

การผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพจากน้ำมันพืชใช้แล้วด้วยเครื่องปฏิกรณ์
แบบท่อที่มีสารบรรจุอยู่บางส่วน

BIODIESEL PRODUCTION FROM USED VEGETABLE OIL IN
A PARTIAL PACKING TUBULAR REACTOR



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2170-7

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพจากน้ำมันพืชใช้แล้วด้วยเครื่องปฏิกรณ์
แบบท่อที่มีสารบรรจุอยู่บางส่วน

BIODIESEL PRODUCTION FROM USED VEGETABLE OIL IN
A PARTIAL PACKING TUBULAR REACTOR



ศัลยवेश เกตุแก้ว
SULYAWATE KATEKAEW

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....63470
วัน,เดือน,ปี.....29 ส.ค. 2549

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ ISBN 974-15-2170-7 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**BIODIESEL PRODUCTION FROM USED VEGETABLE OIL IN
A PARTIAL PACKING TUBULAR REACTOR**



SULYAWATE KATEKAEW

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
2006
ISBN 974-15-2170-7



COPYRIGHT 2006

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

เทคโนโลยีลาดกระบัง **พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง** **โรงเรียนการดำ**

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์เรื่อง การผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพจากน้ำมันพืชใช้แล้วด้วยเครื่องปฏิกรณ์
แบบท่อที่มีสารบรรจุอยู่บางส่วน
นักศึกษา นายศัลยเวช เกตุแก้ว
รหัสนักศึกษา 47060706
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
พ.ศ. 2549
ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ประกอบ กิ่งไชยา

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษา ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันพืชที่ใช้แล้วและเมทานอล โดยมีโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อที่มีปริมาตร 14.8 ลิตร ที่ได้ติดตั้งวัสดุบรรจุบางส่วนอยู่ภายใน โดยทำการศึกษาที่อัตราส่วนโดยโมลน้ำมันพืชต่อเมทานอลเป็น 1:6 และ 1:4.5 อัตราการไหลรวม 30, 60 และ 120 ลิตร/ชั่วโมง ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 0.5% โดยน้ำหนักน้ำมัน อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส ความยาวท่อบรรจุ 1, 5, 10 และ 15 เมตรตามลำดับ พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ คือ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:6 อัตราการไหลรวม 120 ลิตรต่อชั่วโมง อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความยาวท่อบรรจุ 15 เมตร ซึ่งปริมาณน้ำมันดีเซลชีวภาพในผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้เท่ากับ 97.4% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title Biodiesel Production from Used Vegetable Oil in a Partial Packing
 Tubular Reactor

Student Mr. Sulyawate Katekaew

Student ID. 47060706

Degree Master of Engineering

Programme Chemical Engineering

Year 2006

Thesis Advisor Assoc.Prof. Dr. Prakob Kitchaiya

ABSTRACT

This thesis proposes a study conditions for biodiesel production from used vegetable oil and methanol by transesterification reaction in a 14.8 litres tubular reactor. Sodium hydroxide was used as the catalyst. There was a partial packing installed inside the reactor in order to enhance the mixing between used vegetable oil and methanol. The experimental conditions were oil and methanol molar ratio at 1:6 and 1:4.5, flow rate were 30, 60 and 120 L/hr, catalyst concentration at 0.5% by weight of oil, temperature at 50 and 60°C and length of partial packing were 1, 5, 10 and 15 metres, respectively. It was found that catalyst concentration at 0.5% by weight of oil, flow rate 120 L/hr, temperature at 60°C and length of partial packing was 15 metres. Methyl ester yield was 97.4% by weight.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากจากความช่วยเหลือของบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ. ดร. ประกอบ กิจไชยา ที่ให้คำแนะนำและคำปรึกษา อีกทั้งตรวจแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ คณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้

ขอขอบคุณ คุณพิสันต์ ผลโพธิ์ เจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลืออย่างมากมาในเรื่องต่างๆ

ขอขอบคุณ คุณชัชวีร์ ไทยสุชาติและคุณวิชุดา ไชยเขตต์ สำหรับคำปรึกษาที่ดี และให้ความช่วยเหลือในการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC

ขอขอบคุณเพื่อนๆ และนักศึกษาทุกคนที่ช่วยเหลือให้คำแนะนำต่างๆ ตลอดจนให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยตลอดมา

ขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ พี่น้องและครอบครัวศรีเจริญทุกท่าน สำหรับกำลังใจและความช่วยเหลือให้ผู้วิจัยบรรลุในการต่อสู้กับอุปสรรคต่างๆ รวมทั้งเป็นแรงผลักดันให้งานวิจัยนี้สำเร็จ

ขอขอบคุณประการใดที่มีในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้เขียนขอโน้มรับความผิดพลาดนั้น ไว้แต่เพียงผู้เดียว

ศัลลเวช เกตุแก้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	4
1.4 ขั้นตอนการทำวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	4
บทที่ 2 หลักการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 น้ำมันดีเซล.....	5
2.1 ชนิดของน้ำมันดีเซล.....	5
2.2 สมบัติที่สำคัญของน้ำมันดีเซล.....	6
2.2 ความหมายของน้ำมันดีเซลชีวภาพ.....	8
2.3 การใช้น้ำมันดีเซลชีวภาพในต่างประเทศ.....	13
2.3.1 B2 (น้ำมันดีเซลชีวภาพ 2% : ดีเซล 98% โดยปริมาตร).....	13
2.3.2 B5 (น้ำมันดีเซลชีวภาพ 5% : ดีเซล 95% โดยปริมาตร).....	13
2.3.3 B20 (น้ำมันดีเซลชีวภาพ 20% : ดีเซล 80% โดยปริมาตร).....	13
2.3.4 B40 (น้ำมันดีเซลชีวภาพ 40% : ดีเซล 60% โดยปริมาตร).....	13
2.3.5 B100 (น้ำมันดีเซลชีวภาพ 100% โดยปริมาตร).....	13
2.4 น้ำมันพืชที่ใช้ในการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ.....	14
2.4.1 ลักษณะและ โครงสร้างของน้ำมัน.....	14
2.4.2 สมบัติของน้ำมันพืชในการเป็นเชื้อเพลิง.....	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของงานวิจัยเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามนำไปดัดแปลงแก้ไข และส่งต่อข้างอื่นถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.4.3 ปัญหาของน้ำมันพืชในการเป็นเชื้อเพลิง.....	15
2.5 การใช้อนุพันธ์ของไตรกลีเซอไรด์แทนน้ำมันดีเซล.....	16
2.6 กระบวนการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ.....	17
2.6.1 กระบวนการแบบกะ.....	18
2.6.2 กระบวนการสังเคราะห์น้ำมันดีเซลชีวภาพแบบต่อเนื่อง.....	18
2.7 น้ำมันดีเซลชีวภาพที่สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน.....	19
2.7.1 มาตรฐานของน้ำมันดีเซลชีวภาพ.....	21
บทที่ 3 ทฤษฎี.....	24
3.1 หลักการของเครื่องปฏิกรณ์กวนผสมแบบต่อเนื่อง.....	24
3.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ.....	27
3.3 ตัวผสมไร้การเคลื่อนที่.....	29
3.3.1 หลักการผสมของเครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่.....	30
3.3.2 การประยุกต์ใช้เครื่องไร้การเคลื่อนที่.....	32
3.4 การขยายสเกลการสังเคราะห์น้ำมันดีเซลชีวภาพ.....	33
บทที่ 4 การทดลอง.....	36
4.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	36
4.2 ออกแบบและสร้างเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อที่มีสารบรรจุอยู่บางส่วน.....	36
4.2.1 ส่วนประกอบของเครื่องปฏิกรณ์.....	37
4.3 สารเคมี.....	39
4.4 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	39
4.5 วิธีการทดลอง.....	40
4.5.1 ศึกษาคุณสมบัติของน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว.....	40
4.5.2 ขั้นตอนการเตรียมสาร.....	40
4.5.3 ขั้นตอนการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ.....	40
4.5.4 ขั้นตอนการหยุดปฏิกิริยา.....	40
4.5.5 ขั้นตอนการล้าง.....	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่สามารถนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต การคัดลอกโดยไม่ขออนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.5.6 ขั้นตอนการวิเคราะห์หาปริมาณเมทิลเอสเทอร์.....	41
4.6 สภาวะการทดลอง.....	41
บทที่ 5 ผลการทดลอง.....	44
5.1 คุณสมบัติของน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว.....	44
5.1.1 ปริมาณกรดไขมันอิสระ.....	44
5.1.2 ความหนาแน่น.....	44
5.1.3 ค่าความหนืด.....	44
5.2 ปริมาณน้ำมันดีเซลชีวภาพในผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้.....	44
5.3 วิเคราะห์ผลของน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ผลิตได้.....	47
5.3.1 ผลของความยาวท่อต่อปริมาณน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ผลิตได้.....	47
5.3.2 ผลของอัตราการไหลรวมต่อปริมาณน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ผลิตได้ เมื่อใช้ท่อบรรจุยาว 10 เมตร.....	48
5.3.3 ผลของความยาวท่อบรรจุและอัตราการไหลรวมต่อปริมาณดีเซล ชีวภาพที่ผลิตได้.....	50
5.3.4 ผลของอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันและอัตราการไหลรวม ต่อปริมาณน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ผลิตได้.....	51
5.3.5 ผลของสเปซไทม์ต่อปริมาณน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ผลิตได้.....	52
5.3.6 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ผลิตได้.....	53
5.4 วิจารณ์ผลการทดลอง.....	55
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง.....	58
เอกสารอ้างอิง.....	59
ภาคผนวก ก. การคำนวณ.....	61
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ภาคผนวก ข. การหาปริมาณกรดไขมันอิสระ.....	66
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ ประวัติผู้เขียน.....	68

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 ความต้องการใช้พลังงานในประเทศ (ล้านลิตร/วัน).....	1
1.2 การผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทย.....	3
2.1 มาตรฐานของน้ำมันดีเซลในประเทศไทย.....	7
2.2 คุณสมบัติของน้ำมันดีเซลชีวภาพจากน้ำมันชนิดต่างๆ.....	9
2.3 ลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล.....	9
2.4 ลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน.....	11
2.5 คุณสมบัติและค่าความร้อนของน้ำมันพืชชนิดต่างๆ.....	14
2.6 สมบัติในการเป็นเชื้อเพลิงของน้ำมันพืช.....	15
2.7 มาตรฐานน้ำมันดีเซลชีวภาพ.....	21
2.8 ข้อกำหนดมาตรฐานน้ำมันดีเซลชีวภาพในแต่ละประเทศ.....	22
2.9 การเลือกใช้ไครทิลีเซอไรต์ชนิดต่างๆ เพื่อผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพในแต่ละประเทศ.....	23
4.1 แสดงตัวแปรต่างๆ ในการทดลอง.....	42
4.2 แสดงตำแหน่งของตัวอย่างที่เก็บ (สเปซไทม์, T).....	43
5.1 ปริมาณน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ผลิตได้.....	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างโมเลกุลของน้ำมัน.....	14
2.2 สมการเคมีของการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน.....	17
2.3 ลำดับชั้นของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน.....	17
2.4 แผนภูมิการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพด้วยกระบวนการแบบกะ.....	18
2.5 กระบวนการปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันแบบต่อเนื่องในระดับ โรงงานต้นแบบ โดย Nouredдини และคณะ.....	20
3.1 ลักษณะของเครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่และลักษณะของชิ้นส่วนภายใน.....	30
3.2 การผสมของเหลวโดยเครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่.....	30
3.3 การละลายก๊าซในของเหลวด้วยเครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่.....	30
3.4 ลักษณะการไหลแบบการแบ่งส่วนการไหล.....	31
3.5 ลักษณะการไหลแบบการผสมในแนวรัศมี.....	31
3.6 ลักษณะการไหลแบบการเปลี่ยนทิศทางการไหล.....	32
3.7 การผสมของของเหลวที่มีความหนืดต่ำภายในเครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่.....	32
3.8 การแพร่กระจายของเหลวภายในเครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่.....	32
3.9 การผสมของของเหลวที่มีความหนืดสูงภายในเครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่.....	33
4.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อสำหรับผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ (ก) เครื่องปฏิกรณ์ก่อนหุ้มฉนวน.....	36
(ข) เครื่องปฏิกรณ์หลังหุ้มฉนวน.....	37
4.2 ส่วนปั๊มของเครื่องปฏิกรณ์.....	38
4.3 ส่วนประกอบของเครื่องปฏิกรณ์.....	39
5.1 แสดงผลของความยาวท่อที่มีผลต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์ ที่สเปซไทน์ต่างๆ โดยมีอัตราส่วน โดย โมลเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของไซเคียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0.5 อัตราการไหลรวม 30 ลิตร/ชั่วโมง.....	47
5.2 ผลของอัตราการไหลรวมต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้ที่สเปซไทน์ต่างๆ เมื่อมีอัตราส่วน โดย โมลเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6:1 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส	

เอกสารนี้มีความเข้มข้นของไซเคียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0.5 ความยาวท่อบรรจุเป็น 10 เมตร.....49 การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.3 ผลของอัตราการใช้รวมต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้ที่สเปซใหม่ต่างๆ เมื่อมีอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 4.5:1 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0.5 ความยาวท่อบรรจุเป็น 10 เมตร.....	49
5.4 ผลของอัตราการใช้รวมต่อปริมาณเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้ ณ ความยาวเครื่องปฏิกรณ์ 75 เมตร ที่อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6:1 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0.5.....	50
5.5 ผลของอัตราการใช้รวมต่อปริมาณเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้ ณ ความยาวเครื่องปฏิกรณ์ 75 เมตร ที่อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 4.5:1 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0.5.....	51
5.6 ผลของอัตราส่วนต่อปริมาณเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้ที่สเปซใหม่ต่างๆ ณ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ใช้ท่อบรรจุยาว 10 เมตร และความเข้มข้นของ โซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0.5.....	52
5.7 ผลของอัตราส่วนต่อปริมาณเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้ที่สเปซใหม่ต่างๆ ณ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ใช้ท่อบรรจุยาว 15 เมตร และความเข้มข้นของ โซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0.5.....	53
5.8 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้ที่สเปซใหม่ต่างๆ โดยมีอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6:1 Superficial velocity 6.8 ลิตร/ชั่วโมง และความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0.5.....	54
5.9 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้ที่สเปซใหม่ต่างๆ โดยมีอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6:1 Superficial velocity 13.6 ลิตร/ชั่วโมง และความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0.5.....	54
5.10 ส่วนของท่อบรรจุที่ช่วยให้สารตั้งต้นทั้งสองสัมผัสกัน.....	55
5.11 แสดงลักษณะของไหลเมื่อไหลผ่านส่วนของท่อเปล่า จะเห็นการแยกชั้นของกลีเซอริน ออกจากชั้นน้ำมันดีเซลชีวภาพ.....	56
5.12 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการผลิต.....	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยมีแหล่งทรัพยากรด้านพลังงานปิโตรเลียมอย่างจำกัด และมีการใช้ในแต่ละปีเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยในปี พ.ศ.2548 มีการใช้น้ำมันสำเร็จรูปเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะน้ำมันดีเซลมีการใช้มากถึง 50 ล้านลิตรต่อวัน คิดเป็น 51.2% ของความต้องการภายในประเทศ [1] ซึ่งมีปริมาณการใช้สูงกว่าเชื้อเพลิงอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ความต้องการใช้พลังงานในประเทศ (ล้านลิตร/วัน)

ปี พ.ศ.	2542	2543	2544	2545	2546	2547	2548
น้ำมันดีเซล (DIESEL)	41.4%	42.1%	43.7%	44.8%	49.6%	50.4%	51.2%
น้ำมันเตา (FUEL OIL)	21.5%	17.9%	13.0%	13.3%	13.3%	12.7%	12.8%
น้ำมันเบนซิน (GASOLINE)	19.0%	19.0%	19.7%	20.4%	18.7%	17.2%	18.7%
น้ำมันเครื่องบิน (JET FUEL)	8.9%	9.8%	10.7%	10.3%	10.1%	9.5%	9.1%
ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG)	9.0%	11.0%	12.7%	10.8%	8.2%	10.1%	8.1%
น้ำมันก๊าด (KEROSENE)	0.1%	0.1%	0.2%	0.2%	0.1%	0.1%	0.1%

ที่มา : สำนักนโยบายและแผนพลังงาน

ปัจจุบันราคาน้ำมันเชื้อเพลิงมีการปรับตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง และมีความผันผวนด้านราคาขึ้นลงตลอดเวลา โดยในปี พ.ศ.2548 ราคาน้ำมันดิบในตลาดโลกพุ่งสูงขึ้นถึง 60 เหรียญสหรัฐต่อ 1 บาร์เรล ส่งผลกระทบต่ออย่างรุนแรงต่อการขาดดุลการค้าของประเทศ

จากภาวะดังกล่าว จึงทำให้มีการแสวงหาแหล่งพลังงานใหม่ที่จะนำมาใช้ทดแทนพลังงานเชื้อเพลิงปิโตรเลียม แนวทางหนึ่งในการแก้ปัญหา คือ การนำน้ำมันพืชซึ่งสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันดีเซล และเป็นที่น่าสนใจเนื่องมาจากมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย เนื่องจากมีปริมาณกำมะถันต่ำ อีกทั้งยังเป็นพลังงานชนิดที่สามารถสร้างทดแทนใหม่ได้ (Renewable Resource)

การใช้น้ำมันพืชกับเครื่องยนต์ดีเซลมีการทดลองใช้ตั้งแต่สงครามโลกครั้งที่ 2 แต่เนื่องจากน้ำมันปิโตรเลียมมีราคาสูง ประกอบกับมีปัญหาเกิดขึ้นมากมาย เนื่องจากคุณสมบัติน้ำมันพืชและน้ำมันดีเซลมีความแตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลให้จุดติดได้ยาก ดังนั้นการใช้น้ำมันพืชโดยตรงกับเครื่องยนต์แบบเดิมจึงไม่เหมาะสม ต่อมาจึงได้มีการพัฒนาใช้ผลผลิตทางการเกษตรในรูปแบบต่างๆ ให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานกับเครื่องยนต์มากขึ้น เช่น การผลิตแก๊สโซฮอล ตลอดจนการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ (Biodiesel) ทั้งนี้เพื่อเป็นการนำทรัพยากรมาใช้ประโยชน์อย่างคุ้มค่า และยังเป็นการรักษาเงินตราภายในประเทศ อีกทั้งความต้องการเสริมสร้างความมั่นคงในด้านพลังงานของประเทศ รวมถึงความต้องการลดมลพิษเพื่อให้สิ่งแวดล้อมดีขึ้น

น้ำมันดีเซลชีวภาพได้รับการยอมรับว่าเป็นทางเลือกใหม่สำหรับประเทศไทยเพื่อใช้ทดแทนน้ำมันดีเซล วัตถุประสงค์ที่สำคัญในการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ คือ น้ำมันพืช ซึ่งประเทศไทยสามารถผลิตได้เอง เช่น น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง แต่ในขณะนี้ปริมาณของน้ำมันเหล่านี้มีเพียงพอสำหรับการบริโภคภายในประเทศเท่านั้น ไม่เพียงพอสำหรับการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงภายในประเทศอย่างจริงจังได้ และมีราคาแพงเมื่อเทียบกับราคาน้ำมันดีเซล การแก้ปัญหาที่มีแนวทางที่สามารถทำได้คือ การเลือกใช้น้ำมันพืชที่มีราคาถูก เช่น น้ำมันพืชที่ใช้แล้วจากโรงงานอาหารต่างๆ ซึ่งไม่ควรนำมาใช้บริโภคซ้ำอีกมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ ดังนั้นการใช้น้ำมันพืชใช้แล้วเพื่อการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพจึงมีข้อดี กล่าวคือ ช่วยกำจัดวงจรการนำน้ำมันพืชใช้แล้วกลับสู่กระบวนการบริโภคอีกครั้ง ซึ่งจะมีพ่อค้าทำการรับซื้อน้ำมันพืชที่ใช้แล้วจากโรงงานอาหารทอด เช่น โรงงานมันฝรั่งทอด เพื่อนำมาขายให้กับพ่อค้าหรือแม่ค้าตามท้องตลาดในราคาถูก น้ำมันนี้จะถูกนำมาทอดอาหารใหม่ เช่น ปาท่องโก๋ ไข่ หมู และเนื้อทอด ซึ่งเป็นอันตรายอย่างยิ่งต่อผู้บริโภค เนื่องจากการใช้น้ำมันทอดซ้ำหลายครั้งจะเกิดสารก่อมะเร็งซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพ

โดยสากลคำว่าไบโอดีเซล (Biodiesel) หมายถึง เมทิลเอสเทอร์ หรือเอทิลเอสเทอร์ของน้ำมันหรือไขมันของพืชและสัตว์ (ไตรกลีเซอไรด์) ซึ่งสังเคราะห์ได้จากการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์กับเมทานอลหรือเอทานอล โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นด่าง กรด หรือ เอนไซม์ ไบโอดีเซลที่ได้จากการทำปฏิกิริยาจะมีคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม แต่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากกว่า เนื่องจากสามารถย่อยสลายได้ดีตามธรรมชาติ ไม่มีองค์ประกอบของซัลเฟอร์ ลดปริมาณเขม่าและควันดำได้เป็นอย่างดี เป็นต้น

สำหรับในประเทศไทยเริ่มมีการวิจัยเกี่ยวกับน้ำมันไบโอดีเซลตั้งแต่ปี พ.ศ. 2524 โดยใช้น้ำมันจากเมล็ดพืชน้ำมัน เช่น น้ำมันถั่วลิสง น้ำมันเมล็ดสบู่ดำ น้ำมันมะพร้าว น้ำมันปาล์ม รวมถึงเอสเทอร์ของน้ำมันปาล์ม เป็นพลังงานทดแทนในเครื่องยนต์ดีเซล ดังแสดงในตารางที่ 1.2 สำหรับในต่างประเทศ ได้มีการวิจัยน้ำมันพืชเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลอย่างต่อเนื่อง โดยใช้น้ำมันพืชจากพืชน้ำมันที่มีการเพาะปลูกมากในแต่ละประเทศ จนถึงปัจจุบันได้มีการตั้งโรงงานเพื่อ

ผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพจากเมล็ดเรพในกลุ่มประเทศยุโรปและสหรัฐอเมริกา และ โรงงานผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพจากน้ำมันปาล์มในประเทศมาเลเซีย

ตารางที่ 1.2 การผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทย [2]

บริษัท/หน่วยงาน	วัตถุดิบ	กำลังการผลิต (ลิตร/วัน)	ระบบการผลิต
บริษัทราชาไบโอดีเซล จำกัด อ.คอนสัก จ.สุราษฎร์ธานี	น้ำมันพืชใช้แล้ว น้ำมันมะพร้าว	20,000	แบบกะ
กรมอุทหาเรือ	น้ำมันปาล์มโอสีน	2,000	แบบกะ
สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย	น้ำมันปาล์มสเตียร์น	30	แบบกะ
โครงการส่วนพระองค์ สวนจิตรลดา	น้ำมันพืชใช้แล้ว	400	แบบกะ

วิธีพื้นฐานที่ใช้ในการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ คือ กระบวนการของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันแบบกะ กระบวนการแบบกะมีข้อดีหลายประการ เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแบบต่อเนื่อง นั่นคือ กระบวนการแบบกะต้องการปริมาณของเครื่องปฏิกรณ์ขนาดใหญ่กว่า ต้องการเงินลงทุนสูงกว่า ไม่เหมาะสำหรับการผลิตในเชิงอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการผลิตให้เป็นแบบต่อเนื่อง โดยอาจใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อที่ติดตั้งเครื่องผสมไ้การเคลื่อนที่ช่วยในการผสม ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ดีกว่าระบบการผลิตแบบเดิม แต่เนื่องเครื่องผสมไ้การเคลื่อนที่มีราคาค่อนข้างสูง หากสามารถนำสิ่งที่สามารถใช้ทดแทนได้ จะช่วยลดต้นทุนการผลิตลง ดังนั้นงานวิจัยนี้จะใช้วัสดุบรรจุเฉื่อยที่มีใช้อยู่ในอุตสาหกรรมการกลั่นนํ้ามาบรรจุในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ เพื่อใช้ทดแทนเครื่องผสมไ้การเคลื่อนที่

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ออกแบบและสร้างเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อที่มีวัสดุบรรจุอยู่บางส่วน เพื่อผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว

1.2.2 ทดสอบเครื่องปฏิกรณ์ที่สร้างขึ้น โดยผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพที่สภาวะต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อรับทราบข้อมูลเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 สร้างเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อที่มีวัสดุบรรจุอยู่บางส่วน เพื่อผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ

1.3.2 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อที่มีวัสดุบรรจุอยู่บางส่วน

1.3.3 วิเคราะห์ประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์ โดยการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ผลิตได้

1.4 ขั้นตอนการทำวิจัย

1.4.1 คำนวณและรวบรวมข้อมูลการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพโดยการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน

1.4.2 ออกแบบและสร้างเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อที่มีวัสดุบรรจุอยู่บางส่วน

1.4.3 ทำการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อที่มีวัสดุบรรจุอยู่บางส่วน ที่สภาวะต่างๆ

1.4.4 วิเคราะห์คุณภาพน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ได้จากกระบวนการผลิต

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

1.5.1 ทราบถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อที่มีวัสดุบรรจุอยู่บางส่วน

1.5.2 เป็นแหล่งข้อมูลในการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ เพื่อใช้ทดแทนน้ำมันดีเซล

1.5.3 เป็นประโยชน์ในเชิงอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ สำหรับกระบวนการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ

1.5.4 การผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว จะช่วยลดการนำน้ำมันพืชที่ใช้แล้วไปประกอบอาหารซ้ำ ลดโอกาสการเกิดปัญหาด้านสุขภาพแก่ประชาชน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

หลักการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำมันดีเซล [3, 4]

น้ำมันดีเซลเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญไม่ได้ในอุตสาหกรรมของประเทศ มีการใช้กับรถบรรทุกหนัก รถเมล์ หัวรถจักร เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เครื่องจักรกลในงานเกษตรกรรม และเหมืองแร่ เป็นต้น น้ำมันดีเซล คือ สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีทั้งพาราฟิน แนฟทีน โอลิฟิน และอะโรมาติก จำนวนคาร์บอนอะตอมอยู่ในช่วง 12 ถึง 18 มีช่วงจุดเดือดที่กว้างซึ่งอยู่ระหว่าง 150 ถึง 370 องศาเซลเซียส เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบโดยตรง (Straight-Run) แต่ในปัจจุบันเนื่องจากมีกระบวนการแตกตัวใน โรงกลั่นหลายกระบวนการ จึงอาจมีน้ำมันส่วนที่ได้จากการแตกตัวผสมอยู่ เพื่อเพิ่มปริมาณให้สอดคล้องกับอุปสงค์ที่เพิ่มขึ้นตลอดเวลา น้ำมันดีเซลอาจจะประกอบด้วยน้ำมันที่มีคุณภาพต่างกันหลายสมบัติ เช่น ความหนืด ค่าซีเทน จุดวาบไฟ การกลายเป็นไอ เป็นต้น ASTM D 975 ซึ่งเป็นมาตรฐานสากลของประเทศสหรัฐอเมริกาได้แบ่งน้ำมันดีเซลออกหลายประเภท นอกจากนี้ข้อกำหนดของน้ำมันดีเซลในแต่ละประเทศขึ้นกับภูมิประเทศและสภาพอากาศที่ใช้งาน แต่ในประเทศไทยมีข้อกำหนดของน้ำมันดีเซลอยู่ 2 ประเภทเท่านั้น คือ น้ำมันดีเซลหมุนเร็วและหมุนช้า ดังแสดงในตารางที่ 2.1 น้ำมันดีเซลทั้งสองประเภทแม้จะคล้ายคลึงกัน แต่มีความต้องการด้านคุณภาพต่างกัน โดยน้ำมันดีเซลหมุนเร็วจะมีข้อกำหนดคุณภาพที่เข้มงวดกว่า เพื่อให้เหมาะสมสำหรับเครื่องยนต์และการใช้งาน จึงมีราคาแพงกว่า

2.1.1 ชนิดของน้ำมันดีเซล [3]

ชนิดของน้ำมันดีเซลสามารถแบ่งตามขนาดของเครื่องยนต์ดีเซล ปัจจุบันประเทศไทยมีจำหน่ายอยู่ 2 ชนิดคือ

1. น้ำมันดีเซลสำหรับเครื่องรอบเร็ว (Automotive Diesel Oil; ADO) หรือ น้ำมันดีเซลหมุนเร็ว (High speed diesel) หรือน้ำมันโซล่า น้ำมันดีเซลชนิดนี้เหมาะสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลที่มีความเร็วรอบสูงกว่า 1000 รอบต่อนาที ใช้สำหรับงานที่เปลี่ยนแปลงความเร็วค่อนข้างบ่อย เช่น รถยนต์ขนส่ง รถบรรทุก รถไฟ เป็นต้น

2. น้ำมันดีเซลสำหรับเครื่องรอบช้า (Industrial Diesel Oil; IDO) หรือน้ำมันดีเซลหมุนช้า (Low speed diesel) หรือน้ำมันซีโล้ เหมาะสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลที่มีความเร็วรอบต่ำประมาณ 500-1000 รอบต่อนาที ใช้สำหรับงานที่ค่อนข้างหนัก และรอบค่อนข้างคงที่ เช่น เครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้ในการขับเคลื่อนเรือเดินทะเลและการผลิตไฟฟ้า เป็นต้น

2.1.2 ธมบัตินี้สำคัญของน้ำมันดีเซล [4]

คุณสมบัติของน้ำมันดีเซลที่สำคัญมีดังนี้

1. ความหนืด (Viscosity) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความต้านทานในตัวต่อการไหลของน้ำมัน คือ น้ำมันที่มีความหนืดน้อยจะไหลได้ง่าย ส่วนน้ำมันที่มีความหนืดมากกว่าจะไหลได้ยากกว่า ความหนืดมีผลต่อระบบการฉีดน้ำมัน และยังมีส่วนในการหล่อลื่นปั๊มเชื้อเพลิงแรงดันสูงอีกด้วย โดยน้ำมันที่มีความหนืดมากเกินไป จะทำให้ละอองน้ำมันที่ฉีดออกไปไม่กระจายเท่าที่ควร แต่หากน้ำมันมีความหนืดน้อยเกินไปก็จะไม่เพียงพอสำหรับการหล่อลื่น

2. ค่าซีเทน (Cetane number; CN) เป็นค่าที่แสดงถึงคุณภาพในการจุดระเบิดของเชื้อเพลิง กล่าวคือ ยิ่งค่าซีเทนมีค่าสูงเท่าใดก็ยิ่งจะมีช่วงเวลาความล่าช้าในการจุดระเบิดสั้นลง และทำให้มีปริมาณของเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้เมื่อเชื้อเพลิงเกิดการจุดระเบิดมีค่าน้อยลงด้วย ดังนั้นเชื้อเพลิงที่มีค่าซีเทนที่สูงกว่าจะมีอัตราการเพิ่มขึ้นของความดันที่น้อยกว่า และทำให้ควบคุมการเผาไหม้ได้ดีกว่า นอกจากนี้ยังเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องยนต์เนื่องจากมีช่วงเวลาความล่าช้าในการจุดระเบิดสั้น ทำให้ปริมาณเชื้อเพลิงที่สะสมในห้องเผาไหม้จะลดลงก่อนถึงการลุกติดไฟ และยังคงลดปริมาณการปล่อยไฮโดรคาร์บอนและแก๊สจําพวกไนโตรเจนออกไซด์ได้อีกด้วย นอร์มัลเฮกซะเดเคน (ซีเทน) ซึ่งสามารถติดไฟได้ง่ายได้ถูกกำหนดให้มีค่าซีเทนเป็น 100 และให้เฮปตะเมทิลโนเนนที่ติดไฟยากมีค่าซีเทนเป็น 15 ซึ่งเชื้อเพลิงที่มีค่าซีเทนสูงก็จะมีความสามารถในการต้านทานน็อคของเครื่องยนต์ที่มากขึ้นด้วย

3. ดัชนีซีเทน (Cetane index) จะแสดงถึงคุณภาพในการติดไฟของน้ำมันดีเซล หาได้จากค่าความถ่วงจำเพาะ API และอุณหภูมิของการกลั่นที่ 50%

4. อุณหภูมิการกลั่น (Distillation temperature) เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการระเหยของน้ำมัน มีผลต่อเครื่องยนต์ดังนี้

4.1 อุณหภูมิที่มีน้ำมันกลั่นออกมา 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร แสดงถึงความยากง่ายในการติดเครื่องยนต์ ยิ่งมีค่ามากเครื่องยนต์จะยิ่งติดยาก

4.2 อุณหภูมิที่มีน้ำมันกลั่นออกมา 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เป็นจุดที่จะทำให้การอุ่นเครื่องยนต์ทำได้เร็ว การกระจายไอน้ำมันไปยังกระบอกสูบต่างๆ เป็นไปอย่างสม่ำเสมอและปรับส่วนผสมของน้ำมันกับอากาศได้ถูกต้องตลอดเวลา ทำให้แรงเครื่องได้ดี เครื่องยนต์มีพลังงานสูง

4.3 อุณหภูมิที่มีน้ำมันกลั่นออกมา 90 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ต้องมีการกำหนดค่าสูงสุดไว้เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานให้ได้พลังงานสูงสุดและประหยัดเชื้อเพลิง

4.4 อุณหภูมิที่จุดสิ้นสุดและส่วนที่เหลือจากการกลั่น มีการกำหนดค่าสูงสุดไว้เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำมันที่ไม่เผาไหม้เกิดการผสมกับน้ำมันเครื่องมากเกินไป

5. จุดวาบไฟ (Flash point) คือ อุณหภูมิที่น้ำมันได้รับความร้อนจนกลายเป็นไอผสมกับอากาศ และเมื่อไอนี้ถูกเปลวไฟจะลุกวาบขึ้น น้ำมันที่มีจุดวาบไฟต่ำจะต้องมีการดูแลอย่างระมัดระวัง

6. จุดไหลเท (Pour point) คือ อุณหภูมิต่ำสุดที่น้ำมันยังเป็นของเหลวพอที่จะไหลได้ โดยจะมีผลต่อการใช้งานน้ำมันที่อุณหภูมิต่ำ

7. ปริมาณกำมะถัน ในน้ำมันดีเซลกำมะถันจะอยู่ในรูปแบบต่างๆ เช่น ไดซัลไฟด์ หรือ สารประกอบเฮเทอโรไซคลิก เป็นต้น ซึ่งกำมะถันเหล่านี้เมื่อผ่านห้องเผาไหม้จะกลายเป็นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับน้ำหรือความชื้นกลายเป็นกรดกำมะถันและกัดกร่อนชิ้นส่วนต่างๆ ของเครื่องยนต์

จะเห็นได้ว่าคุณสมบัติของน้ำมันดีเซลมีหลายประการ และเพื่อเป็นการรักษามาตรฐานของน้ำมันดีเซลให้เป็นผลดีกับเครื่องยนต์และสิ่งแวดล้อม รัฐบาลไทยโดยกระทรวงพาณิชย์จึงได้กำหนดมาตรฐานของน้ำมันดีเซลภายในประเทศตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 มาตรฐานของน้ำมันดีเซลในประเทศไทย

ข้อกำหนด	อัตราสูงต่ำ	น้ำมันดีเซล		วิธีทดสอบ
		หมุนเร็ว	หมุนช้า	
1. ความต้วงจำเพาะ ณ อุณหภูมิ 15.6/15.6 องศาเซลเซียส	ไม่ต่ำกว่า	0.81	-	ASTM D 1298
2. ค่าซีเทน หรือ คีซีเทน	ไม่ต่ำกว่า	47	45	ASTM D 613
3. ความหนืด (เซนติสโตกส์) ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส	ไม่ต่ำกว่า	1.8	-	ASTM D 445
ณ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	ไม่สูงกว่า	4.1	8.0	
	ไม่ต่ำกว่า	-	-	
	ไม่สูงกว่า	-	6.0	
4. จุดไหลเท (องศาเซลเซียส)	ไม่สูงกว่า	10	16	ASTM D 97
5. ปริมาณกำมะถัน ร้อยละ โดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.05	1.5	ASTM D 2622
6. การกัดกร่อนแผ่นทองแดงหมายเลข	ไม่สูงกว่า	1	-	ASTM D 130
7. ปริมาณกากถ่าน ร้อยละ โดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.05	-	ASTM D 189
8. ปริมาณน้ำและตะกอน ร้อยละ โดยปริมาตร	ไม่สูงกว่า	0.05	0.3	ASTM D 2709
9. ปริมาณเถ้า ร้อยละ โดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.01	0.02	ASTM D 482
10. จุดวาบไฟ (องศาเซลเซียส)	ไม่ต่ำกว่า	52	52	ASTM D 93
11. อุณหภูมิของส่วนที่กลั่นได้โดยปริมาตร ในอัตราร้อยละ 90 (องศาเซลเซียส)	ไม่สูงกว่า	357	-	ASTM D 86

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

ข้อกำหนด	อัตราสูงต่ำ	น้ำมันดีเซล		วิธีทดสอบ
		หมุนเร็ว	หมุนช้า	
12. สี	ไม่ต่ำกว่า	-	4.5	ASTM D 1500
13. คุณสมบัติการหล่อลื่น ทดสอบโดยเครื่อง HFRR (ไมโครเมตร)	ไม่สูงกว่า	4.0	7.5	CEC F-06-A-96
	ไม่สูงกว่า	460	-	

ที่มา : ประกาศกรมทะเบียนการค้า พ.ศ. 2545

2.2 ความหมายของน้ำมันดีเซลชีวภาพ [5]

การนำเอาน้ำมันพืชมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลนั้นสามารถทำได้โดยการนำมาผสมกับน้ำมันดีเซลโดยตรงและใช้เป็นเชื้อเพลิง หรือนำเอาน้ำมันพืชมาผ่านกระบวนการ ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อใช้ทดแทนน้ำมันดีเซล ซึ่งในปัจจุบันคำว่า ไบโอดีเซล (Biodiesel) นั้นคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติได้มีมติให้ใช้ชื่อเรียกที่หมายถึง เชื้อเพลิงที่ได้จากน้ำมันพืชและสัตว์ที่ผ่านกระบวนการทางเคมี เกิดเป็นสารที่เรียกว่าเมทิลเอสเทอร์ หรือ เอทิลเอสเทอร์ ใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลได้ดี โดยไม่ต้องทำการดัดแปลงเครื่องยนต์ น้ำมันนี้ไม่มีส่วนผสมของปิโตรเลียม สลายได้ง่าย และปราศจากกำมะถัน ส่วนการนำน้ำมันพืชมาผสมกับน้ำมันดีเซลหรือน้ำมันก๊าด เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลนั้น คณะกรรมการนโยบายแห่งชาติ มีมติให้ใช้คำเรียกว่า น้ำมันดีเซลมะพร้าว หรือน้ำมันดีเซลปาล์ม ขึ้นอยู่กับชนิดของประเภทน้ำมันที่นำมาผสม เช่น น้ำมันดีเซลมะพร้าวดิบ น้ำมันดีเซลมะพร้าวบริสุทธิ์ น้ำมันดีเซลปาล์มดิบ น้ำมันดีเซลปาล์มบริสุทธิ์ เป็นต้น

คำว่าน้ำมันดีเซลชีวภาพในงานวิจัยนี้จะใช้เรียกเมทิลเอสเทอร์ หรือ เอทิลเอสเทอร์เท่านั้น

น้ำมันดีเซลชีวภาพที่ผลิตจากน้ำมันหรือไขมันต่างชนิดต่างๆ จะมีคุณสมบัติต่างกันดังตารางที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของน้ำมันดีเซลชีวภาพจากน้ำมันชนิดต่างๆ [6]

เมทิลเอสเทอร์ ของน้ำมันพืช	ความหนืด mm ² /sec	ซีเทน นัมเบอร์	ค่า ความร้อน MJ/Liter	จุดหมอก °C	จุดวาบไฟ °C	ความ หนาแน่น g/L	กำมะถัน %wt
Peanut	4.9 (37.8°C)	54	33.6	5	176	0.883	-
Soybean	4.5 (37.8°C)	45	33.5	1	178	0.885	-
Babassu	3.6 (37.8°C)	63	31.8	4	127	0.879	-
Palm	5.7 (37.8°C)	62	33.5	13	164	0.88	-
Sunflower	4.6 (37.8°C)	49	33.5	1	183	0.86	-
Tallow	-	-	-	12	96	-	-
Rapeseed	4.2 (40°C)	51-59.7	32.8	-	-	0.882	-
Used rapeseed	9.48 (30°C)	53	36.7	-	192	0.895	0.002

ประเทศไทยได้กำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซลไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน เมื่อปี พ.ศ.2548 ดังตารางที่ 2.3 และ 2.4 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.3 ลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงต่ำ	น้ำมันดีเซล			วิธีทดสอบ ^u
			หมุนเร็ว		หมุนช้า	
			ธรรมดา	บี5		
1	ความถ่วงจำเพาะ ณ อุณหภูมิ 15.6/15.6 องศาเซลเซียส (Specific Gravity at 15.6/15.6°C)	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	0.81	0.81	-	ASTM D 1298
2	จำนวนซีเทน (Cetane Number) หรือ คำนวณซีเทน (Calculate Cetane Index)	ไม่ต่ำกว่า	47	47	45	ASTM D 613 ASTM D 976
3	ความหนืด เซนติสโตกส์ (Viscosity, cST)					ASTM D 445
	3.1 ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (at 40°C)	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	1.8	1.8	-	
	3.2 ณ อุณหภูมิ 50°C	ไม่สูงกว่า	-	-	8.0	
	3.2 ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (at 50°C)	ไม่สูงกว่า	-	-	6.0	

ตารางที่ 2.3 (ต่อ)

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงต่ำ	น้ำมันดีเซล			วิธีทดสอบ ¹	
			หมุนเร็ว		หมุนช้า		
			ธรรมดา	บี5			
4	จุดไหลเท (Pour Point, °C)	องศาเซลเซียส	ไม่สูงกว่า	10	10	16	ASTM D 97
5	กำมะถัน (Sulphur, %wt.)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.035	0.035	1.5	ASTM D 4294
6	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (Copper Strip Corrosion)		ไม่สูงกว่า	หมายเลข 1	หมายเลข 1	-	ASTM D 130
7	เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ,กรัม/ลูกบาศก์เมตร (Oxidation Stability, g/m ³)		ไม่สูงกว่า	-	25	-	ASTM D 2274
8	กากดำ (Carbon Residue, %wt.)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.05	0.05	-	ASTM D 189
9	น้ำและตะกอน (Water and Sediment, %wt.)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.05	0.05	0.3	ASTM D 2709
10	เถ้า (Ash, %wt.)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.01	0.01	0.02	ASTM D 482
11	จุดวาบไฟ (Flash Point, °C)	องศาเซลเซียส	ไม่ต่ำกว่า	52	52	52	ASTM D 93
12	การกลั่น (Distillation, °C)	องศาเซลเซียส	ไม่สูงกว่า	357	357	-	ASTM D 86
13	สี (Colour) 13.1 ชนิดของสี (Hue) 13.2 เนื้อสี (Dye, mg/l)	มิลลิกรัม/ลิตร	ไม่ต่ำกว่า		น้ำเงิน ² 7.0		(1) เปรียบเทียบสีและปริมาณเนื้อสีกับน้ำมันมาตรฐานที่เตรียมขึ้นใหม่โดยใช้สีละลายในน้ำมันก่อนการช้อนสีให้มีปริมาณเท่ากับที่กำหนด แล้วนำมาบรรจุแยกกันในภาชนะที่ใช้ในการวัดสีตามวิธีทดสอบ ASTM D 1500 แล้วตรวจที่นิงด้วยสาขา หรือ (2) ASTM D 2392

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปทำประโยชน์อื่นใด การค้า
ไม่ว่าวิธีใดทางอื่น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการใช้

ตารางที่ 2.3 (ต่อ)

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงต่ำ	น้ำมันดีเซล			วิธีทดสอบ ^u
			หมุนเร็ว		หมุนช้า	
			ธรรมดา	บี5		
14	13.3 ความเข้มของสี (Intensity)	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	-	4.0	4.5	ASTM D 1500
15	ไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน ร้อยละโดยปริมาตร (Methyl Ester of Fatty Acid, % vol.)	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	4	4	7.5	EN 14078
15	คุณสมบัติการหล่อลื่น ไมโครเมตร (Lubricity, μm)	ไม่สูงกว่า	460	460	-	CEC F-06-A-96
16	สารเติมแต่ง (ถ้ามี) (Additive)	ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบจากอธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน				

- หมายเหตุ 1/ วิธีทดสอบอาจใช้วิธีอื่นที่เทียบเท่าก็ได้ แต่ในกรณีที่มีข้อโต้แย้งให้ใช้วิธีที่กำหนดในรายละเอียดแนบท้ายนี้
- 2/ ใช้สารประกอบประเภท 1,4 dialkylamino anthraquinone และใช้วิธีทดสอบตาม (1) และ (2)

ตารางที่ 2.4 ลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงต่ำ	วิธีทดสอบ ^u
1	เมทิลเอสเทอร์ ร้อยละโดยน้ำหนัก (Methyl Ester, % wt.)	ไม่ต่ำกว่า 96.5	EN 14103
2	ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส กิโลกรัม/เมตร ³ (Density at 15°C, kg/m^3)	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า 860 และ 900	ASTM D 1298
3	ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เซนติสโตกส์ (Viscosity at 40°C, cST)	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า 3.5 และ 5.0	ASTM D 445
4	จุดวาบไฟ องศาเซลเซียส (Flash Point, °C)	ไม่ต่ำกว่า 120	ASTM D 93
5	กำมะถัน ร้อยละโดยน้ำหนัก (Sulphur, %wt.)	ไม่สูงกว่า 0.0010	ASTM D 2622
6	กากถ่าน ร้อยละโดยน้ำหนัก (ร้อยละ 10 ของกากที่เหลือจากการกลั่น) (Carbon Residue, on 10% distillation residue, %wt.)	ไม่สูงกว่า 0.30	ASTM D 4530
7	จำนวนซีเทน (Cetane Number)	ไม่ต่ำกว่า 51	ASTM D 613

ตารางที่ 2.4 (ต่อ)

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงสุด		วิธีทดสอบ ^{1/}	
8	เถ้าซัลเฟต (Sulfated Ash, %wt.)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.02	ASTM D 874
9	น้ำ (Water, %wt.)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.050	ASTM D 2709
10	สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด (Total Contaminate, %wt.)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.0024	ASTM D 5452
11	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (Copper Strip Corrosion)		ไม่สูงกว่า	หมายเลข 1	ASTM D 130
12	เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส (Oxidation Stability at 110°C, hours)	ชั่วโมง	ไม่ต่ำกว่า	6	EN 14112
13	ค่าความเป็นกรด (Acid Value, mg KOH/g)	มิลลิกรัม โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัม	ไม่สูงกว่า	0.50	ASTM D 664
14	ค่าไอโอดีน (Iodine Value, g Iodine/100 g)	กรัมไอโอดีน/100 กรัม	ไม่สูงกว่า	120	EN 14111
15	กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเตอร์ (Linolenic Acid Methyl Ester, %wt.)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	12.0	EN 14103
16	เมทานอล (Methanol, %wt.)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14110
17	โมนอกลิเซอไรด์ (Monoglyceride, %wt.)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.80	EN 14105
18	ไดกลิเซอไรด์ (Diglyceride, %wt.)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14105
19	ไตรกลิเซอไรด์ (Triglyceride, %wt.)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14105
20	กลีเซอรินอิสระ (Free glycerin, %wt.)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.02	EN 14105
21	กลีเซอรินทั้งหมด (Total glycerin, %wt.)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.25	EN 14105
22	โลหะกลุ่ม 1 (โซเดียมและโปแตสเซียม) (Group I metals (Na+K) mg/kg)	มิลลิกรัม/กิโลกรัม	ไม่สูงกว่า	5.0	EN 14108 และ EN 14109
	โลหะกลุ่ม 2 (แคลเซียมและแมกนีเซียม) (Group II metals (Ca+Mg) mg/kg)	มิลลิกรัม/กิโลกรัม	ไม่สูงกว่า	5.0	prEN 14538
23	ฟอสฟอรัส (Phosphorus, %wt.)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.0010	ASTM D 4951
24	สารเติมแต่ง (ถ้ามี) (Additive)		ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบจากอธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน		

หมายเหตุ 1/ วิธีทดสอบอาจใช้วิธีอื่นที่เทียบเท่าได้ แต่ในกรณีที่มีข้อโต้แย้งให้ใช้วิธีที่กำหนดในรายละเอียดแนบท้ายนี้

2.3 การใช้น้ำมันดีเซลชีวภาพในต่างประเทศ [6]

โดยทั่วไปการใช้น้ำมันดีเซลชีวภาพในต่างประเทศนั้น นิยมนำไปผสมกับน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมเป็นสูตรต่างๆ และใช้กันโดยแพร่หลายดังนี้

2.3.1 B2 (น้ำมันดีเซลชีวภาพ 2% : ดีเซล 98% โดยปริมาตร)

มีจำหน่ายทั่วไปในมลรัฐมินนิโซต้า ประเทศสหรัฐอเมริกา และจะบังคับใช้ทั้งมลรัฐในปี ค.ศ. 2005

2.3.2 B5 (น้ำมันดีเซลชีวภาพ 5% : ดีเซล 95% โดยปริมาตร)

มีจำหน่ายทั่วไปในประเทศฝรั่งเศส โดยกว่าครึ่งหนึ่งของน้ำมันดีเซลที่จำหน่ายเป็นน้ำมันสูตร B5

2.3.3 B20 (น้ำมันดีเซลชีวภาพ 20% : ดีเซล 80% โดยปริมาตร)

เป็นน้ำมันผสมที่คณะกรรมการไบโอดีเซลแห่งชาติ และสำนักงานป้องกันสิ่งแวดล้อมของประเทศสหรัฐอเมริกา แนะนำให้ใช้ตามกฎหมายยานยนต์เชื้อเพลิงทดแทนของประเทศ (Alternative Motor Fuels Act : AMFA 1988) ปัจจุบันนิยมใช้ในประเทศสหรัฐอเมริกา โดยเฉพาะรถของบริษัทและรถของหน่วยงานราชการกว่า 147 แห่ง รวมทั้งการใช้ยานยนต์ในพื้นที่ที่ต้องคำนึงถึงมลพิษเป็นพิเศษ เช่น รถรับส่งนักเรียน รถประจำทาง เรือ หรือเครื่องจักรกลที่ใช้ในเมืองแร่ ทั้งนี้ได้รับการรับรองจากบริษัทผู้ผลิตระบบหัวฉีดน้ำมันและเครื่องยนต์

2.3.4 B40 (น้ำมันดีเซลชีวภาพ 40% : ดีเซล 60% โดยปริมาตร)

เป็นสูตรที่ใช้ในรถขนส่งมวลชนในประเทศฝรั่งเศส ทั้งนี้เพื่อผลในการลดมลพิษ

2.3.5 B100 (น้ำมันดีเซลชีวภาพ 100% โดยปริมาตร)

เป็นการใช้น้ำมันดีเซลชีวภาพ 100% ในประเทศเยอรมนีและออสเตรีย โดยได้รับการรับรองจากบริษัทผู้ผลิตรถยนต์รายใหญ่ของประเทศ

ในด้านของวัตถุดิบที่นำมาใช้ผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพก็มีความแตกต่างกันไปตามสภาพและผลผลิตทางการเกษตรของแต่ละประเทศ เช่น ประเทศในกลุ่มสหภาพยุโรปจะใช้น้ำมันจากเมล็ดเรพ (Rapeseed Oil) เป็นหลัก ประเทศสหรัฐอเมริกาใช้น้ำมันถั่วเหลือง ประเทศมาเลเซียใช้น้ำมันปาล์ม ประเทศอาร์เจนตินา ฝรั่งเศส และอิตาลีใช้น้ำมันเมล็ดดอกทานตะวัน เป็นต้น นอกจากนี้น้ำมันที่ใช้ทอดอาหารแล้วที่ได้จากภัตตาคารต่างๆ หรือไขมันวัวคุณภาพต่ำก็ได้รับความสนใจจากหลายประเทศว่าเป็นวัตถุดิบซึ่งเป็นไตรกลีเซอไรด์ต้นทุนต่ำ สามารถนำมาใช้ผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพได้ดี โดยมีการปรับปรุงกระบวนการผลิตเล็กน้อย

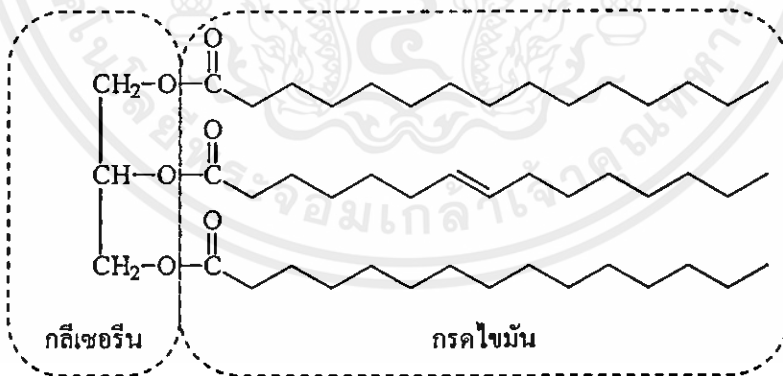
2.4 น้ำมันพืชที่ใช้ในการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ

2.4.1 ลักษณะและโครงสร้างของน้ำมัน [7]

น้ำมันพืชหรือน้ำมันจากไขมันสัตว์เป็นสารประกอบประเภทไตรกลีเซอไรด์ที่มีโครงสร้างเชื่อมต่อกับกรดไขมันที่มีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่ 10 ถึง 30 อะตอม ดังรูปที่ 2.1 โดยปริมาณกรดไขมันคิดเป็น 94-96% ของน้ำหนักโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ ซึ่งคุณสมบัติของน้ำมันแต่ละชนิดแตกต่างกันตามคุณสมบัติของกรดไขมันนั้นๆ แสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติและค่าความร้อนของน้ำมันพืชชนิดต่างๆ [7]

น้ำมันพืช	ความต้งจำเพาะ 21 °C (g/ml)	ความหนืด 21 °C (cP)	ค่าความร้อน (kJ/kg)
น้ำมันถั่วเหลือง	0.918	57.2	39,350
น้ำมันทานตะวัน	0.918	60.0	39,490
น้ำมันมะพร้าว	0.915	51.9	37,540
น้ำมันถั่วลิสง	0.914	67.1	39,470
น้ำมันปาล์ม	0.898	88.6	39,550
น้ำมันเมล็ดในปาล์ม	0.904	66.3	39,720
น้ำมันเมล็ดสบู่ดำ	0.915	36.9 (38 °C)	39,300
น้ำมันดีเซล	0.845	3.8	46,800



รูปที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลของน้ำมัน

เอกสารนี้ 2.4.2 สมบัติของน้ำมันพืชในการเป็นเชื้อเพลิง [2-3, 7] นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะมิใช่สมบัติในการเป็นเชื้อเพลิงของน้ำมันพืช ดังแสดงในตารางที่ 2.6 ความหนืดคิเนติกของน้ำมันพืชจะอยู่ในช่วง 30 ถึง 40 เซนติสโตกส์ ที่ 38°C ความหนืดที่สูงนี้เกิดจากโมเลกุลและสูตร

โครงสร้างที่มีขนาดใหญ่ของไตรกลีเซอไรด์ น้ำมันพืชมีน้ำหนักโมเลกุลมากอยู่ในช่วง 600 ถึง 900 ซึ่งสูงกว่าของน้ำมันดีเซลประมาณ 10 เท่า จุดวาบไฟสูงมาก (มากกว่า 200°C) ค่าการให้ความร้อนอยู่ในช่วง 39 ถึง 40 เมกะจูลส์ต่อกิโลกรัม ซึ่งต่ำกว่าน้ำมันดีเซล (45 เมกะจูลส์ต่อกิโลกรัม) จำนวนออกซิเจนในน้ำมันดีเซลทำให้ค่าความร้อนลดลงประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ เลขซีเทนอยู่ในช่วง 32 ถึง 40 ค่าไอโอดีนอยู่ในช่วง 0 ถึง 200 ส่วนจุดเกิดหมอกและจุดไหลเทของน้ำมันพืชสูงกว่าน้ำมันดีเซล

ตารางที่ 2.6 สมบัติในการเป็นเชื้อเพลิงของน้ำมันพืช [7]

Vegetable Oil	Kinematic Viscosity at 38°C	Cetane Number	Heating Value	Cloud Point	Pour Point	Flash Point	Density	Carbon Residue	Ash	Sulphur
	mm ² /s		MJ/kg	°C	°C	°C	kg/L	%wt	%wt	%wt
Corn	34.9	37.6	39.5	-1.1	-40.0	277	0.9095	0.24	0.010	0.01
Cottonseed	33.5	41.8	39.5	1.7	-15.0	234	0.9148	0.24	0.010	0.01
Crambe	53.6	44.6	40.5	10.0	-12.2	274	0.9044	0.23	0.050	0.01
Linseed	27.2	34.6	39.3	1.7	-15.0	241	0.9236	0.22	<0.010	0.01
Peanut	39.6	41.8	39.8	12.8	-6.7	271	0.9262	0.24	0.005	0.01
Rapeseed	37.0	37.6	39.7	-3.9	-31.7	246	0.9115	0.30	0.054	0.01
Safflower	31.3	41.3	39.5	18.3	-6.7	260	0.9144	0.25	0.006	0.01
H.O.Safflower	41.2	49.1	39.5	-12.2	-20.6	293	0.9021	0.24	<0.001	0.02
Sesame	35.5	40.2	39.3	-3.9	-9.4	260	0.9133	0.25	<0.010	0.01
Soya bean	32.6	37.9	39.6	-3.9	-12.2	254	0.9138	0.27	<0.010	0.01
Sunflower	33.9	37.1	39.6	7.2	-15.0	274	0.9161	0.23	<0.010	0.01
Palm	39.6	42.0	-	31.0	-	267	0.9180	-	-	-
Babassu	30.3	38.0	-	20.0	-	150	0.9460	-	-	-
Tallow	-	-	40.0	-	-	201	-	6.21	-	-

2.4.3 ปัญหาของน้ำมันพืชในการเป็นเชื้อเพลิง [3, 7]

การใช้น้ำมันพืชแทนน้ำมันดีเซลในเครื่องยนต์ดีเซลทั่วไปทำให้เกิดปัญหา ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและเกรดของน้ำมันและสภาพภูมิอากาศ การฉีด Atomization และการเผาไหม้ของน้ำมันพืชในเครื่องยนต์ดีเซลนั้นมีแตกต่างอย่างมากเมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม ความหนืดที่สูงมากของน้ำมันพืชสร้างปัญหาให้กับกระบวนการฉีด ทำให้การฉีดน้ำมันเป็นฝอยไม่ดี การผสมกันของน้ำมันกับอากาศไม่ดี ทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ จุดวาบไฟที่สูงมากของมันเป็นผลมาจากค่าการเป็นไอที่ต่ำ ซึ่งทำให้เกิดเป็นคาร์บอนอุดตันที่หัวฉีด และยังเกิดการเงื้องงอและสลายตัวในน้ำมันหล่อลื่น และจากคุณสมบัติที่มีความหนืดที่สูง ความเป็นไอด้าของน้ำมันพืช เป็นผลให้การสตาร์ทเครื่องยนต์เมื่ออากาศเย็นทำได้ยาก การทำงานผิดพลาด และการจุดระเบิดคลาดเคลื่อน น้ำมันพืชเกิดโพลีเมโรเซชันได้จากทั้งความร้อนและออกซิเดชัน ทำให้เกิดการตกตะกอนใน

หวัหิด เกิดเป็นฟิล์มที่อุดันการไหลของเชื้อเพลิงและรบกวนการเผาไหม้ ส่วนในระยะยาวน้ำมันพืชทำให้เกิดยางเหนียว ทำให้แหวนลูกสูบติด ดังนั้นเมื่อนำมาใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลโดยทั่วไป จำเป็นที่เครื่องยนต์ต้องทำการปรับปรุงอีกมาก

2.5 การใช้อนุพันธ์ของไตรกลีเซอไรด์ทดแทนน้ำมันดีเซล

รูดอล์ฟ ดีเซล ผู้คิดค้นเครื่องยนต์ดีเซล ได้ใช้น้ำมันถั่วลิสงเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ ในการทดสอบเมื่อปี ค.ศ.1900 เชื้อเพลิงจากน้ำมันพืชจึงมีความเป็นไปได้ในการแทนที่น้ำมันดีเซล[7] แม้ว่าความคิดที่จะใช้น้ำมันพืชมีมาเป็นเวลานานแล้ว แต่ไม่จริงจังกนัก เนื่องจากส่วนใหญ่การทดสอบในระยะสั้นให้ผลที่น่าพอใจ แต่ผลในระยะยาวกลับมีปัญหาอย่างรุนแรงกับเครื่องยนต์ เนื่องจากความหนืดที่สูง ซึ่งเป็นผลมาจากโครงสร้างทางเคมีของไตรกลีเซอไรด์ และมีการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ จึงมีความพยายามในการพัฒนาอนุพันธ์ของน้ำมันพืชที่มีคุณสมบัติและให้ผลเหมือนน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม ปัญหาของการใช้ไตรกลีเซอไรด์แทนน้ำมันดีเซล ส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับ ความหนืดที่สูง ความเป็นไอที่ต่ำ และลักษณะที่เป็น Polyunsaturated ของไตรกลีเซอไรด์ [8] ซึ่งทั้งนี้สามารถลดปัญหาดังกล่าวลงได้โดย 4 วิธี คือ [8]

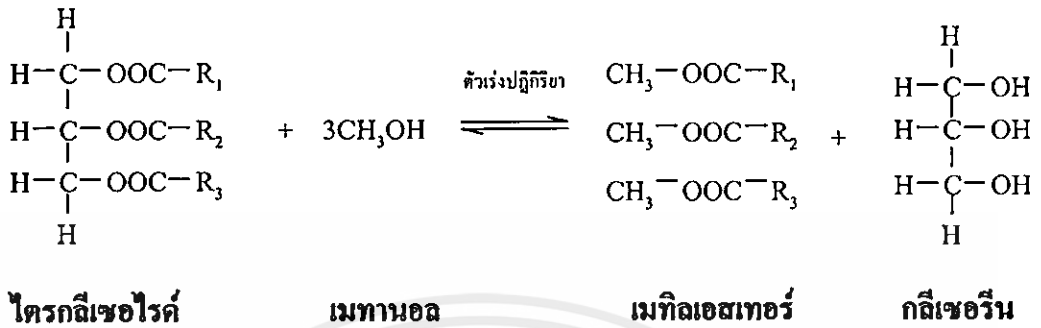
1. การนำมาใช้โดยตรงและการผสม (Direct use and blending) ในทางปฏิบัติไม่สามารถใช้น้ำมันพืช 100 % แทนน้ำมันดีเซลได้ เนื่องจากคุณสมบัติของน้ำมันพืชเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล พบว่าน้ำมันพืชมีความหนืดสูงกว่าน้ำมันดีเซล และเกิดเป็นไขที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการป้อนเชื้อเพลิง และการใช้งานในบางพื้นที่ในช่วงฤดูหนาวที่มีอุณหภูมิต่ำ จุดระเบิดได้ช้า จึงได้มีการนำมาผสมกับน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนต่างๆ แต่ก็มักจะพบปัญหาการเสื่อมสภาพของน้ำมันเครื่องและเกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์

2. การทำเป็นไมโครอิมัลชัน (Microemulsions) ของน้ำมันจากพืชและสัตว์กับตัวทำละลายเช่น เมทานอล เอทานอล และ 1-บิวทานอล ด้วยอัตราส่วนต่างๆ ซึ่งเป็นการทำให้ของเหลวเกิดการกระจายอนุภาคอย่างสมดุล วิธีนี้ลดปัญหาความหนืดได้ดี แต่ยังคงมีรายงานปัญหาในเรื่องการอุดตันที่หัวฉีด เกิดการสะสมของคราบคาร์บอน การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ และความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้น [8]

3. การแตกสลายด้วยความร้อน (Thermal cracking หรือ Pyrolysis) เป็นการนำน้ำมันพืชมาให้ความร้อนในสภาวะที่ไร้ออกซิเจน เพื่อให้ไขมันแตกตัวเป็นโมเลกุลที่เล็กลง ซึ่งทำให้ความหนืดของน้ำมันพืชลดลง ปัญหาของวิธีนี้คือ เครื่องมือมีราคาแพง และควบคุมการเกิดผลิตภัณฑ์ได้ยาก เช่น บางครั้งจะได้ก๊าซโซลีนออกมามากกว่าน้ำมันดีเซล

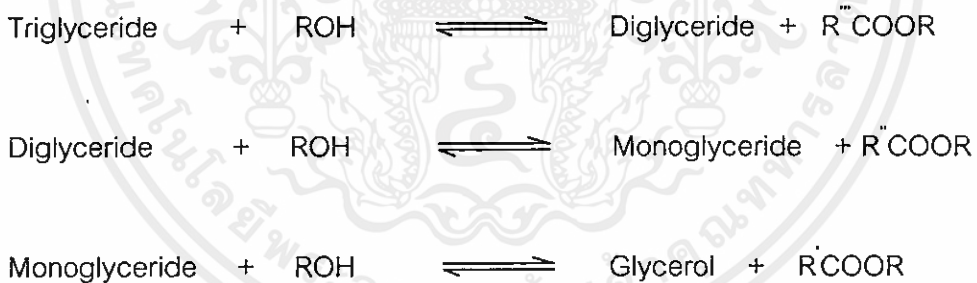
4. ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันหรือแอลกอฮอล์ไลซิส (Transesterification หรือ Alcoholysis) เป็นปฏิกริยาของน้ำมันหรือไขมันซึ่งเป็นไตรกลีเซอไรด์ที่ได้จากพืชและสัตว์กับแอลกอฮอล์ เกิดเป็นเอสเทอร์ ซึ่งคือน้ำมันดีเซลชีวภาพ และกลีเซอริน โดยใช้กรด ค่าง หรือเอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกริยา วิธี

นี่เป็นวิธีมาตรฐาน ในการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพในปัจจุบันปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันดังแสดง ในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 สมการเคมีของการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นต่อเนื่องเป็นอนุกรมกันและเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ โดยไตรกลีเซอไรด์จะถูกเปลี่ยนทีละขั้นตอนเป็นไดกลีเซอไรด์และ โมโนกลีเซอไรด์ น้ำมันดีเซลชีวภาพ และกลีเซอรินในที่สุด ดังรูปที่ 2.3 โดยสมดุลของปฏิกิริยาจะมีทิศทางไปทางด้านการเกิดน้ำมันดีเซลชีวภาพและกลีเซอริน



รูปที่ 2.3 ลำดับขั้นของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

2.6 กระบวนการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ

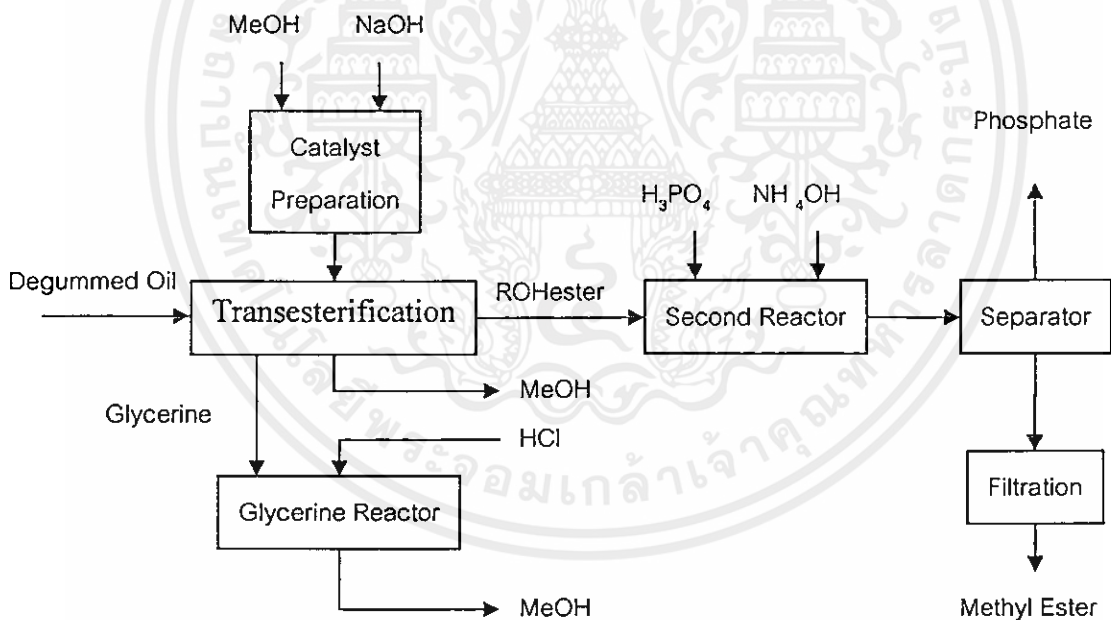
การพัฒนากระบวนการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพในเชิงอุตสาหกรรมเป็นไปอย่างไม่หยุดยั้ง ปัจจุบันเทคโนโลยีการผลิตถูกพัฒนาให้มีประสิทธิภาพและประสิทธิผลสูงสุดคือ นอกจากจะประกอบไปด้วยส่วนของการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ได้น้ำมันดีเซลชีวภาพออกมาแล้ว ยังประกอบไปด้วยส่วนการทำน้ำมันดีเซลชีวภาพให้บริสุทธิ์ (Methyl Ester Purification Unit) การทำกลีเซอรินให้บริสุทธิ์ด้วยการกลั่น (Glycerin Distillation Unit) ซึ่งทำให้ได้กลีเซอรินที่มีความ

บริสุทธิ์สูงถึงชั้นคุณภาพยา (Pharmaceutical Grade) และส่วนของการนำเมทานอลกลับมาใช้ใหม่ โดยทำให้บริสุทธิ์ด้วยการกลั่น (Methanol Distillation Unit) เป็นขั้นตอนต่อเนื่องกัน เทคโนโลยีกระบวนการผลิตเหล่านี้มักถูกปิดเป็นความลับด้วยการจดสิทธิบัตรเอาไว้

กระบวนการผลิตจริงในเชิงอุตสาหกรรมในปัจจุบัน มีทั้งกระบวนการที่ใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (Batch Process) และกระบวนการที่ใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง (Continuous Process) ซึ่งมีข้อดี ข้อด้อยแตกต่างกัน ดังนี้

2.6.1 กระบวนการแบบกะ

โรงงานผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพส่วนใหญ่ในยุโรป ที่มีกำลังการผลิตอยู่ในช่วง 500 ถึง 10,000 ตันต่อปี ยังคงใช้กระบวนการแบบกะอยู่ เทคโนโลยีการผลิตนี้มีราคาไม่แพง สามารถทำให้ได้คุณภาพตามต้องการ มีความยืดหยุ่นสูงเมื่อมีการเปลี่ยนสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยา แต่มีปัญหาด้านความสม่ำเสมอของคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ แผนภูมิของกระบวนการผลิตแบบกะแสดงดังในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แผนภูมิการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพด้วยกระบวนการแบบกะ [9]

เอกสารนี้ 2.6.2 กระบวนการตั้งคราะห์น้ำมันดีเซลชีวภาพแบบต่อเนื่อง

ในปี ค.ศ. 1990 บริษัท Leer ในประเทศเยอรมนี ได้พัฒนากระบวนการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพแบบต่อเนื่องขึ้น โดยเรียกเทคโนโลยีนี้ว่า CD Process โดยกระบวนการมีขั้นตอนของการ

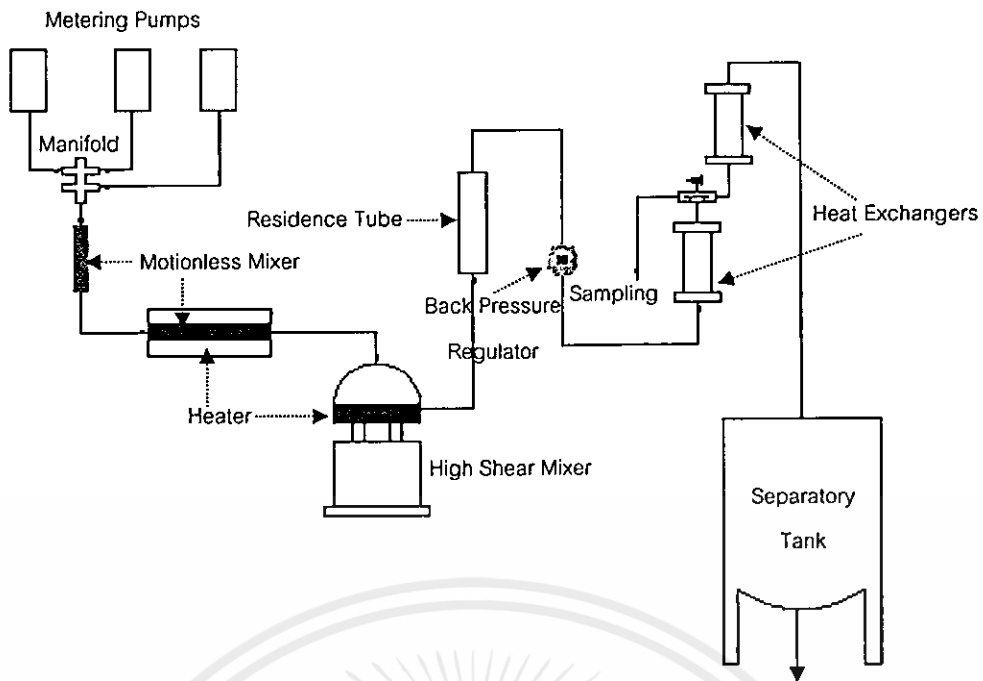
ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันอยู่ 3 ขั้นตอน เมื่อผ่านแต่ละขั้นตอนจะทำให้ได้น้ำมันดีเซลชีวภาพที่มีคอนเวอร์ชันสูงเพิ่มขึ้นตามลำดับ กระบวนการนี้สามารถผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพได้ถึง 15-20 ตันต่อชั่วโมง ซึ่งมาตรฐานการผลิตในสมัยนั้นทำได้เพียง 0.5-1.5 ตันต่อชั่วโมง [10]

Krisnangkura K. และ Simamaharnop R. ศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันแบบต่อเนื่องในเครื่องปฏิกรณ์แบบขดท่อ ของน้ำมันปาล์มกับเมทานอล โดยมีโทลูอินเป็นตัวทำละลาย ใช้โซเดียมเมทอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล 1:5.8 1:9 1:13 และ 1:17 ที่อุณหภูมิ 70 °C พบว่าได้ผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ 57% 87% 96% และ 99% ตามลำดับ โดยใช้อัตราส่วนโดยโมล 1:13 ปฏิกิริยาเกิดขึ้นภายใน 60 วินาที และที่อัตราส่วน 1:17 ปฏิกิริยาเกิดขึ้นใน 15 วินาที [11]

Watanabe Y. และคณะ ศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบแพ็คคอลัมน์ 3 คอลัมน์ต่อเนื่องกัน ตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งคือเอนไซม์ไลเปส *Candida* จะถูกบรรจุในเครื่องปฏิกรณ์คอลัมน์ละ 3 กรัม สารตั้งต้นคือน้ำมันถั่วเหลืองผสมกับน้ำมันจากผลพลและเมทานอล ในอัตราส่วนโดยโมล 1:3 ถูกป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์ด้วยอัตราการไหลคงที่ 6 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ผลิตภัณฑ์ที่ออกจากคอลัมน์ที่ 1 จะเข้าสู่คอลัมน์ที่ 2 โดยมีสารตั้งต้นที่อัตราส่วน 1:3 ถูกป้อนเข้าไปเพิ่มด้วยอัตราการไหลเดียวกัน และทำในทำนองเดียวกันในเครื่องปฏิกรณ์ที่ 3 ซึ่งพบว่า ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันดีเซลชีวภาพในขั้นตอนสุดท้าย 93% [12]

Damoko D. และ Cheryan M. ศึกษาการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์กวนผสมแบบต่อเนื่องขนาด 1 ลิตร สารตั้งต้นคือน้ำมันปาล์มและเมทานอลในอัตราส่วน 1:6 โดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 60 °C พบว่าได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันดีเซลชีวภาพ 58.8% และ 85.6% โดยน้ำหนัก เมื่อเวลาที่สารใช้ในการทำปฏิกิริยาคือ 40 นาที และ 60 นาที ตามลำดับ [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 กระบวนการปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันแบบต่อเนื่องในระดับโรงงานต้นแบบ โดย Nouredдини และคณะ [14]

Nouredдини H. และคณะ รายงานผลการทำปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันแบบต่อเนื่องในระดับโรงงานต้นแบบ ในกระบวนการมีอุปกรณ์ผสมไร้การเคลื่อนที่ (Motionless Mixer) และอุปกรณ์ผสมความเร็วสูง (High-Shear Mixer) ที่ปรับความเร็วได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 สารตั้งต้นคือน้ำมันถั่วเหลืองและเมทานอล ที่อัตราส่วนโดยโมล 1:8 และ 1:6 โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกริยา ที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกริยาในช่วง 0.1 ถึง 1% โดยน้ำหนักของน้ำมันพืช เปลี่ยนแปลงความเร็วของอุปกรณ์ผสมความเร็วสูงในช่วง 0 ถึง 3600 รอบต่อนาที และมีอัตราการไหลของสารตั้งต้นในช่วง 0.25 ถึง 0.35 ลิตรต่อนาที พบว่า การใช้อุปกรณ์ผสมไร้การเคลื่อนที่เพียงอย่างเดียว สามารถทำให้ได้น้ำมันดีเซลชีวภาพสูงมากกว่า 97% ในขณะที่ถ้าใช้อุปกรณ์ผสมความเร็วสูงเพียงอย่างเดียวจะต้องใช้ความเร็วรอบสูงกว่า 1800 รอบต่อนาที จึงจะได้ผลิตภัณฑ์มากกว่า 97% ที่อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันถั่วเหลืองต่อเมทานอล 1:6 ความเข้มข้นต่าง 0.4% และเมื่อใช้อุปกรณ์ผสมทั้ง 2 อย่างร่วมกันพบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกริยาและปริมาณแอลกอฮอล์จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นด้วย ส่วนอัตราการไหลไม่ได้ให้ผลแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้ [14]

2.7 น้ำมันดีเซลชีวภาพที่สังเคราะห์ได้จากปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

น้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์จากปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์ แอลกอฮอล์ที่เหมาะสมคือ เมทานอล เอทานอล โพรพานอล บิวทานอล และเอมิลแอลกอฮอล์

แต่ที่นิยมใช้คือเมทานอล เนื่องจากมีราคาถูกและหาได้ง่าย บางครั้งใช้เอทานอลเพราะผลิตจากแหล่งหมุนเวียนได้ ชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้จะทำให้ น้ำมันดีเซลชีวภาพมีคุณสมบัติส่วนใหญ่ใกล้เคียงกัน แต่มีสมบัติบางประการที่แตกต่างกัน เช่น ความหนืด จุดเกิดหมอก และจุดไหลเท

2.7.1 มาตรฐานของน้ำมันดีเซลชีวภาพ

เนื่องจากน้ำมันดีเซลชีวภาพนั้นผลิตได้จากน้ำมันพืชและไขมันหลายชนิดที่มีคุณสมบัติต่างกัน มีข้อดีและข้อด้อยแตกต่างกันเมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม ดังนั้นการกำหนดคุณภาพมาตรฐานนั้นมีไว้เพื่อให้ น้ำมันดีเซลชีวภาพมีคุณภาพเป็นมาตรฐานเดียวกัน ซึ่ง ASTM (American Society of Testing & Materials) ได้กำหนดมาตรฐาน D 6751 สำหรับน้ำมันดีเซลชีวภาพ ดังแสดงในตารางที่ 2.7 และในประเทศต่างๆ ที่ปัจจุบันมีการผลิตและใช้น้ำมันดีเซลชีวภาพ กำหนดมาตรฐานไว้ ดังแสดงในตารางที่ 2.8 นอกจากนี้ในแต่ละประเทศอาจใช้วัตถุดิบในการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.7 มาตรฐานน้ำมันดีเซลชีวภาพ [15]

คุณสมบัติ	หน่วย	มาตรฐาน DIN 51606	มาตรฐาน US ASTM
จุดวาบไฟ	องศาเซลเซียส	ไม่น้อยกว่า 100	ไม่น้อยกว่า 100
ปริมาณน้ำ และ ตะกอน	ร้อยละ โดยปริมาตร	-	ไม่มากกว่า 0.05
ปริมาณกากถ่าน	ร้อยละ โดยน้ำหนัก	ไม่มากกว่า 0.30	ไม่มากกว่า 0.05
ปริมาณเถ้า	ร้อยละ โดยน้ำหนัก	-	ไม่มากกว่า 0.02
ความหนืด ที่ 40 องศาเซลเซียส	เซนติสโตกส์	3.5 – 5.0	1.9 – 6.5
ปริมาณกำมะถัน	ร้อยละ โดยน้ำหนัก	ไม่มากกว่า 0.01	ไม่มากกว่า 0.05
ค่าซีเทน	-	ไม่น้อยกว่า 49	ไม่น้อยกว่า 40
จุดหมอก	องศาเซลเซียส	-	3 องศาเซลเซียส
การกัดกร่อนแผ่นทองแดง	-	ไม่มากกว่า 1	ไม่มากกว่า 3B
ค่าความเป็นกรดทั้งหมด	มิลลิกรัม KOH/กรัม	ไม่มากกว่า 0.50	ไม่มากกว่า 0.80
กลีเซอรินอิสระ	ร้อยละ โดยน้ำหนัก	ไม่มากกว่า 0.02	ไม่มากกว่า 0.02
ปริมาณกลีเซอรินทั้งหมด	ร้อยละ โดยน้ำหนัก	ไม่มากกว่า 0.25	ไม่มากกว่า 0.24

ตารางที่ 2.8 ข้อกำหนดมาตรฐานน้ำมันดีเซลชีวภาพในแต่ละประเทศ [16]

Specifications	Units	Australia	France	Germany	Italy	Sweden	USA	Draft EU
Standard/Specification		ONC1191	-	DINE51606	UNI10635	SS155436	ASTM D6751	EN14214
Introduction Date		Jly1997	Spt1997	Spt1997	Apr1997	Nov1996	2001	2001
Density @ 15°C	g/cm ³	0.85-0.89	0.87-.89	0.875-0.90	0.86-0.90	0.87-0.90	-	0.86-0.90
Kinematic Viscosity @ 40°C	mm ² /s	3.5-5.0	3.5-5.0	3.5-5.0	3.5-5.0	3.5-5.0	1.9-6.0	3.5-5.0
Flash Point	°C	≥100	≥100	≥110	≥100	≥100	≥130	≥130
CFPP	°C	0/-15	-	0-10/-20	-	-5	-	0/-15
Pour Point	°C	-	-10	-	0/-15	-	-	-
Sulphur	%max	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.05	0.01
CCR 100% max.		0.05	-	0.05	-	-	0.05	-
10% distl.residue	%max	-	0.3	-	0.5	-	-	0.3
Sulphated Ash max.	%max	0.02	-	0.03	-	-	0.02	0.01
(Oxide).Ash, max.	%mass	-	-	-	0.01	0.01	-	-
Water max.	mg/kg	-	200	300	700	300	≤0.05	500
Total Contaminants	mg/kg	-	-	20	-	20	-	-
Cu Corrosion	3h/50°C	-	-	1	-	-	No.3	1
Cetane No.		≥49	≥49	≥49	-	≥48	≥47	≥47
Neutral No.		≤0.8	≤0.5	≤0.5	≤0.5	≤0.6	≤0.8	≤0.02
Methanol	%mass	≤0.20	≤0.01	≤0.3	≤0.02	≤0.02	-	≤0.02
Ester Content	%mass	-	≥96.5	-	≥98	≥98	-	≥96.5
Monoglyceride	%mass	-	≤0.8	≤0.8	≤0.8	≤0.8	-	≤0.8
Diglyceride	%mass	-	≤0.2	≤0.4	≤0.2	≤0.1	-	≤0.20
Triglyceride	%mass	-	≤0.2	≤0.4	≤0.1	≤0.1	-	≤0.03
Free Glycerol	%mass	≤0.02	≤0.02	≤0.02	≤0.05	≤0.02	≤0.02	0.25
Total Glycerol	%mass	0.24	0.25	0.25	-	-	0.24	≤115

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.8 (ต่อ)

Specifications Standard/Specification	Units	Australia ONC1191	France -	Germany DINE51606	Italy UNI10635	Sweden SS155436	USA ASTM D6751	Draft EU EN14214
Iodine No.		≤120	≤115	≤115	-	≤125	-	-
C18:3 & higher acids		≤15	-	-	-	-	-	10
Phosphorous	ppm	≤20	≤10	≤10	≤10	≤10	≤10	10
Alkaline Matter	(Na, k)	-	≤5	≤5	≤10	≤10	-	≤360
Distillation 95%	°C	-	≤360	-	-	-	≤360	*
IBP min.	°C	-	-	-	-	-	-	*
Bound Glycerin		-	-	-	-	-	-	Max 0.8
Oxidation Stability	Hrs.	-	-	-	-	-	-	6 min.
Sediment		-	-	-	-	-	-	≤0.05
Cloud Point		-	-	-	-	-	*	-

หมายเหตุ * ไม่กำหนดค่าเพียงแต่ให้รายงานค่า, CFPP คือ Cold Filter Plugging Point

ตารางที่ 2.9 การเลือกใช้ไตรกลีเซอไรด์ชนิดต่างๆ เพื่อผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพในแต่ละประเทศ[15]

ชนิดน้ำมัน	ประเทศ
น้ำมันจากเรพซีด (Rape Seed) 80% น้ำมันทานตะวัน 10%	อิตาลี และฝรั่งเศส
น้ำมันถั่วเหลือง (Soy Bean)	อเมริกา
น้ำมันปาล์ม (Palm Oil)	มาเลเซีย
น้ำมันมะกอก (Olive Oil)	สเปน
น้ำมันเมล็ดฝ้าย (Cotton Seed Oil)	กรีซ
น้ำมันจาโทรฟาเคอร์เคส (Jatropha Curcas Oil)	นิการากัว
ไขวัว (Beef Tallow)	ไอร์แลนด์
น้ำมันพืชใช้แล้ว (Used Frying Oil)	ออสเตรเลีย

บทที่ 3

ทฤษฎี

3.1 หลักการของเครื่องปฏิกรณ์กวนผสมแบบต่อเนื่อง [17]

การทำงานของเครื่องปฏิกรณ์แบบไหลต่อเนื่อง (Continuous Flow Reactor) สारตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาจะถูกป้อนเข้าที่ทางเข้าเครื่องปฏิกรณ์อย่างต่อเนื่อง และผลิตภัณฑ์จะไหลออกที่ทางออกอย่างต่อเนื่องเช่นกัน โดยทั่วไป โรงงานอุตสาหกรรมที่ต้องการผลิตผลิตภัณฑ์เป็นจำนวนมากๆ มักใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบไหลต่อเนื่อง เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทั่วไปจะอยู่ในสถานะคงตัว (Steady State) ทำให้ควบคุมการทำงานได้ง่าย ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความสม่ำเสมอ และยังช่วยลดขั้นตอนการถ่ายเทสารเข้าหรือออกจากเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งเป็นขั้นตอนที่จำเป็นต้องทำเมื่อใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะในการผลิตออกไปได้

เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนอุดมคติ (Ideal Mixing Tank Reactor) ในเครื่องปฏิกรณ์จะมีใบกวนช่วยกวนของผสมภายในถังกวนให้มีความเข้มข้นเท่ากันทุกตำแหน่ง (รวมถึงอุณหภูมิภายในเท่ากันทุกตำแหน่ง) การถ่ายเทความร้อนอาจทำได้โดยการติดตั้งแจ็กเก็ตบริเวณรอบถัง หรือใช้คอยล์ให้ความร้อนติดตั้งภายในถัง แล้วทำการส่งไอน้ำร้อนหรือน้ำหล่อเย็นเป็นตัวกลางถ่ายเทความร้อน ใบกวนนั้นนอกจากมีหน้าที่ทำให้สารทำปฏิกิริยามีเนื้อเดียวกันแล้ว ยังช่วยเพิ่มการถ่ายเทมวลและความร้อนอีกด้วย

เวลาที่สารใช้ในการทำปฏิกิริยา (Residence Time, τ) นิยามได้ดังสมการที่ (3.1)

$$\tau \equiv \frac{V}{v_0} \quad (3.1)$$

เมื่อ τ คือ เวลาเฉลี่ยที่สารทำปฏิกิริยาอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์, [time]

V คือ ปริมาตรของสารทำปฏิกิริยา, [volume]

v_0 คือ อัตราการไหลเข้าและออกของสารทำปฏิกิริยา, [volume/time]

การทำงานของเครื่องปฏิกรณ์กวนผสมแบบต่อเนื่อง (Continuous-Stirred Tank Reactor, CSTR) นั้น ในช่วงแรกของการทำปฏิกิริยา ระบบจะยังไม่เข้าสู่สถานะคงตัวจนกระทั่งถึงเวลาหนึ่ง การหาเวลาที่ระบบต้องใช้ตั้งแต่เริ่มทำปฏิกิริยาจนถึงเวลาที่ระบบเข้าสู่สถานะคงตัว เมื่อมีปริมาตรการทำปฏิกิริยาของระบบและอุณหภูมิคงที่ สามารถหาได้โดยเริ่มจากทำดุล โมลดังสมการต่อไปนี้

$$C_{A0}v_0 - C_A v + r_A V = \frac{dN_A}{dt} \quad (3.2)$$

เมื่อ C_{A0} คือ ความเข้มข้นของสาร A ที่เวลาเริ่มต้น , [mol/volume]

C_A คือ ความเข้มข้นของสาร A ที่เวลาใดๆ , [mol/volume]

r_A คือ อัตราเร็วปฏิกิริยา (Rate of Reaction) , [mol·(time·volume)⁻¹]

N_A คือ จำนวนโมลของสาร A , [mole]

สำหรับวัฏภาคของเหลว เมื่อมีอัตราการไหลเชิงปริมาตรคงที่ ($V = V_0$) และปริมาตรของของเหลวผสมภายในเครื่องปฏิกรณ์คงที่ ($V = V_0$) จะทำให้ $\tau = V_0/V_0$ และเนื่องจาก $N_A = C_A V$ ดังนั้นสมการ (3.2) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$C_{A0} - C_A + r_A \tau = \frac{1}{V_0} \frac{dN_A}{dt} = \frac{V}{V_0} \frac{dC_A}{dt} = \tau \frac{dC_A}{dt} \quad (3.3)$$

สำหรับปฏิกิริยาแบบอันดับหนึ่ง (1st Order Reaction) เมื่อ k คือ ค่าคงที่อัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยา จะได้ว่า

$$-r_A = kC_A \quad (3.4)$$

แทนสมการ (3.4) ลงในสมการ (3.3) จะได้ว่า

$$C_{A0} - C_A - kC_A \tau = \tau \frac{dC_A}{dt} \quad (3.5)$$

จัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{dC_A}{dt} + \frac{1+k}{\tau} C_A = \frac{C_{A0}}{\tau} \quad (3.6)$$

ซึ่งจะได้ว่า

$$C_A = \frac{C_{A0}}{1+k} \left\{ 1 - \exp \left[-(1+k) \frac{t}{\tau} \right] \right\} \quad (3.7)$$

นิยามให้ t_s คือ เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เพื่อให้ความเข้มข้นของสารทำปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์เข้าสู่สถานะคงตัว C_{As} กล่าวคือ พจน์เอกซ์โพเนนเชียลในสมการ (3.7) เข้าสู่ศูนย์เมื่อเวลานานมาก เมื่อเทียบกับ τ และจะได้ว่า

$$C_{AS} = \frac{C_{A0}}{1 + \tau k} \quad (3.8)$$

ในที่นี้จะให้เวลา t_s เป็นเวลาที่ C_A เข้าใกล้ C_{AS} คือให้ $C_A = 0.99C_{AS}$ เมื่อแทนค่าลงในสมการ (3.7) จะได้ว่า

$$t_s = 4.6 \frac{\tau}{1 + \tau k} \quad (3.9)$$

สำหรับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นช้า ($k\tau \leq 1$) จะได้ว่า

$$t_s = 4.6\tau \quad (3.10)$$

ซึ่งหมายถึง ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ภายในเครื่องปฏิกรณ์จะเข้าสู่สภาวะคงตัวหลังจากเริ่มป้อนสารป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์เพื่อทำปฏิกิริยาไปเป็นเวลานานกว่า 5 เท่าของเรซีเดนซ์ไทม์และสำหรับปฏิกิริยาที่เกิดอย่างรวดเร็ว จะได้ว่า

$$t_s = \frac{4.6}{k} \quad (3.11)$$

การหาค่าคอนเวอร์ชันในเครื่องปฏิกรณ์กวนผสมแบบต่อเนื่อง ในกรณีที่เป็นปฏิกิริยาอันดับสอง (2nd Order Reaction) สมการอัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยา คือ

$$-r_A = kC_A C_B \quad (3.12)$$

ณ สภาวะคงตัว (Steady State) จะได้สมการดุลมวลทั่วไปดังนี้

$$F_{A0} - F_A = -r_A V \quad (3.13)$$

แทนสมการ (3.12) ลงในสมการ (3.13)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F_{A0} - F_A = kC_A C_B V \quad (3.14)$$

เมื่อ $\theta_B = \frac{C_{B0}}{C_{A0}}$ และจากนิยามของคอนเวอร์ชัน (Conversion) $n_A = n_{A0}(1 - x_A)$ เมื่อ n คือจำนวนโมล และ x_A คือคอนเวอร์ชันของสาร A จะได้ว่า

$$F_{A0}x_A = kC_{A0}(1 - x_A)C_{A0}(\theta_B - x_A)V \quad (3.15)$$

$$\begin{aligned} x_A &= \frac{kC_{A0}^2V}{F_{A0}}(1 - x_A)(\theta_B - x_A) \\ &= kC_{A0}\tau(1 - x_A)(\theta_B - x_A) \end{aligned} \quad (3.16)$$

นิยามให้ $\beta = kC_{A0}\tau$ เป็นค่าเรซิเดนซ์ไทม์ไร้หน่วย (Dimensionless Residence Time) สำหรับปฏิกิริยาแบบอันดับสอง สมการที่ (3.16) สามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\beta x_A^2 - (\beta\theta_B + \beta + 1)x_A + \beta\theta_B = 0 \quad (3.17)$$

จะได้คอนเวอร์ชันสำหรับเครื่องปฏิกรณ์กวนผสมแบบต่อเนื่อง เมื่อปฏิกิริยาเป็นแบบอันดับสองคือ

$$x_{CSTR} = \frac{\left(\theta_B + 1 + \frac{1}{\beta}\right) - \sqrt{\left(\theta_B + 1 + \frac{1}{\beta}\right)^2 - 4\theta_B}}{2} \quad (3.18)$$

3.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ [17-18]

ในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ สารทำปฏิกิริยาจะไหลผ่านท่อในลักษณะของลูกสูบที่ถูกดันออกไป ความเข้มข้นของสารทำปฏิกิริยาจะเปลี่ยนแปลงไปตามแนวแกนท่อ หรือกล่าวได้ว่าอัตราเร็วปฏิกิริยาแตกต่างกันตามแนวแกนท่อ ส่วนความเข้มข้นในแนวรัศมีของท่อจะสมมติให้มีค่าเท่ากัน

เวลาที่สารใช้ในการทำปฏิกิริยา (Space time, τ) นิยามได้ดังสมการที่ 3.20

$$\tau = \frac{V}{v_0} \quad (3.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตามหากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายวิชาการของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี โทร. 0-2327-8100

เมื่อ τ คือ เวลาเฉลี่ยที่สารทำปฏิกิริยาอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์, [time]

V คือ ปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์, [volume]

V_0 คือ อัตราการไหลเข้าและออกของสารทำปฏิกิริยา, [volume/time]

สมการออกแบบของเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล คือ

$$r_j = \frac{dF_j}{dV} \quad (3.21)$$

เมื่อ r_j คือ อัตราเร็วของปฏิกิริยา (Rate of reaction), [$\text{mol} \cdot (\text{time} \cdot \text{volume})^{-1}$]

F_j คือ อัตราการไหลเชิงโมล (Molar flow rate), [mol/time]

ในกรณีที่ปฏิกิริยาอันดับสอง (2^{nd} order reaction) สมการอัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยา คือ

$$-r_A = kC_A C_B \quad (3.22)$$

จากนิยามของคอนเวอร์ชัน (Conversion, x_A) คือ

$$x_A = (F_{A0} - F_A) / F_{A0} \quad (3.23)$$

เมื่อ F_{A0} คือ อัตราการไหลเชิงโมลของสาร A ที่เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์, [mol/time]

F_A คือ อัตราการไหลเชิงโมลของสาร A ที่ตำแหน่งใดๆ หรือที่ทางออกของเครื่องปฏิกรณ์, [mol/time]

เมื่อพิจารณาเฉพาะสารทำปฏิกิริยาจำกัด A และ จากสมการที่ 3.23 จัดรูปใหม่จะได้

$F_A = F_{A0}(1 - x_A)$ แทนในสมการที่ 3.21 จะได้

$$F_{A0} \left(\frac{dx_A}{dV} \right) = -r_A \quad (3.24)$$

กำหนดให้ $\theta_B = \frac{C_{B0}}{C_{A0}}$ เมื่อปฏิกิริยาเป็นอันดับสอง ดังนั้นอัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยาจะเท่ากับ

$$-r_A = kC_{A0}^2 (1 - x_A)(\theta_B - x_A) \quad (3.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F_{A0} \frac{dx}{dV} = kC_{A0}^2 (1-x_A)(\theta_B - x_A) \quad (3.26)$$

หาปริพันธ์ของสมการ (3.26) ได้ดังนี้

$$\int_0^{x_A} \frac{dx}{(1-x_A)(\theta_B - x_A)} = \frac{kC_{A0}^2}{F_{A0}} \int_0^V dV \quad (3.27)$$

$$\frac{1}{\theta_B - 1} \ln \left(\frac{\theta_B - x_A}{\theta_B(1-x_A)} \right) = kC_{A0} \tau = \beta \quad (3.28)$$

$$\frac{\theta_B - x_A}{\theta_B(1-x_A)} = \exp[\beta(\theta_B - 1)] \quad (3.29)$$

จะได้คอนเวอร์ชันของเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ สำหรับปฏิกิริยาอันดับสอง คือ

$$x_{PFR} = \frac{\theta_B [\exp(\beta(\theta_B - 1)) - 1]}{\theta_B \exp[\beta(\theta_B - 1)] - 1} \quad (3.30)$$

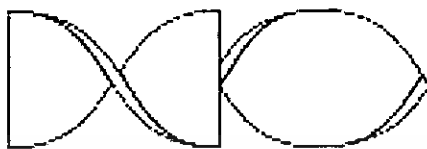
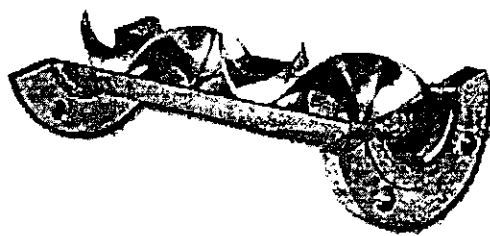
เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ สารจะไหลผ่านท่อที่มักจะมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากันตลอด โดยความเข้มข้นสารตั้งต้นลดลงตามความยาวในแกนไหล ดังนั้นในคอนตันจะมีความเข้มข้นของสารตั้งต้นสูงและลดลงเรื่อยๆ คอนเวอร์ชันจะขึ้นกับความยาวของเครื่องปฏิกรณ์

3.3 ตัวผสมไร้การเคลื่อนที่ (Static mixer) [19]

เครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่เป็นอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการผสมซึ่งไม่ใช่หน่วยขับเคลื่อนใดๆ ภายในเครื่องผสม โดยของไหลจะถูกทำให้ผสมกันเมื่อไหลผ่านเครื่องผสมแบบนี้

เครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่มีลักษณะเป็นท่อที่ภายในประกอบไปด้วยชิ้นส่วน (Element) หลากๆ อัน โดยที่แต่ละอันมีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้ายาว 1.5 เท่า ของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ซึ่งบิดทำมุม 180 องศา และในบางชนิดจะมีรูปร่างลักษณะพิเศษเฉพาะ ขึ้นอยู่กับการใช้งาน โดยไม่เพียงแต่ใช้เพื่อผสมของผสมในกระบวนการเท่านั้น แต่ยังสามารถประยุกต์ใช้ในงานอื่นได้อีก เช่น การละลายก๊าซในของเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อให้บริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ชั้นส่วนด้านขวา ชั้นส่วนด้านซ้าย

รูปที่ 3.1 ลักษณะของเครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่และลักษณะของชั้นส่วนภายใน [19-20]



รูปที่ 3.2 การผสมของเหลวโดยเครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่ [19]



รูปที่ 3.3 การละลายก๊าซในของเหลวด้วยเครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่ [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่ข้อมูลและข้ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1 หลักการผสมของเครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่ (Mixing principles)

เครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่ที่สามารถผสมของไหลได้ โดยอาศัยหลักการ 3 ข้อ คือ

1. การแบ่งส่วนการไหล (Division of flow)

การแบ่งส่วนการไหลเป็นการแบ่งของไหลออกเป็น 2 ส่วน เมื่อของไหลไหลผ่านแต่ละชั้นส่วน ดังนั้นจำนวนส่วนที่ได้ (N) จะเป็นไปตามสูตร $N=2^n$ เมื่อ n คือ จำนวนชั้นส่วน



รูปที่ 3.4 ลักษณะการไหลแบบการแบ่งส่วนการไหล [19]

2. การผสมในแนวรัศมี (Radial mixing)

การผสมในแนวรัศมี คือ การผสมซึ่งเกิดขึ้นในขณะที่ของไหลไหลไปตามส่วนโค้งของแต่ละชั้นส่วน ซึ่งจะไหลวนจากผนังท่อกลับเข้าสู่บริเวณกึ่งกลางของท่อ และไหลวนจากกึ่งกลางท่อไปยังผนังท่อสลับกันไป



รูปที่ 3.5 ลักษณะการไหลแบบการผสมในแนวรัศมี [19]

3. การเปลี่ยนทิศทางการไหล (Flow reversal)

การเปลี่ยนทิศทางการไหล คือ การผสมขณะที่ของไหลไหลผ่านแต่ละชั้นส่วน ทิศทางการไหลของของไหลจะสลับเปลี่ยนไปมาระหว่างซ้ายและขวา แรงที่เกิดจากแรงเฉื่อยที่เกิดขึ้นอย่างทันทีทันใดนั้น มีค่ามากจนทำให้เกิดการผสมของของเหลวขึ้น

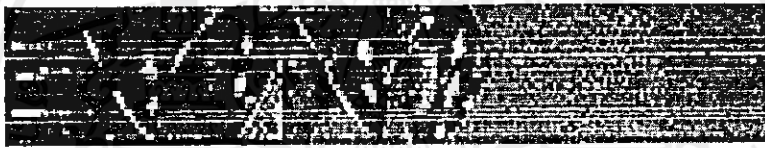


รูปที่ 3.6 ลักษณะการไหลแบบการเปลี่ยนทิศทางการไหล [19]

3.3.2 การประยุกต์ใช้เครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่

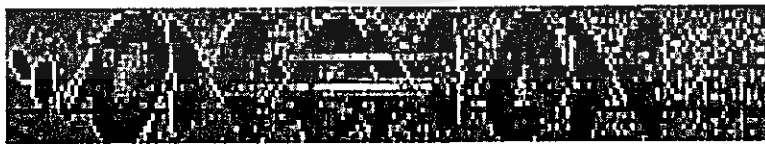
การใช้งานเครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่สามารถใช้กับลักษณะการผสมหรือการกระจายได้หลายแบบ ดังนี้

1. การผสมของไหลที่มีความหนืดต่ำและสามารถละลายซึ่งกันและกันได้ จะอาศัยหลักการเปลี่ยนทิศทางการไหลเป็นหลัก โดยการผสมในลักษณะนี้จะใช้ชิ้นส่วนในจำนวนน้อย



รูปที่ 3.7 การผสมของของเหลวที่มีความหนืดต่ำภายในเครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่ [19]

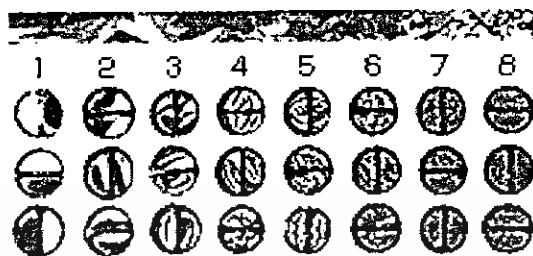
2. การแพร่กระจายของเหลว การผสมของเหลวที่ไม่ละลายซึ่งกันและกัน เช่น น้ำและน้ำมัน เครื่องผสมสามารถแพร่กระจายน้ำมันให้ผสมกับน้ำได้ โดยอาศัยหลักการผสมในแนวรัศมี ซึ่งของผสมที่ไหลผ่านชิ้นส่วนจำนวนมากจะทำให้ขนาดของอนุภาคของน้ำมันเล็กลง



รูปที่ 3.8 การแพร่กระจายของเหลวภายในเครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่ [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การผสมของไหลที่มีความหนืดสูง การผสมของเหลวความหนืดสูงจะอาศัยหลักการแบ่งส่วนการไหลและการผสมในแนวรัศมี จากภาพแสดงให้เห็นการผสมทีละชั้น เมื่อของผสมไหลผ่านไปในแต่ละชั้นส่วน



รูปที่ 3.9 การผสมของของเหลวที่มีความหนืดสูงภายในเครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่ [19]

ในงานวิจัยนี้ได้มีการนำตัวผสมไร้การเคลื่อนที่ที่ทำจากวัสดุที่หาได้ง่ายในประเทศไทย มีราคาถูก ทนทาน และมีน้ำหนักเบา วัสดุนี้คือ ขดเส้นสแตนเลส หรือฝอยขัดหม้อ นำมาบรรจุภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อเพื่อช่วยให้เกิดการผสมของสารภายในท่อ ขดเส้นสแตนเลสจะทำให้กระแสนการไหลของของไหลเกิดความปั่นป่วนแตกเป็นกระแสเล็กๆ เกิดลักษณะ Eddies ขึ้นจำนวนมากมายหลังจากของเหลวไหลผ่านแต่ละเส้นของขดสแตนเลสจำนวนมาก

3.4 การขยายสเกลการสังเคราะห์น้ำมันดีเซลชีวภาพ [21]

ในการขยายสเกล (Scale up) การสังเคราะห์น้ำมันดีเซลชีวภาพต้องคำนึงถึงการผสมภายในท่อ ซึ่งจะพิจารณาได้จากเลขเรย์โนลด์ (Reynold number) นอกจากนี้สเปซไทม์ก็มีส่วนสำคัญที่ต้องพิจารณา ในการวิเคราะห์ถึงการขยายสเกลจะให้เลขเรย์โนลด์และสเปซไทม์มีค่าคงที่ ดังนั้นเมื่อเลขเรย์โนลด์ (Re) ในท่อ คือ

$$Re = \frac{Du\rho}{\mu} = \frac{4u_0\rho}{\mu\pi D} \quad (3.31)$$

เมื่อ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ

u คือ Superficial velocity

ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล

μ คือ ความหนืดของของไหล

u_0 คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของของไหลที่ทางเข้า

V คือ ปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์

L คือ ความยาวของท่อ

และสเปซไทม์ (τ) คือ

$$\tau = \frac{V}{u_0} = \frac{\pi D^2 L}{4u_0} \quad (3.32)$$

เมื่อเลขเรย์โนลด์มีค่าคงที่ในการขยายสเกล จะได้ว่า

$$\frac{\text{Re}_2}{\text{Re}_1} = \frac{\left(\frac{u_0}{D}\right)_2}{\left(\frac{u_0}{D}\right)_1} = 1 \quad (3.33)$$

หรือ

$$\left(\frac{D}{u_0}\right)_2 = \left(\frac{D}{u_0}\right)_1 \quad (3.34)$$

ในขณะที่ค่าสเปซไทม์มีค่าคงที่ในการขยายสเกล จะได้ว่า

$$\frac{\tau_2}{\tau_1} = \frac{\left(\frac{D^2 L}{u_0}\right)_2}{\left(\frac{D^2 L}{u_0}\right)_1} = 1 \quad (3.35)$$

เมื่อผนวกสมการที่ (3.34) เข้ากับสมการที่ (3.35) พบว่า เมื่อเลขเรย์โนลด์และค่าสเปซไทม์มีค่าคงที่ในการขยายสเกล จะได้

$$D_2 L_2 = D_1 L_1 \quad (3.36)$$

ดังนั้น เมื่อเพิ่มขนาดของท่อขึ้น n เท่า

$$D_2 = nD_1 \quad (3.37)$$

ความยาวของท่อจะลดลง n เท่า

$$L_2 = \frac{L_1}{n} \quad (3.38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ และจากสมการที่ (3.34) จะได้ว่า

$$u_{02} = nu_{01} \quad (3.39)$$

หรืออาจกล่าวได้ว่า เมื่อต้องการเพิ่มกำลังการผลิต n เท่า จะต้องใช้ท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น n เท่า และความยาวของท่อลดลง n เท่า เมื่อให้เลขเรย์โนลด์และค่าสเปซไทม์มีค่าคงที่

เมื่อความเร็วของการไหลในท่ออยู่ในช่วงการไหลแบบราบเรียบ สมการความดันตกของ Poiseuille คือ

$$\Delta P = \frac{2\mu u L}{D^2} \quad (3.40)$$

อัตราส่วนความดันตกเมื่อขยายสเกล n เท่า คือ

$$\begin{aligned} \frac{\Delta P_2}{\Delta P_1} &= \frac{u_2 L_2 D_1^2}{u_1 L_1 D_2^2} = \frac{u_{02} L_2 D_1^4}{u_{01} L_1 D_2^4} \\ &= \frac{L_2 D_1^3}{L_1 D_2^3} = \frac{1}{n} \left(\frac{1}{n} \right)^3 = \frac{1}{n^4} \end{aligned} \quad (3.41)$$

ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในด้านความดันตก ที่ลดลงเป็นอย่างมาก

ดังนั้นในการขยายสเกลการสังเคราะห์น้ำมันดีเซลชีวภาพเมื่อเพิ่มกำลังผลิต n เท่า และเพื่อให้ได้เลขเรย์โนลด์และสเปซไทม์มีค่าคงที่ จะได้ว่า ขนาดของท่อมีขนาดเพิ่มขึ้น n เท่า ในขณะที่ความยาวลดลง n เท่า และความดันตกมีค่าลดลง n^4 เท่า

บทที่ 4

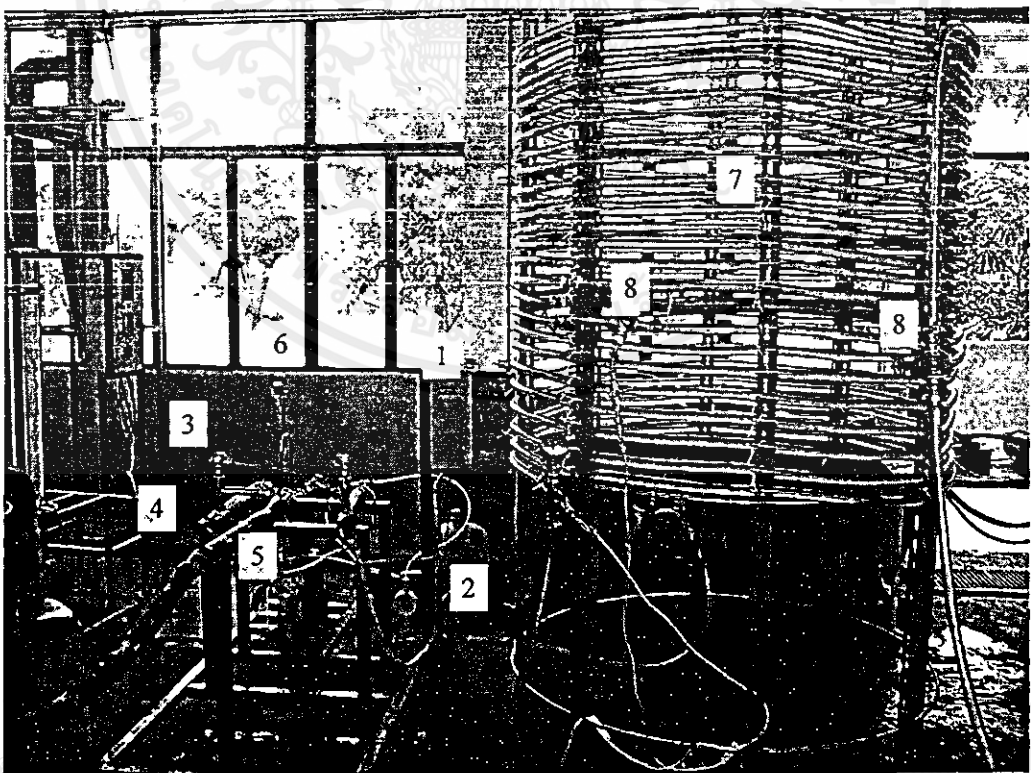
การทดลอง

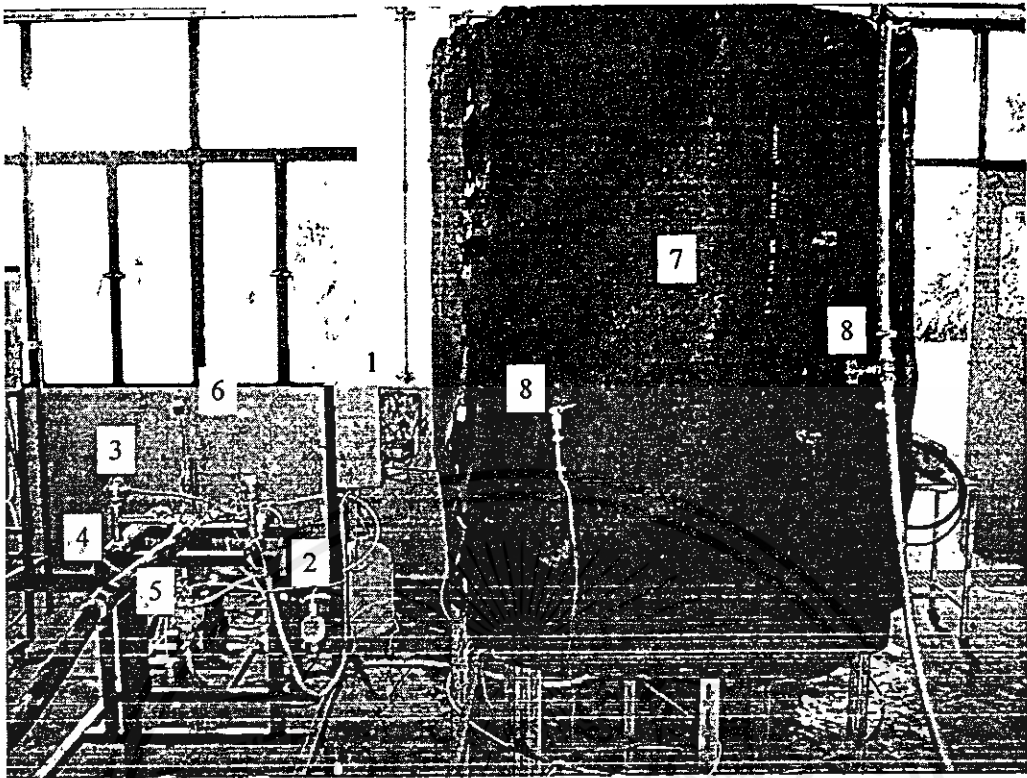
4.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 4.1.1 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 4.1.2 ออกแบบและสร้างเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อบรรจุบางส่วน
- 4.1.3 ผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพในเครื่องปฏิกรณ์ ที่สภาวะต่างๆ
- 4.1.4 วิเคราะห์คุณภาพน้ำมันดีเซลชีวภาพ จากกระบวนการผลิต

4.2 ออกแบบและสร้างเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อบรรจุบางส่วน

จากการศึกษาผลงานวิจัยเรื่องการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ ของ เบญจพร เมืองสมบัติ และคณะ เพื่อนำข้อมูลมาคำนวณหาขนาดของเครื่องสูบและเครื่องทำความร้อน อัตราการไหลของสารตั้งต้น ปริมาตรระบบ และความยาวรวมของเครื่องปฏิกรณ์ จากนั้น ทำการสร้างเครื่องปฏิกรณ์ดังแสดงดังรูปที่ 4.1 ถึง 4.3 และทำการทดสอบกระบวนการที่ออกแบบ เพื่อทำการปรับค่าต่างๆ ของระบบให้เหมาะสม (ภาคผนวก ก)





(ข)

รูปที่ 4.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ สำหรับผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ (ก) เครื่องปฏิกรณ์ก่อนหุ้มฉนวน (ข) เครื่องปฏิกรณ์หลังหุ้มฉนวน ประกอบไปด้วย 1. เครื่องควบคุม 2. ป้อน 3. เทอร์โมคัพเบิล 4. เครื่องให้ความร้อน 5. ส่วนของท่อปรรูจ 6. มาตรวัดความดัน 7. ส่วนของท่อเปล่า 8. วาล์วเก็บตัวอย่าง

4.2.1 ส่วนประกอบของเครื่องปฏิกรณ์

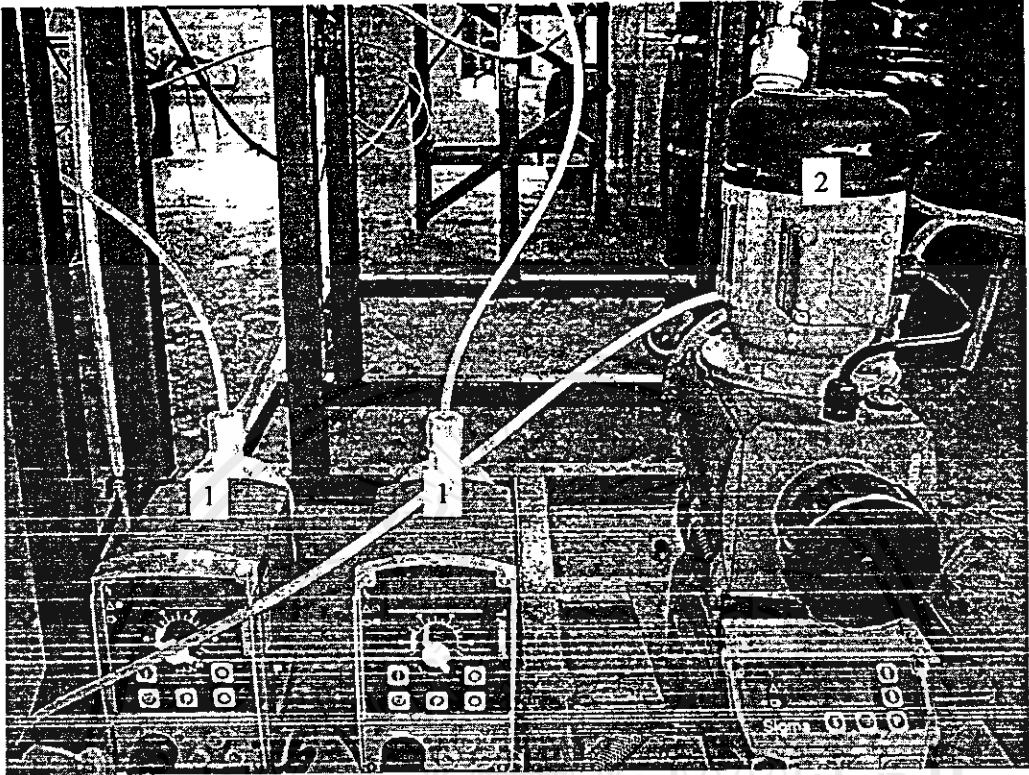
- เครื่องสูบลมขนาด 111 ลิตรต่อชั่วโมง สำหรับป้อนน้ำมัน
- เครื่องสูบลมขนาด 11 และ 7.1 ลิตรต่อชั่วโมง สำหรับป้อนสารละลายเมทานอล
- สายยางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5/8 นิ้ว ยาว 75 เมตร
- วัสดุเฉื่อย เป็นขดสแตนเลสหรือฝอยขัดหม้อ
- เครื่องทำความร้อนขนาด 500 1200 2000 และ 4000 วัตต์ สำหรับให้ความร้อนแก่สารตั้งต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ มีมาตรวัดความดัน ที่ัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

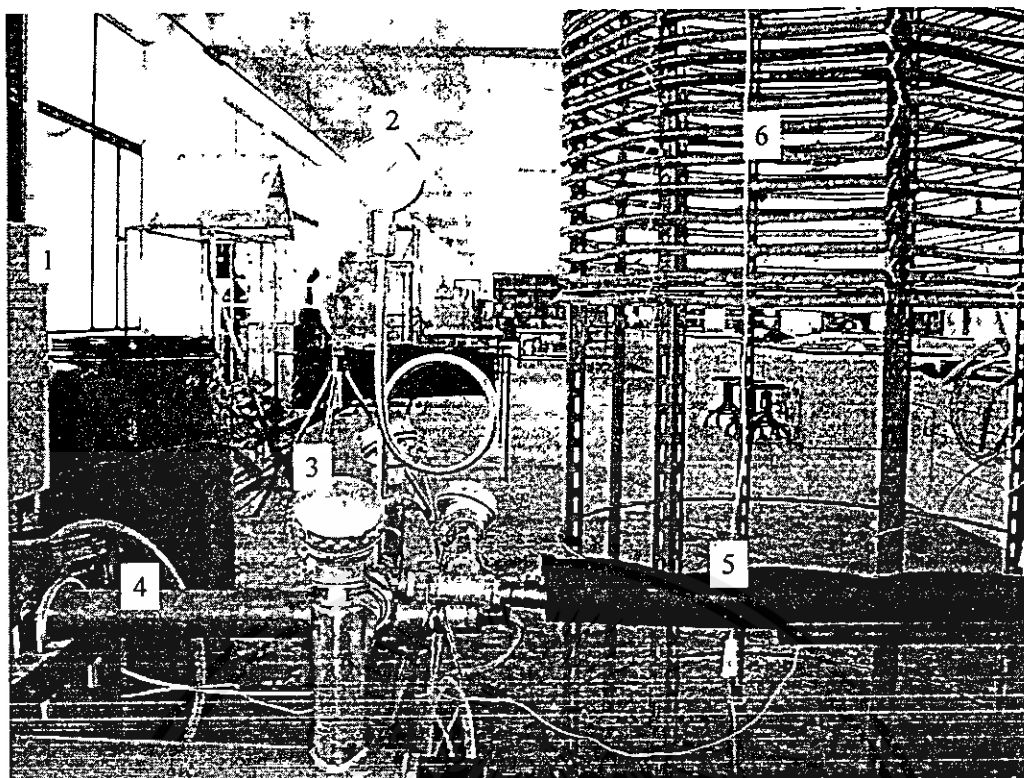
- ชุดควบคุมอุณหภูมิ

- ฉนวนกันความร้อน



รูปที่ 4.2 ส่วนปั๊มของเครื่องปฏิกรณ์ 2 ชนิด คือ 1. ปั๊มเมทานอล 2. ปั๊มน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ส่วนประกอบของเครื่องปฏิกรณ์ ประกอบไปด้วย 1. เครื่องควบคุม 2. มาตรวัดความดัน 3. เทอร์โมคัพเปิด 4. เครื่องให้ความร้อน 5. ส่วนของท่อบรรจุ 6. ส่วนของท่อเปล่า

4.3 สารเคมี

- น้ำมันพืชที่ใช้แล้วจากบริษัท ยูไนเต็คฟู๊ดส์ มหาชน
- Methanol (Commercial grade)
- Ethanol (Commercial grade)
- Sodium hydroxide (Analytical reagent)
- Sodium sulphate (Analytical reagent)
- Phosphoric acid (Analytical reagent)
- Acetone (Analytical reagent)
- Acetonitrile (Analytical reagent)

4.4 เครื่องมือและอุปกรณ์

- เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อบรรจุบางส่วน
- เครื่อง High Performance Liquid Chromatograph (HPLC)
- เครื่องวัดความหนืดแบบเซย์โบลด์

- เครื่องชั่งน้ำหนักไฟฟ้าละเอียด 4 ตำแหน่ง
- บีกเกอร์ขนาด 40 และ 200 มิลลิลิตร
- กระจกตวงขนาด 100 มิลลิลิตร
- ขวดรูปชมพู่ขนาด 200 มิลลิลิตร
- หลอดหยดสาร
- กรวยกรอง
- กรวยแยกขนาด 200 มิลลิลิตร
- เทอร์โมมิเตอร์
- หลอดทดลอง
- ขวดเก็บตัวอย่างขนาด 50 มิลลิลิตร
- กระดาษกรอง
- ขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร

4.5 วิธีการทดลอง

4.5.1 ศึกษาคุณสมบัติของน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว

- วิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระ(ภาคผนวก ข)
- วิเคราะห์ความหนาแน่น
- วิเคราะห์ความหนืด

4.5.2 ขั้นตอนการเตรียมสาร

- เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมัน (ภาคผนวก ก) ในเมทานอล เป็นสารตั้งต้น
- เตรียมสารละลายกรดฟอสฟอริกในเอทานอล (ภาคผนวก ก) เพื่อทำการหุุดปฏิกิริยา

4.5.3 ขั้นตอนการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ

- ทำการป้อนน้ำมันพืช และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเมทานอล ในอัตราส่วน โดยโมลน้ำมันต่อเมทานอลตามสภาวะการทดลอง เข้าสู่เครื่องให้ความร้อน และไหลมารวมกันในส่วนของเครื่องปฏิกรณ์ที่ประกอบด้วยส่วนของท่อบรรจุและส่วนของท่อเปล่า โดยมีความยาวรวม 75 เมตร

- รอจนระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว จากนั้นทำการเก็บตัวอย่าง ณ ตำแหน่งต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่... ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.4 ขั้นตอนการหุุดปฏิกิริยา

- นำตัวอย่างมาหุุดปฏิกิริยาด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริกในเอทานอลในขวดเก็บตัวอย่าง

- ทำการเขย่าเพื่อหยุดปฏิกิริยา

4.5.5 ขั้นตอนการล้าง

- นำตัวอย่างที่หยุดปฏิกิริยา มาล้างด้วยน้ำอุ่นอุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส ในกรวยแยก

- รอให้สารแยกออกเป็น 2 ชั้น โดยชั้นล่าง คือ น้ำ ส่วนชั้นบน คือ น้ำมันดีเซลชีวภาพ
- ล้างด้วยน้ำอุ่นอีกครั้ง รอให้สารแยกออกเป็น 2 ชั้น โดยชั้นล่าง คือ น้ำ ส่วนชั้นบน คือ น้ำมันดีเซลชีวภาพ

- นำน้ำมันดีเซลชีวภาพมากำจัดน้ำออก โดยใช้โซเดียมซัลเฟต
- กรองน้ำมันดีเซลชีวภาพ

4.5.6 ขั้นตอนการวิเคราะห์หาปริมาณเมทิลเอสเทอร์

- นำน้ำมันดีเซลชีวภาพที่กรองแล้ว 0.25 กรัม ละลายในอะซิโตน 10 มิลลิลิตร โดยใช้ขวดวัดปริมาตร

- นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบด้วยเครื่อง HPLC โดยใช้สารละลายอะซิโตนและอะซิโตนไนไตร อัตราส่วนโดยปริมาตร 2 ต่อ 1 เป็นเฟสเคลื่อนที่

4.6 สถานะการทดลอง

สำหรับตัวแปรควบคุมในแต่ละสถานะการทดลอง เป็นดังนี้

- ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมัน
- ความยาวรวมของเครื่องปฏิกรณ์ 75 เมตร

สำหรับตัวแปรอื่นๆ ในสถานะการทดลองดังแสดงดังตารางที่ 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 4.1 แสดงตัวแปรต่างๆ ในสภาวะการทดลอง

ตัวแปร	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
อัตราการไหลรวม	30	30	30	30	60	60	120	120	60	60	120	120
อุณหภูมิ	50	50	50	60	60	60	60	60	60	60	60	60
อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมัน	6:1	6:1	6:1	6:1	6:1	4.5:1	6:1	4.5:1	6:1	4.5:1	6:1	4.5:1
ความยาวท่อบรรจุ	1	5	5(2)	10	10	10	10	10	15	15	15	15
ความยาวท่อเปล่า	74	70	65	65	65	65	65	65	60	60	60	60

หมายเหตุ (...) หมายถึงจำนวนชิ้น

ตารางที่ 4.2 แสดงตำแหน่งของตัวอย่างที่เกิดขึ้น (สเปซไทม์, T)

ตำแหน่งของตัวอย่าง สถานะการทดลองที่	หลังท้อบรรจุ (สเปซไทม์, นาที)	ความยาวเครื่องปฏิกรณ์ 25 เมตร (สเปซไทม์, นาที)	ความยาวเครื่องปฏิกรณ์ 50 เมตร (สเปซไทม์, นาที)	ความยาวเครื่องปฏิกรณ์ 75 เมตร (สเปซไทม์, นาที)
1	0.4	10	20	30
2	2	10	20	30
3	2	10	20	30
4	4	10	20	30
5	2	5	10	15
6	2	5	10	15
7	1	2.5	5	7.5
8	1	2.5	5	7.5
9	3	5	10	15
10	3	5	10	15
11	1.5	2.5	5	7.5
12	1.5	2.5	5	7.5

บทที่ 5

ผลการทดลองและวิเคราะห์

5.1 คุณสมบัติของน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว

5.1.1 ปริมาณกรดไขมันอิสระ

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

พบว่า

ปริมาณกรดโอเลอิก, % = 0.53

ปริมาณกรดปาล์มมิติก, % = 0.75

ค่า acid value = 0.75 มิลลิกรัม โซเดียมไฮดรอกไซด์/กรัมไขมัน

5.1.2 ความหนาแน่น

ความหนาแน่นเฉลี่ยของน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว ≈ 0.88 กรัม/มิลลิลิตร

5.1.3 ค่าความหนืด

จากการวัดค่าความหนืดด้วยเครื่องวัดความหนืดแบบเซย์โบลต์ พบว่า

เวลาเฉลี่ยที่ได้จากการวัด = 209 วินาที

สูตรการคำนวณค่า Kinematic Viscosity; stokes ของ Redwood ($t > 100$) ดังสมการ

Stokes = $0.00247t - 0.50 / t$

พบว่า

ค่าความหนืดเฉลี่ยของน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว ≈ 51.4 cSt

5.2 ปริมาณน้ำมันดีเซลชีวภาพในผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้

จากการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพที่สภาวะการทดลองต่างๆ แสดงผลดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ปริมาณน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ผลิตได้

สถานะที่	ตัวแปรต่างๆ	ตำแหน่งของตัวแปรที่เก็บ	เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์
1	- อัตราการไหลรวม 30 ลิตรต่อชั่วโมง - อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส - อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 - ความยาวท่อบรรจุ 1 เมตร - ความยาวท่อเปล่า 74 เมตร	- หลังท่อบรรจุ ($\tau = 0.4$ นาที) - ความยาวเครื่องปฏิกรณ์ 25 เมตร ($\tau = 10$ นาที) - ความยาวเครื่องปฏิกรณ์ 50 เมตร ($\tau = 20$ นาที) - ความยาวเครื่องปฏิกรณ์ 75 เมตร ($\tau = 30$ นาที)	22.6 29.8 34.3 36.8
2	- อัตราการไหลรวม 30 ลิตรต่อชั่วโมง - อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส - อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 - ความยาวท่อบรรจุ 5 เมตร - ความยาวท่อเปล่า 70 เมตร	- หลังท่อบรรจุ ($\tau = 2$ นาที) - ความยาวเครื่องปฏิกรณ์ 25 เมตร ($\tau = 10$ นาที) - ความยาวเครื่องปฏิกรณ์ 50 เมตร ($\tau = 20$ นาที) - ความยาวเครื่องปฏิกรณ์ 75 เมตร ($\tau = 30$ นาที)	56.4 63.5 66.4 70.1
3	- อัตราการไหลรวม 30 ลิตรต่อชั่วโมง - อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส - อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 - ความยาวท่อบรรจุ 5 เมตร (2 ชั้น) - ความยาวท่อเปล่า 65 เมตร	- หลังท่อบรรจุ ($\tau = 2$ นาที) - ความยาวเครื่องปฏิกรณ์ 25 เมตร ($\tau = 10$ นาที) - ความยาวเครื่องปฏิกรณ์ 50 เมตร ($\tau = 20$ นาที) - ความยาวเครื่องปฏิกรณ์ 75 เมตร ($\tau = 30$ นาที)	57.3 63.8 70.6 72.5
4	- อัตราการไหลรวม 30 ลิตรต่อชั่วโมง - อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส - อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 - ความยาวท่อบรรจุ 10 เมตร - ความยาวท่อเปล่า 65 เมตร	- หลังท่อบรรจุ ($\tau = 4$ นาที) - ความยาวเครื่องปฏิกรณ์ 25 เมตร ($\tau = 10$ นาที) - ความยาวเครื่องปฏิกรณ์ 50 เมตร ($\tau = 20$ นาที) - ความยาวเครื่องปฏิกรณ์ 75 เมตร ($\tau = 30$ นาที)	79.3 81.3 82.0 82.7
5	- อัตราการไหลรวม 60 ลิตรต่อชั่วโมง - อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส - อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 - ความยาวท่อบรรจุ 10 เมตร - ความยาวท่อเปล่า 65 เมตร	- หลังท่อบรรจุ ($\tau = 2$ นาที) - ความยาวเครื่องปฏิกรณ์ 25 เมตร ($\tau = 5$ นาที) - ความยาวเครื่องปฏิกรณ์ 50 เมตร ($\tau = 10$ นาที) - ความยาวเครื่องปฏิกรณ์ 75 เมตร ($\tau = 15$ นาที)	81.9 84.1 85.9 86.2
6	- อัตราการไหลรวม 60 ลิตรต่อชั่วโมง - อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส - อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 4.5:1 - ความยาวท่อบรรจุ 10 เมตร - ความยาวท่อเปล่า 65 เมตร	- หลังท่อบรรจุ ($\tau = 2$ นาที) - ความยาวเครื่องปฏิกรณ์ 25 เมตร ($\tau = 5$ นาที) - ความยาวเครื่องปฏิกรณ์ 50 เมตร ($\tau = 10$ นาที) - ความยาวเครื่องปฏิกรณ์ 75 เมตร ($\tau = 15$ นาที)	78.6 80.4 82.2 85.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 (ต่อ)

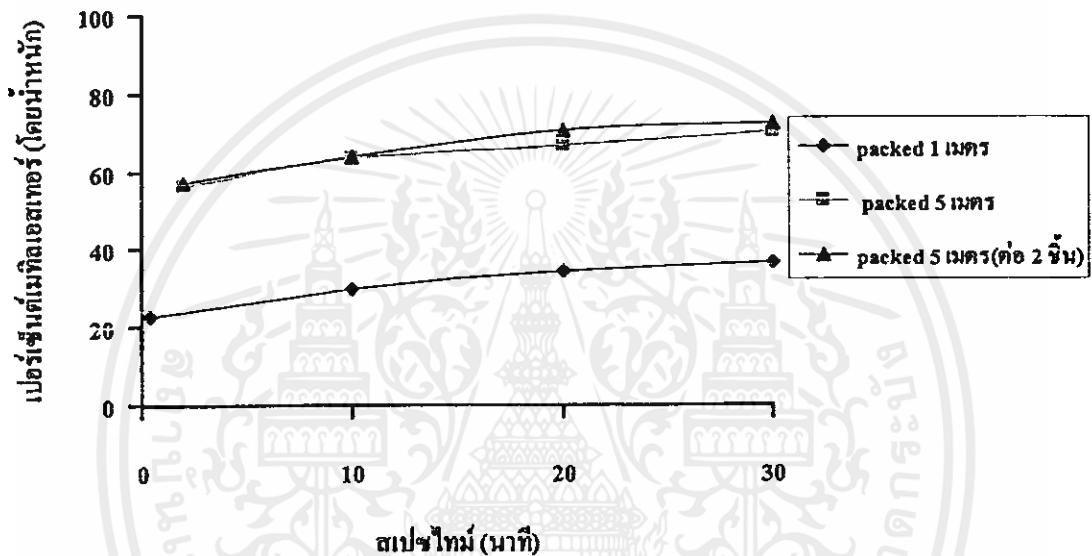
สถานะที่	ตัวแปรต่างๆ	ตำแหน่งของตัวอย่างที่เก็บ	เปอร์เซ็นต์ เมทิลเอสเทอร์
7	- อัตราการไหลรวม 120 ลิตรต่อชั่วโมง	- หลังท่อบรรจุ ($\tau = 1$ นาที)	82.9
	- อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส	- ความยาวเครื่องปฏิกรณ์ 25 เมตร ($\tau = 2.5$ นาที)	87.7
	- อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1	- ความยาวเครื่องปฏิกรณ์ 50 เมตร ($\tau = 5$ นาที)	90.7
	- ความยาวท่อบรรจุ 10 เมตร	- ความยาวเครื่องปฏิกรณ์ 75 เมตร ($\tau = 7.5$ นาที)	94.1
	- ความยาวท่อเปล่า 65 เมตร		
8	- อัตราการไหลรวม 120 ลิตรต่อชั่วโมง	- หลังท่อบรรจุ ($\tau = 1$ นาที)	82.3
	- อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส	- ความยาวเครื่องปฏิกรณ์ 25 เมตร ($\tau = 2.5$ นาที)	85.6
	- อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 4.5:1	- ความยาวเครื่องปฏิกรณ์ 50 เมตร ($\tau = 5$ นาที)	87.7
	- ความยาวท่อบรรจุ 10 เมตร	- ความยาวเครื่องปฏิกรณ์ 75 เมตร ($\tau = 7.5$ นาที)	90.4
	- ความยาวท่อเปล่า 65 เมตร		
9	- อัตราการไหลรวม 60 ลิตรต่อชั่วโมง	- หลังท่อบรรจุ ($\tau = 3$ นาที)	83.2
	- อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส	- ความยาวเครื่องปฏิกรณ์ 25 เมตร ($\tau = 5$ นาที)	87.1
	- อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1	- ความยาวเครื่องปฏิกรณ์ 50 เมตร ($\tau = 10$ นาที)	89.6
	- ความยาวท่อบรรจุ 15 เมตร	- ความยาวเครื่องปฏิกรณ์ 75 เมตร ($\tau = 15$ นาที)	93.5
	- ความยาวท่อเปล่า 60 เมตร		
10	- อัตราการไหลรวม 60 ลิตรต่อชั่วโมง	- หลังท่อบรรจุ ($\tau = 3$ นาที)	80.6
	- อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส	- ความยาวเครื่องปฏิกรณ์ 25 เมตร ($\tau = 5$ นาที)	84.5
	- อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 4.5:1	- ความยาวเครื่องปฏิกรณ์ 50 เมตร ($\tau = 10$ นาที)	86.3
	- ความยาวท่อบรรจุ 15 เมตร	- ความยาวเครื่องปฏิกรณ์ 75 เมตร ($\tau = 15$ นาที)	89.3
	- ความยาวท่อเปล่า 60 เมตร		
11	- อัตราการไหลรวม 120 ลิตรต่อชั่วโมง	- หลังท่อบรรจุ ($\tau = 1.5$ นาที)	90.4
	- อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส	- ความยาวเครื่องปฏิกรณ์ 25 เมตร ($\tau = 2.5$ นาที)	93.5
	- อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1	- ความยาวเครื่องปฏิกรณ์ 50 เมตร ($\tau = 5$ นาที)	95.5
	- ความยาวท่อบรรจุ 15 เมตร	- ความยาวเครื่องปฏิกรณ์ 75 เมตร ($\tau = 7.5$ นาที)	97.4
	- ความยาวท่อเปล่า 60 เมตร		
12	- อัตราการไหลรวม 120 ลิตรต่อชั่วโมง	- หลังท่อบรรจุ ($\tau = 1.5$ นาที)	84.0
	- อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส	- ความยาวเครื่องปฏิกรณ์ 25 เมตร ($\tau = 2.5$ นาที)	87.2
	- อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 4.5:1	- ความยาวเครื่องปฏิกรณ์ 50 เมตร ($\tau = 5$ นาที)	90.6
	- ความยาวท่อบรรจุ 15 เมตร	- ความยาวเครื่องปฏิกรณ์ 75 เมตร ($\tau = 7.5$ นาที)	93.6
	- ความยาวท่อเปล่า 60 เมตร		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 วิเคราะห์ผลของน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ผลิตได้

5.3.1 ผลของความยาวท่อบรรจุต่อปริมาณน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ผลิตได้

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ผลิตได้ที่สภาวะการทดลองต่างๆ กล่าวคือ อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของ โซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0.5 และอัตราการไหลรวม 30 ลิตร/ชั่วโมง ได้ผลแสดงดังรูปที่ 5.1 พบว่า



รูปที่ 5.1 : ผลของความยาวท่อที่มีผลต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์ ที่สเปซไทม์ต่างๆ โดยมีอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6:1 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0.5 อัตราการไหลรวม 30 ลิตร/ชั่วโมง

- กรณีที่ใช้ท่อบรรจุยาว 5 เมตร ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้ ณ ตำแหน่งของท่อเปล่าหลังท่อบรรจุ คือ ที่ความยาวท่อ 25 เมตร ($\tau=10$ นาที) 50 เมตร ($\tau=20$ นาที) และ 75 เมตร ($\tau=30$ นาที) จะมีปริมาณมากกว่าประมาณ 2 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีใช้ท่อบรรจุยาว 1 เมตร อันเป็นผลเนื่องมาจากสารตั้งต้นทั้งสองเมื่อไหลมารวมกันผ่านส่วนของท่อบรรจุจะเกิดการไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อบรรจุ ทำให้สารตั้งต้นทั้งสองสัมผัสกันได้ดีขึ้น ปฏิกริยาจึงเกิดได้ดีขึ้น ดังนั้นท่อบรรจุที่มีความยาวมากกว่า สารตั้งต้นจะผสมสัมผัสกันได้นานกว่า เกิดปฏิกิริยาได้มากกว่า ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้จึงมีปริมาณสูงกว่า

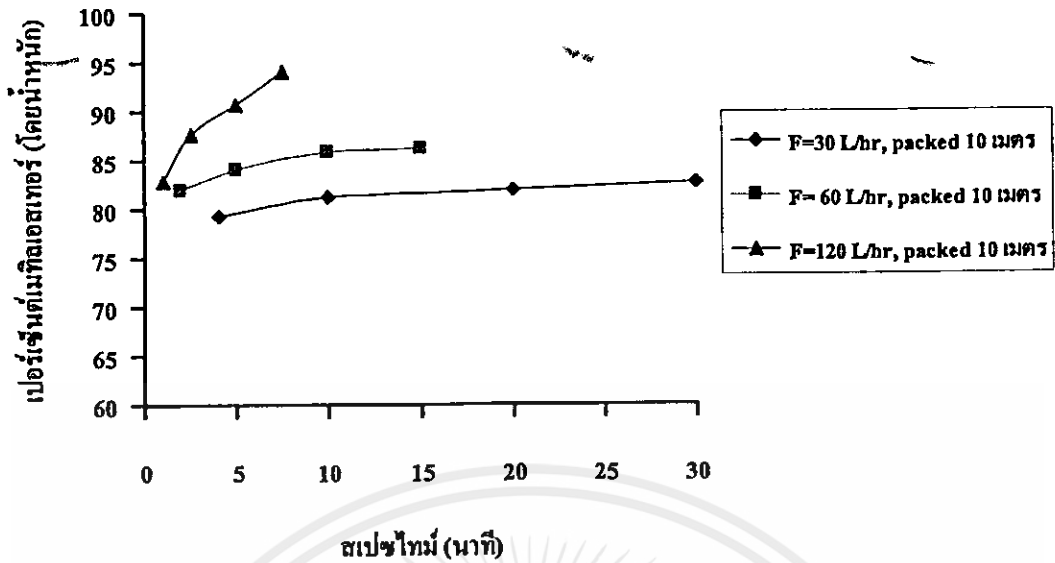
- เมื่อเปรียบเทียบปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้ในกรณีที่มีการเพิ่มเติมส่วนของท่อบรรจุยาว 5 เมตร เข้ามาที่ตำแหน่งความยาว 25 เมตรของเครื่องปฏิกรณ์ กับกรณีที่ไม่มีการบรรจุเพิ่มเติม พบว่า กรณีที่มีการบรรจุเพิ่มเติม ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้ ณ ตำแหน่งของท่อเปล่ามีปริมาณสูงกว่าเพียงเล็กน้อย อันเป็นผลเนื่องมาจากเมื่อสารตั้งต้นทั้งสองไหลผ่านส่วนของท่อบรรจุในช่วงแรก (ความยาวเครื่องปฏิกรณ์ 5 เมตรแรก) จะเกิดการสัมผัสผสมกัน และด้วยอัตราการไหลรวม 30 ลิตร/ชั่วโมง ของไหลที่ออกมาจากส่วนท่อบรรจุจะเกิดการแยกชั้นเป็นชั้นน้ำมันและกลีเซอริน ในส่วนของท่อเปล่า (ความยาวของเครื่องปฏิกรณ์ท่อเปล่าในส่วนนี้คือ 25 เมตร) ดังนั้นเมื่อไหลเข้าสู่ส่วนของท่อบรรจุเพิ่มเติม ของไหลที่มีความหนาแน่นต่างกันมากซึ่งแยกชั้นกันอยู่จะเกิดการผสมเพิ่มเติมเพียงเล็กน้อย ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จึงสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย

5.3.2 ผลของอัตราการไหลรวมต่อปริมาณน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ผลิตได้เมื่อใช้ท่อบรรจุยาว 10 เมตร

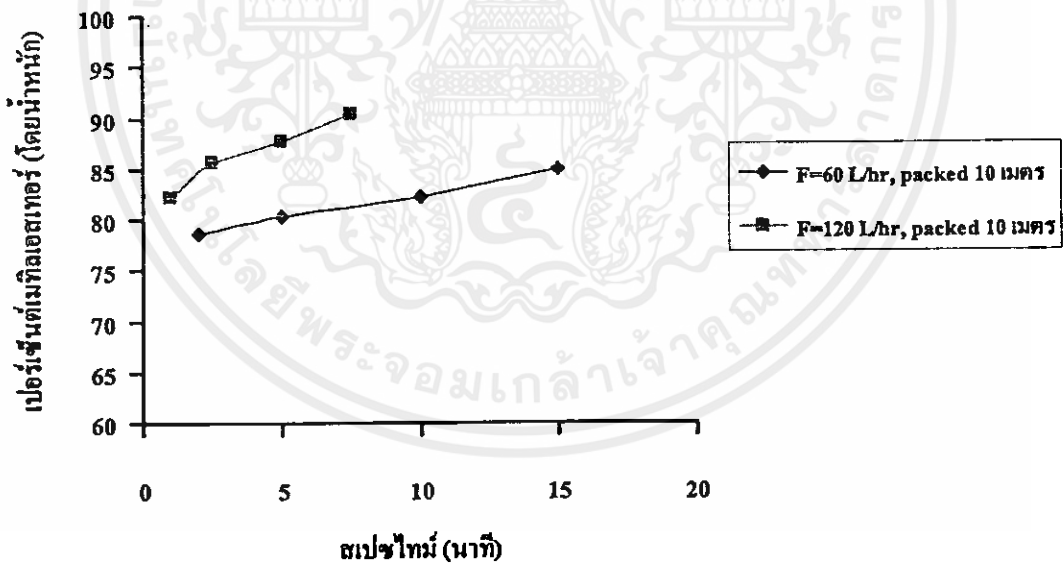
เมื่อเปรียบเทียบปริมาณน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ผลิตได้ ที่สภาวะการทดลอง ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0.5 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6:1 และ 4.5:1 ได้ผลแสดงดังรูปที่ 5.2 และ 5.3 ตามลำดับ

- เมื่อใช้ส่วนของท่อบรรจุยาว 10 เมตร โดยมีอัตราการไหลรวมต่างกัน ทั้งกรณีที่อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6:1 และ 4.5:1 พบว่า กรณีที่อัตราการไหลรวมสูงกว่า ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้จะสูงกว่าตามลำดับ อันเป็นผลเนื่องมาจากอัตราการไหลที่สูงช่วยให้สารตั้งต้นทั้งสองสัมผัสกันได้ดียิ่งขึ้นเมื่อไหลรวมกันในส่วนของท่อบรรจุ โดยเมื่ออัตราการไหลสูงขึ้น ของไหลจะเกิดการไหลแบบปั่นป่วนมากขึ้น ปฏิกิริยาจึงเกิดได้ดีขึ้นตามลำดับ ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้จึงสูงกว่าแม้ว่าช่วงเวลาที่ของไหลอยู่ในส่วนของท่อบรรจุจะสั้นกว่าก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอัตราการไหลที่ต่ำกว่า ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากของไหลเมื่อไหลผ่านส่วนของท่อเปล่าด้วยอัตราการไหลที่สูง ของไหลยังมีการสัมผัสกันอยู่โดยยังไม่มี การแยกชั้นระหว่างผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์และกลีเซอริน ปฏิกิริยาจึงยังเกิดอยู่ในระดับหนึ่ง ส่งผลให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้มีปริมาณสูงกว่ากรณีอัตราการไหลต่ำที่มีการแยกชั้นผลิตภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 : ผลของอัตราการไหลรวมต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้ที่สเปซไทม์ต่างๆ เมื่อมีอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6:1 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0.5 ความยาวท่อบรรจุเป็น 10 เมตร



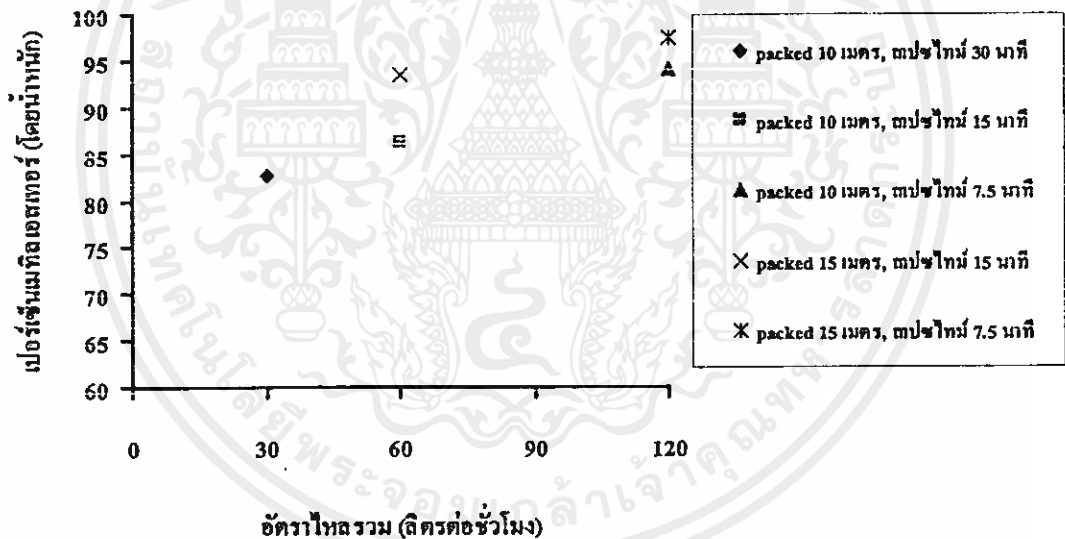
รูปที่ 5.3 : ผลของอัตราการไหลรวมต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้ที่สเปซไทม์ต่างๆ เมื่อมีอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 4.5:1 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0.5 ความยาวท่อบรรจุเป็น 10 เมตร

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.3 ผลของความยาวท่อบรรจุและอัตราการไหลรวมต่อปริมาณน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ผลิตได้

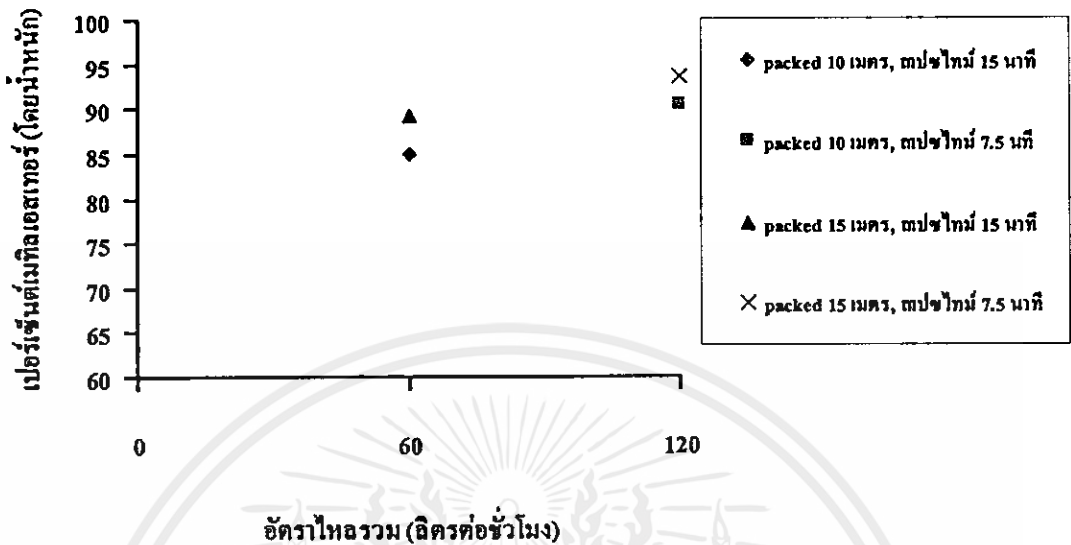
เมื่อเปรียบเทียบปริมาณน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ผลิตได้ ณ ตำแหน่งความยาวเครื่องปฏิกรณ์รวม 75 เมตร และใช้ความยาวท่อบรรจุ 10 และ 15 เมตร โดยมีอัตราการไหลรวมเป็น 30 60 และ 120 ลิตร/ชั่วโมง ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0.5 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6:1 และ 4.5:1 ได้ผลแสดงดังรูปที่ 5.4 และ 5.5 ตามลำดับ พบว่า

- ขนาดของความยาวท่อบรรจุ 15 เมตร จะช่วยให้การผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพได้ดีที่สุด โดยเมื่ออัตราการไหลรวมเป็น 120 ลิตร/ชั่วโมง จะให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่มากที่สุด
- เมื่ออัตราการไหลรวม 120 ลิตร/ชั่วโมง จะช่วยให้การผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพได้ดีที่สุด โดยเฉพาะเมื่อใช้ท่อบรรจุยาว 15 เมตร จะให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่มากที่สุด
- สำหรับการทดลองที่ความยาวท่อบรรจุและอัตราการไหลสูงกว่านี้ไม่ได้ดำเนินการ เพราะมีความดันตกภายในท่อ และอัตราการไหลสูงกว่าความสามารถของปั๊มจะทำงานได้



รูปที่ 5.4 : ผลของอัตราการไหลรวมต่อปริมาณเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้ ณ ความยาวเครื่องปฏิกรณ์ 75 เมตร ที่อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6:1 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 : ผลของอัตราการไหลรวมต่อปริมาณเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้ ณ ความยาวเครื่องปฏิกรณ์ 75 เมตร ที่อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 4.5:1 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0.5

5.3.4 ผลของอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันและอัตราการไหลรวมต่อปริมาณน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ผลิตได้

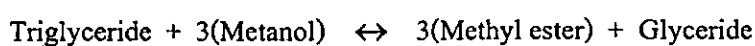
เมื่อเปรียบเทียบปริมาณน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ผลิตได้ ที่สภาวะการทดลอง ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0.5 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความยาวท่อบรรจุ 10 และ 15 เมตร ได้ผลแสดงดังรูปที่ 5.6 และ 5.7 ตามลำดับ พบว่า

- เมื่ออัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากัน แต่มีอัตราการไหลรวมต่างกัน พบว่าปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้จากกรณีอัตราการไหลรวมสูงกว่า จะมีปริมาณสูงกว่า เนื่องจากสารตั้งต้นทั้งสองสัมผัสกันได้ดีกว่า

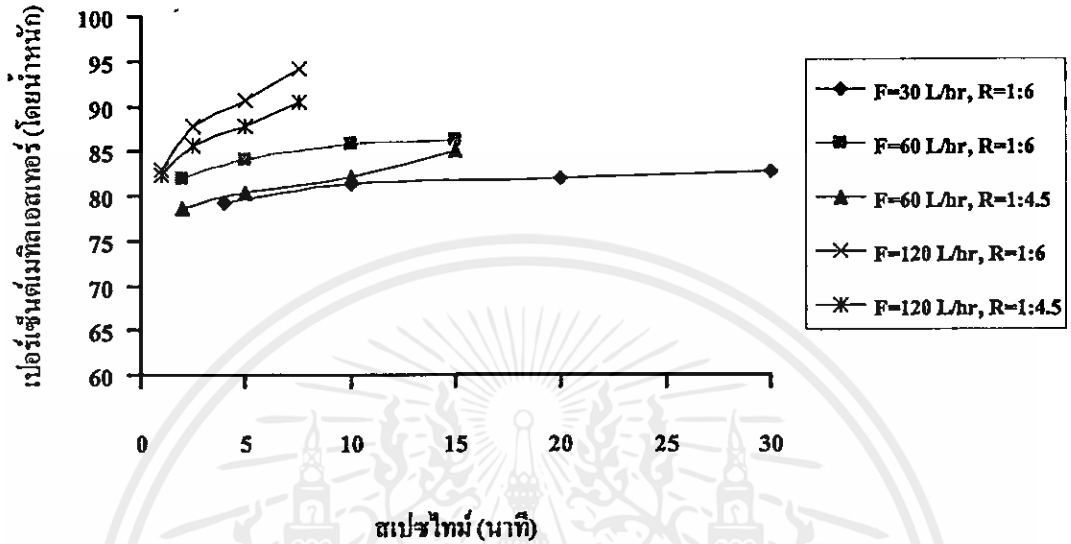
- เมื่ออัตราการไหลรวมเท่ากัน แต่อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันต่างกัน พบว่า ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้จากกรณีอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6:1 จะมากกว่า อันเป็นผลเนื่องมาจากปฏิกิริยาการเกิดเมทิลเอสเทอร์ ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยไตรกลีเซอไรด์ 1 โมล ทำปฏิกิริยากับเมทานอล 3 โมล ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเมทิลเอสเทอร์ 3 โมล และกลี

เออสารไตรกลีเซอไรด์ 1 โมล ดังสมการ

ต่าง/กรด



พบว่า อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันจากสมการเป็น 3:1 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ต่ำสุดที่ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ แต่ในความเป็นจริงปฏิกิริยาอาจจะเกิดไม่สมบูรณ์ เนื่องจากปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ ดังนั้นจึงมีการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 4.5:1 และ 6:1



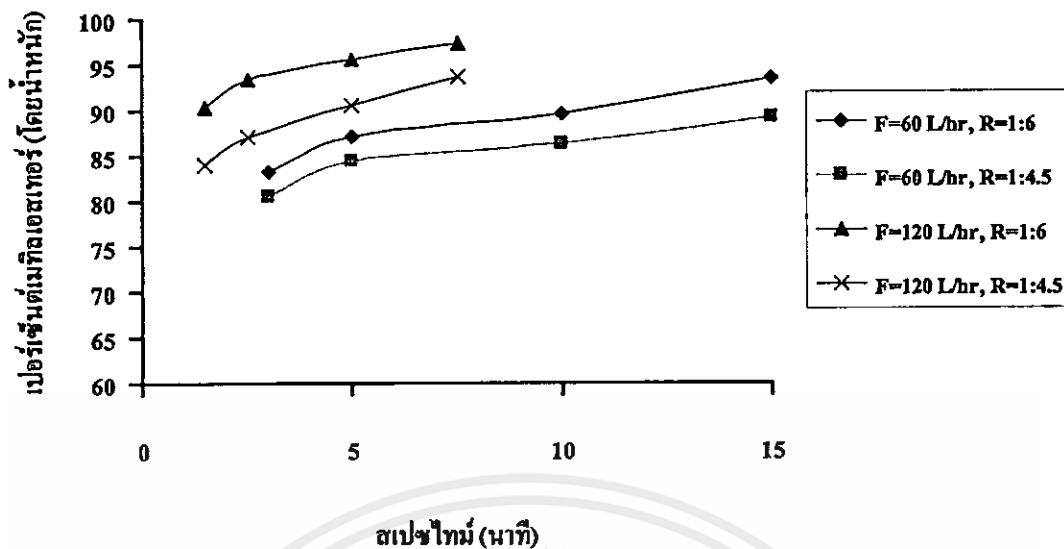
รูปที่ 5.6: ผลของอัตราส่วนต่อปริมาณเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้ ที่สเปซไทม์ต่างๆ ณ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ใช้ท่อบรรจุยาว 10 เมตร และความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0.5

5.3.5 ผลของสเปซไทม์ต่อปริมาณน้ำมันคีโตนชีวภาพที่ผลิตได้

สเปซไทม์เป็นช่วงเวลาที่ของไหลอยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งจากการเปรียบเทียบผลของสเปซไทม์ต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์ ดังแสดงดังรูปที่ 5.6 และ 5.7 พบว่า

- หลังจากของไหลไหลออกจากส่วนของท่อบรรจุผ่านเข้าสู่ส่วนของท่อเปล่า ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับช่วงส่วนของท่อบรรจุ อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาโดยส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นภายในส่วนของท่อบรรจุ ซึ่งเป็นส่วนที่ช่วยให้สารตั้งต้นทั้งสองสัมผัสกันได้ดี ส่วนของท่อเปล่า ปฏิกิริยาจะดำเนินต่อไปในระดับหนึ่ง เนื่องจากของไหลเริ่มแยกชั้นผลิตภัณฑ์ระหว่างเมทิลเอสเทอร์และกลีเซอริน ซึ่งพบว่าสเปซไทม์ที่เหมาะสมที่สุดคือ 7.5 นาที โดยใช้อัตราการไหลรวม 120 ลิตร/ชั่วโมง และความยาวท่อบรรจุ 15 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



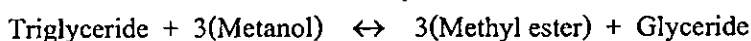
รูปที่ 5.7 : ผลของอัตราส่วนต่อปริมาณเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้ ที่สเปซไทม์ต่างๆ ณ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ใช้ท่อบรรจุยาว 15 เมตร และความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0.5

5.3.6 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ผลิตได้

จากงานวิจัยของคุณสุริยาพร มาลัย ซึ่งทำการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์ โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส ที่สภาวะการทดลองเดียวกัน ได้ผลแสดงดังรูป 5.8 และ 5.9 ตามลำดับ พบว่า

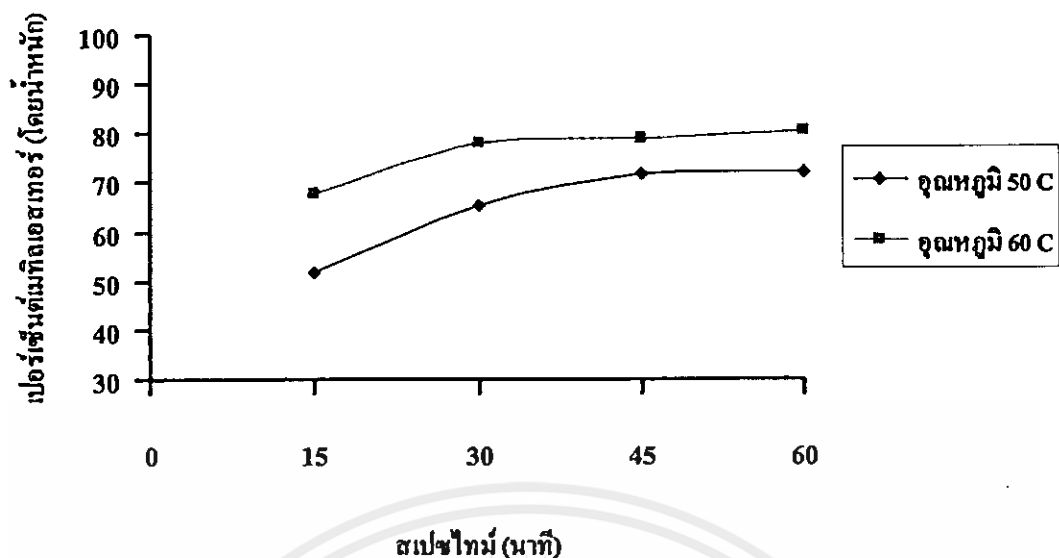
- ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีปริมาณสูงกว่าเมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นผลเนื่องมาจากผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากปฏิกิริยา

ค่าคงที่สมดุล

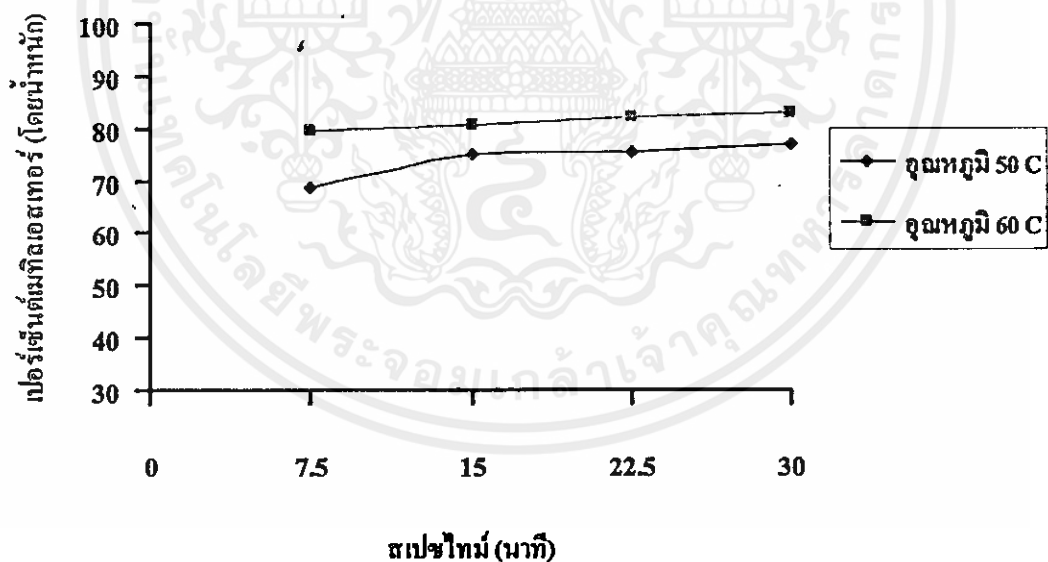


จากปฏิกิริยาดังกล่าว พบว่า อุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับอัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ ดังนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาจึงเกิดได้ดีกว่าตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 : ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้ ที่สเปซไทม์ต่างๆ โดยมีอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6:1 Superficial velocity 6.8 ลิตร/ชั่วโมง และความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0.5



รูปที่ 5.9 : ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้ ที่สเปซไทม์ต่างๆ โดยมีอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6:1 Superficial velocity 13.6 ลิตร/ชั่วโมง และความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0.5

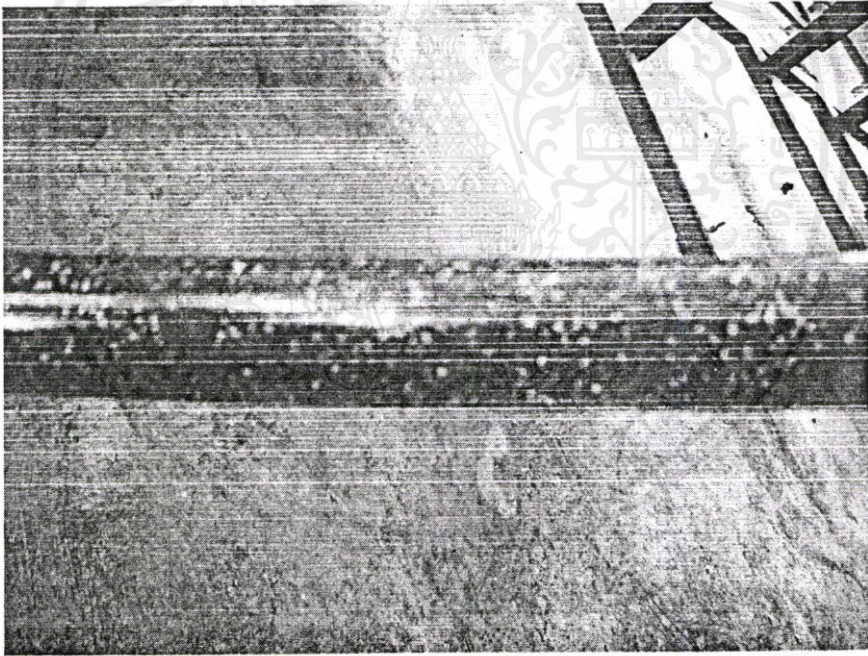
เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อาจรณิใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 วิจารณ์ผลการทดลอง

จากการเปรียบเทียบปริมาณน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ผลิตได้จากสภาวะการทดลองต่างๆ พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ คือ

- ท่อบรรจุ
- ความยาวของท่อบรรจุ
- อัตราการไหลรวมของสารตั้งต้น
- อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมัน
- สเตชไทม์
- อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา

(1) **ท่อบรรจุ** เป็นส่วนที่ทำให้สารตั้งต้นน้ำมันและสารละลายเมทานอลที่ไหลมารวมกัน เกิดการไหลแบบปั่นป่วนขึ้นภายในท่อบรรจุ ทำให้พื้นที่สัมผัสกันระหว่างสารตั้งต้นทั้งสองมีมากขึ้น ปฏิกิริยาจึงเกิดได้มากขึ้นตามลำดับ ดังแสดงดังรูปที่ 5.10



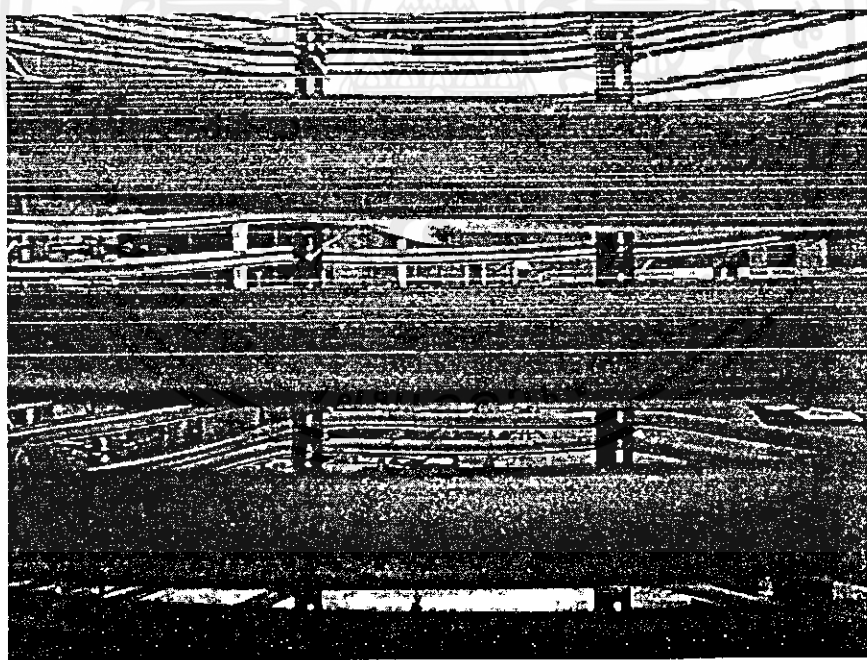
รูปที่ 5.10 : ส่วนของท่อบรรจุที่ช่วยให้สารตั้งต้นทั้งสองสัมผัสกัน

(2) **ความยาวของท่อบรรจุ** เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการสัมผัสกันของสารตั้งต้น โดยที่ความยาวของท่อบรรจุจะบอกถึงช่วงเวลา that สารตั้งต้นทั้งสองสัมผัสกัน ซึ่งพบว่า ท่อบรรจุที่มีความยาวมากกว่า ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้จะมีปริมาณสูงกว่ากรณีท่อบรรจุที่สั้น เนื่องจากสารตั้งต้นสัมผัสกันได้นานกว่า ปฏิกิริยาจึงเกิดได้ดีกว่า

(3) อัตราการไหลรวมของสารตั้งต้น เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการสัมผัสกันของสารตั้งต้นทั้งสอง โดยเมื่อของไหลไหลผ่านส่วนของท่อบรรจุ จะเกิดการไหลแบบปั่นป่วนเกิดขึ้น ซึ่งของไหลที่ไหลด้วยอัตราการไหลที่มาก การปั่นป่วนจะเกิดขึ้นมาก ทำให้การสัมผัสกันของสารตั้งต้นเพิ่มขึ้น ปฏิริยาจึงเกิดได้ดีขึ้น และเมื่อไหลผ่านมายังส่วนของท่อเปล่า อัตราการไหลที่สูงยังทำให้ของไหลยังคงสัมผัสกันอยู่ ไม่เกิดการแยกชั้นของผลิตภัณฑ์ในระยะเวลาอันสั้น ทำให้ปฏิริยายังดำเนินการอยู่

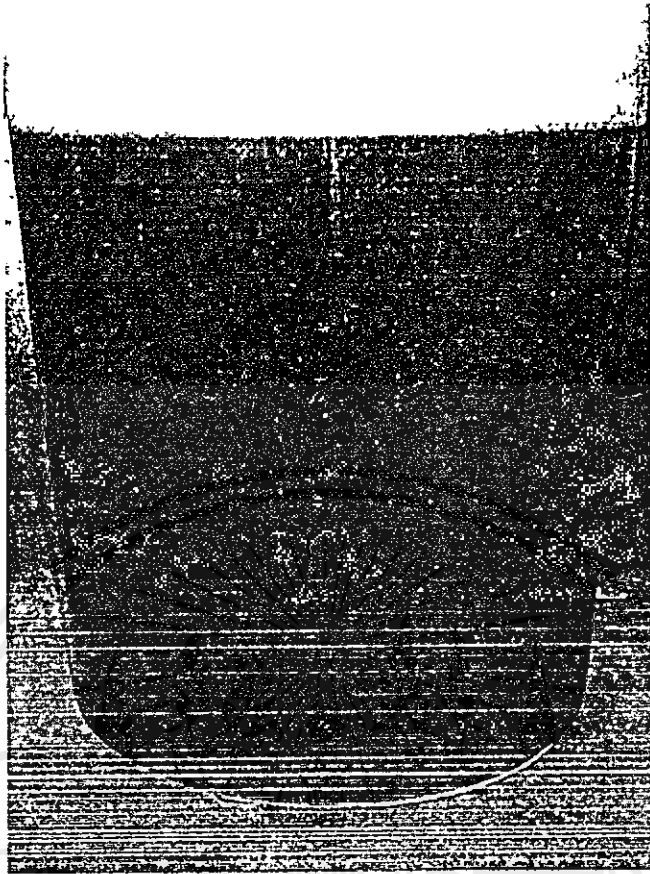
(4) อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมัน เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการทำปฏิริยาระหว่างสารตั้งต้นทั้งสอง โดยพบว่า ระบบที่มีการไหลแบบต่อเนื่อง อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันที่สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ได้สูงสุด คือ 6:1 เนื่องจากเมทานอลมีมากพอในการสัมผัสทำปฏิริยากับน้ำมัน

(5) สเปซไทม์ เป็นช่วงเวลาในการทำปฏิริยาของสารตั้งต้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้ปฏิริยาดำเนินได้สมบูรณ์ โดยเมื่อของไหลไหลผ่านท่อบรรจุ ปฏิริยายังดำเนินต่อไปในส่วนของท่อเปล่าทำให้ปฏิริยาเกิดได้สมบูรณ์ ดังแสดงดังรูปที่ 5.11 และ 5.12 โดยที่สเปซไทม์จะมีความสัมพันธ์กับอัตราการไหลและความยาวของเครื่องปฏิกรณ์



รูปที่ 5.11 : แสดงลักษณะของไหลเมื่อไหลผ่านส่วนของท่อเปล่า จะเห็นการแยกชั้นของกลีเซอรินออกจากชั้นน้ำมันดีเซลชีวภาพ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คิดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.12 : ผลลัพธ์ที่ได้จากการผลิต

(6) อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เป็นปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งอุณหภูมิจะมีความสัมพันธ์กับค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยา โดยที่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยา ก็จะเพิ่มขึ้นตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการทดลอง

การผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันของน้ำมันพืชที่ใช้แล้วและเมทานอล โดยมีโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อที่มีสารบรรจุอยู่บางส่วนที่มีปริมาตรรวม 14.8 ลิตร จากการทดลอง พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันของน้ำมันพืชที่ใช้แล้วและเมทานอลขึ้นอยู่กับความยาวของท่อบรรจุ อัตราการไหลรวมของสารตั้งต้น อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมัน และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เนื่องจากว่า สารตั้งต้นของปฏิกิริยานี้ไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ดีที่ผิวรอยต่อของวัฏภาคของเหลว ดังนั้นเมื่อของเหลวไหลผ่านเครื่องปฏิกรณ์ในส่วนของท่อบรรจุจะเกิดการกระจายตัว เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาเคมีของสารตั้งต้นทั้งสองชนิด และเมื่อผ่านมายังส่วนของท่อเปล่า พื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาเคมีจะลดลง เนื่องจากเกิดการแยกชั้นขึ้นระหว่างน้ำมันดีเซลชีวภาพและกลีเซอริน ดังนั้นปัจจัยที่มีส่วนสำคัญที่สุด คือ พื้นที่ผิวรอยต่อระหว่างสองวัฏภาคซึ่งมีจำนวนมากในส่วนของท่อบรรจุภายในเครื่องปฏิกรณ์

จากการทดลองด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อที่มีสารบรรจุอยู่บางส่วน ความยาวรวม 75 เมตร โดยมีส่วนของท่อบรรจุยาว 15 เมตร และท่อเปล่ายาว 60 เมตร พบว่า จะได้ปริมาณน้ำมันดีเซลชีวภาพในผลิตภัณฑ์สูงถึง 97.4% โดยน้ำหนัก เมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันพืชที่ใช้แล้วเป็น 6:1 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 และอัตราการไหลรวม 120 ลิตร/ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ป๊าว อุ๋นใจ และ สยาม กพลีชัย. 2544. "ไบโอดีเซล เชื้อเพลิงชีวภาพแห่งยุคสมัย". *Update*. สิงหาคม 2544. 16(168) : 50-56.
- [2] ศิริวรรณ นूरี่คำ. 2546. "ไบโอดีเซล ทางเลือกใหม่ทดแทนพลังงานเชื้อเพลิง." [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก http://clgc.rdi.ku.ac.th/newsletter/news16_1/biodiesel.html
- [3] อ่ำพล ชื้อตรง, สายันต์ ศรีวิเชียร. **เชื้อเพลิงและวัสดุหล่อลื่น**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ศูนย์ส่งเสริมวิชาการ. 2538.
- [4] ประเสริฐ เทียนนิมิตร, ขวัญชัย สันทิพย์สมบูรณ์, ปานเพชร ชินินทร. **เชื้อเพลิงและสารหล่อลื่น**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดยูเคชั่น. 2545.
- [5] คณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ. **"ไบโอดีเซล : พลังงานอนาคตของชาติ."** [Online]. Available : <http://www.eppo.go.th/nepc/doc-NEPC-2544-03.html> . 2544.
- [6] Korbitz, W. "Biodiesel Production in Europe and North America, an Encouraging Prospect.", **Renewable Energy**, 1999, vol.16, pp. 1078-1083
- [7] Shay E.G. "Diesel fuel from vegetable oils: status and opportunities." **Biomass and Bioenergy**. vol. 4, 1993. pp. 227-242
- [8] Fangrui, M. and Milford, A.H. "Biodiesel production : a review.", **Bioresourcetechnology**, vol. 70, 1999. pp.1-15.
- [9] Connemann, J. and Fischer, J. "Biodiesel in Europe 1998", **International Liquid Biofuels Congress**, Parana, Brazil, 1998.
- [10] Connemann, J. and Fisher, J. "Biodiesel Quality Y2K+ Market Experiences with FAME.", **CEN/TC 19 Automotive Fuel Millennium Symposium 25 and 26 November 1999**.
- [11] Krisnangkura, K. and Simamahamnop, R. "Continuous Transmethylation of Palm Oil in an Organic Solvent.", **JAOCS**, vol. 69, no.2,. 1992. pp.166-169.
- [12] Yomi, W., Shimada, Y., Sugihara, A. and Noda, H. "Continuous Production of Biodiesel Fuel from Vegetable Oil Using Immobilized Candida Antarctica Lipase.", **JAOCS**, vol.77, no.4, 2000. pp. 355-360.
- [13] Damoko, D. and Cheryan, M. "Continuous Production of Palm Methyl Esters.", **JAOCS**, vol.77, no. 12, 2000. pp. 1269-1272.
- [14] Nouredini, H., Harkey, D. and Medikonduru, V. "A Continuous Process for the Conversion of Vegetable Oils into Methyl Esters of Fatty Acids.", **JAOCS**,

vol.75, no.12, 1998, pp. 1775-1783.

- [15] Pacific Biodiesel, Inc. 2546. "Biodiesel Fuel." [Online]. Available :
http://biodiesel.com/biodiesel_fuel.htm#FUEL
- [16] Meher L.C., Vidya Sagar D., Naik S.N. "Technical aspect of biodiesel production by transesterification – a review." **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, 2004 pp. 1-21.
- [17] Fogler, H.S. **Elements of Chemical Reaction Engineering**. 3rd ed. United States of America : Prentice-Hall, Inc. 1999. pp. 189, 811-820, 825-826, 829-831.
- [18] วิโรจน์ บุญอำนวยวิทยา. **จลนพลศาสตร์และการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เคมี**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). 2544. หน้า 236-239.
- [19] Noritake. 2546. "Static Mixer." [Online]. Available :
<http://www.noritake.co.jp/eng/eeg/kakouki/feature.html>
- [20] Kenics. 2546. "Static Mixer." [Online]. Available :
<http://www.kenics.com/km.php>
- [21] จุฑารัตน์ อินทร์นา และประกอบ กิจไชยา. "การขยายสเกลการสังเคราะห์น้ำมันดีเซลชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การคำนวณ

ก-1 การคำนวณเพื่อออกแบบกระบวนการผลิต

ในการขยายขนาดกระบวนการผลิตมีสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณา คือ ค่าเรย์โนลด์ ซึ่งการศึกษาในครั้งนี้อ้างอิงข้อมูลมาจากการศึกษาผลงานวิจัยเรื่อง การผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ ของเบญจพร เมืองสมบัติ และคณะ ได้ข้อมูลดังนี้

ปริมาตรระบบ	1,030	มิลลิลิตร
อัตราการไหลของของผสม	4,140	มิลลิลิตร/ชั่วโมง
ความเร็วเชิงเส้นของของผสม	32,945	เซนติเมตร/ชั่วโมง
เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ	0.4	เซนติเมตร
สเปซไทม์	15	นาที

ก-1.1 หาอัตราการไหลของของผสม

เมื่อกำหนดให้ค่าเรย์โนลด์เท่ากัน แต่ใช้ท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด $5/8$ นิ้ว จะสามารถหาอัตราการไหลของของผสมได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง} &= \frac{5}{8} \times 2.54 \\ &= 1.5875 \text{ เซนติเมตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ความเร็วเชิงเส้นของของผสม} &= \frac{0.4}{1.5875} \times 32,945 \\ &= 8,301 \text{ เซนติเมตร/ชั่วโมง} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{อัตราการไหลของของผสม} &= 8,301 \times \frac{\pi}{4} \times (1.5875)^2 \\ &= 16,430 \text{ มิลลิลิตร/ชั่วโมง} \end{aligned}$$

แต่สำหรับการทดลองจริง จะใช้อัตราการไหลของของผสมต่ำสุดเป็น 30 ลิตร/ชั่วโมง เนื่องจากอัตราการไหลที่ได้จากการคำนวณมีค่าน้อยเกินไป จนไม่สามารถทำให้สารตั้งต้นทั้งสองผสมกันได้

ดังนั้น ออกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$\begin{aligned} \text{ความเร็วเชิงเส้นที่ใช้จริง} &= (30,000 \times 4) / (\pi \times 1.5875^2) \\ &= 15,156 \text{ เซนติเมตร/ชั่วโมง} \end{aligned}$$

เมื่อกำหนดให้สเปซไทม์ที่ใช้ในการทดลองมีค่ามากที่สุด คือ 30 นาที

$$\begin{aligned} \text{ความยาวของสายยางที่ใช้} &= \frac{1}{2} \times 15,156 \\ &= 7,578 \text{ เซนติเมตร} \\ &= \approx 75 \text{ เมตร} \end{aligned}$$

ก-1.2 หาอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันและแอลกอฮอล์

ความหนาแน่นของน้ำมัน	0.88 กรัม/มิลลิลิตร
ความหนาแน่นของเมทานอล	0.79 กรัม/มิลลิลิตร
น้ำหนักโมเลกุลของน้ำมัน	840.5
น้ำหนักโมเลกุลของเมทานอล	32.04

- กรณีอัตราส่วน โดย โมลเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6:1

$$\begin{aligned} \text{น้ำมัน 1 โมล มีปริมาตร} &= \frac{840.5}{0.88} \\ &= 955 \text{ มิลลิลิตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{เมทานอล 6 โมล มีปริมาตร} &= \frac{32.04}{0.79} \times 6 \\ &= 243 \text{ มิลลิลิตร} \end{aligned}$$

ดังนั้นอัตราส่วนน้ำมันต่อเมทานอล $\approx 4:1$ โดยปริมาตร

- กรณีอัตราส่วน โดย โมลเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 4.5:1

$$\begin{aligned} \text{น้ำมัน 1 โมล มีปริมาตร} &= \frac{840.5}{0.88} \\ &= 955 \text{ มิลลิลิตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{เมทานอล 4.5 โมล มีปริมาตร} &= \frac{32.04}{0.79} \times 4.5 \\ &= 183 \text{ มิลลิลิตร} \end{aligned}$$

ดังนั้นอัตราส่วนน้ำมันต่อเมทานอล $\approx 5:1$ โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปอัตราการไหลของน้ำมันและแอลกอฮอล์แต่ละสภาวะการทดลอง

อัตราการไหลรวม (L/hr)	อัตราส่วนโดยโมล น้ำมันต่อเมทานอล	อัตราการไหล ของน้ำมัน(L/hr)	อัตราการไหล ของเมทานอล(L/hr)
30	1:6	24	6
60	1:6	48	12
	1:4.5	50	10
120	1:6	96	24
	1:4.5	100	20

ก-2 หาขนาดเครื่องทำความร้อน

อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในการทดลอง คือ 60 องศาเซลเซียส

$$\text{อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำมัน} = 24,000 \times 0.88$$

$$= 21,120 \text{ กรัม/ชั่วโมง}$$

$$\text{อัตราการไหลเชิงมวลของเมทานอล} = 6,000 \times 0.79$$

$$= 4,740 \text{ กรัม/ชั่วโมง}$$

$$\text{ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมัน} \quad 2.1 \quad \text{จูล/กรัม*องศาเซลเซียส}$$

$$\text{ความจุความร้อนจำเพาะของเมทานอล} \quad 2.51 \quad \text{จูล/กรัม*องศาเซลเซียส}$$

$$\text{ความร้อนที่ต้องการสำหรับน้ำมัน} = 21,120 \times 2.1 \times (60 - 30)$$

$$= 1,330 \text{ วัตต์}$$

$$\text{ความร้อนที่ต้องการสำหรับเมทานอล} = 4,740 \times 2.51 \times (60 - 30)$$

$$= 357 \text{ วัตต์}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปขนาดเครื่องทำความร้อนแต่ละสภาวะการทดลอง

อัตราการไหลรวม (L/hr)	อัตราส่วนโดยโมลน้ำมันต่อเมทานอล	อัตราการไหลของน้ำมัน (L/hr)	ขนาดเครื่องทำความร้อนของน้ำมัน(วัตต์)	อัตราการไหลของเมทานอล (L/hr)	ขนาดเครื่องทำความร้อนของเมทานอล(วัตต์)
30	1:6	24	1,330	6	357
60	1:6	48	2,661	12	714
	1:4.5	50	2,772	10	595
120	1:6	96	5,322	24	1,428
	1:4.5	100	5,544	20	1,190

ก-3 การคำนวณเพื่อเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ตัวเร่งปฏิกิริยาเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมัน

- กรณีอัตราส่วนโดยโมลน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:6

เมื่อใช้เมทานอล 1 ลิตร

$$\text{ใช้น้ำมัน 4 ลิตรหนัก} = 0.88 \times 4,000 = 3,520 \text{ กรัม}$$

$$\text{มีด่าง} = \frac{0.5}{100} \times 3,520 = 17.6 \text{ กรัม}$$

ดังนั้นต้องเตรียมด่าง 17.6 กรัม ต่อ เมทานอล 1 ลิตร

- กรณีอัตราส่วนโดยโมลน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:4.5

เมื่อใช้เมทานอล 1 ลิตร

$$\text{ใช้น้ำมัน 5 ลิตรหนัก} = 0.88 \times 5,000 = 4,400 \text{ กรัม}$$

$$\text{มีด่าง} = \frac{0.5}{100} \times 4,400 = 22 \text{ กรัม}$$

ดังนั้นต้องเตรียมด่าง 22 กรัม ต่อ เมทานอล 1 ลิตร

ก-4 การคำนวณเพื่อเตรียมสารละลายกรดเพื่อใช้หยุดปฏิกิริยา

เมื่อเก็บตัวอย่างครั้งละ 20 มิลลิลิตร และใช้กรดเพื่อหยุดปฏิกิริยาเข้มข้นเป็น 3 เท่าของด่างที่มี

ในตัวอย่าง

$$\text{น้ำหนักโมเลกุลของโซเดียมไฮดรอกไซด์} \quad 40.000$$

$$\text{น้ำหนักโมเลกุลของกรดฟอสฟอริก} \quad 98.974$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กรณีอัตราส่วน โดยโบลน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:6

$$\begin{aligned} \text{เมทานอล 1 ลิตร มีค่า} &= \frac{17.6}{40} = 0.44 \text{ โบล} \\ \text{ตัวอย่าง 20 มิลลิลิตร มีเมทานอล} &= 20 \times \frac{1}{5} = 4 \text{ มิลลิลิตร} \\ \text{เมทานอล 4 มิลลิลิตร มีค่า} &= \frac{0.44}{1,000} \times 4 = 0.00176 \text{ โบล} \\ \text{ต้องการไอออนบวกเพื่อสะเทินค่า} &= 0.00176 \times 3 = 0.00528 \text{ โบล} \\ \text{ต้องใช้กรดฟอสฟอริก} &= \frac{0.00528}{3} = 0.00176 \text{ โบล} \\ \text{คิดเป็นกรดฟอสฟอริกเข้มข้น} &= 0.00176 \times \frac{100}{20} \\ &= 0.088 \text{ โบล/ลิตร} \\ &= 0.088 \times 98.974 \\ &= 8.710 \text{ กรัม/ลิตร} \\ \text{ดังนั้นต้องใช้กรดฟอสฟอริกเข้มข้นร้อยละ 85} &= 8.710 \times \frac{100}{85} = 10.25 \text{ กรัม/ลิตร} \end{aligned}$$

- กรณีอัตราส่วน โดยโบลน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:4.5

$$\text{ดังนั้นต้องใช้กรดฟอสฟอริกเข้มข้นร้อยละ 85} = 9.056 \times \frac{100}{85} = 10.65 \text{ กรัม/ลิตร}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

การหาปริมาณกรดไขมันอิสระ

การวิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว ด้วยวิธีมาตรฐาน A.O.C.S Official Method Ca 5a-40 มีรายละเอียดดังนี้

ข-1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้

1. ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเอทานอล เข้มข้น 0.1 นอร์มอล
3. สารละลายฟีนอล์ฟทาลิน เข้มข้น 1% ในเอทานอล
4. เอทานอลที่เป็นกลาง เตรียมโดยการสะเทินด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ใช้ฟีนอล์ฟทาลินเป็นอินดิเคเตอร์ จนได้สารละลายสีชมพู

ข-2 วิธีการทดลอง

1. นำเอทานอลที่ทำให้เป็นกลางแล้วมา 50 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่มีน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว 28.2 กรัม พร้อมกับใส่สารละลายฟีนอล์ฟทาลินจำนวน 2 มิลลิลิตร
2. ทำการไตเตรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 นอร์มอล เขย่าจนได้สารละลายสีชมพู
3. บันทึกปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไตเตรต

ข-3 การคำนวณ

1. ความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเอทานอล โดยการทำไตเตรตด้วยสารมาตรฐานปฐมภูมิโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต (KHP)
น้ำหนักสาร KHP 2.4017 กรัม ในสารละลาย 100 มิลลิลิตร
น้ำหนัก NaOH 1.0995 กรัม ในสารละลาย 100 มิลลิลิตร

- ทำการไตเตรตสารละลายมาตรฐานปฐมภูมิโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต 25 มิลลิลิตร ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้ฟีนอล์ฟทาลินเป็นอินดิเคเตอร์ ทำซ้ำ 3 ครั้ง ได้ค่าเฉลี่ย

ของปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เท่ากับ 28.08 มิลลิลิตรให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณค่า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หาคความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังนี้

$$\text{Mol NaOH} = \text{Mol KHP}$$

$$M_1V_1 = M_2V_2$$

$$M_1(28.08) = (0.1176)(25)$$

ดังนั้นความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ คือ $M_1 = 0.1047$ นอร์มอล

2. การคำนวณหาปริมาณของกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว ดังสมการ

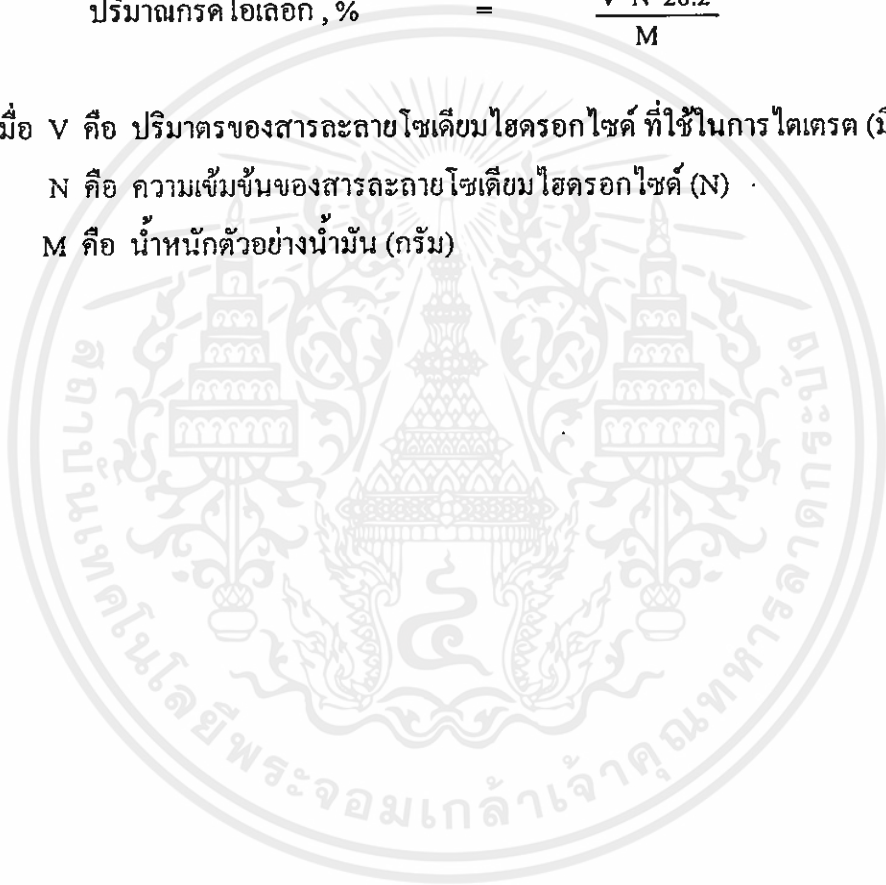
$$\text{ปริมาณกรดปาล์มมิก, \%} = \frac{V \cdot N \cdot 25.6}{M}$$

$$\text{ปริมาณกรดโอเลอิก, \%} = \frac{V \cdot N \cdot 28.2}{M}$$

เมื่อ V คือ ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ใช้ในการไตเตรต (มิลลิลิตร)

N คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (N)

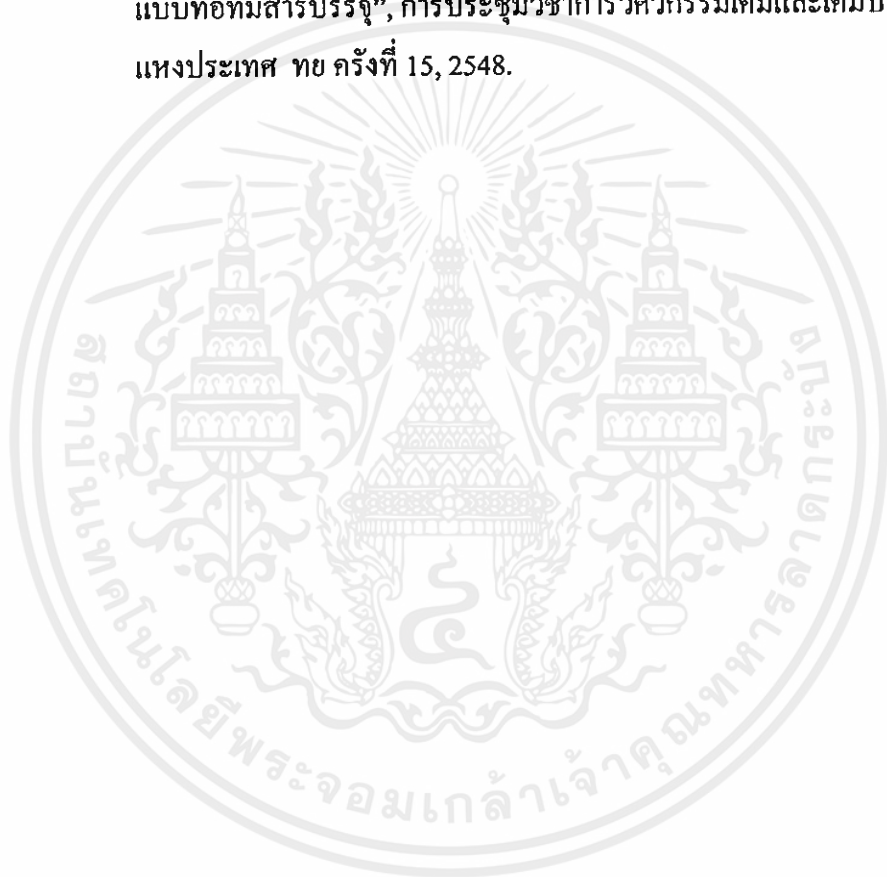
M คือ น้ำหนักตัวอย่างน้ำมัน (กรัม)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นายศัลยเวช เกตุแก้ว
วันเดือนปีเกิด	วันที่ 25 พฤษภาคม 2524 ที่จังหวัดนครศรีธรรมราช
วุฒิการศึกษา	ระดับปริญญาตรี 2546 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สาขาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
ผลงานทางวิชาการ	1) “การผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพจากน้ำมันพืชที่ ฆ่าแล้ว นเครื่องปฏิกิริยาแบบทอที่มีสารบรรจุ”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ทอ ครั้งที่ 15, 2548.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้