโอดีเซล.....	22
2.1.14 น้ำมันดีเซล.....	22

## สารบัญ ( ต่อ )

บทที่	หน้า
2.1.15 สมบัติของน้ำมันดีเซล.....	22
2.1.16 ของไหลภาวะเหนือวิกฤต.....	24
2.1.17 การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เคมี.....	32
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	39
3. วิธีดำเนินการวิจัย.....	43
3.1 เครื่องมือในการทดลอง.....	43
3.2 สารที่ใช้ในการทดลอง.....	48
3.3 ขั้นตอนการวิจัย.....	48
4. ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	52
4.1 ผลการศึกษาสมบัติสารตั้งต้นและน้ำมันดีเซล.....	52
4.2 ชนิดและปริมาณของกรดไขมัน.....	54
4.3 ผลของอุณหภูมิและอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันพืชต่อเมทานอล.....	56
4.3.1 ผลของอุณหภูมิ.....	57
4.3.2 ผลของอัตราส่วนโดยโมล.....	62
4.4 จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน.....	66
4.5 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา.....	69
4.6 ผลการศึกษาสมบัติของเมทิลเอสเทอร์.....	70
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	75
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	75
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	76
รายการอ้างอิง.....	78
ภาคผนวก.....	81
ภาคผนวก ก.....	82
ภาคผนวก ข.....	95
ภาคผนวก ค.....	95
ภาคผนวก ง.....	105
ภาคผนวก จ.....	154
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	156



## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	ปริมาณการผลิตพืชน้ำมันของประเทศไทย.....	1
2.1	แสดงกรดไขมันที่มีในอาหาร.....	6
2.2	แสดงชนิดและปริมาณกรดไขมันในอาหาร.....	9
2.3	แสดงจุดหลอมเหลวของกรดไขมัน.....	10
2.4	อุณหภูมิเกิดควันของน้ำมัน.....	12
2.5	แสดงจุดเกิดควัน จุดวาบไฟ และจุดติดไฟของน้ำมัน.....	13
2.6	สมบัติวิกฤตของสารชนิดต่างๆ.....	25
2.7	สมบัติของของไหลเหนือวิกฤตเทียบแก๊สและของเหลว.....	26
2.8	ข้อดีและข้อเสียของของไหลเหนือวิกฤต.....	28
2.9	สมการอินทิเกรตของปฏิกิริยาอันดับต่างๆ.....	39
4.1	สมบัติน้ำมันมะพร้าว น้ำมันเมล็ดในปาล์ม น้ำมันละหุ่ง และน้ำมันดีเซลหมุนช้า.....	52
4.2	ความหนาแน่นของเมทานอลและน้ำมันพืชตัวอย่าง.....	54
4.3	ชนิดและปริมาณกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันพืชตัวอย่าง.....	55
4.4	ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันมะพร้าว.....	69
4.5	ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันเมล็ดในปาล์ม.....	69
4.6	ค่าพลังงานกระตุ้นสำหรับปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน.....	70
4.7	สมบัติของเมทิลเอสเทอร์ที่อัตราส่วนโดยโมล 1:24 อุณหภูมิ 350 ° C เปรียบเทียบกับมาตรฐานน้ำมันดีเซล และไบโอดีเซล.....	72
4.8	การเปรียบเทียบผลการทดลองของงานวิจัยนี้กับงานวิจัยที่ผ่านมา.....	74
ก1	ผลการวิเคราะห์ค่ากรด.....	89
ก2	ผลการวิเคราะห์ค่าสaponifiเคชัน.....	89
ก3	ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนของน้ำมันพืช.....	90
ก4	ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนของเมทิลเอสเทอร์และน้ำมันดีเซลหมุนช้า.....	90
ก5	ผลการวิเคราะห์ค่าความหนืดของน้ำมันพืช.....	91
ก6	ผลการวิเคราะห์ค่าความหนืดของเมทิลเอสเทอร์และน้ำมันดีเซลหมุนช้า.....	91
ก7	ผลการวิเคราะห์จุดวาบไฟของน้ำมันพืช.....	92
ก8	ผลการวิเคราะห์จุดวาบไฟของเมทิลเอสเทอร์และน้ำมันดีเซลหมุนช้า.....	92
ก9	ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นของน้ำมันพืช.....	93

## สารบัญตาราง ( ต่อ )

ตารางที่	หน้า
ก10 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นของเมทิลเอสเทอร์และ น้ำมันดีเซลหมุนช้า.....	93
ข1 การคำนวณอัตราการใช้ที่อัตราส่วนโดยโมล 1:6 สำหรับน้ำมันมะพร้าว.....	95
ข2 การคำนวณอัตราการใช้ที่อัตราส่วนโดยโมล 1:12 สำหรับน้ำมันมะพร้าว.....	96
ข3 การคำนวณอัตราการใช้ที่อัตราส่วนโดยโมล 1:24 สำหรับน้ำมันมะพร้าว.....	97
ข4 การคำนวณอัตราการใช้ที่อัตราส่วนโดยโมล 1:42 สำหรับน้ำมันมะพร้าว.....	98
ข5 การคำนวณอัตราการใช้ที่อัตราส่วนโดยโมล 1:6 สำหรับน้ำมันเมล็ดในปาล์ม.....	99
ข6 การคำนวณอัตราการใช้ที่อัตราส่วนโดยโมล 1:12 สำหรับน้ำมันเมล็ดในปาล์ม.....	100
ข7 การคำนวณอัตราการใช้ที่อัตราส่วนโดยโมล 1:24 สำหรับน้ำมันเมล็ดในปาล์ม.....	101
ข8 การคำนวณอัตราการใช้ที่อัตราส่วนโดยโมล 1:42 สำหรับน้ำมันเมล็ดในปาล์ม.....	102
ค1 เวลาสเปซ ที่อุณหภูมิและอัตราส่วนโดยโมลต่างๆ.....	104
ง1 ผลการทดลองหาปริมาณร้อยละของเมทิลเอสเทอร์.....	148
จ1 มาตรฐานน้ำมันดีเซลหมุนเร็ว น้ำมันดีเซลหมุนช้าและไบโอดีเซล.....	154

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1	ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน.....21
2.2	เฟสไดอะแกรมของของไหลภาวะเหนือวิกฤต.....24
2.3	เส้นทางการเข้าสู่ภาวะเหนือวิกฤต.....26
2.4	ผลของความดันต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริก.....28
2.5	ผลของความดันต่อความหนาแน่น.....28
2.6	การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ความดันคงที่.....29
2.7	การเปลี่ยนแปลงความหนืดของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิต่างๆ .....29
2.8	อินทิเกรตของสมการอัตราเร็วโดยการเขียนกราฟ.....36
2.9	การทดสอบสมการอัตราเร็วโดยวิธีการวิเคราะห์แบบดิฟเฟอเรนเชียล.....38
3.1	อุปกรณ์และแผนภาพการทดลอง.....44
3.2	ปั๊มแรงดันสูง.....44
3.3	ถังแก๊สไหลอมเหลวและถังหล่อเย็น.....45
3.4	แผงวงจรควบคุมและจอแสดงผล .....46
3.5	อุปกรณ์การควบคุมความดัน (Back Pressure Regulator).....47
3.6	เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี.....47
3.7	เครื่องวิเคราะห์ความหนืด.....50
3.8	เครื่องวิเคราะห์จุดวาบไฟ.....50
3.9	เครื่องวิเคราะห์ค่าความร้อน.....51
3.10	เครื่องกลั่นลำดับส่วน.....51
4.1	ผลของอุณหภูมิต่อการเกิดเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันมะพร้าว ที่อัตราส่วนโดยโมล 1 : 42 .....57
4.2	ผลของอุณหภูมิต่อการเกิดเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันมะพร้าว ที่อัตราส่วนโดยโมล 1 : 24 .....58
4.3	ผลของอุณหภูมิต่อการเกิดเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันมะพร้าว ที่อัตราส่วนโดยโมล 1 : 12 .....58

## สารบัญรูปร่างภาพ ( ต่อ )

รูปที่		หน้า
4.4	ผลของอุณหภูมิต่อการเกิดเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันมะพร้าว ที่อัตราส่วนโดยโมล 1 : 6 .....	59
4.5	ผลของอุณหภูมิต่อการเกิดเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันเมล็ดในปาล์ม ที่อัตราส่วนโดยโมล 1 : 42 .....	59
4.6	ผลของอุณหภูมิต่อการเกิดเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันเมล็ดในปาล์ม ที่อัตราส่วนโดยโมล 1 : 24.....	60
4.7	ผลของอุณหภูมิต่อการเกิดเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันเมล็ดในปาล์ม ที่อัตราส่วนโดยโมล 1 : 12.....	60
4.8	ผลของอุณหภูมิต่อการเกิดเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันเมล็ดในปาล์ม ที่อัตราส่วนโดยโมล 1 : 6.....	61
4.9	ผลของอุณหภูมิต่อการเกิดเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันมะพร้าวที่อุณหภูมิ 350 °C.....	62
4.10	ผลของอุณหภูมิต่อการเกิดเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันมะพร้าวที่อุณหภูมิ 300 °C.....	63
4.11	ผลของอุณหภูมิต่อการเกิดเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันมะพร้าวที่อุณหภูมิ 270 °C.....	63
4.12	ผลของอัตราส่วนโดยโมลต่อการเกิดเมทิลเอสเทอร์ จากน้ำมันเมล็ดในปาล์มที่อุณหภูมิ 350 °C.....	64
4.13	ผลของอัตราส่วนโดยโมลต่อการเกิดเมทิลเอสเทอร์ จากน้ำมันเมล็ดในปาล์มที่อุณหภูมิ 300 °C.....	64
4.14	ผลของอัตราส่วนโดยโมลต่อการเกิดเมทิลเอสเทอร์ จากน้ำมันเมล็ดในปาล์มที่อุณหภูมิ 270 °C.....	65
4.15	การทดสอบปฏิกิริยาอันดับหนึ่งสำหรับใช้น้ำมันมะพร้าวเป็นสารตั้งต้น.....	67
4.16	การทดสอบปฏิกิริยาอันดับสองสำหรับใช้น้ำมันมะพร้าวเป็นสารตั้งต้น.....	67
4.17	การทดสอบปฏิกิริยาอันดับหนึ่งสำหรับน้ำมันเมล็ดในปาล์มเป็นสารตั้งต้น.....	68
4.18	การทดสอบปฏิกิริยาอันดับสองสำหรับใช้น้ำมันเมล็ดในปาล์มเป็นสารตั้งต้น.....	68
4.19	โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันมะพร้าว .....	71
4.20	โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันเมล็ดในปาล์ม.....	71
ง.1	โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ภาวะอัตราส่วนโดยโมล 1 : 12 อุณหภูมิ 350 เซลเซียส ความดัน 19 เมกะปาสคัล เวลาสเปซ 12 นาที.....	107
ง.2	Calibration curve ของสารละลายมาตรฐานเมทิลลอเรต.....	109

## สารบัญรูปภาพ ( ต่อ )

รูปที่	หน้า
ง.3	Calibration curve ของสารละลายมาตรฐานเมทิลไมริสเทต.....109
ง.4	Calibration curve ของสารละลายมาตรฐานเมทิลปาล์มิเทต.....110



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกใหม่สำหรับเครื่องยนต์ดีเซล โดยมีวัตถุดิบเป็นน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ ไบโอดีเซลสามารถผลิตได้หลายวิธี แต่วิธีที่นิยมทำคือ การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันระหว่างน้ำมันพืช หรือไขมันสัตว์กับแอลกอฮอล์ ซึ่งให้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลมากที่สุด ส่วนวิธีที่นิยมใช้รองลงมาคือ การผสมน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ กับน้ำมันก๊าด หรือน้ำมันดีเซลซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้มีราคาถูกกว่าวิธีแรก แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังคงมีองค์ประกอบเป็นไตรกลีเซอไรด์อยู่ โดยโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ประกอบด้วยกรดไขมันและกลีเซอรอลซึ่งกลีเซอรอลเป็นสารประกอบที่มีโมเลกุลใหญ่การเผาไหม้จึงไม่สมบูรณ์ เกิดคาร์บอนเกาะติดตามเครื่องยนต์และอุปกรณ์ต่างๆ ดังนั้น ไบโอดีเซลที่ได้จากการทำปฏิกิริยาจึงมีความปลอดภัยต่อเครื่องยนต์มากกว่า

อุปสรรคสำหรับการนำไบโอดีเซลจากวิธีนี้มาใช้ คือ ราคาของไบโอดีเซลสูงกว่าราคาของน้ำมันดีเซลมาก ทั้งนี้เนื่องมาจากราคาของวัตถุดิบ และค่าใช้จ่ายในการผลิต สำหรับราคาของวัตถุดิบแก้ไขได้โดยการใช้ไขมันพืชที่ได้จากพืชน้ำมันที่มีมากในประเทศแสดงดังตารางที่ 1.1 หรือใช้น้ำมันที่ผ่านการบริโภคแล้ว ซึ่งมีราคาถูกกว่าน้ำมันพืชที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์ ส่วนค่าใช้จ่ายในการผลิต ขึ้นอยู่กับขั้นตอนการทำให้ผลิตภัณฑ์บริสุทธิ์ ทั้งนี้เพราะวิธีแบบดั้งเดิมนิยมใช้เบส หรือกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์ที่ได้จำเป็นต้องผ่านการทำให้บริสุทธิ์ก่อนนำไปใช้ ขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์นั้นซับซ้อน และใช้เวลานาน ค่าใช้จ่ายในส่วนนี้จึงสูงตามไปด้วย

ตารางที่ 1.1 ปริมาณการผลิตพืชน้ำมันของประเทศไทย ( พันตัน ) [7]

พ.ศ.	ปาล์มน้ำมัน	มะพร้าว	ถั่วเหลือง	ถั่วลิสง	ละหุ่ง	งา
2538/2539	2,255	1,413	386	147	6	34
2539/2540	2,688	1,419	359	147	6	34
2540/2541	2,681	1,386	338	126	6	35
2541/2542	2,465	1,372	321	135	7	36
2542/2543	3,512	na	na	na	na	na

ดังนั้นการทำปฏิกิริยาโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถลดค่าใช้จ่ายในส่วนนี้ลงได้ และการทำปฏิกิริยาในภาวะเหนือวิกฤตของเมทานอล ( $T_c = 239\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P_c = 8.09\text{ MPa}$ ) เป็นวิธีที่ไม่ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เพราะที่ภาวะนี้สภาพความมีขั้วของเมทานอลจะลดลง เป็นผลให้เมทานอลกับน้ำมันพืชรวมเป็นเนื้อเดียวกัน และทำปฏิกิริยากันได้อย่างสมบูรณ์ภายใน 2 – 4 นาที ที่อุณหภูมิ  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$  ความดัน 19 MPa โดยกระบวนการแบบไม่ต่อเนื่อง เพื่อให้การผลิตไบโอดีเซลขยายไปสู่ระดับอุตสาหกรรมได้ จำเป็นต้องเปลี่ยนกระบวนการผลิตจากกระบวนการแบบไม่ต่อเนื่องมาเป็นแบบต่อเนื่องแทน แล้วหาภาวะที่เหมาะสมต่อไป

## 1.2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1. พัฒนาระบวนการผลิตไบโอดีเซลในเมทานอลภาวะเหนือวิกฤตโดยกระบวนการแบบต่อเนื่อง

1.2.2. หาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันในเมทานอลภาวะเหนือวิกฤต

## 1.3. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.3.1. ได้ภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลในเมทานอลภาวะเหนือวิกฤต

1.3.2. นำวัตถุดิบทางการเกษตรที่ผลิตได้ภายในประเทศมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิง

## 1.4. ขอบเขตและวิธีดำเนินการวิจัย

1.4.1. สืบค้นข้อมูลทางสารสนเทศเกี่ยวกับงานวิจัย

1.4.2. ออกแบบและสร้างเครื่องมือสำหรับทดลอง

1.4.3. เตรียมวัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1.4.4. ออกแบบการทดลองโดยศึกษาผลของตัวแปรดังต่อไปนี้

1.4.4.1.1. อุณหภูมิ  $270 - 350\text{ }^{\circ}\text{C}$

1.4.4.1.2. ความดัน  $8.09 - 19\text{ MPa}$

1.4.4.1.3. อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันพืชต่อเมทานอล  $1 : 6 - 1 : 42$

1.4.4.1.4. เวลาในการทำปฏิกิริยา  $2 - 60$  นาที

1.4.5. วิเคราะห์ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยวิธี แก๊สโครมาโทกราฟ (Gas Chromatograph)

1.4.6. วิเคราะห์สมบัติทางเชื้อเพลิงของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ที่ได้

1.4.7. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1. แนวคิดและทฤษฎี

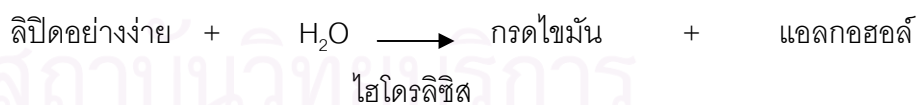
##### 2.1.1. ลิพิด (Lipid) [5]

ลิพิดเป็นสารประกอบอินทรีย์ประเภทไขมันหรือมีลักษณะคล้ายไขมันซึ่งมีในพืชและสัตว์ทั่วไปมีสมบัติไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้ดีในตัวทำละลายชนิดไม่มีขั้วเช่น อีเทอร์ คลอโรฟอร์ม เบนซีน เฮกเซน ไดเอทิลอีเทอร์ และชนิดมีขั้วเล็กน้อย เช่น แอลกอฮอล์ และอะซิโตน เป็นต้น ไขมันเป็นส่วนประกอบหนึ่งของอาหาร เป็นสารอาหารที่ให้พลังงานสูง อาหารที่กินในแต่ละวันควรมีไขมันประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ ของพลังงานที่ได้รับทั้งหมด ไขมันช่วยละลายวิตามินบางชนิด ได้แก่ วิตามิน เอ ดี อี และ เค ให้กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว ซึ่งเป็นกรดไขมันที่จำเป็นแก่ร่างกาย ได้แก่ กรด linoleic กรด linolenic และกรด arachidic ไขมันเป็นแหล่งสะสมอาหารของร่างกายอยู่ในเนื้อเยื่อไขมัน (adipose tissue) ได้ผิวหนัง ซึ่งจะช่วยทำหน้าที่เป็นฉนวนป้องกันความร้อนและเย็นให้แก่ร่างกาย ลิพิดบางชนิดเป็นส่วนประกอบของเนื้อเยื่อประสาท บางชนิดรวมกับโปรตีนเป็นไลโปโปรตีน เป็นต้น

##### 2.1.2. ประเภทของลิพิด [5]

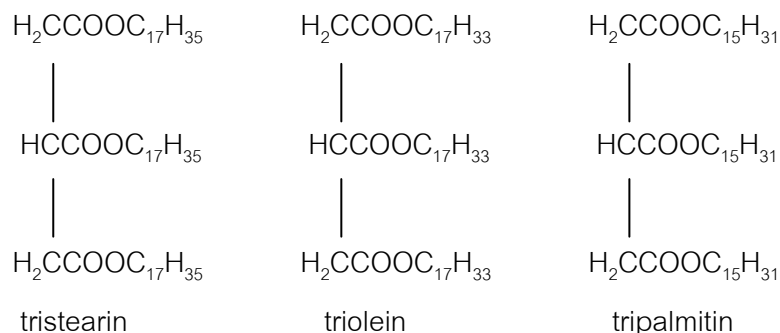
ลิพิดแบ่งเป็น 3 ประเภทคือ

2.1.2.1 ลิพิดอย่างง่าย (simple lipid) เป็นเอสเทอร์ของกรดไขมันและแอลกอฮอล์ เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสจะได้ดังนี้



ลิพิดอย่างง่าย ได้แก่

ก. น้ำมันและไขมัน เป็นเอสเทอร์ของกรดไขมันกับกลีเซอริน เช่น tristearin triolein tripalmitin ดังสูตร



ข. ขี้ผึ้ง (wax) เป็นเอสเทอร์ของกรดไขมันกับแอลกอฮอล์อื่นที่ไม่ใช่กลีเซอริน แต่เป็นแอลกอฮอล์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เช่น carnauba wax ( $\text{C}_{25}\text{H}_{31}\text{COOC}_{30}\text{H}_{61}$ ) และขี้ผึ้ง ( $\text{C}_{15}\text{H}_{31}\text{COOC}_{30}\text{H}_{61}$ ) ซึ่งเกิดจาก mericyl alcohol ( $\text{C}_{30}\text{H}_{61}\text{OH}$ )

2.1.2.2. ลิพิดเชิงประกอบ (compound lipid) เป็นเอสเทอร์ของกรดไขมันและแอลกอฮอล์ และมีสารประกอบอื่นรวมอยู่ด้วย ได้แก่

ก. ฟอสโฟลิพิด หรือ ฟอสฟาไทด์ (phosphatide) เป็นสารไขมันที่มีกรดฟอสฟอริกและสารประกอบของไนโตรเจนในโมเลกุล เช่น เลซิทิน

ข. ไกลโคลิพิด หรือเรียกได้อีกอย่างว่า ซีรีโบไซด์ (cereboside) เพราะมีอยู่ในสมองส่วนซีรีรัม ไกลโคลิพิดเป็นสารไขมันที่มีคาร์โบไฮเดรตและสารพวกไนโตรเจนอยู่ในโมเลกุล

ค. ลิพิดที่มีสารอื่นอยู่ด้วย เช่น อะมิโนลิพิด ซึ่งมีส่วนที่มีหมู่อะมิโน ( $-\text{NH}_2$ ) อยู่ในโมเลกุล

### 2.1.3. ไขมันและน้ำมัน

เป็นเอสเทอร์ของกรดไขมันกับกลีเซอริน ไขมันจะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง ส่วนน้ำมันจะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง ไขมันและน้ำมันจะมีส่วนประกอบทางเคมีเหมือนกัน กรดไขมันที่มีในไขมันและน้ำมันอาจเป็นชนิดเดียวกันทั้ง 3 โมเลกุล หรือคนละชนิดก็ได้ ไขมันหรือน้ำมันจากสัตว์มีกรดไขมันที่อิ่มตัวอยู่มากและมักเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง ไขมันและน้ำมันจากสัตว์ได้แก่ ไขมันในเนื้อสัตว์ ไขมันในไข่แดง ไขมันในนม และน้ำมันหมู ส่วนไขมันและน้ำมันจากพืชมีกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวอยู่มาก (ยกเว้นน้ำมันมะพร้าว) ได้แก่ น้ำมันรำ น้ำมันถั่ว น้ำมันมะกอก น้ำมันข้าวโพด น้ำมันดอกคำฝอย และน้ำมันดอกทานตะวัน เป็นต้น

### 2.1.4. กรดไขมัน

กรดไขมันเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีคาร์บอนอะตอมเกาะกันเป็นเส้นตรง กรดไขมันที่พบในธรรมชาติมักมีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นจำนวนคี่ กรดไขมันมี 2 ประเภทคือ ชนิดอิ่มตัว และไม่อิ่มตัว กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวจะมีพันธะคู่ ระหว่างคาร์บอน 1 แห่ง หรือ 2 แห่ง กรดไขมันที่มีในอาหาร แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 กรดไขมันที่มีในอาหาร [5]

ชื่อกรด	สูตร	จุดหลอมเหลว	จุดเดือด	ถ.พ.	แหล่งที่พบ
	$C_nH_{2n}O_2$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$20^{\circ}C$	

#### อนุกรมอะซีติก ( acetic series )

กรดบิวไทริก (butyric)	$C_4H_8O_2$	- 6.5	162.3	0.959	เนยเหลว
กรดคาไพโรอิก (caproic)	$C_6H_{12}O_2$	- 3.4	200.0	0.924	เนยเหลว
กรดคาไพริลิก (caprylic)	$C_8H_{16}O_2$	16.5	236.0	0.910	เนยเหลว, น้ำมันมะพร้าว และน้ำมันปาล์ม
กรดคาพริก (capric)	$C_{10}H_{20}O_2$	31.3	269.0		เนยเหลว, น้ำมันมะพร้าว และน้ำมันปาล์ม
กรดลอริก (lauric)	$C_{12}H_{24}O_2$	43.6		0.883	น้ำมันมะพร้าวและน้ำมันปาล์ม
กรดไมริสติก (myristic)	$C_{14}H_{28}O_2$	58.3		0.858	น้ำมันมะพร้าว, น้ำมันลูกจันทน์และน้ำมันหมู
กรดปาล์มิติก (palmitic)	$C_{16}H_{32}O_2$	62.6		0.850	ในไขมันและน้ำมันเกือบทุกชนิด
กรดสเตียริก (stearic)	$C_{18}H_{36}O_2$	69.3			มีในไขมันส่วนใหญ่
กรดอะราคิติก (arachidic)	$C_{20}H_{40}O_2$	77.0			น้ำมันถั่วลิสง
กรดลิคโนเชอริก (lignoceric)	$C_{24}H_{48}O_2$	80.5			น้ำมันถั่วลิสง

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

อนุกรมโอเลอิก (oleic series) , (มี 1 พันธะคู่)

ชื่อกรด	สูตร $C_nH_{2n-2}O_2$	จุด หลอมเหลว ว $^{\circ}C$	จุด เดือด $^{\circ}C$	ถ.พ. $20^{\circ}C$	แหล่งที่พบ
กรดไฮโปแกอิก (hypogaecic)	$C_{16}H_{30}O_2$	33.0			น้ำมันถั่วลิสง
กรดโอเลอิก (oleic)	$C_{18}H_{34}O_2$	14.0			มีในไขมันและน้ำมันส่วนใหญ่
กรดอีรูซิก (erucic)	$C_{22}H_{42}O_2$	33.0-34.0			น้ำมันมัสตาร์ด

อนุกรมไลโนเลอิก (linoleic series) , (มี 2 พันธะคู่)

กรดไลโนเลอิก (linoleic)	$C_{18}H_{32}O_2$	-5.0			น้ำมันข้าวโพด น้ำมัน ลินสีด น้ำมันเมล็ดฝ้าย และน้ำมันถั่วลิสง
-------------------------	-------------------	------	--	--	---

อนุกรมไลโนเลนิก (linolenic series) , (มี 3 พันธะคู่)

กรดไลโนเลนิก (linolenic)	$C_{18}H_{30}O_2$	-11.0			น้ำมันลินสีดและน้ำมัน ชักแห้งอื่นๆ (drying oil)
-----------------------------	-------------------	-------	--	--	--

อนุกรมคลูปาโนไดนิค (clupanodonic) , (มี 4 พันธะคู่)

กรดคลูปาโนไดนิค (clupanodonic)	$C_{18}H_{28}O_2$				น้ำมันปลากวางพ , น้ำมัน ตับปลาสด และปลา อื่นๆ
กรดอะราคิไดนิค (araachidonic)	$C_{20}H_{32}O_2$	-49.5			เนื้อเยื่อของสัตว์ น้ำมัน ข้าวโพด น้ำมันลินสีด

กรด linoleic และ linolenic เรียกว่า กรดไขมันที่จำเป็นต่อร่างกาย (essential fatty acid) ซึ่งเป็นกรดไขมันที่ร่างกายไม่สามารถสร้างขึ้นในร่างกายได้ จึงต้องได้รับจากอาหาร ส่วนกรด arachidic นั้นก็จัดว่าเป็นกรดไขมันที่จำเป็นต่อร่างกาย แต่สามารถสร้างขึ้นในร่างกายมนุษย์ได้จากกรด linoleic ซึ่งมีมากในน้ำมันข้าวโพด น้ำมันเมล็ดฝ้าย น้ำมันถั่วลิสง และน้ำมันถั่วเหลือง กรดไขมันที่จำเป็นต่อร่างกายมีความสำคัญในการสร้าง พรอสตาแกรนดินส์ (prostaglandins) ซึ่งเป็นสารที่มีบทบาทในการทำหน้าที่ภายในร่างกายมาก เช่น การขับน้ำย่อยที่เป็นกรด การหดตัว และคลายตัวของกล้ามเนื้อเรียบ การควบคุมอุณหภูมิของร่างกายการรวมตัวของแผ่นเลือด ฯลฯ

การขาดกรดไขมันจะทำให้เกิดโรคต่างๆ ในเด็กทารกจะทำให้เกิดแผลตามตัวและน้ำหนักลดลง ปริมาณกรดไขมันในอาหารบางชนิดแสดงในตารางที่ 2.2

### 2.1.5. ฟอสโฟลิปิด

ฟอสโฟลิปิดมีในเซลล์พืชและเซลล์สัตว์ทุกชนิด เป็นสารไขมันรูปหนึ่งที่เกิดขึ้นในในร่างกายโดยเฉพาะในสมอง ตับ เนื้อเยื่อไขมันหลัง และเนื้อเยื่อของเซลล์เกือบทุกเซลล์ฟอสโฟลิปิดที่สำคัญที่พบในอาหารและรู้จักกันดีคือเลซิทิน ซึ่งเป็นโคลีนฟอสโฟกลีเซอไรด์ (choline phosphoglyceride) หรือฟอสฟาติดีลโคลีน (phosphatidyl choline) ซึ่งต่างจากไขมัน

### 2.1.6. สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไขมัน

2.1.6.1. เมื่อบริสุทธิ์จะปราศจากสี กลิ่น และรส

2.1.6.2. ไม่ละลายในน้ำ (ยกเว้นน้ำมันงา) และแอลกอฮอล์ที่เย็น ละลายในแอลกอฮอล์ที่ร้อนได้เล็กน้อยละลายได้ดีในคลอโรฟอร์ม อีเทอร์ คาร์บอนไดซัลไฟด์ คาร์บอนเตตระคลอไรด์ และปิโตรเลียมอีเทอร์

2.1.6.3. ไขมันจะหลอมละลายเมื่อได้รับความร้อน ไขมันจะค่อยๆ อ่อนตัวหลอมละลาย ทั้งนี้เพราะไขมันประกอบด้วยกรดไขมันหลายชนิด จุดหลอมเหลวของไขมันขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของกรดไขมันที่มีอยู่ในไขมัน กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวมีจุดหลอมเหลวต่ำ ยังมีจำนวนพันธะคู่มากในโมเลกุล จุดหลอมเหลวก็ยิ่งต่ำ กรดไขมันชนิดอิ่มตัวที่มีโมเลกุลยาว จะมีจุดหลอมเหลวสูงกว่ากรดไขมันชนิดอิ่มตัวโมเลกุลสั้น จุดหลอมเหลวของกรดไขมันชนิดต่างๆ มีดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 ชนิดและปริมาณของกรดไขมันในอาหาร (g / 100 g) [5]

แหล่งไขมัน	กรดไขมันอิ่มตัว			กรดไขมันไม่อิ่มตัว			
	ปาล์มิติก	สเตียริก	ทั้งหมด	โอเลอิก	ไลโนเลอิก	ไลโนเลนิก	ทั้งหมด
น้ำมัน							
ข้าวโพด	10.9	1.8	12.7	24.2	58.0	0.7	82.9
เมล็ดฝ้าย	22.7	2.3	25.9	17.0	51.5	0.2	69.7
มะกอก	11.0	2.2	13.5	72.5	7.9	0.6	82.1
ปาล์มโอเลอิก	43.5	4.3	49.3	36.6	9.1	0.2	46.3
ถั่วลิสง	9.5	2.2	16.9	44.8	32.0	-	78.2
ดอกคำฝอย	6.2	2.2	9.1	11.7	74.1	0.4	86.6
งา	8.9	4.8	14.2	39.3	41.3	0.3	81.4
ถั่วเหลือง	10.3	3.8	14.4	22.8	51.0	6.8	81.2
ดอกทานตะวัน	5.9	4.5	10.3	19.5	65.7	-	85.2

ไขมันและน้ำมันมีชนิดและปริมาณของกรดไขมันที่แตกต่างกัน เช่น ไขมันที่มีกรดไขมันชนิดอิ่มตัวโมเลกุลยาวจำนวนมาก จึงมีจุดหลอมเหลวสูง ทำให้มีลักษณะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิปกติ ส่วนน้ำมันมะพร้าวมีกรดไขมันชนิดอิ่มตัวโมเลกุลสั้นจำนวนมาก มีกรดไขมันที่อิ่มตัวน้อย จึงมีจุดหลอมเหลวสูง อยู่ในสภาพที่เป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ ในฤดูหนาวน้ำมันมะพร้าวจะแข็งตัวก่อนน้ำมันชนิดอื่น คือแข็งตัวที่อุณหภูมิประมาณ 22-26 องศาเซลเซียส สำหรับเนยก็เช่นเดียวกันจะแข็งตัวที่อุณหภูมิ 35-41 องศาเซลเซียส

2.1.6.4. ความถ่วงจำเพาะของไขมันและน้ำมัน ไขมันและน้ำมันทุกชนิดมีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่า 1.0 ความถ่วงจำเพาะของไขมันชนิดต่างๆมีดังนี้

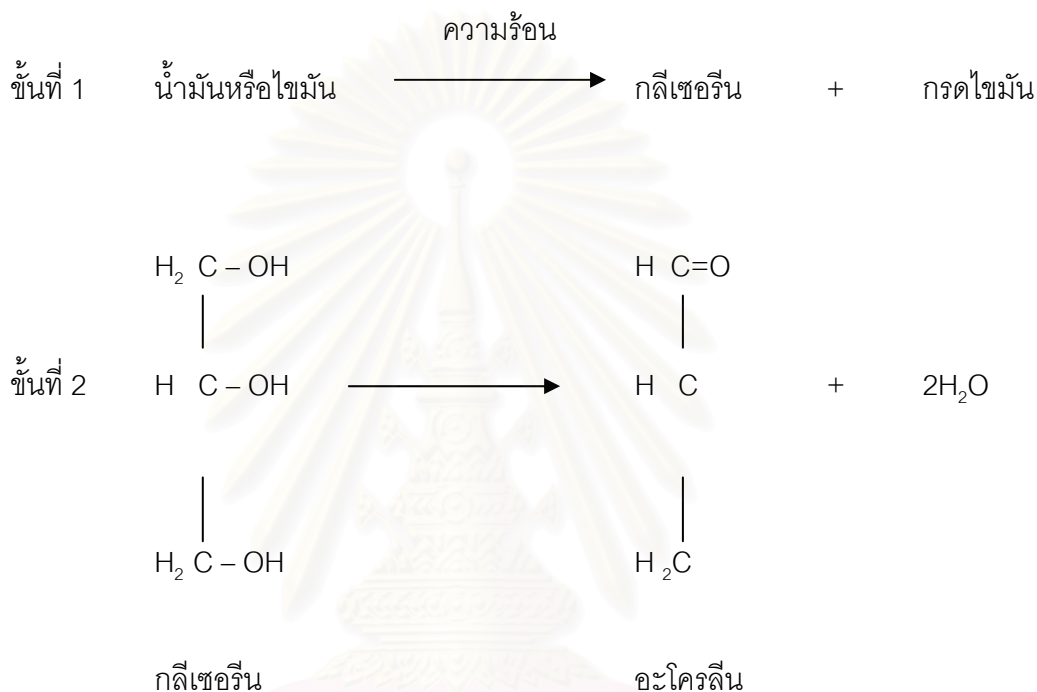
เนย	ไม่ต่ำกว่า	0.905	ที่ 40 ° C
น้ำมันเมล็ดฝ้าย	ประมาณ	0.917-0.918	ที่ 25 ° C
น้ำมันข้าวโพด	ประมาณ	0.919-0.921	ที่ 25 ° C
น้ำมันหมู	ประมาณ	0.931-0.932	ที่ 15 ° C
น้ำมันมะกอก	ประมาณ	0.916-0.918	ที่ 25 ° C

ตารางที่ 2.3 จุดหลอมเหลวของกรดไขมันชนิดต่างๆ [5]

จำนวนคาร์บอน	กรดไขมัน	จุดหลอมเหลว °C
	<b>กรดอิ่มตัว</b>	
4	บิวไทริก C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> COOH	-7.9
6	คาโปรอิก C <sub>5</sub> H <sub>11</sub> COOH	-3.4
8	คาพโรอิก C <sub>7</sub> H <sub>15</sub> COOH	16.7
10	คาพริก C <sub>9</sub> H <sub>19</sub> COOH	31.6
12	ลอรริก C <sub>11</sub> H <sub>23</sub> COOH	44.2
14	ไมริสติก C <sub>13</sub> H <sub>27</sub> COOH	54.4
16	ปาล์มิติก C <sub>15</sub> H <sub>31</sub> COOH	62.9
18	สเตียริก C <sub>17</sub> H <sub>35</sub> COOH	69.6
20	อะราคิติก C <sub>19</sub> H <sub>39</sub> COOH	75.3
22	บีซีนิก C <sub>21</sub> H <sub>43</sub> COOH	79.9
24	ลิกโนซีริก C <sub>23</sub> H <sub>47</sub> COOH	84.1
	<b>กรดไม่อิ่มตัว</b>	
16	ปาล์มิโตเลอิก CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>5</sub> CH=CH(CH <sub>2</sub> ) <sub>7</sub> COOH 9-hexadecenoic	0.5
18	โอเลอิก CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>7</sub> CH=CH(CH <sub>2</sub> ) <sub>7</sub> COOH cis-9-octadecenoic	16.3
18	อีไลติก CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>7</sub> CH=CH(CH <sub>2</sub> ) <sub>7</sub> COOH trans- 9-octadecenoic	43.7
18	ไลโนเลอิก 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 cis-cis-9-12-15 octadecadienoic	-5.0
18	ไลโนเลนิก 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 cis-cis-9-12-15 octadecatrienoic	-11.0
20	อะราคิโดนิก CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>4</sub> CH=(CHCH <sub>2</sub> CH) <sub>3</sub> =CH(CH <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> COOH cis-cis-cis-cis-5-8-11-14eicosatetraenoic	-49.5
22	อีรูซิก CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>7</sub> CH=CH(CH <sub>2</sub> ) <sub>11</sub> COOH cis-13cocosenoic	33.7

### 2.1.6.5. เมื่อเผาให้ความร้อน จะมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

(ยกเว้นน้ำมันซักแห้ง) เมื่ออุณหภูมิเกิน 250 °C จะมีการสลายตัวได้สารที่มีกลิ่น เรียกว่า อะโครลีน (acrolein) เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของกลีเซอริน อะโครลีน เป็นสารที่ระเหยได้ ทำให้ผู้อยู่ใกล้เคียงรู้สึกแสบตา และทำให้อาหารมีกลิ่นไม่น่ารับประทาน ลำดับการเปลี่ยนแปลงมีดังนี้



อุณหภูมิที่ทำให้ไขมันหรือน้ำมันเป็นควันเรียกว่า จุดเกิดควัน (smoking point) ไขมันหรือน้ำมันจากสัตว์มีอุณหภูมิที่เป็นควันต่ำกว่าน้ำมันพืช อุณหภูมิที่เป็นควันนี้ใช้ทดสอบความบริสุทธิ์ของไขมันได้ ซึ่งน้ำมันและไขมันแต่ละชนิดจะสลายตัวที่อุณหภูมิต่างกัน

อุณหภูมิเป็นควันของไขมันนอกจากจะขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันและไขมันแล้ว ยังขึ้นอยู่กับสิ่งอื่น ๆ อีกดังนี้

ก. ปริมาณของกรดไขมันอิสระ ถ้าในน้ำมันมีปริมาณของกรดไขมันอิสระสูง จะมีอุณหภูมิที่เป็นควันต่ำ เช่น น้ำมันมะพร้าวมีกรดไขมันอิสระในรูปของกรดโอเลอิกร้อยละ 1.90 สูงกว่าไขมันทุกชนิด จึงมีอุณหภูมิที่เป็นควันต่ำสุด น้ำมันที่ใช้แล้วมีอุณหภูมิที่เป็นควันต่ำลงก็ด้วยเหตุผลเดียวกัน นั่นคือเมื่อน้ำมันได้รับความร้อน โมเลกุลของไขมันสลายตัวเป็นกรดไขมันอิสระ ในน้ำมันจึงมีปริมาณของกรดไขมันอิสระมากขึ้นทำให้อุณหภูมิที่เป็นควันต่ำลง ดังกรณีของน้ำมันหมู ในตารางที่ 2.4



ตารางที่ 2.4 อุณหภูมิที่เป็นควันของน้ำมันและไขมันชนิดต่างๆ [5]

ชนิดของไขมัน	อุณหภูมิที่เป็นควัน °C	กรดไขมันอิสระ (กรดโอเลอิก)%
น้ำมันเมล็ดฝ้าย	233	0.07
น้ำมันหมู (มันเปลง)	221	0.15
น้ำมันหมู (มันแข็ง)	194	0.51
น้ำมันหมูใช้แล้ว ( 5 ชั่วโมง)	204	0.34
น้ำมันหมูใช้นานกว่า 5 ชั่วโมง	190	0.61
น้ำมันมะกอก	170	0.92
น้ำมันถั่วลิสง	149-162	1.64-1.10
น้ำมันมะพร้าว	138	1.90
เนย	208	0.28

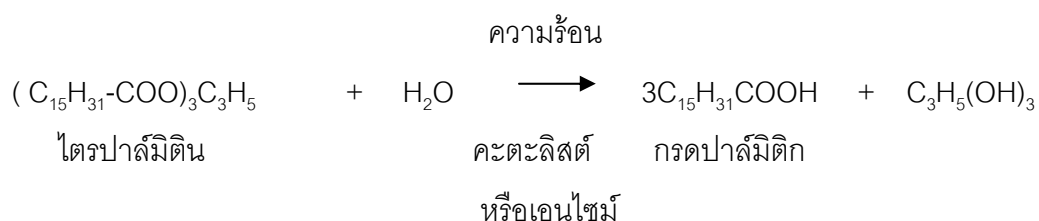
ข. การสัมผัสกับอากาศ ถ้าน้ำมันสัมผัสกับอากาศได้มากขึ้น อุณหภูมิที่เป็นควันของน้ำมันจะลดลงดังนั้นการทอดอาหารในภาชนะที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ จะทำให้จุดเป็นควันของน้ำมันลดต่ำลงเร็วกว่าน้ำมันที่ทอดในภาชนะที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า

ค. เศษอาหารที่ปะปนในน้ำมัน เช่นแป้ง จะทำให้อุณหภูมิที่เป็นควันของน้ำมันต่ำลงเร็วขึ้น ฉะนั้นน้ำมันที่ใช้แล้วควรกรองเอาเศษอาหารออกเสียก่อนที่จะทอดในคราวต่อไป

ถ้าน้ำมันได้รับความร้อนสูงขึ้นเรื่อยๆ จากจุดเป็นควัน น้ำมันอาจลุกเป็นไฟได้ เรียกจุดนี้ว่าจุดที่เริ่มติดไฟหรือจุดวาบไฟ (flash point) และถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นอีก ก็จะลุกเป็นไฟได้ เรียกจุดนี้ว่าจุดลุกเป็นไฟ (fire point) อุณหภูมิของจุดทั้ง 3 นี้แสดงในตารางที่ 2.5

2.1.6.6. ไขมันทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ โดยเฉพาะเมื่อมีแสงและความชื้นจะได้กรดไขมันอิสระเกิดขึ้น และจะเปลี่ยนเป็นแอลดีไฮด์ และกรดไขมันที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ทำให้มีกลิ่นเหม็นและรสชาติเปลี่ยนไป เรียกว่าเกิดการเหม็นหืน (rancid)

2.1.6.7. ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส เมื่อไฮโดรไลซ์ไขมันด้วยกรด หรือเอนไซม์ จะได้กรดไขมันกับกลีเซอริน ดังสมการ



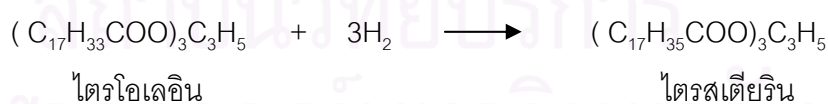
ตารางที่ 2.5 จุดที่เป็นควัน จุดวาบไฟ และจุดติดไฟของน้ำมันต่าง ๆ [5]

น้ำมัน	จุดที่เป็นควัน		จุดวาบไฟ		จุดติดไฟ	
	°F	°C	°F	°C	°F	°C
น้ำมันละหุ่งบริสุทธิ์	392	200	568	298	635	335
น้ำมันละหุ่งปราศจากน้ำ	348	176	569	299	638	337
น้ำมันข้าวโพดดิบ	352	178	562	294	655	346
น้ำมันข้าวโพดบริสุทธิ์	440	227	618	326	678	539
น้ำมันถั่วเหลือง (บีบ)	357	181	563	296	664	351
น้ำมันถั่วเหลือง (สกัด)	410	210	603	317	670	354
น้ำมันถั่วเหลืองบริสุทธิ์	492	256	618	326	673	356

2.1.6.8. การทำให้เกิดสบู่ (saponification) เป็นปฏิกิริยาของไขมันกับเบสแก่ เช่น NaOH หรือ KOH จะได้สบู่ ดังสมการ



2.1.6.9. การเติมไฮโดรเจน (hydrogenation) น้ำมันที่มีกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวจะเปลี่ยนเป็นไขมันได้โดยการผ่านไฮโดรเจนลงไป จะทำให้กรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวเป็นกรดไขมันที่อิ่มตัว และไขมันที่ได้จะแข็งขึ้น ปฏิกิริยานี้มีประโยชน์ในอุตสาหกรรมทำชอร์ตเทนนิ่ง ซึ่งเป็นไขมันที่เป็นของแข็งเช่นเดียวกับเนย แต่นุ่มและหนืดปฏิกิริยานี้ใช้ทำเนยเทียม (margarine) โอลีโอมาร์การีน ทำจากการผ่านไฮโดรเจนลงในไตรโอเลอิน แล้วเติมสี กลิ่น วิตามินเอและดีลงไป ปฏิกิริยามีดังนี้



2.1.6.10. ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (spontaneous oxidation) น้ำมันที่มีกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวอยู่มาก เช่น น้ำมันลินสีดจะถูกเติมออกซิเจนได้ง่าย เกิดสารที่เป็นของแข็งไม่เปียกน้ำ ใช้ผสมในสีทาบ้านและเคลือบ เรียกว่าน้ำมันพวกนี้ว่า น้ำมันชักแห้ง (drying oil)

### 2.1.7. กรรมวิธีการผลิตไขมันและน้ำมัน

ไขมันบริสุทธิ์ไม่มีในธรรมชาติ จึงต้องสกัดออกมาจากอาหารที่มีไขมันสูง เช่น มันสัตว์ เมล็ดพืช โดยปกติเซลล์ของสัตว์มักมีน้ำมันมากกว่าเซลล์ของพืช การสกัดน้ำมันจากสัตว์และพืชจึงใช้กรรมวิธีต่างกันซึ่งอาจแบ่งได้ 3 วิธี ดังนี้

2.1.7.1. การเจียว คือการให้ความร้อนจนน้ำมันแตกออกจากเซลล์ วิธีนี้มักใช้ในการสกัดน้ำมันจากสัตว์ โดยการนำเนื้อเยื่อส่วนที่มีไขมันสูงของสัตว์มาหั่นเป็นชิ้นเล็กๆบางๆเพื่อช่วยให้ไขมันแยกออกมาเร็วขึ้น ความร้อนจะทำให้เซลล์น้ำมันแตกละลายไหลออกมา

2.1.7.2. การบีบอัด คือการใช้ความดันสูงบีบน้ำมันออกจากเมล็ดพืชที่มีไขมันสูง วิธีการคือนำเมล็ดพืชที่ทำความสะอาดแล้วมาแยกเอาเปลือกออกเพื่อให้มีคุณภาพดี บดเพื่อให้เมล็ดแตกโดยเฉพาะเมล็ดพืชที่มีขนาดใหญ่ นำไปอบโดยใช้ความร้อน 70 – 90 องศาเซลเซียส เพื่อช่วยให้ความชื้นลดลงเหลือประมาณ 12 % นอกจากนี้ยังเป็นการทำลายเอนไซม์และทำให้โปรตีนเปลี่ยนสภาพไปบ้าง การอบจะทำให้ไขมันบางส่วนออกจากเซลล์ ขึ้นต่อไปจึงผ่านเข้าเครื่องบีบน้ำมัน ใช้ความดันสูง จนเซลล์แตกละลายไหลออกมาจึงหยุดเครื่อง แล้วแยกกากออก

2.1.7.3. การใช้ตัวทำละลาย คือการใช้สารสกัดน้ำมันพืช ขั้นตอนของกรรมวิธีคล้ายการบีบอัด แต่เพิ่มขั้นตอนการทำให้เป็นแผ่นหรือปั้นเป็นเม็ดเพื่อให้มีพื้นที่ผิวมาก แล้วนำไปแช่ในตัวทำละลาย ตัวทำละลายที่นิยมใช้กัน ได้แก่ อีเทอร์ เบนซีน คาร์บอนไดซัลไฟด์ และเฮกเซน เมื่อละลายไขมันออกแล้ว ก็ระเหยตัวทำละลายออกไปจากน้ำมัน

2.1.7.4. การทำไขมันและน้ำมันให้บริสุทธิ์ มีขั้นตอนดังนี้

ก. กำจัดสารแขวนลอยต่างๆในน้ำมัน

การกำจัดสารแขวนลอยต่างๆในน้ำมัน ซึ่งได้แก่ โปรตีน คาร์โบไฮเดรต ฟอสฟาไทด์ และน้ำ โดยการนำไขมันมาทำให้ร้อนแล้วตั้งทิ้งไว้ น้ำมันและวัตถุอื่นที่มีน้ำหนักมากกว่าก็จะตกลงข้างล่าง แล้วจึงกำจัดออกไป อีกวิธีหนึ่งคือการต้มไขมันที่ 200 ° C โดยมีตัวดูดซับ แล้วทำการกรอง

ข. กำจัดกรดไขมันอิสระ

การกำจัดกรดไขมันอิสระซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาไลโปลิซิสโดยการให้น้ำมันทำปฏิกิริยากับด่าง ส่วนมากใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เติมลงไป ในไขมันที่ต้มให้ร้อน คนอย่างแรงแล้วตั้งทิ้งไว้ กรดไขมันอิสระจะทำปฏิกิริยากับสบู่ เมื่อตั้งทิ้งไว้สบู่จะจมลงจึงทำการแยกออก

ค. กำจัดสีโดยการฟอกสี

ใช้วิธีเติมสารดูดซับสี เช่น ผงถ่าน หรืออาศัยปฏิกิริยาเคมี การฟอกสีนิยมใช้เบนโตไนต์ (bentonite) ซึ่งเป็นโคลนฟอกสี (bleaching clay) ชนิดหนึ่งซึ่งประกอบด้วยแร่ montmorillonite ( $\text{Al}_4\text{Si}_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) ไม่น้อยกว่า 85 % โดยเติมในน้ำมันและให้ความร้อนภายใต้ภาวะสุญญากาศ ทำซ้ำจนกระทั่งน้ำมันใส การฟอกสีนิยมทำภายใต้ภาวะสุญญากาศ เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งจะเกิดขึ้นถ้าทำการฟอกสีที่อุณหภูมิสูงซึ่งจะทำให้ น้ำมันมีสีเข้ม เบนโตไนต์กำจัดสีเขียว (chlorophyll) ได้ดีกว่าสีแดง (carotene หรือ xanthophyll) ความร้อนอาจทำให้น้ำมันมีสีแดงเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของโทโคเฟอรอล (tocopherol) เกิดเป็นโครมัน - 5 - 6 ควิโนน (chroman -5-6 - quinone) ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีสีแดง ดังนั้นการฟอกสีอาจใช้ผงถ่าน (charcoal) ร่วมกับเบนโตไนต์ เพื่อกำจัดสารสีแดงในน้ำมันมะพร้าวได้

#### ง. การกำจัดกลิ่น

ทำโดยการให้น้ำมันที่ร้อนไหลตกลงมาเป็นชั้นๆ ในหอสุญญากาศ สวนทางกับไอน้ำร้อนซึ่งเคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้ามซึ่งจะทำให้สารที่ทำให้เกิดกลิ่นระเหยออกไป สารพวกนี้ได้แก่ แอลดีไฮด์ คีโตน และเปอร์ออกไซด์

### 2.1.8. การวิเคราะห์ทางเคมี

2.1.8.1. ค่าซาฟอนนิฟิเคชัน (saponification number) หมายถึงจำนวนมิลลิกรัมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ทำปฏิกิริยาพอดีกับน้ำมันหรือไขมัน 1 กรัม เป็นตัวบ่งชี้ให้ทราบถึงขนาดหรือน้ำหนักของโมเลกุลของกรดไขมันที่เป็นส่วนประกอบอยู่ในโมเลกุลของไขมันหรือน้ำมันนั้น ไขมันหรือน้ำมันที่โมเลกุลประกอบด้วยกรดไขมันที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำหรือขนาดของโมเลกุลเล็ก หรือมีจำนวนคาร์บอนในโมเลกุลน้อยจะมีค่า saponification สูง ในทางตรงกันข้าม ไขมันหรือน้ำมันที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง จะให้ค่า saponification ต่ำ

2.1.8.2. ค่าของกรด (acid value) เป็นจำนวนมิลลิกรัมของ KOH ที่ทำให้กรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในไขมัน 1 กรัม สะเทินพอดี กรดไขมันอิสระที่มีในน้ำมันก็เนื่องมาจากการสลายตัวของกลีเซอไรด์ทางเคมีหรือโดยการกระทำของแบคทีเรีย ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ว่าไตรกลีเซอไรด์ที่มีอยู่ในไขมันหรือน้ำมันถูกทำลายด้วยเอ็นไซม์ไลเปสเป็นกรดไขมันอิสระมากน้อยเพียงใด ถ้าค่าสูงแสดงว่าไตรกลีเซอไรด์ถูกทำลายได้เป็นกรดไขมันอิสระมาก

2.1.8.3. ค่าไอโอดีน (iodine value) หมายถึงจำนวนกรัมของไอโอดีนที่ถูกดูดซึมโดยน้ำมัน 100 กรัม ค่าไอโอดีนจะบอกให้ทราบถึงความไม่อิ่มตัวของกรดไขมันที่มีในน้ำมัน

### 2.1.9. การจำแนกไขมันสัตว์และน้ำมันพืช การแบ่งชนิดของไขมันสัตว์ และน้ำมันพืช ในทางการค้าแบ่งได้เป็น 10 กลุ่มด้วยกัน คือ

2.1.9.1. กลุ่มไขมันนม (Milk fat group) เป็นไขมันที่ได้จากน้ำนมของสัตว์ต่างๆ ที่สำคัญคือไขมันที่ได้จากน้ำนมวัว ในบางท้องถิ่นอาจเป็นน้ำนมกระป๋อง ไขมันในน้ำนมประกอบด้วยกรด oleic ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ กรด palmitic ประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ กรด stearic ประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ ไขมันนมต่างจากไขมันและน้ำมันชนิดอื่น เนื่องจากมีกรดไขมันที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำเป็นจำนวนมากประมาณ 20-25 เปอร์เซ็นต์

2.1.9.2. กลุ่ม lauric (Lauric acid group) น้ำมันที่อยู่ในกลุ่มนี้ได้จากเนื้อในเมล็ดของพืชตระกูล ปาล์ม และมะพร้าว ลักษณะเฉพาะของน้ำมันกลุ่มนี้คือ มีกรด lauric สูง โดยเฉพาะน้ำมันมะพร้าวมีสูงถึง 40 – 50 เปอร์เซ็นต์ และมีกรดไขมันชนิดอื่นที่มีจำนวนคาร์บอน 8 10 14 16 และ 18 เพียงเล็กน้อย มีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว เช่นกรด oleic และกรด linoleic จำนวนเล็กน้อยเช่นกัน ซึ่งเป็นผลดีต่ออายุของการเก็บรักษา ไขมันพวกนี้มักหลอมละลายที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากประกอบด้วยกรดไขมันที่มีจำนวนคาร์บอนน้อย และเป็นน้ำมันที่มีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวอยู่น้อย เมื่อทำให้เป็นสบู่มักมีลักษณะแข็งทนทานต่อการถูกออกซิไดซ์

2.1.9.3 กลุ่มไขมันพืช (Vegetable butter group) เป็นน้ำมันที่ได้จากเมล็ดพืชในเขตร้อน สมบัติทั่วไปคล้ายกลุ่ม lauric acid แตกต่างกันที่มีส่วนประกอบของกรดไขมันที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำน้อยกว่า และถึงแม้จะมีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวที่มีคาร์บอนอะตอม 14 – 18 มากกว่า 50% น้ำมันกลุ่มนี้ยังคงมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวประเภท oleic และ linoleic อยู่ด้วยเช่นกัน ตัวอย่างพืชในกลุ่มนี้ คือ โคโคบัตเทอร์ (cocoa butter) ไขมันในกลุ่มนี้ราคาค่อนข้างแพง และมักใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น ทำช็อกโกแลต ทอฟฟี่ และใช้ในอุตสาหกรรมยา

2.1.9.4. กลุ่มไขมันสัตว์ (Animal fat group) ไขมันจากกลุ่มนี้ได้มาจากสัตว์บกชนิดต่างๆ มีลักษณะเฉพาะ คือ มีกรดไขมัน  $C_{16}$  และ  $C_{18}$  อยู่มาก มีความไม่อิ่มตัวปานกลาง และมักจะมีกรดไขมันที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ เป็นส่วนประกอบอยู่ด้วยจำนวนหนึ่ง เช่น heptadecanic acid ซึ่งมีอยู่ 2% ในไขมันสัตว์ (tallow) แม้ว่าจะมีส่วนเหมือนกับ vegetable butter อยู่บ้าง แต่ก็มีข้อแตกต่างที่ลักษณะโครงสร้างของ ไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) ส่วนใหญ่ไม่นิยมบริโภคแต่ใช้ในอุตสาหกรรมสบู่อการผลิตกรดไขมัน และทำปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (hydrogenation) เพื่อทำน้ำมันหล่อลื่น

2.1.9.5. กลุ่ม Oleic – Linoleic (Oleic – Linoleic acid group) เป็นกลุ่มไขมันที่ใหญ่ที่สุด ได้จากพืชเป็นหลัก มีส่วนประกอบและลักษณะเฉพาะแตกต่างกันมาก แต่มีลักษณะเด่นคือ มีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ เป็นประเภท oleic และ linoleic ภาวะปกติ

เป็นของเหลว ยกเว้นที่อุณหภูมิต่ำ ตัวอย่างน้ำมันพืชในกลุ่มนี้คือ น้ำมันเมล็ดฝ้าย น้ำมันถั่วลิสง น้ำมันมะกอก น้ำมันปาล์ม

2.1.9.6. กลุ่ม Erucic (Erucic acid group) เป็นน้ำมันที่ได้จากมัสตาร์ด และ เมล็ดเรป มีกรดไขมันชนิด erucic เป็นส่วนประกอบหลักประมาณ 40 -55% และมี กรดไขมันชนิดอื่นเพียงเล็กน้อย แหล่งผลิตมาจากจีน อินเดีย ยุโรปตอนกลาง และแคนาดา ซึ่งใช้ในอุตสาหกรรม น้ำมันหล่อลื่น และมีราคาถูก

2.1.9.7. กลุ่ม Linolenic (Linolenic acid group) น้ำมันจากกลุ่มนี้มี linolenic เป็นส่วนประกอบหลัก ได้จากพืชเขตหนาวมีสมบัติพิเศษคือ แห้งเร็ว ทั้งนี้เพราะเมื่อเกิดการออกซิไดซ์จะระเหยกลายเป็นไอ จึงเหมาะที่จะนำมาทำสีไม่นิยมบริโภค ตัวอย่างได้แก่ น้ำมันลินสีด (linseed) และน้ำมันถั่วเหลือง (soybean )

2.1.9.8. กลุ่ม Conjugated (Conjugated acid group) เป็นไขมันที่แตกต่างจากไขมันชนิดอื่น เนื่องจากชนิดไขมันที่เป็นองค์ประกอบซึ่งมี conjugated double bond อยู่ในโมเลกุลน้ำมันที่สำคัญคือ tung oil ประกอบด้วย eleostearic acid ( มีคาร์บอน 18 อะตอม พันธะคู่ 3 พันธะ ) ทำให้เกิดออกซิเดชันและพอลิเมอไรส์ได้ง่าย ใช้ในอุตสาหกรรมสารเคลือบผิว

2.1.9.9. กลุ่มไขมันจากสัตว์ทะเล (Marine animal oil group) กลุ่มไขมันนี้มีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 16 20 และ 22 เป็นส่วนประกอบหลัก และอาจมีพันธะคู่ถึง 6 พันธะ ตัวอย่างได้แก่ น้ำมันตับปลา น้ำมันเหล่านี้มีปัญหาในการเก็บรักษา แต่สามารถนำมาบริโภคได้

2.1.9.10. กลุ่มกรดไฮดรอกซี (Hydroxy acid group ) น้ำมันที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้คือน้ำมันละหุ่ง ซึ่งมีลักษณะพิเศษกว่าน้ำมันชนิดอื่นเนื่องจากประกอบด้วย กรด ricinoleic ปริมาณสูงทำให้ใช้บริโภคหรือทำสบู่ไม่ได้แต่สามารถทำสารเคลือบผิว และน้ำมันหล่อลื่นได้

## 2.1.10. พืชน้ำมันในประเทศไทย

### 2.1.10.1. มะพร้าว

มะพร้าวนิยมบริโภคทั้งผลอ่อนและผลแก่ โดยผลแก่นิยมนำมาทำอาหารทั้งคาวและหวานในรูปของกะทิ สำหรับประเทศไทยมีผลผลิตรวมทั้งประเทศ 1,947,963 ตันต่อปี ใช้ในประเทศประมาณ 1,080 ล้านตัน ส่งออกในรูปมะพร้าวแห้ง 1,566 ตัน คิดเป็นมูลค่า 277 ล้านบาทต่อปี โดยนิยมเพาะปลูกแถบภาคใต้ของไทยคิดเป็นพื้นที่ที่ให้ผลผลิต 1,917,287 ไร่ เนื้อมะพร้าวแห้งนิยมนำมาสกัด โดยมีน้ำมัน 60 – 68% น้ำมันมะพร้าวจะแตกต่างจากน้ำมันพืชส่วนใหญ่คือ มีกรด lauric สูง ซึ่งแข็งตัวได้ง่ายเมื่อมีอากาศเย็น กรดไขมันที่เป็นส่วนประกอบในน้ำมันมะพร้าวส่วนใหญ่จะเป็นชนิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำถึงปานกลาง มีจุดหลอมเหลว 24 – 27

$^{\circ}\text{C}$  และมีจุดแข็งตัวประมาณ  $5^{\circ}\text{C}$  การที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ เนื่องมาจากน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของ triglycerides ต่ำนั่นเอง สมบัติทางกายภาพที่สำคัญของน้ำมันมะพร้าวที่แตกต่างจากน้ำมันทั่วๆ ไป คือ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะเปลี่ยนจากของแข็งไปเป็นของเหลวแบบฉับพลัน ในช่วงอุณหภูมิแคบๆ อันเป็นผลมาจากลักษณะเฉพาะของ triglyceride และกรดไขมันที่เป็นส่วนประกอบ กรดไขมันในน้ำมันมะพร้าวเป็นกรดไขมันชนิดอิ่มตัวถึง 90% ได้แก่ lauric myristic และ palmitic เป็นหลัก โดยจะมีชนิด lauric มากที่สุด ซึ่งกรดไขมันเหล่านี้มีจุดหลอมเหลว 44, 54 และ  $63^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ จะเห็นว่าจุดหลอมเหลวของตัวที่ต่ำสุดจะต่างจากตัวที่สูงสุด  $19^{\circ}\text{C}$  เท่านั้น ในทางตรงข้าม พวกที่มีน้ำหนักโมเลกุลมาก เช่น linoleic oleic และ stearic acid จะมีจุดหลอมเหลว 7, 16, และ  $70^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ จะเห็นว่ามีค่าแตกต่างกัน  $77^{\circ}\text{C}$  การที่น้ำมันมะพร้าวประกอบด้วยกรดไขมันที่มีจุดหลอมเหลวต่างกันไม่มากนักจึงทำให้มีคุณสมบัติดังได้กล่าวมาข้างต้น เมื่อทำการ hydrogenation (เพื่อเปลี่ยนกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวให้เป็นชนิดอิ่มตัว) จุดหลอมเหลวและความหนืดจะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เพราะว่าเมื่อทำการ hydrogenation อย่างสมบูรณ์ก็จะเท่ากับเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของกรดไขมันเพียง 10% เท่านั้น เพราะมีกรดไขมันอิ่มตัวอยู่แล้ว 90 – 94% หลังจากทำ hydrogenation อย่างสมบูรณ์ จุดหลอมเหลวจะประมาณ  $45.1^{\circ}\text{C}$  น้ำมันมะพร้าวมีช่วงการมีคุณสมบัติเหมือนพลาสติก แคบซึ่งเป็นข้อจำกัดของการนำมาใช้เพื่อการบริโภค จึงไม่เหมาะในการนำมาทำ มาร์การีน (margarine) น้ำมันมะพร้าวดิบมักจะมีปริมาณกรดไขมันอิสระสูงกว่าน้ำมันพืชทั่วๆ ไป น้ำมันมะพร้าวที่มีคุณภาพสูงในสหรัฐฯ มักจะกำหนดให้มีปริมาณกรดไขมันอิสระไม่เกิน 3% (คำนวณเป็น oleic acid) แต่โดยทั่วไปมักจะมีปริมาณกรดไขมันอิสระประมาณ 5% ซึ่งสามารถทำให้ลดลงได้ด้วยการทำให้บริสุทธิ์ เมื่อนำน้ำมันมะพร้าวมาทำให้แข็งแล้วกรองโดยใช้ความดันแยกส่วนที่แข็งออกมา จะได้ น้ำมันมะพร้าวสเตียรีน (coconut stearin) ซึ่งจะมีจุดหลอมเหลว  $32^{\circ}\text{C}$  นำมาใช้ทำขนม หรือ ทอफीได้ ส่วนที่เป็นของเหลว หรือ โอเลอิน (olein) จะมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่า จะประกอบด้วยกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัว และชนิดอิ่มตัวที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

#### 2.1.10.2. ปาล์มน้ำมัน

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชที่ขึ้นในเขตร้อนชื้น ดังนั้นจึงเจริญเติบโตได้ดีในภาคใต้ของไทย และบริเวณที่ปลูกมากที่สุดอยู่ที่ จังหวัดกระบี่ สุราษฎร์ธานี ชุมพร สตูลและตรัง ผลปาล์มมีส่วนที่ให้ไขมันสองส่วน คือ เมล็ดใน (kernel) และ เนื้อหุ้มเมล็ด น้ำมันในเมล็ดมีสมบัติคล้ายน้ำมันมะพร้าวคือมีกรด lauric สูง ส่วนน้ำมันปาล์มจากเนื้อหุ้มเมล็ดมีองค์ประกอบคล้ายน้ำมันหมู มีวิตามิน A และ E สูงกว่าน้ำมันพืชชนิดอื่น ผลปาล์มสุกมีเอนไซม์ที่ทำให้เกิดกรดไขมันอิสระในตัวเองสูงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นเมื่อปาล์มสุกตัดจากต้นต้องส่งโรงงานสกัดโดยเร็ว การสกัดน้ำมันปาล์มมีหลายวิธี มีทั้งสกัดจากปาล์มทั้งผล (เนื้อผสมเมล็ด) สกัดเฉพาะเนื้อปาล์มและสกัด

จากเมล็ดใน โดยน้ำมันที่ได้จะมีสมบัติและองค์ประกอบแตกต่างกัน น้ำมันจากเมล็ดในปาล์มมี 44 – 53% ของเมล็ดปาล์มแห้ง มักนำมาใช้ทำสบู่ และผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น มาร์การีนและเนย มีค่าไอโอดีนสูงกว่าน้ำมันมะพร้าว เพราะว่ามีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวเป็นส่วนประกอบมากกว่า และมีกรดไขมันชนิดอิ่มตัวที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น caproic และ caprylic น้อยกว่าน้ำมันมะพร้าว จุดหลอมเหลวจะสูงกว่าน้ำมันมะพร้าว 2 – 3 °C น้ำมันเมล็ดในปาล์มประกอบด้วย triglyceride ชนิด trisaturated 63% disaturated - monounsaturated 26% และ monosaturated - diunsaturated 11% เนื่องจากค่า iodine สูงกว่าน้ำมันมะพร้าว เมื่อทำการ hydrogenation จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพมากกว่า น้ำมันเมล็ดในปาล์มสามารถแยกออกเป็น ส่วนที่เป็นของแข็งและส่วนที่เป็นของเหลวได้ โดยการกรองและกดด้วยความดัน ส่วนที่เป็นของแข็ง เรียกว่า stearin ใช้ทำเนย ส่วนที่เป็นของเหลว เรียกว่า olein ใช้ในการบริโภค และอุตสาหกรรมสบู่

#### 2.1.10.3 ถั่วเหลือง

ถั่วเหลืองเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญ เพราะเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมภายในประเทศหลายชนิด ถั่วเหลืองมีน้ำมันประมาณ 18 – 20 % สกัดโดยวิธีใช้สารละลาย ถ้ากะเทาะเปลือกก่อนสกัด กากที่ได้ใช้ทำอาหารคนได้ เช่นทำเนื้อเทียม (texture vegetable protein) โปรตีนแยกส่วน (protein isolate) และโปรตีนเข้มข้น (protein concentrate) ถ้าสกัดโดยไม่เอาเปลือกออก กากใช้ทำอาหารสัตว์ ปัจจุบันประเทศไทยยังผลิตไม่พอกับความต้องการใช้ภายในประเทศ โดยแหล่งเพาะปลูกหลักอยู่ที่ภาคเหนือคิดเป็นร้อยละ 69.66 ของพื้นที่เพาะปลูกทั้งหมด น้ำมันถั่วเหลืองที่มีคุณภาพดีจะมีสีเหลืองอ่อน ถ้าใช้ถั่วเหลืองที่ยังไม่แก่อาจทำให้น้ำมันมีสีเขียวได้ น้ำมันถั่วเหลืองมีกรดไขมันที่สำคัญคือกรด linoleic อยู่ประมาณ 43-56 % กรด linolenic ประมาณ 5 -11 % และกรดไขมันอิ่มตัวประมาณ 11-26 % ในอดีตน้ำมันถั่วเหลืองไม่นิยมใช้บริโภคเพราะเมื่อได้รับความร้อนจะเกิดกลิ่น ส่วนมากจึงใช้ทำมายองเนส และน้ำสลัด แต่ปัจจุบันนิยมรับประทานมากขึ้นเพราะมีคุณค่าทางอาหารสูง

#### 2.1.10.4 ถั่วลิสง

เมล็ดถั่วลิสงมีน้ำมัน 45 – 55 % น้ำมันมีสีเหลืองซีด มีกลิ่นเฉพาะตัว สกัดโดยวิธีบีบอัด ถ้าบริโภคโดยตรงโดยไม่ผ่านกรรมวิธีกำจัดเชื้อราจะมีโอกาสรับเชื้อ aflatoxin ได้ ประเทศไทยส่งออกในรูปถั่วลิสงคั่วคิดเป็นมูลค่าประมาณปีละ 5 – 6 ล้านบาท แหล่งเพาะปลูกหลักอยู่ที่ภาคเหนือ รองลงมา คือภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดนครราชสีมา น้ำมันถั่วเหลืองประกอบด้วยกรดไขมันอิ่มตัวประมาณ 20 % กรด oleic ประมาณ 55 % กรด linoleic ประมาณ 25 % น้ำมันถั่วเหลืองมีลักษณะคล้ายน้ำมันเมล็ดฝ้าย คือเมื่ออากาศเย็น จะมีบางส่วนเป็นของแข็ง นิยมใช้ในการปรุงอาหาร เนยเทียม และมายองเนส กากใช้เป็นอาหารสัตว์



#### 2.1.10.5. ละหุ่ง

ละหุ่งมีถิ่นกำเนิดมาจากแอฟริกา ขึ้นได้ดีในเขตร้อน ปัจจุบันมีการปลูกทั่วไปทั้งในเอเชีย แอฟริกา และอเมริกาใต้ ทั่วโลกมีพื้นที่ปลูกกว่าล้านไร่ ผลผลิตกว่า 8 แสนตันต่อปี อินเดียและบราซิลเป็นแหล่งผลิตใหญ่ที่สุดในโลก ประเทศไทยมีโรงงานสกัดน้ำมันละหุ่งอยู่ที่จังหวัดสมุทรปราการ แหล่งเพาะปลูกอยู่ทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มีมูลค่าผลผลิตประมาณ 200 ล้านบาทต่อปี เมล็ดละหุ่งเมื่อยังอ่อนจะมีเปลือกหุ้ม 2 ชั้น พอแก่เปลือกชั้นนอกจะหายไป เปลือกชั้นในจะหนาและแข็งขึ้น น้ำมันมีสารที่เป็นพิษต่อการแข็งตัวของเลือด ละหุ่งมีน้ำมัน 46 – 50 % น้ำมันที่สกัดได้มีสีเหลืองอ่อนจนถึงใส ในสมัยสงครามโลกครั้งที่ 2 ใช้้ำมันละหุ่งเป็นน้ำมันหล่อลื่นในเครื่องยนต์ ปัจจุบันนอกจากใช้สำหรับเครื่องยนต์รถจักรยานแล้วยังใช้ทำสี สารเคลือบผิววัสดุ โลชันบำรุงผิว สบู่ น้ำมันใส่ผม ส่วนผสมในน้ำยาฟอกหนัง อุตสาหกรรมสิ่งทอทำให้เส้นใยเงาคัลลายใหม่ ยาฆ่าเชื้อโรค อุตสาหกรรมพลาสติก และน้ำมันเบรค

#### 2.1.11. ไบโอดีเซล [7],[8]

การใช้น้ำมันพืชเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลไม่ใช่แนวคิดใหม่ แต่มีการใช้มาตั้งแต่สมัยสงครามโลกครั้งที่ 2 ซึ่งในขณะนั้นน้ำมันปิโตรเลียมยังคงมีราคาถูก และหาได้ง่ายทำให้เชื้อเพลิงจากน้ำมันพืชไม่ได้รับความสนใจ ต่อมาเกิดวิกฤตการณ์ขาดแคลนน้ำมันในปี ค.ศ. 1971 เชื้อเพลิงจากน้ำมันพืชกลับมาได้รับความสนใจอีกครั้ง ทั้งนี้เพราะเป็นเชื้อเพลิงที่ได้จากแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่สามารถหาได้ตามท้องถิ่นนั้นๆ ในต่างประเทศมีการนำน้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันทานตะวัน และน้ำมันใช้แล้ว มาใช้ทดลองเดินเครื่องยนต์ สำหรับประเทศไทยได้เริ่มทำการวิจัยตั้งแต่ปี พ.ศ. 2524 โดยใช้น้ำมันถั่วลิสง น้ำมันเมล็ดสบู่ดำ น้ำมันมะพร้าว และน้ำมันปาล์ม รวมถึงเอสเทอร์ของน้ำมันปาล์มด้วย แต่เมื่อวิกฤตการณ์น้ำมันผ่านไป ความสนใจในการผลิตเชื้อเพลิงจากน้ำมันพืชก็ลดลง เป็นผลให้ข้อมูลการใช้น้ำมันพืชเป็นเชื้อเพลิงในประเทศไทยมีจำกัด จนกระทั่งเกิดวิกฤตการณ์น้ำมันขึ้นอีกครั้งเมื่อต้นปี พ.ศ. 2544 ไบโอดีเซลเป็นคำที่ทุกคนได้ยินกันอย่างหนาหูมากขึ้นรองลงมาจากแก๊สโซฮอล์ แต่ข้อมูลที่มีอยู่ไม่เพียงพอที่จะให้คำตอบถึงผลกระทบที่มีต่อเครื่องยนต์ในระยะยาวได้ จึงมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อตอบคำถามดังกล่าว ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาสามารถจำแนกวิธีผลิตไบโอดีเซลได้ดังนี้

#### 2.1.12. การผลิตไบโอดีเซล [8]

2.1.12.1. การผสมและใช้โดยตรง ( Blending and Direct use ) เป็นการนำน้ำมันพืชมาใช้โดยตรง หรือนำมาผสมกับน้ำมันดีเซล ซึ่งเริ่มใช้ตั้งแต่ปี 1980 แต่การใช้น้ำมันพืชโดยตรงก่อให้เกิดปัญหาแก่เครื่องยนต์ เนื่องจากน้ำมันพืชมีความหนืดสูงและการระเหยต่ำ

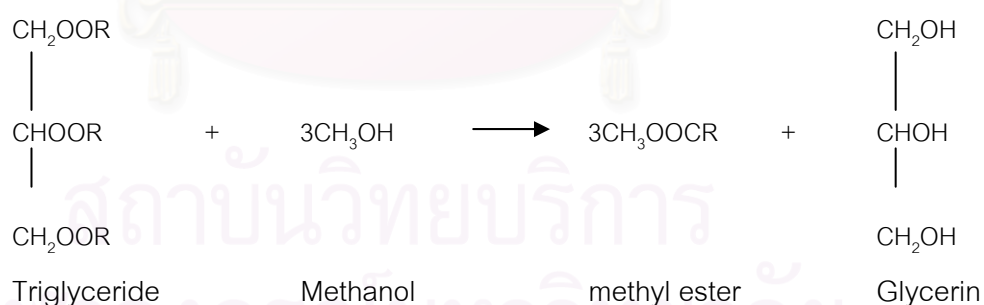
นอกจากนี้ระหว่างเผาไหม้จะเกิดการพอลิเมอไรเซชันได้อย่างเหนียว ซึ่งจะเกาะติดตามเครื่องยนต์ ทำให้เครื่องยนต์เสียหาย

2.1.12.2. การทำเป็นสารคอลลอยด์ (Microemulsion) เป็นการทำให้ของเหลวสองชนิดที่ไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน ให้ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน ได้สารคอลลอยด์ที่เสถียร มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1-150 มิลลิเมตร มีองค์ประกอบเป็น น้ำมันพืช แอลกอฮอล์ สารลดแรงตึงผิว และสารเพิ่มค่าซีเทน (cetane improver)

2.1.12.3. การแตกตัวด้วยความร้อน (Pyrolysis) เป็นการให้ความร้อนเพื่อสลายโมเลกุลของไขมันให้เป็นสารที่มีโมเลกุลเล็กลง เช่น แอลเคน แอลคีน

2.1.12.4. การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification) เป็นกระบวนการเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์ของน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ให้เป็นสารประกอบเอสเทอร์โดยใช้แอลกอฮอล์ที่มีโมเลกุลสั้นในภาวะที่ใช้หรือไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

การผลิตเอสเทอร์มีหลายกระบวนการแต่วิธีที่นิยมมากที่สุด คือการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลมากที่สุดและก่อปัญหาต่อเครื่องยนต์น้อยที่สุดเช่นกัน เอสเทอร์ที่ได้เรียกตามชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ เช่น ถ้าใช้เมทานอล ก็จะได้ fatty acid methyl esters หรือ methyl esters ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide) หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide) นอกจากนี้จะได้เอสเทอร์แล้ว ยังได้กลีเซอรินเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมที่มีคุณค่า ซึ่งจะแยกตัวออกมาด้วยแรงโน้มถ่วง ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ( Transreterification ) [15]

### 2.1.13. ความหมายของไบโอดีเซล [8]

ไบโอดีเซล คือ เชื้อเพลิงใดๆ ที่สามารถใช้แทนน้ำมันดีเซล โดยได้มาจากสารชีวมวล อีกความหมายหนึ่งตามมาตรฐาน ASTM ( American standard Test Method ) คือ โมโนอัลคิลเอสเทอร์ของกรดไขมันที่ได้มาจากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์

### 2.1.14. น้ำมันดีเซล [1]

เครื่องยนต์ดีเซลเป็นเครื่องยนต์แรงอัดสูงและจุดระเบิดเอง (High Compression ,Self Ignition Engine) ซึ่งการจุดระเบิดของเชื้อเพลิงเกิดขึ้นจากความร้อนจากแรงอัดสูงของอากาศในระบบสูบโดยไม่ต้องใช้หัวเทียน วงจรของเครื่องยนต์ประกอบด้วยขั้นตอนการส่งอากาศเข้าไปในห้องเผาไหม้ การอัดอากาศภายในระบบสูบ การฉีดเชื้อเพลิงเป็นฝอยเข้าไปซึ่งเผาไหม้ทันที ก๊าซจากการเผาไหม้ขยายตัว และปล่อยก๊าซจากการเผาไหม้ออกไป เครื่องยนต์ดีเซลมีหลายขนาด อาจแบ่งได้เป็น

2.1.14.1 ชนิดรอบต่ำ คือน้อยกว่า 300 รอบต่อนาที ใช้สำหรับงานหนักต่อเนื่อง โดยมีรอบคงที่ เช่น การขับเคลื่อนเรือเดินทะเล การผลิตกำลังไฟฟ้า เป็นต้น

2.1.14.2 ชนิดรอบปานกลาง คือระหว่าง 300 –1,000 รอบต่อนาที ใช้สำหรับงานที่ค่อนข้างหนักและรอบค่อนข้างคงที่เช่น สถานีผลิตไฟฟ้า สถานีสูบน้ำ เป็นต้น

2.1.14.3.ชนิดรอบสูง คือตั้งแต่ 1,000 รอบต่อนาทีขึ้นไป ใช้สำหรับงานที่มีความเปลี่ยนแปลงบ่อยๆและความเร็วเปลี่ยนแปลงไปมา มากเช่น รถขนส่ง รถบรรทุก และรถไฟ เป็นต้น

### 2.1.15. สมบัติของน้ำมันดีเซล

ความต้องการพื้นฐานของน้ำมันดีเซลคือ ต้องจุดระเบิดได้เองโดยเร็วและเผาไหม้ได้หมดภายใต้ภาวะภายในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ สามารถส่งถ่ายได้ด้วยอุปกรณ์การฉีดน้ำมัน และจะต้องเหมาะสมกับการส่งถ่ายจากโรงกลั่นถึงถังน้ำมันเครื่องยนต์ โดยไม่เสื่อมสภาพและไม่เกิดอันตรายต่อพื้นผิวที่มันสัมผัส สมบัติของน้ำมันดีเซลประกอบด้วย

2.1.15.1 คุณภาพการจุดติดไฟ (Ignition Quality) การจุดระเบิดหรือติดไฟได้เองจะเร็วหรือช้าขึ้นกับประเภทของไฮโดรคาร์บอนที่มีอยู่ในน้ำมัน โดยพาราฟินติดไฟได้เร็วที่สุด ตรงกันข้ามพวกแอโรแมติกจะติดไฟได้ช้าโดยเฉพาะแอโรแมติกที่มีจำนวนวงแหวนมาก การวัดจึงใช้ไฮโดรคาร์บอนสองประเภทดังกล่าวเป็นหลักเรียกว่า ค่าซีเทน

ก. ค่าซีเทน (ASTM D 613) เป็นตัวเลขที่แสดงผลจากการทดสอบน้ำมันดีเซลในเครื่องยนต์ที่ออกแบบมาโดยเฉพาะเพื่อประเมินค่าช่วงเวลารอกว่าที่เริ่มติดไฟ (Ignition Delay) โดยใช้ น้ำมันเชื้อเพลิงอ้างอิงสองชนิดคือ ซีเทน (n – cetane) ให้ค่าซีเทนเท่ากับ 100 และ Heptamethylnonane ให้ค่าซีเทนเท่ากับ 15 โดย

Cetane no. = % n – cetane + (0.15) (%Heptamethylnonane )

ข. ดัชนีซีเทน (ASTM D 976) เนื่องจากค่าซีเทนจำเป็นต้องใช้เครื่องยนต์และเสียเวลามากจึงใช้วิธีคำนวณ (Calculated Cetane Index Formula) แทน ซึ่งประมาณค่าจากค่าความถ่วงจำเพาะและช่วงกลั่นกลางของน้ำมันค่าที่ได้เรียกดัชนีซีเทน ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าซีเทนมากใช้แทนกันได้

#### 2.1.15.2. ค่าเกี่ยวกับการระเหย ( Volatility)

ก. อุณหภูมิการกลั่น (ASTM D 86) น้ำมันควรมีช่วงการกลั่นที่พอเหมาะ มักใช้ค่าอุณหภูมิการกลั่นกลางเป็นตัวบ่งชี้คุณสมบัติรวมๆ แต่ก็ไม่มีข้อกำหนดบังคับไว้สำหรับน้ำมันดีเซลหมุนเร็วจะมีจุด 50 % ประมาณ 300 ° C

ข. จุดวาบไฟ (ASTM D 93) เพื่อความปลอดภัยในการเก็บและส่งถ่าย จะมีการกำหนดจุดวาบไฟต่ำสุดไว้ที่ 660 ° C

#### 2.1.15.3. ค่าเกี่ยวกับการไหล ( Fluidity )

ก. ค่าความหนืด (ASTM D 445) มีผลต่อการทำงานของปั๊มและหัวฉีด เพราะถ้าไหลเกินไปหรือข้นเกินไปจะฉีดเป็นฝอยได้ไม่ดี เป็นผลเสียต่อการเผาไหม้ ทำให้กำลังตกและเกิดควันดำเครื่องยนต์รอบต่ำสามารถใช้น้ำมันที่มีความหนืดสูงกว่าเครื่องยนต์รอบสูง

ข. ค่าจุดไหลเท (ASTM D 97) ต้องมีข้อกำหนดสูงสุดไว้เพื่อให้ น้ำมันไหลเทได้เมื่อต้องการใช้ขณะอุณหภูมิต่ำ

ค. ค่าจุดหมอก (ASTM D 2500) เป็นจุดที่สารพาราฟินจะตกผลึกเป็นขี้ผึ้ง ซึ่งอาจอุดตันไส้กรองน้ำมันได้ สำคัญมากในเขตหนาว ในประเทศไทยไม่มีข้อกำหนดข้อนี้

#### 2.1.15.4. ค่าเกี่ยวกับความสะอาด

ก. สี (ASTM D 1500) ปกติ น้ำมันดีเซลจะมีสีชาอ่อน เพื่อป้องกันการปลอมปน จึงมีข้อกำหนดให้น้ำมันดีเซลหมุนเร็วมีสีไม่เกิน 2.0 ส่วนน้ำมันดีเซลหมุนช้าให้มีสีเข้มมากคือ 4.5 – 7.5 จะได้ไม่นำมาปนกัน

ข. ปริมาณกากถ่าน (ASTM D 189) ปริมาณกากถ่านในน้ำมันอาจเป็นสาเหตุให้เครื่องยนต์และหัวฉีดสกปรก ข้อจำกัดปริมาณกากถ่านเพื่อป้องกันไม่ให้กากน้ำมันติดเข้ามาในน้ำมันดีเซล

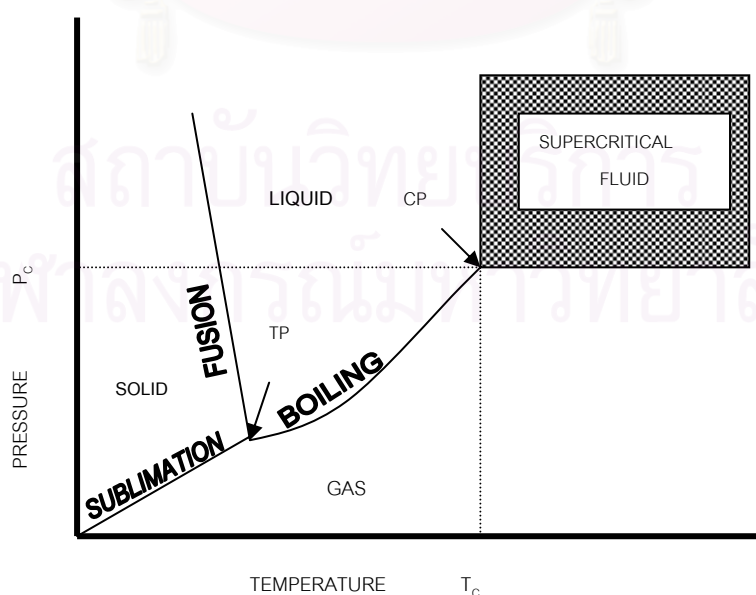
ค. กำมะถัน (ASTM D 129) นอกจากทำให้กัดกร่อนเครื่องยนต์และไอเสียแล้วกำมะถันยังทำให้เกิดมลภาวะทางอากาศเมื่อเผาไหม้ จึงต้องมีข้อกำหนด

ไว้ เครื่องยนต์รอบต่ำจะทนต่อสารประกอบกำมะถันได้สูงกว่าเครื่องยนต์รอบสูง จึงเคร่งครัดเรื่องนี้น้อยกว่า

ง. ค่าอื่นๆ เช่น ค่าเก่า ปริมาณน้ำ จัดเป็นข้อกำหนดเพิ่มเติมในด้าน ความสะอาด

### 2.1.16. ของไหลภาวะเหนือวิกฤต [22]

ของไหลภาวะเหนือวิกฤต (Supercritical Fluids, SCF) หมายถึงสารใด ๆ ในภาวะ ซึ่งจำแนกไม่ได้ว่าเป็นแก๊สหรือของเหลว ภาวะเช่นนี้สามารถอธิบายได้จาก Pressure-temperature Phase Diagram ของสารบริสุทธิ์ใดๆ เช่นตามรูปที่ 2.2 จะแสดงบริเวณที่สารอยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลว และแก๊ส โดยมี Sublimation Line อยู่ระหว่างบริเวณที่สารอยู่ในสถานะของแข็งกับแก๊ส Fusion Line อยู่ระหว่างของแข็งกับของเหลว และ Vapor Pressure Line (Boiling Line) อยู่ระหว่างแก๊สกับของเหลว จุดที่อยู่ระหว่างทั้ง 3 สถานะเรียกว่า Triple Point (TP) และเมื่อพิจารณาถึงแก๊สที่สามารถเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวได้ซึ่งมี 2 วิธีโดยการเพิ่มความดัน หรือลดอุณหภูมิเพื่อลดพลังงานจลน์ ทำให้ระยะทางระหว่างโมเลกุลลดลงเกิดแรงดึงดูดระหว่างกันควบแน่นเป็นของเหลว แต่ที่อุณหภูมิสูงกว่าจุด ๆ หนึ่ง โมเลกุลของแก๊สจะมีพลังงานจลน์มากแม้จะให้ความดันเท่าใดก็ไม่สามารถทำให้แก๊สเกิดการควบแน่นเป็นของเหลวได้ อุณหภูมิสูงสุดที่แก๊สยังสามารถควบแน่นเป็นของเหลวได้เรียกว่าอุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature,  $T_c$ ) และความดันที่จุดนี้จะเรียกว่า ความดันวิกฤต (Critical Pressure,  $P_c$ ) จุดที่มีอุณหภูมิเท่ากับ อุณหภูมิวิกฤต และ ความดันเท่ากับ ความดันวิกฤต เรียกว่า จุดวิกฤต (Critical Point, CP)



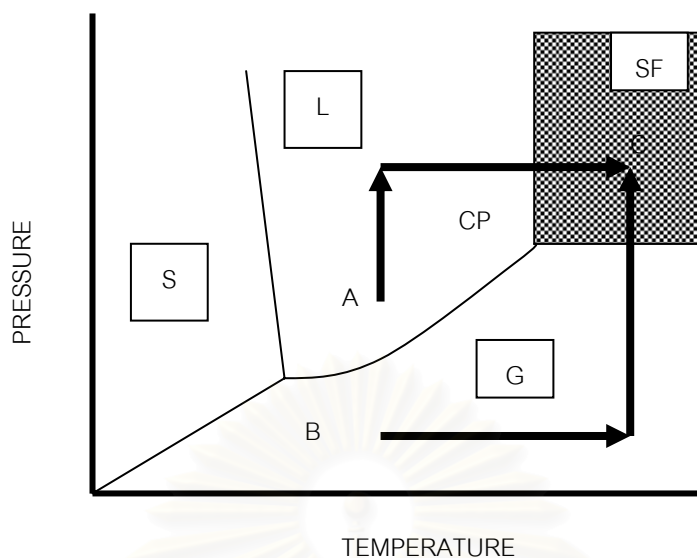
รูปที่ 2.2 เฟสไดอะแกรมของของไหลภาวะเหนือวิกฤต [22]

ที่อุณหภูมิมากกว่า อุณหภูมิวิกฤต และ ความดันมากกว่า ความดันวิกฤต สารจะอยู่ในภาวะที่มีสมบัติจำแนกไม่ได้ว่าเป็นแก๊สหรือของเหลว เรียกสารที่อยู่ในภาวะนี้ว่า ของไหลภาวะเหนือวิกฤต โดยค่าอุณหภูมิวิกฤต และ ความดันวิกฤตของสารต่าง ๆ แสดงไว้ในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 สมบัติวิกฤตของสารชนิดต่าง ๆ [22]

Substance	Critical Temperature(K)	Critical Pressure (MPa)	Critical Density (g/cm <sup>3</sup> )
Methane	190.6	4.60	0.162
Ethylene	282.4	5.03	0.218
Chlorotrifluoromethane	302.0	3.92	0.579
Carbon dioxide	304.2	7.38	0.468
Methanol	512.6	8.09	0.272
Ethanol	516.0	6.40	0.276
Propane	369.8	4.24	0.217
Ammonia	405.6	11.30	0.235
Diethyl ether	467.7	3.64	0.265

ของไหลภาวะเหนือวิกฤตมีสมบัติอยู่ระหว่างแก๊สกับของเหลว ดังแสดงในตารางที่ 2.7 ความหนาแน่นของของไหลภาวะเหนือวิกฤตมีค่าใกล้เคียงกับของเหลว เมื่อนำมาใช้เป็นตัวทำละลาย โมเลกุลของสารที่ต้องการละลายจะถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของ ของไหลภาวะเหนือวิกฤต เกิดอันตรกิริยา (Interaction) กัน ลดพลังงานเอนทัลปี เกิดการละลายได้ดี และขณะเดียวกัน ของไหลภาวะเหนือวิกฤต ก็มีความหนืด และการแพร่กระจาย ใกล้เคียงกับแก๊ส ทำให้สามารถแทรกเข้าไปในโครงสร้างภายในของตัวถูกละลาย (Solute Matrix) ได้ดี ด้วยสมบัติเหล่านี้จึงนำของไหลภาวะเหนือวิกฤตมาใช้เป็นตัวทำละลาย โดยการเกิดของไหลเหนือวิกฤตมีสองเส้นทาง แสดงดังรูปที่ 2.3 เส้นทางแรกเริ่มต้นที่จุด A สารจะอยู่ในสถานะของเหลว ทำการเพิ่มความดันให้สูงกว่าความดันวิกฤตของสารนั้นที่อุณหภูมิคงที่จากนั้นจึงเพิ่มอุณหภูมิให้สูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตที่ความดันคงที่ จนกระทั่งสารนั้นเข้าสู่ภาวะเหนือวิกฤตที่จุด C เส้นทางที่สองเริ่มต้นที่จุด B สารจะอยู่ในสถานะแก๊ส เริ่มให้ความร้อนแก่สารนั้นจนกระทั่งอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตที่ความดันคงที่ ต่อมาเพิ่มความดันให้สูงกว่าความดันวิกฤตของสารนั้นที่อุณหภูมิคงที่



รูปที่ 2.3 เส้นทางการเข้าสู่ภาวะเหนือวิกฤต(จุด C) จากของเหลว(จุด A) และ จากแก๊ส(จุด B) [22]

ตารางที่ 2.7 สมบัติของของไหลภาวะเหนือวิกฤตเปรียบเทียบกับแก๊สและของเหลว [22]

State of Fluid	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Diffusivity (cm <sup>2</sup> /sec)	Viscosity (g/cm sec)
Gas P = 1 atm, T = 15-30°C	(0.6 - 2)×10 <sup>-3</sup>	0.1 - 0.4	(1 - 3)×10 <sup>-4</sup>
Liquid P = 1 atm, T = 15-30°C	0.6 - 1.6	(0.2 - 2)×10 <sup>-5</sup>	(0.2 - 3)×10 <sup>-2</sup>
Supercritical P = P <sub>c</sub> , T = T <sub>c</sub>	0.2 - 0.5	0.7×10 <sup>-3</sup>	(1 - 3)×10 <sup>-4</sup>
P = 4P <sub>c</sub> , T = T <sub>c</sub>	0.4 - 0.9	0.2×10 <sup>-3</sup>	(3 - 9)×10 <sup>-4</sup>

การศึกษการละลายของสารในของไหลภาวะเหนือวิกฤต ครั้งแรกในปี 1879 โดย J.B. Hannay และ J.Hogarth แสดงการละลายของ Methyl Halides ในของไหลภาวะเหนือวิกฤตของเอทานอลและคาร์บอนเตตระคลอไรด์ แต่ไม่ได้รับความสนใจมากนัก มีการศึกษาถึงประโยชน์ของของไหลภาวะเหนือวิกฤตอย่างจริงจังเมื่อไม่นานมานี้เอง ตัวอย่างการศึกษาทางของไหลภาวะเหนือวิกฤตซึ่งลงตีพิมพ์ใน Journal Analytical Chemistry ก่อนปี 1986 มีเพียง 2 เรื่องเท่านั้น แต่ตั้งแต่ปี 1986 จนถึงกลางปี 1989 มีมากถึง 26 เรื่อง เหตุผลสำคัญที่ทำให้ของไหลภาวะเหนือ

วิกฤตได้รับความสนใจได้แก่ การค้นพบว่าตัวทำละลายที่ใช้ในอุตสาหกรรมเป็นอันตรายต่อสุขภาพ ทำลายสิ่งแวดล้อม และแหล่งของตัวทำละลายมีจำกัดลง

ความสามารถในการปรับเปลี่ยนความสามารถในการทำละลายของของไหลภาวะเหนือวิกฤต แสดงให้เห็นได้ชัดเจนในรูปที่ 2.4 เมื่ออุณหภูมิคงที่ที่ 50 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มความดันที่ให้ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant) ของคาร์บอนไดออกไซด์ สามารถเพิ่มขึ้น เทียบความเป็นขั้ว (Polarity) ได้ตั้งแต่เพนเทน (Pentane) จนถึงอะซิโตน (Acetone)

#### 2.1.16.1. สมบัติพื้นฐานสำหรับของไหลภาวะเหนือวิกฤต

##### ก. ความหนาแน่น

ความหนาแน่นของของไหลภาวะเหนือวิกฤตขึ้นกับอุณหภูมิและความดันโดยความหนาแน่นเปลี่ยนแปลงไม่เป็นเชิงเส้นเมื่อเปลี่ยนแปลงความดันที่อุณหภูมิคงที่แสดงดังรูปที่ 2.5 จากรูปความหนาแน่นในภาวะเหนือวิกฤตเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มความดันเพียงเล็กน้อยและมีค่ามากขึ้นบริเวณใกล้จุดวิกฤต

จากกฎของก๊าซอุดมคติสามารถใช้หาความสัมพันธ์ของความดันกับความหนาแน่นที่อุณหภูมิต่างๆได้ดังนี้

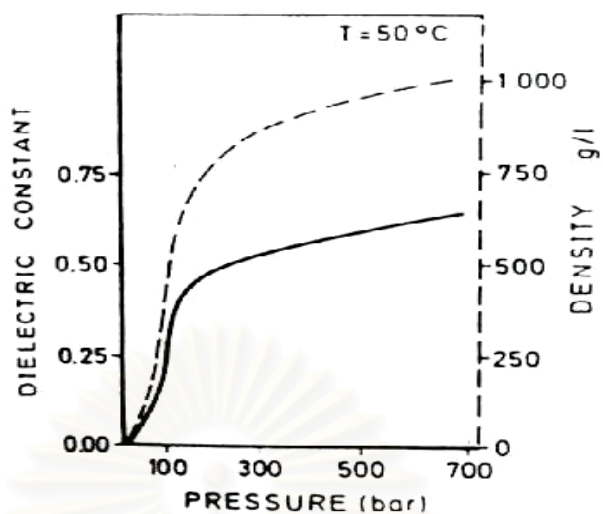
$$PV = znRT \quad (2.1)$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{nMwP}{zRT} \quad (2.2)$$

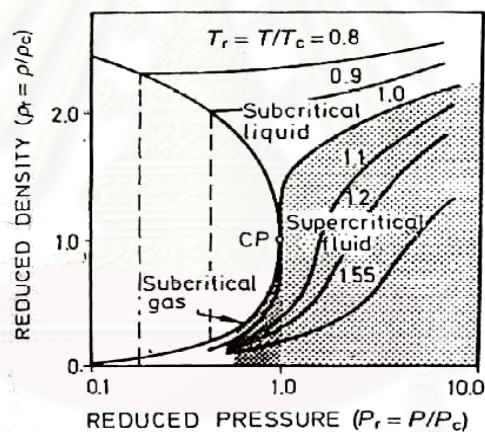
โดย	V	คือ	ปริมาตร
	z	คือ	แฟกเตอร์สภาพอัด (Compressibility factor)
	R	คือ	ค่าคงที่ของแก๊ส
	$\rho$	คือ	ความหนาแน่น
	Mw	คือ	น้ำหนักโมเลกุล

ค่าแฟกเตอร์สภาพอัดสามารถหาได้หลายวิธีแต่วิธีที่สะดวกคือใช้วิธีของ Pitzer โดย  $Z = Z^0 + \omega Z^1$  ซึ่ง  $Z^0$  และ  $Z^1$  ได้จากการเปิดตาราง [3]





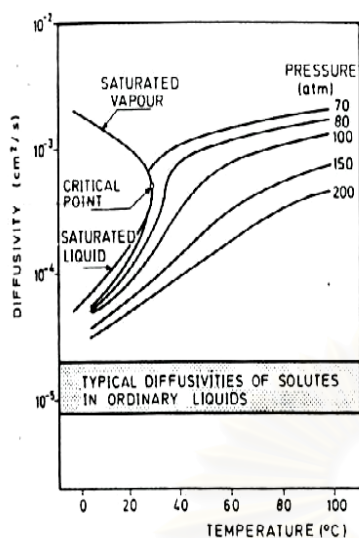
รูปที่ 2.4 ผลของความดันที่มีต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์  
ภาวะเหนือวิกฤต [22]



รูปที่ 2.5 ผลของความดันต่อความหนาแน่นที่อุณหภูมิคงที่ [22]

#### ข. สัมประสิทธิ์การแพร่

จากรูปที่ 2.6 พบว่า สัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวถูกละลายในตัวทำละลายในภาวะเหนือวิกฤตมีค่ามากกว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวถูกละลายในตัวทำละลายที่เป็นของเหลว ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ลดลงเมื่อความดันเพิ่มขึ้น แต่จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ

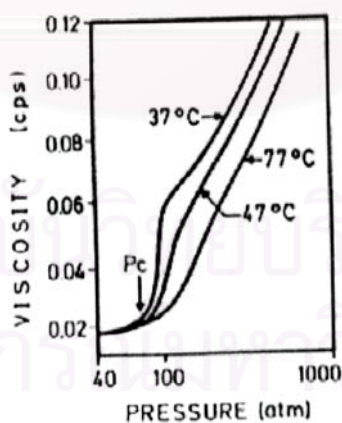


รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ความดันคงที่ [22]

### ค. ความหนืด

ความหนืดของแก๊ส ของเหลว และของไหลภาวะเหนือวิกฤตขึ้นกับอุณหภูมิซึ่งความดันมีผลเพียงเล็กน้อยต่อความหนืดของของเหลว สำหรับของไหลภาวะเหนือวิกฤตเมื่อเพิ่มความดันความหนืดจะเพิ่มขึ้นด้วยแสดงดังรูปที่

2.7



รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ [22]

### ง. ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพันธ์กับความสามารถในการละลาย (solubility) ของของไหล เช่น น้ำมีค่าไดอิเล็กทริกลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและลดความดัน ส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าสถิต (electrostatic potential) ระหว่าง

ไอออนลดลงทำให้ไอออนเป็นอิสระจากไอออนคู่ควบ ดังนั้นภายใต้ภาวะนี้ น้ำจะประพฤติตัวเป็นตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่นเดียวกับตัวทำละลายชนิดอื่นซึ่งในภาวะปกติประพฤติตัวเป็นตัวทำละลายที่มีขั้วแต่เมื่ออยู่ในภาวะนี้จะประพฤติตัวเป็นตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วเช่นเดียวกับน้ำดังรูปที่ 2.4

#### 2.1.16.2. สมบัติของของไหลภาวะเหนือวิกฤต

ก.สมบัติการถ่ายโอน (Transport Properties) จากการที่ของไหลภาวะเหนือวิกฤตมีความหนืดต่ำและสัมประสิทธิ์การแพร่สูงทำให้สามารถกระจายตัวได้อย่างทั่วถึง สามารถแทรกซึม (penetrate) เข้าไปในโครงสร้างภายในของตัวถูกละลายได้ดี ทำให้ตัวถูกละลายที่ละลายเข้าไปในของไหลภาวะเหนือวิกฤตกระจายออกจากบริเวณที่เกิดการสกัดไปบริเวณอื่นได้ง่าย คือมีอัตราการถ่ายโอนมวลดี ส่งผลให้ของไหลภาวะเหนือวิกฤต เป็นตัวทำละลายที่ดี อย่างไรก็ตาม ความหนืด และสัมประสิทธิ์การแพร่ของของไหลภาวะเหนือวิกฤต มีความสัมพันธ์กับปัจจัยหลายประการเช่น อุณหภูมิ ความดัน และชนิดของของไหลภาวะเหนือวิกฤต จึงต้องมีการปรับภาวะให้เหมาะสมเพื่อให้สกัดสารที่ต้องการได้ดีที่สุดและมีสารที่ไม่ต้องการปนออกมาน้อยที่สุด อัตราเร็วของการถ่ายโอนมวล นอกจากเป็นผลโดยตรงจากความหนืดและความสามารถในการแพร่ของของไหลภาวะเหนือวิกฤตแล้ว ยังขึ้นกับ Diffusion Distance และ Diffusion Barriers ซึ่งเป็นปัจจัยจากโครงสร้างภายในของตัวถูกละลาย

ข. ความสามารถในการทำละลาย (Solvent Power) เป็นสมบัติเด่นประการหนึ่งของของไหลภาวะเหนือวิกฤต ที่เหนือกว่าตัวทำละลายที่เป็นของเหลวทั่วไป เนื่องจากสามารถปรับให้มีค่ามากหรือน้อยได้ง่ายกว่า โดยการปรับภาวะของของไหลภาวะเหนือวิกฤตประการแรกคืออุณหภูมิโดยทั่วไป การเพิ่มอุณหภูมิให้กับตัวทำละลายที่เป็นของเหลว จะทำให้มีการละลายเพิ่มขึ้น แต่ในของไหลภาวะเหนือวิกฤต การเพิ่มอุณหภูมิ จะก่อให้เกิดผล 2 ประการที่ขัดแย้งกัน

1. เพิ่มการละลายของตัวถูกละลาย

2. ลดความหนาแน่น ทำให้โมเลกุลของของไหลภาวะเหนือวิกฤตกับตัวถูกละลายอยู่ห่างกัน การละลายของตัวถูกละลายจึงลดลง

ผลรวมของสิ่งที่ขัดแย้งกัน 2 ประการนี้คือความสามารถในการทำละลายของของไหลภาวะเหนือวิกฤต ซึ่งข้อขัดแย้งในประการที่สอง สามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่มความดันให้กับของไหลภาวะเหนือวิกฤต เพื่อคงสภาพความ

หนาแน่นให้ใกล้เคียงกับภาวะเดิมก่อนที่จะมีการเพิ่มอุณหภูมิ กล่าวโดยสรุปคือ ตัวแปรที่มีผลโดยตรงต่อความสามารถในการละลาย คือ อุณหภูมิและความหนาแน่น และความดันจะมีผลทางอ้อม โดยส่งผ่านความหนาแน่น

ตารางที่ 2.8 ข้อดีและข้อเสียของของไหลภาวะเหนือวิกฤตที่ใช้กันทั่วไปมากที่สุด

[22]

Properties	Inorganic				Organic		
	CO <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O <sup>a</sup>	N <sub>2</sub> O	CFCs	HC	MeOH
Toxicity	+	-	+		+	+	-
Inflammability	+	-	+		+	-	-
Cost	+	-	+		+	+	-
Reactivity	+	-	-	-	+	+	-
Ease of reaching supercritical conditions	+	-	-	+	+	+	-
Environmental aggressiveness	+		+		-		
Gaseous under ambient conditions	+		-	+	+	+	-
Compatibility with detector	+					-	
Polarity	-	+		+	+	-	+

หมายเหตุ

+ ข้อดีของของไหลภาวะเหนือวิกฤต

- ข้อเสียของของไหลภาวะเหนือวิกฤต

<sup>a</sup> Not used as extracting fluid.

CFCs = chlorofluorocarbons ; HC = hydrocarbons ; MeOH = methanol.

ค. สมบัติการเลือก(Selectivity Properties) เป็นสมบัติของของไหลภาวะเหนือวิกฤต ที่สามารถปรับอุณหภูมิ และความดัน เพื่อให้มีความสามารถในการทำละลาย ที่เหมาะสมเฉพาะกับสารที่ต้องการสกัดให้มีการ

สกัดที่มากที่สุด โดยที่มีสารที่ไม่ต้องการปนออกมาน้อยที่สุด จากการที่ของไหลภาวะเหนือวิกฤตมีสมบัติการเลือกค่อนข้างดี ยังสามารถนำมาใช้ในการสกัดแบบ Fractionated Extraction ภาวะที่ใช้จะเริ่มต้นจากบริเวณจุดวิกฤตแล้วค่อยๆเพิ่มอุณหภูมิและความดัน ด้วยเทคนิคนี้ สามารถสกัดแยกสารออกเป็นส่วนต่างๆ เช่น การสกัดพริกไทย แยกเป็น ส่วนที่ให้รสเผ็ด และ ส่วนที่ให้กลิ่นหอม เป็นต้น

### 2.1.16.3. ประโยชน์ของของไหลภาวะเหนือวิกฤต

แม้ว่าของไหลภาวะเหนือวิกฤตจะเป็นที่รู้จักกันมานานแล้ว แต่การนำมาใช้ประโยชน์เพิ่งเริ่มแพร่หลายเมื่อไม่นานมานี้เอง โดยข้อดีและข้อเสียของของไหลภาวะเหนือวิกฤตแสดงดังตารางที่ 2.8 และสามารถสรุปประโยชน์ของของไหลภาวะเหนือวิกฤตได้ดังนี้

ก. ใช้เป็นตัวทำละลายในงานสกัด (Supercritical Fluid Extraction) ทั้งงานสกัดเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์จำนวนมาก ๆ และที่ได้รับการพัฒนาค่อนข้างมากคืองานสกัดในปริมาณน้อย ๆ จุดประสงค์เพื่อนำสารสกัดไปวิเคราะห์ต่อไป

ข. ใช้เป็นเฟสเคลื่อนที่ในงานวิเคราะห์ด้วยเทคนิค โครมาโทกราฟี (Supercritical Fluid Chromatography)

### 2.1.17. การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เคมี [2]

ในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ ต้องใช้ข้อมูล ความรู้ และประสบการณ์จากหลายเรื่อง คือ เทอร์โมไดนามิกส์ จลนพลศาสตร์เคมี กลศาสตร์ของไหล การถ่ายโอนความร้อน การถ่ายโอนมวลสาร และเศรษฐศาสตร์ การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เคมีมีปัญหา 2 ปัญหาที่จะต้องหาคำตอบคือ

ก. มีการเปลี่ยนแปลงใดที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

ข. การเปลี่ยนนั้นๆ เกิดเร็วเพียงใด

ปัญหาแรกเกี่ยวข้องกับเทอร์โมไดนามิกส์ ปัญหาที่สองเกี่ยวข้องกับกระบวนการอัตราเร็วต่างๆ เช่น จลนพลศาสตร์เคมี การถ่ายโอนความร้อน การถ่ายโอนมวลสาร ฯลฯ การเชื่อมโยงเรื่องเหล่านี้เข้าด้วยกัน และพยายามหาความสัมพันธ์ของกระบวนการเหล่านี้เป็นเรื่องที่ยุงยากมากที่สุดทีเดียว ดังนั้น ควรจะเริ่มต้นด้วยสถานการณ์ที่ง่ายที่สุดเสียก่อน และเพิ่มการพิจารณาขึ้น โดยคำนึงถึงปัจจัยอื่นๆ เพิ่มเติม จนสามารถแก้ปัญหาที่ยุงยากมากขึ้นได้ในที่สุด

การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เคมี สิ่งแรกที่ต้องพิจารณา คือ สมการซึ่งอธิบายอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาเคมี เรียกสมการนั้นว่า สมการอัตราเร็ว (rate equation) ซึ่งอาจหาได้โดยรูปแบบทางทฤษฎี (theoretical models) หรือถ้าไม่มีรูปแบบที่น่าพอใจ ก็หันไปหาสมการแทนข้อมูลการทดลองโดยลำดับ สมการนี้ใช้หาอัตราเร็วการเปลี่ยนแปลงของสารใดๆ ณ

เวลาใดเวลาหนึ่ง สมการเหล่านี้ช่วยหาขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ที่จำเป็นในการผลิตผลิตภัณฑ์ให้ได้ปริมาณตามที่ต้องการ

เครื่องปฏิกรณ์เคมีแบ่งออกได้เป็นกลุ่มใหญ่ๆ 2 กลุ่มด้วยกัน คือ

1. แบ่งตามลักษณะของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น ซึ่งแบ่งได้เป็น เครื่องปฏิกรณ์เคมีสำหรับปฏิกิริยาเนื้อเดียวกัน (homogeneous reactor) และเครื่องปฏิกรณ์สำหรับปฏิกิริยาเนื้อผสม (heterogeneous reactor)

2. แบ่งตามลักษณะการไหลของของไหล ซึ่งแบ่งได้เป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบไม่ต่อเนื่อง (batch reactor) เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง (steady-state flow reactor) และแบบผสม (unsteady-state flow or semibatch reactor)

โดยหลักการแล้วจะศึกษาลักษณะการปฏิบัติงานของเครื่องปฏิกรณ์หนึ่งๆ ได้ ถ้าทราบสิ่งต่อไปนี้

อัตราเร็วในการถ่ายโอนความร้อนของของไหลที่ทำปฏิกิริยา ลักษณะการถ่ายโอนมวลสาร และอัตราเร็วของปฏิกิริยา

ขีดจำกัดภายนอกที่เกิดจากการติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์ เช่น แบบของเครื่องปฏิกรณ์ รูปทรงของเครื่องปฏิกรณ์ (ซึ่งมีผลต่อการไหล และแบบของการผสมกัน) และความสามารถในการกำจัดความร้อนออก

จุดเริ่มต้นสำหรับการออกแบบทั้งหมด คือ ดุลมวลสาร ( 2.3 ) ที่แสดงสำหรับสารที่เข้าทำปฏิกิริยา สำหรับหน่วยปริมาตรหนึ่งๆ จะมีสมการดังนี้

$$\left( \begin{array}{l} \text{อัตราเร็วของ} \\ \text{ตัวทำปฏิกิริยา} \\ \text{ที่ไหลเข้าไป} \\ \text{หน่วยปริมาตร} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{l} \text{อัตราเร็วของ} \\ \text{ตัวทำปฏิกิริยา} \\ \text{ที่ไหลออกจาก} \\ \text{หน่วยปริมาตร} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{l} \text{อัตราเร็วของตัว} \\ \text{ทำปฏิกิริยาที่สูญเสียไปเนื่องจาก} \\ \text{ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{l} \text{อัตราเร็วของการ} \\ \text{สะสมของตัวทำ} \\ \text{ปฏิกิริยาใน} \\ \text{หน่วยปริมาตร} \end{array} \right) \quad (2.3)$$

สำหรับการปฏิบัติการที่อุณหภูมิไม่คงที่ (nonisothermal) ต้องใช้ดุลความร้อนร่วมกับดุลมวลสาร แสดงดังสมการ 2.4 ดังนี้

$$\left( \begin{array}{l} \text{อัตราเร็วของความ} \\ \text{ร้อนที่ไหลเข้าไป} \\ \text{ในหน่วยปริมาตร} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{l} \text{อัตราเร็วของความ} \\ \text{ร้อนที่ไหลออกจาก} \\ \text{หน่วยปริมาตร} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{l} \text{อัตราเร็วการหายไป} \\ \text{ของความร้อนจาก} \\ \text{ผลปฏิกิริยาเคมี} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{l} \text{อัตราเร็วของการ} \\ \text{สะสมของความร้อน} \\ \text{ในหน่วยปริมาตร} \end{array} \right) \quad (2.4)$$

เมื่อใช้ทั้งดุลมวลสาร และดุลความร้อนก็จะได้สมการที่แสดงอัตราเร็วของปฏิกิริยาและผลของความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยานี้

2.1.17.1 จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเนื้อเดียวกัน (kinetics of homogeneous reactions)

สำหรับปฏิกิริยาเนื้อเดียวกัน สารที่เข้าทำปฏิกิริยาทั้งหมดจะอยู่ในเนื้อ (phase) เดียวกัน คือ เป็นแก๊ส ของเหลว หรือของแข็ง และถ้าปฏิกิริยาเป็นแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยานั้นก็ต้องอยู่ในเนื้อเดียวกันกับสารที่เข้าทำปฏิกิริยา และผลิตภัณฑ์ด้วย อัตราเร็วของปฏิกิริยา สำหรับสาร A ที่เข้าทำปฏิกิริยาใดๆ เป็นดังนี้

$$r_A = \frac{1}{V} \frac{d}{dt} N_A = \frac{1}{V} \frac{d}{dt} (C_A V) \quad (2.5)$$

$$= \frac{\text{(โมล A ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา)}}{\text{(หน่วยปริมาตร) (หน่วยเวลา)}}$$

จากคำจำกัดความนี้ ถ้า A เป็นผลิตภัณฑ์ (product) อัตราเร็วจะเป็นบวก และถ้าเป็นสารที่เข้าทำปฏิกิริยา (reactant) ซึ่งถูกใช้ไปอัตราเร็วจะเป็นลบ

ตัวแปรที่มีผลต่อปฏิกิริยาจำพวกนี้ คือ องค์ประกอบของสารภายในเนื้อเดียวกัน อุณหภูมิ และความดันของระบบ จะเขียนสมการอัตราเร็วของปฏิกิริยาของสาร A ได้เป็น

$$r_A = \text{ฟังก์ชัน (องค์ประกอบ, อุณหภูมิ, ความดัน)} \quad (2.6)$$

การหาสมการอัตราเร็วโดยทั่วไปมี 2 ขั้นตอน คือหาเทอมที่ขึ้นกับความเข้มข้น โดยกำหนดอุณหภูมิคงที่ และหาเทอมที่ขึ้นกับอุณหภูมิ โดยกำหนดความเข้มข้นคงที่

เครื่องปฏิกรณ์แบบไม่ต่อเนื่อง เป็นเครื่องมือค่อนข้างง่าย เหมาะสำหรับการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเนื้อเดียว โดยตรวจสอบผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาที่เวลาต่างๆ ในการทดลองมักปฏิบัติที่อุณหภูมิคงที่ และปริมาตรคงที่ เพื่อให้การแปลความหมายผลที่ได้จากการทดลองง่ายขึ้น จะสามารถติดตามความก้าวหน้าของปฏิกิริยาได้โดยวิธีหนึ่งในหลายวิธีต่อไปนี้

1. ติดตามความเข้มข้นของสารที่กำหนดไว้ชนิดหนึ่ง

2. ติดตามการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพบางอย่างของระบบ เช่น สัมประสิทธิ์การนำไฟฟ้า หรือดรรชนีหักเหแสง เป็นต้น
3. ติดตามการเปลี่ยนแปลงของความดันทั้งหมดของระบบที่มีปริมาตรคงที่
4. ติดตามการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรของระบบที่มีความดันคงที่ เครื่องปฏิกรณ์แบบไม่ต่อเนื่อง เมื่อกล่าวถึงเครื่องปฏิกรณ์แบบไม่ต่อเนื่องที่มีปริมาตรคงที่ หมายถึง ปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ที่ถูกครอบครองโดยสารผสมที่ทำปฏิกิริยากัน ดังนั้น จึงหมายถึงปฏิกิริยาที่มีความหนาแน่นคงที่ เช่น ปฏิกิริยาในสถานะของเหลว หรือในสถานะแก๊สที่เกิดในบอมบ์ที่มีปริมาตรคงที่ที่จัดอยู่ในกรณีนี้

ในระบบที่มีปริมาตรคงที่ การวัดอัตราเร็วของปฏิกิริยาจะง่ายขึ้นเป็น

$$r_A = \frac{1}{V} \frac{d}{dt} N_A = \frac{1}{V} \frac{d}{dt} (C_A V) = \frac{\frac{1}{V} C_A dV + V dC_A}{dt} = \frac{d}{dt} C_A \quad (2.7)$$

ดังนั้น สมการการออกแบบโดยทั่วไป คือ

$$V(-r_A) = \frac{d}{dt} C_A \quad (2.8)$$

และสำหรับแก๊สอุดมคติ

$$r = \frac{1}{RT} \frac{d}{dt} P_A \quad (2.9)$$

การวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลองเพื่อหาสมการอัตราเร็วในเทอมของความเข้มข้นมี 2 วิธี คือ

ก. วิเคราะห์ข้อมูลแบบอินทิกรัล [2] สรุปวิธีการได้ดังนี้

1. ตั้งสมมติฐานกลไกของปฏิกิริยาและหาสมการอัตราเร็วที่สอดคล้องกัน เขียนสมการสำหรับการหายไปของ reactant A ในระบบที่มีปริมาตรคงที่ ซึ่งจะอยู่ในรูปแบบต่อไปนี้



$$-r_A = -\frac{d}{dt}C_A = f(kC_A) \quad (2.10)$$

ซึ่งอาจจะแยกเทอมที่ขึ้นกับความเข้มข้นออกจากเทอมที่ไม่ขึ้นกับความเข้มข้นได้ ดังนี้

$$-r_A = -\frac{d}{dt}C_A = kf(C_A) \quad (2.11)$$

2. จัดเรียงสมการใหม่ได้เป็น

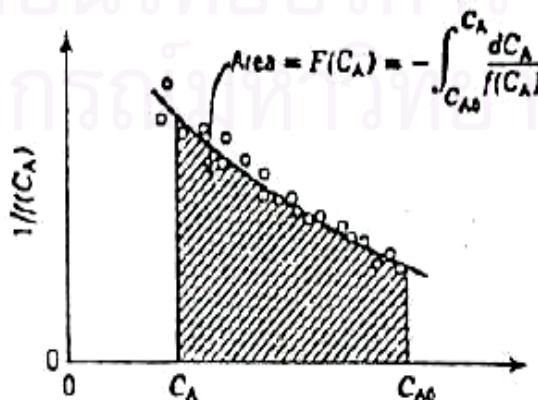
$$-\frac{d}{f(C_A)}C_A = kdt \quad (2.12)$$

ขณะนี้  $f(C_A)$  เกี่ยวข้องกับความเข้มข้นของสารเท่านั้น ซึ่งอาจจะแสดงในรูปของ  $C_A$  ได้ ดังนั้นจะอินทิเกรตได้

$$-\int_{C_{A0}}^{C_A} \frac{d}{f(C_A)}C_A = F(C_A) = k \int_0^t dt = kt \quad (2.13)$$

3. จากค่าของความเข้มข้นของสารที่ได้จากการทดลองหาค่าของ  $F(C_A)$

ที่เวลาต่างๆ สำหรับเทอม  $-\int_{C_{A0}}^{C_A} \frac{d}{f(C_A)}C_A$  อาจจะหาโดยใช้วิธีกราฟช่วย วิธีการ คือ การหาพื้นที่ใต้กราฟที่ พล็อตระหว่าง  $\frac{1}{f(C_A)}$  กับ  $C_A$  จะได้ค่า  $F(C_A)$  ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 อินทิเกรชันของสมการอัตราเร็วโดยการเขียนกราฟ [33]

4. เขียนกราฟ  $F(C_A)$  กับ  $t$  และดูว่าให้เส้นตรงหรือไม่ ถ้าได้เส้นตรงก็แสดงว่า กลไกที่ได้เลือกไว้สอดคล้องกับข้อมูล

5. ถ้าข้อมูลไม่อยู่บนเส้นตรง ก็ต้องเลือกกลไกใหม่จนได้กราฟเส้นตรง  
ในการอินทิเกรตสมการอัตราเร็ว นิยมใช้ fractional conversion (หรือเรียกง่ายๆ ว่า conversion) แทนความเข้มข้น เพราะสะดวกต่อการใช้ในงานทางอุตสาหกรรม มีความหมายเป็นสัดส่วนของตัวทำปฏิกิริยาที่เปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ หรือ

$$N_A = N_{A_0} (1 - X_A) \quad (2.14)$$

$$\text{และจาก } C_A = \frac{N_A}{V} = \frac{N_{A_0} (1 - X_A)}{V} = C_{A_0} (1 - X_A) \quad (2.15)$$

$$\text{นั่นคือ fractional conversion } X_A = \frac{C_{A_0} - C_A}{C_{A_0}} \quad (2.16)$$

ข. วิเคราะห์ข้อมูลแบบดิฟเฟอเรนเชียล [2] สรุปวิธีการได้ดังนี้

1. ตั้งสมมติฐาน กลไกปฏิกิริยา แล้วหาสมการอัตราเร็วจากกลไกนั้น เช่นเดียวกับการวิเคราะห์อินทิกรัลจะอยู่ในรูปแบบ

$$-r_A = \frac{d}{dt} C_A = f(kC_A) \quad (2.17)$$

$$\text{หรือ} \quad -r_A = \frac{d}{dt} C_A = kf(C_A) \quad (2.18)$$

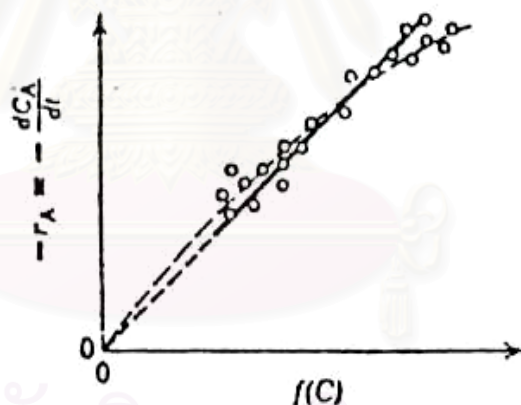
2. จากกราฟความเข้มข้น เวลา จากการทดลอง หา  $-\left(\frac{d}{dt} C_A\right)$  ที่เวลาต่างๆ

3. ที่ช่วงเวลาที่เลือกเอาไว้ทำตารางแสดงความเข้มข้นของ reactants และ products ต่างๆ เช่นเดียวกับ  $-\left(\frac{d}{dt}C_A\right)$  จากค่าเหล่านี้ หาค่าของฟังก์ชัน  $f(C_A)$  และแสดงไว้ในตาราง

4. เขียนกราฟ  $-\left(\frac{d}{dt}C_A\right)$  กับ  $f(C_A)$  ถ้าได้เส้นตรงผ่านจุดกำเนิด สมการอัตราเร็วก็สอดคล้องกับข้อมูล ดังนั้น กลไกที่ใช้หาอัตราเร็วนั้นถูกต้อง แสดงดังรูปที่ 2.9

5. ถ้าไม่ได้เส้นตรงผ่านจุดกำเนิด ก็ควรจะพิจารณากลไกอันใหม่

ได้สรุปสมการที่อินทิเกรตได้จากสมการอัตราเร็วต่างๆกัน แสดงไว้ในตารางที่ 2.9



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
รูปที่ 2.9 การทดสอบสมการอัตราเร็วโดยวิธีวิเคราะห์แบบดิฟเฟอเรนเชียล [33]

ตารางที่ 2.9 แสดงสมการอินทิเกรชันของปฏิกิริยาอันดับต่างๆ [33]

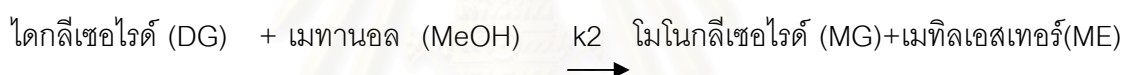
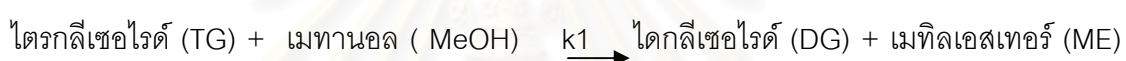
ปฏิกิริยา	Differential equation	Integrated equation
$A \rightarrow P$	$(-r_A) = k_c C_A$	$t = \frac{1}{k_c} \ln \left[ \frac{1}{1 - X_A} \right] = \ln \frac{C_{A0}}{C_A}$
$2A \rightarrow P$	$(-r_A) = k_c C_A^2$	$t = \frac{1}{k_c C_{A0}} \left[ \frac{X_A}{1 - X_A} \right]$
$A + B \rightarrow P$ $M_{BA} \neq 1$	$(-r_A) = k_c C_A C_B$	$t = \frac{1}{k_c C_{A0} (M_{BA} - 1)} \ln \left[ \frac{M_{BA} - X_A}{M_{BA} (1 - X_A)} \right]$
$A + B \rightarrow P$ $M_{BA} = 1$	$(-r_A) = k_c C_A C_B$	$t = \frac{1}{k_c C_{A0}} \left[ \frac{X_A}{1 - X_A} \right]$
$A + 2B \rightarrow P$ $M_{BA} = 2$	$(-r_A) = k_c C_A C_B$	$t = \frac{1}{2k_c C_{A0}} \left[ \frac{X_A}{1 - X_A} \right]$

## 2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

H.Noureddini , D.Harkey and V.Medikonduru (1998) [9] ศึกษาการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยกระบวนการแบบต่อเนื่องในระดับย่อส่วน (pilot plant) ซึ่งทำการศึกษาผลของการผสมโดยใช้เครื่องผสมแบบ high – shear mixing ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา และอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันพืชต่อเมทานอล จากการศึกษาพบว่า เมื่อความเร็วรอบของเครื่องผสมเพิ่มขึ้นปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเพิ่มขึ้นตามจนถึงระดับหนึ่งปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเริ่มลดลง ที่เป็นเช่นนี้เพราะที่ความเร็วรอบสูงจะเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้ ดังนั้นความเร็วรอบที่เหมาะสมคือ 900 รอบต่อนาทีทั้งนี้จำเป็นต้องใช้เครื่องผสมแบบ motionless mixing ร่วมด้วย โดยเครื่องผสมชนิดนี้มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกภายในมีโพลีเมอร์บรรจุอยู่ซึ่งจะขวางการไหลของของไหลทำให้น้ำมันพืชกับเมทานอลผสมกันก่อนเข้าเครื่องให้ความร้อน เบื้องต้นและเครื่องผสมแบบ high – shear mixing ต่อไป สำหรับการศึกษาค้นคว้าผลของความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา ทดลองโดยกำหนดให้ความเร็วรอบคงที่ที่ 900 รอบต่อนาที และอัตราการไหลของสารตั้งต้นเป็น 0.3 ลิตรต่อนาที จากการศึกษาพบว่า ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่

เหมาะสมคือ ร้อยละ 0.4 โดยน้ำหนัก ถ้าใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามากกว่านี้ชั้นเมทิลเอสเทอร์จะละลายในชั้นของกลีเซอรอลมากขึ้น ซึ่งปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้จะลดลง สุดท้ายเป็นผลของอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันพืชต่อเมทานอล พบว่าอัตราส่วนโดยโมล 1 : 8 ให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์มากกว่าอัตราส่วนโดยโมล 1:6 ที่อุณหภูมิและเวลาเดียวกัน แต่ที่อัตราส่วนโดยโมลสูงกลีเซอรอลจะแยกออกมาช้ากว่า

M.Diasakou , A.Louloudi and N.Papayannakos (1998 ) [10] ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันถั่วเหลืองกับเมทานอลในภาวะปราศจากตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 200 และ 235 องศาเซลเซียส ทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชเพื่อศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาที่อัตราส่วนต่างๆ แล้วนำข้อมูลจากการทดลองมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ โดยกลไกการเกิดปฏิกิริยาเป็นดังนี้คือ



สมมติให้แต่ละขั้นตอนเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งและไม่ย้อนกลับซึ่งจะได้สมการอัตราเร็วดังนี้

$$\frac{dC_{TG}}{dt} = -k_1 C_{TG} C_{MeOH}$$

$$\frac{dC_{DG}}{dt} = k_1 C_{TG} C_{MeOH} - k_2 C_{DG} C_{MeOH}$$

$$\frac{dC_{MG}}{dt} = k_2 C_{DG} C_{MeOH} - k_3 C_{MG} C_{MeOH}$$

โดย  $k_1$ ,  $k_2$  และ  $k_3$  เป็นค่าคงที่อัตราเร็วและในการศึกษาจะทำการวัดปริมาณองค์ประกอบที่มีในผลิตภัณฑ์ทั้งหมดซึ่งประกอบด้วย ไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมนอกลิเซอไรด์และเมทิลเอสเทอร์ จากการทดลองพบว่า  $k_1$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นโดยมีค่าใกล้เคียงกับ  $k_2$  ในขณะที่  $k_3$  มีค่าต่ำกว่าทั้งสองค่า ทั้งนี้เพราะโมนอกลิเซอไรด์เปลี่ยนเป็นเมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอลช้ามาก จึงสรุปได้ว่าการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในภาวะปราศจาก

ตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถทำได้โดยการติดตามการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นขององค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นได้

D.Darnoko and Munir Cheryan(2000) [11] ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันระหว่างน้ำมันปาล์มกับเมทานอลโดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทดลองโดยใช้กระบวนการแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 50 ถึง 60 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันพืชต่อเมทานอลเป็น 1 : 6 ทดลองจนเกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ ผลการทดลองพบว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและเป็นปฏิกิริยาอันดับสอง โดยค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์อยู่ในช่วง 0.018 – 0.191 (ร้อยละโดยน้ำหนัก.นาที่)<sup>-1</sup> โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของโมโนกลีเซอไรด์เกิดเร็วกว่าปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์ พิจารณาได้จากค่าพลังงานกระตุ้น (activation energy) ของปฏิกิริยา จากการทดลองได้ค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ เป็น 14.7 14.2 และ 6.4 กิโลแคลอรีต่อโมลตามลำดับ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมคือร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

D.Kusdiana and S.Saka (2001) [12] ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันเพื่อผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดเรบในภาวะเหนือวิกฤตของเมทานอลโดยกระบวนการแบบไม่ต่อเนื่อง (batch process) ซึ่งศึกษาทั้งภาวะต่ำกว่าวิกฤตและเหนือวิกฤต โดยอุณหภูมิอยู่ในช่วง 200 ถึง 500 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันเมล็ดเรบต่อเมทานอล 1:3.5 ถึง 1:42 เครื่องปฏิกรณ์ทำด้วยโลหะประเภท Inconel -625 ขนาด 5 มิลลิเมตร ด้านบนติดอุปกรณ์วัดอุณหภูมิและความดัน โดยทำงานได้สูงสุดที่ 500 องศาเซลเซียสและ 200 เมกะปาสคัล ในช่วงต่ำกว่าจุดวิกฤตให้ความร้อนแก่เครื่องปฏิกรณ์โดยใช้น้ำมันส่วนภาวะเหนือวิกฤตใช้อ่างดีบุก (tin bath) ผลการศึกษาพบว่าอุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความดัน 19 เมกะปาสคัล เวลา 240 วินาที อัตราส่วนโดยโมล 1:42 ได้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ถึง 95 โดยน้ำหนักในขณะที่อัตราส่วนโดยโมล 1:6 และ 1:3.5 เกิดปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ สำหรับผลของอุณหภูมิพบว่าที่อุณหภูมิ 200 และ 230 องศาเซลเซียสให้ร้อยละการเปลี่ยนเป็นเมทิลเอสเทอร์ต่ำ เนื่องจากอยู่ช่วงต่ำกว่าจุดวิกฤตสภาพความมีตัวของเมทานอลยังคงสูงอยู่ และที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส ร้อยละการเปลี่ยนเป็นเมทิลเอสเทอร์ยังคงต่ำอยู่ ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับเสถียรภาพของภาวะเหนือวิกฤต เพราะที่อุณหภูมินี้มีความดัน 14 เมกะปาสคัล ซึ่งอยู่ระหว่างภาวะต่ำกว่าจุดวิกฤตและเหนือวิกฤต เป็นไปได้ที่เมทานอลในภาวะนี้ยังมีสภาพความมีตัวของสูงจึงเกิดปฏิกิริยาได้น้อย ในขณะที่อุณหภูมิ 300 และ 350 องศาเซลเซียสให้ผลได้สูงถึง ร้อยละ 80 และ 95 โดยน้ำหนัก ซึ่งถือเป็นภาวะที่เหมาะสม

ในการทดลอง และเพื่อหาค่าคงที่อัตราเร็วได้สมมติให้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งและกำหนดให้อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันพืชต่อเมทานอลเป็น 1:42 จากนั้นหาค่าคงที่อัตราเร็วโดยติดตามการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบที่ไม่ใช่เมทิลเอสเทอร์ในแต่ละช่วงเวลา พบว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง โดยค่าคงที่อัตราเร็วเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลิตเมทิลเอสเทอร์คือ อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสอัตราส่วนโดยโมล 1:42 เวลาในการทำปฏิกิริยา 240 วินาที

S.Saka and D.Kusdiana (2001) [13] ศึกษาการเตรียมไบโอดีเซลในภาวะเหนือวิกฤตของเมทานอล ( $T_c = 239^\circ \text{C}$ ,  $P_c = 8.09 \text{ MPa}$ ) โดยกระบวนการแบบกะ (Batch process) งานวิจัยนี้ใช้เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 5 มิลลิลิตรทำจากโลหะประเภท Inconel -625 ด้านบนติดตั้งอุปกรณ์วัดความดันและอุณหภูมิทำงานสูงสุดได้ 200 เมกะปาสคัล และ 500 องศาเซลเซียสทดลองโดยใช้น้ำมันเมล็ดเรป (rapeseed) ปริมาณ 2 กรัมและเมทานอล 3.36 กรัม เพื่อให้ได้อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันพืชต่อเมทานอลเป็น 1: 42 จากนั้นเขย่าแล้วจุ่มเครื่องปฏิกรณ์ลงในอ่างดีบุก (tin bath) ให้ความร้อนที่ 350 องศาเซลเซียสตามเวลาที่ต้องการในช่วง 10 ถึง 240 วินาที เมื่อได้เวลาตามที่ต้องการแล้ว นำเครื่องปฏิกรณ์จุ่มในอ่างน้ำเย็นเพื่อหยุดปฏิกิริยา ทั้งผลิตภัณฑ์ที่ได้ให้แยกชั้นนำส่วนบนมาระเหยเมทานอลออกจะได้เมทิลเอสเทอร์ ส่วนด้านล่างนำมาระเหยเมทานอลออกเช่นกัน ซึ่งจะได้กลีเซอรอลบริสุทธิ์ ผลการทดลองพบว่า อัตราส่วนโดยโมล 1:42 อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความดัน 19 เมกะปาสคัล เวลา 240 วินาที ได้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ถึง 95 โดยน้ำหนัก

Ayhan Demirbas (2002) [14] ศึกษาการเตรียมเมทิลเอสเทอร์โดยวิธีทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในภาวะเหนือวิกฤตของเมทานอลโดยใช้น้ำมันพืชที่มีมากในประเทศตุรกี 6 ชนิดซึ่งประกอบด้วย น้ำมันเมล็ดฝ้าย (cotton seed) น้ำมันเมล็ดในถั่วเฮเซล (hazelnut kernel) น้ำมันเมล็ดดอกคำฝอย (safflower seed) และน้ำมันดอกทานตะวัน (sunflower seed) ในกระบวนการแบบกะ (batch process) เครื่องปฏิกรณ์มีขนาด 100 มิลลิลิตร รูปทรงกระบอกทำจากสแตนเลส 316 ด้านบนติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิและความดัน เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงภายในระบบ ผลการทดลองพบว่า อัตราส่วนโดยโมลที่เหมาะสมคือ 1 : 41 อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เวลา 300 วินาที ได้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ 95 โดยน้ำหนัก

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินงานวิจัย

#### 3.1. เครื่องมือในการทดลอง

##### 3.1.1. เครื่องปฏิกรณ์และอุปกรณ์ให้ความร้อนเบื้องต้น (reactor and preheater)

เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล (plug flow หรือ tubular reactor) ทำจากท่อสแตนเลส เบอร์ 316 ปริมาตร 90 ลูกบาศก์เซนติเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3/8 นิ้ว หนา 0.035 นิ้ว ทนแรงดันสูงสุดได้ 3,300 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ยาว 545 เซนติเมตร นำมาขุดเป็นเกลียวให้มีรัศมีของวง 5 เซนติเมตร ขุดจนได้ความยาว 10 เซนติเมตร เพื่อให้ใส่ในอ่างเกลือหลอมเหลวได้ ปลายด้านหนึ่งต่อกับข้อต่อสี่ทาง ( four way union ) และอีกด้านต่อกับท่อหล่อเย็น

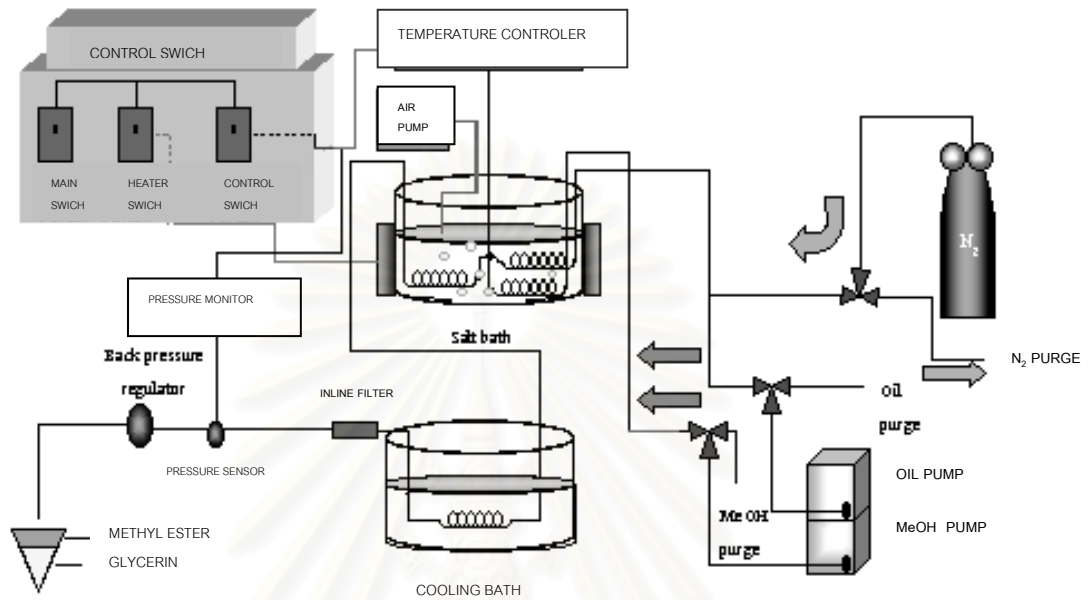
อุปกรณ์ให้ความร้อนเบื้องต้น (preheater) ทำจากท่อสแตนเลสเบอร์ 316 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/8 นิ้ว หนา 0.035 นิ้ว ยาว 200 เซนติเมตร ทนแรงดันสูงสุดได้ 10,900 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว นำมาขุดเป็นเกลียวเช่นเดียวกับเครื่องปฏิกรณ์ โดยอุปกรณ์ให้ความร้อนเบื้องต้น มี 2 ชุด ชุดแรกสำหรับให้ความร้อนเบื้องต้นแก่น้ำมันพืช อีกชุดสำหรับเมทานอล เครื่องปฏิกรณ์และอุปกรณ์ให้ความร้อนเบื้องต้นเชื่อมกันด้วยข้อต่อสี่ทางด้านที่เหลือของข้อต่อมีไว้สำหรับใส่ เทอร์โมคัพเพิล เพื่อวัดอุณหภูมิในระบบ แสดงดังรูปที่ 3.1

##### 3.1.2. ปั๊มแรงดันสูง (high performance liquid chromatography pump)

Model	:	Pu – 1580
Pumping method	:	SSQD (Slow Suction Quick Delivery)
Pumping mode	:	Fixed flow rate / Fixed Pressure
Flow rate setting range	:	0.001 – 10 ml / mim
Maximum pressure	:	50 MPa (to 5 ml / min ) 35 MPa (over 5 ml / min )
Pressure limits	:	0 –50 MPa
Operating temperature	:	10 – 40 ° C



## Supercritical Methanol Transesterification System



รูปที่ 3.1 อุปกรณ์และแผนภาพการทดลอง



รูปที่ 3.2 ปั๊มแรงดันสูง

### 3.1.3. ถังเกลือหลอมเหลว (salt bath)

ทำจากท่อสเตนเลส เบอร์ 316 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 32 เซนติเมตร สูง 40 เซนติเมตรหนา 0.6 เซนติเมตร

### 3.1.4. ถังหล่อเย็น (cooling bath)

ทำจากท่อสเตนเลส เบอร์ 316 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร หนา 0.5 เซนติเมตร



รูปที่ 3.3. ถังเกลือหลอมเหลวและถังหล่อเย็น

### 3.1.5. อุปกรณ์กรอง (Inline filter)

ทำจากท่อสเตนเลส 316 ขนาด  $\frac{1}{2}$  นิ้ว ภายในใส่ไส้กรองขนาดความละเอียด 0.5 ไมโครเมตร

### 3.1.6. อุปกรณ์วัดความดัน (Pressure Sensor)

บริษัท : Kyowa Electronic Instruments Co.,LTD.

Model : PGM – 500 KE

### 3.1.7. จอแสดงผลความดัน (Pressure Monitor)

ชื่อสินค้า : Hengstler Process Indicator

Model : 0735A60000

### 3.1.8. อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller)

บริษัท : Sigma Co.,LTD.

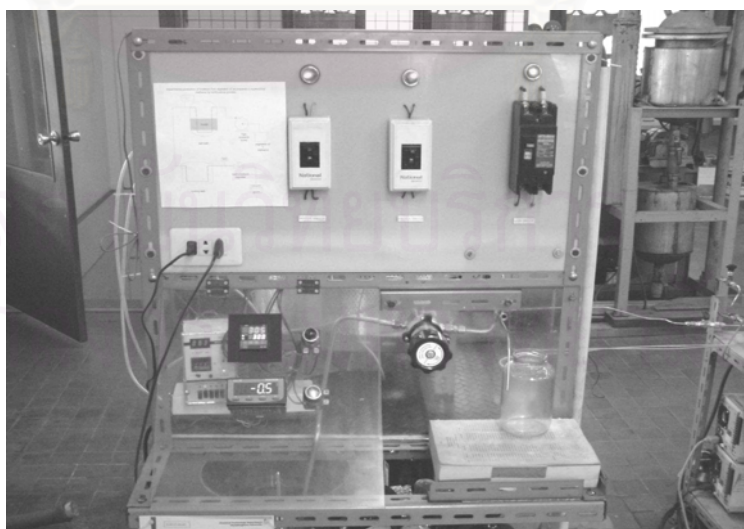
Model : SF48

### 3.1.9. แผงวงจรควบคุม (Control switch)

ประกอบด้วย : Main Switch

: Heater Switch

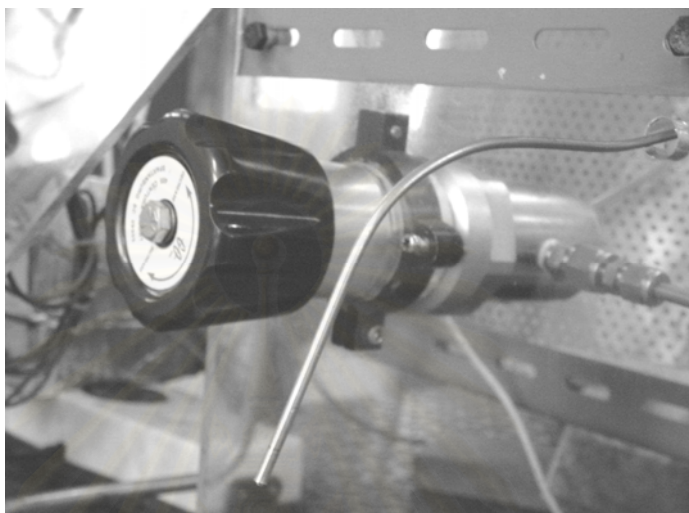
: Controller Switch



รูปที่ 3.4 แผงวงจรควบคุมและจอแสดงผลต่างๆ

### 3.1.20. อุปกรณ์ควบคุมความดัน (Back Pressure Regulator)

บริษัท : Goregulator Co.,LTD.  
 Model : BP\_66  
 Pressure control range : 0 – 6,000 psi



รูปที่ 3.5 Back Pressure Regulator

### 3.1.20. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ (Gas Chromatograph , GC)

บริษัท : Shimadzu  
 Model : GC 14 B SPL  
 Detector : FID ( Flame Ionization Detector )  
 Column : Capillary column , Model ZB – Wax  
 size 30 m x 0.25 mm  
 Carrier gas : He



รูปที่ 3.6 เครื่อง แก๊สโครมาโทกราฟ

### 3.2.1. สารที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1. น้ำมันดีเซลชนิดหมุนเร็วและหมุนช้า จากบริษัท Shell

3.2.2. น้ำมันละหุ่ง (Castor Oil) บริษัท สยามน้ำมันละหุ่ง จำกัด จ. สมุทรปราการ

3.2.3. น้ำมันเมล็ดในปาล์ม (Palm kernel oil) บริษัท ห้างหุ้นส่วนจำกัด น้ำมันพืชซีวมงคล จ.

สมุทรสาคร

3.2.4. น้ำมันมะพร้าวดิบ (Coconut oil) บริษัท น้ำมันมะพร้าวทับสะแก จ. ประจวบคีรีขันธ์

3.2.5. Methanol Analytical grade

3.2.6. N – heptane (Chromatography grade)

3.2.7. Standard methyl esters ได้แก่ methyl laurate , methyl miristate และ methyl palmitate จากบริษัท Supelco ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้รับความอนุเคราะห์จาก กองวิจัยพืชน้ำมัน กรมวิชาการเกษตร

3.2.8. Molten salt ประกอบด้วย โซเดียมไนเตรต ( $\text{NaNO}_3$ ) โซเดียมไนไตรต์ ( $\text{NaNO}_2$ ) โพแทสเซียมไนเตรต ( $\text{KNO}_3$ ) ผสมกันด้วยอัตราส่วน 1 : 5 : 6 โดยน้ำหนัก

### 3.3. ขั้นตอนการวิจัย

#### 3.3.1. วิเคราะห์สมบัติสารตั้งต้น (ภาคผนวก ก.)

3.3.1.1. ค่ากรด (Acid Value) ตามวิธีมาตรฐาน AOCS Cd – 3D-63

3.3.1.2. ค่าสaponification (Saponification Value) ตามวิธีมาตรฐาน AOCS Cd - 3B-76

3.3.1.3. ชนิดและปริมาณกรดไขมัน (fatty acid composition) ตามวิธีมาตรฐาน AOCS Ce – 2 – 66 (ส่งวิเคราะห์ที่กองวิจัยพืชน้ำมัน กรมวิชาการเกษตร) แสดงดังภาคผนวก ง.

3.3.1.4. API ตามมาตรฐาน ASTM D 1298

3.3.1.5. ค่าความหนืด ตามมาตรฐาน ASTM D 445

3.3.1.6. จุดวาบไฟ ตามมาตรฐาน ASTM D 93

3.3.1.7. ค่าความร้อน ตามมาตรฐาน ASTM D 240

#### 3.3.2. การทดลอง

3.3.2.1. ให้ความร้อนกับเกลือหลอมเหลวจนกระทั่งได้อุณหภูมิตามที่ต้องการ (270 300 และ 350 องศาเซลเซียส) โดยดูจากจอแสดงอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล

3.3.2.2. เปิดแก๊สไนโตรเจนเข้าเครื่องปฏิกรณ์โดยไล่สิ่งตกค้างในระบบออกก่อน จากนั้นจึงปิด back pressure regulator เพื่อเพิ่มแรงดันให้กับระบบเป็น 19 เมกะปาสกัล

3.3.2.3. ป้อนน้ำมันพืชและเมทานอลด้วยอัตราการไหลที่กำหนดไว้ (แสดงการคำนวณอัตราการไหลในภาคผนวก ข.) เพื่อให้ได้อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันพืชต่อเมทานอลตามต้องการ (1 : 6 1 : 12 1 : 24 และ 1 : 42)

3.3.2.4. รอจนระบบเข้าสู่ภาวะคงที่ (steady state) จึงเก็บตัวอย่างและเริ่มจับเวลานับตั้งแต่เริ่มเก็บตัวอย่างจนกระทั่งได้ปริมาณตัวอย่างตามที่ต้องการ

3.3.2.5. เปิดแก๊สไนโตรเจนเพื่อไล่สิ่งตกค้างในระบบออกประมาณ 10 นาที หรือสังเกตจากทางออกว่าไม่มีสารใดๆ หยดลงมาอีกจึงเริ่มการทดลองครั้งต่อไป

3.3.2.6. นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ใส่บีกเกอร์แล้วทิ้งไว้ให้กลีเซอรอลแยกชั้น โดยใช้เวลาประมาณ 3 – 5 ชั่วโมงจึงจะเกิดการแยกอย่างสมบูรณ์ แยกเมทิลเอสเทอร์ออกจากกลีเซอรอลโดยใช้กรวยแยก นำส่วนบนมาระเหยเมทานอลออก โดยใช้ rotary evaporator ซึ่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์ที่ได้แล้วนำไปหาปริมาณเมทิลเอสเทอร์ต่อไป

### 3.3.3. การวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์

ใช้เทคนิคการหาปริมาณแบบ external standardization

#### 3.3.3.1. การเตรียมสารละลายมาตรฐาน

เตรียมสารละลายมาตรฐานจากเมทิลเอสเทอร์มาตรฐานที่ทราบน้ำหนักแน่นอน โดยละลายใน n – heptane จากนั้นนำพื้นที่พีคและความเข้มข้นมาเขียนกราฟได้ calibration curve เพื่อใช้หาปริมาณเมทิลเอสเทอร์ในตัวอย่าง (ภาคผนวก ง)

#### 3.3.3.2. การเตรียมตัวอย่าง

เตรียมตัวอย่างโดยการทำให้เจือจางโดยใช้น้ำหนักของตัวอย่างที่ทราบน้ำหนักแน่นอน ( ทศนิยม 4 ตำแหน่ง ) ละลายด้วย n - heptane จากนั้นฉีดตัวอย่างในเครื่อง GC ปริมาณ 0.4 ไมโครลิตร โดยต้องเตรียมตัวอย่างให้ความเข้มข้นอยู่ในช่วงที่เป็นเส้นตรง (Calibration Curve)

#### 3.3.3.3. การเตรียมเครื่อง GC

ใช้คอลัมน์ชนิด Capillary รุ่น ZB – Wax ติดตั้งกับเครื่อง โดยปรับอัตราการไหลของฮีเลียม (He) เป็น 2 มิลลิเมตรต่อนาที ความดันของฮีเลียม 150 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ส่วนไฮโดรเจนและออกซิเจนปรับความดันไว้ที่ 30 และ 25 ปอนด์ต่อตารางนิ้วตามลำดับ โดยตั้งอุณหภูมิของหัวฉีด (injector) คอลัมน์ (column) และ ดีเทคเตอร์ (detector) ไว้ที่ 240 190 และ 240 องศาเซลเซียสตามลำดับ และใช้โปรแกรม isothermal ตลอดการทดลอง

#### 3.3.3.4. การฉีดตัวอย่าง

ก่อนฉีดตัวอย่างต้องรอให้อุณหภูมิถึงจุดที่ตั้งไว้ก่อน แล้วจึงจุดไฟ รอจน base line นิ่งจึงเริ่มฉีดตัวอย่าง โดยใช้เข็มเฉพาะขนาดเล็ก (micro syringe) ขนาด 10 ไมโครลิตร ปริมาณ

ตัวอย่างที่ฉีดแต่ละครั้งเป็น 0.4 ไมโครลิตร รวจนฟีกของเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบหลักออกหมดจึงเริ่มฉีดครั้งต่อไป (โครมาโทแกรมแสดงในภาคผนวก ง. ข้อ 3.)

### 3.3.3.5. การพิจารณาผลการฉีดตัวอย่าง

เมทิลเอสเทอร์แต่ละชนิดจะขึ้นที่เวลาต่างกันและสามารถทราบว่าเป็นเมทิลเอสเทอร์ชนิดใดได้โดยการเปรียบเทียบกับฟีกของเมทิลเอสเทอร์มาตรฐาน ถ้าฟีกที่ได้มี retention time เท่ากันแสดงว่าเป็นสารชนิดเดียวกันและปริมาณหาได้โดยการเทียบกับ Calibration curve ของเมทิลเอสเทอร์มาตรฐานแต่ละชนิด

### 3.3.4. การวิเคราะห์สมบัติผลิตภัณฑ์

การวิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์นั้นจะวิเคราะห์เฉพาะผลิตภัณฑ์ที่ได้จากภาวะที่เหมาะสมเท่านั้น แล้วนำสมบัติที่ได้ไปเปรียบเทียบกับไบโอดีเซลมาตรฐานและน้ำมันดีเซลโดยสมบัติที่ทำกรวิเคราะห์ประกอบด้วย (วิธีการทดลองแสดงในภาคผนวก ก.)

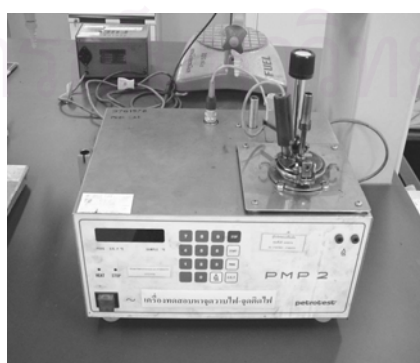
3.3.4.1. API ทดสอบโดยมาตรฐาน ASTM 1298

3.3.4.2. ค่าความหนืด ทดสอบโดยมาตรฐาน ASTM D 445



รูปที่ 3.7 เครื่องวิเคราะห์ความหนืด (อ่างน้ำมัน และ Viscometer)

3.3.4.3. จุดวาบไฟ ทดสอบโดยมาตรฐาน ASTM D 93



รูปที่ 3.8 เครื่องวิเคราะห์จุดวาบไฟแบบ Pensky – Martens Closed Tester

#### 3.3.4.4. ค่าความร้อน ทดสอบโดยมาตรฐาน ASTM D 240



รูปที่ 3.9 เครื่องวิเคราะห์ค่าความร้อน

#### 3.3.4.5. ดรรชนีซีเทน ทดสอบโดยมาตรฐาน ASTM D 976

ดรรชนีซีเทนเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ค่า API และ ค่าการกลั่นกลาง

#### 3.3.4.6. ค่ากลั่นกลาง ทดสอบโดยมาตรฐาน ASTM D 86



รูปที่ 3.10 เครื่องกลั่นลำดับส่วน



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการอภิปรายผล

#### 4.1. ผลการศึกษาสมบัติสารตั้งต้นและน้ำมันดีเซล

น้ำมันพืชเป็นสารประกอบไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) มีโครงสร้างเป็น  $C_3H_5$ - เชื่อมต่อกับกรดไขมัน ที่มีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่ 10 ถึง 30 ตัว น้ำมันพืชมีกรดไขมันชนิดต่าง ๆ เป็นองค์ประกอบ โดยมีกรดไขมันอยู่ถึงร้อยละ 94 – 96 ของน้ำหนักโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ ทำให้สมบัติของน้ำมันแต่ละชนิดทั้งทางเคมีและกายภาพแตกต่างกัน น้ำมันพืชที่มีกรดไขมันอิ่มตัวสูงจะมีค่าไอโอดีนต่ำ และเมื่อมีปริมาณกรดไขมันอิ่มตัวลดลงหรือมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูงขึ้น ค่าไอโอดีนจะสูงขึ้นตามลำดับ น้ำมันพืชที่มีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวสูงจะเป็นสารที่ไม่อยู่ตัวถูกออกซิไดซ์ได้ง่าย และเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันที่อุณหภูมิสูงได้ โดยทั่วไปค่าไอโอดีนเป็นดัชนีบ่งชี้ถึงการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน ซึ่งการเลือกใช้น้ำมันพืชที่มีค่าไอโอดีนต่ำเป็นเชื้อเพลิงจะป้องกันการเกิดพอลิเมอไรเซชันได้ ดังนั้นก่อนการทดลองจำเป็นต้องทดสอบสมบัติของน้ำมันพืชก่อน เพื่อจะได้ทราบแนวโน้มสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้

ตารางที่ 4.1 สมบัติของน้ำมันมะพร้าว น้ำมันเมล็ดในปาล์ม น้ำมันละหุ่ง เปรียบเทียบกับ น้ำมันดีเซลหมุนช้า

สมบัติ	น้ำมันดีเซล หมุนช้า	น้ำมัน มะพร้าว	น้ำมันเมล็ด ในปาล์ม	น้ำมันละหุ่ง
ค่าความร้อน (MJ / kg)	46.0	38.43	38.59	37.61
ค่าความหนืด ( $mm^2/s$ )	3.4	27.0	31.1	234.9
ค่าจุดวาบไฟ ( $^{\circ}C$ )	77	231	264	290
ค่ากรด (mg of KOH / g of oil)	-	16	31	6
ค่าสปอนนิฟิเคชัน (mg of KOH / g of oil)	-	204	244	174
ค่าไอโอดีน (g of $I_2$ / 100 g of oil)	-	11	15	90

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นว่าน้ำมันทั้งสามชนิดมีค่าความร้อนต่ำกว่าน้ำมันดีเซล ซึ่งเมื่อนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงค่าความร้อนของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จะมีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซลเช่นกัน เมื่อนำไปใช้กับเครื่องยนต์รอบสูงกำลังจะตกลง ส่วนค่าความหนืดของน้ำมันพืชทั้งสามชนิดมีค่ามากกว่าน้ำมันดีเซลมาก โดยน้ำมันมะพร้าวและน้ำมันเมล็ดในปาล์มมีค่าความหนืดใกล้เคียงกัน คือ 27.0 และ 31.1 mm<sup>2</sup>/s ตามลำดับ ในขณะที่น้ำมันละหุ่งมีค่าความหนืดมากกว่าน้ำมันพืชทั้งสองชนิดมาก โดยมีค่าความหนืด 234.9 mm<sup>2</sup>/s เมื่อนำมาทดลองพบว่าขณะป้อนน้ำมันละหุ่งเข้าสู่ระบบ การทำงานของปั๊มแรงดันสูงผิดปกติไปเมื่อเทียบกับกรณีป้อนเมทานอลและน้ำมันพืชอีกสองชนิด โดยปั๊มมีการกระตุกและมีเสียงดังออกมาจากส่วนของ pump head และดังมากขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหล โดยความดันที่อ่านได้จากการป้อนน้ำมันละหุ่งเข้าสู่ระบบที่มีความดันเท่ากับ ความดันบรรยากาศมีค่าประมาณ 3 – 5 เมกะปาสกัล ซึ่งมีค่าสูงกว่าเมทานอล และน้ำมันพืชอีกสองชนิด กรณีป้อนเมทานอลใช้แรงส่ง 0 เมกะปาสกัล น้ำมันมะพร้าว 0.4 เมกะปาสกัล และน้ำมันเมล็ดในปาล์ม 0.6 เมกะปาสกัล ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากความหนืดของสารแต่ละชนิดนั่นเอง เนื่องจากส่วนประกอบที่สำคัญของปั๊มแรงดันสูงคือ pump head โดย pump head เป็นส่วนที่ทำหน้าที่รับและส่งสารเข้าสู่ระบบตามการทำงานที่กำหนดไว้ว่าต้องการให้อัตราการไหลคงที่ หรือความดันของระบบคงที่ซึ่งแรงดันสูงสุดที่ส่งได้คือ 50 เมกะปาสกัล โดยทั่วไปสารละลายจะมีความหนืดต่ำจึงไม่ส่งผลต่อการทำงานของ pump head ดังนั้นเพื่อความปลอดภัยกับปั๊มแรงดันสูงที่มีราคาสูงจึงเลือกใช้น้ำมันละหุ่งในการศึกษาครั้งนี้ ความหนืดของน้ำมันพืชเป็นอุปสรรคสำคัญในการใช้น้ำมันพืชเป็นเชื้อเพลิงโดยจะก่อปัญหาที่ระบบหัวฉีด โดยหัวฉีดจะไม่สามารถฉีดเชื้อเพลิงให้เป็นฝอยได้ เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ สำหรับจุดวาบไฟพบว่าน้ำมันพืชทั้งสามชนิดมีจุดวาบไฟสูงกว่าน้ำมันดีเซล ซึ่งบ่งบอกให้ทราบว่า น้ำมันพืชมีความสามารถในการระเหยต่ำ ทำให้จุดระเบิดยาก ซึ่งการลดความหนืดและจุดวาบไฟของน้ำมันพืชลงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการใช้น้ำมันพืชเป็นเชื้อเพลิง การวิเคราะห์สมบัติทางน้ำมันพืชนั้น ทำให้ทราบว่าน้ำมันพืชที่ใช้มีสมบัติเป็นเช่นไรก่อนการทดลอง โดยค่ากรดบอกลให้ทราบว่าน้ำมันพืชนั้นมีกรดไขมันอิสระอยู่มากน้อยเพียงใด น้ำมันพืชที่มีค่ากรดสูงจะมีกรดไขมันอิสระมาก จึงเกิดการเหม็นหืนเร็วกว่าและมีจุดเกิดควันต่ำกว่า น้ำมันพืชที่มีค่ากรดต่ำ จากตารางที่ 4.1 พบว่า น้ำมันปาล์มมีค่ากรดมากที่สุด เมื่อนำมาทดลองในภาวะอุณหภูมิสูงจึงเกิดควันได้เร็วกว่าน้ำมันพืชชนิดอื่น ส่วนค่าสaponification index บอกลให้ทราบถึงขนาดโมเลกุลของไขมัน โดยไขมันที่มีค่าสaponification index ต่ำจะมีขนาดโมเลกุลใหญ่ จากตารางที่ 4.1 พบว่าน้ำมันละหุ่งมีค่าสaponification index ต่ำที่สุดโดยมีค่า 174 มิลลิกรัมKOHที่ใช้ในการ saponify ต่อกรัมของน้ำมันพืช (การคำนวณแสดงดังภาคผนวก ก) จึงมีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าน้ำมันมะพร้าวและน้ำมันเมล็ดในปาล์ม ส่วนค่าไอโอดีนเป็นตัวบ่งชี้ระดับความไม่อิ่มตัวของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันพืช ถ้ากรดไขมันมีพันธะคู่มากไอโอดีนจะถูกดูดซึม (absorb)

มากเช่นกัน น้ำมันพืชที่มีกรดไขมันไม่อิ่มตัวเป็นองค์ประกอบสูงจะมีค่าไอโอดีนสูงซึ่งจะเกิดพอลิเมอร์ไอโซชันได้ง่ายกว่าน้ำมันที่มีค่าไอโอดีนต่ำ จากตารางที่ 4.1 น้ำมันละหุ่งมีค่าไอโอดีนสูงที่สุด รองลงมาเป็นน้ำมันเมล็ดในปาล์มและน้ำมันมะพร้าว โดยมีค่า 90 15 และ 11 กรัมของไอโอดีนที่ถูกดูดซึมต่อ 100 กรัม น้ำมันพืช ตามลำดับ จากค่าดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าน้ำมันละหุ่งเกิดพอลิเมอร์ไอโซชันได้ง่ายกว่าน้ำมันพืชทั้งสองชนิด เมื่อนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงแล้วใช้กับเครื่องยนต์เชื้อเพลิงชนิดนี้จะเกิดยางเหนียว (gum) ขึ้น ซึ่งเป็นปัญหาต่อเครื่องยนต์ต่อไป โดยสมบัติดังกล่าวนี้สอดคล้องกับชนิดและองค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันพืช นอกจากสมบัติที่กล่าวมาแล้วข้างต้นความหนาแน่นของน้ำมันพืชก็เป็นอีกสมบัติหนึ่งที่สามารถบอกถึงขนาดโมเลกุลของน้ำมันพืชได้ โดยความหนาแน่นสูงโมเลกุลจะมีขนาดใหญ่ แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ความหนาแน่นของเมทานอล และน้ำมันตัวอย่าง

สารตั้งต้น	ความหนาแน่น (กรัม / มิลลิลิตร)
เมทานอล	0.792
น้ำมันมะพร้าว	0.919
น้ำมันเมล็ดในปาล์ม	0.925

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าเมทานอลมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำมันพืชทั้งสองชนิดและมีสภาพความมีขั้วต่างกัน เมื่อนำสารทั้งสองชนิดมาผสมกัน เมทานอลจะแยกชั้นอยู่ด้านบน ส่วนน้ำมันพืชอยู่ด้านล่าง ทำให้ในภาวะปกติสารทั้งสองชนิดไม่ทำปฏิกิริยากัน จึงจำเป็นต้องลดสภาพความมีขั้วของเมทานอลลงเพื่อให้สารทั้งสองชนิดละลายเป็นเนื้อเดียวกันจึงจะเกิดปฏิกิริยาได้

#### 4.2 . ชนิดและปริมาณกรดไขมันในน้ำมันพืชตัวอย่าง

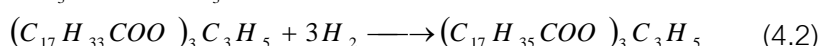
น้ำมันพืชแต่ละประเภทแตกต่างกันที่ชนิดและปริมาณกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบ ตารางที่ 4.3 แสดงชนิดและปริมาณกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันเมล็ดในปาล์มและน้ำมันมะพร้าว ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีแก๊สโครมาโทกราฟดังแสดงผลการวิเคราะห์ในภาคผนวก ง. (ข้อ 2.) ซึ่งองค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันทั้งสองชนิดมีปริมาณใกล้เคียงกัน โดยมีกรด lauric ประมาณร้อยละ 50 รองลงมาเป็น กรด myristic และ กรด palmitic ตามลำดับนอกนั้นเป็นกรดไขมันชนิดอื่นๆประมาณร้อยละ 20

ตารางที่ 4.3. ชนิดและปริมาณกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันพืชตัวอย่าง  
(วิเคราะห์ตามมาตรฐาน AOCS Ce - 2 - 66)

ชนิดกรดไขมัน	น้ำมันมะพร้าว	น้ำมันเมล็ดในปาล์ม
Caproic acid	0.39	-
Caprylic acid	5.75	3.77
Capric acid	5.09	3.67
Lauric acid	44.56	48.38
Myristic acid	19.08	17.37
Palmitic acid	10.04	9.13
Stearic acid	3.57	2.72
Oleic acid	8.8	12.56
Linoleic acid	2.72	2.4
Total	100	100
มวลโมเลกุล	693	702

มวลโมเลกุลสามารถคำนวณได้จากชนิดและปริมาณกรดไขมันในน้ำมันพืช จากตารางที่ 4.3 น้ำมันเมล็ดในปาล์มและน้ำมันมะพร้าวมีมวลโมเลกุลเท่ากับ 702 และ 693 ตามลำดับ (วิธีคำนวณแสดงในภาคผนวก ก)

จากการทดลองหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเมทิลเอสเทอร์ในภาวะเหนือวิกฤตของเมทานอลนั้นพบว่าชนิดของกรดไขมันมีผลต่อการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยน้ำมันพืชที่มีกรดโอเลอิกสูงจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (hydrogenation) ได้โดยเปลี่ยนไตรโอเลออินเป็นไตรสเตอริอีน ซึ่งมีลักษณะเป็นของแข็งเหนียวสีขาว ทำให้เกิดการอุดตันในระบบ โดยไฮโดรเจนในระบบเกิดจากการแตกตัวของเมทานอลที่อุณหภูมิสูงดังปฏิกิริยานี้



#### 4.3. ผลของอุณหภูมิและอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันพืชต่อเมทานอล ต่อการเกิดเมทิลเอสเทอร์

การทดลองนี้ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ 270 300 และ 350 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมล 1:6 1:12 1:24 และ 1:42 ความดัน 19 เมกะปาสคัล โดยใช้กระบวนการแบบต่อเนื่องซึ่งมีสารไหลเข้าและออกจากระบบตลอดเวลา โดยเมทานอลจะอยู่ในภาวะของไหลเหนือวิกฤตซึ่งมีสมบัติแตกต่างไปจากของเหลวและแก๊ส ดังนั้นตัวแปรที่เกี่ยวข้องเช่น อุณหภูมิ ความดัน อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันพืชต่อเมทานอล จึงมีผลต่อเวลาในการเคลื่อนที่ของเมทานอลในระบบทั้งสิ้น ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของของไหลเหนือวิกฤต ในระบบต่อเนื่องเมทานอลภาวะเหนือวิกฤตจะมีอัตราการไหลโดยปริมาตรเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเมทานอลในภาวะของเหลว ทำให้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยลง ซึ่งใช้สมบัติของแก๊สจึงคำนวณเวลาในการเคลื่อนที่ของเมทานอลได้ โดยในระบบต่อเนื่องนี้เรียกเวลาในการทำปฏิกิริยาว่า เวลาสเปซ (space time,  $\tau$ ) จากการทดลองเพื่อความสะดวกในการปรับอัตราการไหลจากปั๊มและลดความยุ่งยากขณะทดลอง จึงคำนวณอัตราการไหลโดยสารตั้งต้นอยู่ในสถานะของเหลวแล้วจึงคำนวณในสถานะของไหลเหนือวิกฤตต่อไป ซึ่งในภาวะนี้เมทานอลจะอยู่ในสถานะของไหลเหนือวิกฤตโดยที่อัตราการไหลโดยปริมาตรเปลี่ยนแปลงไปจากที่คำนวณในสถานะของเหลวโดยมีค่ามากขึ้น แต่อัตราการไหลโดยมวล (mass flowrate) ยังคงเท่าเดิมทำให้อัตราส่วนโดยโมลยังคงเป็นไปตามที่กำหนดไว้ แต่เวลาในการทำปฏิกิริยาจะน้อยลงขึ้นกับอุณหภูมิและอัตราส่วนโดยโมลที่ต้องการศึกษา (แสดงการคำนวณในภาคผนวก ค)

สมบัติของแก๊สจริง

$$PV^* = zn^*RT \quad (4.3)$$

$$V^*_{MeOH} = \frac{zn^*_{MeOH}RT}{P} \quad (4.4)$$

$$\tau = \frac{V}{V^* + Q_{oil}} \quad (4.5)$$

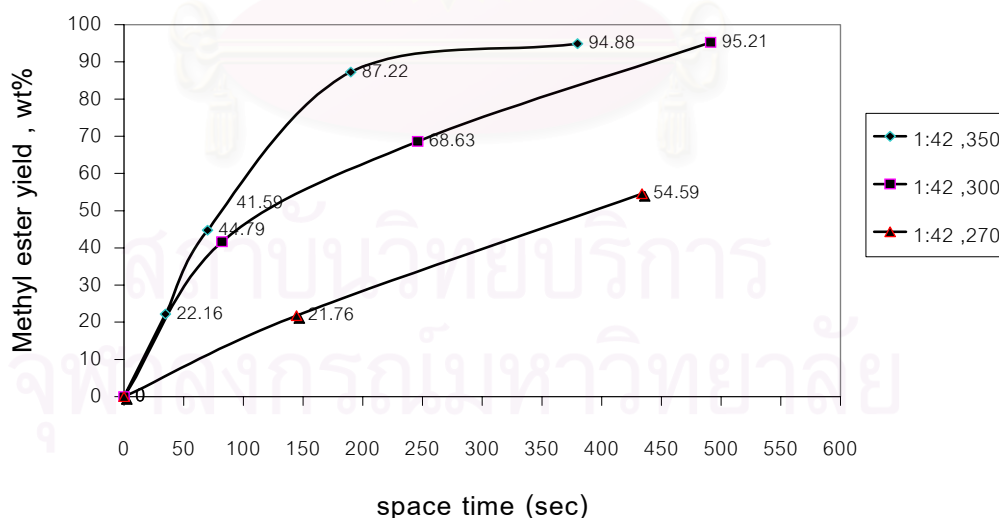
สำหรับเหตุผลในการกำหนดให้ความดันคงที่ที่ 19 เมกะปาสคัล [12] อ้างอิงจากผลงานวิจัยของ S.Saka และ D. Kusdiana ( 2001 ) กล่าวว่า ที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส ความดัน 14 เมกะปาสคัล เกิดปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ เนื่องจากที่ภาวะนี้ เป็นภาวะเหนือวิกฤตที่ไม่เสถียรเพราะความดันและอุณหภูมิล้อมใกล้จุดวิกฤต ซึ่งของไหลในภาวะนี้ไม่เป็นของไหลเหนือวิกฤตอย่างแท้จริง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทดลองที่ความดัน 10 เมกะปาสคัลด้วยซึ่งพบว่าที่ความดันนี้

ให้ร้อยละของผลได้ต่ำกว่าการทดลองที่ความดัน 19 เมกะปาสคัลจริง ( ภาคผนวกง ) ดังนั้นจึงเลือกใช้ความดันที่ 19 เมกะปาสคัล ตลอดการทดลอง และเนื่องจากการทดลองนี้ดำเนินการในภาวะเหนือวิกฤต จึงพิจารณาหาภาวะที่เหมาะสม โดยกำหนดให้เวลาสเปซในการทำปฏิกิริยาไม่เกินกว่า 600 วินาที

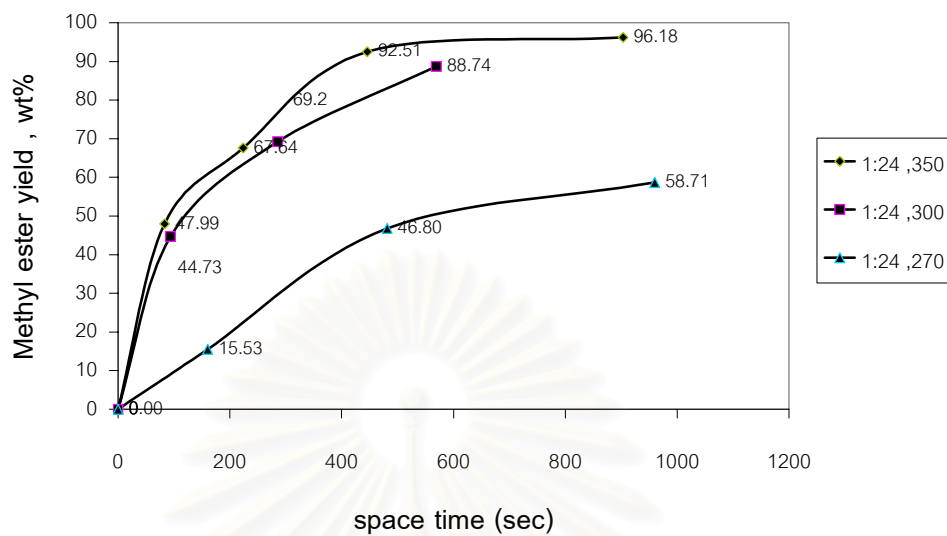
#### 4.3.1. ผลของอุณหภูมิ

จากการทดลองกรณีใช้น้ำมันมะพร้าวเป็นสารตั้งต้นพบว่า ร้อยละการเปลี่ยนเป็นเมทิลเอสเทอร์จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ ซึ่งจากการทดลอง อุณหภูมิ 350 ° C ด้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงที่สุด ตามด้วยอุณหภูมิ 300 และ 270 องศาเซลเซียส โดยพิจารณาที่อัตราส่วน 1:42 เวลาสเปซ 400 วินาที พบว่าด้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เป็น 95.85 และ 50 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.1 ในขณะที่อัตราส่วนโดยโมลอื่นๆให้ผลเช่นเดียวกัน แสดงดังรูปที่ 4.2 4.3 และ 4.4

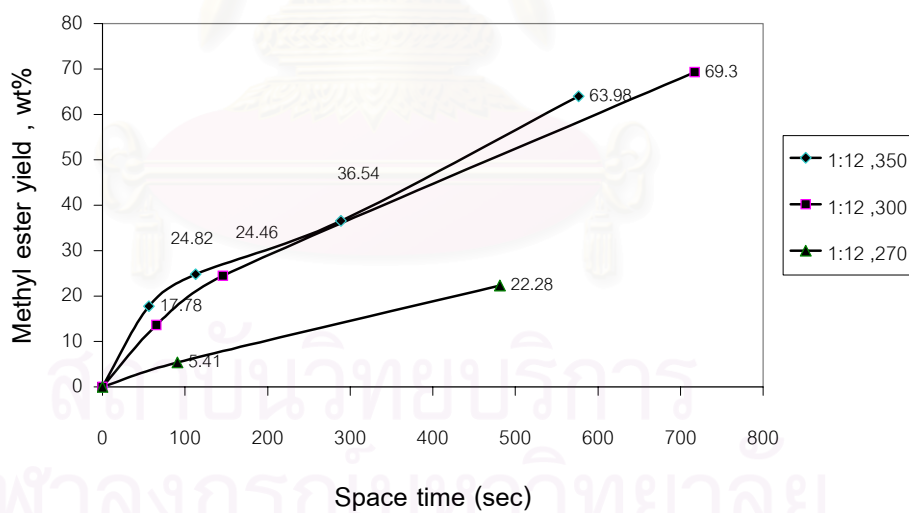
กรณีใช้น้ำมันเมล็ดในปาล์มเป็นสารตั้งต้นพบว่าให้ผลทำนองเดียวกับน้ำมันมะพร้าว โดยอัตราส่วนโดยโมล 1:42 อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ด้ร้อยละของผลได้ถึง 96 ในขณะที่ อุณหภูมิ 300 และ 270 องศาเซลเซียสได้ 94 และ 38 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.5 ซึ่งอัตราส่วนโดยโมลอื่นๆให้ผลเช่นเดียวกัน แสดงดังรูปที่ 4.6 4.7 และ 4.8



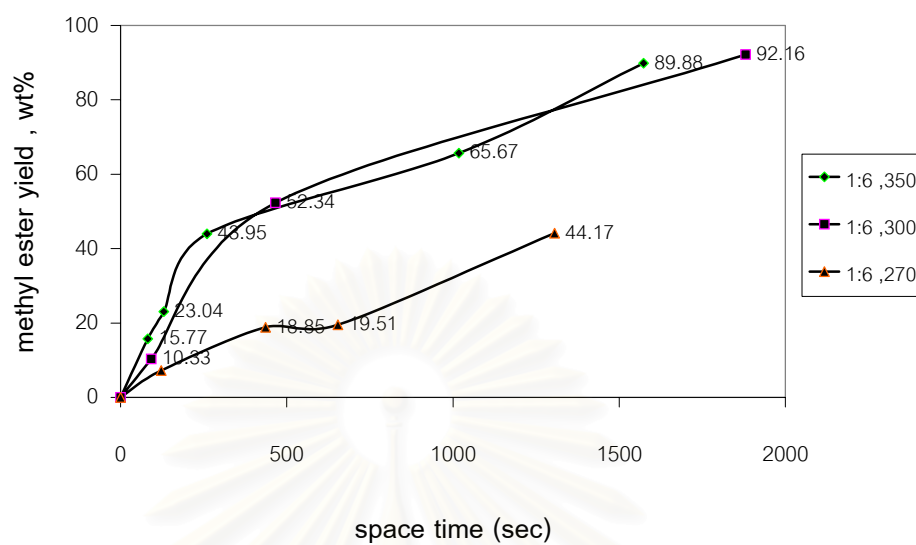
รูปที่ 4.1 ผลของอุณหภูมิต่อการเกิดเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันมะพร้าวที่อัตราส่วนโดยโมล 1: 42



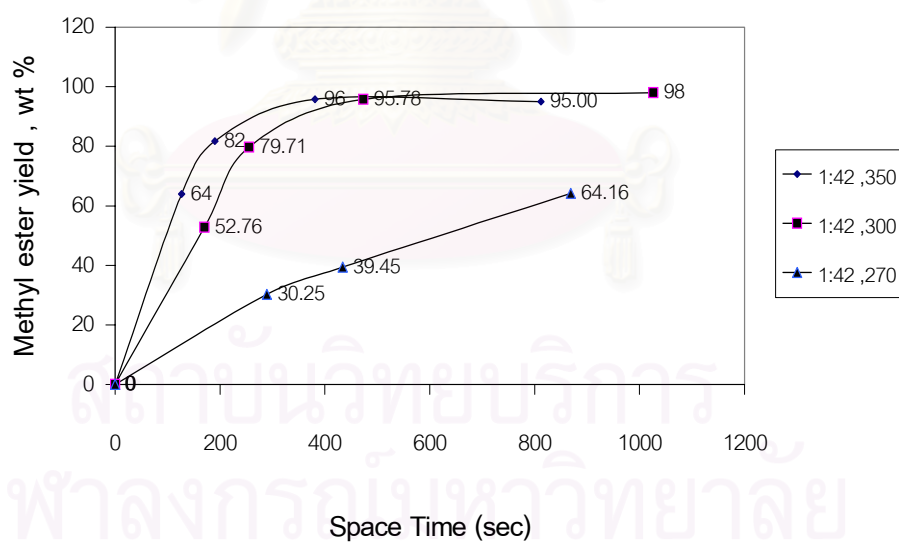
รูปที่ 4.2 ผลของอุณหภูมิต่อการเกิดเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันมะพร้าวที่อัตราส่วนโดยโมล 1: 24



รูปที่ 4.3 ผลของอุณหภูมิต่อการเกิดเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันมะพร้าวที่อัตราส่วนโดยโมล 1: 12

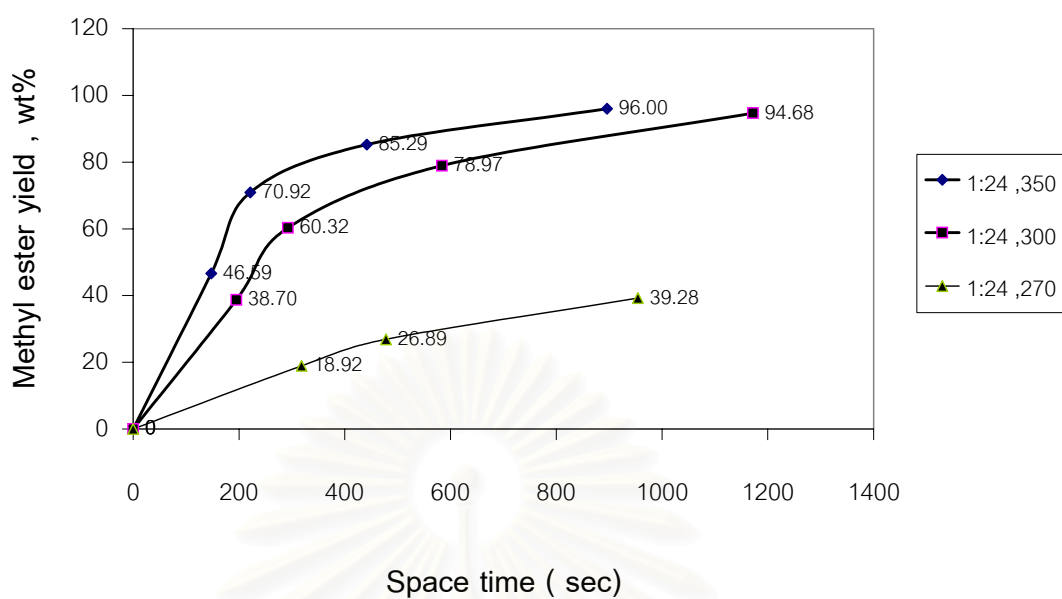


รูปที่ 4.4 ผลของอุณหภูมิต่อการเกิดเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันมะพร้าวที่อัตราส่วนโดยโมล 1: 6

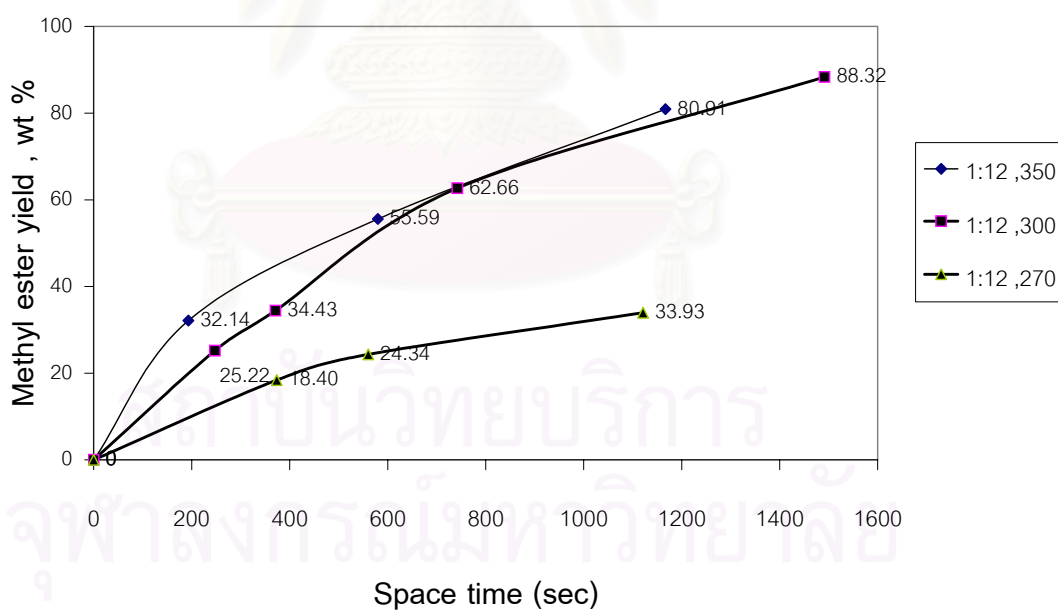


รูปที่ 4.5 ผลของอุณหภูมิต่อการเกิดเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันเมล็ดในปาล์มที่อัตราส่วนโดยโมล 1: 42

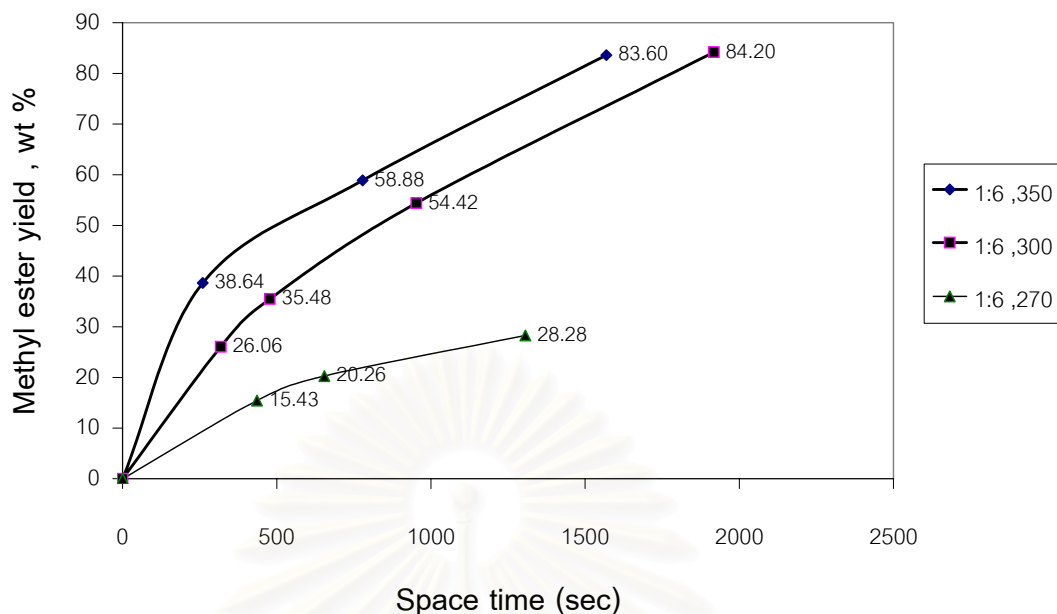




รูปที่ 4.6 ผลของอุณหภูมิต่อการเกิดเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันเมล็ดในปาล์ม  
ที่อัตราส่วนโดยโมล 1: 24



รูปที่ 4.7 ผลของอุณหภูมิต่อการเกิดเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันเมล็ดในปาล์ม  
ที่อัตราส่วนโดยโมล 1: 12



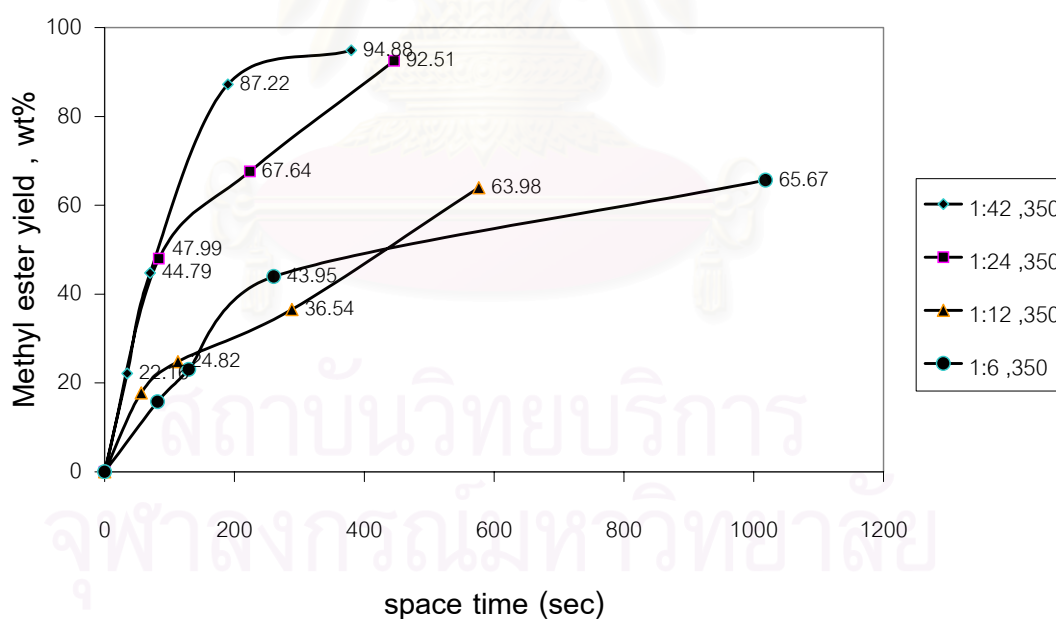
รูปที่ 4.8 ผลของอุณหภูมิต่อการเกิดเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันเมล็ดในปาล์ม  
ที่อัตราส่วนโดยโมล 1: 6

การศึกษาผลของอุณหภูมิทำการทดลองที่อัตราส่วนโดยโมลคงที่ ซึ่งอัตราการไหลโดยมวลของเมทานอล (mass flowrate) ที่เข้าสู่ระบบมีปริมาณเท่ากันทุกการทดลอง เมื่อพิจารณาจากกฎของแก๊สอุดมคติจะเห็นว่าอุณหภูมิมีผลต่อปริมาณของเมทานอลโดยอุณหภูมิสูงเมทานอลจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นซึ่งในระบบที่มีการไหลอย่างต่อเนื่องอัตราการไหลของเมทานอลในระบบจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ทำให้เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยลงดังสมการ (4.3) ถึง (4.5) แต่จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิสูงได้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงกว่าภาวะอุณหภูมิต่ำ ทั้งนี้เพราะเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะมีค่าลดลง โดยค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพันธ์กับความแข็งแรงของพันธะไฮโดรเจนของเมทานอล ซึ่งความแข็งแรงของพันธะไฮโดรเจนจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นและเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความดันแสดงดังรูปที่ 2.4 ดังนั้นร้อยละการเกิดเมทิลเอสเทอร์ที่อุณหภูมิสูงจึงเกิดได้มากกว่า และอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับผลิตเมทิลเอสเทอร์คือ 350 องศาเซลเซียส

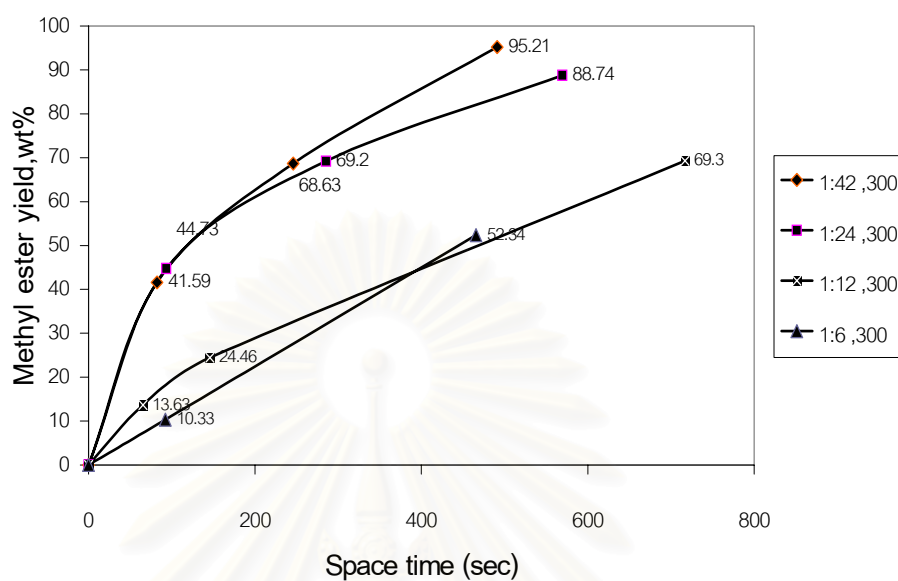
#### 4.3.2. ผลของอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันพืชต่อเมทานอล

จากการทดลองใช้อัตราส่วนของน้ำมันพืชต่อเมทานอลเป็น 1:6 1:12 1:24 และ 1:42 ที่อุณหภูมิคงที่ พบว่าเมื่อสัดส่วนของเมทานอลเพิ่มขึ้น ร้อยละการเกิดเมทิลเอสเทอร์จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน กรณีใช้น้ำมันมะพร้าวเป็นสารตั้งต้นร้อยละการเกิดเมทิลเอสเทอร์ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมล 1:6 1:12 1:24 และ 1:42 มีค่า 50 52 93 และ 95 ตามลำดับ โดยพิจารณาที่เวลาสเปซ 450 วินาที แสดงดังรูปที่ 4.9 ในขณะที่อุณหภูมิอื่นให้ผลเช่นเดียวกัน แสดงดังรูปที่ 4.10 และ 4.11

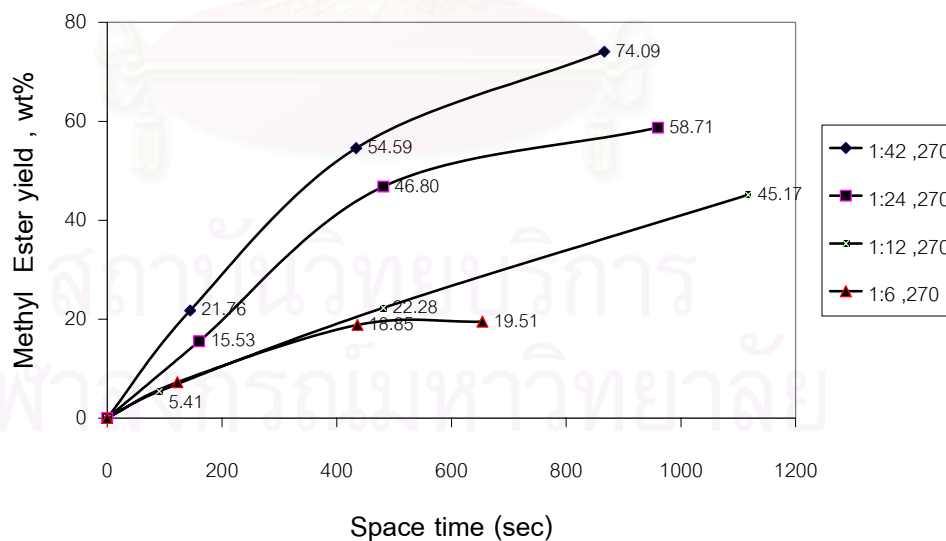
กรณีใช้น้ำมันเมล็ดในปาล์มเป็นสารตั้งต้นพบว่าให้ผลในการทำงานเดียวกับน้ำมันมะพร้าว โดยที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมล 1:6 1:12 1:24 และ 1:42 ให้ร้อยละการเกิดเมทิลเอสเทอร์คือ 48 50 85 และ 96 ตามลำดับ พิจารณาเวลาสเปซที่ 450 วินาที



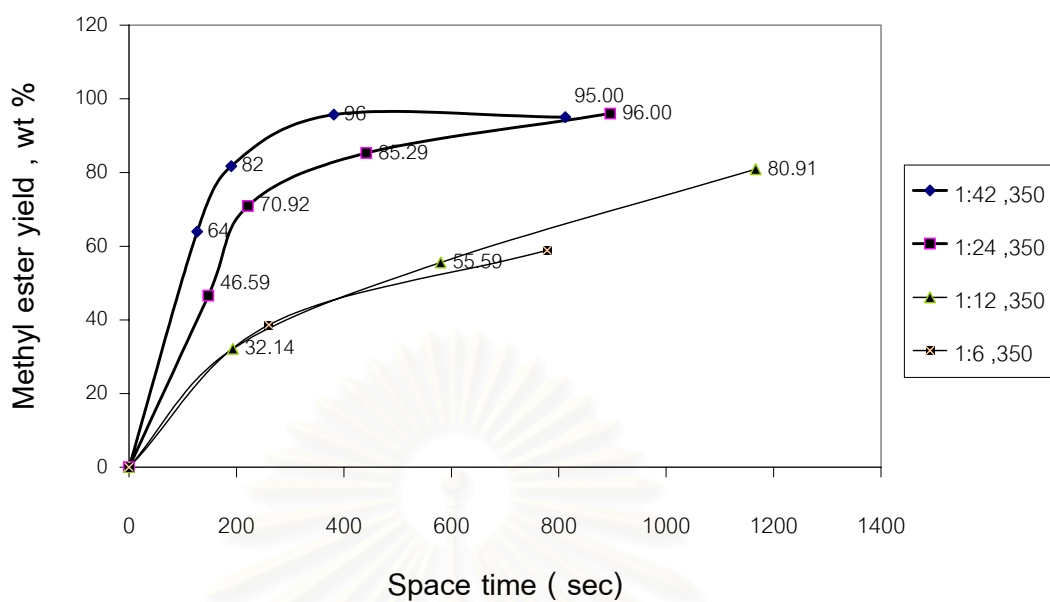
รูปที่ 4.9 ผลของอัตราส่วนโดยโมลต่อการเกิดเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันมะพร้าว  
ที่อุณหภูมิ 350 °C



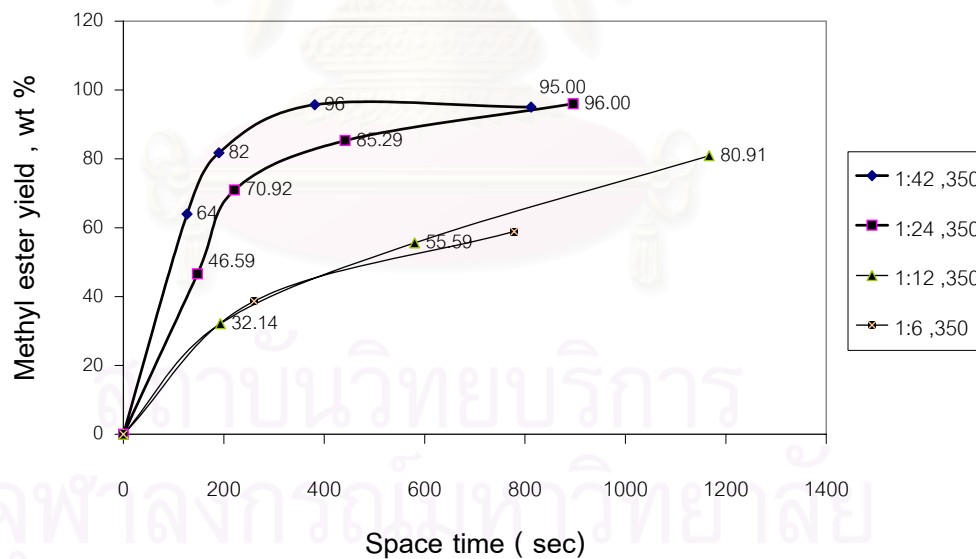
รูปที่ 4.10 ผลของอัตราส่วนโดยโมลต่อการเกิดเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันมะพร้าว ที่อุณหภูมิ 300 °C



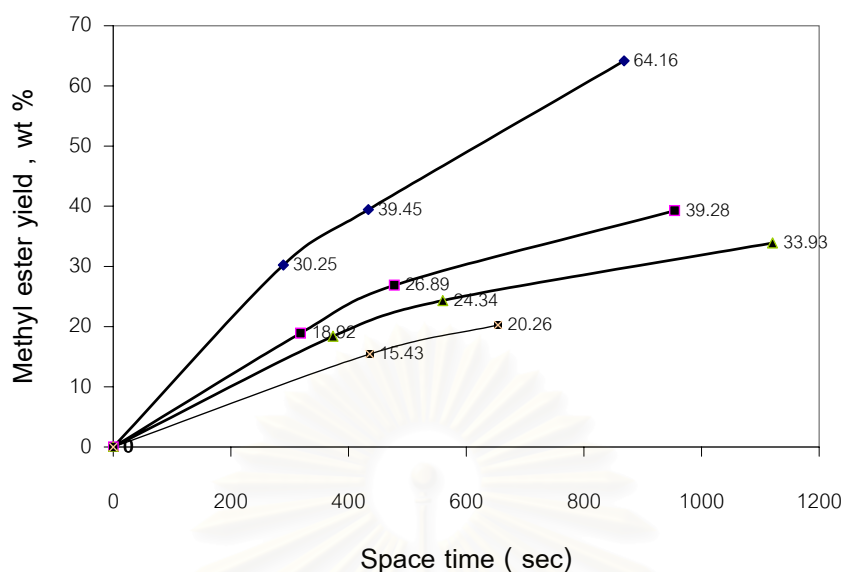
รูปที่ 4.11 ผลของอัตราส่วนโดยโมลต่อการเกิดเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันมะพร้าว ที่อุณหภูมิ 270 °C



รูปที่ 4.12 ผลของอัตราส่วนโดยโมลต่อการเกิดเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันเมล็ดในปาล์ม  
ที่อุณหภูมิ 350 °C



รูปที่ 4.13 ผลของอัตราส่วนโดยโมลต่อการเกิดเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันเมล็ดในปาล์ม  
ที่อุณหภูมิ 300 °C



รูปที่ 4.14 ผลของอัตราส่วนโดยโมลต่อการเกิดเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันเมล็ดในปาล์ม ที่อุณหภูมิ 270 °C

การศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมล ทำการทดลองโดยกำหนดให้อุณหภูมิคงที่ แล้วเปลี่ยนอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันพืชต่อเมทานอล ซึ่งการเปลี่ยนอัตราส่วนโดยโมลเป็นการเปลี่ยนอัตราการไหลเข้าของมวลเมทานอลสู่ระบบ ซึ่งมีผลต่อเวลาในการทำปฏิกิริยาแสดงดังสมการ (4.1) โดยอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลสูง เวลาทำปฏิกิริยาจะน้อยลงเพราะมวลเมทานอลที่เข้าสู่ระบบมาก แต่จากผลการทดลองพบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลสูงร้อยละการเกิดเมทิลเอสเทอร์จะมีค่าสูงกว่าภาวะที่ใช้อัตราส่วนโดยโมลต่ำ ทั้งนี้เนื่องมาจากที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลสูงนั้น โมเลกุลของน้ำมันพืชจะถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของเมทานอลมากกว่า ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการทำปฏิกิริยา โดยอัตราส่วนโดยโมลที่เหมาะสมคือ 1:24 ซึ่งน้ำมันมะพร้าวให้ร้อยละผลได้ถึง 93 และน้ำมันเมล็ดในปาล์มได้ 85 ถึงแม้ที่อัตราส่วนโดยโมล 1:42 จะให้ร้อยละของผลได้มากกว่าแต่ก็ใช้ปริมาณเมทานอลมากกว่า 1 เท่าตัวโดยร้อยละของผลได้ไม่แตกต่างกันมากนักนอกจากนี้จากการทดลองยังพบว่าเมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมล 1:42 เมทานอลจะละลายในน้ำมันพืชไม่หมดซึ่งจะเกิดการแยกชั้นทันทีที่ออกมาจากระบบ เกิดสารเหลือทิ้งที่ต้องบำบัดมากขึ้นทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้นด้วย และยังพบว่าเวลาที่ใช้ในการแยกกลีเซอรอลเมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลสูงมากกว่าการทดลองที่อัตราส่วนโดยโมลต่ำ

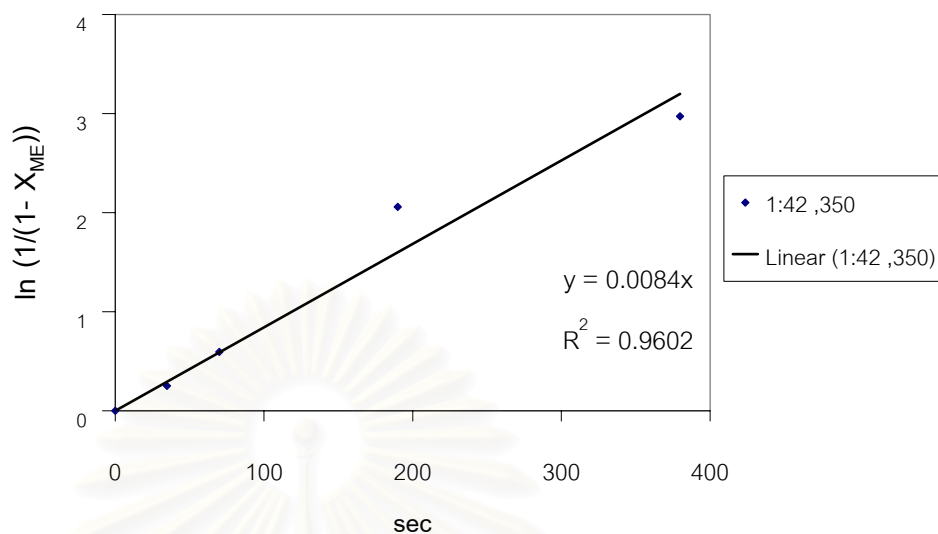
#### 4.4. จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเคมีนั้นกระทำเพื่อหาค่าคงที่อัตราเร็ว แล้วนำไปใช้ในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์โดยทั่วไปนิยมศึกษาโดยใช้กระบวนการแบบกะ เพราะง่ายในการแปลผลที่ได้จากการทดลอง เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลส่วนมากใช้ในการศึกษาปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ และบางครั้งก็ใช้กับปฏิกิริยาเอกพันธ์ด้วยในกรณีที่เครื่องปฏิกรณ์แบบกะไม่สามารถทำได้หรือทำได้แต่ไม่ดีเท่าเช่นปฏิกิริยาที่ได้ผลิตภัณฑ์หลายชนิด และปฏิกิริยาที่เร็วมาก รวมทั้งปฏิกิริยาในวัฏภาคแก๊สด้วย ซึ่งในงานวิจัยนี้การเกิดปฏิกิริยาค่อนข้างเร็วและต้องการปริมาณผลิตภัณฑ์สูงเพื่อนำไปวิเคราะห์สมบัติต่อไปจึงใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล

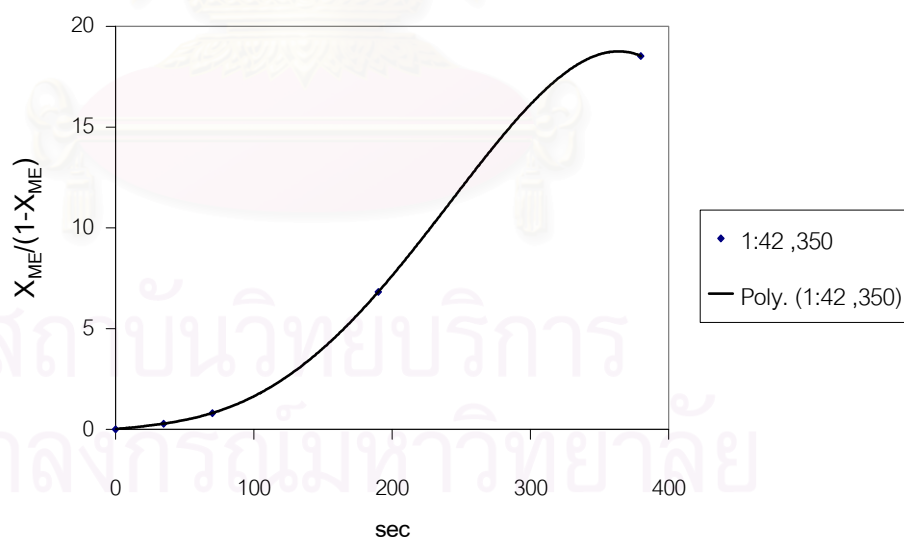
เนื่องจากการทดลองใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลสูง จึงสมมติให้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง โดยติดตามการเปลี่ยนแปลงของไตรกลีเซอไรด์ของกรดไขมันหลักในน้ำมันพืชซึ่งประกอบด้วย ไตรกลีเซอไรด์ของกรด lauric ไตรกลีเซอไรด์ของกรด myristic และไตรกลีเซอไรด์ของกรด palmitic สำหรับน้ำมันมะพร้าวมีกรด lauric 44.56 % myristic 19.08 % และ palmitic 10.04 % ส่วนน้ำมันเมล็ดในปาล์มมีกรด lauric 48.38 % myristic 17.37 % และ palmitic 9.13 % ตามลำดับ

การทดสอบปฏิกิริยาอันดับหนึ่งใช้วิธีอินทิกรัล เขียนกราฟระหว่าง  $\ln\left(\frac{1}{1-X_A}\right)$  กับ เวลา โดยค่าความชันที่ได้คือค่าคงที่อัตราเร็ว (k) มีหน่วยเป็น (วินาที)<sup>-1</sup>

ผลการเขียนกราฟพบว่าทุกภาวะที่ทำการทดลองให้กราฟเป็นเส้นตรง แสดงว่าปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ภาวะต่างๆเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับอุณหภูมิและความเข้มข้นของไตรกลีเซอไรด์ การทดสอบเพื่อหาอันดับปฏิกิริยากรณีใช้น้ำมันมะพร้าวและน้ำมันเมล็ดในปาล์มเป็นสารตั้งต้นที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมล 1:42 แสดงดังรูปที่ 4.15 4.16 4.17 และ 4.18 ส่วนค่าคงที่อัตราเร็วที่ภาวะต่างๆของน้ำมันมะพร้าวและน้ำมันเมล็ดในปาล์มแสดงดังตารางที่ 4.4 และ 4.5

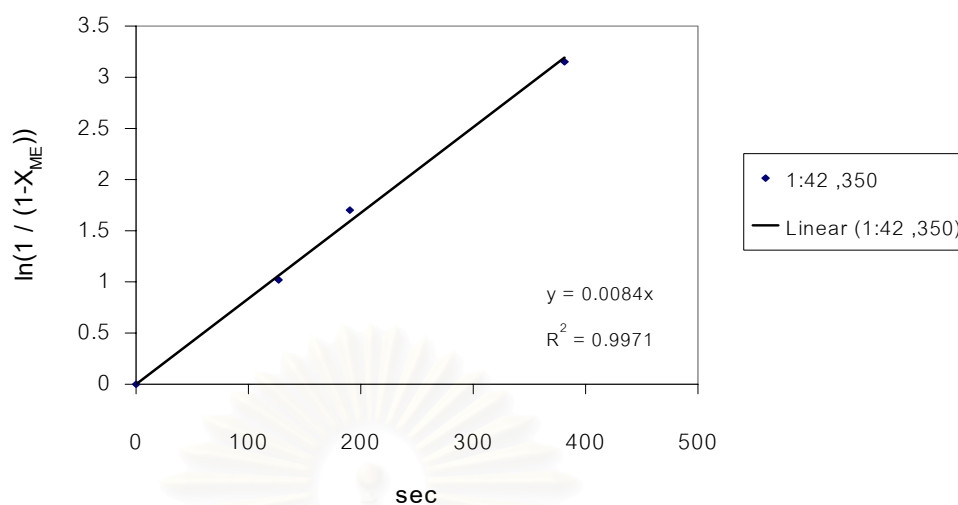


รูปที่ 4.15 การทดสอบปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเมื่อใช้น้ำมันมะพร้าวเป็นสารตั้งต้นที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมล 1:42

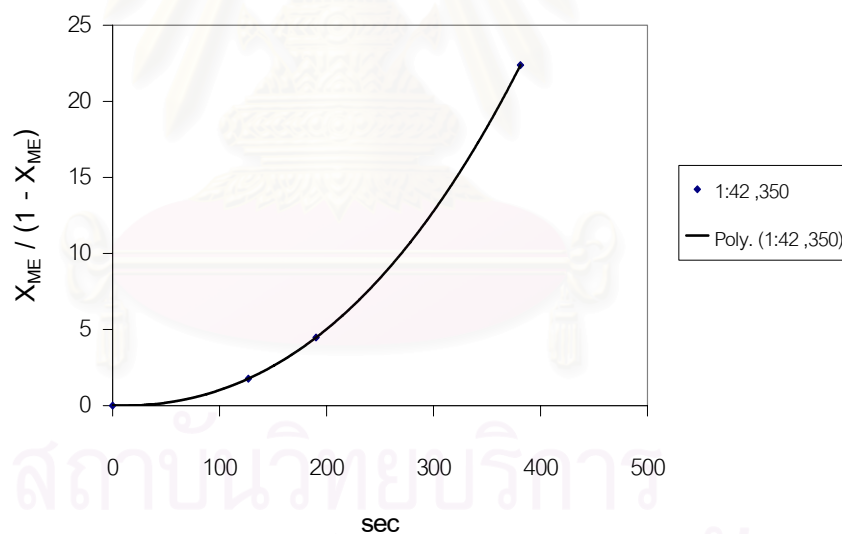


รูปที่ 4.16 การทดสอบปฏิกิริยาอันดับสองเมื่อใช้น้ำมันมะพร้าวเป็นสารตั้งต้นที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมล 1:42





รูปที่ 4.17 การทดสอบปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเมื่อน้ำมันเมล็ดในปาล์มเป็นสารตั้งต้นที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมล 1:42



รูปที่ 4.18 การทดสอบปฏิกิริยาอันดับสองเมื่อน้ำมันเมล็ดในปาล์มเป็นสารตั้งต้นที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมล 1:42

ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่อัตราเร็ว ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันมะพร้าวที่อุณหภูมิ และอัตราส่วนโดยโมลต่างๆ

อุณหภูมิ °C	k (s) <sup>-1</sup>			
	1:6	1:12	1:24	1:42
270	2 × 10 <sup>4</sup>	4 × 10 <sup>4</sup>	7 × 10 <sup>4</sup>	1.4 × 10 <sup>3</sup>
300	8 × 10 <sup>4</sup>	1.9 × 10 <sup>3</sup>	3.4 × 10 <sup>3</sup>	5.4 × 10 <sup>3</sup>
350	1 × 10 <sup>3</sup>	1.8 × 10 <sup>3</sup>	4.7 × 10 <sup>3</sup>	8.4 × 10 <sup>3</sup>

ตารางที่ 4.5 ค่าคงที่อัตราเร็ว ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันเมล็ดในปาล์มที่ อุณหภูมิและอัตราส่วนโดยโมลต่างๆ

อุณหภูมิ °C	k (s) <sup>-1</sup>			
	1:6	1:12	1:24	1:42
270	1.0 × 10 <sup>4</sup>	3.0 × 10 <sup>4</sup>	4.0 × 10 <sup>4</sup>	1.0 × 10 <sup>3</sup>
300	6.0 × 10 <sup>4</sup>	1.0 × 10 <sup>3</sup>	2.4 × 10 <sup>3</sup>	5.9 × 10 <sup>3</sup>
350	8.0 × 10 <sup>4</sup>	1.1 × 10 <sup>3</sup>	4.1 × 10 <sup>3</sup>	8.4 × 10 <sup>3</sup>

จะเห็นว่าค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันมะพร้าว และ น้ำมันเมล็ดในปาล์มมีค่าใกล้เคียงกัน โดยค่าคงที่อัตราเร็วขึ้นกับอุณหภูมิและความเข้มข้นของ ไตรกลีเซอไรด์

#### 4.5. ผลของอุณหภูมิต่ออัตราเร็วของปฏิกิริยา

อัตราเร็วของปฏิกิริยาเคมีขึ้นกับอุณหภูมิและองค์ประกอบของสารเขียนได้เป็น

$$r_A = f_1(\text{อุณหภูมิ}) * f_2(\text{องค์ประกอบ})$$

$$r_A = k \cdot f_2(\text{องค์ประกอบ})$$

จากการทดลองพบว่าค่าคงที่อัตราเร็วขึ้นกับอุณหภูมิ โดยมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ ดัง ตารางที่ 4.4 และ 4.5 ซึ่งเป็นไปตามกฎของอาร์เรเนียส จึงสามารถหาค่าพลังงานกระตุ้นได้ กฎของอาร์เรเนียส

$$k = k_0 e^{\frac{-E}{RT}}$$

$$\ln k = \ln k_0 - \frac{E}{RT}$$

ค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) หาได้โดยการเขียนกราฟ ระหว่าง  $\ln k$  กับ  $1/T$  โดยผลของค่าพลังงานกระตุ้นแสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าพลังงานกระตุ้นสำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่อัตราส่วนโดยโมลต่างๆ

อัตราส่วนโดยโมล	$E_a$ (kcal / mol)	
	น้ำมันมะพร้าว	น้ำมันปาล์ม
1:6	32.40	32.40
1:12	16.70	17.30
1:24	15.20	18.67
1:42	13.70	16.29

ตารางที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ภาวะอัตราส่วนโดยโมล 1:6 มีค่ามากที่สุด รองลงมาเป็น 1:12 1:24 และ 1:42 ตามลำดับ โดยปฏิกิริยาที่มีค่าพลังงานกระตุ้นสูงจะเกิดยากกว่าปฏิกิริยาที่มีพลังงานกระตุ้นต่ำ ดังนั้นปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่อัตราส่วนโดยโมล 1:42 จึงเกิดได้ง่ายกว่าและใช้พลังงานภายนอกน้อยกว่าในการเกิดปฏิกิริยาที่ร้อยละผลได้เดียวกัน

#### 4.6. ผลการศึกษาสมบัติของเมทิลเอสเทอร์

เมทิลเอสเทอร์เป็นสารประกอบที่ได้จากการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันพืชกับเมทานอล เพื่อใช้ทดแทนน้ำมันดีเซล ดังนั้นสมบัติของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จำเป็นต้องทำการศึกษาก่อนนำไปใช้เพื่อป้องกันถึงผลกระทบที่มีต่อเครื่องยนต์ภายหลังจากการใช้เชื้อเพลิงชนิดนี้ ซึ่งในปัจจุบันมีการกำหนดมาตรฐานของเมทิลเอสเทอร์หรือที่รู้จักกันในชื่อไบโอดีเซลแล้ว แสดงดัง

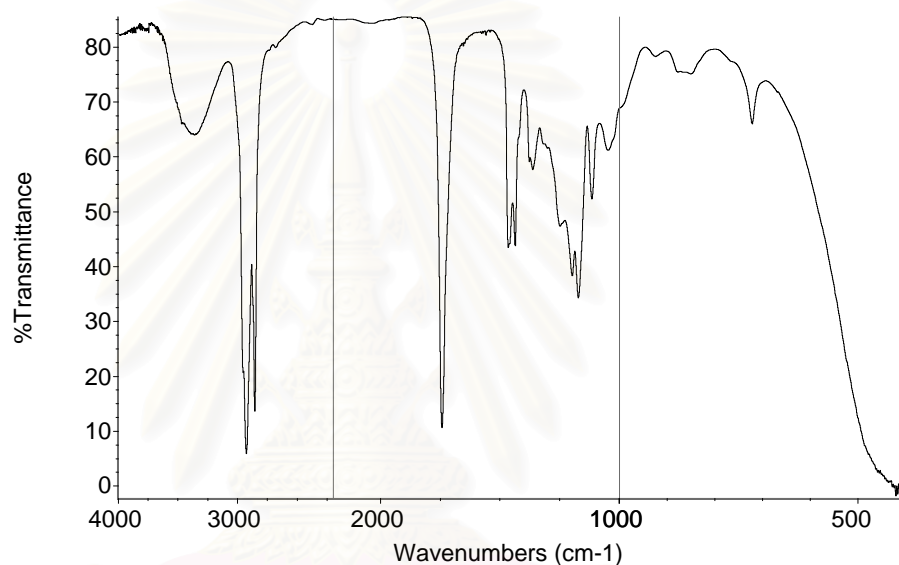
ตารางที่ 4.7

สมบัติของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากน้ำมันพืชทั้งสองชนิดมีค่าตรงตามมาตรฐานของไบโอดีเซลและน้ำมันดีเซลหมุนช้า ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติของน้ำมันพืชที่ใช้เป็นสารตั้งต้นแล้วพบว่าการนำน้ำมันพืชมาผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันสามารถลดความหนืดและจุดวาบไฟของน้ำมันพืชชนิดนั้นได้และสามารถใช้ผลิตภัณฑ์นี้ทดแทนน้ำมันดีเซลได้ในอนาคต โดยเหมาะสม

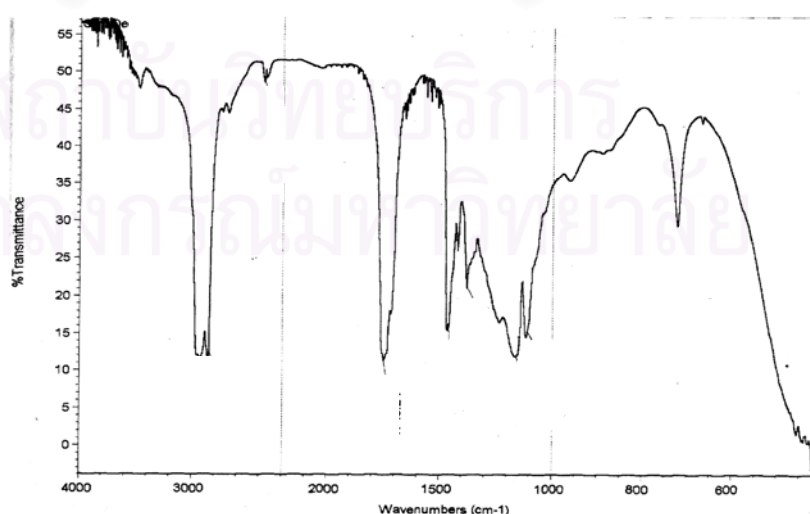
กับเครื่องวัดความเร็วรอบต่ำทั้งนี้เพราะเมทิลเอสเทอร์ที่ได้มีค่าความร้อนและค่าดรรชนีชี้เท  
นต่ำกว่าน้ำมันดีเซล อาจเกิดปัญหาเร่งเครื่องยนต์ไม่ขึ้นเมื่อใช้กับเครื่องวัดความเร็วรอบสูง

#### 4.6.1. การวิเคราะห์โครงสร้างของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยวิธี FTIR ( Fourier Transform Infrared Spectrometer )

โครงสร้างของเมทิลเอสเทอร์ประกอบด้วยหมู่คาร์บอนิลและเมทิลโดยหมู่เมทิลจะดูดซับคลื่น  
แสงอินฟราเรดที่ความยาวคลื่น  $2,975 - 2,950 \text{ cm}^{-1}$  ลักษณะพีคจะมีลักษณะใหญ่ (strong) และที่  
ความยาวคลื่น  $2,885 - 2,865 \text{ cm}^{-1}$  ลักษณะพีคมีขนาดเล็ก (weak) ส่วนหมู่คาร์บอนิลจะดูดซับ  
ความยาวคลื่นที่  $1,750 - 1,735 \text{ cm}^{-1}$  แสดงดังรูปที่ 4.19 และ 4.20



รูปที่ 4.19 โคโรมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันมะพร้าว



รูปที่ 4.20 โคโรมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันเมล็ดในปาล์ม

จากโครมาโทแกรมแสดงให้เห็นว่าเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากน้ำมันเมล็ดในปาล์มและน้ำมันมะพร้าวมีโครงสร้างเป็นสารประกอบเอสเทอร์จริง โดยโครมาโทแกรมทั้งคู่มีลักษณะคล้ายกันเนื่องมาจากกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของน้ำมันทั้งสองชนิดเหมือนกัน

ตารางที่ 4.7 สมบัติของเมทิลเอสเทอร์ที่อัตราส่วนโดยโมล 1:24 อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับ มาตรฐานน้ำมันดีเซล และไบโอดีเซล

สมบัติ	มาตรฐานของน้ำมันดีเซลหมุนช้า และไบโอดีเซล			ดีเซลหมุนช้า	ไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าว	ไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดในปาล์ม
	วิธีทดสอบ	ดีเซลหมุนช้า	ไบโอดีเซล			
ค่าความถ่วงจำเพาะที่ 15.6 °C	ASTM D 1298	0.92 max.	-	0.836	0.8796	0.8801
ดรรชนีซีเทน	ASTM D 976	45 min.	40 min.	55	42	44
จุดวาบไฟ °C	ASTM D 93	52 min.	100 min.	77	120	156
ค่าความร้อน MJ / kg	ASTM D 240	45.2 min.	-	46.0	39.4	38.3
ค่าความหนืด ที่ 40 °C	ASTM D 445	8 max.	1.9 – 6.5	3.4	3.81	4.8

#### 4.6.2. การเปรียบเทียบผลการทดลองกับงานวิจัยที่ผ่านมา

การผลิตเมทิลเอสเทอร์โดยวิธีปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันไม่ใช่วิธีใหม่ แต่ได้ใช้มาตั้งแต่ปี 1986 และได้พัฒนาเรื่อยมาจนในระยะ 2 – 3 ปีที่ผ่านมาได้เกิดแนวความคิดที่เข้มงวด ทนภาวะเหนือวิกฤตแทนตัวเร่งปฏิกิริยาดังตารางที่ 4.8 เมื่อเปรียบเทียบผลงานวิจัยที่ผ่านมาแล้วกับผลงานวิจัยนี้พบว่ากระบวนการที่ใช้แตกต่างกัน โดยงานวิจัยที่ผ่านมาแล้วใช้กระบวนการแบบไม่ต่อเนื่อง โดยได้ผลได้ 95 % ส่วนงานวิจัยนี้ใช้กระบวนการแบบต่อเนื่องเครื่องปฏิกรณ์เป็นแบบท่อไหล ได้ร้อยละผลได้ 92 สำหรับน้ำมันมะพร้าว และ 90 สำหรับน้ำมันเมล็ดในปาล์ม ที่ภาวะเดียวกัน งานวิจัยที่ผ่านมาเลือกภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลิตเมทิลเอสเทอร์ที่อุณหภูมิ 350 องศา

เซลเซียส อัตราส่วนโดยโมล 1:42 แต่งานวิจัยนี้เลือกภาวะที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสเช่นกัน แต่อัตราส่วนโดยโมลเลือกที่ 1:24 ทั้งนี้เพราะคำนึงถึงเมทานอลที่เหลือซึ่งถือว่าเป็นของเสียที่ออกจากระบบชนิดหนึ่งที่ต้องทำการบำบัดก่อนนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งจะทำให้เสียค่าใช้จ่ายในส่วนนี้เพิ่มขึ้น ที่ภาวะนี้ได้เมทิลเอสเทอร์ 90 % สำหรับน้ำมันมะพร้าว และ 85 % สำหรับน้ำมันเมล็ดในปาล์ม ที่เวลาสเปซ 400 วินาที จากตารางที่ 4.8 จะเห็นว่าร้อยละของเมทิลที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ผ่านมา แต่มีค่าต่ำกว่าเล็กน้อยเนื่องจากเครื่องปฏิกิริยาที่ใช้เป็นคนละประเภทและน้ำมันพืชที่ใช้ก็ต่างชนิดกัน



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.8 การเปรียบเทียบผลการทดลองของงานวิจัยนี้กับงานวิจัยที่ผ่านมา

Title	Author	Year	System	Reactants	condition	%yield	$\square$ mm <sup>2</sup> /s	CI	FP ° C
1. Biodiesel fuel from rapeseed oil as prepared in supercritical methanol [12]	S.Saka , D.Kusdiana	2001	Batch	Rapeseed oil / MeOH	1:42,350°C ,19 MPa ,240 sec	95	-	-	-
2. Biodiesel from vegetable oils via transesterification in supercritical methanol [14]	Ayhan Demirbas	2002	Batch	Cottnseed oil / MeOH	1:41,250°C , 200 sec	95	-	-	-
3. Experimental production of biodiesel from vegetable oil as prepared in supercritical methanol by continuous process	This work	2002	continuous	Coconut oil / MeOH	1:42,350°C ,19 MPa ,240 sec	92			
					1:42,350°C ,19 MPa ,400sec	95	3.81	42	120
					1:24,350°C ,19 MPa ,400sec	90	3.84	42	123
				Palm kernel oil / MeOH	1:42,350°C ,19 MPa ,240 sec	90			
					1:42,350°C ,19 MPa ,400sec	96	3.81	42	148
					1:24,350°C ,19 MPa ,400sec	85	4.8	43	156

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชในภาวะเหนือวิกฤตของเมทานอลโดยกระบวนการแบบต่อเนื่อง เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมและศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันในภาวะเหนือวิกฤตสรุปผลได้ดังนี้

#### 5.1. สรุปผลการทดลอง

5.1.1. ภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลิตเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันมะพร้าวและน้ำมันเมล็ดในปาล์มในภาวะเหนือวิกฤตของเมทานอลโดยกระบวนการแบบต่อเนื่อง คืออุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความดัน 19 เมกะปาสคัล อัตราส่วนโดยโมล 1:24 เวลาสเปซ 400 วินาที (6.67 นาที) โดยได้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ร้อยละ 90 สำหรับน้ำมันมะพร้าว และร้อยละ 85 สำหรับน้ำมันเมล็ดในปาล์ม

5.1.2. สมการอัตราเร็วของการผลิตเมทิลเอสเทอร์อยู่ในรูป

$$r_{ME} = k \cdot C_{TG}$$

หรือ

อัตราการผลิตเมทิลเอสเทอร์ = (ค่าคงที่อัตราเร็ว)(ความเข้มข้นของไตรกลีเซอไรด์)

ซึ่งเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง สมการอัตราเร็วของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันมะพร้าวและน้ำมันเมล็ดในปาล์มให้ผลเช่นเดียวกัน โดยอัตราเร็วในการผลิตเมทิลเอสเทอร์ขึ้นกับอุณหภูมิและความเข้มข้นของไตรกลีเซอไรด์ และที่ภาวะที่เหมาะสมค่าคงที่อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันมะพร้าวมีค่า 0.0047 วินาที<sup>-1</sup> และน้ำมันเมล็ดในปาล์มมีค่า 0.0041 วินาที<sup>-1</sup> ค่าคงที่อัตราเร็วในการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันพืชทั้งสองชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากน้ำมันทั้งสองชนิดมีชนิดและปริมาณกรดไขมันใกล้เคียงกัน โดยน้ำมันมะพร้าวมี กรด lauric 44.56 % myristic 19.08 % palmitic 10.04 % oleic 8.8 % caprylic 5.75 % capric 5.09 % stearic 3.57 % linoleic 2.72 % และ caproic 0.39 % ส่วนน้ำมันเมล็ดในปาล์มมีกรด lauric 48.38 % myristic 17.37 % palmitic 9.13 % oleic 12.56 % caprylic 3.77 % capric 3.67 % stearic 2.72 % และ linoleic 2.40 %



5.1.3. ผลของอุณหภูมิต่อค่าคงที่อัตราเร็วเป็นไปตามสมการของอาร์เรเนียส โดยค่าคงที่อัตราเร็วเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและที่ภาวะที่เหมาะสมปฏิกิริยาที่ใช้ไขมันมะพร้าวเป็นสารตั้งต้นมีค่าพลังงานกระตุ้น 15.2 kcal / mol ส่วนน้ำมันเมล็ดในปาล์มมีค่า 18.67 kcal / mol

5.1.4. เมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากภาวะที่เหมาะสมมีสมบัติทางเชื้อเพลิงอยู่ในส่วนกำหนดของมาตรฐานไบโอดีเซลและน้ำมันดีเซลหมุนช้า โดยมีความหนืดใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลหมุนช้า ความหนืดของน้ำมันดีเซลหมุนช้ามีค่า 3.4 mm<sup>2</sup>/s ส่วนเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันมะพร้าวและน้ำมันเมล็ดในปาล์มมีค่า 3.8 และ 4.8 mm<sup>2</sup>/s ตามลำดับ ในขณะที่จุดวาบไฟของผลิตภัณฑ์ทั้งสองมีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซลหมุนช้า โดยน้ำมันดีเซลหมุนช้ามีจุดวาบไฟ 77° C ส่วนเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันมะพร้าวและน้ำมันเมล็ดในปาล์มมีค่า 120 และ 156 ° C ตามลำดับ ผลิตภัณฑ์นี้จึงมีความปลอดภัยในการจัดเก็บและขนส่งมากกว่าน้ำมันดีเซล ส่วนดรรชนีซีเทนของผลิตภัณฑ์ทั้งสองมีค่าน้อยกว่าดรรชนีซีเทนของน้ำมันดีเซลหมุนช้า โดยมีค่า 42 และ 44 สำหรับเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันมะพร้าวและน้ำมันเมล็ดในปาล์มตามลำดับ ในขณะที่น้ำมันดีเซลหมุนช้ามีดรรชนีซีเทนเป็น 55

5.1.5. น้ำมันพืชที่มีกรด oleic เป็นองค์ประกอบอยู่สูง จะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันในภาวะเหนือวิกฤตของเมทานอลได้ ซึ่งจะก่อปัญหาการอุดตันของระบบจาก tristearin ที่เกิดขึ้น ดังนั้น น้ำมันพืชที่เหมาะสมในการทดลองในภาวะนี้ต้องเป็นน้ำมันพืชที่มีกรดไขมันอิ่มตัวสูง เช่นน้ำมันมะพร้าวและน้ำมันเมล็ดในปาล์ม ซึ่งประเทศไทยมีปริมาณการผลิตพืชน้ำมันทั้งสองชนิดสูงอยู่แล้ว จึงไม่ก่อปัญหาการขาดแคลนวัตถุดิบเมื่อต้องใช้น้ำมันพืชทั้งสองชนิดมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันดีเซล สำหรับประเทศไทยเพาะปลูกพืชน้ำมัน 6 ชนิดคือ ปาล์ม น้ำมัน มะพร้าว ถั่วเหลือง ถั่วลิสง ละคร และงา โดยปาล์มน้ำมันมีปริมาณการเพาะปลูกมากที่สุดทุกปี ซึ่งในบางปีมีทั้งนำเข้าและส่งออก ในขณะที่น้ำมันมะพร้าวมีการนำเข้าในปริมาณน้อยมาก ส่วนใหญ่เป็นการส่งออก ดังนั้นความเป็นไปได้ในการใช้น้ำมันพืชผลิตเป็นเชื้อเพลิงยังคงสูงอยู่ ซึ่งน้ำมันที่มีศักยภาพในการผลิตเป็นเชื้อเพลิงในประเทศไทยคือน้ำมันมะพร้าว และน้ำมันปาล์ม

## 5.2. ข้อเสนอแนะ

5.2.1. ควรนำกลีเซอรอลมาทำให้บริสุทธิ์ แล้ววิเคราะห์ปริมาณที่ได้ เพื่อใช้คำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการผลิตไบโอดีเซลในเมทานอลภาวะเหนือวิกฤตโดยกระบวนการแบบต่อเนื่อง

5.2.2. ควรใช้น้ำมันพืชที่มีค่ากรดต่ำซึ่งจะลดปริมาณควันที่เกิดขึ้นในระบบได้

5.2.3. ผลผลิตจากระบบที่ปราศจากตัวเร่งปฏิกิริยา มีข้อดีที่ไม่ต้องแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออก แต่ผลผลิตที่ได้จะออกมาเป็นเนื้อเดียวกับเมทานอลและกลีเซอรอลซึ่งเป็นผลผลิตที่ร่วม ดังนั้นเมื่อทดลองโดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลสูงกลีเซอรอลจะแยกตัวออกมามาก ทั้งนี้เพราะกลีเซอรอลสามารถละลายได้ในเมทานอลที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา ดังนั้นเพื่อให้กลีเซอรอลแยกชั้นจึงต้องทำการกำจัดเมทานอลออกจากเมทิลเอสเทอร์ก่อน แล้วทิ้งผลผลิตไว้เพื่อให้กลีเซอรอลตกลงมา การกำจัดเมทานอลสำหรับระบบที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถทำได้โดยใช้ rotary evaporator อุณหภูมิไว้ 35 – 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที สำหรับตัวอย่างครั้งละประมาณ 250 มิลลิลิตร



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

1. ปราโมทย์ ไชยเวช . ปิโตรเลียมเทคโนโลยี , กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์สุนทรอภเชต , 2537 , หน้า 80-89.
2. สมชาย ไอสวรรณ. จลนพลศาสตร์วิศวกรรมเคมี , กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์ใจทอง , 2532 , หน้า 1 – 86.
3. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ. เทอร์โมไดนามิกส์วิศวกรรมเคมี , กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2538 , หน้า 12 – 30.
4. ไพจิตร จันทรวงศ์ . คู่มือการใช้ประโยชน์และตรวจสอบคุณภาพของน้ำมันและน้ำมันพืช 52 ชนิด , สายงายเคมีพืชน้ำมันและสารธรรมชาติ กองเกษตรเคมี กรมวิชาการเกษตร , 2530 , หน้า 14-17 , 68-69 , และ 117-118.
5. ศศิเกษม ทองยงค์ และ พรรณี เดชกำแหง. เคมีอาหารเบื้องต้น , กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์ , 2530 , หน้า 119 – 142.
6. แม้น อมรสิทธิ์ และ อมร เพชรสม. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ , กรุงเทพมหานคร : ห้างหุ้นส่วนชวนพิมพ์ , 2534 , หน้า 108 – 188 และ 714 – 789.
7. พิสมัย เจนวนิชปัญจกุล . ไบโอดีเซล : พลังงานทางเลือก ? . กรุงเทพมหานคร : ฝ่ายสิ่งแวดล้อม นิเวศวิทยาและพลังงาน สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย , 2544. (อัดสำเนา)
8. กัญญา บุญเกียรติ และ สุกัญญา มากมี. ไบโอดีเซล : พลังงานทางเลือกใหม่สำหรับเครื่องยนต์ดีเซล , วารสารวิทยาศาสตร์ , 3 ( พฤษภาคม – มิถุนายน , 2544 ) , หน้า 148 – 152.
9. Nouredini, H., Harkey, D., and Medikonduru, V. A Continuous Process for the Conversion of Vegetable Oils into Methyl Esters of Fatty Acids. JAOCS 75 (1998) : 1775 – 1783.
10. Diasakou, M., Louloudi, A., and Papayannakoa, N. Kinetics of the non – catalytic transesterification of soybean oil. Fuel 77 ( 1998 ) : 1297 – 1302.
11. Darnoko, D., and Cheryan, M. Kinetics of Plam Oil Transesterification in a Batch Reactor. JAOCS 77 ( 2000 ) : 1263 – 1267.
12. Kusdiana, D., and Saka, S. Kinetics of transesterification in rapeseed oil to biodiesel fuel as treated in supercritical methanol. Fuel 80 ( 2001 ) : 693 – 698.

13. SaKa, S., and Kusdiana, D. Biodiesel fuel from rapeseed oil as prepared in supercritical methanol. Fuel 80 ( 2001 ) : 225 – 231.
14. Demirbas, A. Biodiesel from vegetable oils via transesterification in supercritical methanol. Energy Conversion and Management 43 ( 2002 ) : 2349 – 2359.
15. Yusuf, A., Hanna, M.A. Alternative diesel fuels from vegetable oils. Bioresource Technology 50 ( 1994 ) :153-163.
16. Praveen, R.M., Scott, C. B., and Nouredini, H. Improved conversion of plant oils and animal fats into Biodiesel and co-product. Bioresource Technology 56 (1996) : 19 - 24.
17. Foidl, N. , Foidl, G., Sanchez, M., Mittelbach, M., and Hackel, S. Jatropha Curcus L.as a source for the production of biofuel in Nicaragua. Bioresource Technology 58 ( 1996 ) :77-82.
18. Freedman, B., Butterfield, R.O., and Pryde E. H. Transesterification kinetic of soybean oil. JAOCS 63 (1986) : 1375 – 1380.
19. Michael, A.J., and Jerry, W.K. Methanolysis of Seed Oils in Flowing Supercritical Carbon Dioxide. JAOCS 73 (1996) : 353 – 356.
20. Nimcevic, D., Puntigum, R., Worgetter, M., and Richard, G.J. Preparation of Rapeseed Oil Esters of Lower Aliphatic Alcohols. JAOCS 77 (2000) : 275 – 280.
21. Korbitz, W. Biodiesel Production in Europe and North America an Encouraging Prospect. Renewable Energy 16 (1999) : 1078 – 1083.
22. Luque de Castro, M.D., Valcarcel, M., and Tena, M.T. Analytical Supercritical Fluid Extraction. Germany : Springer – Verlag Berlin Heidelberg, 1994.
23. ASTM Standard , D86. Distillation of Petroleum Products : American society for testing and materials. U.S.A.,1989.
24. ASTM Standard, D 93. Flash Point by Pensky-Martens Closed Tester : American society for testing and materials. U.S.A.,1989.
25. ASTM Standard, D 240. Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuel By Bomb Calorimeter : American society for testing and materials. U.S.A.,1989.
26. ASTM Standard, D 445. Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids : American society for testing and materials. U.S.A.,1989.

27. ASTM Standard, D 976. Calculated Cetane Index of Distillate Fuels : American society for testing and materials. U.S.A.,1989.
28. ASTM Standard, D 1298. API Gravity of Crude Petroleum and Petroleum products by Hydrometer Method : American society for testing and materials. U.S.A.,1989.
29. ASTM Standard, PS 121 - 93. Provisional Specification for Biodiesel Fuel (B 100) Blend Stock for Distillate Fuel : American society for testing and materials. U.S.A.,1999.
30. AOCS Official Method, Cd – 3d – 63 , Acid Value : American Oil Chemical Society. U.S.A., 1997.
31. AOCS Official Method, Cd – 3b – 73 , Saponification Value : American Oil Chemical Society. U.S.A., 1997.
32. AOCS Official Method, Ce – 2 – 66 , Preparation of Methyl Esters of Fatty Acids : American Oil Chemical Society. U.S.A., 1997.
33. Smith, J.M., Chemical Engineering Kinetics, 3<sup>rd</sup> ed., McGraw – Hill, New York, 1972.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

### การวิเคราะห์สมบัติสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์

#### 1. การหาค่ากรด (Acid Value) AOCS Official Method Cd – 3D - 63

##### 1.1 เครื่องมือ

- 1.1.1 ขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 1.1.2 บิวเรต (burette) ขนาด 25 มิลลิลิตร

##### 1.2 สารเคมี

- 1.2.1 สารละลายผสมระหว่างเอทานอลกับไดเอทิลอีเทอร์ อัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดยปริมาตร ทำให้เป็นกลางด้วยสารละลายโปรแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้ฟีนอล์ฟทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์
- 1.2.2 สารละลายโปรแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.1 นอ้มลในเอทานอล
- 1.2.3 สารละลายฟีนอล์ฟทาลีน 10 กรัม ในเอทานอล 1 ลิตร

##### 1.3 วิธีการทดลอง

- 1.3.1. ชั่งตัวอย่าง 10 –20 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 1.3.2. เติมสารละลายผสมระหว่างเอทานอลกับไดเอทิลอีเทอร์ 150 มิลลิลิตร
- 1.3.3. ไตเตรตด้วยสารละลายโปรแทสเซียมไฮดรอกไซด์จนกระทั่งสารที่ได้เป็นสีชมพูอ่อน

##### 1.4 การคำนวณค่ากรด

$$\text{ค่ากรด} = (56.1 \times T \times V) / m$$

โดย V = ปริมาตรของสารละลายโปรแทสเซียมไฮดรอกไซด์ , มิลลิลิตร  
 T = ความเข้มข้นของสารละลายโปรแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ,นอ้มล

m = น้ำหนักตัวอย่าง , กรัม

## 2. การหาค่าสaponification Value (Saponification Value) AOCS Official Method Cd – 3b – 76

### 2.1 เครื่องมือ

- 2.1.1. ขวดก้นกลมขนาด 250 มิลลิลิตร
- 2.1.2. รีฟลักคอนเดนเซอร์ (Reflux condensors) ยาว 30 เซนติเมตร
- 2.1.3. ปิเปต ขนาด 25 มิลลิลิตร
- 2.1.4. บิวเรต ขนาด 50 มิลลิลิตร
- 2.1.5. เตาให้ความร้อน (Heating metal)

### 2.2 สารเคมี

- 2.2.1. สารละลายโปแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.5 นอ้มล ในเอทานอล
- 2.2.2. สารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.5 นอ้มล
- 2.2.3. ฟีนอล์ฟทาลีน อินดิเคเตอร์

### 2.3 วิธีทดลอง

- 2.3.1. ชั่งตัวอย่างน้ำมันพืช 1 – 2 กรัม ใส่ขวดก้นกลมขนาด 250 มิลลิลิตร
- 2.3.2. เติมสารละลายโปแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 25 มิลลิลิตร โดยใช้ปิเปต
- 2.3.3. รีฟลักเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- 2.3.4. เติมสารละลายฟีนอล์ฟทาลีนขณะยังร้อน แล้วไตเตรตด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่ทราบความเข้มข้นแน่นอน จนกระทั่งสารละลายใส
- 2.3.5. ทำ การทดลองซ้ำโดยไม่ใช้ตัวอย่าง (blank) ด้วยวิธีเดียวกัน

### 2.4 การคำนวณ

$$\text{ค่าสaponification Value} = (56.1 \times T \times (V_0 - V_1)) / m$$

- โดย  $V_0$  = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้กับ blank , มิลลิลิตร
- $V_1$  = ปริมาตรกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้กับตัวอย่าง , มิลลิลิตร
- $T$  = ความเข้มข้นที่แน่นอนของกรดไฮโดรคลอริก , นอ้มล
- $m$  = น้ำหนักตัวอย่าง , กรัม



3. ค่าความถ่วงจำเพาะ (API , ASTM D1298 Standard Test Method for API Gravity of Crude Petroleum and Petroleum products by Hydrometer method)

3.1. เทน้ำมันที่ต้องการจะทดสอบปริมาณ 800 ml. ลงในกระบอกวัดปริมาตรขนาด 1,000 มิลลิลิตร

3.2. นำกระบอกวัดปริมาตรที่มีน้ำมันบรรจุอยู่ใส่ลงไปใต้น้ำเย็นเพื่อลดอุณหภูมิ

3.3. ลดอุณหภูมิของน้ำมันในกระบอกตวงลงถึง 60 °F หรือ 15.56 °C

3.4. นำ ไฮโดรมิเตอร์ (hydrometer) หย่อนลงในน้ำมันช้าๆ ระวังอย่าให้ Hydrometer กระแทกกับก้นของกระบอกวัดปริมาตร และอย่าให้ผิวด้านข้างของ Hydrometer สัมผัสกับผนังกระบอกวัดปริมาตรด้วยเช่นกันโดยให้ Hydrometer ลอยอยู่เหนือก้นของกระบอกวัดปริมาตร แล้วอ่านตัวเลขที่ก้าน Hydrometer ค่าที่อ่านได้คือค่า API

3.5. ทำการทดลองอย่างน้อยสองครั้ง ค่าที่ได้ไม่ควรแตกต่างกันเกิน 0.2 °API

3.6. ค่า API ที่ได้สามารถนำมาคำนวณหาค่า sp.gr. (ASTM D 1298) ได้โดย

$$^{\circ}API = \frac{141.5}{Sp.Gr.60/60^{\circ}F} - 131.5$$

API = ค่าที่อ่านได้จาก Hydrometer

3.7. ถ้าไม่สามารถลดอุณหภูมิของน้ำมันได้ที่ 60°F หรือ 15.56 °C ให้ลดอุณหภูมิให้ได้มากที่สุดโดยยังไม่เกิดไข จากนั้นนำค่า API ที่ได้มาคำนวณเปลี่ยนให้เป็นที่อุณหภูมิ 60°F หรือ 15.56 °C

$$API(60^{\circ}F) = (0.002 (60 - T) + 1) * API(T)$$

API(60°F) = ค่า API ที่จากการคำนวณเปลี่ยนมาเป็น 60°F

T = อุณหภูมิที่ต่ำที่สุดที่สามารถทำได้โดยไม่เกิดไข °F

API(T) = ค่า API ที่ได้ที่อุณหภูมิใดๆ

#### 4. ค่าความหนืด (Viscosity , ASTM D445 Standard Test Method for kinematics Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and the calculation of dynamic viscosity)

- 4.1. เลือกขนาดของ Viscosity ให้เหมาะสมกับชนิดและความหนืดของน้ำมัน
- 4.2. ปรับอุณหภูมิของอ่างน้ำมันที่ใช้แช่ Viscosity ให้ได้อุณหภูมิเท่ากับ 40 °C
- 4.3. นำน้ำมันมากรองสิ่งสกปรกและฝุ่นละอองออกก่อนทดลอง
- 4.4. ใส่น้ำมันลงใน Viscometer ประมาณ 3 /4 ของกระเปาะด้านล่าง
- 4.5. นำ Viscometer ไปแช่ในอ่างน้ำมันประมาณ 20 นาที เพื่อให้น้ำมันมีอุณหภูมิ 40 °C
- 4.6. ใช้ลูกยางดูดน้ำมันขึ้นมาให้พ้นขีดบนของกระเปาะแรกแล้วปล่อยลงมา
- 4.7. เริ่มจับเวลาเมื่อน้ำมันผ่านขีดบนจนถึงขีดล่างของกระเปาะแรก นำเวลาที่ได้อ่าน  
คำนวณหาค่าความหนืด
- 4.8. ทำการทดลองอย่างน้อยสองครั้ง ค่าที่ได้ควรแตกต่างกันเกิน 0.35 % ของค่าเฉลี่ย

$$V = K * t$$

เมื่อ  $V =$  Kinematic Viscosity , mm<sup>2</sup>/s  
 $K =$  ค่าคงที่ Viscometer , mm<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>  
 $t =$  เวลาที่ใช้ , วินาที

#### 5. จุดวาบไฟ (Flash Point)

##### 5.1. Cleveland Open Cup (ASTM D92 Standard Test Method for Flash Point and Fire Point by Cleveland Open Cup)

5.1.1. ใส่น้ำมันตัวอย่างลงในถ้วยทดสอบน้ำมัน (Oil cup) ให้พอดีกับขีดและอย่าให้มีฟองอากาศ

5.1.2. นำเทอร์โมมิเตอร์จุ่มลงในน้ำมัน อย่าให้เทอร์โมมิเตอร์สัมผัสกับภาชนะ และให้อยู่กึ่งกลางถ้วย

5.1.3. ให้ความร้อนกับน้ำมันให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นด้วยอัตรา 14 °C ต่อนาที จนกระทั่งอุณหภูมิของน้ำมันเข้าใกล้จุดวาบไฟที่คาดไว้ ให้ลดความร้อนลงให้เหลือ 2 °C ต่อนาที

5.1.4. จุดเปลวไฟทดสอบ

5.1.5. นำเปลวไฟทดสอบลากผ่านผิวหน้าของน้ำมันจากขอบด้านหนึ่งไปยังขอบอีกด้านหนึ่งให้ลากผ่านเป็นรูปกากบาท

5.1.6. เมื่อเกิดเปลวไฟขึ้น บันทึกอุณหภูมิที่อ่านได้

5.1.7. ทำการทดลองอย่างน้อยสองครั้ง ค่าที่ได้ไม่ควรแตกต่างกันเกิน  $5^{\circ}\text{C}$

## 5.2. Pensky-Martens Closed Tester (ASTM D93 Standard Test Method for Flash Point by Pensky-Martens Closed Tester)

5.2.1. ใส่ น้ำมันตัวอย่างลงในถ้วยทองเหลืองให้พอดีกับขีดและอย่างให้มีฟองอากาศ

5.2.2. นำถ้วยทองเหลืองใส่ลงในเครื่องทดสอบ

5.2.3. เปิดเครื่อง ตั้งโปรแกรม ASTM แล้วกด Start

5.2.4. เริ่มจุดไฟทดสอบเมื่อน้ำมันมีอุณหภูมิ  $50^{\circ}\text{C}$  และเริ่มทดสอบ

5.2.5. ถ้าไฟยังไม่ติดให้ทดสอบทุกๆ  $2^{\circ}\text{C}$  จนกระทั่งเปลวไฟติด

5.2.6. เมื่อเปลวไฟติด บันทึกอุณหภูมิที่อ่านได้ อุณหภูมิที่อ่านได้คือจุดวาบไฟ

5.2.7. ทำการทดลองอย่างน้อยสองครั้ง ค่าที่ได้ไม่ควรแตกต่างกันเกิน  $5^{\circ}\text{C}$

## 6. ค่าความร้อน (ASTM D240 Standard Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter )

### 6.1. หาค่า Water Equivalent ของ Bomb Calorimeter

6.1.1. ชั่งน้ำหนัก Benzoic acid ประมาณ 1 กรัม นำไปอัดเม็ด แล้วชั่งน้ำหนักให้ได้ความละเอียด 0.0001 กรัม

6.1.2. ต่อกันเส้นลวด (Firing Wire) ยาว 6 เซนติเมตร เข้ากับขั้ว อิเล็กโทรด (Electrode) ทั้ง 2 ข้าง แล้วยึดให้แน่น จากนั้นนำด้าย (Firing cotton) ยาว 12 เซนติเมตร ผูกกับ Firing Wire

6.1.3. เติมน้ำกลั่น 1 ml ลงใน ออกซิเจน บอมบ์ (oxygen bomb) ด้วย ปิเปต

6.1.4. นำ อิิกนิชัน เทอมินอล (Ignition Terminal) วางลงใน บอมบ์ ปิดฝาให้แน่น เติมน้ำ ออกซิเจน อย่างช้าๆ จนได้ความดัน 30 บาร์

6.1.5. เติมน้ำในบัคเกต (bucket) โดยให้น้ำหนักของน้ำและ bucket รวมกัน ได้ประมาณ 2.8 กิโลกรัม จากนั้นนำออกซิเจน bomb ใส่ลงใน bucket แล้วนำไปวางในเครื่องให้ แกนข้าง bucket ลงลึกคพอดี

6.1.6. ปรับค่าอุณหภูมิของน้ำในเจคเกต (Water jacket) ให้ใกล้เคียง bucket แตกต่างไม่เกิน  $0.5^{\circ}\text{C}$  การปรับทำโดยปรับปุ่ม Balance จากแผงควบคุมด้านหน้าเครื่อง

6.1.7. กดปุ่ม Firing plug เพื่อต่อวงจรไฟฟ้าเข้า Electrode socket บน Oxygen Bomb กด Test ทดสอบว่าวงจรเดินครบหรือไม่ ถ้าไฟติดแสดงว่าวงจรไม่ขาด

6.1.8. รอกจนอุณหภูมิใน Water bucket คงที่จึงกดจุดระเบิดการเผาไหม้ บันทึก ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นและรอกจนกว่าอุณหภูมิการเผาไหม้ได้ค่าสูงสุด บันทึกอุณหภูมิสุดท้าย

6.1.9. นำ Oxygen Bomb ออกแล้วค่อยๆ ลดความดันจนหมด ล้างภายใน Oxygen Bomb ด้วยน้ำกลั่นหลายๆ ครั้ง ใส่สารที่ได้ไว้ใน บีกเกอร์ 250 มิลลิลิตร

6.1.10. นำสารละลายที่ได้ไป ไตเตรต (titrate) กับ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 0.1 โมล ต่ ลิตร โดยใช้ ฟีนอล์ฟทาลีน (phenolphthalein indicator) เป็นอินดิเคเตอร์ บันทึก ปริมาณ NaOH ที่ใช้ เป็น มิลลิลิตร

6.1.11. วัด Firing wire ที่ใช้ในการเผาไหม้

$$C\Delta T = Q_{\text{tot}} = mQ_m + q_1 + q_2$$

C = ค่าความจุความร้อนจำเพาะของเบนโซอิก

$\Delta T$  = อุณหภูมิหลังการเผาไหม้ – อุณหภูมิก่อนเผาไหม้ ( $^{\circ}\text{C}$ )

$Q_m$  = ค่าความร้อนของสารตัวอย่าง

(ค่าความร้อนของเบนโซอิก  $\approx 26,434 \pm 3 \text{ kJ / kg}$ )

M = มวลของสารตัวอย่างที่ใช้

$q_1$  = เทอมของค่าแก้ไขจากลวดหลังการเผาไหม้ (J)

=  $12.6 \cdot \text{ความยาวลวดที่เผาไหม้ไป}$

$q_2$  = เทอมของค่าแก้ไขจากการเผาไหม้ของซัลเฟอร์และ

ไนโตรเจน

## 6.2. หาค่า Calorific Value ของตัวอย่าง

ขั้นตอนการวิเคราะห์หาค่าความร้อนของสารตัวอย่าง เหมือนกับการหาค่าความร้อนของ กรดเบนโซอิก (Benzoic acid) เพียงแต่เปลี่ยน Benzoic acid เป็นสารตัวอย่างเท่านั้น

$$Q = (C\Delta T - q_1 - q_2) / m$$

C = ค่าความจุความร้อนจำเพาะของเบนโซอิก

$\Delta T$  = อุณหภูมิหลังเผาไหม้ – อุณหภูมิก่อนเผาไหม้ ( $^{\circ}C$ )

$q_1$  = เทอมของค่าแก้ไขจากหลอดหลังการเผาไหม้(J)

$$= 12.6 * \text{ความยาวหลอดที่เผาไหม้ไป}$$

$q_2$  = เทอมของค่าแก้ไขจากการเผาไหม้ของซัลเฟอร์และ

ไนโตรเจน

$$= 5,987 * \text{ปริมาณ NaOH ที่ใช้ (ml)}$$

m = น้ำหนักของสารตัวอย่าง

Q = ค่าความร้อนของสารตัวอย่าง

## 7. ค่าการกลั่น (Distillation , ASTM D 86 Standard Test Method for Distillation of Petroleum product)

7.1. เติมน้ำมัน 100 มิลลิลิตร ใน ขวดกลั่น (Distillation flask) ระวังอย่าให้น้ำมันไหลออกจากก้านขวด

7.2. ประกอบ Distillation flask เข้ากับเทอร์โมมิเตอร์ปิดจุกคอรัคให้สนิท ปรับระดับเทอร์โมมิเตอร์ให้อยู่สูงประมาณก้านขวด

7.3. ต่อก้านขวดเข้ากับอุปกรณ์ควบแน่น (condenser)

7.5. ปิดรอยรั่วด้วยซิลิโคน (silicone grease) บริเวณข้อต่อต่างๆ

7.6. เปิดเครื่องให้ความร้อน โดยให้ของเหลวหยดแรกหยดออกมาภายใน 2 นาที

7.7. บันทึกอุณหภูมิ ทุก 10 มิลลิลิตร ของสารที่กลั่นได้

## 8. ค่าซีเทน (Cetane , ASTM D 976 Standard Test Method for Calculated Cetane Index of Distillate Fuels)

หาได้โดยการคำนวณจากสมการที่ 1

$$CI = -420.34 + 0.016 G^2 + 0.192 G \log M + 65.01 (\log M)^2 - 1.809 \times 10^4 M^2 \quad (1)$$

โดย G = ค่า API

M = อุณหภูมิการกลั่น 50 เปรอร์เซ็นต์ , เคลวิน

## 9. ผลการทดลอง

### 9.1. ค่ากรด

ตารางที่ ก1 ผลการวิเคราะห์ค่ากรด

การทดลอง	น้ำมันมะพร้าว	น้ำมันเมล็ดในปาล์ม	น้ำมันละหุ่ง
1	15.92	30.82	5.91
2	15.42	31.21	6.11
3	15.93	30.42	5.82
ค่าเฉลี่ย	15.76	30.82	5.95

### 9.2. ค่าสปอนนิฟิเคชัน

ตารางที่ ก2 ผลการวิเคราะห์ค่าสปอนนิฟิเคชัน

การทดลอง	น้ำมันมะพร้าว	น้ำมันเมล็ดในปาล์ม	น้ำมันละหุ่ง
1	201	240	176
2	207	245	174
3	203	246	173
ค่าเฉลี่ย	204	244	174

### 9.3. ค่าความร้อน (MJ / kg)

#### 9.3.1. สารตั้งต้น

ตารางที่ ก3 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนของน้ำมันพืช

การทดลอง	น้ำมันมะพร้าว	น้ำมันเมล็ดในปาล์ม	น้ำมันละหุ่ง
1	38.43	38.39	37.92
2	38.42	38.42	37.31
3	38.44	38.98	37.61
ค่าเฉลี่ย	38.43	38.59	37.61

#### 9.3.2. เมทิลเอสเทอร์ (ภาวะที่เหมาะสม)และน้ำมันดีเซลหมุนช้า

ตารางที่ ก4 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนของเมทิลเอสเทอร์และน้ำมัน ดีเซลหมุนช้า

การทดลอง	ดีเซลหมุนช้า	เมทิลเอสเทอร์ของ น้ำมันมะพร้าว	เมทิลเอสเทอร์ ของน้ำมันเมล็ด ในปาล์ม
1	46.32	39.42	39.31
2	45.64	39.46	39.45
3	46.03	39.45	39.23
ค่าเฉลี่ย	46.00	39.44	39.33

#### 9.4. ค่าความหนืด ( $\text{mm}^2/\text{s}$ )

##### 9.4.1. สารตั้งต้น

ตารางที่ ก5 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนืดของน้ำมันพืช

การทดลอง	น้ำมันมะพร้าว	น้ำมันเมล็ดในปาล์ม	น้ำมันละหุ่ง
1	26.9	30.5	235.2
2	27.2	31.8	234.9
3	27.0	31.0	234.6
ค่าเฉลี่ย	27.03	31.1	234.9

##### 9.4.2. เมทิลเอสเทอร์ (ภาวะที่เหมาะสม) และน้ำมันดีเซลหมุนช้า

ตารางที่ ก6 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนืดของเมทิลเอสเทอร์และน้ำมันดีเซลหมุนช้า

การทดลอง	ดีเซลหมุนช้า	เมทิลเอสเทอร์ของ น้ำมันมะพร้าว	เมทิลเอสเทอร์ ของน้ำมันเมล็ด ในปาล์ม
1	3.4	3.8	4.1
2	3.4	3.8	4.1
3	3.4	3.8	4.1
ค่าเฉลี่ย	3.4	3.8	4.1



## 9.5. จุดวาบไฟ (°C)

### 9.5.1. สารตั้งต้น

ตารางที่ ก7 ผลการวิเคราะห์จุดวาบไฟของน้ำมันพืช

การทดลอง	น้ำมันมะพร้าว	น้ำมันเมล็ดในปาล์ม	น้ำมันละหุ่ง
1	229	264	290
2	235	262	290
3	229	266	290
ค่าเฉลี่ย	231	264	290

### 9.5.2. เมทิลเอสเทอร์และน้ำมันดีเซลหมุนช้า

ตารางที่ ก8 ผลการวิเคราะห์จุดวาบไฟของเมทิลเอสเทอร์และน้ำมันดีเซลหมุนช้า

การทดลอง	ดีเซลหมุนช้า	เมทิลเอสเทอร์ของ น้ำมันมะพร้าว	เมทิลเอสเทอร์ ของน้ำมันเมล็ด ในปาล์ม
1	78	122	158
2	76	120	156
3	76	120	156
ค่าเฉลี่ย	77	120	156

## 9.6. ความหนาแน่น

9.6.1. สารตั้งต้น (ใช้ขวด ถ.พ. ขนาด 25 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

ตารางที่ ก9 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นของน้ำมันพืช

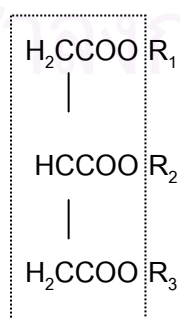
การทดลอง	น้ำมันมะพร้าว	น้ำมันเมล็ดในปาล์ม	น้ำมันละหุ่ง
1	0.8039	0.923	0.925
2	0.794	0.924	0.931
3	0.778	0.910	0.921
ค่าเฉลี่ย	0.792	0.919	0.925

### 9.6.2. เมทิลเอสเทอร์และน้ำมันดีเซลหมุนช้า โดยใช้ Hydrometer (ASTM D 1298)

ตารางที่ ก10 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นของเมทิลเอสเทอร์และน้ำมันดีเซลหมุนช้า

การทดลอง	ดีเซลหมุนช้า	เมทิลเอสเทอร์ของน้ำมันมะพร้าว	เมทิลเอสเทอร์ของน้ำมันเมล็ดในปาล์ม
1	0.8360	0.8796	0.8870
2	0.8360	0.8796	0.8870
3	0.8360	0.8796	0.8870
ค่าเฉลี่ย	0.8360	0.8796	0.8870

## 10. การคำนวณน้ำหนักโมเลกุลของน้ำมันมะพร้าวและน้ำมันปาล์ม



ไตรกลีเซอไรด์

มวลโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ คำนวณโดย

$$MW_{TG} = 3R_{Aver} + 173$$

$$R_{Aver} = \sum \left( \frac{\% Fa_n}{100} \times MW_n \right)$$

### 10.1. มวลโมเลกุลของน้ำมันมะพร้าว

จากตารางที่ 4.3 องค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันพืช

$$R_{Aver} = (0.0039*71)+(0.0575*99)+(0.0509*127)+(0.4456*155)+(0.1908*183)+(0.104*211)+(0.0357*239)+(0.0880*237)+(0.0272*235)$$

$$= 173.38$$

$$3R = 520.15$$

$$MW_{TG} = 639.15$$

### 10.2. มวลโมเลกุลของน้ำมันเมล็ดในปาล์ม

$$R_{Aver} = (0.0377*99)+(0.0367*127)+(0.4838*155)+(0.1737*183)+(0.0913*211)+(0.0272*239)+(0.1256*237)+(0.0240*235)$$

$$= 176.34$$

$$3R = 529.02$$

$$MW_{TG} = 702.02$$

## ภาคผนวก ข

### การคำนวณอัตราการไหลของน้ำมันพืชและเมทานอล

#### 1. น้ำมันมะพร้าว

##### 1.1. อัตราส่วนโดยโมล 1:6

ตารางที่ข1 การคำนวณอัตราการไหลที่อัตราส่วนโดยโมล 1:6

สารตั้งต้น (ของเหลว)	โมล	มวล โมเลกุล	น้ำหนัก (กรัม)	ความหนาแน่น (กรัม / มิลลิลิตร)	ปริมาตร (มิลลิลิตร)
น้ำมันพืช	1	693	693	0.919	754
เมทานอล	6	32	192	0.792	242

ปริมาตรรวม = 996 มิลลิลิตร

ก. อัตราการไหลรวม 10 มิลลิลิตร / นาที ( เครื่องปฏิกรณ์ 50 มิลลิลิตร )

อัตราการไหลของน้ำมันพืช = 7.57 มิลลิลิตร / นาที

อัตราการไหลของเมทานอล = 2.43 มิลลิลิตร / นาที

ข. อัตราการไหลรวม 5 มิลลิลิตร / นาที ( เครื่องปฏิกรณ์ 50 มิลลิลิตร )

อัตราการไหลของน้ำมันพืช = 3.78 มิลลิลิตร / นาที

อัตราการไหลของเมทานอล = 1.21 มิลลิลิตร / นาที

ค. อัตราการไหลรวม 3 มิลลิลิตร / นาที ( เครื่องปฏิกรณ์ 90 มิลลิลิตร )

อัตราการไหลของน้ำมันพืช = 2.27 มิลลิลิตร / นาที

อัตราการไหลของเมทานอล = 0.73 มิลลิลิตร / นาที

ง. อัตราการไหลรวม 1.5 มิลลิลิตร / นาที ( เครื่องปฏิกรณ์ 90 มิลลิลิตร )

อัตราการไหลของน้ำมันพืช = 1.13 มิลลิลิตร / นาที

อัตราการไหลของเมทานอล = 0.36 มิลลิลิตร / นาที

## 1.2. อัตราส่วนโดยโมล 1:12

ตารางที่ ข2 การคำนวณอัตราการไหลที่อัตราส่วนโดยโมล 1:12

สารตั้งต้น (ของเหลว)	โมล	มวล โมเลกุล	น้ำหนัก (กรัม)	ความหนาแน่น (กรัม / มิลลิลิตร)	ปริมาตร (มิลลิลิตร)
น้ำมันพืช	1	693	693	0.919	754
เมทานอล	12	32	384	0.792	485

ปริมาตรรวม = 1,239 มิลลิลิตร

ก. อัตราการไหลรวม 10 มิลลิลิตร / นาที ( เครื่องปฏิกรณ์ 50 มิลลิลิตร )

อัตราการไหลของน้ำมันพืช = 6.10 มิลลิลิตร / นาที

อัตราการไหลของเมทานอล = 3.90 มิลลิลิตร / นาที

ข. อัตราการไหลรวม 5 มิลลิลิตร / นาที ( เครื่องปฏิกรณ์ 50 มิลลิลิตร )

อัตราการไหลของน้ำมันพืช = 3.04 มิลลิลิตร / นาที

อัตราการไหลของเมทานอล = 1.96 มิลลิลิตร / นาที

ค. อัตราการไหลรวม 3 มิลลิลิตร / นาที ( เครื่องปฏิกรณ์ 90 มิลลิลิตร )

อัตราการไหลของน้ำมันพืช = 1.82 มิลลิลิตร / นาที

อัตราการไหลของเมทานอล = 1.18 มิลลิลิตร / นาที

ง. อัตราการไหลรวม 1.5 มิลลิลิตร / นาที ( เครื่องปฏิกรณ์ 90 มิลลิลิตร )

อัตราการไหลของน้ำมันพืช = 0.91 มิลลิลิตร / นาที

อัตราการไหลของเมทานอล = 0.59 มิลลิลิตร / นาที

## 1.3. อัตราส่วนโดยโมล 1:24

ตารางที่ ข3 การคำนวณอัตราการไหลที่อัตราส่วนโดยโมล 1: 24

สารตั้งต้น (ของเหลว)	โมล	มวล โมเลกุล	น้ำหนัก ( กรัม )	ความหนาแน่น ( กรัม / มิลลิลิตร )	ปริมาตร ( มิลลิลิตร )
น้ำมันพืช	1	693	693	0.919	754
เมทานอล	24	32	768	0.792	970

ปริมาตรรวม = 1724 มิลลิลิตร

ก. อัตราการไหลรวม 10 มิลลิลิตร / นาที ( เครื่องปฏิกรณ์ 50 มิลลิลิตร )

อัตราการไหลของน้ำมันพืช = 4.40 มิลลิลิตร / นาที

อัตราการไหลของเมทานอล = 5.60 มิลลิลิตร / นาที

ข. อัตราการไหลรวม 5 มิลลิลิตร / นาที ( เครื่องปฏิกรณ์ 50 มิลลิลิตร )

อัตราการไหลของน้ำมันพืช = 2.19 มิลลิลิตร / นาที

อัตราการไหลของเมทานอล = 2.81 มิลลิลิตร / นาที

ค. อัตราการไหลรวม 3 มิลลิลิตร / นาที ( เครื่องปฏิกรณ์ 90 มิลลิลิตร )

อัตราการไหลของน้ำมันพืช = 1.31 มิลลิลิตร / นาที

อัตราการไหลของเมทานอล = 1.69 มิลลิลิตร / นาที

ง. อัตราการไหลรวม 1.5 มิลลิลิตร / นาที ( เครื่องปฏิกรณ์ 90 มิลลิลิตร )

อัตราการไหลของน้ำมันพืช = 0.66 มิลลิลิตร / นาที

อัตราการไหลของเมทานอล = 0.84 มิลลิลิตร / นาที

## 1.4. อัตราส่วนโดยโมล 1:42

ตารางที่ ข4 การคำนวณอัตราการไหลที่อัตราส่วนโดยโมล 1: 42

สารตั้งต้น (ของเหลว)	โมล	มวล โมเลกุล	น้ำหนัก (กรัม)	ความหนาแน่น (กรัม / มิลลิลิตร)	ปริมาตร (มิลลิลิตร)
น้ำมันพืช	1	693	693	0.919	754
เมทานอล	42	32	1,344	0.792	1,697

ปริมาตรรวม = 2,451 มิลลิลิตร

ก. อัตราการไหลรวม 10 มิลลิลิตร / นาที ( เครื่องปฏิกรณ์ 50 มิลลิลิตร )

อัตราการไหลของน้ำมันพืช = 3.08 มิลลิลิตร / นาที

อัตราการไหลของเมทานอล = 6.92 มิลลิลิตร / นาที

ข. อัตราการไหลรวม 5 มิลลิลิตร / นาที ( ปริมาตรเครื่องปฏิกรณ์ 50 มิลลิลิตร )

อัตราการไหลของน้ำมันพืช = 1.54 มิลลิลิตร / นาที

อัตราการไหลของเมทานอล = 3.46 มิลลิลิตร / นาที

ค. อัตราการไหลรวม 3 มิลลิลิตร / นาที ( เครื่องปฏิกรณ์ 90 มิลลิลิตร )

อัตราการไหลของน้ำมันพืช = 0.92 มิลลิลิตร / นาที

อัตราการไหลของเมทานอล = 2.08 มิลลิลิตร / นาที

ง. อัตราการไหลรวม 1.5 มิลลิลิตร / นาที ( เครื่องปฏิกรณ์ 90 มิลลิลิตร )

อัตราการไหลของน้ำมันพืช = 0.46 มิลลิลิตร / นาที

อัตราการไหลของเมทานอล = 1.04 มิลลิลิตร / นาที

## 2. น้ำมันเมล็ดในปาล์ม

### 2.1. อัตราส่วนโดยโมล 1:6

ตารางที่ ข5 การคำนวณอัตราการไหลที่อัตราส่วนโดยโมล 1: 6

สารตั้งต้น (ของเหลว)	โมล	มวล โมเลกุล	น้ำหนัก ( กรัม )	ความหนาแน่น ( กรัม / มิลลิลิตร )	ปริมาตร ( มิลลิลิตร )
น้ำมันพีช	1	702	702	0.925	759
เมทานอล	6	32	192	0.792	242

ปริมาตรรวม = 1,001 มิลลิลิตร

ก. อัตราการไหลรวม 9 มิลลิลิตร / นาที ( เครื่องปฏิกรณ์ 90 มิลลิลิตร )

อัตราการไหลของน้ำมันพีช = 6.82 มิลลิลิตร / นาที

อัตราการไหลของเมทานอล = 2.18 มิลลิลิตร / นาที

ข. อัตราการไหลรวม 6 มิลลิลิตร / นาที ( เครื่องปฏิกรณ์ 90 มิลลิลิตร )

อัตราการไหลของน้ำมันพีช = 4.55 มิลลิลิตร / นาที

อัตราการไหลของเมทานอล = 1.45 มิลลิลิตร / นาที

ค. อัตราการไหลรวม 3 มิลลิลิตร / นาที ( เครื่องปฏิกรณ์ 90 มิลลิลิตร )

อัตราการไหลของน้ำมันพีช = 2.27 มิลลิลิตร / นาที

อัตราการไหลของเมทานอล = 0.73 มิลลิลิตร / นาที

ง. อัตราการไหลรวม 1.5 มิลลิลิตร / นาที ( เครื่องปฏิกรณ์ 90 มิลลิลิตร )

อัตราการไหลของน้ำมันพีช = 1.14 มิลลิลิตร / นาที

อัตราการไหลของเมทานอล = 0.36 มิลลิลิตร / นาที



## 2.2 อัตราส่วนโดยโมล 1:12

ตารางที่ ข6 การคำนวณอัตราการไหลที่อัตราส่วนโดยโมล 1: 12

สารตั้งต้น (ของเหลว)	โมล	มวล โมเลกุล	น้ำหนัก (กรัม)	ความหนาแน่น (กรัม / มิลลิลิตร)	ปริมาตร (มิลลิลิตร)
น้ำมันพืช	1	702	702	0.925	759
เมทานอล	12	32	384	0.792	485

ปริมาตรรวม = 1,244 มิลลิลิตร

ก. อัตราการไหลรวม 9 มิลลิลิตร / นาที ( เครื่องปฏิกรณ์ 90 มิลลิลิตร )

อัตราการไหลของน้ำมันพืช = 5.49 มิลลิลิตร / นาที

อัตราการไหลของเมทานอล = 3.51 มิลลิลิตร / นาที

ข. อัตราการไหลรวม 6 มิลลิลิตร / นาที ( เครื่องปฏิกรณ์ 90 มิลลิลิตร )

อัตราการไหลของน้ำมันพืช = 3.66 มิลลิลิตร / นาที

อัตราการไหลของเมทานอล = 2.34 มิลลิลิตร / นาที

ค. อัตราการไหลรวม 3 มิลลิลิตร / นาที ( เครื่องปฏิกรณ์ 90 มิลลิลิตร )

อัตราการไหลของน้ำมันพืช = 1.83 มิลลิลิตร / นาที

อัตราการไหลของเมทานอล = 1.17 มิลลิลิตร / นาที

ง. อัตราการไหลรวม 1.5 มิลลิลิตร / นาที ( เครื่องปฏิกรณ์ 90 มิลลิลิตร )

อัตราการไหลของน้ำมันพืช = 0.92 มิลลิลิตร / นาที

อัตราการไหลของเมทานอล = 0.58 มิลลิลิตร / นาที

## 2.3. อัตราส่วนโดยโมล 1:24

ตารางที่ ข7 การคำนวณอัตราการไหลที่อัตราส่วนโดยโมล 1: 24

สารตั้งต้น (ของเหลว)	โมล	มวล โมเลกุล	น้ำหนัก (กรัม)	ความหนาแน่น (กรัม / มิลลิลิตร)	ปริมาตร (มิลลิลิตร)
น้ำมันพืช	1	702	702	0.925	759
เมทานอล	24	32	768	0.792	1,000

ปริมาตรรวม = 1,759 มิลลิลิตร

ก. อัตราการไหลรวม 9 มิลลิลิตร / นาที ( เครื่องปฏิกรณ์ 90 มิลลิลิตร )

อัตราการไหลของน้ำมันพืช = 3.88 มิลลิลิตร / นาที

อัตราการไหลของเมทานอล = 5.12 มิลลิลิตร / นาที

ข. อัตราการไหลรวม 6 มิลลิลิตร / นาที ( เครื่องปฏิกรณ์ 90 มิลลิลิตร )

อัตราการไหลของน้ำมันพืช = 2.59 มิลลิลิตร / นาที

อัตราการไหลของเมทานอล = 3.41 มิลลิลิตร / นาที

ค. อัตราการไหลรวม 3 มิลลิลิตร / นาที ( เครื่องปฏิกรณ์ 90 มิลลิลิตร )

อัตราการไหลของน้ำมันพืช = 1.29 มิลลิลิตร / นาที

อัตราการไหลของเมทานอล = 1.71 มิลลิลิตร / นาที

ง. อัตราการไหลรวม 1.5 มิลลิลิตร / นาที ( เครื่องปฏิกรณ์ 90 มิลลิลิตร )

อัตราการไหลของน้ำมันพืช = 0.65 มิลลิลิตร / นาที

อัตราการไหลของเมทานอล = 0.85 มิลลิลิตร / นาที

## 2.4. อัตราส่วนโดยโมล 1:42

ตารางที่ ข8 การคำนวณอัตราการไหลที่อัตราส่วนโดยโมล 1: 42

สารตั้งต้น (ของเหลว)	โมล	มวล โมเลกุล	น้ำหนัก (กรัม)	ความหนาแน่น (กรัม / มิลลิลิตร)	ปริมาตร (มิลลิลิตร)
น้ำมันพืช	1	702	702	0.925	759
เมทานอล	42	32	1,344	0.792	1,697

ปริมาตรรวม = 2,456 มิลลิลิตร

ก. อัตราการไหลรวม 9 มิลลิลิตร / นาที ( เครื่องปฏิกรณ์ 90 มิลลิลิตร )

อัตราการไหลของน้ำมันพืช = 2.78 มิลลิลิตร / นาที

อัตราการไหลของเมทานอล = 6.22 มิลลิลิตร / นาที

ข. อัตราการไหลรวม 6 มิลลิลิตร / นาที ( ปริมาตรเครื่องปฏิกรณ์ 90 มิลลิลิตร )

อัตราการไหลของน้ำมันพืช = 1.85 มิลลิลิตร / นาที

อัตราการไหลของเมทานอล = 4.15 มิลลิลิตร / นาที

ค. อัตราการไหลรวม 3 มิลลิลิตร / นาที ( เครื่องปฏิกรณ์ 90 มิลลิลิตร )

อัตราการไหลของน้ำมันพืช = 0.93 มิลลิลิตร / นาที

อัตราการไหลของเมทานอล = 2.07 มิลลิลิตร / นาที

ง. อัตราการไหลรวม 1.5 มิลลิลิตร / นาที ( เครื่องปฏิกรณ์ 90 มิลลิลิตร )

อัตราการไหลของน้ำมันพืช = 0.46 มิลลิลิตร / นาที

อัตราการไหลของเมทานอล = 1.04 มิลลิลิตร / นาที

ภาคผนวก ค

การคำนวณเวลาสเปซ (  $\tau$  )

จากทฤษฎีของแก๊ส

$$PV^* = Zn^* RT$$

$$V^* = \frac{ZQ_{MeOH} \rho_{MeOH} RT}{Mw_{MeOH} P}$$

$$\tau = \frac{V}{V^* + Q_{oil}}$$

คำนวณหาค่า Z โดยวิธีของ Pitzer [3]

$$Z = Z(P_r, T_r, \omega)$$

$$Z = Z^0(P_r, T_r) + \omega Z^1(P_r, T_r)$$

$$T_r = \frac{T}{T_c}$$

$$P_r = \frac{P}{P_c}$$

$$T_c = 239 \text{ } ^\circ\text{C} \quad P_c = 80.9 \text{ bar} \quad \omega = 0.5688$$

T	P	Tr	Pr	Z <sup>0</sup>	Z <sup>1</sup>	Z	V (ml)
270	100	1.1	1.2	0.6	0.06	0.63	50
300	100	1.3	1.2	0.82	0.10	0.88	90
350	100	1.5	1.2	0.89	0.10	0.95	
270	190	1.1	2.3	0.42	0.03	0.44	
300	190	1.3	2.3	0.66	0.23	0.79	
350	190	1.5	2.3	0.82	0.24	0.96	

ตารางที่ ค1 เวลาสเปซ ณ จุดหนุมมิและอัตราส่วนโดยโมลต่างๆ

oil : MeOH , t <sub>1</sub> ,T,P liquid state	Q <sub>oil</sub> (ml/min)	Q <sub>MeOH</sub> (ml/min)	Z	V* ml/min	V <sub>total</sub> V*+Q <sub>oil</sub>	□ min	□ sec
1:42,10,350,19	2.78	6.22	0.96	39.76516	42.54516	2.12	127
1:42,15,350,19	1.85	4.15	0.96	26.53142	28.38142	3.17	190
1:42,30,350,19	0.93	2.07	0.96	13.23374	14.16374	6.35	381
1:42,60,350,19	0.46	1.04	0.96	6.648838	7.108838	12.66	760
1:24,10,350,19	3.88	5.12	0.96	32.73274	36.61274	2.46	147
1:24,15,350,19	2.59	3.41	0.96	21.80052	24.39052	3.69	221
1:24,30,350,19	1.29	1.71	0.96	10.93222	12.22222	7.36	442
1:24,60,350,19	0.65	0.85	0.95	5.377541	6.027541	14.93	896
1:12,10,350,19	5.49	3.51	0.96	22.43983	27.92983	3.22	193
1:12,15,350,19	3.66	2.34	0.96	14.95988	18.61988	4.83	290
1:12,30,350,19	1.83	1.17	0.96	7.479942	9.309942	9.67	580
1:12,60,350,19	0.92	0.58	0.96	3.708006	4.628006	19.45	1167
1:6,10,350,19	6.82	2.18	0.96	13.93699	20.75699	4.34	260
1:6,15,350,19	4.55	1.45	0.96	9.270014	13.82001	6.51	391
1:6,30,350,19	2.27	0.73	0.96	4.666973	6.936973	12.97	778
1:6,60,350,19	1.14	0.36	0.96	2.301521	3.441521	26.15	1569
1:42,10,300,19	2.78	6.22	0.76	28.95421	31.73421	2.84	170
1:42,15,300,19	1.85	4.15	0.76	19.31832	21.16832	4.25	255
1:42,30,300,19	0.93	2.07	0.76	10.47671	11.40671	7.89	473
1:24,10,300,19	3.88	5.12	0.76	23.83369	27.71369	3.25	195
1:24,15,300,19	2.59	3.41	0.76	15.87361	18.46361	4.87	292
1:24,30,300,19	1.29	1.71	0.76	7.96008	9.25008	9.73	584
1:24,60,300,19	0.65	0.85	0.76	3.956765	4.606765	19.54	1172
1:12,10,300,19	5.49	3.51	0.76	16.33911	21.82911	4.12	247
1:12,15,300,19	3.66	2.34	0.76	10.89274	14.55274	6.18	371
1:12,30,300,19	1.83	1.17	0.76	5.446371	7.276371	12.37	742
1:12,60,300,19	0.92	0.58	0.76	2.69991	3.61991	24.86	1492
1:6,10,300,19	6.82	2.18	0.76	10.14794	16.96794	5.30	318
1:6,15,300,19	4.55	1.45	0.76	6.749776	11.29978	7.96	478

## ภาคผนวก ง

### การหาชนิดและปริมาณเมทิลเอสเทอร์

#### 1. การหาชนิดและปริมาณเมทิลเอสเทอร์

##### 1.1. การหาชนิด

เมทิลเอสเทอร์แต่ละชนิดจะมี retention time ไม่เท่ากัน เมทิลเอสเทอร์ชนิดเดียวกันจะมี retention time เท่ากันเสมอ จึงใช้หลักการนี้ในการพิจารณาว่าพีก (peak) ที่ได้เป็นของเมทิลเอสเทอร์ชนิดใด โดยเทียบกับเมทิลเอสเทอร์มาตรฐาน

##### 1.2. การหาปริมาณ

การหาปริมาณเมทิลเอสเทอร์แต่ละชนิด ทำได้โดยใช้ calibration curve ของเมทิลเอสเทอร์มาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นแน่นอน

##### 1.2.1. การคำนวณปริมาณเมทิลเอสเทอร์แต่ละชนิด

$$W_{MFA} = \frac{C \times W_p}{D}$$

โดย

$W_{MFA}$  = น้ำหนักเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (กรัม)

$C$  = ความเข้มข้นของเมทิลเอสเทอร์แต่ละชนิดที่ได้จาก Calibration curve (มิลลิกรัม / ลิตร)

$W_p$  = น้ำหนักผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)

$D$  = ความเข้มข้นที่เจือจาง (กรัม / มิลลิลิตร)

##### 1.2.2. การคำนวณน้ำหนักไตรกลีเซอไรด์ของกรดไขมันแต่ละชนิด

$$W_{TG(Fa)} = W_o \times \%Fatty\ acid$$

โดย

$$W_{TG(Fa)} = \text{น้ำหนักไตรกลีเซอไรด์ของกรดไขมัน}$$

$$W_o = \text{น้ำหนักน้ำมันเริ่มต้นที่ใช้ (กรัม) (อัตราการไหล (มิลลิกรัม / ลิตร) \times \text{เวลาในการเก็บตัวอย่าง (min) \times ความหนาแน่น (กรัม / มิลลิตร)}$$

%Fatty acid = ร้อยละของกรดไขมันแต่ละชนิดในน้ำมันพืช ซึ่งได้จากการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันอย่างสมบูรณ์ และวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ได้ทั้งหมด โดยร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันแต่ละชนิดจะเท่ากับร้อยละของกรดไขมันชนิดนั้นในน้ำมันพืช ตัวอย่าง

### 1.2.3. การคำนวณร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

เนื่องจากในงานวิจัยนี้จะติดตามการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ของกรดไขมันหลัก 3 ชนิด ซึ่งประกอบด้วย กรดลอริก กรดไมริสติก และกรดปาล์มิติก จึงคิดร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ จากกรดไขมันดังกล่าว

$$\%ME = \frac{W_{Ml} + W_{Mm} + W_{Mp}}{W_{TGl} + W_{TGm} + W_{TGp}} \times 100$$

โดย

$$M_{M1} = \text{น้ำหนักเมทิลลอเรต(กรัม)}$$

$$W_{Mm} = \text{น้ำหนักเมทิลไมริสเทต (กรัม)}$$

$$W_{Mp} = \text{น้ำหนักเมทิลปาล์มิเทต (กรัม)}$$

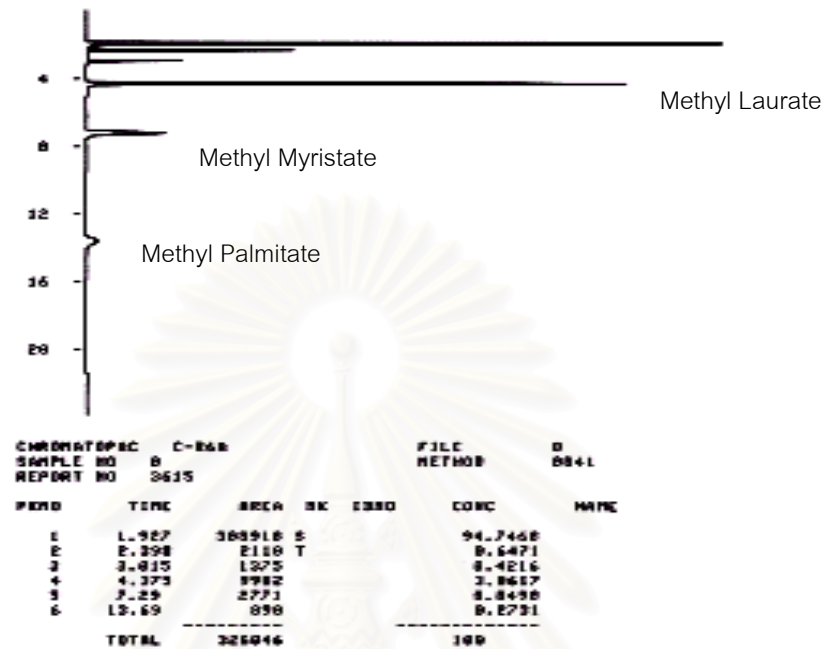
$$W_{TGl} = \text{น้ำหนักไตรกลีเซอไรด์ของกรดลอริก(กรัม)}$$

$$W_{TGm} = \text{น้ำหนักไตรกลีเซอไรด์ของกรดไมริสติก (กรัม)}$$

$$W_{TGp} = \text{น้ำหนักไตรกลีเซอไรด์ของกรดปาล์มิติก (กรัม)}$$

$$\%ME = \text{ร้อยละเมทิลเอสเทอร์}$$

### 1.3 ตัวอย่างการคำนวณ



รูปที่ 1.1 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ภาวะ 1:12, T 350 °C, Pressure 19 MPa , 12 min.

#### 1.3.1. พื้นที่พีคของเมทิลเอสเทอร์ชนิดต่างๆเป็นดังนี้

เมทิลลอเรต	9,982
เมทิลไมริสเทต	2,771
เมทิลปาล์มิเทต	898

1.3.2. หาคความเข้มข้นจาก Calibration curve ดังรูปที่ ง.2 ,ง.3 และ ง.4 ซึ่งได้ความเข้มข้นของเมทิลเอสเทอร์แต่ละชนิดดังนี้

เมทิลลอเรต	$0.4600 \times 10^5$	mg/l
เมทิลไมริสเทต	$1.5290 \times 10^4$	mg/l
เมทิลปาล์มิเทต	$0.754 \times 10^4$	mg/l



### 1.3.3. น้ำหนักของเมทิลเอสเทอร์

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักของเมทิลลอเรต} &= [0.4600 \times 10^5 (\text{mg / l}) \times 246 (\text{g})] / (0.1333 (\text{g / ml})) \\ &= 84.90 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักของเมทิลไมริสเทต} &= [1.5290 \times 10^4 (\text{mg / l}) \times 246 (\text{g})] / (0.1333 (\text{g/ml})) \\ &= 28.22 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักของเมทิลปาล์มิตเทต} &= [0.754 \times 10^4 (\text{mg / l}) \times 258 (\text{g})] / (0.1333 (\text{g / ml})) \\ &= 13.76 \text{ g} \end{aligned}$$

### 1.3.4. น้ำหนักไตรกลีเซอไรด์ของกรดไขมันแต่ละชนิด

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักไตรกลีเซอไรด์ของกรดลอริก} &= 286 \times 0.45 \\ &= 120.60 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

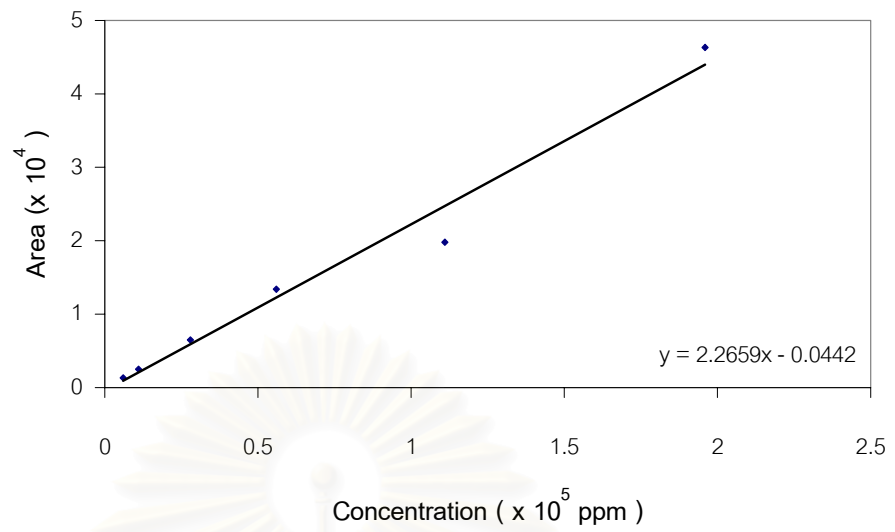
$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักไตรกลีเซอไรด์ของกรดไมริสติก} &= 268 \times 0.19 \\ &= 50.92 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักไตรกลีเซอไรด์ของกรดปาล์มิติก} &= 286 \times 0.10 \\ &= 26.80 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

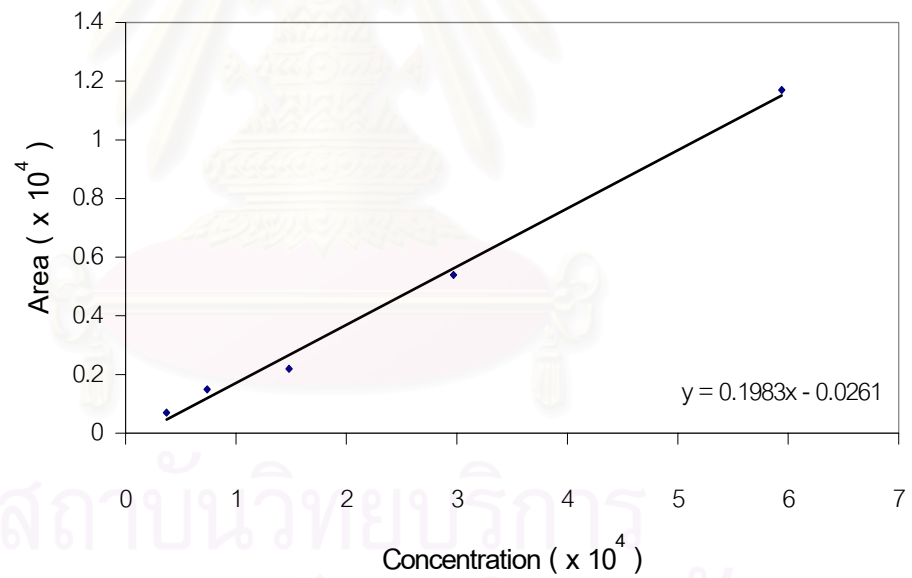
### 1.3.5 ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

$$\%ME = \frac{84.90 + 28.22 + 13.76}{120.60 + 50.92 + 26.80} \times 100$$

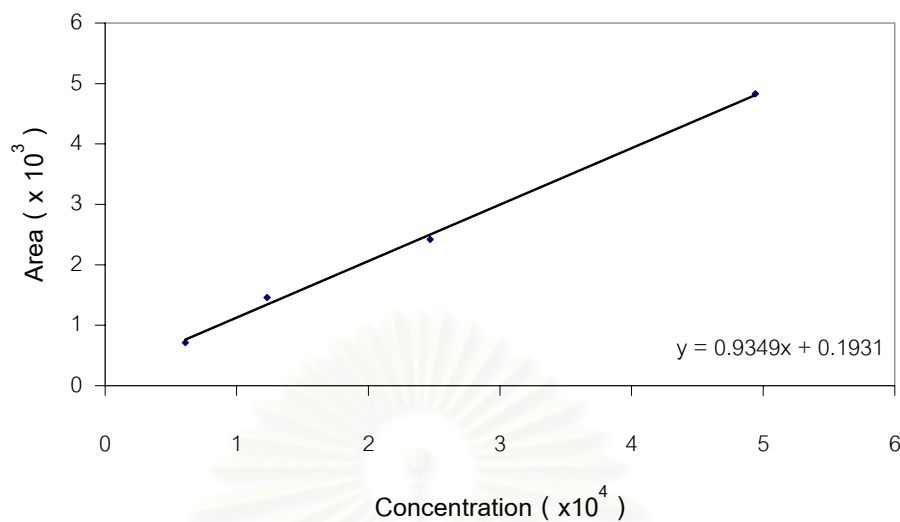
$$= 63.98$$



รูปที่ 1.2. Calibration curve ของสารละลายมาตรฐานเมทิลลีด



รูปที่ 1.3. Calibration curve ของสารละลายมาตรฐานเมทิลไมริสเทต



รูปที่ 4. Calibration curve ของสารละลายมาตรฐานเมทิลปาล์มิต

#### 1. การหาชนิดและปริมาณกรดไขมันในน้ำมันพืช

น้ำมันพืชที่ทำการศึกษาประกอบด้วย น้ำมันมะพร้าว น้ำมันเมล็ดในปาล์ม และ น้ำมันละหุ่ง โดยส่งวิเคราะห์ที่ สำนักวิจัยและพัฒนาพืชน้ำมัน กรมวิชาการเกษตร จากรายงานผลการวิเคราะห์ หมายเลข 508 / 44 คือน้ำมันละหุ่ง หมายเลข 509 / 44 คือน้ำมันเมล็ดในปาล์ม และหมายเลข 510 / 44 คือน้ำมันมะพร้าว สำหรับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันละหุ่งไม่ได้รายงานผลการวิเคราะห์มาเนื่องจากหน่วยงานที่รับวิเคราะห์ไม่สามารถหาสารละลายมาตรฐานของเมทิลเอสเทอร์ของกรด ricinoleic ได้ รายงานผลการวิเคราะห์แสดงดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สำนักวิจัยและพัฒนาพืชน้ำมันฯ (สว.นอ.)

กรมวิชาการเกษตร จตุจักร กทม.10900

วันที่ส่งวิเคราะห์ ธันวาคม 2544

OSL No. 508-510/44

ตัวอย่าง น้ำมันพืช

รายงานผลการวิเคราะห์ น้ำมันพืช จำนวน 3 ตัวอย่าง ของคุณ สุกัญญา มากมี ศูนย์วิจัย  
ปิโตรเลียมและเทคโนโลยีปิโตรเคมี วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมีจุฬา ซอย 12 ถ.พญาไท แขวง  
วังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทร.(02)-218-5336 ได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้  
ชนิดองค์ประกอบของกรดไขมัน (% FFA)

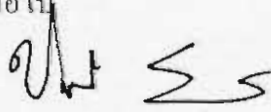
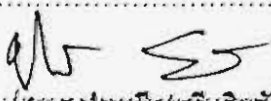
		ตัวอย่างที่	
		509/44	510/44
[C6:0]	Caproic acid	trace	0.39
[C8:0]	Caprylic acid	3.77	5.75
[C10:0]	Capric acid	3.67	5.09
[C12:0]	Lauric acid	48.38	44.56
[C14:0]	Myristic acid	17.37	19.08
[C16:0]	Palmitic acid	9.13	10.04
[C18:0]	Stearic acid	2.72	3.57
[C20:0]	Arachidic acid	trace	trace
[C18:1]	Oleic acid	12.56	8.80
[C18:1OH]	Ricinoleic acid	-	-
[C18:2]	Linoleic acid	2.40	2.72
[C18:3]	Linolenic acid	trace	-

หมายเหตุ [C18:1] (12 OH . Cis - 9) Ricinoleic acid

ตัวอย่างที่ 508/44 กำลังดำเนินการอยู่จะส่งผลในคราวต่อไป

รายงานนี้รับรองผลเฉพาะตัวอย่างที่ได้ทดสอบเท่านั้น

วันที่ 16 / 1 / 45 508-510

  
.....ผู้วิเคราะห์  
  
.....(น.ส.ประเทืองศรี สิ้นชัยศรี) พอ.สว.นอ.

นักวิทยาศาสตร์ 8 ว

รักษาการแทนผู้อำนวยการสำนักวิจัยและพัฒนาพืชน้ำมัน

### 3. ตัวอย่างโครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากการทดลอง

#### 3.1. โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันมะพร้าว

3.1.1. อุณหภูมิ 350 °C อัตราส่วนโดยโมล 1:42 เวลาสเปซ (สถานะของเหลว) 5 นาที

ความดัน 19 MPa

ATTEN(0)=1  
START



CHROMATOPAC C-R6A  
SAMPLE NO 0  
REPORT NO 3419

FILE 0  
METHOD 0841

PKNO	TIME	AREA	MK	IDNO	CONC	NAME
1	1.868	341773			96.6892	
2	2.057	94	V		0.0267	
3	2.32	1320			0.3736	
4	2.922	943			0.2668	
5	4.207	6629			1.8754	
6	6.132	79			0.0223	
7	6.962	1983			0.561	
8	12.968	654			0.1852	
TOTAL		353476			100	

3.1.2. อุณหภูมิ 350 °C อัตราส่วนโดยโมล 1:42 เวลาสเปซ (สถานะของเหลว) 10 นาที  
 ความดัน 19 MPa



CHROMATOPAC C-R6A FILE 0  
 SAMPLE NO 0 METHOD 0841  
 REPORT NO 3717

PKNO	TIME	AREA	MK	IDNO	CONC	NAME
1	1.952	212593	S		93.9816	
2	2.412	618	T		0.2731	
3	3	592	T		0.2616	
4	4.333	8256			3.6497	
5	7.158	1901			0.8402	
6	13.358	839			0.3708	
7	21.183	396			0.1749	
8	26.843	1014			0.4481	
TOT.		226207			100	

3.1.3. อุณหภูมิ 350 °C อัตราส่วนโดยโมล 1:42 เวลาสเปซ (สถานะของเหลว) 30 นาที  
ความดัน 19 MPa

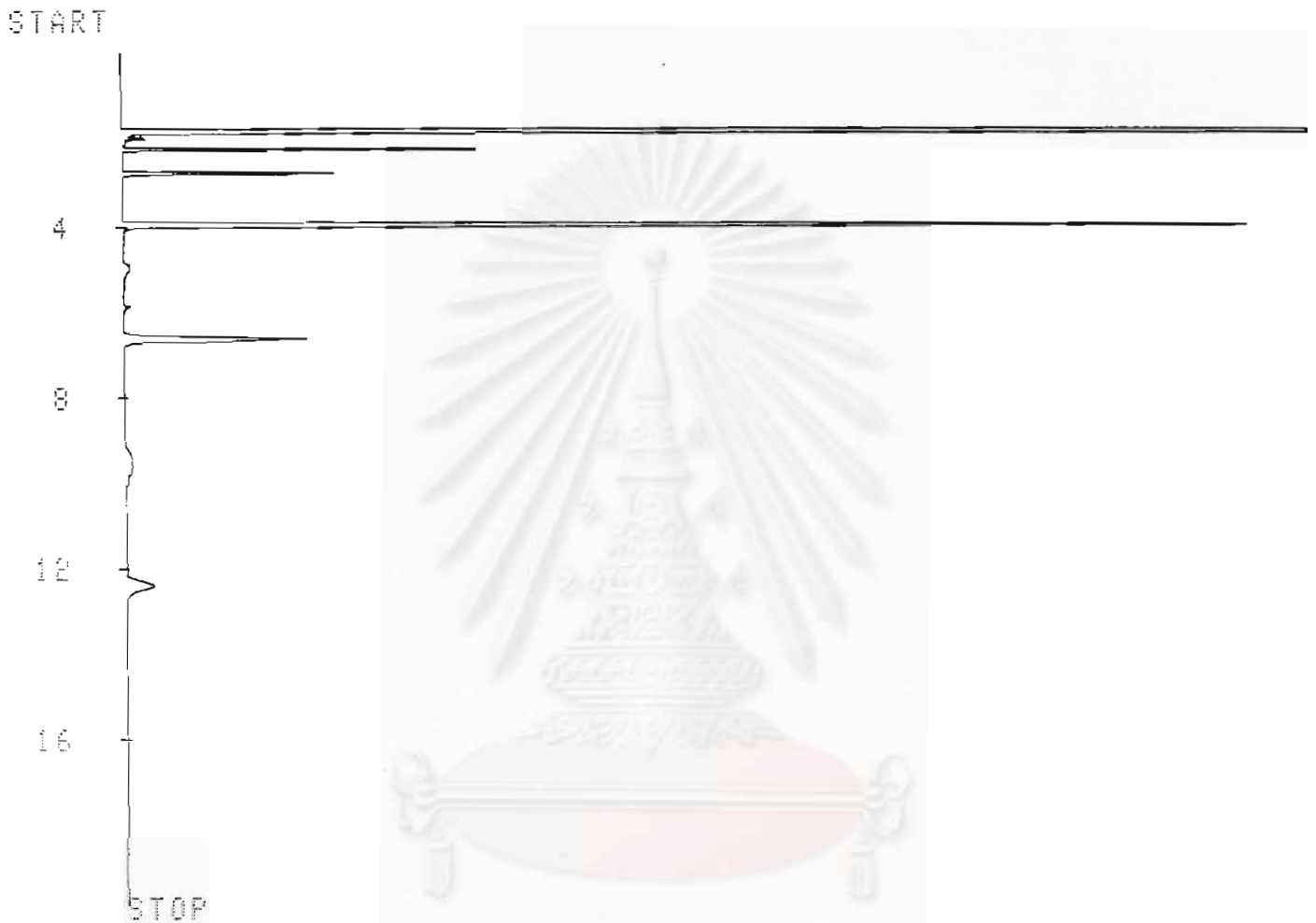
START



CHROMATOPAC C-R6A FILE 0  
SAMPLE NO 0 METHOD 0841  
REPORT NO 3617

PKNO	TIME	AREA	MK	IDNO	CONC	NAME
1	1.895	276881			92.5613	
2	2.357	2149	V		0.7184	
3	2.965	1515			0.5063	
4	4.305	12818			4.285	
5	7.158	3970			1.3272	
6	13.417	1505			0.5031	
7	21.215	295			0.0986	
TOTAL		299132			100	

3.1.4. อุณหภูมิ 350 °C อัตราส่วนโดยโมล 1:24 เวลาสเปซ (สถานะของเหลว) 15 นาที  
ความดัน 19 MPa



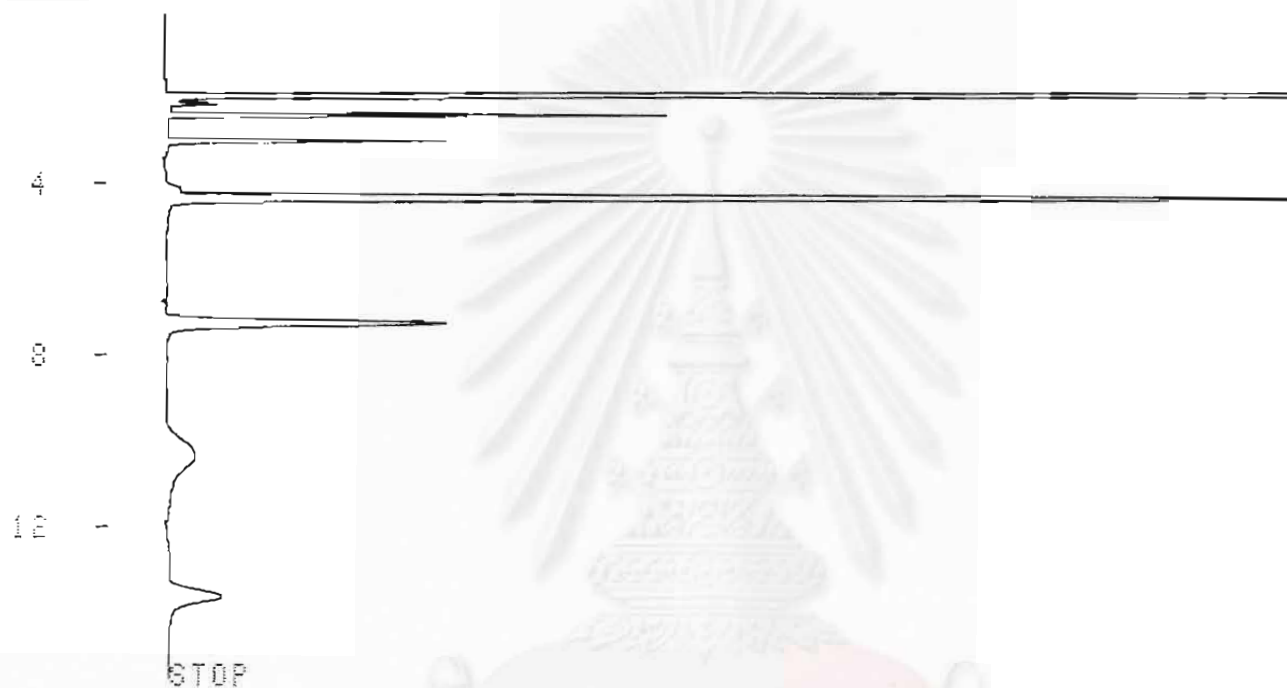
CHROMATOPAC C-R6A FILE 0  
 SAMPLE NO 0 METHOD 0841  
 REPORT NO 3435

PKNO	TIME	AREA	NK	IDNO	CONC	NAME
1	1.82	384287			96.6619	
2	2.002	127	V		0.032	
3	2.257	1538	V		0.3869	
4	2.837	1065			0.2678	
5	4.078	7685			1.933	
6	5.95	53			0.0132	
7	6.722	2135			0.5369	
8	12.482	669			0.1682	
TOTAL		387558			100	



3.1.5. อุณหภูมิ 350 °C อัตราส่วนโดยโมล 1:24 เวลาสเปซ (สถานะของเหลว) 60 นาที  
ความดัน 19 MPa

START



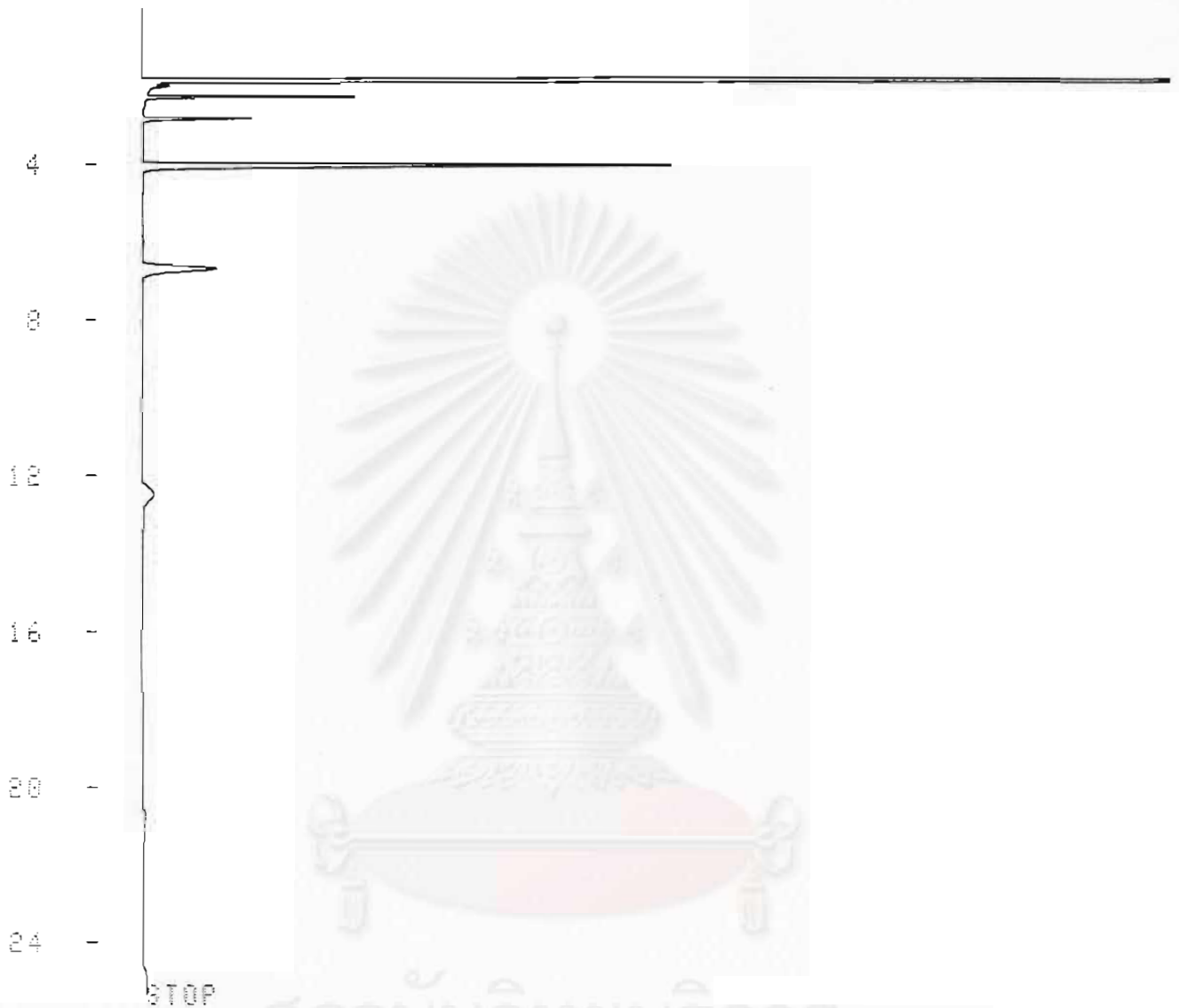
CHROMATOPAC C-R6A  
SAMPLE NO 0  
REPORT NO 3610

FILE 0  
METHOD 0041

PKNO	TIME	AREA	MK	IDNO	CONC	NAME
1	1.918	358478			92.2973	
2	2.112	316	V		0.0015	
3	2.383	2647	V		0.6816	
4	2.98	1816			0.4675	
5	4.083	266			0.0685	
6	4.34	15631	V		4.0246	
7	7.223	5021	V		1.2929	
8	10.3	2247			0.5786	
9	13.565	1972			0.5076	
TOTAL		388395			100	

3.1.6. อุณหภูมิ 350 °C อัตราส่วนโดยโมล 1:12 เวลาสเปซ (สถานะของเหลว) 15 นาที  
ความดัน 19 MPa

START

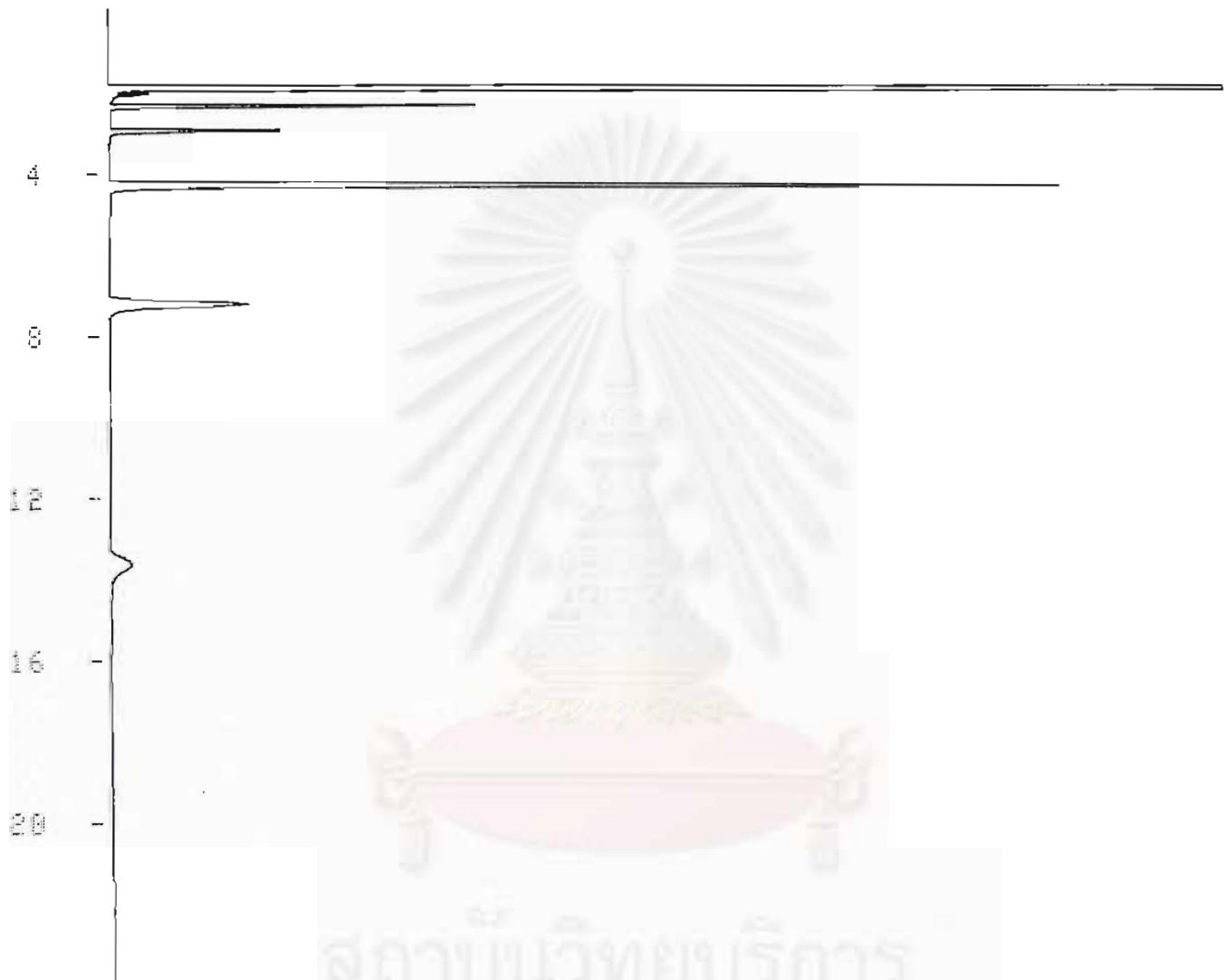


CHROMATOPAC C-R6A FILE 0  
SAMPLE NO 0 METHOD 0841  
REPORT NO 3471

PKNO	TIME	AREA	MK	IDNO	CONC	NAME
1	1.837	241485	S		96.3839	
2	2.018	72	T		0.0286	
3	2.275	1179	T		0.4704	
4	2.845	765			0.3055	
5	4.073	5289			2.1111	
6	6.715	1456			0.5811	
7	12.467	299			0.1194	
TOTAL		250545			100	

3.1.7. อุณหภูมิ 350 °C อัตราส่วนโดยโมล 1:12 เวลาสเปซ (สถานะของเหลว) 30 นาที  
ความดัน 19 MPa

START

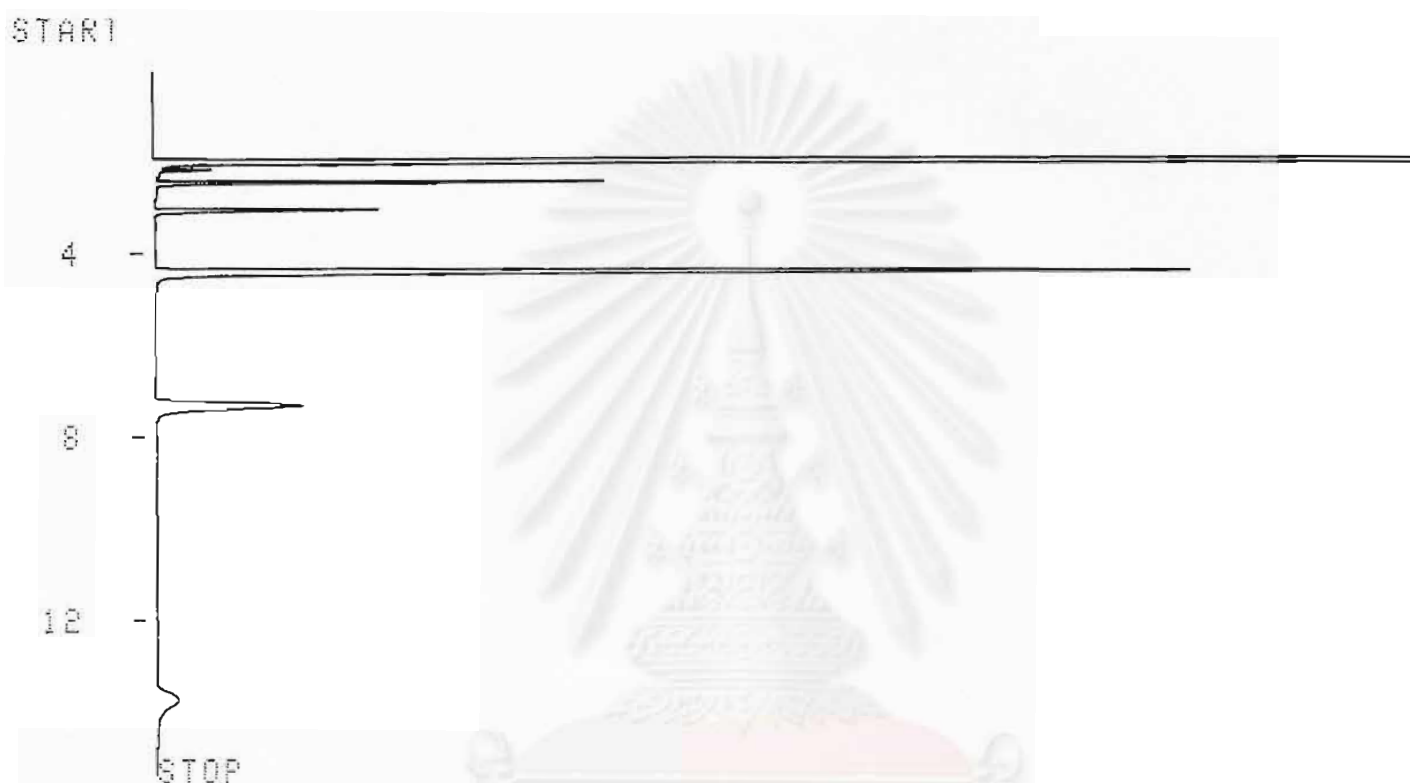


CHROMATOPAC C-86A  
SAMPLE NO 0  
REPORT NO 3615

FILE 0  
METHOD 0841

PKNO	TIME	AREA	MK	IDNO	CONC	NAME
1	1.927	308918	S		94.7468	
2	2.398	2110	T		0.6471	
3	3.015	1375			0.4216	
4	4.375	9982			3.0617	
5	7.29	2771			0.5498	
6	13.69	890			0.2731	
TOTAL		326046			100	

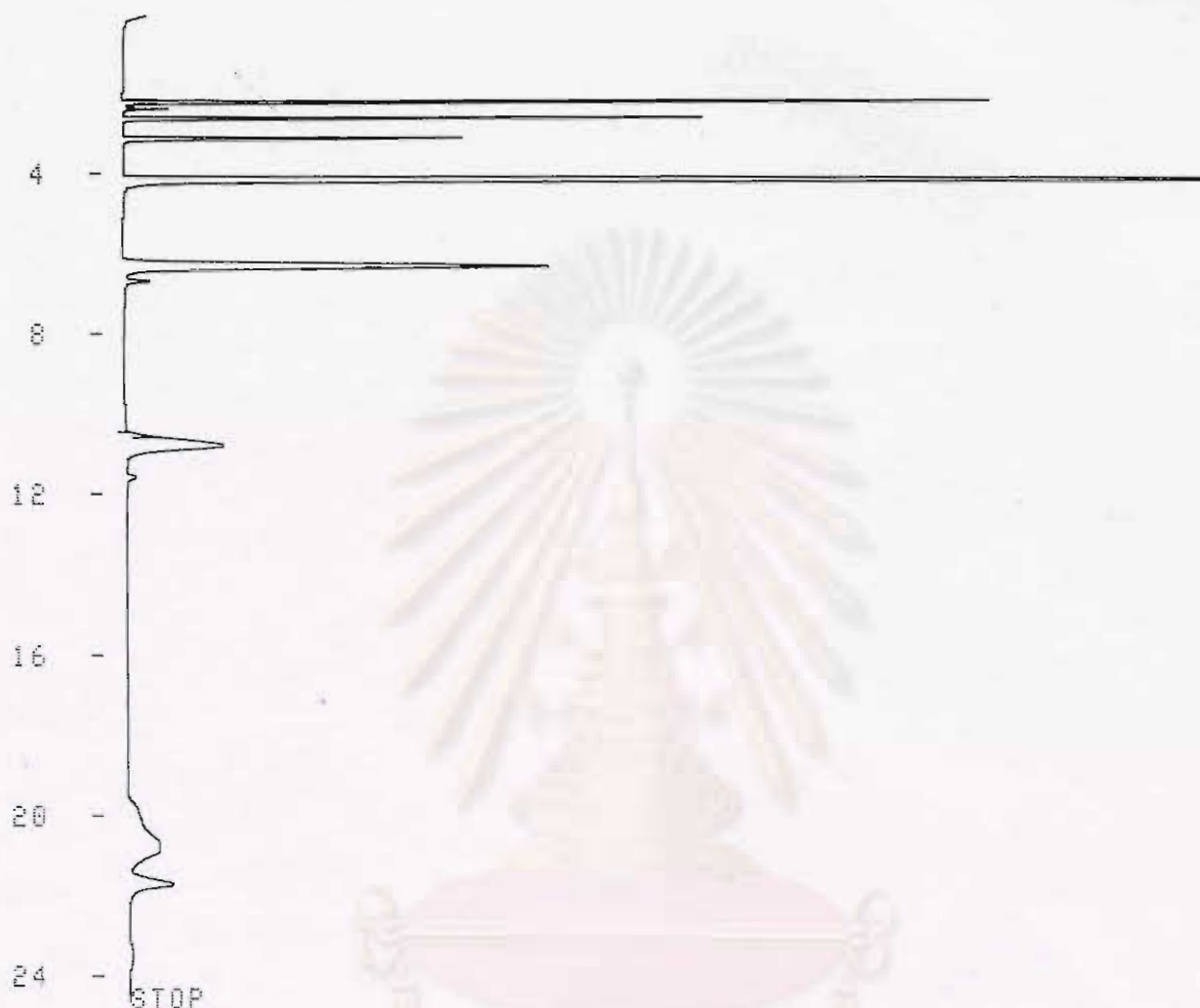
3.1.8. อุณหภูมิ 350 °C อัตราส่วนโดยโมล 1:6 เวลาสเปซ (สถานะของเหลว) 30 นาที  
ความดัน 19 MPa



PKNO	TIME	AREA	MK	IDNO	CONC	NAME
1	1.937	269478	S		94.8597	
2	2.41	1901	T		0.6716	
3	3.02	1195			0.4222	
4	4.372	8432			2.9794	
5	7.283	2288			0.8085	
6	13.633	732			0.2587	
TOTAL		283026			100	

3.1.9. อุณหภูมิ 300 °C อัตราส่วนโดยโมล 1:42 เวลาสเปซ (สถานะของเหลว) 15 นาที  
ความดัน 19 MPa

START

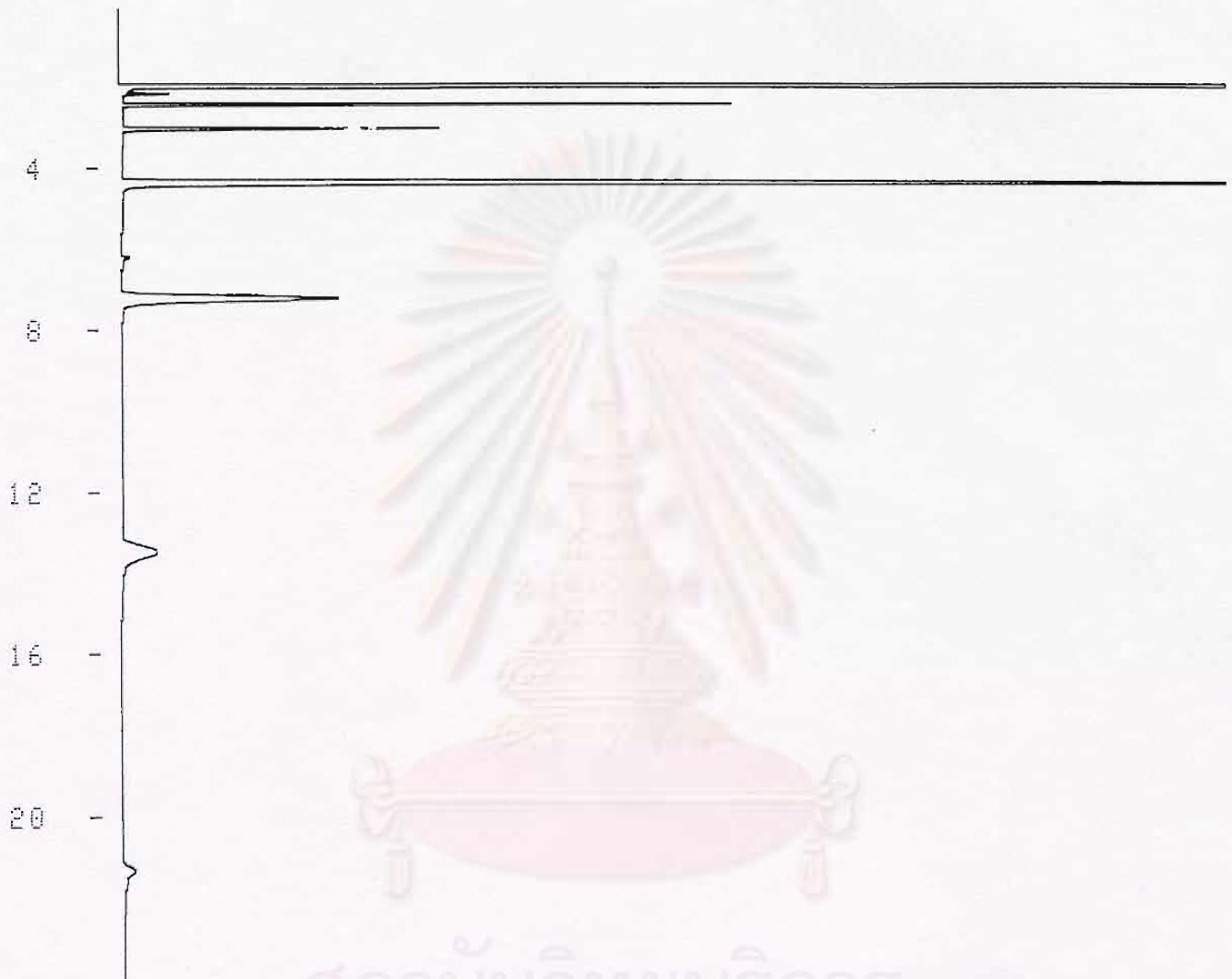


CHROMATOPAC C-R6A FILE 0  
SAMPLE NO 0 METHOD 0841  
REPORT NO 3339

PKNO	TIME	AREA	MK	IDNO	CONC	NAME
1	2.173	4455			10.5782	
2	2.352	203	V		0.4815	
3	2.587	2405	V		5.7107	
4	3.08	2016			4.7857	
5	4.163	17287			41.0466	
6	6.312	6836			16.2309	
7	6.638	282	V		0.6685	
8	10.745	3402			8.0767	
9	11.533	186			0.4421	
10	20.667	3287			7.8043	
11	21.663	1412	V		3.3516	
12	23.367	347			0.8232	
TOTAL		42115			100	

3.1.10. อุณหภูมิ 300 °C อัตราส่วนโดยโมล 1:6 เวลาสเปซ (สถานะของเหลว) 15 นาที  
ความดัน 19 MPa

START



CHROMATOPAC C-R6A FILE 0  
SAMPLE NO 0 METHOD 0841  
REPORT NO 3620

PKNO	TIME	AREA	MK	IDNO	CONC	NAME
1	1.92	397301			94.6944	
2	2.382	2361			0.5628	
3	2.973	1655			0.3945	
4	4.317	12504			2.9801	
5	7.163	3869			0.9222	
6	13.408	1495			0.3562	
7	21.238	377			0.0898	
TOTAL		419561			100	

3.1.11. อุณหภูมิ 270 °C อัตราส่วนโดยโมล 1:12 เวลาสเปซ (สถานะของเหลว) 5 นาที  
ความดัน 19 MPa

CHROM

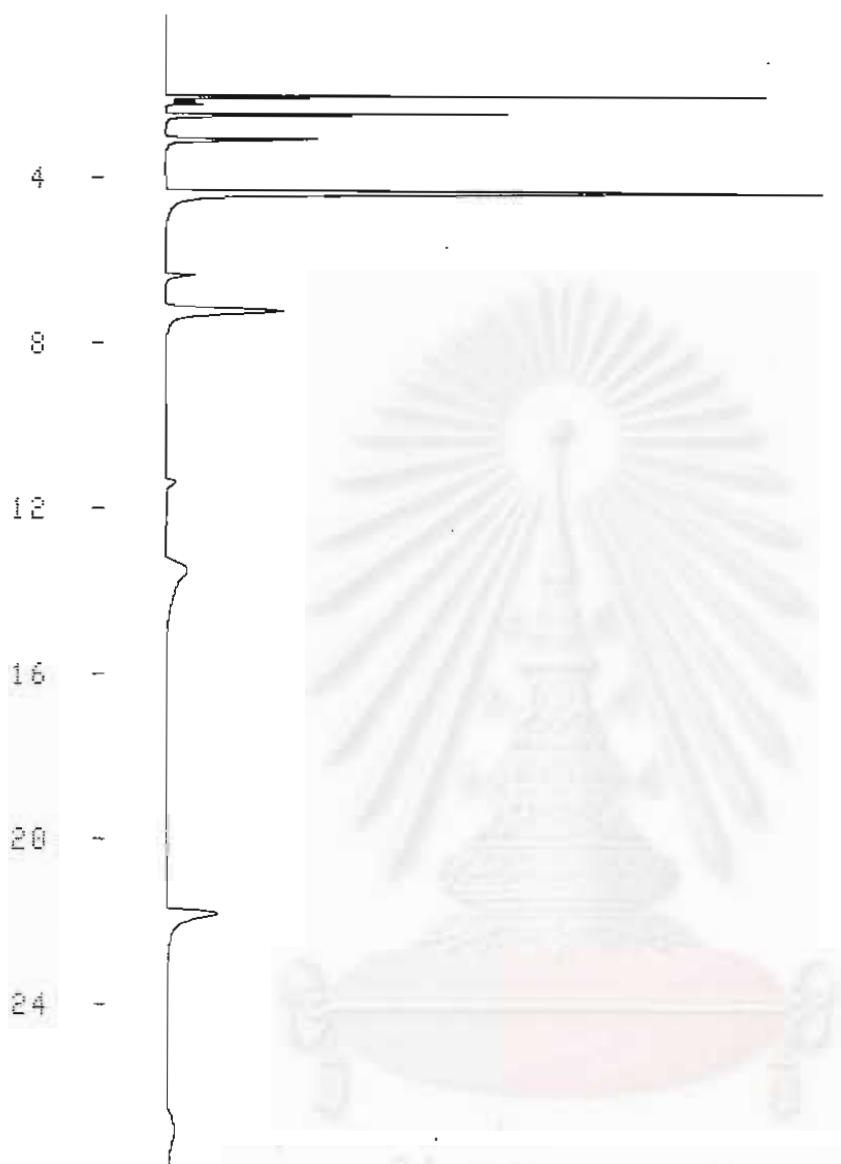


CHROMATOPAC C-R6A FILE การ 0  
SAMPLE NO 0 METHOD 0841  
REPORT NO 3491

PKNO	TIME	AREA	MK	IDNO	CONC	NAME
1	1.85	3437	S		21.4492	
2	2.013	95	T		0.5917	
3	2.268	1253	V		7.8206	
4	2.827	876			5.4668	
5	4.067	6187			38.6137	
6	5.978	215			1.3413	
7	6.717	2051			12.7997	
8	10.725	155			0.9649	
9	12.458	700			4.3708	
10	20.642	1055			6.5815	
TOTAL		16022			100	

3.1.12. อุณหภูมิ 270 °C อัตราส่วนโดยโมล 1:6 เวลาสเปซ (สถานะของเหลว) 5 นาที  
ความดัน 10 MPa

START



CHROMATOPAC C-R6A  
SAMPLE NO 0  
REPORT NO 3505

FILE 0  
METHOD 0841

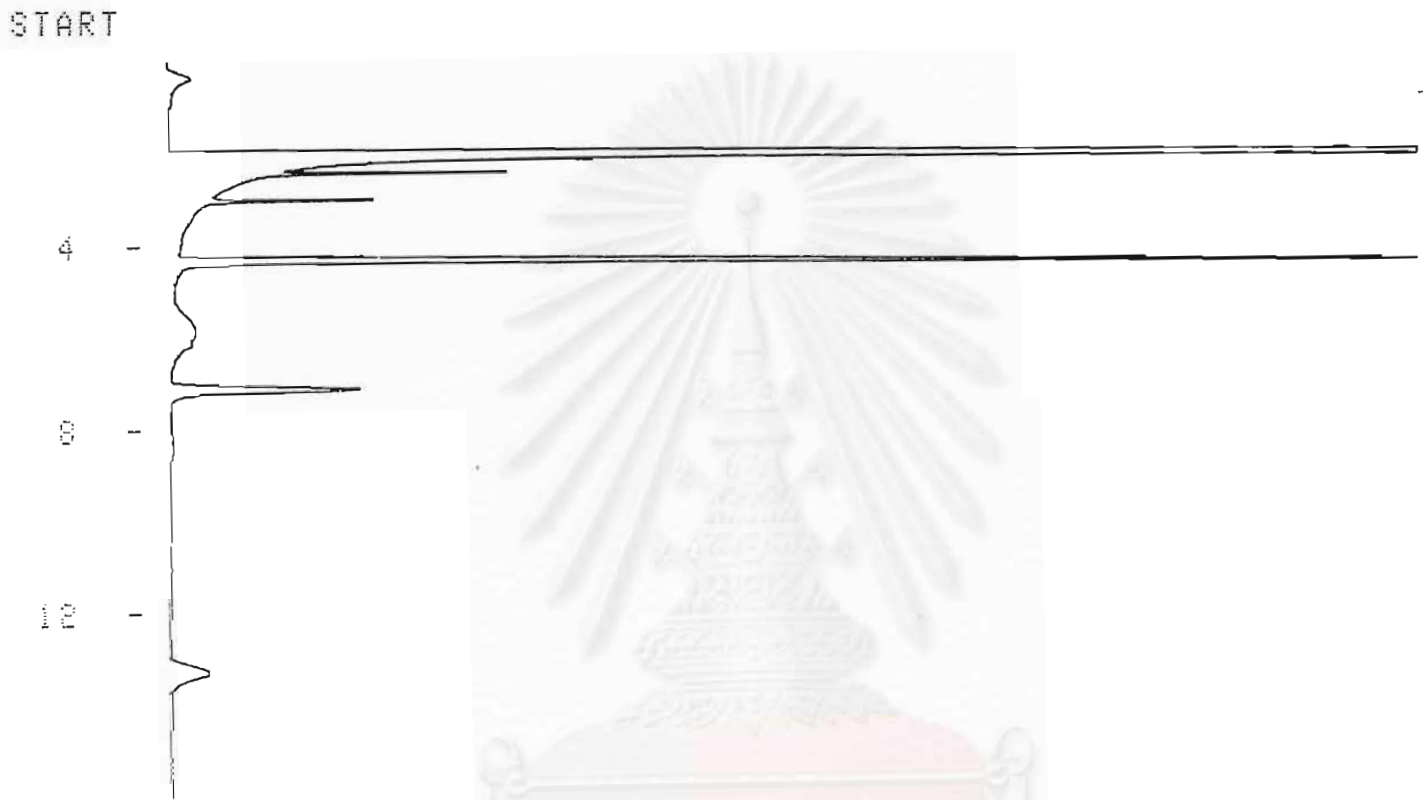
PKNO	TIME	AREA	MK	IDNO	CONC	NAME
1	1.982	2125	S		12.3239	
2	2.157	86	T		0.4964	
3	2.427	1497	V		8.6837	
4	3.022	1078			6.2496	
5	4.347	7120			41.2934	
6	6.307	287			1.6644	
7	7.188	2238			12.9811	
8	11.295	178			1.0323	
9	13.425	1180			6.8452	
10	21.737	1454			8.4301	
TOTAL		17244			100	



### 3.2. โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันเมล็ดในปาล์ม

3.2.1. อุณหภูมิ 350 °C อัตราส่วนโดยโมล 1:42 เวลาสเปซ (สถานะของเหลว) 10 นาที

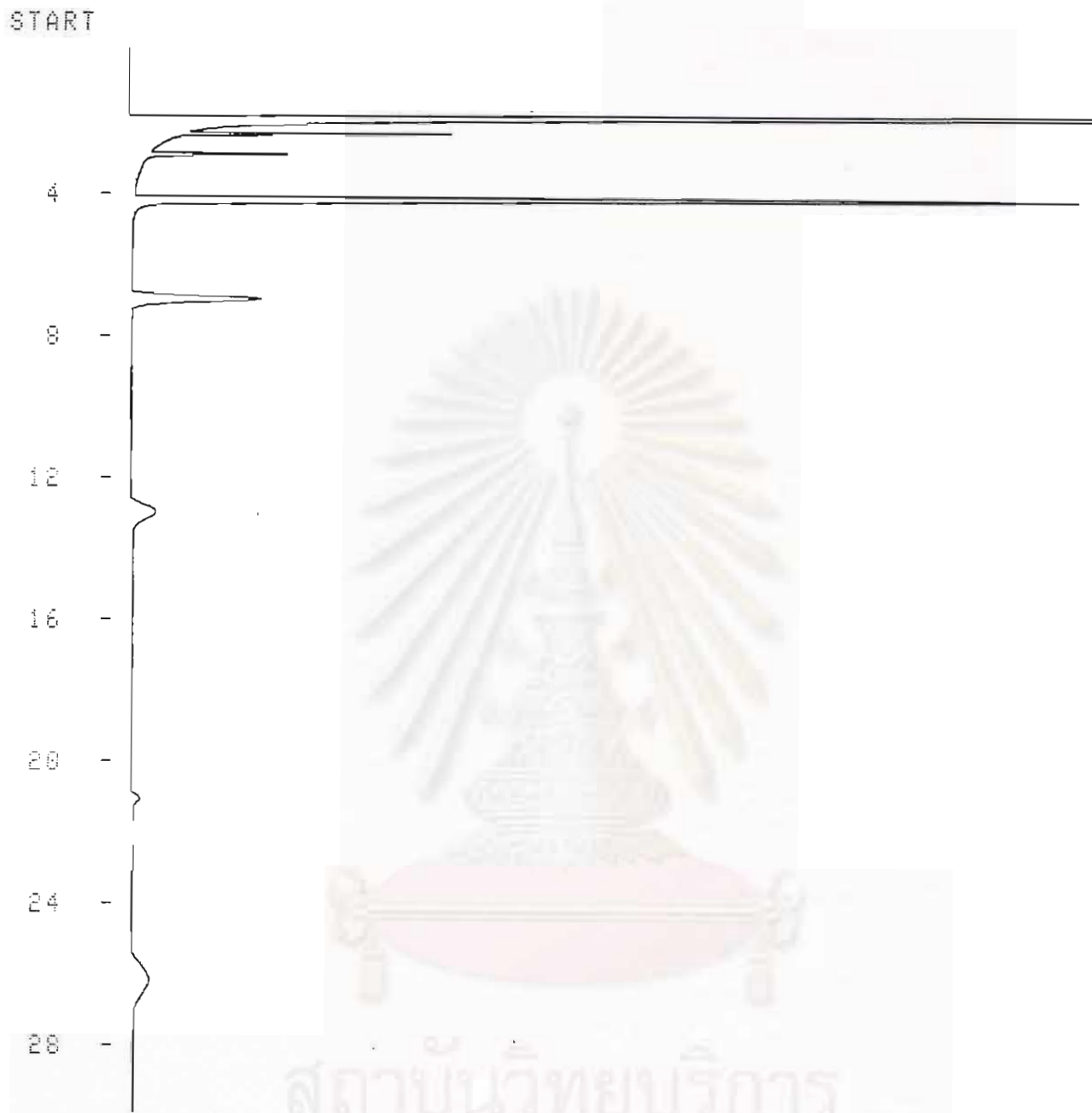
ความดัน 19 MPa



CHROMATOPAC C-R6A FILE 0  
 SAMPLE NO 8 METHOD 0841  
 REPORT NO 3731

PKNO	TIME	AREA	MK	IDNO	CONC	NAME
1	8.36	580			0.1663	
2	1.955	283971	S		94.412	
3	2.415	799	T		0.2655	
4	3.005	781	T		0.2596	
5	4.342	10642			3.5383	
6	7.142	2771			0.9214	
7	13.275	1314			0.4369	
TOTAL		300778			100	

3.2.2. อุณหภูมิ 350 °C อัตราส่วนโดยโมล 1:42 เวลาสเปซ (สถานะของเหลว) 30 นาที  
ความดัน 19 MPa

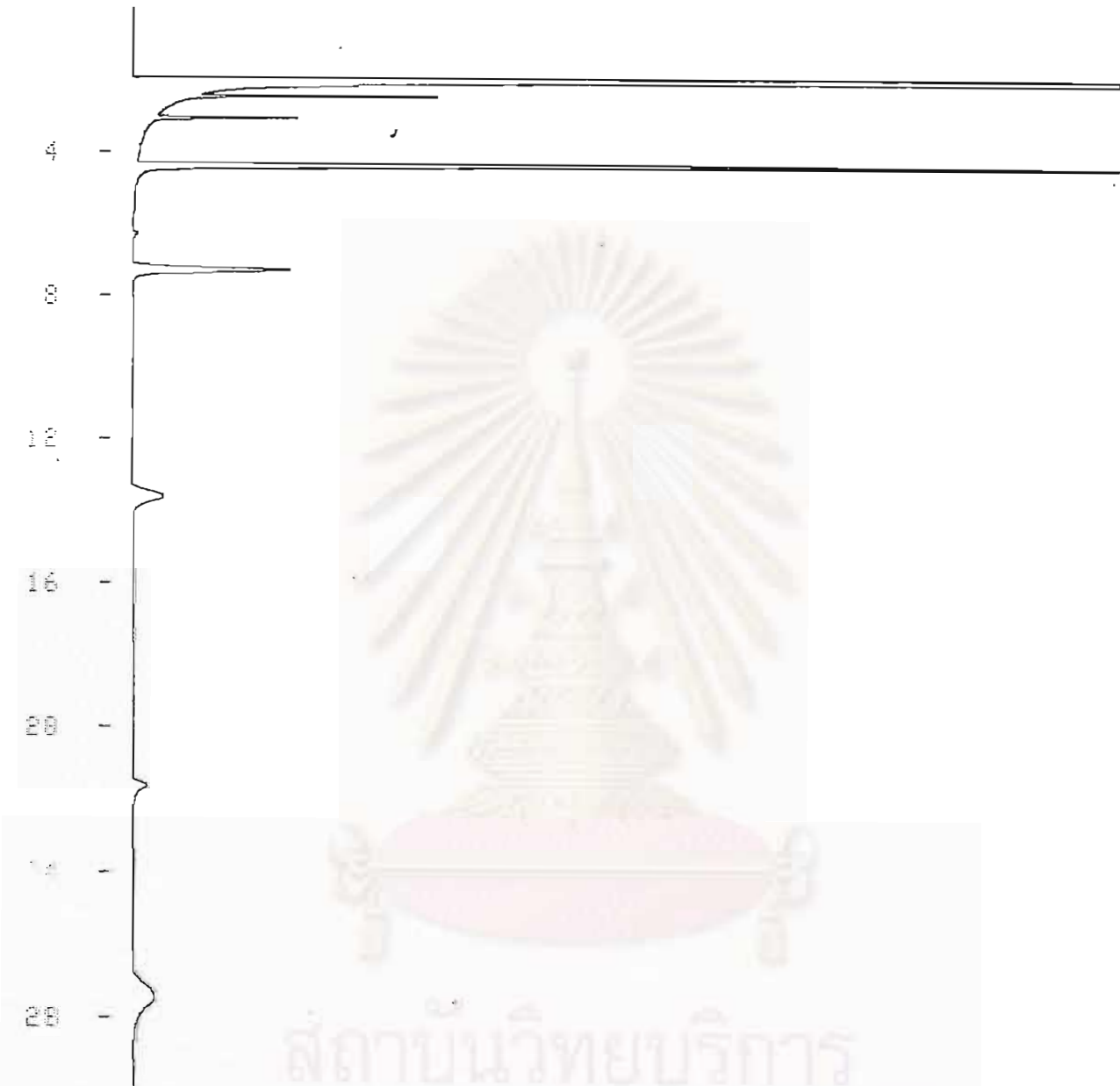


CHROMATOPAC C-R6A FILE 0  
 SAMPLE NO 0 METHOD 0841  
 REPORT NO 3754

PKNO	TIME	AREA	MK	IDNO	CONC	NAME
1	1.962	178378	S		88.811	
2	2.417	1423	T		0.7083	
3	2.997	1087	T		0.5409	
4	4.303	12974			6.4597	
5	7.058	3379			1.6024	
6	13.067	1446			0.7199	
7	21.13	324			0.1612	
8	26.232	1841			0.9165	
TOTAL		200852			100	

3.2.3. อุณหภูมิ 350 °C อัตราส่วนโดยโมล 1:24 เวลาสเปซ (สถานะของเหลว) 10 นาที  
ความดัน 19 MPa

START



CHROMATOPAC C-R6A FILE 0  
SAMPLE NO 0 METHOD 0841  
REPORT NO 3719

PKNO	TIME	AREA	NK	IDNO	CONC	NAME
1	1.993	193884	S		90.4666	
2	2.463	1117	T		0.5214	
3	3.065	919	T		0.4289	
4	4.433	11668			5.4441	
5	7.308	3819			1.4087	
6	13.608	1285			0.5997	
7	21.625	493			0.2299	
8	27.425	1930			0.9006	
TOTAL		214315			100	

3.2.4. อุณหภูมิ 350 °C อัตราส่วนโดยโมล 1:24 เวลาสเปซ (สถานะของเหลว) 30 นาที

ความดัน 19 MPa

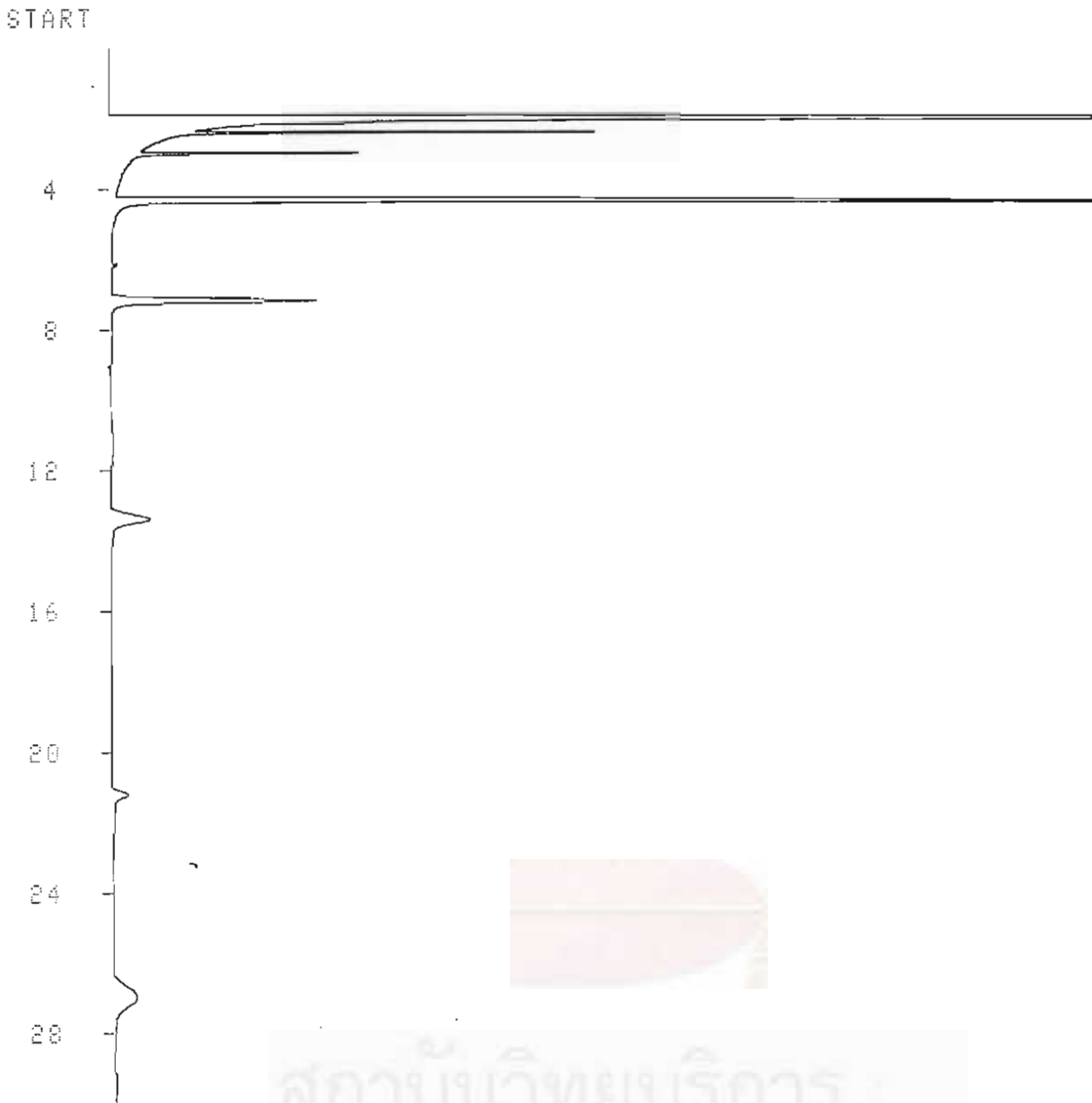
START



CHROMATOPAC C-R6A FILE 0  
 SAMPLE NO 0 METHOD 0841  
 REPORT NO 3709

PKNO	TIME	AREA	MK	IDNO	CONC	NAME
1	1.935	189249	S		89.2178	
2	2.398	1590	T		0.7495	
3	2.992	1157	T		0.5454	
4	4.36	13332			6.285	
5	7.208	3468			1.6351	
6	13.457	1333			0.6282	
7	27.158	1992			0.9391	

3.2.5. อุณหภูมิ 350 °C อัตราส่วนโดยโมล 1:12 เวลาสเปซ (สถานะของเหลว) 10 นาที  
 ความดัน 19 MPa



CHROMATOPAC C-R6A FILE 0  
 SAMPLE NO 0 METHOD 0841  
 REPORT NO 3718

PKNO	TIME	AREA	MK	IDNO	CONC
1	1.953	279030	S		91.8974
2	2.417	1597	T		0.5261
3	3.008	1235	T		0.4068
4	4.373	14242			4.6907
5	7.2	3650			1.202
6	13.378	1470			0.484
7	21.198	475			0.1563
8	26.963	1933			0.6367
TOTAL		303633			100

3.2.6. อุณหภูมิ 350 °C อัตราส่วนโดยโมล 1:12 เวลาสเปซ (สถานะของเหลว) 30 นาที  
ความดัน 19 MPa

START



CHROMATOPAC C-R6A  
SAMPLE NO 0  
REPORT NO 3711

FILE 0  
METHOD 0941

PKNO	TIME	AREA	MK	IDNO	CONC	NAME
1	1.953	192556	S		86.5873	
2	2.417	1968	T		0.8849	
3	3.01	1498	T		0.6735	
4	4.39	17300			7.7795	
5	7.24	4595			2.0661	
6	13.482	1843			0.8285	
7	27.2	2624			1.1801	
TOTAL		222383			100	

3.2.7. อุณหภูมิ 350 °C อัตราส่วนโดยโมล 1:6 เวลาสเปซ (สถานะของเหลว) 10 นาที  
ความดัน 19 MPa

START

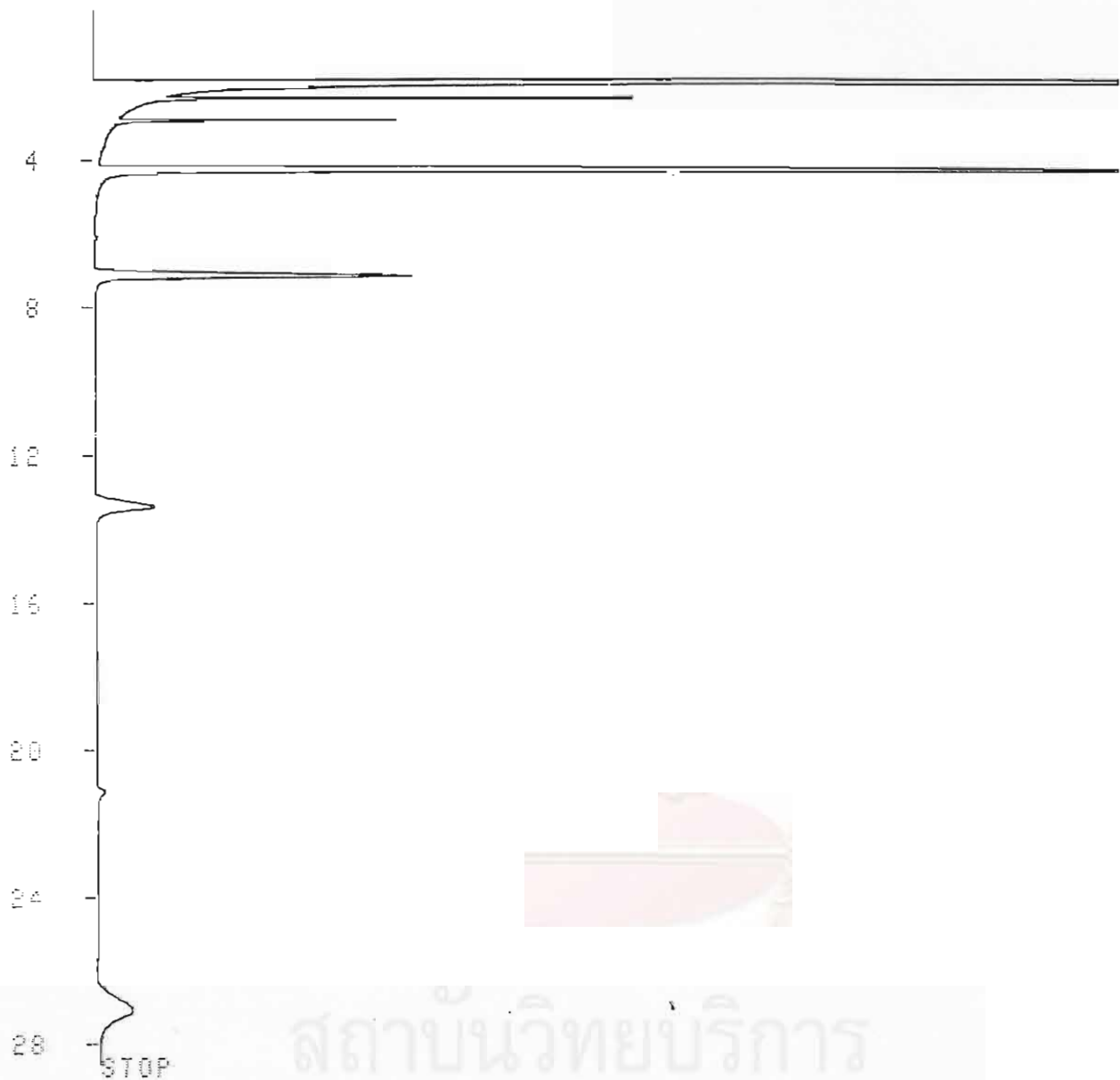


CHROMATOPAC C-R6A FILE 0  
SAMPLE NO 0 METHOD 0841  
REPORT NO 3722

PKNO	TIME	AREA	MK	IDNO	CONC	NAME
1	1.96	184392	S		88.6275	
2	2.42	1449	T		0.6962	
3	3.008	1111	T		0.5342	
4	4.348	13660			6.5658	
5	7.173	3615			1.7373	
6	13.375	1530			0.7352	
7	21.237	355			0.1704	
8	26.892	1942			0.9333	
TOTAL		208053			100	

3.2.8. อุณหภูมิ 350 °C อัตราส่วนโดยโมล 1:6 เวลาสเปซ (สถานะของเหลว) 30 นาที  
ความดัน 19 MPa

START



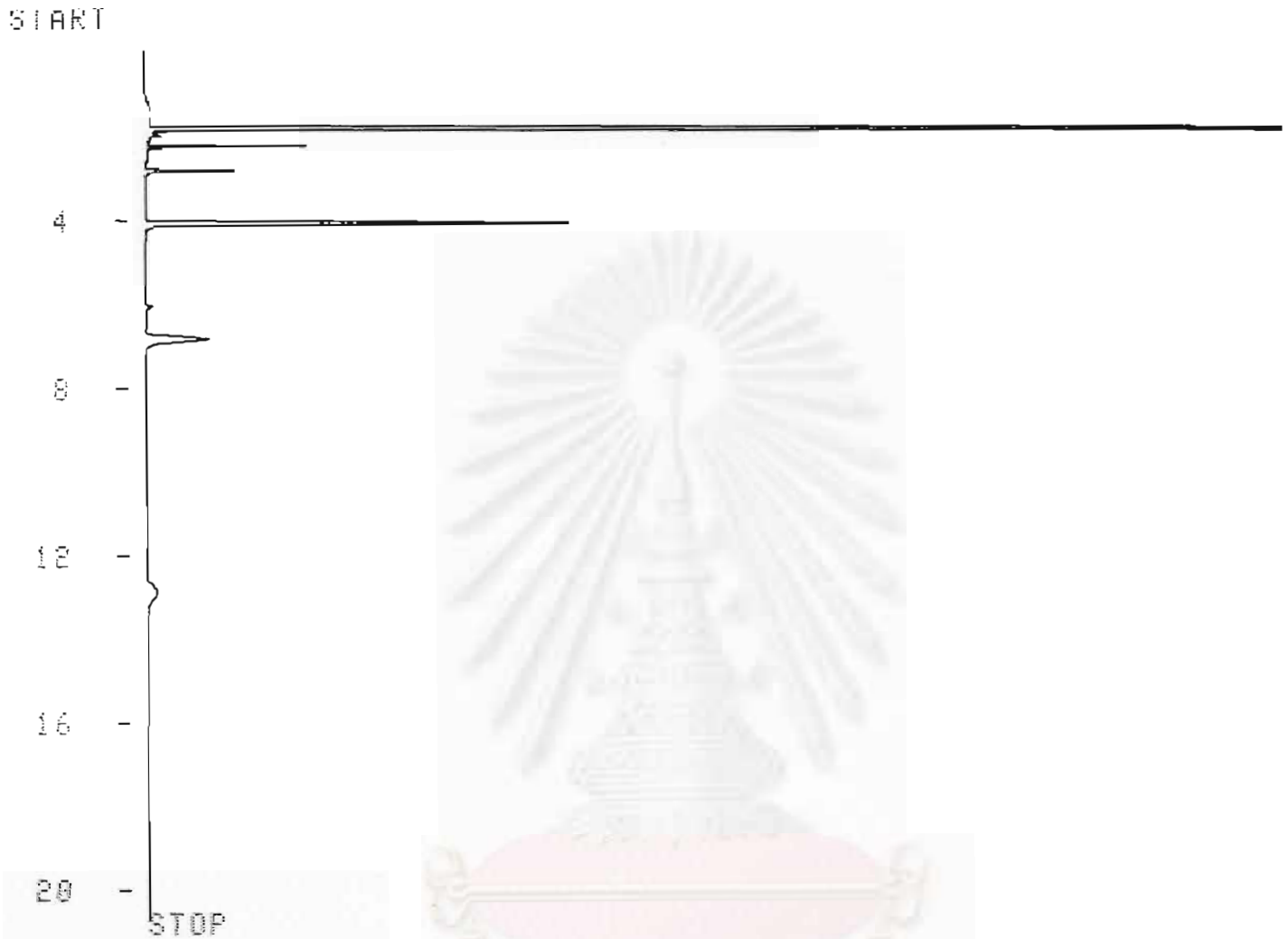
CHROMATOPAC C-R6A  
SAMPLE NO 0  
REPORT NO 3713

FILE 0  
METHOD 0841

PKNO	TIME	AREA	MK	IDNO	CONC	NAME
1	1.957	208769	S		86.1288	
2	2.422	2126	T		0.877	
3	3.015	1643	T		0.6776	
4	4.405	19634			8.1602	
5	7.25	5346			2.2057	
6	13.475	2105			0.8686	
7	27.155	2769			1.1422	
TOTAL		242392			100	



3.2.9. อุณหภูมิ 300 °C อัตราส่วนโดยโมล 1:42 เวลาสเปซ (สถานะของเหลว) 10 นาที  
 ความดัน 19 MPa

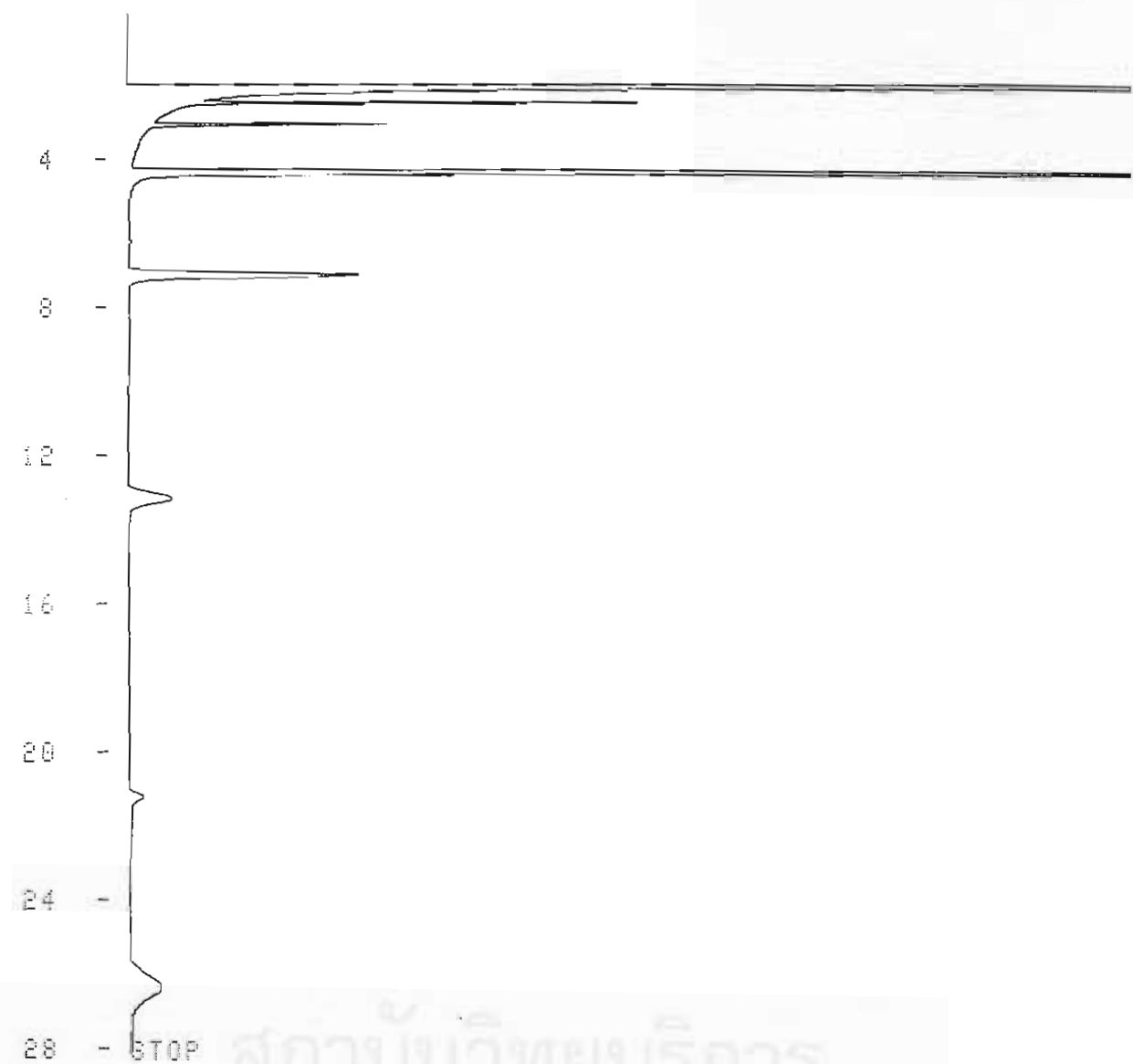


CHROMATOPAC C-R6A FILE 0  
 SAMPLE NO 0 METHOD 0041  
 REPORT NO 3421

PKNO	TIME	AREA	NK	IDNO	CONC	NAME
1	1.897	261784			97.896	
2	2.083	56	V		0.021	
3	2.343	614			0.2298	
4	2.915	450			0.1683	
5	4.183	3237			1.2107	
6	6.913	1011			0.3781	
7	12.908	257			0.0961	
TOTAL		267410			100	

3.2.10. อุณหภูมิ 300 °C อัตราส่วนโดยโมล 1:42 เวลาสเปซ (สถานะของเหลว) 30 นาที  
ความดัน 19 MPa

START



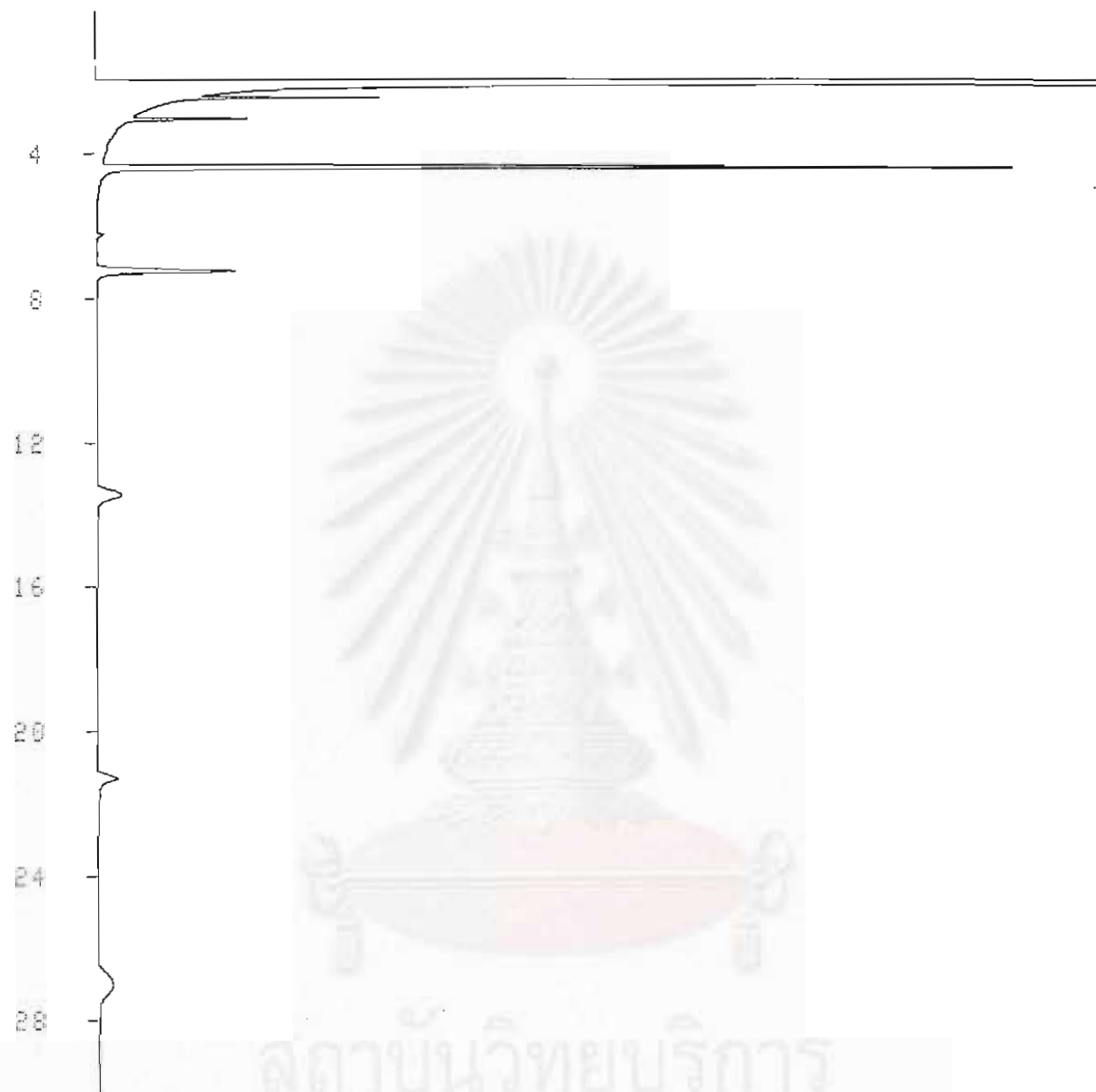
CHROMATOPAC C-R6A FILE 0  
SAMPLE NO 0 METHOD 0841  
REPORT NO 3755

PKNO	TIME	AREA	MK	IDNO	CONC,	NAME
1	1.962	224742	S		88.272	
2	2.417	1831	T		0.7192	
3	2.998	1426	T		0.5601	
4	4.33	16959			6.6611	
5	7.08	4556			1.7893	
6	13.08	1930			0.758	
7	21.14	463			0.1818	
8	26.288	2695			1.0584	
TOTAL		254602			100	

3.2.11. อุณหภูมิ 300.°C อัตราส่วนโดยโมล 1:24 เวลาสเปซ (สถานะของเหลว) 10 นาที

ความดัน 19 MPa

START



CHROMATOPAC C-R6A FILE 0  
 SAMPLE NO 0 METHOD 0841  
 REPORT NO 3714

PKNO	TIME	AREA	MK	IDNO	CONC	NAME
1	1.928	321406	S		95.4198	
2	2.415	1063	T		0.3155	
3	3.005	793	T		0.2323	
4	4.343	8663			2.5719	
5	7.175	2309			0.6854	
6	13.375	925			0.2747	
7	21.223	546			0.1621	
8	26.923	1139			0.3383	
TOTAL		336833			100	

3.2.12. อุณหภูมิ 300 °C อัตราส่วนโดยโมล 1:24 เวลาสเปซ (สถานะของเหลว) 30 นาที  
ความดัน 19 MPa

START



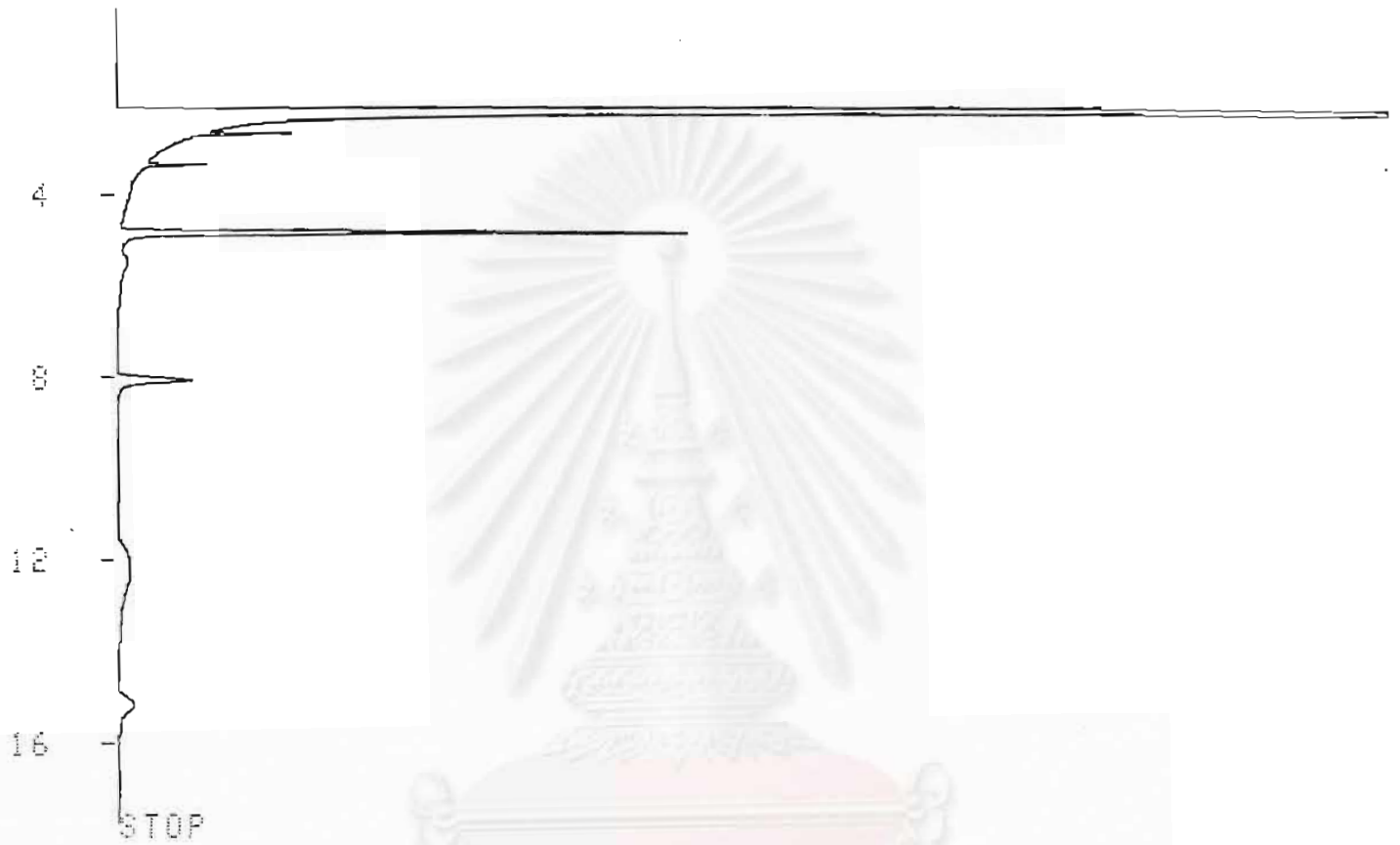
CHROMATOPAC C-R6A  
SAMPLE NO 0  
REPORT NO 3749

FILE 0  
METHOD 0841

PKNO	TIME	AREA	MK	IDNO	CONC	NAME
1	1.955	165813	S		88.0938	
2	2.408	1396	T		0.7418	
3	2.99	1062	T		0.564	
4	4.313	13668			7.2615	
5	7.063	3299			1.7525	
6	13.107	1200			0.6373	
7	26.231	1786			0.9491	
TOTAL		188223			100	

3.2.13. อุณหภูมิ 300 °C อัตราส่วนโดยโมล 1:12 เวลาสเปซ (สถานะของเหลว) 10 นาที  
 ความดัน 19 MPa

START



CHROMATOPAC J-R6A  
 SAMPLE NO 0  
 REPORT NO 3704

FILE 0  
 METHOD 0841

PKNO	TIME	AREA	MK	IDNO	CONC	NAME
1	2.223	215249	S		97.1114	
2	2.752	374	T		0.1689	
3	3.43	329	T		0.1484	
4	4.94	4276			1.9292	
5	8.167	1036			0.4676	
6	15.24	387			0.1744	
TOTAL		221651			100	

3.2.14. อุณหภูมิ 300 °C อัตราส่วนโดยโมล 1:12 เวลาสเปซ (สถานะของเหลว) 30 นาที  
 ความดัน 19 MPa

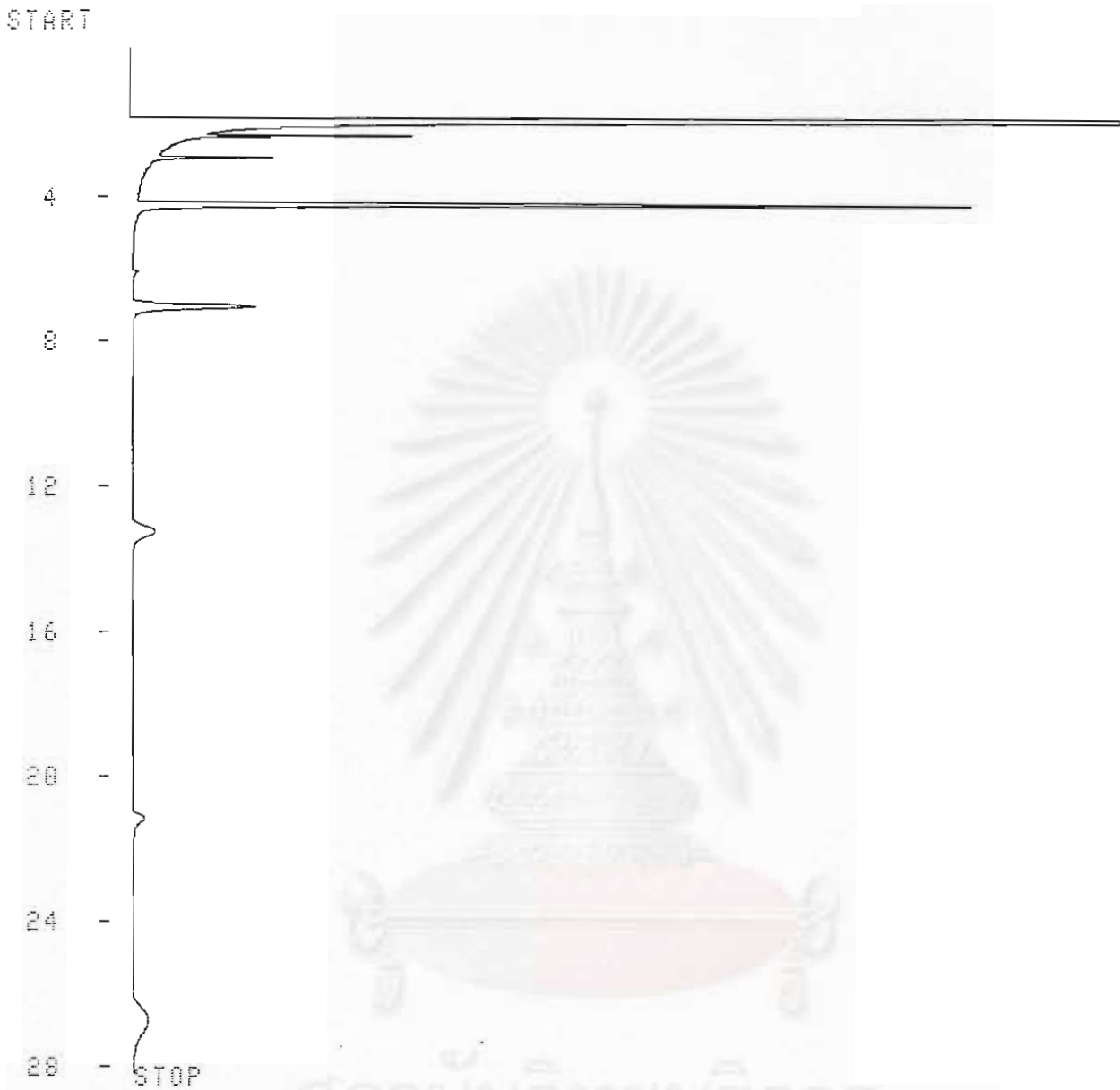
START



CHROMATOPAC C-R6A FILE 0  
 SAMPLE NO 0 METHOD 0841  
 REPORT NO 3712

PKNO	TIME	AREA	MK	IDNO	CONC	NAME
1	1.958	170864	S		88.6698	
2	2.422	1429	T		0.7414	
3	3.017	1103	T		0.5725	
4	4.38	12898			6.6936	
5	7.222	3374			1.7507	
6	13.433	1253			0.6504	
7	27.065	1776			0.9217	
TOTAL		192697			100	

3.2.15. อุณหภูมิ 300 °C อัตราส่วนโดยโมล 1:6 เวลาสเปซ (สถานะของเหลว) 10 นาที  
 ความดัน 19 MPa

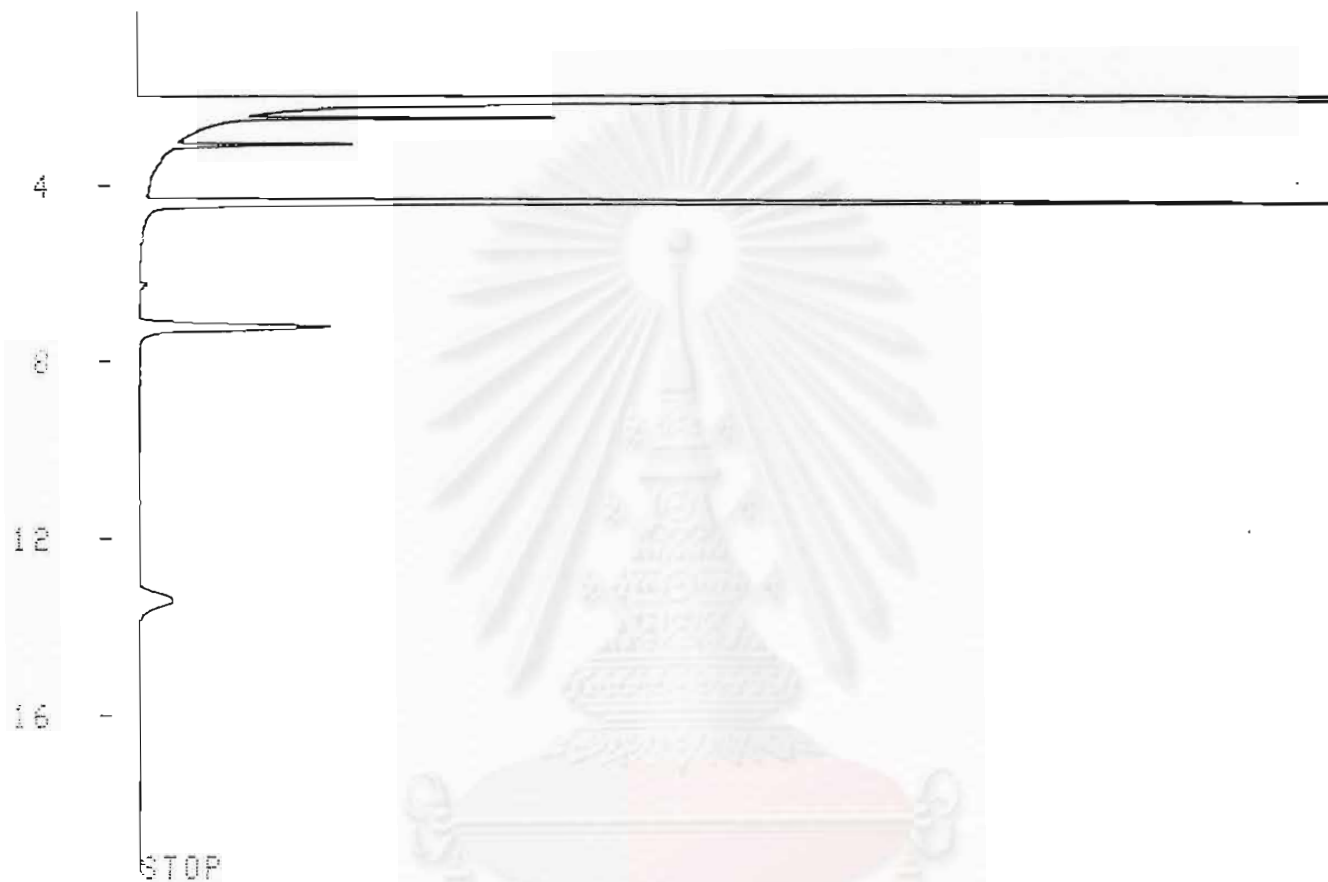


CHROMATOPAC C-R6A FILE 0  
 SAMPLE NO 0 METHOD 0841  
 REPORT NO 3723

PKNO	TIME	AREA	MK	IDNO	CONC	NAME
1	1.958	223417	S		93.3497	
2	2.418	981	T		0.4098	
3	3.008	782	T		0.3269	
4	4.342	9007			3.7635	
5	7.157	2408			1.0062	
6	13.333	997			0.4164	
7	21.247	436			3.1823	
8	26.767	1305			5.5452	
TOTAL		239333			100	

3.2.16. อุณหภูมิ 300 °C อัตราส่วนโดยโมล 1:6 เวลาสเปซ (สถานะของเหลว) 30 นาที  
ความดัน 19 MPa

START



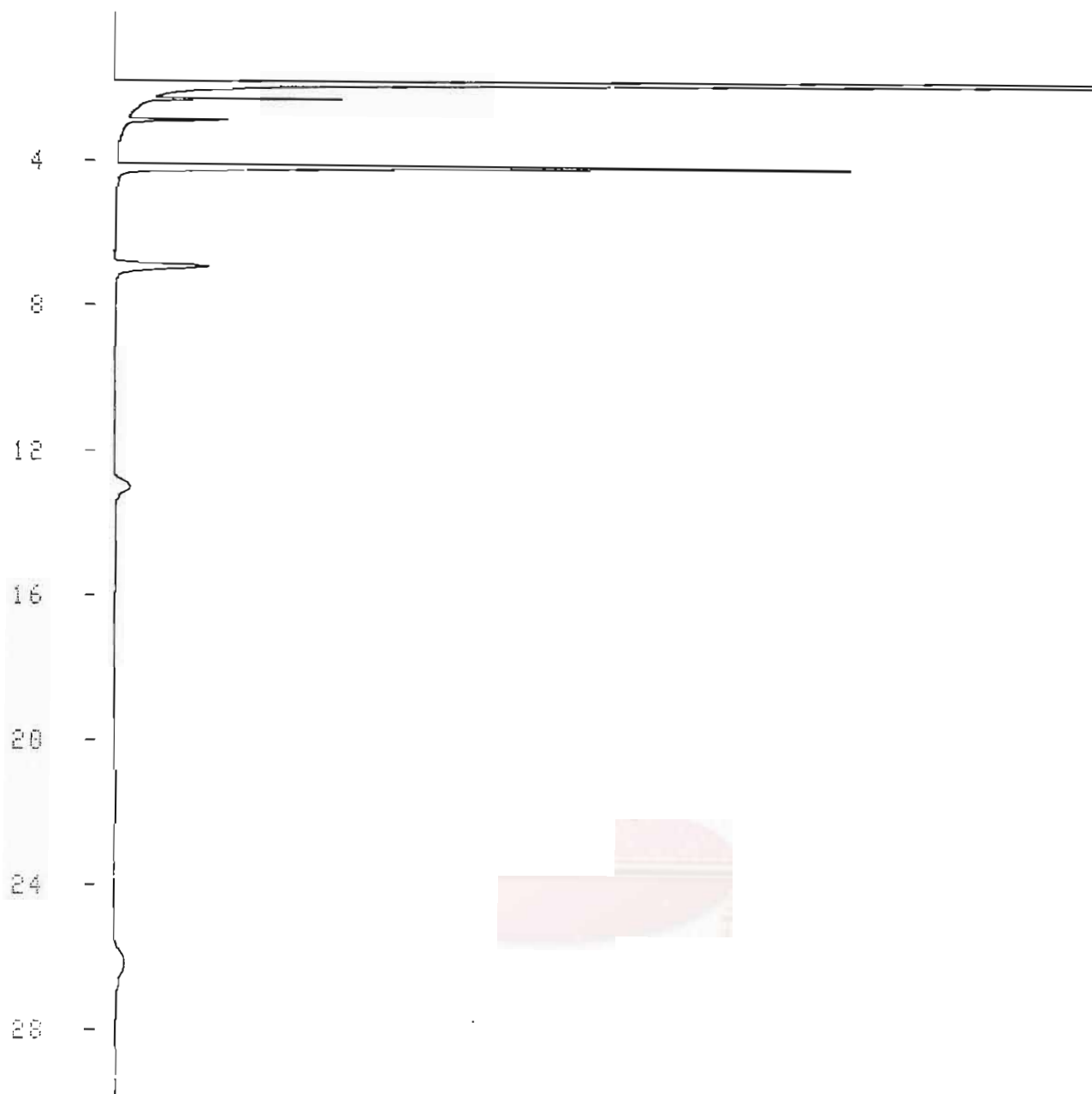
CHROMATOPAC C-R6A FILE 0  
SAMPLE NO 0 METHOD 0841  
REPORT NO 3730

PKNO	TIME	AREA	MK	IDNO	CONC	NAME
1	1.965	281073	S		93.8404	
2	2.428	1254	T		0.4186	
3	3.02	998	T		0.3332	
4	4.358	11688			3.9023	
5	7.172	3199			1.0681	
6	13.333	1310			0.4375	
TOTAL		299523			100	



3.2.17. อุณหภูมิ 270 °C อัตราส่วนโดยโมล 1:42 เวลาสเปซ (สถานะของเหลว) 10 นาที  
ความดัน 19 MPa

START



CHROMATOPAC C-R6A  
SAMPLE NO 0  
REPORT NO 3745

FILE 0  
METHOD 0841

PKNO	TIME	AREA	MK	IDNO	CONC	NAME
1	1.95	117571	S		90.0829	
2	2.402	961	T		0.7366	
3	2.982	728	T		0.5579	
4	4.277	8462			6.4835	
5	7.033	2069			1.5851	
6	13.067	723			0.5541	
TOTAL		130515			100	

3.2.18. อุณหภูมิ 270 °C อัตราส่วนโดยโมล 1:42 เวลาสเปซ (สถานะของเหลว) 30 นาที  
ความดัน 19 MPa

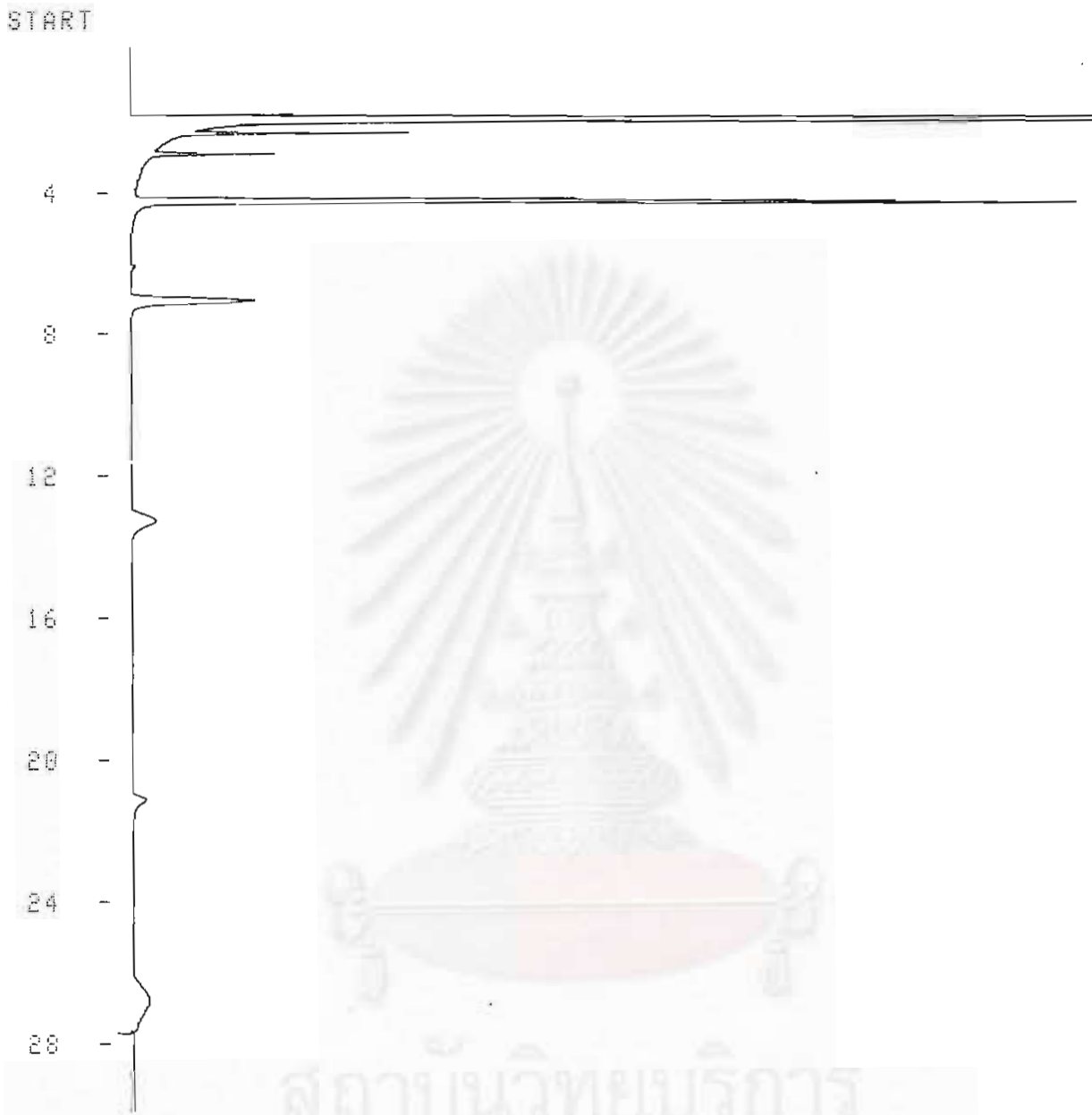
START



CHROMATOPAC C-R6A FILE METHOD 0  
SAMPLE NO 0 0841  
REPORT NO 3721

PKNO	TIME	AREA	MK	IDNO	CONC	NAME
1	1.952	288854	S		89.3583	
2	2.415	2213	T		0.6847	
3	3.007	1672	T		0.5174	
4	4.375	20086			6.2136	
5	7.197	5116			1.5827	
6	13.365	2069			0.64	
7	21.217	517			0.16	
8	26.967	2726			0.8434	
TOTAL		323253			100	

3.2.19. อุณหภูมิ 270 °C อัตราส่วนโดยโมล 1:24 เวลาสเปซ (สถานะของเหลว) 10 นาที  
 ความดัน 19 MPa



CHROMATOPAC C-R6A FILE 0  
 SAMPLE NO 0 M. THOD 0841  
 REPORT NO 3720

PKNO	TIME	AREA	TK	IDNO	CONC	NAME
1	1.952	186443	S		90.7611	
2	2.41	1079	T		0.5253	
3	3	883	T		0.4299	
4	4.337	11066			5.3842	
5	7.153	2828			1.3767	
6	13.35	1150			0.56	
7	21.2	471			0.2293	
8	26.817	1506			0.7333	
TOTAL		205422			100	

3.2.20. อุณหภูมิ 270 °C อัตราส่วนโดยโมล 1:24 เวลาสเปซ (สถานะของเหลว) 30 นาที  
ความดัน 19 MPa

START



CHROMATOPAC C-R6A  
SAMPLE NO 0  
REPORT NO 3710

FILE 0  
METHOD 0841

PKNO	TIME	AREA	NK	IDNO	CONC	NAME
1	1.952	296367	S		96.0675	
2	2.415	943	T		0.3058	
3	3.008	710	T		0.2301	
4	4.347	7422			2.4058	
5	7.188	1915			0.6208	
6	13.433	704			0.2283	
7	21.258	437			0.1416	
TOTAL		308499			100	

3.2.21. อุณหภูมิ 270 °C อัตราส่วนโดยโมล 1:12 เวลาสเปซ (สถานะของเหลว) 10 นาที  
ความดัน 19 MPa

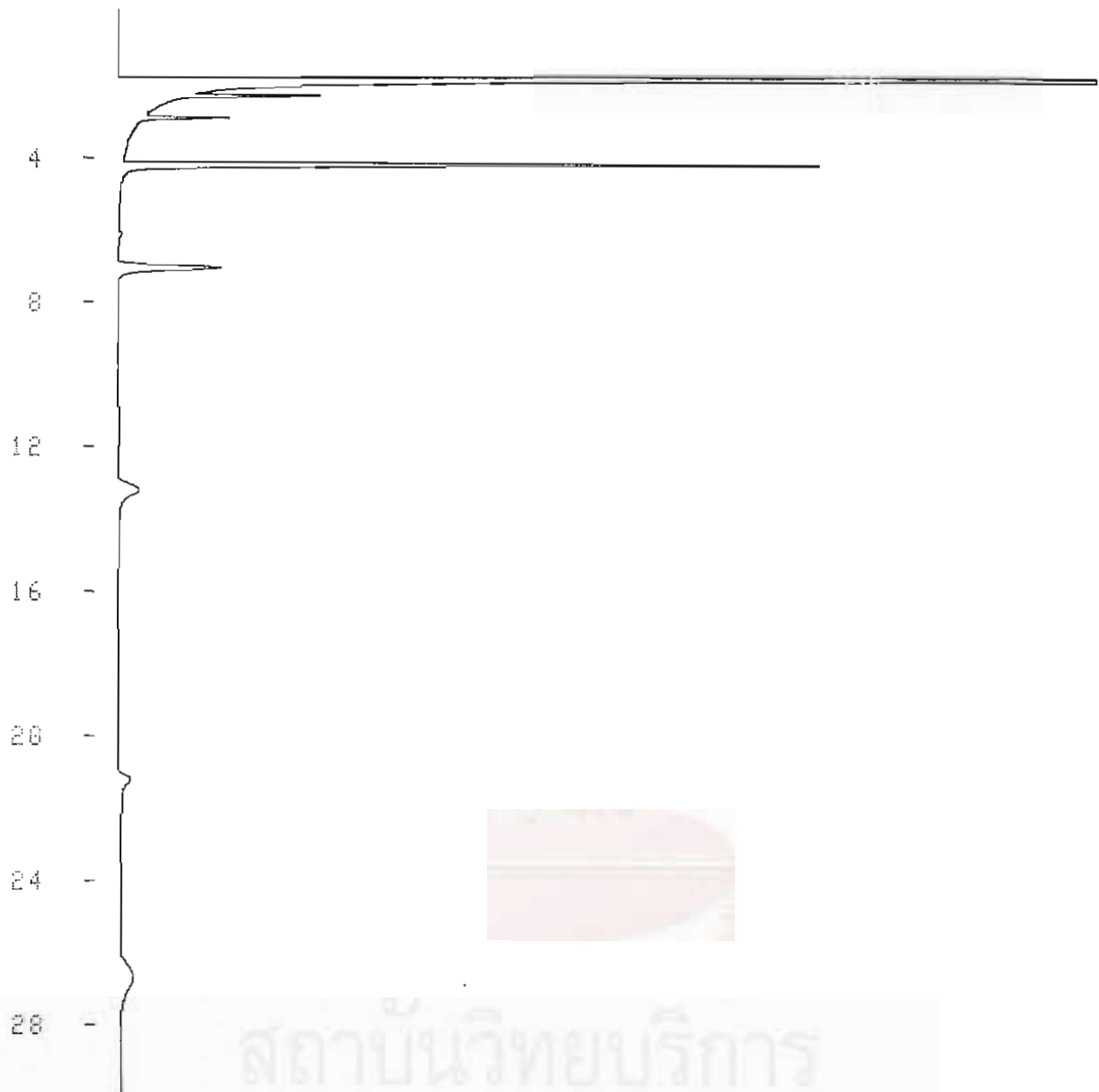


CHROMATOPAC C-R6A FILE 0  
SAMPLE NO 8 METHOD 0841  
REPORT NO 3715

PKNO	TIME	AREA	MK	IDNO	CONC	NAME
1	1.932	236230	S		97.0843	
2	2.393	579	T		0.238	
3	2.985	433	T		0.1779	
4	4.307	4480			1.8414	
5	7.128	1179			0.4845	
6	13.317	423			0.174	
TOTAL		243324			100	

3.2.22. อุณหภูมิ 270 °C อัตราส่วนโดยโมล 1:12 เวลาสเปซ (สถานะของเหลว) 30 นาที  
ความดัน 19 MPa

START



CHROMATOPAC C-R6A  
SAMPLE NO 0  
REPORT NO 3729

FILE 0  
METHOD 0841

PKNO	TIME	AREA	MK	IDNO	CONC	NAME
1	1.928	231695	S		94.2388	
2	2.417	952	T		0.3872	
3	3.005	735	T		0.2991	
4	4.327	8083			3.2878	
5	7.142	2085			0.8479	
6	13.308	913			0.3715	
7	21.272	356			0.1449	
8	26.775	1039			0.4228	
TOTAL		245860			100	

3.2.23. อุณหภูมิ 270 °C อัตราส่วนโดยโมล 1:6 เวลาสเปซ (สถานะของเหลว) 10 นาที  
ความดัน 19 MPa

START



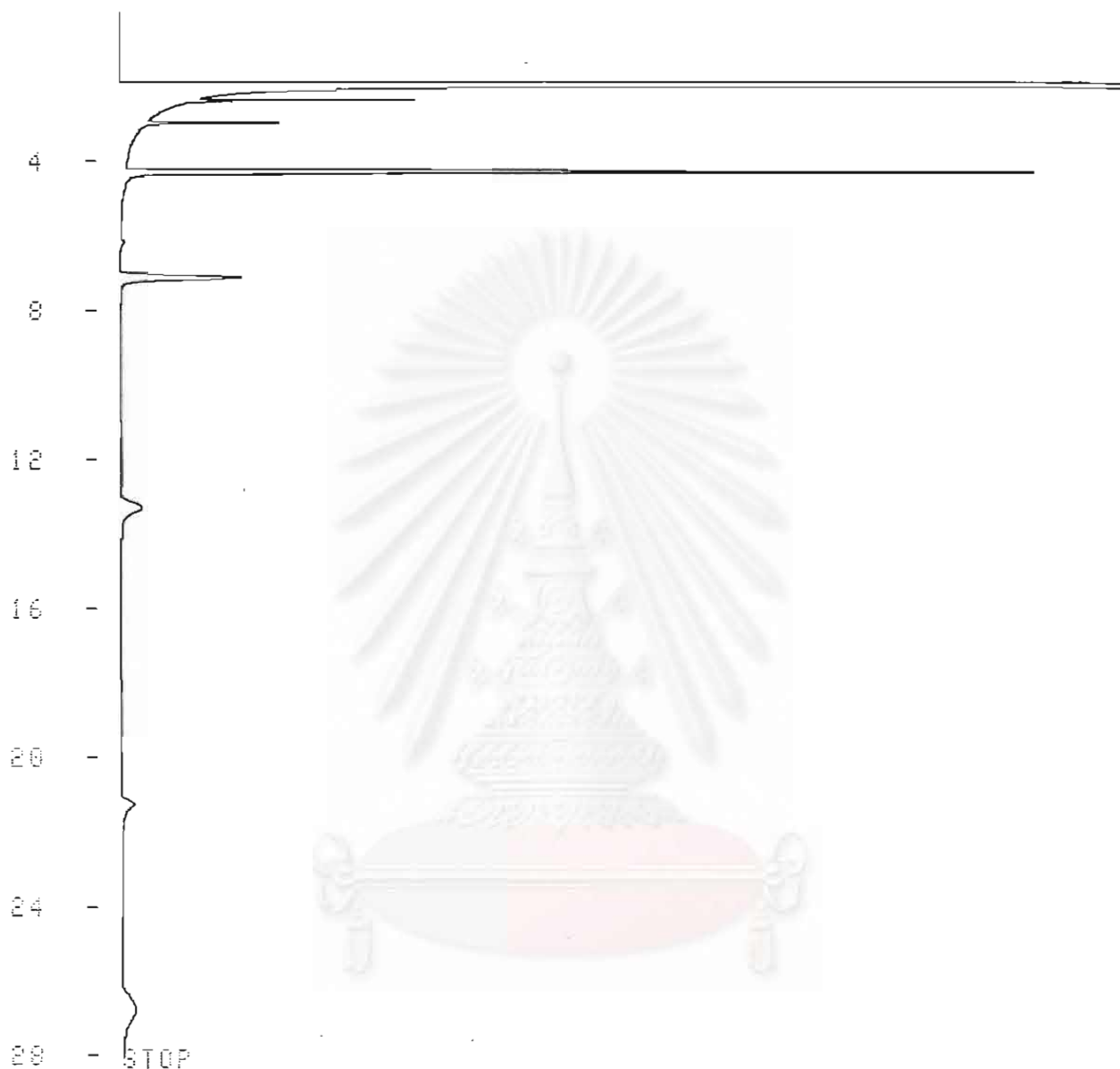
CHROMATOPAC C-R6A FILE 0  
SAMPLE NO 0 METHOD 0841  
REPORT NO 3716

PKNO	TIME	AREA	NK	IDNO	CONC	NAME
1	1.955	314714	S		96.7759	
2	2.418	856	T		0.2631	
3	3.01	654	T		0.2012	
4	4.342	6681			2.0545	
5	7.158	1695			0.5212	
6	13.358	599			0.1841	
TOTAL		325199			100	

3.2.24. อุณหภูมิ 270 °C อัตราส่วนโดยโมล 1:6 เวลาสเปซ (สถานะของเหลว) 30 นาที

ความดัน 19 MPa

START



CHROMATOPAC C-R6A  
 SAMPLE NO 0  
 REPORT NO 3728

FILE 0  
 METHOD 0841

PKNO	TIME	AREA	MK	IDNO	CONC	NAME
1	1.955	237962	S		94.2828	
2	2.415	1001	T		0.3967	
3	3.005	768	T		0.3041	
4	4.337	8422			3.3368	
5	7.15	2111			0.8364	
6	13.312	828			0.3281	
7	21.258	361			0.1432	
8	26.742	939			0.372	
TOTAL		252392			100	



ตารางที่ 1. ผลการทดลองหาปริมาณร้อยละเมทิลเอสเทอร์

น้ำมันมะพร้าว

Condition oil : MeOH,t□,T,P	Area Ml (x104)	conc Ml (x105) ppm	Area Mm (x104)	conc Mm (x104) ppm	Area Mp ( x103)	conc Mp (x104) ppm	Wo g	W p g	W <sub>TGl</sub> (g) %L=45	W <sub>TGm</sub> (g) % M=19	W <sub>TGp</sub> (g) %P=10	D g/ml	W <sub>Ml</sub> g	W <sub>Mm</sub> g	W <sub>Mp</sub> g	%Ml	%Mm	%Mp	% ME
1:42,5,350,19	0.6629	0.8693	0.1983	3.6596	0.654	2.9023	172	165	77.40	32.68	17.20	0.8926	16.07	6.76	5.37	20.76	20.70	31.19	22.16
1:42,10,350,19	0.8256	0.1624	0.1901	0.6415	0.839	0.0683	316	287	142.20	60.04	31.60	0.127232	36.62	14.47	1.54	25.76	24.10	4.88	22.51
1:42,10,350,10	0.6110	0.2892	0.1844	1.0615	0.6545	0.4935	171	157	76.95	32.49	17.10	0.123184	36.85	13.53	6.29	47.89	41.64	36.78	44.79
1:42,15,350,19	0.7685	0.2875	0.2135	1.0426	0.6690	0.4379	225	184	101.25	42.75	22.50	0.05519	95.9	34.76	14.60	94.7	81.31	64.89	87.22
1:42,15,350,10	0.7076	0.3318	0.2143	1.2123	0.6600	0.4994	169	125	76.05	32.11	16.90	0.0723	57.4	20.96	8.63	75.4	65.27	51.09	69.53
1:24,5,350,19	1.7419	0.7883	0.5766	3.0393	2.0210	1.9552	275	236	123.75	52.25	27.50	0.9017	20.63	7.95	5.12	16.67	15.22	18.61	16.56
1:24,5,350,10	2.0458	0.9224	0.7112	3.7181	2.7300	2.7136	230	136	103.50	43.70	23.00	0.9018	13.91	5.61	4.09	13.44	12.83	17.79	13.87
1:24,10,350,19	2.8329	1.2697	0.9627	4.9864	3.8520	3.9137	275	253	123.75	52.25	27.50	0.9018	35.62	13.99	10.98	28.79	26.77	39.93	29.77
1:24,10,350,10	0.6900	0.3240	0.2041	1.1609	0.6970	0.5390	256	233	115.20	48.64	25.60	0.1266	59.63	21.37	9.92	51.77	43.92	38.75	47.99
1:24,15,350,19	0.7685	0.3587	0.2135	1.2083	0.6690	0.5090	256	246	115.20	48.64	25.60	0.10183	86.65	29.19	12.30	75.21	60.01	48.04	67.64
1:24,15,350,10	0.7689	0.3588	0.2145	1.2133	0.6790	0.5197	206	192	92.70	39.14	20.60	0.10183	67.66	22.88	9.80	72.99	58.45	47.57	65.82
1:24,30,350,19	2.1163	0.9535	0.6709	3.5149	1.665	1.5744	192	181	86.40	36.48	19.20	0.2014	85.70	31.59	14.15	99.19	86.60	73.70	92.51
1:24,60,350,19	1.5631	0.7093	0.5021	2.6636	1.572	1.4749	139	117	62.55	26.41	13.90	0.1328	62.48	23.46	12.99	99.89	88.84	93.46	96.18
1:12,5,350,19	1.9794	0.8931	0.6344	3.3308	2.3830	2.3424	336	286	151.20	63.84	33.60	0.9212	27.73	10.34	7.27	18.34	16.20	21.64	18.24

ตารางที่ 1. (ต่อ)

Condition oil : MeOH,t□,T,P	Area MI (x104)	conc MI (x105) ppm	Area Mm (x104)	conc Mm (x104) ppm	Area Mp ( x103)	conc Mp (x104) ppm	Wo g	W p g	W <sub>TGI</sub> (g) %L=45	W <sub>TGm</sub> (g) % M=19	W <sub>TGp</sub> (g) %P=10	D g/ml	W <sub>MI</sub> g	W <sub>Mm</sub> g	W <sub>Mp</sub> g	%MI	%Mm	%Mp	% ME
1:12,10,350,19	0.5196	0.2488	0.1427	0.8510	0.3860	0.2063	365	336	164.25	69.35	36.50	0.11903	70.23	24.02	5.82	42.76	34.64	15.96	37.05
1:12,10,350,10	2.5079	1.1263	0.8078	4.2052	2.9850	2.9863	341	310	153.45	64.79	34.10	0.9135	38.22	14.27	10.13	24.91	22.03	29.72	24.82
1:12,15,350,19	0.5289	0.2529	0.1456	0.8659	0.2990	0.1133	342	299	153.90	64.98	34.20	0.11343	66.67	22.82	2.99	43.32	35.12	8.73	36.54
1:12,15,350,10	0.5087	0.2440	0.1378	0.8265	0.3890	0.2095	338	296	152.10	64.22	33.80	0.11467	62.99	21.34	5.41	41.41	33.22	16.00	35.88
1:6,5,350,19	2.3727	1.0666	0.7295	3.8104	2.5280	2.4975	424	384	190.80	80.56	42.40	0.9018	45.42	16.23	10.63	23.80	20.14	25.08	23.04
1:6,5,350,10	1.6799	0.7609	0.5066	2.6863	2.1930	2.1392	312	264	140.40	59.28	31.20	0.9018	22.27	7.86	6.26	15.87	13.27	20.07	15.77
1:6,10,350,19	0.5717	0.2718	0.1643	0.9602	0.5627	0.3953	310	277	139.50	58.90	31.00	0.11192	67.27	23.76	9.78	48.22	40.35	31.56	43.95
1:6,10,350,10	0.4813	0.2319	0.1365	0.8201	0.4100	0.2320	321	282	144.45	60.99	32.10	0.09689	67.50	23.87	6.75	46.73	39.14	21.04	41.31
1:6,15,350,19	0.2918	0.1483	0.0837	0.5535	0.2620	0.0737	348	304	156.60	66.12	34.80	0.0510	88.39	33.00	4.39	56.44	49.90	12.62	48.84
1:6,15,350,10	0.3544	0.1759	0.1049	0.6608	0.3387	0.1557	361	320	162.45	68.59	36.10	0.05937	94.8	35.62	8.39	58.37	51.93	23.25	51.97
1:12,5,270,19	0.6187	0.2926	0.2051	1.1810	0.7000	0.5422	370	335	166.50	70.30	37.00	0.9165	10.69	4.32	1.98	6.42	6.14	5.36	6.21
1:12,5,270,10	0.5461	0.2605	0.1989	1.1346	0.6360	0.4737	309	270	139.05	58.71	30.90	0.9203	7.64	3.33	1.39	5.50	5.67	4.50	5.41
1:12,10,270,19	1.0381	0.4776	0.3505	1.8991	1.1770	1.0524	344	313	154.80	65.36	34.40	0.9212	16.23	6.45	3.58	10.48	9.87	10.39	10.31
1:12,10,270,10	1.4430	0.6563	0.5056	2.6813	1.8100	1.7295	343	292	154.35	65.17	34.30	0.9211	20.81	8.50	5.48	13.48	13.04	15.98	13.71
1:12,15,270,19	2.1172	0.9539	0.7157	3.7408	3.1990	3.2152	301	277	135.45	57.19	30.10	0.9206	28.70	11.26	9.67	21.19	19.68	32.14	22.28
1:12,15,270,10	1.9146	0.8645	0.6692	3.5063	3.4280	3.4602	327	297	147.15	62.13	32.70	0.9202	27.90	11.32	11.17	18.96	18.21	34.15	20.82
1:6,5,270,19	0.9671	0.4463	0.2818	1.5527	1.8880	1.8129	424	319	190.80	80.56	42.40	0.9206	15.47	5.38	6.28	8.11	6.68	14.82	8.65

ตารางที่ 1. (ต่อ)

Condition oil : MeOH,t□,p,T,P	Area MI (x104)	conc MI (x105) ppm	Area Mm (x104)	conc Mm (x104) ppm	Area Mp ( x103)	conc Mp (x104) ppm	Wo g	W p g	W <sub>TGI</sub> (g) %L=45	W <sub>TGm</sub> (g) % M=19	W <sub>TGp</sub> (g) %P=10	D g/ml	W <sub>MI</sub> g	W <sub>Mm</sub> g	W <sub>Mp</sub> g	%MI	%Mm	%Mp	% ME
1:6,5,270,10	0.7120	0.3337	0.2238	1.2602	1.1800	1.0556	417	365	187.65	79.23	41.70	0.9208	13.23	5.00	4.18	7.05	6.30	10.03	7.26
1:6,10,270,19	1.8498	0.8359	0.6287	3.3021	3.0040	3.0066	320	280	144.00	60.80	32.00	0.9202	25.43	10.05	9.15	17.66	16.53	28.59	18.85
1:6,10,270,10	1.9067	0.8610	0.6707	3.5139	2.4490	2.4130	332	283	149.40	63.08	33.20	0.9209	26.46	10.80	7.42	17.71	17.12	22.34	18.18
1:6,15,270,19	2.0866	0.9404	0.7066	3.6949	2.5080	2.4761	375	320	168.75	71.25	37.50	0.9206	32.69	12.84	8.61	19.37	18.03	22.95	19.51
1:6,15,270,10	2.1685	0.9765	0.7365	3.8457	3.4950	3.5318	348	276	156.60	66.12	34.80	0.9204	29.28	11.53	10.59	18.70	17.44	30.43	19.96
1:12,5,300,10	1.7200	0.7786	0.3643	1.9687	1.9780	1.9092	342	272	153.90	64.98	34.20	0.92	23.02	5.82	5.64	14.96	8.96	16.50	13.63
1:12,10,300,10	1.4914	0.6777	0.5186	2.7468	1.5460	1.4471	335	272	150.75	63.65	33.50	0.9216	20.00	8.11	4.27	13.27	12.74	12.75	13.06
1:12,15,300,10	2.7984	1.2545	0.8914	4.6268	3.1480	3.1607	260	213	117.00	49.40	26.00	0.9202	29.04	10.71	7.32	24.82	21.68	28.14	24.46
1:6,5,300,10	1.3078	0.5967	0.4274	2.2869	1.2460	1.1262	417	313	187.65	79.23	41.70	0.9206	20.29	7.78	3.83	10.81	9.81	9.18	10.33
1:12,30,350,19	0.9982	0.4600	0.2771	1.5290	0.89	0.7454	268	246	120.60	50.92	26.80	0.1333	84.90	28.22	13.76	70.40	55.42	51.33	63.98
1:6,30,350,19	0.8432	0.3916	0.2288	1.2854	0.732	0.5764	278	265	125.10	52.82	27.80	0.1133	91.6	30.05	13.48	73.2	56.90	48.48	65.67
1:12,60,350,19	1.5695	0.7122	0.4551	2.4266	1.555	1.4567	201	172	90.45	38.19	20.10	0.1374	89.1	30.37	18.23	98.6	79.54	90.72	92.61
1:6,60,350,19	1.11765	0.5128	0.3364	1.8280	1.119	0.9904	166	164	74.70	31.54	16.60	0.1180	71.2	25.40	13.76	95.4	80.53	82.90	89.88
1:42,5,300,19	1.1526	0.5282	0.6003	3.1589	3.496	3.5329	175	160	78.75	33.25	17.50	0.3557	23.8	14.2	15.89	30.2	42.74	90.82	41.59
1:42,15,300,19	1.7287	0.7824	0.6836	3.5789	3.402	2.3627	230	216	103.50	43.70	23.00	0.2546	66.4	30.4	20.05	64.1	69.49	87.17	68.63
1:42,30,300,19	1.3405	0.6111	0.5093	2.6999	1.507	1.4054	224	201	100.80	42.56	22.40	0.1301	94.4	41.7	21.71	93.6	98.00	96.92	95.21
1:24,5,300,19	1.3162	0.6004	0.5483	2.8966	1.613	1.5188	315	295	141.75	59.85	31.50	0.2948	60.1	29.0	15.20	42.4	48.44	48.25	44.73

ตารางที่ 1. (ต่อ)

Condition oil : MeOH,t□,T,P	Area Ml (x104)	conc Ml (x105) ppm	Area Mm (x104)	conc Mm (x104) ppm	Area Mp ( x103)	conc Mp (x104) ppm	Wo g	W p g	W <sub>TGl</sub> (g) %L=45	W <sub>TGm</sub> (g) % M=19	W <sub>TGp</sub> (g) %P=10	D g/ml	W <sub>Ml</sub> g	W <sub>Mm</sub> g	W <sub>Mp</sub> g	%Ml	%Mm	%Mp	% ME
1:24,15,300,19	1.104	0.5067	0.4789	2.5466	1.276	1.1583	355	341	159.75	67.45	35.50	0.1646	105.0	52.8	24.00	65.7	78.24	67.61	69.20
1:24,30,300,19	1.4959	0.6797	0.5659	2.9854	1.513	1.4118	250	235	112.50	47.50	25.00	0.1602	99.7	43.8	20.70	88.6	92.17	82.82	88.74
1:42,5,270,19	0.2716	0.1394	0.1325	0.7998	0.672	0.5122	200	185	90.00	38.00	20.00	0.1554	16.6	9.5	6.10	18.4	25.05	30.48	21.76
1:42,15,270,19	0.2572	0.1330	0.1084	0.6783	0.463	0.2887	250	235	112.50	47.50	25.00	0.0535	58.5	29.8	12.69	52.0	62.78	50.77	54.59
1:42,30,270,19	0.9063	0.4195	0.4479	2.3903	1.34	1.2268	259	242	116.55	49.21	25.90	0.1331	76.3	43.5	22.30	65.4	88.30	86.10	74.09
1:42,60,270,19	1.0482	0.4821	0.3502	1.8976	1.318	1.2032	260	249	117.00	49.40	26.00	0.1255	95.7	37.7	23.88	81.8	76.25	91.86	81.72
1:24,5,270,19	0.256	0.1325	0.125	0.7620	0.581	0.4149	250	236	112.50	47.50	25.00	0.2055	15.2	8.8	4.77	13.5	18.43	19.06	15.53
1:24,15,270,19	0.4037	0.1977	0.2071	1.1760	1.006	0.8695	315	286	141.75	59.85	31.50	0.1055	53.6	31.9	23.58	37.8	53.29	74.87	46.80
1:24,30,270,19	0.7806	0.3640	0.349	1.8916	1.712	1.6247	320	302	144.00	60.80	32.00	0.1555	70.7	36.7	31.56	49.1	60.44	98.63	58.71
1:24,60,270,19	1.3236	0.6036	0.5572	2.9415	1.408	1.2995	266	246	119.70	50.54	26.60	0.1554	95.6	46.6	20.57	79.8	92.13	77.34	82.65
1:42,30,350,19	1.2818	0.5852	0.397	2.1336	1.405	1.2963	152.2	151.3	68.50	28.92	15.22	0.1315	67.3	24.6	14.92	98.3	84.89	98.00	94.82
1:6,15,300,19	1.2504	0.5713	0.3869	2.0827	1.495	1.3926	321.4	229.4	144.62	61.06	32.14	0.1694	77.4	28.2	18.86	53.5	46.20	58.70	52.34
1:6,60,300,19	1.0755	0.4942	0.3106	1.6979	1.161	1.0353	155.8	152.5	70.12	29.61	15.58	0.1101	68.4	23.5	14.34	97.6	79.41	92.00	92.16
1:12,30,300,19	1.1137	0.5110	0.4955	2.6304	1.683	1.5936	192.3	186.4	86.54	36.54	19.23	0.1764	54.0	27.8	16.84	62.4	76.06	87.56	69.30
1:12,30,270,19	1.3749	0.6263	0.5912	3.1130	2.732	2.7157	212.4	183.2	95.58	40.36	21.24	0.312	36.8	18.3	15.95	38.5	45.29	75.08	45.17
1:6,30,270,19	1.02	0.4697	0.3033	1.6611	1.179	1.0546	154.6	152.3	69.57	29.37	15.46	0.2234	32.0	11.3	7.19	46.0	38.55	46.50	44.17

น้ำมันเมล็ดในปาล์ม

Condition oil : MeOH,t□,T,P	Area Ml (x104)	conc Ml (x105) ppm	Area Mm (x104)	conc Mm (x104) ppm	Area Mp (x103)	conc Mp (x104) ppm	Wo g	W p g	W <sub>TGl</sub> (g) %L=49	W <sub>TGm</sub> (g) % M=17	W <sub>TGp</sub> (g) %P=14	D g/ml	W <sub>Ml</sub> g	W <sub>Mm</sub> g	W <sub>Mp</sub> g	%Ml	%Mm	%Mp	% ME
1:42,5,350,10	1.9255	0.8693	0.6996	3.6596	2.9065	2.9023	172	165	82.56	29.24	24.08	0.8926	16.07	6.76	5.37	19.46	23.14	22.28	20.75
1:42,10,350,19	1.0642	0.3839	0.2771	1.0903	1.314	0.6909	86	84	41.37	14.65	12.07	0.10842	29.74	8.45	5.35	71.90	57.66	44.36	63.95
1:42,15,350,19	1.2974	0.5921	0.3379	1.8356	1.4460	1.3401	145	125	69.60	24.65	20.30	0.12142	60.95	18.90	13.80	87.58	76.66	67.96	81.75
1:42,30,350,19	1.6786	0.7603	0.4438	2.3696	1.8150	1.7348	147	110	70.53	24.98	20.57	0.1159	72.2	22.49	16.47	102.3	90.03	80.04	95.72
1:24,10,350,19	1.1668	0.5344	0.3019	1.6541	1.2850	1.1679	163	136	78.22	27.70	22.81	0.18516	39.3	12.15	8.58	50.2	43.85	37.60	46.59
1:24,15,350,19	1.1453	0.5250	0.2926	1.6072	1.1430	1.0160	152	140	72.96	25.84	21.28	0.12943	56.8	17.38	10.99	77.8	67.28	51.65	70.92
1:24,30,350,19	1.3332	0.6079	0.3468	1.8805	1.3333	1.2196	194	174	92.88	32.90	27.09	0.1225	86.3	26.71	17.32	93.0	81.20	63.95	85.29
1:24,60,350,19	1.5312	0.6953	0.3960	2.1286	1.6130	1.5188	194	186	93.12	32.98	27.16	0.134	96.5	29.55	21.08	103.6	89.59	77.62	96.00
1:12,10,350,19	1.4242	0.6480	0.3650	1.9723	1.4700	1.3658	192	161	92.23	32.67	26.90	0.32396	32.2	9.80	6.79	34.9	30.01	25.23	32.14
1:12,15,350,19	1.0815	0.4968	0.2712	1.4992	1.1360	1.0086	211	195	101.28	35.87	29.54	0.21136	45.8	13.83	9.30	45.3	38.56	31.50	41.38
1:12,30,350,19	1.7300	0.7830	0.4595	2.4488	1.8430	1.7648	132	111	63.24	22.40	18.45	0.23103	37.6	11.77	8.48	59.5	52.53	45.97	55.59
1:12,60,350,19	1.907	0.8611	0.4851	2.5779	1.938	1.8664	196	175	94.08	33.32	27.44	0.1824	82.6	24.74	17.91	87.8	74.25	65.27	80.91
1:6,10,350,19	1.366	0.6224	0.3615	1.9546	1.53	1.4300	279.6	265	134.22	47.54	39.15	0.2983	55.3	17.36	12.70	41.2	36.53	32.45	38.64
1:6,15,350,19	1.4834	0.6742	0.3503	1.8981	1.2150	1.0931	251	234	120.48	42.67	35.14	0.25456	62.0	17.45	10.05	51.4	40.89	28.59	45.12
1:6,30,350,19	1.9634	0.8860	0.5346	2.8275	2.1050	2.0450	175	132	83.90	29.71	24.47	0.22296	52.5	16.74	12.11	62.5	56.34	49.48	58.88

ตารางที่ 1. (ต่อ)

Condition oil : MeOH,t□,T,P	Area Ml (x104)	conc Ml (x105) ppm	Area Mm (x104)	conc Mm (x104) ppm	Area Mp ( x103)	conc Mp (x104) ppm	Wo g	W p g	W <sub>TGl</sub> (g) %L=49	W <sub>TGm</sub> (g) % M=17	W <sub>TGp</sub> (g) %P=14	D g/ml	W <sub>Ml</sub> g	W <sub>Mm</sub> g	W <sub>Mp</sub> g	%MI	%Mm	%Mp	% ME
1:42,10,300,19	0.6722	0.3162	0.1577	0.9269	0.465	0.2908	132	116	63.36	22.44	18.48	0.09234	39.7	11.64	3.65	62.7	51.89	19.77	52.76
1:42,15,300,19	1.0642	0.4892	0.2771	1.5290	1.3140	1.1990	147	122	70.56	24.99	20.58	0.10042	59.4	18.58	14.57	84.2	74.33	70.78	79.71
1:42,30,300,19	1.6959	0.7680	0.4556	2.4291	1.9300	1.8578	112	103	53.57	18.97	15.62	0.14596	54.2	17.14	13.11	101.2	90.35	83.91	95.78
1:24,10,300,19	0.8663	0.4018	0.2309	1.2960	0.9250	0.7829	159	151	76.36	27.04	22.27	0.189288	32.1	10.34	6.25	42.0	38.23	28.04	38.70
1:24,15,300,19	1.2148	0.5556	0.3074	1.6818	1.1710	1.0460	212	186	101.76	36.04	29.68	0.15253	67.8	20.51	12.76	66.6	56.90	42.98	60.32
1:24,30,300,19	1.3668	0.6227	0.3299	1.7953	1.2000	1.0770	253	237	121.44	43.01	35.42	0.13663	108.0	31.14	18.68	88.9	72.40	52.74	78.97
1:24,60,300,19	1.3621	0.6206	0.3425	1.8588	1.1700	1.0449	154	125	73.92	26.18	21.56	0.09886	78.5	23.50	13.21	106.2	89.77	61.28	94.68
1:12,10,300,19	0.4276	0.2082	0.1036	0.6541	0.3860	0.2063	243	223	116.64	41.31	34.02	0.1355	34.3	10.76	3.39	29.4	26.05	9.98	25.22
1:12,15,300,19	0.6999	0.3284	0.1806	1.0424	0.7240	0.5679	233	214	111.84	39.61	32.62	0.165243	42.5	13.50	7.35	38.0	34.08	22.55	34.43
1:12,30,300,19	1.2898	0.5887	0.3374	1.8331	1.2530	1.1337	141	128	67.64	23.95	19.73	0.16248	46.4	14.44	8.93	68.6	60.28	45.27	62.66
1:12,60,300,19	1.1317	0.5190	0.2878	1.5830	1.1060	0.9765	169	145	81.12	28.73	23.66	0.09529	79.0	24.09	14.86	97.3	83.84	62.80	88.32
1:6,10,300,19	0.9007	0.4170	0.2408	1.3459	0.9970	0.8599	252	179	121.12	42.90	35.33	0.21973	34.0	10.96	7.00	28.0	25.56	19.83	26.06
1:6,15,300,19	1.0564	0.4857	0.2716	1.5013	1.0860	0.9551	243	236	116.64	41.31	34.02	0.25344	45.2	13.98	8.89	38.8	33.84	26.14	35.48
1:6,30,300,19	1.1688	0.5353	0.3199	1.7448	1.3100	1.1947	255	241	122.40	43.35	35.70	0.18231	70.8	23.07	15.79	57.8	53.21	44.24	54.42
1:6,60,300,19	1.3838	0.6302	0.3471	1.8820	1.3490	1.2364	152	134	72.96	25.84	21.28	0.12485	67.6	20.20	13.27	92.7	78.17	62.36	84.20
1:42,10,270,19	0.8462	0.3930	0.2069	1.1750	0.7230	0.5668	133	115	63.84	22.61	18.62	0.20523	22.0	6.58	3.18	34.5	29.12	17.06	30.25
1:42,15,270,19	2.0086	0.9060	0.5116	2.7115	2.0690	2.0065	156	141	74.88	26.52	21.84	0.399547	32.0	9.57	7.08	42.7	36.08	32.42	39.45

ตารางที่ 1. (ต่อ)

Condition oil : MeOH,t□,T,P	Area Ml (x104)	conc Ml (x105) ppm	Area Mm (x104)	conc Mm (x104) ppm	Area Mp ( x103)	conc Mp (x104) ppm	Wo g	W p g	W <sub>TGl</sub> (g) %L=49	W <sub>TGm</sub> (g) % M=17	W <sub>TGp</sub> (g) %P=14	D g/ml	W <sub>Ml</sub> g	W <sub>Mm</sub> g	W <sub>Mp</sub> g	%Ml	%Mm	%Mp	% ME
1:24,10,270,19	1.106	0.5076	0.2828	1.5577	1.15	1.0235	185	163	88.80	31.45	25.90	0.45145	18.3	5.62	3.70	20.6	17.88	14.27	18.92
1:24,15,270,19	1.2974	0.5921	0.3135	1.7126	1.3950	1.2856	147	123	70.56	24.99	20.58	0.35132	20.7	6.00	4.50	29.4	23.99	21.87	26.89
1:24,30,270,19	0.7422	0.3471	0.1915	1.0973	0.7040	0.5465	105	85	50.40	17.85	14.70	0.13343	22.1	6.99	3.48	43.9	39.16	23.68	39.28
1:12,10,270,19	0.4480	0.2172	0.1179	0.7262	0.4230	0.2459	176	139	84.33	29.87	24.60	0.17115	17.6	5.90	2.00	20.9	19.75	8.12	18.40
1:12,15,270,19	0.8083	0.3762	0.2085	1.1831	0.9130	0.7700	254	232	121.92	43.18	35.56	0.27145	32.2	10.11	6.58	26.4	23.42	18.51	24.34
1:12,30,270,19	1.3769	0.6272	0.3556	1.9249	1.4350	1.3284	244	215	117.12	41.48	34.16	0.31314	43.1	13.22	9.12	36.8	31.86	26.70	33.93
1:6,10,270,19	0.6681	0.3144	0.1695	0.9864	0.599	0.4342	279.6	263	134.22	47.54	39.15	0.3521	23.5	7.37	3.24	17.5	15.50	8.28	15.43
1:6,15,270,19	0.5218	0.2498	0.1294	0.7842	0.482	0.3090	163	142	78.24	27.71	22.82	0.1955	18.1	5.70	2.25	23.2	20.56	9.84	20.26
1:6,30,270,19	0.8422	0.3912	0.2111	1.1962	0.828	0.6791	253	221	121.44	43.01	35.42	0.2263	38.2	11.68	6.63	31.5	27.16	18.72	28.28

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ

ตารางที่ จ1. มาตรฐานน้ำมันดีเซลหมุนเร็ว น้ำมันดีเซลหมุนช้า  
และ ไบโอดีเซล [7] [ 29]

ข้อกำหนด	วิธีทดสอบ	ดีเซลหมุนช้า	ดีเซลหมุนเร็ว	ไบโอดีเซล
1.ความถ่วงจำเพาะ ณ อุณหภูมิ 15.6/15.6 °ซ (Specific Gravity at 15.6/15.6 °C)	ASTM D1298	ไม่สูงกว่า 92	ไม่ต่ำกว่า 0.81 และ ไม่สูงกว่า 0.87	-
2.จำนวนซีเทน(Cetane Number) หรือดัชนีซีเทน(Calculated Cetane Index)	ASTM D 613 ASTM D 976	ไม่ต่ำกว่า 45	ไม่ต่ำกว่า 47 ไม่ต่ำกว่า 47	ไม่ต่ำกว่า 40
3.ค่าความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 °ซ เซนติสโตกส์ (Viscosity at 40 °C,cSt.)	ASTM D 445	ไม่สูงกว่า 8	ไม่ต่ำกว่า 1.8 และ ไม่สูงกว่า 4.1	ไม่ต่ำกว่า 1.9 และ ไม่สูงกว่า 6.5
4.จุดไหลเท °ซ (Pour Point, °C)	ASTM D 97	ไม่สูงกว่า 16	ไม่สูงกว่า 10	-
5.ธาตุกำมะถัน ร้อยละโดยน้ำหนัก (Sulphur Content,%wt.)	ASTM D 2622 วิธีอื่นที่เทียบเท่า	ไม่สูงกว่า 1.5	ไม่สูงกว่า 0.05	ไม่สูงกว่า 0.05
6.การกัดกร่อนแผ่นทองแดง หมายเลข (Copper Strip Corrosion , number)	ASTM D 130	-	ไม่สูงกว่า 1	ไม่สูงกว่า 3
7.กากถ่าน ร้อยละโดยน้ำหนัก (Carbon Residue,%wt.)	ASTM D 189	-	ไม่สูงกว่า 0.05	ไม่สูงกว่า 0.05
8.น้ำและตะกอน ร้อยละโดยปริมาตร (Water and Sediment,%vol.)	ASTM D 2709	ไม่สูงกว่า 0.03	ไม่สูงกว่า 0.05	ไม่สูงกว่า 0.05
9.เถ้า ร้อยละโดยน้ำหนัก (Ash,%wt.)	ASTM D 482	ไม่สูงกว่า 0.02	ไม่สูงกว่า 0.01	-
10.จุดวาบไฟ °ซ (Flash Point, °C)	ASTM D 93	ไม่สูงกว่า 52	ไม่สูงกว่า 52	ไม่ต่ำกว่า 100
11.การกลั่น(Distillation) อุณหภูมิของส่วนที่กลั่นได้โดย ปริมาตรในอัตรา ร้อยละเก้าสิบ °ซ (90% recovered, °C)	ASTM D 86	-	ไม่สูงกว่า 357	-



## ภาคผนวก จ (ต่อ)

ข้อกำหนด	วิธีทดสอบ	ดีเซลหมุนช้า	ดีเซลหมุนเร็ว	ไบโอดีเซล
12. มีสารเติมแต่ง (Detergent Additive) ซึ่งมีคุณสมบัติในการทำความสะอาดหัวฉีด	CEC F-06-A96	-	-	-
13. คุณสมบัติในการหล่อลื่น*ทดสอบโดยวิธีเชพเพอร์อาร์ไมโครเมตร (Lubricity by HFRR, $\mu\text{m}$ )	CEC F-06-A96	-	ไม่สูงกว่า 460	-



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว สุกัญญา มากมี เกิดที่จังหวัดอุดรดิษฐ์ สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีวิศวกรรม แขนงวิชาเทคโนโลยีทางเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2542 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2543



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย