



การผลิตเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์แบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์
ด้วยท่อผสมแบบสถิต

**Continuous Methyl Ester and Ethyl Ester Production from Refined Palm Oil
Using Static Mixer**

กิจภูมิ วิจิตรโสภา

Kichaphum Wijitsopa

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Mechanical Engineering
Prince of Songkla University**

2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การผลิตเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์แบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์
ด้วยท่อผสมแบบสถิต

**Continuous Methyl Ester and Ethyl Ester Production from Refined Palm Oil
Using Static Mixer**

กิจภูมิ วิจิตรโสภา

Kichaphum Wijitsopa

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Mechanical Engineering
Prince of Songkla University**

2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์	การผลิตเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์แบบต่อเนื่องจากน้ำมัน ปาล์มบริสุทธิ์ด้วยท่อผสมแบบสถิต
ผู้เขียน	นายกิจภูมิ วิจิตรโสภา
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
คณะกรรมการสอบ

.....
(รองศาสตราจารย์กำพล ประทีปชัยกูร)

.....ประธานกรรมการ
(ดร.ฐานันดรศักดิ์ เทพญา)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีระยุทธ หลีวิจิตร)

.....
(ดร.กฤษ สมนึก)

.....กรรมการ
(ดร.บุญรอด ลัจจกุลนุกิจ)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์กำพล ประทีปชัยกูร)

.....กรรมการ
(ดร.กฤษ สมนึก)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา
วิศวกรรมเครื่องกล

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(รองศาสตราจารย์กำพล ประทีปชัยกุล)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นายกิจภูมิ วิจิตรโสภา)

นักศึกษา

(4)

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายกิจภูมิ วิจิตรโสภา)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การผลิตเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์แบบต่อเนื่องจากน้ำมัน ปาล์มบริสุทธิ์ด้วยท่อผสมแบบสถิต
ผู้เขียน	นายกิจภูมิ วิจิตรโสภา
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา	2558

บทคัดย่อ

การศึกษาการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่มีค่ากรดไขมันอิสระต่ำด้วยท่อผสมแบบสถิต งานวิจัยนี้เลือกใช้เมทิลแอลกอฮอล์และเอทิลแอลกอฮอล์ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยท่อผสมแบบสถิตความยาว 10 เมตร ทำหน้าที่ผสมและเร่งการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design (CCD) และใช้วิธี Response Surface Methodology (RSM) เพื่อทำการวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยท่อผสมแบบสถิต ที่อัตราการไหลของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 20 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่า ภายใต้เงื่อนไข เมทานอล 23% โดยปริมาตร ผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 11.5 g/L of oil ที่อุณหภูมิ 60°C อุณหภูมิของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 60°C และใช้ท่อผสมสถิตความยาว 1 เมตร สามารถผลิตไบโอดีเซลได้เปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ 96.7% โดยน้ำหนัก และภายใต้เงื่อนไข เอทานอล 47% โดยปริมาตร ผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 14.4 g/L of oil ที่อุณหภูมิ 75°C อุณหภูมิของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 75°C และใช้ท่อผสมสถิตความยาว 1 เมตร สามารถผลิตไบโอดีเซลได้เปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ 98.11% โดยน้ำหนัก

เปอร์เซ็นต์ผลได้จากการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ด้วยท่อผสมสถิต ปริมาณกลีเซอรอลที่แยกขึ้นจากกระบวนการผลิตที่ใช้เมทานอลจะมากกว่าเอทานอล 2 เท่า เมื่อผ่านการล้างแล้วเปอร์เซ็นต์ผลได้ของไบโอดีเซลกรณีใช้เมทานอลจะได้ 83% โดยปริมาตร ซึ่งได้มากกว่ากรณีใช้เอทานอล คือ 64% โดยปริมาตร

Thesis Title	Continuous Methyl Ester and Ethyl Ester Production from Refined Palm Oil Using Static Mixer
Author	Mr. Kichaphum Wijitsopa
Major Program	Mechanical Engineering
Academic Year	2015

ABSTRACT

The continuous methyl ester and ethyl ester production from refined palm oil using static mixer are studied. In this study, methyl alcohol and ethyl alcohol are chosen to be used. Ten meters in length of static mixer are used to mix the mixture of oil and alcohol. Central composite design (CCD) and Response surface methodology (RSM) are used to analyse the optimal condition of biodiesel production. With the flow rate of 20 L/h RPO, 23 vol.% methanol, 11.5 gKOH/L at 60°C and 60°C of oil temperature, 96.7 wt.% conversion is achieved within 1 meter length of static mixer and with the flow rate of 20 L/h RPO, 47 vol.% ethanol, 14.4 gKOH/L at 75°C and 75°C of oil temperature, 98.11 wt.% conversion is achieved within 1 meter length of static mixer.

The separating glycerol from the production using methanol is 2 times greater than using ethanol. Since there are some glycerol in biodiesel phase in crude ethyl ester. After washing 83 vol.% methyl ester is achieved while 64 vol.% ethyl ester is achieved.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.กำพล ประทีปชัยกูร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก, ดร. กฤษ สมนึก อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม และ ดร.ฐานันดรศักดิ์ เทพญา ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะในการทำวิทยานิพนธ์ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ คุณนิยม พรหมรัตน์ และครูปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ทุกๆท่านที่ได้ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์และความช่วยเหลือในการจัดหาและสร้างอุปกรณ์การทดลอง

ขอขอบคุณ สำนักวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนทุนของโครงการมหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ สำนักวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนทุนการศึกษาประเภททุนงบประมาณแผ่นดินในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนเงินอุดหนุนในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่อำนวยความสะดวกด้านเครื่องมือและสถานที่ในการทำวิจัย

กิจภูมิ วิจิตรโสภา

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(12)
รายการภาพประกอบ	(14)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(16)
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 บทนำตั้งเรื่อง	1
1.2 การตรวจเอกสาร	3
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	9
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	9
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย	9
2 ทฤษฎี	11
2.1 ปาล์มน้ำมัน	11
2.2 การผลิตน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์	12
2.3 แอลกอฮอล์	13
2.3.1 เอทิลแอลกอฮอล์	13
2.3.2 เมทิลแอลกอฮอล์	15
2.3.3 คุณสมบัติทางกายภาพของเอทิลแอลกอฮอล์และเมทิลแอลกอฮอล์	16
2.4 กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน	17
2.5 ตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน	17
2.5.1 อัตราส่วนระหว่างแอลกอฮอล์กับน้ำมัน	17
2.5.2 ชนิดและความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา	18
2.5.3 เวลาและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา	18

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.4 เวลาในการทำปฏิกิริยา	18
2.6 ประเภทของเครื่องปฏิกรณ์	19
2.6.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ	19
2.6.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบถ่วงต่อเนื่อง	19
2.6.3 เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง	19
2.7 ข้อดีและข้อด้อยระหว่างการใช้ใบกวนกับการใช้ท่อผสมสติด	20
3 การออกแบบท่อผสมสติดแบบต่อเนื่องของกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน	21
3.1 ถังปฏิกรณ์	22
3.2 ผลการออกแบบท่อผสมแบบสติดในระดับห้องปฏิบัติการ	23
3.3 ผลการออกแบบท่อผสมแบบสติดสำหรับการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ด้วยท่อผสมแบบสติด	24
4 อุปกรณ์และการดำเนินการวิจัย	26
4.1 อุปกรณ์การทดลองการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ด้วยท่อผสมแบบสติด	28
4.2 วัตถุประสงค์และสารเคมี	28
4.3 การวางแผนการทดลอง	28
4.4 ขั้นตอนการทดลอง	31
4.4.1 การทดลองกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันแบบต่อเนื่องด้วยเอทานอล	31
4.4.2 การทดลองกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันแบบต่อเนื่องด้วยเมทานอล	31
4.5 การวิเคราะห์ตัวอย่าง	32
4.6 การหารูปแบบสมการทนายความสัมพันธ์และสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันแบบต่อเนื่อง	33

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5 ผลการทดลองและการอภิปรายผล	35
5.1 ผลการศึกษาหารูปแบบสมการทำนายความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์ ความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยท่อผสมแบบสถิต	35
5.1.1 ผลการศึกษาหารูปแบบสมการทำนายความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์ ความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยท่อผสมแบบสถิต โดย ใช้เมทานอลอุณหภูมิ 30°C	35
5.1.2 ผลการศึกษาหารูปแบบสมการทำนายความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์ ความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยท่อผสมแบบสถิต โดย ใช้เมทานอลอุณหภูมิ 60°C	40
5.1.3 ผลการศึกษาหารูปแบบสมการทำนายความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์ ความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยท่อผสมแบบสถิต โดย ใช้เอทานอลอุณหภูมิ 30°C	44
5.1.4 ผลการศึกษาหารูปแบบสมการทำนายความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์ ความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยท่อผสมแบบสถิต โดย ใช้เอทานอลอุณหภูมิ 75°C	49
5.2 สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์ม บริสุทธิ์ด้วยท่อผสมสถิต	56
5.3 เปอร์เซ็นต์ผลได้จากการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ ด้วยท่อผสมสถิต	57
5.4 คุณสมบัติของไบโอดีเซลจากกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องด้วยท่อผสมสถิต	60
6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	62
6.1 สรุปผลการทดลอง	62
6.2 ข้อเสนอแนะ	63

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม	64
ภาคผนวก	67
ก ตัวอย่างการคำนวณ	68
ข แบบของชุดทดลอง	75
ค ขั้นตอนการออกแบบแผนการทดลอง	86
ง ข้อมูลจากผลการทดลอง	89
จ ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่วิทยานิพนธ์	120
ฉ ผลการทดสอบ	132
ประวัติผู้เขียน	139

รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	สรุปสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลด้วยเอทานอลของงานวิจัยต่างๆ	5
2.1	แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของเอธิลแอลกอฮอล์และเมทิลแอลกอฮอล์	16
2.2	แสดงการจำแนกและลักษณะการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์	20
2.3	แสดงข้อเปรียบเทียบระหว่างการใช้ไบโกลวนและท่อผสมแบบสถิต	20
3.1	ผลของอุณหภูมิของสารผสมที่ต่างๆ ความยาวท่อ 1 เมตร	24
4.1	แสดงชื่ออุปกรณ์ของชุดทดลองกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันแบบต่อเนื่องด้วยท่อผสมแบบสถิต	27
4.2	แสดงช่วงการแปรค่าของตัวแปรอิสระ	30
4.3	แสดงแผนการทดลองที่สภาวะต่างๆ สำหรับกระบวนการกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันแบบต่อเนื่องด้วยท่อผสมแบบสถิต	30
4.4	แสดงขอบเขตเงื่อนไขการทดลองของตัวแปรอิสระ	34
5.1	แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของสมการทำนายความสัมพันธ์ของสมการที่อุณหภูมิน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 60°C และอุณหภูมิสารผสม 30°C	36
5.2	แสดงข้อมูลในการผลิตเมทิลเอสเตอร์แบบต่อเนื่องด้วยท่อผสมแบบสถิต ความยาว 5 เมตร ที่อุณหภูมิน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 60°C และอุณหภูมิสารผสม 30°C	38
5.3	แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของสมการทำนายความสัมพันธ์ของสมการที่อุณหภูมิน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 60°C และอุณหภูมิสารผสม 60°C	41
5.4	แสดงข้อมูลในการผลิตเมทิลเอสเตอร์แบบต่อเนื่องด้วยท่อผสมแบบสถิต ความยาว 1 เมตรที่อุณหภูมิน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 60°C และอุณหภูมิสารผสม 60°C	42
5.5	แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของสมการทำนายความสัมพันธ์ของสมการที่อุณหภูมิน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 75°C และอุณหภูมิสารผสม 30°C	45
5.6	แสดงข้อมูลในการผลิตเอธิลเอสเตอร์แบบต่อเนื่องด้วยท่อผสมแบบสถิต ความยาว 6 เมตรที่อุณหภูมิน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 75°C และอุณหภูมิสารผสม 30°C	47

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
5.7	แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของสมการทำนายความสัมพันธ์ของสมการ ที่อุณหภูมิน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 75°C และอุณหภูมิสารผสม 75°C	50
5.8	แสดงข้อมูลในการผลิตเอซิลเอสเตอร์แบบต่อเนื่องด้วยท่อผสมแบบสถิต ความยาว 1 เมตรที่อุณหภูมิน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 75°C และอุณหภูมิสารผสม 75°C	51
5.9	แสดงสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยท่อผสมสถิต	57
5.10	แสดงอัตราการไหลของสารตั้งต้นที่สภาวะที่เหมาะสมที่สุด	58
5.11	แสดงอัตราส่วนของปริมาณน้ำมันที่แยกออกจากกลีเซอรอล ปริมาณกลีเซอรอล และปริมาณผลได้ของไบโอดีเซลบริสุทธิ์	58
5.12	แสดงกำลังการผลิตจากสภาวะที่เหมาะสมที่สุด	59
5.13	แสดงองค์ประกอบไบโอดีเซลจากกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องด้วยท่อผสมสถิต	60

รายการภาพประกอบ

รูปที่		หน้า
1.1	การผลิตและการใช้เอทานอลของประเทศไทย	3
2.1	แสดงการผลิตเมทานอลจากก๊าซธรรมชาติ	15
2.2	ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน	17
3.1	ร่างแบบชุดทดสอบกระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์แบบต่อเนื่องด้วยท่อผสมแบบสถิต	21
3.2	แสดงรูปทรงของถังที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้	22
3.3	แสดงลักษณะของแผ่นบิดที่ใช้ติดตั้งภายในท่อสแตนเลส	23
3.4	ถังบรรจุแอลกอฮอล์ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ของระบบ	25
3.5	ลักษณะของท่อผสมแบบสถิตของระบบการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง	25
4.1	ชุดทดลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยท่อผสมแบบสถิต	26
5.1	แสดงปริมาณการใช้เมทานอลและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ท่อผสมสถิตความยาวต่างๆ เพื่อให้ได้เมทิลเอสเทอร์ความบริสุทธิ์ 99 wt.% ที่อุณหภูมิสารผสม 30°C	37
5.2	แสดงกราฟ contour ของความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์จากเงื่อนไขที่เหมาะสมที่อุณหภูมิน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 60°C และอุณหภูมิสารผสม 30°C	39
5.3	องค์ประกอบของน้ำมันที่เปลี่ยนแปลงไปตามความยาวท่อผสมสถิตที่จากเงื่อนไขที่เหมาะสมที่อุณหภูมิน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 60°C และอุณหภูมิสารผสม 30°C	39
5.4	แสดงปริมาณการใช้เมทานอลและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ท่อผสมสถิตความยาวต่างๆ เพื่อให้ได้เมทิลเอสเทอร์ความบริสุทธิ์ 99 wt.% ที่อุณหภูมิสารผสม 60°C	42
5.5	แสดงกราฟ contour ของความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์จากเงื่อนไขที่เหมาะสมที่อุณหภูมิน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 60°C และอุณหภูมิสารผสม 60°C	43
5.6	องค์ประกอบของน้ำมันที่เปลี่ยนแปลงไปตามความยาวท่อผสมสถิตที่จากเงื่อนไขที่เหมาะสมที่อุณหภูมิน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 60°C และอุณหภูมิสารผสม 60°C	44

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.7	แสดงปริมาณการใช้เอทานอลและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ต่อผสมสติดความยาวต่างๆ เพื่อให้ได้เมทิลเอสเทอร์ความบริสุทธิ์ 99 wt.% ที่อุณหภูมิสารผสม 30°C	46
5.8	แสดงกราฟ contour ของความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์จากเงื่อนไขที่เหมาะสมที่อุณหภูมิน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 75°C และอุณหภูมิสารผสม 30°C	48
5.9	องค์ประกอบของน้ำมันที่เปลี่ยนแปลงไปตามความยาวที่ต่อผสมสติดที่จากเงื่อนไขที่เหมาะสมที่อุณหภูมิน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 75°C และอุณหภูมิสารผสม 30°C	48
5.10	แสดงปริมาณการใช้เมทานอลและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ต่อผสมสติดความยาวต่างๆ เพื่อให้ได้เมทิลเอสเทอร์ความบริสุทธิ์ 99 wt.% ที่อุณหภูมิสารผสม 75°C	51
5.11	แสดงกราฟ contour ของความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์จากเงื่อนไขที่เหมาะสมที่อุณหภูมิน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 75°C และอุณหภูมิสารผสม 75°C	52
5.12	องค์ประกอบของน้ำมันที่เปลี่ยนแปลงไปตามความยาวที่ต่อผสมสติดที่จากเงื่อนไขที่เหมาะสมที่อุณหภูมิน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 75°C และอุณหภูมิสารผสม 75°C	53
5.13	กราฟ contour ของความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ จากเงื่อนไขที่เหมาะสมที่อุณหภูมิน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 60°C และอุณหภูมิสารผสม 30°C และ 60°C	54
5.14	กราฟ contour ของความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์ จากเงื่อนไขที่เหมาะสมที่อุณหภูมิน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 75°C และอุณหภูมิสารผสม 30°C และ 75°C	55
5.15	แสดงกราฟ contour ของความบริสุทธิ์ของเอสเทอร์ จากเงื่อนไขที่เหมาะสมระหว่างการใช้อีทานอลและเมทานอล	56
5.16	แสดงเวลาที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์เมื่อทำปฏิกิริยาผ่านที่ต่อผสมสติดที่ความยาวต่างๆ	59

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

A	แอลกอฮอล์
C	Carbon
CCD	Central Composite Design
°C	องศาเซลเซียส
cm ³	ลูกบาศก์เซนติเมตร
CSTR	เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง (Continuous Stirred Tank Reactor)
DG	ไดกลีเซอไรด์
E, EtOH	เอทิลแอลกอฮอล์ หรือ เอทานอล
FFA	กรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid)
g/cm ³	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
gKOH/L	กรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อลิตร
g/L, g/L of oil	กรัมต่อน้ำมัน 1 ลิตร
g/mol	กรัมต่อ โมล
H	Hydrogen
K, KOH	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์
<i>k</i>	จำนวนตัวแปรอิสระ
kg/L	กิโลกรัมต่อลิตร
kHz	กิโลเฮิร์ตซ์
L/hr.	ลิตรต่อชั่วโมง
M, MeOH	เมทิลแอลกอฮอล์ หรือ เมทานอล
MG	โมนอกลิเซอไรด์
mgKOH/g	มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม
min	นาที
mmHg	มิลลิเมตรปรอท
mol	โมล

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

mPa.sec	millipascal-second
NaOH	โซเดียมไฮดรอกไซด์
OH	Hydroxy group
rpm	รอบต่อนาที
RPO	น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ (Refined Palm Oil)
RSM	พื้นที่ผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology)
R ²	coefficient of multiple determinations
SM	ท่อผสมสถิต (Static Mixer)
TG	ไทรกลีเซอไรด์
TLC/FID	Thin Layer Chromatography/Flame Ionization Detection
vol.%	โดยปริมาตร
W	วัตต์
wt.%	โดยน้ำหนัก
y	ค่าของผลตอบสนอง
β	ค่าสัมประสิทธิ์
α	จุดแกน

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำต้นเรื่อง

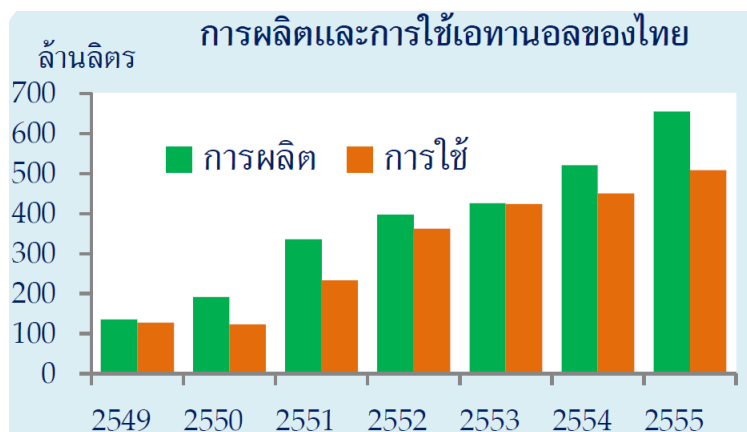
ไบโอดีเซลเป็นพลังงานทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากปริมาณเชื้อเพลิงฟอสซิลกำลังลดลงและอาจจะหมดไปในอนาคต ดังนั้นไบโอดีเซลถือเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะมาทดแทนน้ำมันดีเซลได้ กระบวนการผลิตไบโอดีเซลคือการนำน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์มาทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันกับแอลกอฮอล์โดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบภายในน้ำมัน เช่น ไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์เป็นเอสเทอร์ กระบวนการผลิตไบโอดีเซลนั้น สิ่งที่เราไม่ได้คือ แอลกอฮอล์ แอลกอฮอล์ที่ใช้ผลิตไบโอดีเซลทั่วไปเป็นเมทานอล เป็นของเหลวใส ระเหยได้ เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการทางกลั่นปิโตรเคมี จึงมีความเป็นพิษต่อร่างกายสูงถึงขั้นเสียชีวิตได้ และแอลกอฮอล์อีกชนิดหนึ่งซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเมทานอล คือ เอทานอล เป็นของเหลวใส ระเหยได้ ไวไฟสูง สามารถละลายน้ำได้ ได้จากการหมักพืช เช่น อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด เป็นน้ำตาลแล้วเปลี่ยนน้ำตาลให้เป็นแอลกอฮอล์ ดังนั้นเอทานอลสามารถกินได้ เชื้อเพลิงจากเอทานอลเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและในอนาคตราคาเอทานอลมีแนวโน้มที่จะลดลง

จากความพยายามในการวิจัยค้นหาเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือกใหม่ ซึ่งเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และสามารถสร้างทดแทนใหม่ได้ เพื่อที่จะใช้ในการทดแทนน้ำมันดีเซลในระยะยาว ปัจจุบันเหล่านี้จึงเป็นที่มาของน้ำมันดีเซลจากไตรกลีเซอไรด์ที่ได้มาจากน้ำมันพืชหรือน้ำมันจากไขสัตว์ ไตรกลีเซอไรด์นั้นสามารถนำมาใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลได้ แต่เนื่องจากมีคุณสมบัติบางอย่างที่ไม่เหมาะสำหรับการนำไปใช้โดยตรง ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อเครื่องยนต์ดีเซลในระยะยาวจึงต้องเปลี่ยนโครงสร้างของไตรกลีเซอไรด์โดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันซึ่งเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะได้เอสเทอร์ หรือที่เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ไบโอดีเซล ที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล มีงานวิจัยที่เกี่ยวกับเทคโนโลยีในการผลิตไบโอดีเซลที่ใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน ได้สรุปไว้ว่าการใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีข้อดีคือได้ผลิตภัณฑ์เอสเทอร์สูงและเร่งปฏิกิริยาได้เร็วกว่าการใช้กรด แต่น้ำมันที่ใช้ควรมีค่ากรดไขมันอิสระน้อยกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก หากน้ำมันมีค่ากรดไขมันอิสระสูงจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เอสเทอร์น้อยลง และเกิดปฏิกิริยาสปอนิฟิเคชันทำให้เกิดสบู่มากขึ้นด้วย ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำน้ำมัน

ปาล์มบริสุทธิ์ซึ่งมีค่ากรดไขมันอิสระต่ำมาใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อนำไปผลิตเป็นไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน

โดยทั่วไปการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจะใช้ถังปฏิกรณ์ CSTR (continuous stirred tank reactor) ซึ่งมีข้อดีหลายประการเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแบบต่อเนื่องโดยใช้ท่อผสม ดังนั้นวัตถุดิบประสงคของงานวิจัยนี้คือ ใช้ท่อผสม (static mixer) เร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของกระบวนการผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์แบบต่อเนื่อง ซึ่งท่อผสมประกอบด้วยท่อ (pipe) และไส้ท่อ (element) ไส้ท่อเป็นอุปกรณ์ที่ไม่มีการเคลื่อนที่ จะอยู่ภายในท่อที่มีของเหลวไหลผ่านเพื่อทำให้เกิดการผสม ข้อดีของท่อผสมเมื่อเปรียบเทียบกับ การผสมด้วยถังกวนคือ ใช้พื้นที่ติดตั้งน้อยกว่าเพราะมีขนาดเล็ก ใช้พลังงานในการทำงานน้อยกว่า ใช้เวลาในการผสมน้อยกว่า และสะดวกในการบำรุงรักษา

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงกระบวนการผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์แบบต่อเนื่องโดยใช้เอทานอล ซึ่งงานวิจัยโดยส่วนใหญ่จะใช้เมทานอลเพราะเมทานอลทำปฏิกิริยาได้เร็วกว่า และมีราคาถูกกว่า แต่ราคาของเมทานอลจะขึ้นอยู่กับราคาของปิโตรเลียมซึ่งมีแนวโน้มว่าจะสูงขึ้นเรื่อยๆ ในขณะที่ประเทศไทยสามารถผลิตเอทานอลจากวัตถุดิบทางการเกษตรที่เพาะปลูกภายในประเทศได้อย่างเพียงพอจนสามารถส่งออกได้ ตามรายงานสถานการณ์เอทานอลปี 2555 และแนวโน้มปี 2556 (ธนาคารแห่งประเทศไทย, 2555) ระบุว่าปัจจุบันไทยมีโรงงานเอทานอลที่เปิดดำเนินการแล้ว 20 แห่ง มีกำลังการผลิตรวม 3.3 ล้านลิตรต่อวัน กำลังการผลิตที่ผลิตจากกากน้ำตาลร้อยละ 69.7 จากน้ำตาลอ้อยร้อยละ 6.1 และจากมันสำปะหลังร้อยละ 24.2 ของกำลังการผลิตรวม นอกจากนี้ยังมีโรงงานที่อยู่ระหว่างรอเปิดดำเนินการ และก่อสร้างอีก 7 แห่ง กำลังการผลิตรวม 2.3 ล้านลิตรต่อวัน ซึ่งหากดำเนินการครบทุกแห่งจะทำให้มีกำลังการผลิตรวมทั้งสิ้น 5.6 ล้านลิตรต่อวัน โดยในปี 2556 มีโรงงานใหม่จะเปิดดำเนินการได้อย่างน้อย 3 แห่ง กำลังการผลิตรวม 0.9 ล้านลิตรต่อวัน และมีผู้ผลิตรายเดิม 1 แห่งได้ขยายกำลังการผลิตเพิ่มอีก 0.2 ล้านลิตรต่อวัน ปี 2555 พบว่าปริมาณการใช้แก๊สโซฮอล์อยู่ที่ 4,454.4 ล้านลิตร เพิ่มขึ้นจากปีก่อนร้อยละ 5.7 ทำให้ความต้องการเอทานอลของไทยทั้งปีอยู่ที่ 508.6 ล้านลิตร (เฉลี่ย 1.4 ล้านลิตรต่อวัน) โดยมีการใช้แก๊สโซฮอล์กลุ่ม E10 คิดเป็นร้อยละ 91 รองลงมาคือ E20 คิดเป็นร้อยละ 8.2 และ E85 คิดเป็นร้อยละ 0.8 คาดว่าความต้องการใช้เอทานอลของไทยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอยู่ที่ประมาณ 2.2 ล้านลิตรต่อวันหลังการยกเลิกน้ำมันเบนซิน 91



รูปที่ 1.1 การผลิตและการใช้เอทานอลของประเทศไทย (ธนาคารแห่งประเทศไทย, 2555)

สรุปจากที่ได้กล่าวมา ที่มาของงานวิจัยมี 2 ประเด็นหลัก คือ

1. ต้องการพัฒนาระบบการผลิตเอทิลเอสเตอร์จากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์แบบต่อเนื่องซึ่งโดยทั่วไปจะใช้ CSTR แต่งานวิจัยนี้จะใช้ท่อผสม (static mixer) แทนใบกวน เพื่อต้องการศึกษาความเป็นไปได้เมื่อใช้ท่อผสมแบบต่อเนื่องผลิตเอทิลเอสเตอร์

2. การใช้เอทานอลในการทำปฏิกิริยากับน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน ซึ่งเอทานอลเป็นแอลกอฮอล์ที่สามารถผลิตได้จากวัตถุดิบทางการเกษตรที่เพาะปลูกภายในประเทศและเหลือเพียงพองจนสามารถส่งออกได้ แทนการใช้เมทานอล ซึ่งจะช่วยให้ประเทศสามารถสร้างสมดุลและความมั่นคงของพลังงานภายในประเทศ และจะช่วยพัฒนาประเทศไปสู่การพึ่งพาตนเองในด้านพลังงานได้มากยิ่งขึ้น

1.2 การตรวจเอกสาร

สำหรับการวิจัยในการนำเอาน้ำมันพืชและไขมันสัตว์มาใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลนั้น ได้มีการทำงานวิจัยกันอย่างกว้างขวางทั้งในประเทศและต่างประเทศ ทำให้มีข้อมูลพื้นฐานที่ดีสำหรับการทำการวิจัยในเรื่องนี้ โดยได้แบ่งเอกสารที่เกี่ยวข้องนี้ออกเป็น 4 ส่วนหลักๆ คือ การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชันด้วยตัวเร่งประเภทเบส การผลิตเอทิลเอสเตอร์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเบส การผลิตไบโอดีเซลด้วยท่อผสม และการหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการผลิต ดังนี้

การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชันด้วยตัวเร่งประเภทเบส ซึ่งเป็นปฏิกิริยาโดยทั่วไปที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล มีทีมวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาดังกล่าวหลายทีมวิจัย เช่น การผลิตเมทิลเอสเตอร์ด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชันด้วยตัวเร่ง

ปฏิกิริยาเบส ไตรกลีเซอไรด์ที่ใช้เป็นวัตถุดิบต้องมีค่าความเป็นกรด (acid value) ต่ำกว่า 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก หากสูงกว่าอาจแก้ไขโดยการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเบสนอกเหนือจากการทำให้เป็นกลาง (neutralize) แต่จะสูญเสียปริมาณของเมทิลเอสเทอร์ในชั้นกลีเซอรอลสูงขึ้น ซึ่งอาจทำให้เกิดเจลในชั้นของเมทิลเอสเทอร์ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาสaponification) ทำให้เกิดสบู่ ซึ่งอาจเกิดจากกรดไขมันอิสระที่มีปริมาณน้ำผสมอยู่มากกว่า 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สบู่ที่เกิดขึ้นจะเป็นสารอิมัลชันฟายเออร์ทำให้กลีเซอรอลแขวนลอยอยู่ในชั้นเมทิลเอสเทอร์มากขึ้น ส่งผลให้การแยกชั้นของกลีเซอรอลด้วยแรงโน้มถ่วงทำได้ยากขึ้น สามารถแก้ไขได้จากการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรด เพื่อลดค่าความเป็นกรดของไตรกลีเซอไรด์ให้ต่ำกว่า 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แล้วจึงสามารถนำไปเข้ากระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์ด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเบสเช่นเดิมได้ (Wright et al. 1944; Cvengros and Povazanec 1995) ซึ่ง Cvengros and Povazanec (1995) ทำการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมัน rapeseed โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้กำจัดสบู่ของเกลือ โซเดียม โดยการใส่กรดฟอสฟอริก สะลายสบู่ให้เป็นกรดไขมัน และ Saka and Kusdiana (2001) ได้ศึกษาผลของปริมาณน้ำและกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชที่มีผลต่อปริมาณของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน ในสภาวะเมทานอลเหนือวิกฤต เปรียบเทียบกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทที่เป็นกรด คือ กรดซัลฟิวริก และตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทที่เป็นเบส คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าปริมาณน้ำและกรดไขมันอิสระที่สูงขึ้นมีผลต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทเบส แต่ไม่มีผลต่อกระบวนการเมทานอลสถานะเหนือวิกฤต โดยปริมาณน้ำจะมีผลต่อตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทที่เป็นกรดมากกว่าเบส เนื่องจากจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดไลซิสของน้ำมันพืชมากขึ้น ส่วนปริมาณกรดไขมันอิสระจะมีผลต่อตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทเบสมากกว่า เนื่องจากกรดไขมันอิสระจะทำปฏิกิริยากับเบสทำให้เกิดปฏิกิริยาสaponification จากงานวิจัยในหัวข้อนี้ประเด็นที่สำคัญคือน้ำมันที่จะนำมาผลิตไบโอดีเซลจะต้องมีค่ากรดไขมันอิสระน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ถ้าน้ำมันยังมีค่ากรดไขมันอิสระมากขึ้นจะทำให้ได้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์น้อยลง

การผลิตเมทิลเอสเทอร์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเบส งานวิจัยส่วนใหญ่จะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบส คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ข้อจำกัดของตัวเร่งปฏิกิริยาเบส คือ ปริมาณกรดไขมันอิสระ และปริมาณน้ำ อัตราการเกิดเมทิลเอสเทอร์ขึ้นอยู่กับตัวแปรอิสระคือ อัตราส่วนโดยโมลของเอทานอลต่อน้ำมัน ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเบส ประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยาเบส อุณหภูมิปฏิกิริยา และความรุนแรงในการผสม ซึ่งได้แสดงสภาวะที่เหมาะสมของการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันชนิดต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 สรุปสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลด้วยเอทานอลของงานวิจัยต่างๆ

Feedstock	Type, volume of reactor (cm ³)/type of agitator, agitation intensity (rpm)	ethanol:oil molar ratio (mol/mol)	Catalyst/loading (wt.% to the oil)	Temperature (°C)	Optimal reaction conditions			references
					Reaction conditions	Yield (%)	Time (min)	
Rapeseed oil	Batch reactor, 2000/disc stirrer, 10,000–20,000	6:1–7.5:1	KOH/0.89–1.33	25–65	25°C; 7.5:1; 1.33%; 10000 min ⁻¹	98.9	90	Stamenkovic O.S et al. (2011)
Castor oil	Mechanical shaker	9.65:1–12.35:1	KOH/1.33–2.17	30	11:1; 1.75%	80	90	Stamenkovic O.S et al. (2011)
Sunflower oil	Erlenmeyer flask	6:1	KOH/0.5–2.0	Ambient and 50	50°C; 1.0%	98.7	240	Stamenkovic O.S et al. (2011)
Fish oil	Flask, 250/ultrasound (indirect sonication) 35 kHz,	6:1	KOH/0.5–1.0	20 and 60	60°C; 1% KOH	98	30	Stamenkovic O.S et al. (2011)
Canola oil	Batch Parr reactor/600	6:1	KOH/1	50		95	120	Thompson J.C. and He B.B. (2007)
Used cooking oil	Batch Parr reactor/600	6:1	KOH/1	50		70	120	Thompson J.C. and He B.B. (2007)
Mixtures of canola and used cooking oil	Batch Parr reactor/600	6:1	KOH/1	50		90	120	Thompson J.C. and He B.B. (2007)
Mixture of used olive and sunflower oil	Batch reactor, 1000/mechanical	6:1–15:1	NaOH, KOH, NaOCH ₃ , KOCH ₃ /0.1–1.5	35–78	60°C; 12:1; 1.0% KOH	72.5	30	Encinar J.M. et al. (2007)
Esterified crude palm oil	Flask, 250, microwave: 2.45 GHz, 800W	4.5:1–10.5:1	KOH/0.0–2.0	70	8.5:1; 1.5% KOH; 70W	85	5	Crabbe E. et al. (2001)

ตารางที่ 1.1 (ต่อ) สรุปสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลด้วยเอทานอลของงานวิจัยต่างๆ

Feedstock	Type, volume of reactor (cm ³)/type of agitator, agitation intensity (rpm)	ethanol:oil molar ratio (mol/mol)	Catalyst/loading (wt.% to the oil)	Temperature (°C)	Optimal reaction conditions			references
					Reaction conditions	Yield (%)	Time (min)	
Esterified crude palm oil	Flask, 250 (conventional heating)	8.5:1	KOH/1.5	70	8.5:1	85	60	Crabbe E. et al. (2009)
Soybean oil	Flask 500 mL,magnetic stirring/600	12:1	KOH/1	30	12:1	94.6	60	Terry W. et al. (2010)
Mixture of castor and soybean oil	Batch reactor, 50/magnetic	5.7:1 and 18.8:1	KOH/0.17Molar ratio catalyst:oil	78	18.8:1	97	240	Qiang L. et al. (2013)
Karanja oil	Flask ,impeller/600	6:1	KOH/1	78(±3)	6:1	98	90	Baiju B. et al. (2009)
Castor oil	-	11:1	KOH/1.75	90	11:1	86.3	90	Stamenkovic O.S et al. (2011)
Brassica carinata oil	-	6:1	KOH/1.5	35	6:1	98	60	Abderrahim B. et al. (2009)
Used frying oil	-	12:1	KOH/1	60	12:1	72.5	120	Encinar J.M. et al. (2007)

จากตารางที่ 1.1 นักวิจัยส่วนใหญ่สรุปผลไปในทิศทางเดียวกันว่า อัตราส่วนโดยโมลของเอทานอลต่อน้ำมัน และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา มีนัยสำคัญต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของเอทิลเอสเทอร์ โดยสามารถสังเกตเบื้องต้นหลังจากทำปฏิกิริยาเสร็จสิ้นแล้ว คือ อัตราส่วนโดยโมลของเอทานอลต่อน้ำมันต่ำและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่ำเช่นกัน สารผสมจะไม่แยกชั้นเป็นไบโอดีเซล ดังนั้นนักวิจัยเชื่อว่า การเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเอทานอลต่อน้ำมันสูงกว่า 12:1 กลีเซอรอลจะไปแขวนลอยอยู่ในเอสเทอร์ ทำให้ยากต่อการแยกกลีเซอรอลออกจากสารผสม

งานวิจัยที่ศึกษาการใช้ท่อผสม (static mixer) ในการผลิตไบโอดีเซลส่วนมากจะใช้ในการผสมน้ำมันกับสารเคมีก่อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์ (pre-mixing process) การวิจัยที่ใช้เพียงท่อผสมอย่างเดียวมีจำนวนน้อยมาก เช่น Thompson and He (2007) ศึกษาความเป็นไปได้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันคาโนลา (canola oil) ด้วยท่อผสมแบบหมุนวน โดยกล่าวถึงตัวแปรที่สำคัญ คือ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา อัตราการไหลของของไหล เวลาในการทำปฏิกิริยาและความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า เงื่อนไขที่ทำให้ค่ากลีเซอรไรด์ต่ำสุด คือ อุณหภูมิ 60°C และ 1.5 wt.% of NaOH (25wt.% solution in MeOH) ที่เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที เป็นสภาวะที่เหมาะสม Alamsyah et al. (2010) ได้เปรียบเทียบท่อผสมกับการกวนผสมของการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน พบว่า ท่อผสมสามารถผลิตเมทิลเอสเทอร์ได้ 95.5 wt.% ได้เร็วกว่าการกวนผสม ที่เงื่อนไข อุณหภูมิ 65°C อัตราส่วนโดยโมล 1:10.5 (TG:MeOH) และ 1wt.% of KOH ที่เวลา 5 นาทีและ P. Sungwornpratsakul et al. (2013) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยการเปรียบเทียบวิธีการผลิตจากการกวนด้วยแม่เหล็ก (mechanical mixer) กับแบบท่อผสม (static mixer) โดยใช้ น้ำมันข้าวโพดกับเมทานอล และใช้ KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 26-30°C เวลา 30 นาที สรุปได้ว่าการใช้ static mixer ช่วยลดเวลาในการผลิตได้ เวลาในกระบวนการผลิตยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิสูงปฏิกิริยาที่จะเกิดได้เร็ว และขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา คือยิ่งเปอร์เซ็นต์ตัวเร่งสูงอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่จะสูงขึ้นด้วย

มีงานวิจัยที่ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีการออกแบบทดลองต่าง ๆ เพื่อต้องการผลของตัวแปรอิสระต่อการผลิตไบโอดีเซล เช่น Crabbe et al. (2001) ได้ศึกษาตัวแปรอิสระ 3 ตัวแปร ที่มีผลต่อปริมาณของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบ ด้วยวิธีทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน คือ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลกับน้ำมันปาล์ม ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา จากการศึกษาพบว่า ภายใต้

สภาวะที่เหมาะสมที่สุด คือ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลกับน้ำมันเท่ากับ 40:1 ใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ได้เมทิลเอสเทอร์ที่มีความบริสุทธิ์เท่ากับ 97 เปอร์เซ็นต์ Ghadge and Raheman (2005) ได้ศึกษาการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตไบโอดีเซลแบบสองขั้นตอนจากน้ำมัน mahua โดยใช้วิธี response surface methodology, RSM ขั้นตอนแรกได้หาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการลดกรดไขมันอิสระให้มีค่าน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีตัวแปรอิสระคือ เมทานอล กรดซัลฟิวริก และเวลาในการทำปฏิกิริยาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือ เมทานอล 32 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร, กรดซัลฟิวริก 1.24 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 1.26 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และนำไปผลิตไบโอดีเซลต่อด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันภายใต้สภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือ เมทานอล 25 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ได้ไบโอดีเซลที่มีความบริสุทธิ์ 98 เปอร์เซ็นต์ Tiwari et al. (2007) ได้ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำโดยใช้วิธี RSM ขั้นตอนแรกได้หาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการลดกรดไขมันอิสระให้มีค่าน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีตัวแปรอิสระคือ เมทานอล กรดซัลฟิวริก และเวลาที่ทำปฏิกิริยา พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุด คือ เมทานอล 28 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร, กรดซัลฟิวริก 1.43 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 88 นาที ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และนำไปผลิตไบโอดีเซลต่อด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมที่สุด คือ เมทานอล 16 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 3.5+acid value โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 นาที ได้ไบโอดีเซลที่มีความบริสุทธิ์มากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ จากงานวิจัยในหัวข้อนี้ทำให้ทราบถึงวิธีการออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบสนอง (response surface methodology, RSM) ซึ่งคาดว่าในงานวิจัยนี้จะนำวิธีการดังกล่าวมาออกแบบการทดลอง เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการผลิต

แต่จากการสืบค้นฐานข้อมูลต่าง ๆ พบว่า ยังไม่มีผู้วิจัยเกี่ยวกับการผลิตเอทิลเอสเทอร์ด้วยท่อผสมเพียงอย่างเดียว ดังนั้นจึงเป็นงานวิจัยที่น่าสนใจ เนื่องจากการเปลี่ยนรูปแบบการทำปฏิกิริยาเอทิลเอสเทอร์ริฟิเคชัน จากแบบถังกวนเป็นเป็นแบบท่อผสม ซึ่งท่อผสมมีข้อดีคือการผสมด้วยถังกวน คือ ใช้พื้นที่ติดตั้งน้อยกว่าเพราะมีขนาดเล็ก ใช้พลังงานในการทำงานน้อยกว่า ใช้เวลาในการผสมน้อยกว่า และสะดวกในการบำรุงรักษา (Leng et al., 2008)

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.3.1 เพื่อออกแบบและสร้างระบบผลิตเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์แบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ด้วยท่อผสมแบบสถิต

1.3.2 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์แบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ด้วยท่อผสมแบบสถิตโดยมีการแปรค่าตัวแปรอิสระคือปริมาณของเอทานอล ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเบส ที่ความยาวของท่อผสมสถิต 1-10 เมตร

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถนำข้อมูลที่ได้มาเป็นค่ามาตรฐานในการผลิตเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์แบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ด้วยท่อผสมแบบสถิต

1.4.2 การใช้เอทานอลที่ผลิตภายในประเทศแทนการนำเข้าเอทานอล ทำให้ประเทศสามารถสร้างสมดุลและความมั่นคงของพลังงานภายในประเทศ และช่วยพัฒนาประเทศไปสู่การพึ่งพาตนเองในด้านพลังงานได้ดียิ่งขึ้น

1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

1.5.1 ออกแบบและสร้างระบบผลิตเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์แบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ด้วยท่อผสมแบบสถิตที่สร้างจากสแตนเลส304L ความหนา 1 มิลลิเมตร แต่ละอิลิเมนต์มีอัตราส่วน ความกว้างต่อความยาวเท่ากับ 1.5 บิดให้เป็นเกลียวทำมุม 180 องศา เชื่อมกันต่อโดยทำมุม 90 องศา อิลิเมนต์ชนิดนี้เรียกว่า twisted-ribbon มีความยาว 15 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ติดตั้งภายในท่อสแตนเลสที่หุ้มฉนวนกันการสูญเสียความร้อนระหว่างทำปฏิกิริยา

1.5.2 ศึกษากระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์แบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ด้วยท่อผสมแบบสถิต ที่อุณหภูมิเมทานอล 30°C ไกล่เคียงอุณหภูมิปกติ และ 60°C ไกล่เคียงจุดเดือดของเมทานอล และที่อุณหภูมิเอทานอล 30°C ไกล่เคียงอุณหภูมิปกติ และ 75°C ไกล่เคียงจุดเดือดของเอทานอล

1.5.3 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ และทดสอบหาสภาวะที่เหมาะสมของระบบผลิตเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์แบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ด้วยท่อผสมแบบสถิตที่อัตราการไหลประมาณ 20 ลิตรต่อชั่วโมง โดยไบโอดีเซลที่ผลิตได้จะต้องมีค่าความบริสุทธิ์ของเอสเทอร์มากกว่า 96.5 % และคุณสมบัติสำคัญสูงกว่ามาตรฐานไบโอดีเซลชุมชน และใกล้เคียงหรือเทียบเท่ามาตรฐานไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 ปาล์มน้ำมัน

ปาล์มน้ำมัน (Oil palm) เป็นพืชตระกูลปาล์มลักษณะลำต้นเดี่ยว ขนาดลำต้นประมาณ 12 -20 นิ้ว เมื่ออายุประมาณ 1-3 ปี ลำต้นจะถูกหุ้มด้วยโคนกาบใบ แต่เมื่ออายุมากขึ้น โคนกาบใบจะหลุดร่วงเห็นลำต้นชัดเจน ผิวของลำต้นคล้ายๆ ต้นตาล ลักษณะใบเป็นรูปก้างปลา โคนกาบใบจะมีลักษณะเป็นซี่ คล้ายหนามแต่ไม่คมมาก เมื่อไปถึงกลางใบหนามดังกล่าวจะพัฒนาเป็นใบ การออกดอกเป็นพืชที่แยกเพศ คือต้นที่เป็นเพศผู้ก็จะให้เกสรตัวผู้อย่างเดียว ต้นที่ให้เกสรตัวเมียจึงจะติดผล

ลักษณะผลเป็นทะลายผลจะเกาะติดกันแน่นจนไม่สามารถสอดนิ้วมือเข้าไปที่ก้านผลได้ เวลาเก็บผลปาล์มจึงต้องใช้มีดงอเกี่ยวที่โคนทะลายแล้วดึงให้ขาด ก่อนที่จะตัดทะลายปาล์มต้องตัดทางปาล์มก่อนเพราะผลปาล์มจะตั้งอยู่บนทางปาล์ม กระบวนการตัดทาง(ใบ)ปาล์มและตัดเอาทะลายปาล์มลง เรียกรวมๆ ว่า แแทงปาล์ม ปาล์มน้ำมันจัดเป็น พืชเศรษฐกิจ มีถิ่นกำเนิดอยู่ในทวีปแอฟริกา เป็นพืชที่ให้ผลผลิต น้ำมันต่อหน่วยพื้นที่สูงกว่าพืชน้ำมันทุกชนิด

สามารถนำมาแปรรูปทำเป็นทั้งในรูปแบบของน้ำมันพืชที่ใช้ในการประกอบอาหาร และใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมอาหารต่างๆ เช่น ขนมขบเคี้ยว บะหมี่กึ่งสำเร็จรูป นมข้นหวาน ครีมและเนยเทียม เป็นวัตถุดิบในการผลิตพลังงานทดแทน ใบ โอดีเซลรวมถึงเป็นส่วนผสมในเพื่อช่วยลดการใช้ น้ำมันดีเซล เพิ่มความมั่นคงทางด้านพลังงานให้กับประเทศ อีกทั้งยังจะช่วยลดปัญหาผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมอีกด้วย และยังสามารถแปรรูปเป็น สบู่ ผงซักฟอก เครื่องสำอาง ผลิตภัณฑ์เคมีภัณฑ์ต่างๆ และอาหารสัตว์ ด้วย ใบมาบดเป็นอาหารสัตว์ กะลาปาล์มเป็นวัตถุดิบเชื้อเพลิง ทะลายปาล์มใช้เพาะเห็ด และกระทั่งการปลูกลงดินไปแล้วก็ช่วยในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในการช่วยลดภาวะโลกร้อนได้อีก (ปาล์มน้ำมัน, 2015)

2.2 การผลิตน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์

การกลั่นบริสุทธิ์น้ำมันปาล์ม เป็นกระบวนการที่ทำให้น้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันเมล็ดในปาล์มดิบกลายเป็นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์และน้ำมันเมล็ดในปาล์มบริสุทธิ์พร้อมสำหรับการบริโภค ซึ่งกระบวนการกลั่นสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธีการ คือ

1. วิธีทางกายภาพ (Physical or Steam Refining) เป็นกระบวนการกำจัดกรดไขมันอิสระโดยการผ่านไอน้ำเข้าไปในน้ำมันร้อน แล้วกลั่นแยกเอากรดไขมันอิสระและสารที่ให้กลิ่นให้ระเหยออกไป จึงเป็นการกำจัดกลิ่นและทำให้ไขมันเป็นกลางพร้อมๆ กัน การกลั่นน้ำมันปาล์มโดยวิธีทางกายภาพ ทำได้โดยการเตรียมน้ำมันปาล์มดิบหรือน้ำมันเมล็ดในปาล์มดิบที่ไม่มีฟอสโฟลิปิดที่ผ่านการกำจัดออกด้วยน้ำ แล้วทำปฏิกิริยาคัวยกรดฟอสฟอริก ความเข้มข้น 80 ถึง 85 เปอร์เซ็นต์ ประมาณ 0.05 ถึง 0.2 เปอร์เซ็นต์ของน้ำมันปาล์มดิบผสมกับน้ำมันที่อุณหภูมิ 90 ถึง 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 15 ถึง 30 นาที จากนั้นจึงเติมผงฟอกสี (Bleaching Earth) ประมาณ 0.8 ถึง 2.0 เปอร์เซ็นต์ของน้ำมันปาล์มดิบและฟอกสีภายใต้สภาพสุญญากาศที่อุณหภูมิ 95 ถึง 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 ถึง 45 นาที จากนั้นจึงนำน้ำมันปาล์มไปผ่านเข้าเครื่องกรอง ก็จะได้ไขมันที่ไม่มีฟอสโฟลิปิด และทำการกลั่นโดยใช้ไอน้ำที่อุณหภูมิไขมัน 240 ถึง 270 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 1 ถึง 2 ชั่วโมง ภายใต้สภาพสุญญากาศ จะได้ไขมันปาล์มบริสุทธิ์ (Refined Bleached and Deodorized Palm Oil, RBD PO) หรือน้ำมันเมล็ดในปาล์มบริสุทธิ์ (Refined Bleached and Deodorized Palm Kernel Oil, RBD PKO)

2. วิธีทางเคมี (Chemical Refining) เป็นกระบวนการกำจัดกรดไขมันอิสระโดยใช้สารเคมี ที่นิยมคือ ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโซเดียมคาร์บอเนต ทำปฏิกิริยากับกรดไขมันอิสระในน้ำมัน ทำให้เกิดเป็นสบู่ จากนั้นแยกสบู่ออกโดยใช้วิธีการหมุนเหวี่ยง สำหรับความเข้มข้นของด่างที่ใช้ ปริมาณมากหรือน้อยแปรผันไปตามปริมาณของกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์ม การกลั่นน้ำมันปาล์มด้วยสารละลายด่าง เริ่มต้นด้วยการให้ความร้อนแก่น้ำมันปาล์มดิบที่อุณหภูมิ 80 ถึง 90 องศาเซลเซียส แล้วเติมกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 80 ถึง 85 เปอร์เซ็นต์ ในปริมาณ 0.05 ถึง 0.2 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นจึงเติมสารละลายด่างซึ่งจะทำให้เกิดสบู่ และแยกสบู่ออกด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยง และล้างโซสบู่ด้วยน้ำ จากนั้นจึงให้ความร้อนแก่น้ำมันเพื่อเป็นการไล่น้ำให้ระเหยออก แล้วจึงนำน้ำมันมาฟอกสี และกำจัดกลิ่นด้วยไอน้ำ ก็จะได้ไขมันปาล์มที่เรียกว่า Neutralized Bleached and Deodorized Palm Oil เป็นน้ำมันปาล์มที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์แล้ว โดย

จะแยกเป็นสองส่วนคือ ส่วนล่างมีลักษณะเป็นไขและส่วนบนมีลักษณะเป็นน้ำมันมีสีเหลืองอ่อนถึงเหลืองเข้ม เนื่องจากน้ำมันที่ได้มีคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพบางประการที่ไม่เหมาะสมสำหรับการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์บางชนิด จึงได้มีการศึกษาการตัดแปรคุณสมบัติของน้ำมันปาล์มโดยใช้กระบวนการต่างๆ เพื่อให้สามารถนำไปใช้ในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่หลากหลายชนิดมากขึ้น และมีผลิตผลที่เป็นผลพลอยได้ที่สำคัญ จากการกลั่นบริสุทธิ์น้ำมันปาล์ม คือ กรดไขมันปาล์ม หรือ Palm Fatty Acid Distillated (PFAD) ซึ่งนิยมใช้เป็นวัตถุดิบในการทำสบู่ อาหารสัตว์ และใช้เป็นสารตั้งต้นในการสกัดกรดไขมันชนิดต่างๆ หรือการสกัดวิตามินอีในอุตสาหกรรมออร์โกลานิก (สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร, 2003)

2.3 แอลกอฮอล์

แอลกอฮอล์ (Alcohol) เป็นสารที่ประกอบด้วย Carbon (C) Hydrogen (H) และ ตัว OH (Hydroxy group) หากมีคาร์บอน หนึ่งตัว ก็เรียกว่า Methyl Alcohol $\text{CH}_3\text{-OH}$ คาร์บอนสองตัว ก็เรียกว่า Ethyl Alcohol $\text{C}_2\text{H}_5\text{-OH}$ (แอลกอฮอล์, 2015)

2.3.1 เอทิลแอลกอฮอล์

เอทานอล (Ethanol) หรือ เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol) มีสูตรเคมี $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ เป็นแอลกอฮอล์ชนิดหนึ่งเป็นของเหลวไม่มีสีจุดไฟติดระเหยง่ายสามารถละลายได้ในน้ำ และสารละลายอินทรีย์อื่นๆ เอทานอลเป็นพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) ผลิตได้จากวัตถุดิบทางการเกษตรซึ่งแบ่งได้เป็น 3 ประเภท

1. วัตถุดิบประเภทน้ำตาล ได้แก่ น้ำอ้อย น้ำตาลจากบีท และกากน้ำตาลซึ่งยีสต์สามารถย่อยสลายวัตถุดิบประเภทนี้ได้เลยทันทีโดยไม่ต้องผ่านการย่อยเพื่อเป็นน้ำตาล (Pretreatment)

2. วัตถุดิบประเภทแป้ง ได้แก่ มันสำปะหลัง กล้วยพืชและมันฝรั่งในการผลิตจะต้องย่อยแป้งในวัตถุดิบให้เป็นน้ำตาลกลูโคสซึ่งเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเสียก่อนยีสต์จึงจะเปลี่ยนน้ำตาลเป็นเอทานอลได้

3. วัตถุดิบประเภทที่เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมเกษตร เช่น กากอ้อย ฟาง ข้าวซังข้าวโพด และของเสียจากอุตสาหกรรม เยื่อกระดาษ ฯลฯ

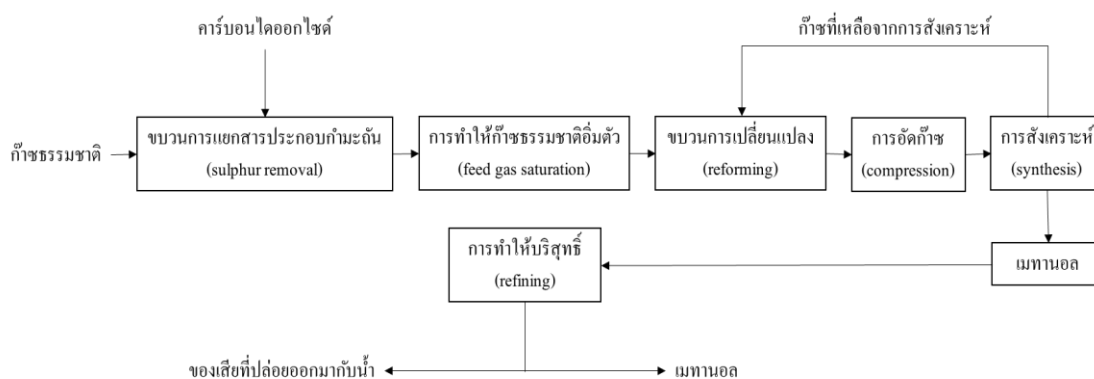
กระบวนการผลิตเอทานอล

การผลิตเอทานอลประกอบด้วยกระบวนการเตรียมวัตถุดิบสำหรับผลิตเอทานอล กระบวนการหมักและการแยกผลิตภัณฑ์เอทานอลและการทำให้บริสุทธิ์ซึ่งในขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบนั้นถ้าเป็นประเภทแป้งหรือเซลลูโลส เช่นมันสำปะหลัง และธัญพืชจะต้องนำไปผ่านกระบวนการย่อยแป้งหรือเซลลูโลสให้เป็นน้ำตาลก่อนด้วยการใช้กรดหรือเอนไซม์ ส่วนวัตถุดิบประเภทน้ำตาลเช่นกากน้ำตาลหรือน้ำอ้อย เมื่อปรับความเข้มข้นให้เหมาะสมแล้วสามารถนำไปหมักได้ในกระบวนการหมักจะเปลี่ยนน้ำตาลให้เป็นแอลกอฮอล์โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้ยีสต์ การเลือกใช้ชนิดของเชื้อจุลินทรีย์ที่เหมาะสมกับวัตถุดิบที่นำมาหมักจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการหมัก

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมักคือเอทิลแอลกอฮอล์หรือเอทานอลที่มีความเข้มข้นประมาณร้อยละ 8 - 12 โดยปริมาตร น้ำหมักที่ได้จากกระบวนการหมักจะนำมาแยกเอทานอลออกโดยใช้กระบวนการกลั่นลำดับส่วน ซึ่งสามารถแยกเอทานอลให้ได้ความบริสุทธิ์ประมาณร้อยละ 95 โดยปริมาตรจากนั้นจึงเข้าสู่กรรมวิธีในการแยกน้ำโดยการใช้โมเลกุลาร์ซีฟ (molecular sieve separation) เอทานอลที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 95 จะผ่านเข้าไปในหอคูดซับที่บรรจุตัวดูดซับประเภทซีโอไลต์โมเลกุลของเอทานอลจะไหลผ่านช่องว่างของซีโอไลต์ออกไปได้ แต่โมเลกุลของน้ำจะถูกดูดซับไว้ ทำให้เอทานอลที่ไหลออกไปมีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5 ส่วนซีโอไลต์ที่ดูดซับน้ำไว้จะถูกรีเจนเนอเรตโดยการไล่น้ำออก เอทานอลความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5 สามารถนำไปผสมกับน้ำมันเบนซินเพื่อใช้ในรถยนต์เครื่องยนต์เบนซินได้ (สมาคมการค้าผู้ผลิตเอทานอลไทย, 2013)

2.3.2 เมทิลแอลกอฮอล์

เมทานอล (methanol) หรือ เมทิลแอลกอฮอล์ (methyl alcohol) มีสูตรโครงสร้างแบบย่อ CH_3OH เป็นของเหลวใส ระเหยง่าย เป็นพิษ นิยมใช้เป็นตัวทำละลาย และใช้เป็นเชื้อเพลิงในธรรมชาติ เมทานอลเป็นผลิตภัณฑ์จากการสลายสารอาหารแบบไม่ใช้ออกซิเจนของแบคทีเรียหลายชนิด ซึ่งเมทานอลจะระเหยออกสู่อากาศภายนอก แล้วสลายตัวได้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ขึ้นตอน โดยสังเขปในการผลิตเมทานอลจากก๊าซธรรมชาติมีดังแสดงในรูปที่ 2.1 (การผลิตเมทานอลจากก๊าซธรรมชาติ, 1984)

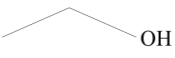
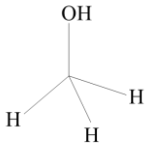


รูปที่ 2.1 แสดงการผลิตเมทานอลจากก๊าซธรรมชาติ

2.3.3 คุณสมบัติทางกายภาพของเอทิลแอลกอฮอล์และเมทิลแอลกอฮอล์

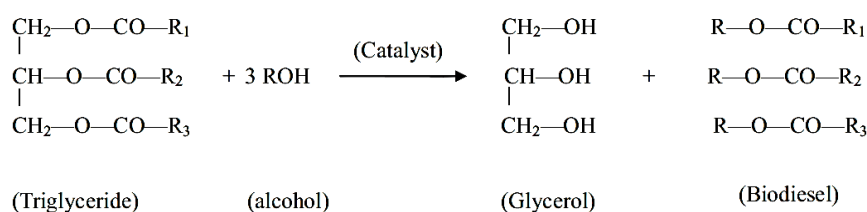
คุณสมบัติทางกายภาพของเอทิลแอลกอฮอล์และเมทิลแอลกอฮอล์นั้นจะมีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกันมาก ถึงแม้ว่าที่มาของแอลกอฮอล์ทั้งสองชนิดจะแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง ซึ่งจะแสดงคุณสมบัติทางกายภาพดังตารางที่ 2.1 (กรมควบคุมมลพิษ, 2015)

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของเอทิลแอลกอฮอล์และเมทิลแอลกอฮอล์

คุณสมบัติ	เอทิลแอลกอฮอล์	เมทิลแอลกอฮอล์
สูตรโมเลกุล	C_2H_6O	CH_4O
สูตรโครงสร้าง		
สถานะ	ของเหลว	ของเหลว
สี	ใส ไม่มีสี	ใส ไม่มีสี
กลิ่น	เฉพาะตัว	เฉพาะตัว
น้ำหนักโมเลกุล	46.07	32
จุดเดือด (°C)	78	64.6
จุดหลอมเหลว (°C)	-114	-97.8
ความถ่วงจำเพาะ (g/cm^3)	0.789	0.790
ความหนืด ที่ 20°C (mPa.sec)	0.59	1.2
ความดันไอ (mmHg)	43	96
จุดวาบไฟ (°C)	13	12.2
จุดลุกติดไฟได้เอง (°C)	363	464

2.4 กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน

เป็นกระบวนการเคลื่อนย้ายหมู่เอสเทอร์ หรือแอลกอฮอล์ไลซิส เป็นปฏิกิริยาแบบผันกลับได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยไตรกลีเซอไรด์จะทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ เกิดเป็นเอสเทอร์และกลีเซอรอล กระบวนการนี้เป็นที่นิยมใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพเชื้อเพลิงโดยเฉพาะการลดค่าความหนืดของน้ำมันพืช หรือไขมันสัตว์ เพื่อผลิตเป็นไบโอดีเซล ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันสามารถทำปฏิกิริยาที่ความดันบรรยากาศปกติ และอุณหภูมิในปฏิกิริยาไม่ควรสูงเกินกว่าจุดเดือดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ แต่ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นช้า ดังนั้นจึงต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้อัตราเร็วของปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้าได้เร็วขึ้น และควรเพิ่มปริมาณของแอลกอฮอล์ตั้งต้นให้เกินพอกจากทฤษฎีเพื่อให้สมดุลของปฏิกิริยาเลื่อนไปทางผลิตภัณฑ์มากขึ้น



รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน (Jutikaet al. , 2012)

2.5 ตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน

2.5.1 อัตราส่วนระหว่างแอลกอฮอล์กับน้ำมัน

อัตราส่วนระหว่างแอลกอฮอล์กับน้ำมันในกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน เมื่อมองจากสมการเคมีจะเห็นได้ชัดว่าเกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาระหว่างไตรกลีเซอไรด์ 3 โมล กับแอลกอฮอล์ 1 โมล จึงจะได้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการเป็นไบโอดีเซลและกลีเซอรอล ดังนั้นในการผลิตไบโอดีเซลจึงต้องใช้อัตราส่วนของแอลกอฮอล์ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลและเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลที่สูง

2.5.2 ชนิดและความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันจะเป็นตัวช่วยให้เกิดปฏิกิริยาเคมีและเกิดผลิตภัณฑ์ได้ดีขึ้น โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้กันทั่วไปมีอยู่ 3 ชนิด คือ เบสกรด และเอนไซม์ โดยในกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบสมากกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรด เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาเบสใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยกว่าและส่งผลต่อการกัดกร่อนอุปกรณ์ที่ใช้้น้อยกว่าตัวเร่งปฏิกิริยากรด ส่วนข้อจำกัดของตัวเร่งปฏิกิริยาเบสคือน้ำและปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันเริ่มต้น ถ้ามีปริมาณมากจะทำให้เกิดสบู่ขึ้นแทนที่จะได้น้ำมันไบโอดีเซลเป็นผลิตภัณฑ์

2.5.3 เวลาและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา

เวลาที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลจะแปรผันตรงกับอัตราการเกิดไบโอดีเซล นั่นคือถ้าเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นอัตราการเกิดไบโอดีเซลก็จะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่คงที่ ซึ่งก็จะขึ้นอยู่กับตัวแปรอื่นๆ ด้วย เช่น อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา โดยอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาก็เป็นปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลทั่วไปจะควบคุมอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาให้ใกล้เคียงกับจุดเดือดของแอลกอฮอล์เพื่อป้องกันการระเหยของแอลกอฮอล์ขณะทำปฏิกิริยา

2.5.4 เวลาในการทำปฏิกิริยา

การกวนผสมถือเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ เนื่องจากการที่จะทำให้ไตรกลีเซอไรด์และแอลกอฮอล์นั้นทำปฏิกิริยากันอย่างสมบูรณ์ ต้องมีเทคนิคในการผสมเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างกันให้มากที่สุด ปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันจึงจะเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ได้ไบโอดีเซลโดยที่ใช้ระยะเวลาสั้นลงอีกด้วย

2.6 ประเภทของเครื่องปฏิกรณ์

2.6.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (batch reactor)

หลักการทำงานคือ นำสารทำปฏิกิริยาทั้งหมด ป้อนเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ทิ้งไว้ก่อนแล้วจึงเริ่มปฏิกิริยา เมื่อเสร็จสิ้นปฏิกิริยาตามเวลาที่กำหนด จึงนำของผสม(สารทำปฏิกิริยาที่ยังเหลืออยู่ และผลิตภัณฑ์) ออกจากเครื่องปฏิกรณ์ โดยทั่วไปจะใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน โดยมีใบกวนช่วยกวนสารทำปฏิกิริยาให้มีอุณหภูมิและความเข้มข้นเท่ากันตลอด การถ่ายเทความร้อนทำโดยการติดตั้งแจ็กเก็ต บริเวณรอบถังหรือใช้คอยล์ติดตั้งภายในถังได้ในปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ วัฏภาคของเหลวและปฏิกิริยาวิวิพันธ์วัฏภาคก๊าซ-ของเหลว วัฏภาคก๊าซ-ของเหลว-ของแข็งที่เป็นคละตะลิสต์ และวัฏภาคของเหลว-ของเหลว

2.6.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่อง (continuous stirred tank reactor)

เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่อง เรียกสั้นๆว่า CSTR สารทำปฏิกิริยาทั้งหมดจะถูกป้อนเข้าที่ทางเข้าของเครื่องปฏิกรณ์อย่างต่อเนื่อง โดยมีใบกวนช่วยกวนสารทำปฏิกิริยาให้มีอุณหภูมิและความเข้มข้นเท่ากันตลอด ใบกวนมีหน้าที่นอกจากทำให้สารทำปฏิกิริยามีเนื้อเดียวกันแล้ว ยังช่วยเพิ่มการถ่ายเทมวลและความร้อน

2.6.3 เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง (continuous reactor)

สารทำปฏิกิริยาป้อนเข้าที่ทางเข้าเครื่องปฏิกรณ์อย่างต่อเนื่อง ผลิตภัณฑ์ที่ได้ไหลออกมาที่ทางออก ลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์แบบนี้มีทั้งรูปแบบถังกวนและแบบท่อไหล

ตารางที่ 2.2 แสดงการจำแนกและลักษณะการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ (สิทธิพันธ์ ท่อแก้ว, 2012)

การทำงาน (Operation)	ลักษณะการทำงาน	ข้อดีและการประยุกต์ใช้ใน อุตสาหกรรม
แบบกะ (Batch) หรือ ไม่ ต่อเนื่อง	สารตั้งต้นทั้งหมดถูกป้อนเข้าไปในถัง ปฏิกรณ์ แล้วจึงเริ่มทำปฏิกิริยา เมื่อเสร็จ สิ้นปฏิกิริยาตามเวลาที่กำหนด จึงนำ ของผสม(สารตั้งต้นที่เหลืออยู่และ ผลิตภัณฑ์) ออกจากถังปฏิกรณ์	-มีโครงสร้างง่าย ๆ -กำลังการผลิตต่ำ -เหมาะกับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก เช่น การหมัก อุตสาหกรรมผสมสี
แบบไหล ต่อเนื่อง (Flow or Continuous)	สารทำปฏิกิริยาป้อนเข้าที่ทางเข้าเครื่อง ปฏิกรณ์อย่างต่อเนื่อง และผลิตภัณฑ์ที่ ได้ไหลออกมาที่ทางออก	-ได้ผลผลิตอย่างต่อเนื่อง กำลังการ ผลิตสูง -เหมาะกับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ เช่น การผลิตพลาสติก

2.7 ข้อดีและข้อด้อยระหว่างการใช้ใบกวนกับการใช้ท่อผสมสถิต

ท่อผสมสถิต (static mixer) เป็นอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อทำหน้าที่ผสมสารต่างชนิดเข้าด้วยกันเช่นเดียวกับการใช้ใบกวน (stirrer) โดยท่อผสมสถิตจะไม่ใช้พลังงานใดๆ เนื่องจากไม่มีส่วนใดเคลื่อนไหว และการผสมจะเกิดขึ้นเมื่อสารที่ต้องการผสมไหลผ่านชุดท่อผสมสถิตทำให้เกิดการปั่นป่วนโดยเร็ว และเมื่อเปรียบเทียบกับการกวนผสมด้วยใบกวนทำให้เห็นข้อแตกต่างดังแสดงในตารางที่ 2.3

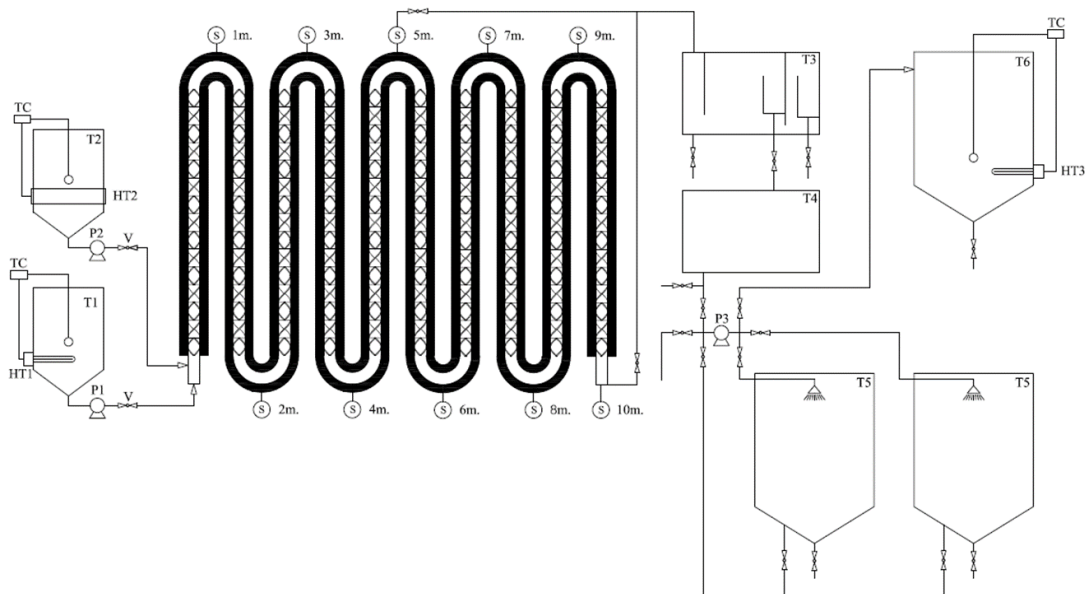
ตารางที่ 2.3 แสดงข้อเปรียบเทียบระหว่างการใช้ใบกวนและท่อผสมแบบสถิต

ข้อเปรียบเทียบ	ท่อผสมสถิต	ใบกวน
พื้นที่ติดตั้ง	เล็กกว่า	ใหญ่กว่า
ค่าอุปกรณ์การผลิต	ต่ำกว่า	สูงกว่า
การสิ้นเปลืองพลังงานในการใช้งาน	น้อยกว่า	มากกว่า
ระยะเวลาการผสม	เร็วกว่า	ช้ากว่า
การถอดเพื่อ ซ่อมแซม ทำความสะอาด	ง่ายกว่า	ยากกว่า

บทที่ 3

การออกแบบท่อผสมสติดแบบต่อเนื่องของกระบวนการทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน

การออกแบบและสร้างชุดทดสอบกระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์แบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ด้วยท่อผสมแบบสติดขนาดความยาวท่อผสม 10 เมตร ส่วนประกอบต่างๆ แสดงดังในรูปที่ 3.1 เป็นแบบร่างชุดทดสอบกระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์แบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ด้วยท่อผสมแบบสติด



รูปที่ 3.1 ร่างแบบชุดทดสอบกระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์แบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ด้วยท่อผสมแบบสติด (S: sampling port, T1: RPO tank, T2: KOH in alcohol

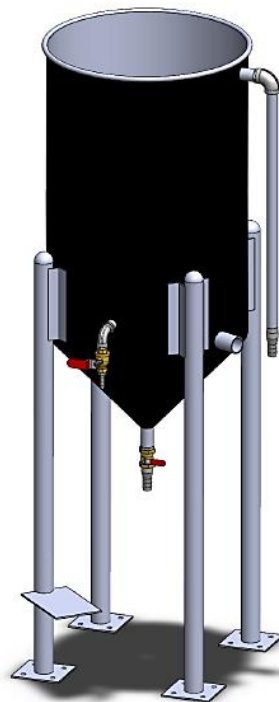
tank, P1: oils pump, P2: alcohol pump, P3: biodiesel pump, HT: heater, V: valve,

TC: temperature control, T3: separate tank, T4: crude biodiesel tank,

T5: washing tank and T6: biodiesel tank)

3.1 ถังปฏิกรณ์

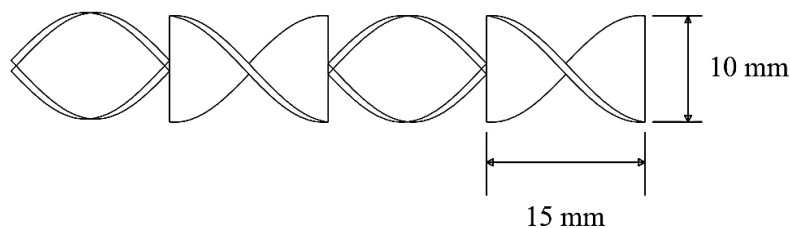
ถังส่วนใหญ่ที่ใช้จะออกแบบให้เป็นถังทรงกระบอกเพื่อง่ายและเร็วในการจัดสร้าง ก้นถังจะสร้างเป็นรูปทรงกรวยเพื่อให้ของเหลวตกลงสู่ก้นถังเพื่อให้ป้อนสามารถดูดของเหลวได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ และสะดวกสำหรับการล้างทำความสะอาดโดยจะไม่มีสิ่งใดตกค้างอยู่ในถัง โดยรูปทรงของถังที่เหมือนกัน เช่น ถังน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ ถังแอลกอฮอล์ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ถังล้าง และถังเก็บไบโอดีเซล ส่วนถังแยกกลีเซอรอลจะเป็นถังทรงกระบอกแนวนอนเนื่องจากจะมีรายละเอียดภายในที่ซับซ้อน ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงรูปทรงของถังที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้

3.2 ผลการออกแบบท่อผสมแบบสถิติในระดับห้องปฏิบัติการ

การออกแบบท่อผสมแบบสถิติในระดับห้องปฏิบัติการเพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับนำไปออกแบบและสร้างชุดปฏิบัติการผลิตเอธิลเอสเทอร์แบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ด้วยท่อผสมแบบสถิติ เช่น ความยาวของท่อผสมแบบสถิติที่ใช้ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เป็นต้น โดยใช้ท่อสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 มิลลิเมตร เพื่อทำการติดตั้งแผ่นบิดภายในที่สร้างขึ้นจากสแตนเลส 304L ความหนา 1 มิลลิเมตร แต่ละอิลิเมนต์มีอัตราส่วน ความกว้างต่อความยาวเท่ากับ 1.5 บิดให้เป็นเกลียวทามุม 180 องศา เชื่อมกันต่อโดยทามุม 90 องศา อิลิเมนต์ชนิดนี้เรียกว่า twisted-ribbon มีความยาว 15 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะของแผ่นบิดที่ใช้ติดตั้งภายในท่อสแตนเลส

นอกจากความยาวท่อผสมสถิติจะเป็นตัวแปรที่สำคัญแล้ว อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาก็ถือเป็นตัวแปรสำคัญต่อการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องโดยใช้ท่อผสมสถิติเช่นกัน ต่อมาได้ทำการทดลองและวัดอุณหภูมิที่จุดเก็บตัวอย่างตั้งแต่ 1 เมตร จนถึง 10 เมตร ที่เงื่อนไข น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 75°C เอทานอล 60 vol.% ผสมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 14 gKOH/L ทำการแปรค่าอุณหภูมิสารผสมที่ 30, 50, และ 70°C จึงได้ผลของอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์รีฟิเคชันดังตารางที่ 3.1 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาจะลดลงตามความยาวท่อผสมสถิติที่เพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 3.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขิงสารผสมทุก 1 เมตร ที่เงื่อนไขน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 75°C เอทานอล 60 vol.% ผสมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 14 gKOH/L

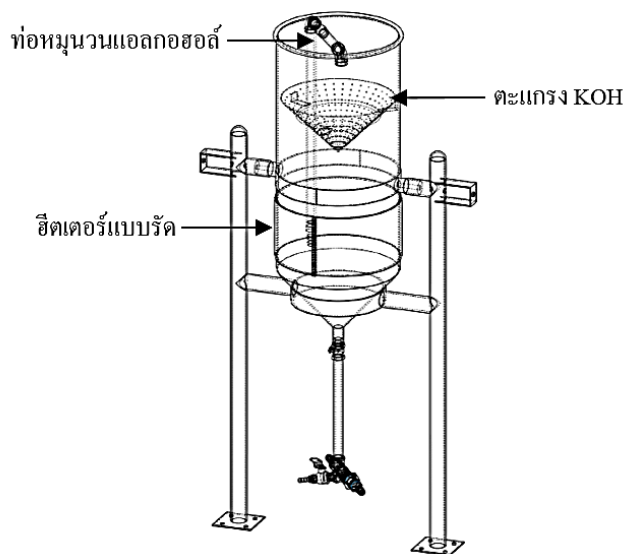
ความยาวท่อผสมสติก (เมตร)	อุณหภูมิของของเหลวภายในท่อผสมสติก (°C)		
	เอทานอล ผสม KOH	เอทานอล ผสม KOH	เอทานอล ผสม
	ที่ 30°C	ที่ 50°C	KOH ที่ 70°C
1	54.4	58.8	63.6
2	54.9	58.9	63.4
3	54.3	58.2	63.7
4	54.6	57.8	63.3
5	54.4	57.5	62.9
6	54.2	57.2	62.5
7	52.6	57.4	62.0
8	51.6	56.9	61.7
9	51.9	56.9	61.4
10	51.8	56.7	61.6

3.3 ผลการออกแบบท่อผสมแบบสติกสำหรับการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ด้วยท่อผสมแบบสติก

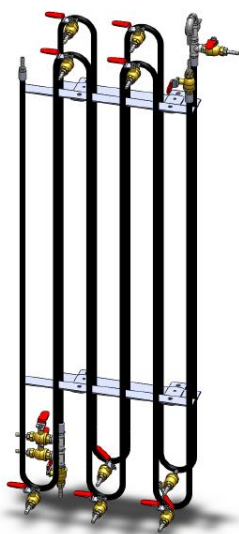
หลังจากได้ทำการทดลองการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยท่อผสมแบบสติกความยาว 10 เมตร ในระดับห้องปฏิบัติการแล้ว ได้ข้อสรุปว่าท่อผสมแบบสติกความยาว 10 เมตร เป็นความยาวที่เพียงพอ เนื่องจากสามารถผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยท่อผสมแบบสติกที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์สูงกว่า 96.5 wt.%

จากข้อมูลเบื้องต้นของการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยท่อผสมแบบสติกในระดับห้องปฏิบัติการ ที่ใช้อุณหภูมิสารผสม (แอลกอฮอล์ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์) 30°C , 50°C และ 70°C ทำให้เกิดสมมุติฐานขึ้นว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิตลดลง และทำให้ความยาวท่อผสมสติกที่ใช้ลดลง จึงทำการออกแบบชุดถังบรรจุสารผสมให้สามารถเพิ่มอุณหภูมิของสารผสมดังแสดงในรูปที่ 3.4 เพื่อทำการออกแบบ

เงื่อนไขการทดลองแปรค่าอุณหภูมิของสารผสมและทำการเก็บตัวอย่างที่ความยาวท่อผสมสถิต 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, และ 10 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งทำการติดท่อฉนวนกันความร้อนรอบท่อ เพื่อลดการสูญเสียความร้อน ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยท่อผสมแบบสถิต



รูปที่ 3.4 ถังบรรจุแอลกอฮอล์ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ของระบบ



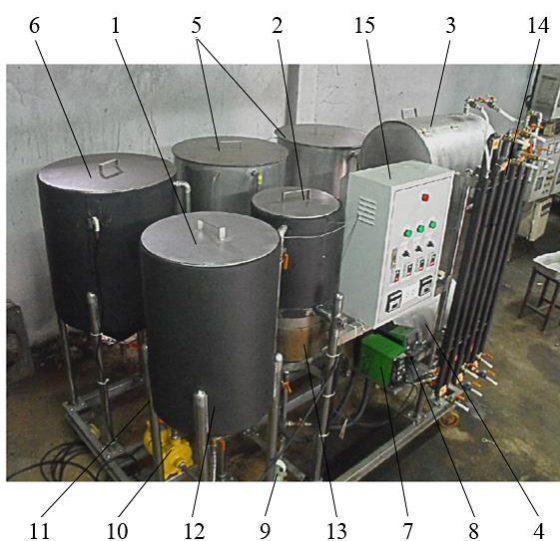
รูปที่ 3.5 ลักษณะของท่อผสมแบบสถิตของระบบการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง

บทที่ 4

อุปกรณ์และการดำเนินการวิจัย

4.1. อุปกรณ์การทดลองการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ด้วยท่อผสมแบบสถิต

อุปกรณ์การทดลองการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ด้วยท่อผสมแบบสถิต ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 คือ ถังเก็บน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ และ ถังเก็บแอลกอฮอล์ (เอทานอล/เมทานอล) ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้ digital dosing pumps (GRUNDFOS) รุ่น DME 48-3 และ DDA 30-4 ตามลำดับ เพื่อป้อนน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ และแอลกอฮอล์ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เข้าสู่ท่อผสมแบบสถิตที่สร้างขึ้นจากสแตนเลส 304L ความหนา 1 มิลลิเมตร ความกว้าง 10 มิลลิเมตร และ ความยาว 15 มิลลิเมตร ถูกบิดให้เป็นเกลียวทามุม 180 องศา เรียกอีลิเมนต์ชนิดนี้ว่า twisted-ribbon แต่ละอีลิเมนต์เชื่อมต่อทามุม 90 องศา ติดตั้งภายในท่อสแตนเลสที่หุ้มฉนวนเพื่อรักษาอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา วัสดุบิดภายในถึงทั้งสองถึงจะถูกให้ความร้อน ด้วย immersion heater ขนาด 2000 วัตต์ และ band heater ขนาด 2000 วัตต์ ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 ชุดทดลองกระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์แบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ด้วยท่อผสมแบบสถิต

ตาราง 4.1 แสดงชื่ออุปกรณ์ของชุดทดลองกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันแบบต่อเนื่องด้วย
ท่อผสมแบบสถิต

หมายเลข	ชื่ออุปกรณ์
1	ถังน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์
2	ถังแอลกอฮอล์ (เอทานอล/เมทานอล) ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์
3	ถังแยกไบโอดีเซลก่อนล้าง
4	ถังพักไบโอดีเซลก่อนล้าง
5	ถังล้าง
6	ถังเก็บไบโอดีเซล
7	Digital dosing pump (GRUNDFOS Model DME 48-3) เพื่อป้อนน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์
8	Digital dosing pump (GRUNDFOS Model DDA 30-4) เพื่อป้อนแอลกอฮอล์ผสมตัวเร่งปฏิกิริยา KOH
9	Magnetic driven pump (SANSE PMD-211) เพื่อไหลวนแอลกอฮอล์ผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยา KOH
10	Centrifugal pump (SUPER PUMP ACH-375S) เพื่อไหลวนน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์
11	Centrifugal pump (SUPER PUMP ACH-375S) เพื่อป้อนไบโอดีเซลเข้าถังล้างและถังเก็บ
12	Immersion heater (ขนาด 2000 วัตต์) เพื่ออุ่นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์
13	Band heater (ขนาด 2000 วัตต์) เพื่ออุ่นแอลกอฮอล์ผสมตัวเร่งปฏิกิริยา KOH
14	ท่อผสมแบบสถิต
15	ผู้ควบคุม

4.2 วัตถุดิบและสารเคมี

- 4.2.1 น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ (กรดไขมันอิสระ 0.5 mgKOH/g)
- 4.2.2 เอทานอล (commercial grade 99%)
- 4.2.3 เมทานอล (commercial grade 98%)
- 4.2.4 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (commercial grade 95%)
- 4.2.5 ฟีนอล์ฟทาลินอินดิเคเตอร์
- 4.2.6 ไอโซโพรพานอล
- 4.2.7 เฮกเซน
- 4.2.8 กรดฟอร์มิก
- 4.2.9 เบนซีน
- 4.2.10 ไดเอทิล อีเทอร์

4.3 การวางแผนการทดลอง

เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ด้วยท่อผสมแบบสถิตที่อุณหภูมิสารผสมเริ่มต้นคงที่ 30°C, 60°C, 30°C และ 75°C โดยใช้เทคนิค response surface methodology, RSM ออกแบบการทดลองแบบ central composite design, CCD เพื่อนำไปวิเคราะห์หาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด และรูปแบบของสมการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ คือ ปริมาณแอลกอฮอล์ และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของเอสเตอร์ ซึ่งอยู่ในรูปความสัมพันธ์ ดังแสดงในสมการที่ 4.1

$$\text{Ester} = f(A, K) \quad (4.1)$$

โดยที่

Ester คือ เปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซล, *A* คือ ปริมาณแอลกอฮอล์ และ *K* คือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

การออกแบบการทดลองแบบ central composite design, CCD เป็นเทคนิคหนึ่งในการวิเคราะห์หาพื้นผิวตอบสนอง การวางแผนการทดลองแบบ CCD ประกอบด้วย 2^k factorial ในแนวแกนหรือในแนวรูปดาว กรณีที่ออกแบบการทดลองโดยมีตัวแปรอิสระ 2 ตัวแปร 2^k factorial จะประกอบด้วย $(-1,-1)$, $(+1,-1)$, $(-1,+1)$, $(+1,+1)$ แต่ในแนวแกนหรือในแนวรูปดาวจะประกอบด้วย $(-\alpha, 0)$, $(+\alpha, 0)$, $(0,-\alpha)$, $(0,+\alpha)$ และที่จุดศูนย์กลางของการทดลองที่ออกแบบจะมีการกระทำซ้ำ 4-6 การทดลอง ในงานวิจัยครั้งนี้มีตัวแปรอิสระ 2 ตัวแปร ดังนั้นจะประกอบด้วย 5 ระดับของแต่ละตัวแปร คือ $(-1.414, -1, 0, +1, +1.414)$ หรือสามารถหาจุดแกนของระดับในแต่ละตัวแปรอิสระของการทดลองได้จากสมการที่ 4.2

$$\alpha = \sqrt[4]{2^k} \quad (4.2)$$

โดยที่ α คือจุดแกน, k คือจำนวนตัวแปรอิสระ

การออกแบบการทดลองแบบ central composite design, CCD 2 ตัวแปรอิสระมี 5 ระดับของ code ตัวแปร จากการใช้โปรแกรม essential experimental design and essential regression version 2.209 ต้องทำการทดลองทั้งหมด 12 การทดลอง เพื่อทำการวิเคราะห์หาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ด้วยท่อผสมแบบสถิต และรูปแบบของสมการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระที่สนใจ คือ ปริมาณแอลกอฮอล์ และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่มีผลต่อการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ด้วยท่อผสมแบบสถิต ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และได้แสดงแผนการทดลองที่เงื่อนไขต่างๆ ตามช่วงการแปรค่าของตัวแปรอิสระ ซึ่งมีการทดลองทั้งหมด 12 การทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และได้แสดงรูปและขั้นตอนการออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรมใน ภาคผนวก ก

ตารางที่ 4.2 แสดงช่วงการแปรค่าของตัวแปรอิสระ

ตัวแปรอิสระ	หน่วย	ระดับของตัวแปรอิสระ				
		-1.414	-1	0	1	1.414
แอลกอฮอล์	% โดยปริมาตร	17	25	45	65	73
โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	g / Liter of oil	7.8	9	12	15	16.2

ตารางที่ 4.3 แสดงแผนการทดลองที่สภาวะต่างๆ สำหรับกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันแบบต่อเนื่องด้วยท่อผสมแบบสถิต

การทดลองที่	A : แอลกอฮอล์ (% โดยปริมาตร)	K : โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (g / Liter of oil)
	1	17
2	45	16.2
3	65	9.0
4	73	12.0
5	45	12.0
6	25	9.0
7	45	7.8
8	45	12.0
9	25	15.0
10	45	12.0
11	45	12.0
12	65	15.0

4.4 ขั้นตอนการทดลอง

4.4.1 การทดลองกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันแบบต่อเนื่องด้วยเอทานอล

ทำการอุ่นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์เพื่อลดความหนืดโดยการให้ความร้อนจากฮีตเตอร์เปิดปั๊มไหลวนน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์เพื่อให้อุณหภูมิสม่ำเสมอทั่วทั้งถัง รอจนน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์อุณหภูมิถึง 75°C ถัดมา ทำการผสมเอทานอลกับตัวเร่งปฏิกิริยา KOH ซึ่งเป็นของแข็ง โดยใช้ปั๊มไหลวนเอทานอลเพื่อละลายตัวเร่งปฏิกิริยา KOH ให้ละลายเข้าด้วยกันจนหมด (อุณหภูมิ 30°C และ 75°C) ปรับอัตราการไหลปั๊มเพื่อป้อนน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 20 ลิตรต่อชั่วโมง และปรับอัตราการไหลปั๊มเพื่อป้อนเอทานอลผสมตัวเร่งปฏิกิริยา KOH ตามเงื่อนไขการทดลอง น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์และเอทานอลผสมตัวเร่งปฏิกิริยา KOH จะถูกป้อนเข้าสู่ท่อผสมแบบสถิตความยาว 10 เมตร ทำให้เกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน ซึ่งท่อผสมแบบสถิตจะติดตั้งวาล์วทุกๆความยาว 1 เมตรเพื่อทำการเก็บตัวอย่าง การเก็บตัวอย่างทุกครั้งต้องหยุดการทำปฏิกิริยาทันทีด้วยการแช่น้ำเย็นที่มีอุณหภูมิประมาณ 0°C เมื่อวัดอุณหภูมิต่อท่อผสมแบบสถิตทำให้เกิดเป็นเอทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอล ขั้นตอนต่อไปเป็นการแยกกลีเซอรอลออกจากเอทิลเอสเทอร์ โดยมีถังแยกทำหน้าที่แยกเก็บเฉพาะเอทิลเอสเทอร์เข้าสู่ถังพักก่อนทำการล้าง และ อุ่นแยกน้ำที่ตกค้างจากขั้นตอนการล้างจนหมด จึงเสร็จสิ้นกระบวนการผลิตเอทิลเอสเทอร์

4.4.2 การทดลองกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันแบบต่อเนื่องด้วยเมทานอล

นอล

ทำการอุ่นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์เพื่อลดความหนืดโดยการให้ความร้อนจากฮีตเตอร์เปิดปั๊มไหลวนน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์เพื่อให้อุณหภูมิสม่ำเสมอทั่วทั้งถัง รอจนน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์อุณหภูมิถึง 60°C ถัดมา ทำการผสมเมทานอลกับตัวเร่งปฏิกิริยา KOH ซึ่งเป็นของแข็ง โดยใช้ปั๊มไหลวนเมทานอลเพื่อละลายตัวเร่งปฏิกิริยา KOH ให้ละลายเข้าด้วยกันจนหมด (อุณหภูมิ 30°C และ 60°C) ปรับอัตราการไหลปั๊มเพื่อป้อนน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 20 ลิตรต่อชั่วโมง และปรับอัตราการไหลปั๊มเพื่อป้อนเมทานอลผสมตัวเร่งปฏิกิริยา KOH ตามเงื่อนไขการทดลอง น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์และเมทานอลผสมตัวเร่งปฏิกิริยา KOH จะถูกป้อนเข้าสู่ท่อผสมแบบสถิตความยาว 10 เมตร ทำให้เกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน ซึ่งท่อผสมแบบสถิตจะติดตั้งวาล์วทุกๆความยาว 1 เมตรเพื่อทำการเก็บตัวอย่าง การเก็บตัวอย่างทุกครั้งต้องหยุดการทำปฏิกิริยาทันทีด้วยการแช่น้ำเย็นที่มี

อุณหภูมิประมาณ 0°C เมื่อวัตถุดิบผ่านท่อผสมแบบสถิตทำให้เกิดเป็นเมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอล ขั้นตอนต่อไปเป็นการแยกกลีเซอรอลออกจากเมทิลเอสเทอร์โดยมีถังแยกทำหน้าที่แยกเก็บเฉพาะเมทิลเอสเทอร์เข้าสู่ถังพักก่อนทำการล้าง และ อุ่นแยกน้ำที่ตกค้างจากขั้นตอนการล้างจนหมด จึงเสร็จสิ้นกระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์

4.5 การวิเคราะห์ตัวอย่าง

การวิเคราะห์หาองค์ประกอบต่างๆ ในน้ำมันด้วยเทคนิค Thin layer chromatography/flame ionization detection (TLC/FID)

น้ำมันที่จะทำการการวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเทคนิค TLC/FID นั้นจะต้องผ่านการล้างด้วยน้ำก่อน เพื่อกำจัดสิ่งที่เป็นพิษมาจากกระบวนการผลิต เช่น แอลกอฮอล์ ตัวเร่งปฏิกิริยาเบส กลีเซอรอล เป็นต้น ซึ่งสิ่งดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของสารที่ไม่เท่ากัน ทำให้ผลการวิเคราะห์ผิดพลาดไปจากผลการทดลองจริง เทคนิค TLC/FID ที่ใช้วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Itronscan MK-6S และ chromarod type S-III quartz rod (Mitsubishi Kagaku Iatron Inc., Japan) มีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

1. หยดตัวอย่างน้ำมันที่จะทดสอบ 1 หยด ผสมกับสารละลายเฮกเซน เขย่าให้เข้ากัน แล้วทำการหยดลงบน chromarod
2. นำ chromarod ที่หยดตัวอย่างแล้ว ไปแช่ในสารละลายที่ 1 ประกอบด้วย เฮกเซน: ไดเอทิล อีเทอร์: กรดฟอร์มิก (50:20:0.3 โดยปริมาตร) รอนสารเคลื่อนที่ถึง 8 เซนติเมตร
3. นำ chromarod จากสารละลายที่ 1 ไปแช่ในสารละลายที่ 2 ประกอบด้วย เฮกเซน: เบนซีน (1:1 โดยปริมาตร) รอนสารเคลื่อนที่ถึง 10 เซนติเมตร
4. นำ chromarod จากสารละลายที่ 2 ไปอบด้วยเครื่อง rod dryer TK-8 ที่อุณหภูมิ 105°C ประมาณ 10 นาที
5. นำ chromarod เข้าเครื่องวิเคราะห์ IATRONSCAN MK-65 เพื่อแยกองค์ประกอบของน้ำมัน โดยแยกชนิดขององค์ประกอบจากการเคลื่อนที่ของสารที่ไม่เท่ากัน

4.6 การหารูปแบบสมการทำนายความสัมพันธ์และสถานะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการทรานส์เอสเทอร์รีฟิเคชันแบบต่อเนื่อง

เทคนิค response surface methodology, RSM เป็นเทคนิคที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการออกแบบเงื่อนไขการทดลองที่มีตัวแปรอิสระหลายตัว ซึ่งจะทำการออกแบบการทดลองตามขอบเขตเงื่อนไขการทดลองที่ผู้ใช้ต้องการ โดยจะครอบคลุมขอบเขตการทดลองและช่วยลดจำนวนของการทดลองลงด้วย เทคนิคนี้สามารถหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองของตัวแปรอิสระ โดยใช้วิธี multiple regression ทำการวิเคราะห์หารูปแบบ 2rd order model ดังแสดงในสมการที่ 4.3 (Ghadge และคณะ, 2006)

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j=1}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (4.3)$$

โดยที่ \hat{y} คือ ค่าของผลตอบสนอง, k คือ จำนวนของตัวแปรอิสระ, x_i, x_j คือ ตัวแปรอิสระที่เป็นรหัสตัวเลข, $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ คือ ค่าคงที่, ค่าสัมประสิทธิ์ของพจน์ตัวแปรกำลังหนึ่ง, ค่าสัมประสิทธิ์ของพจน์ตัวแปรกำลังสอง และ ค่าสัมประสิทธิ์ของพจน์ตัวแปรร่วมตามลำดับ

ผลการทดลองที่ได้จากเงื่อนไขการทดลองทั้งหมดเมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธี multiple regression ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จะทำให้ได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองของตัวแปรอิสระที่ยังไม่ได้ทำการตัดพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญต่อผลตอบสนอง (y) ออก โดยทำการพิจารณาแต่ละพจน์จากค่า P-value พจน์ที่มีค่า P-value สูงกว่า 0.05 ถือเป็นพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญต่อสมการความสัมพันธ์ จึงสามารถตัดพจน์ดังกล่าวออกได้ หรือ $F_0 > F_{\alpha, i, n-1-i}$ โดยที่ α เท่ากับ 0.05 (ระดับความเชื่อมั่น 95%), i คือ จำนวนพจน์ทั้งหมดของสมการความสัมพันธ์, n คือ จำนวนการทดลอง และ $F_{critical}$ ดูจากตาราง F-test

สถานะที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ด้วยท่อผสมแบบสถิติจะเป็นไปตามสมการแสดงความสัมพันธ์ที่ได้ภายใต้เงื่อนไขของตัวแปรอิสระ ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และทำการแก้สมการโดยใช้ Add Ins tool Excel solver ใน MS Excel เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลที่สูงที่สุดภายใต้เงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดขึ้น

ตารางที่ 4.4 แสดงขอบเขตเงื่อนไขการทดลองของตัวแปรอิสระ

ตัวแปรอิสระ	ขอบเขตของตัวแปรอิสระ	หน่วย
ปริมาณแอลกอฮอล์ (A)	$25 \leq A \leq 65$	% โดยปริมาตร
โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (K)	$9 \leq K \leq 15$	g / Liter of oil

บทที่ 5

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

5.1 ผลการศึกษาหารูปแบบสมการทำนายความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยท่อผสมแบบสถิต

ผลจากการวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลตามแผนการทดลองทั้งหมดด้วยเทคนิค TLC/FID ได้แสดงผลการทดลองของเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด และสมการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลกับตัวแปรอิสระ โดยวิธี multiple regression ระดับความเชื่อมั่น 95% ทำให้ได้สมการทำนายความสัมพันธ์ที่ยังไม่ได้ทำการตัดพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญออก โดยพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญนั้นจะสังเกตได้จากค่า P-value ถ้าค่า P-value มีค่ามากกว่า 0.05 ถือว่าพจน์ดังกล่าวเป็นพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญต่อสมการ สามารถตัดออกได้ เพื่อให้เหลือเพียงพจน์ที่มีนัยสำคัญต่อสมการที่มีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ตัวแปรที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซล คือ ปริมาณแอลกอฮอล์ และ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

5.1.1 ผลการศึกษาหารูปแบบสมการทำนายความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยท่อผสมแบบสถิตโดยใช้เมทานอลอุณหภูมิ 30°C

ผลการทดลองการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยท่อผสมแบบสถิตที่มีความยาว 10 เมตร โดยใช้น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์อุณหภูมิ 60°C เมทานอลผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 30°C ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันผ่านท่อผสมสถิตตามเงื่อนไขการทดลองที่ได้ออกแบบมาทั้งหมด จะได้สมการทำนายความสัมพันธ์ที่มีผลต่อที่ทำการตัดพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญแล้ว ดังสมการที่ 5.1, 5.2 และ 5.3 โดยแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของสมการทำนายความสัมพันธ์ของสมการในตารางที่ 5.1 ซึ่งสรุปได้ว่า ปริมาณเมทานอล และ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซล แสดงปริมาณ

การใช้เมทานอลและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ต่อผสมสติดความยาวต่างๆ เพื่อให้ได้เมทิลเอสเทอร์ความบริสุทธิ์ 99 wt.% ดังรูปที่ 5.1 นำสมการทำนายความสัมพันธ์ที่ 5.2 ซึ่งมีค่าทางสถิติที่น่าเชื่อถือที่สุดและใช้ปริมาณสารเคมีน้อยที่สุดจากต่อผสมสติดความยาว 5 เมตร ไปสร้างกราฟ contour เพื่อแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลกับ ปริมาณเมทานอล และ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ดังรูปที่ 5.2 และแสดงองค์ประกอบของน้ำมันที่เปลี่ยนแปลงไปตามความยาวต่อผสมสติด ดังรูปที่ 5.3

$$\text{Ester (4 meter)} = \beta_0 + \beta_1M + \beta_2K + \beta_3MK + \beta_4K^2 + \beta_5M^2K + \beta_6MK^2 \quad (5.1)$$

$$\text{Ester (5 meter)} = \beta_0 + \beta_1M + \beta_2MK + \beta_3M^2K + \beta_4MK^2 \quad (5.2)$$

$$\text{Ester (8 meter)} = \beta_0 + \beta_1M + \beta_2K + \beta_3MK + \beta_4K^2 + \beta_5MK^2 \quad (5.3)$$

โดยที่

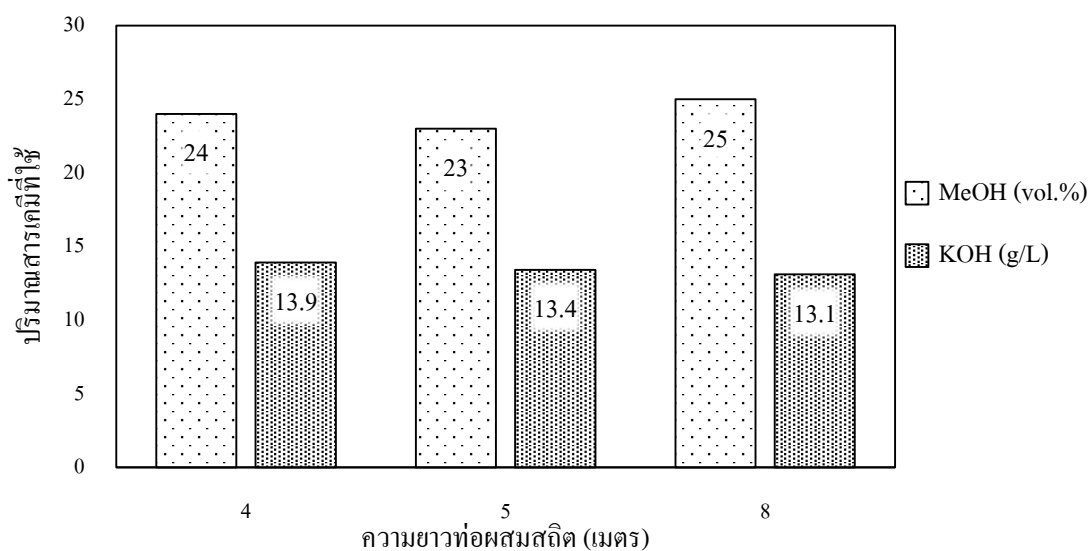
Ester = เปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซล, M = เมทานอล, K = โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และ β = ค่าสัมประสิทธิ์

ตารางที่ 5.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของสมการทำนายความสัมพันธ์ของสมการ ที่อุณหภูมิน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 60°C และอุณหภูมิสารผสม 30°C

สัมประสิทธิ์	ความยาวของต่อผสมสติด		
	4 เมตร	5 เมตร	8 เมตร
β_0	188.18	94.38	142.86
β_1	-1.755	-0.229	-0.721
β_2	-15.33	0.06290	-7.545
β_3	0.304	-0.000198	0.119
β_4	0.590	-0.00221	0.303
β_5	-0.000160	-	-0.00472
β_6	-0.01131	-	0.00000305

ตารางที่ 5.1 (ต่อ) แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของสมการทำนายความสัมพันธ์ของสมการ ที่อุณหภูมิ น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 60°C และอุณหภูมิสารผสม 30°C

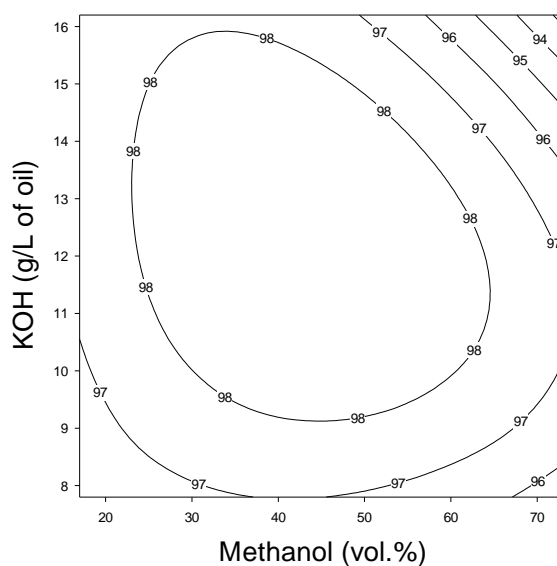
สัมประสิทธิ์	ความยาวของท่อผสมสติด		
	4 เมตร	5 เมตร	8 เมตร
β_0 - value	0.000354	0.000000000	0.00812
β_1 - value	0.01380	0.000221189	0.00210
β_2 - value	0.00917	0.000012732	0.00928
β_3 - value	0.01289	0.000013892	0.00247
β_4 - value	0.01242	0.000028642	0.01131
β_5 - value	0.07093	-	0.00000305
β_6 - value	0.01940	-	-
R^2	0.890	0.964	0.905
R^2_{adjusted}	0.757	0.944	0.826
$R^2_{\text{prediction}}$	0.547	0.924	0.553



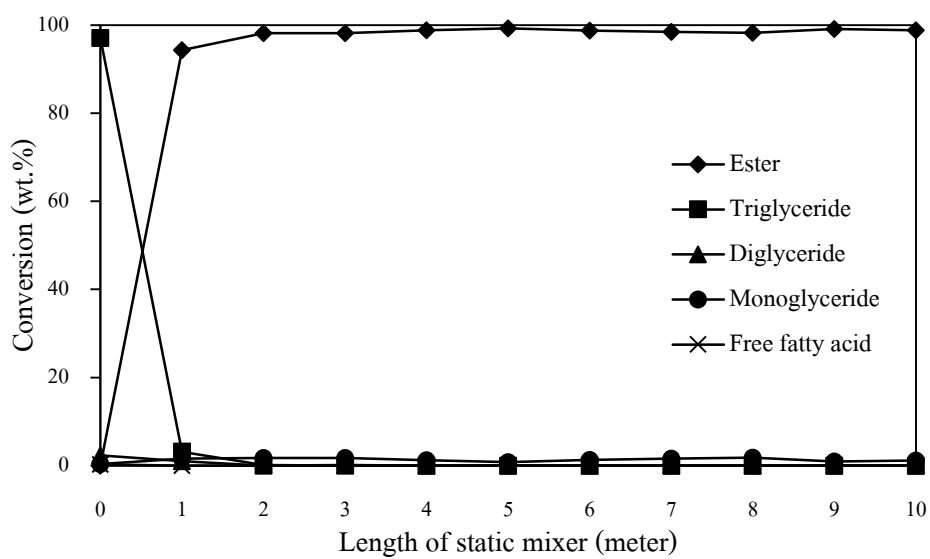
รูปที่ 5.1 แสดงปริมาณการใช้เมทานอลและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ท่อผสมสติดความยาวต่างๆ เพื่อให้ได้เมทิลเอสเทอร์ความบริสุทธิ์ 99 wt.% ที่อุณหภูมิสารผสม 30°C

ตารางที่ 5.2 แสดงข้อมูลในการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยท่อผสมสติกความยาว 5 เมตร ที่อุณหภูมิน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 60°C และอุณหภูมิสารผสม 30°C

การทดลองที่	(M) เมทานอล (vol.%)	(K) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (g/L of oil)	(Ester) ความบริสุทธิ์ ของเอสเทอร์ (wt.%)
1	17	12.0	97.262
2	45	16.2	97.537
3	65	9.0	97.174
4	73	12.0	96.992
5	45	12.0	99.291
6	25	9.0	97.332
7	45	7.8	96.954
8	45	12.0	99.155
9	25	15.0	97.856
10	45	12.0	98.830
11	45	12.0	98.533
12	65	15.0	95.946



รูปที่ 5.2 แสดงกราฟ contour ของความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเตอร์ จากเงื่อนไขที่เหมาะสม ที่อุณหภูมิน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 60°C และอุณหภูมิสารผสม 30°C ความยาวท่อผสมสถิติ 5 เมตร



รูปที่ 5.3 องค์ประกอบของน้ำมันที่เปลี่ยนแปลงไปตามความยาวท่อผสมสถิติที่ จากเงื่อนไขที่เหมาะสม ที่อุณหภูมิน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 60°C และอุณหภูมิสารผสม 30°C

5.1.2 ผลการศึกษาหารูปแบบสมการทำนายความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยท่อผสมแบบสถิตโดยใช้เมทานอลอุณหภูมิ 60°C

ผลการทดลองการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยท่อผสมแบบสถิตที่มีความยาว 10 เมตร โดยใช้น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์อุณหภูมิ 60°C เมทานอลผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 60°C ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันผ่านท่อผสมสถิตตามเงื่อนไขการทดลองที่ได้ออกแบบมาทั้งหมด จะได้สมการทำนายความสัมพันธ์ที่มีผลต่อที่ทำการตัดพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญแล้ว ดังสมการที่ 5.4, 5.5, 5.6 และ 5.7 โดยแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของสมการทำนายความสัมพันธ์ของสมการในตารางที่ 5.3 ซึ่งสรุปได้ว่า ปริมาณเมทานอล และ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซล แสดงปริมาณการใช้เมทานอลและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ท่อผสมสถิตความยาวต่างๆ เพื่อให้ได้เมทิลเอสเตอร์ความบริสุทธิ์ 99 wt.% ดังรูปที่ 5.4 นำสมการทำนายความสัมพันธ์ที่ 5.4 ซึ่งมีค่าทางสถิตที่น่าเชื่อถือที่สุดใช้ปริมาณสารเคมีน้อยที่สุดจากท่อผสมสถิตความยาว 1 เมตร ไปสร้างกราฟ contour เพื่อแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลกับ ปริมาณเมทานอล และ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ดังรูปที่ 5.5 และแสดงองค์ประกอบของน้ำมันที่เปลี่ยนแปลงไปตามความยาวท่อผสมสถิต ดังรูปที่ 5.6

$$\text{Ester (1 meter)} = \beta_0 + \beta_1M + \beta_2K + \beta_3M^2 + \beta_4K^2 + \beta_5M^2K + \beta_6MK^2 \quad (5.4)$$

$$\text{Ester (3 meter)} = \beta_0 + \beta_1M + \beta_2K + \beta_3MK + \beta_4K^2 + \beta_5MK^2 \quad (5.5)$$

$$\text{Ester (5 meter)} = \beta_0 + \beta_1M + \beta_2K + \beta_3M^2 + \beta_4MK + \beta_5K^2 + \beta_6M^2K + \beta_7MK^2 \quad (5.6)$$

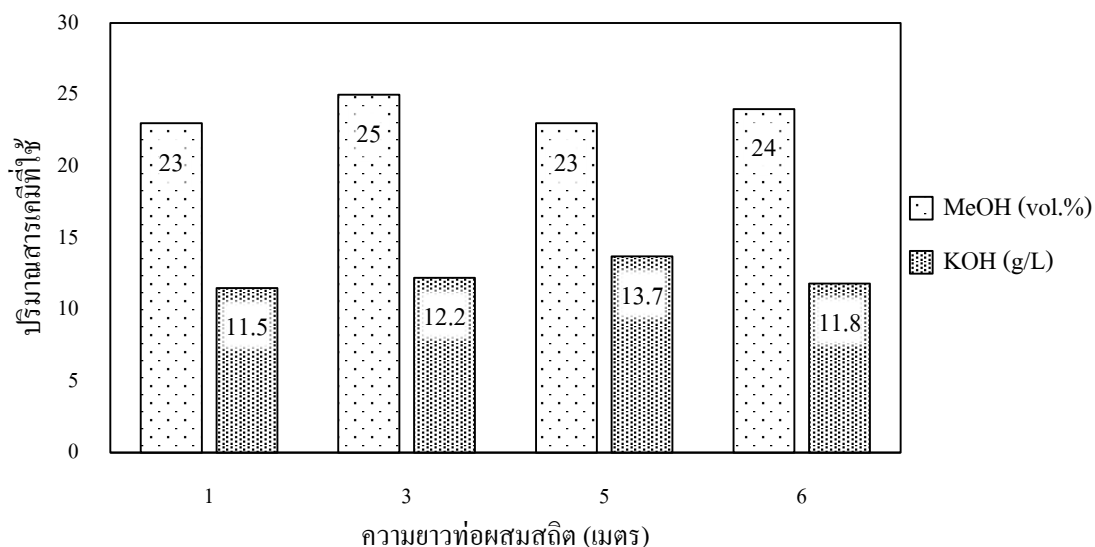
$$\text{Ester (6 meter)} = \beta_0 + \beta_1M + \beta_2K + \beta_3M^2 + \beta_4MK + \beta_5K^2 + \beta_6MK^2 \quad (5.7)$$

โดยที่

Ester = เปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซล, M = เมทานอล, K = โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และ β = ค่าสัมประสิทธิ์

ตารางที่ 5.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของสมการทำนายความสัมพันธ์ของสมการ ที่อุณหภูมิน้ำมัน
ปาล์มบริสุทธิ์ 60°C และอุณหภูมิสารผสม 60°C

สัมประสิทธิ์	ความยาวของท่อผสมสเถิต			
	1 เมตร	3 เมตร	5 เมตร	6 เมตร
β_0	84.71	124.86	109.87	112.09
β_1	0.229	-0.586	-0.342	-0.309
β_2	1.779	-4.816	-1.790	-2.764
β_3	-0.00461	0.108	0.00167	-0.000424
β_4	-0.05853	0.207	0.05031	0.06705
β_5	0.000301	-0.00470	0.07018	0.131
β_6	-0.00102	-	-0.000160	-0.00311
β_7	-	-	-0.00170	-
β_0 - value	0.00000001	0.00000235	0.000000208	0.00000383
β_1 - value	0.00443	0.00922	0.00148	0.03971
β_2 - value	0.000717	0.00764	0.00156	0.02480
β_3 - value	0.00488	0.00636	0.01069	0.08527
β_4 - value	0.01163	0.00647	0.000854	0.01606
β_5 - value	0.01252	0.00515	0.00173	0.01531
β_6 - value	0.01897	-	0.00629	0.01040
β_7 - value	-	-	0.00113	-
R^2	0.984	0.844	0.991	0.903
R^2_{adjusted}	0.964	0.714	0.976	0.787
$R^2_{\text{prediction}}$	0.800	0.592	0.971	0.691



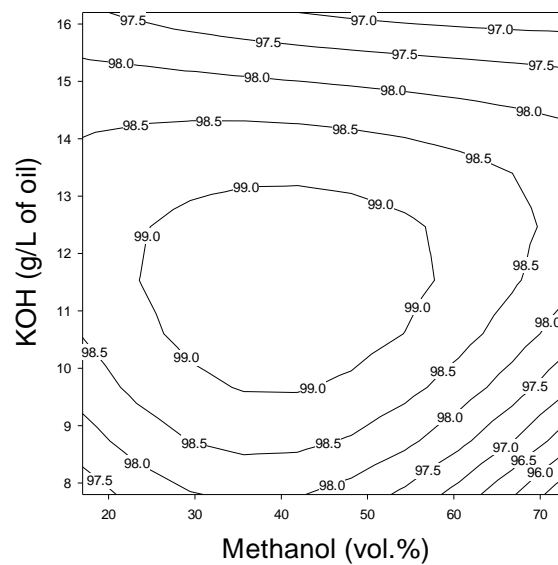
รูปที่ 5.4 แสดงปริมาณการใช้เมทานอลและ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ท่อผสมสติดความยาวต่างๆ เพื่อให้ได้เมทิลเอสเทอร์ความบริสุทธิ์ 99 wt.% ที่อุณหภูมิสารผสม 60°C

ตารางที่ 5.4 แสดงข้อมูลในการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยท่อผสมสติดความยาว 1 เมตร ที่อุณหภูมิน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 60°C และอุณหภูมิสารผสม 60°C

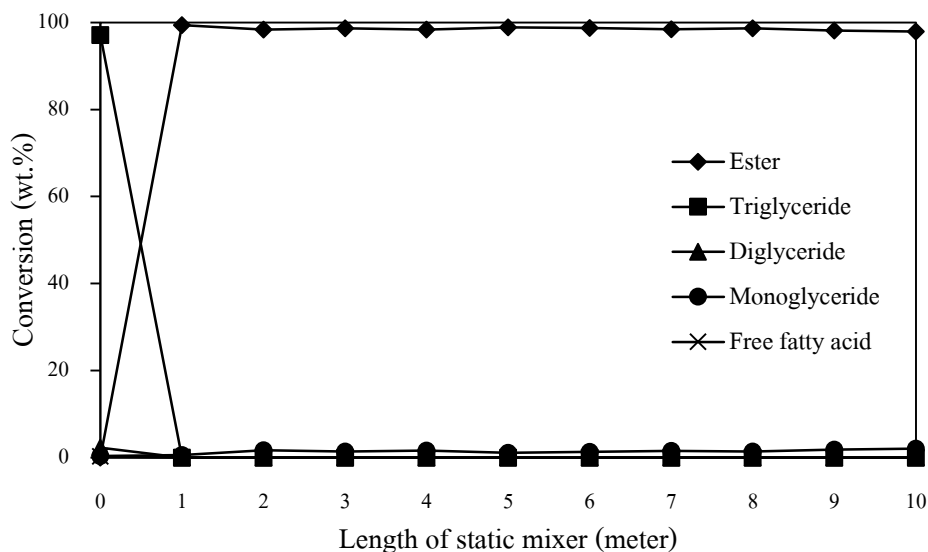
การทดลองที่	(M)	(K)	(Ester)
	เมทานอล (vol.%)	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (g/L of oil)	ความบริสุทธิ์ ของเอสเทอร์ (wt.%)
1	17	12.0	98.711
2	45	16.2	96.845
3	65	9.0	97.530
4	73	12.0	98.145
5	45	12.0	99.466
6	25	9.0	98.456
7	45	7.8	97.894

ตารางที่ 5.4 (ต่อ) แสดงข้อมูลในการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยท่อผสมสติดความยาว 1 เมตร ที่อุณหภูมิน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 60°C และอุณหภูมิสารผสม 60°C

การทดลองที่	(M) เมทานอล (vol.%)	(K) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (g/L of oil)	(Ester) ความบริสุทธิ์ของ เอสเทอร์ (wt.%)
8	45	12.0	99.326
9	25	15.0	98.210
10	45	12.0	99.218
11	45	12.0	99.148
12	65	15.0	97.891



รูปที่ 5.5 แสดงกราฟ contour ของความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ จากเงื่อนไขที่เหมาะสม ที่อุณหภูมิน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 60°C และอุณหภูมิสารผสม 60°C ความยาวท่อผสมสติด 1 เมตร



รูปที่ 5.6 องค์ประกอบของน้ำมันที่เปลี่ยนแปลงไปตามความยาวท่อผสมสถิตที่ จากเงื่อนไขที่เหมาะสม ที่อุณหภูมิน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 60°C และอุณหภูมิสารผสม 60°C

5.1.3 ผลการศึกษาหารูปแบบสมการทำนายความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยท่อผสมแบบสถิตโดยใช้เอทานอลอุณหภูมิ 30°C

ผลการทดลองการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยท่อผสมแบบสถิตที่มีความยาว 10 เมตร โดยใช้ น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์อุณหภูมิ 75°C เอทานอลผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 30°C ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันผ่านท่อผสมสถิตตามเงื่อนไขการทดลองที่ได้ออกแบบมาทั้งหมด จะได้สมการทำนายความสัมพันธ์ที่มีผลต่อที่ทำการตัดพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญแล้ว ดังสมการที่ 5.8, 5.9, 5.10 และ 5.11 โดยแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของสมการทำนายความสัมพันธ์ของสมการในตารางที่ 5.10 ซึ่งสรุปได้ว่า ปริมาณของเอทานอล และ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซล แสดงปริมาณการใช้เอทานอลและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ท่อผสมสถิตความยาวต่างๆ เพื่อให้ได้เอทิลเอสเทอร์ความบริสุทธิ์ 99 wt.% ดังรูปที่ 5.7 นำสมการทำนายความสัมพันธ์ที่ 5.10 ซึ่งมีค่าทางสถิตที่น่าเชื่อถือที่สุดใช้ปริมาณสารเคมีน้อยที่สุดจากท่อผสมสถิตความยาว 6 เมตร ไปสร้างกราฟ contour เพื่อแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลกับ ปริมาณ

เอทานอล และ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ดังรูปที่ 5.8 และแสดงองค์ประกอบของน้ำมันที่เปลี่ยนแปลงไปตามความยาวท่อผสมสติด ดังรูปที่ 5.9

$$\text{Ester (2 meter)} = \beta_0 + \beta_1 E + \beta_2 K + \beta_3 E^2 + \beta_4 EK \quad (5.8)$$

$$\text{Ester (5 meter)} = \beta_0 + \beta_1 E^2 + \beta_2 K^2 + \beta_3 E^3 \quad (5.9)$$

$$\text{Ester (6 meter)} = \beta_0 + \beta_1 E + \beta_2 EK + \beta_3 E^2 K + \beta_4 EK^2 \quad (5.10)$$

$$\text{Ester (10 meter)} = \beta_0 + \beta_1 E + \beta_2 K^2 + \beta_3 E^3 \quad (5.11)$$

โดยที่

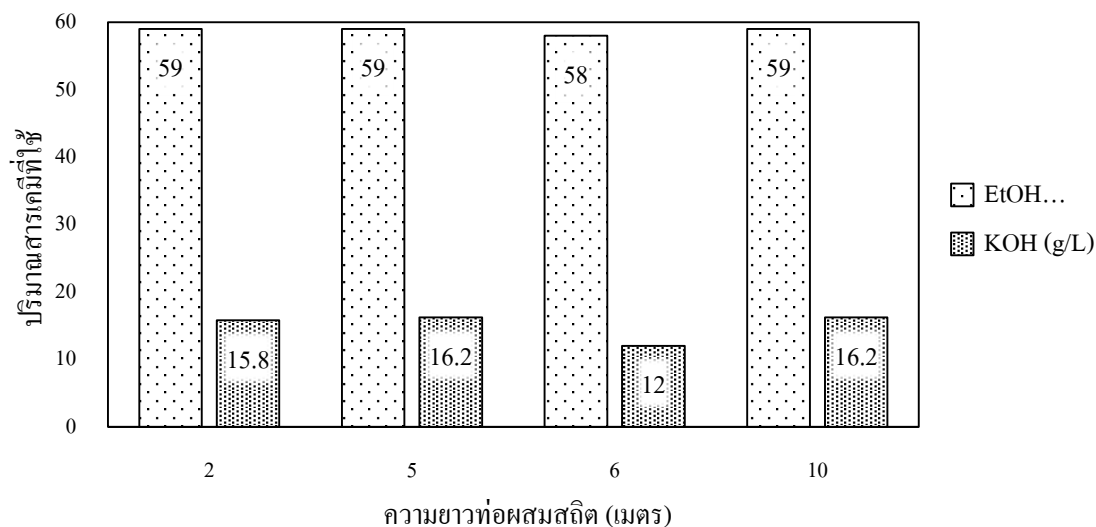
Ester = เปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซล, E = เอทานอล, K = โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และ β = ค่าสัมประสิทธิ์

ตารางที่ 5.5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของสมการทำนายความสัมพันธ์ของสมการ ที่อุณหภูมิน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 75°C และอุณหภูมิสารผสม 30°C

สัมประสิทธิ์	ความยาวของท่อผสมสติด			
	2 เมตร	5 เมตร	6 เมตร	10 เมตร
β_0	-87.52	52.14	-123.31	37.52
β_1	4.607	0.03984	6.857	1.503
β_2	8.879	0.02040	16.06	0.02052
β_3	-0.02307	-0.000450	-0.06362	-0.000142
β_4	-0.156	-	-0.362	-
β_5	-	-	-0.283	-
β_6	-	-	0.00349	-
β_0 - value	0.03283	0.00000169	0.01502	0.000179
β_1 - value	0.00115	0.00001922	0.00513	0.0000276

ตารางที่ 5.5 (ต่อ) แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของสมการทำนายความสัมพันธ์ของสมการ ที่อุณหภูมิ น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 75°C และอุณหภูมิสารผสม 30°C

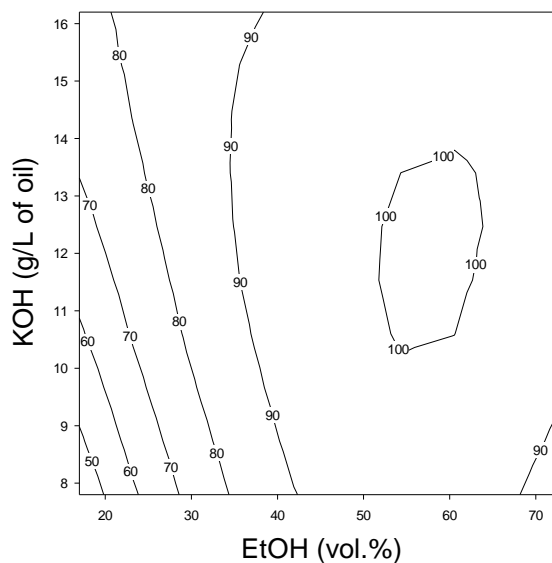
สัมประสิทธิ์	ความยาวของท่อผสมสติด			
	2 เมตร	5 เมตร	6 เมตร	10 เมตร
β_2 - value	0.01015	0.275	0.00568	0.256
β_3 - value	0.00847	0.0000512	0.01022	0.000450
β_4 - value	0.02332	-	0.02879	-
β_5 - value	-	-	0.03499	-
β_6 - value	-	-	0.04471	-
R^2	0.896	0.940	0.984	0.937
R^2_{adjusted}	0.837	0.918	0.966	0.913
$R^2_{\text{prediction}}$	0.476	0.806	0.666	0.816



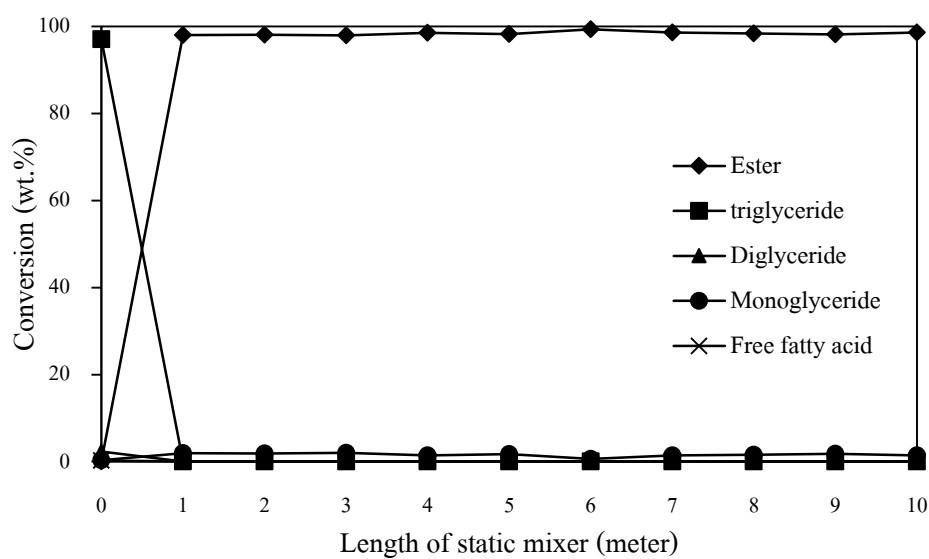
รูปที่ 5.7 แสดงปริมาณการใช้เอทานอลและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ท่อผสมสติดความยาวต่างๆ เพื่อให้ได้เอทิลเอสเทอร์ความบริสุทธิ์ 99 wt.% ที่อุณหภูมิสารผสม 30°C

ตารางที่ 5.6 แสดงข้อมูลในการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยท่อผสมสติกความยาว 6 เมตร ที่อุณหภูมิน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 75°C และอุณหภูมิสารผสม 30°C

การทดลองที่	(E) เอทานอล (vol.%)	(K) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (g/L of oil)	(Ester) ความบริสุทธิ์ ของเอสเทอร์ (wt.%)
1	17	12.0	67.822
2	45	16.2	94.164
3	65	9.0	95.240
4	73	12.0	96.024
5	45	12.0	97.549
6	25	9.0	65.755
7	45	7.8	93.876
8	45	12.0	97.931
9	25	15.0	80.159
10	45	12.0	97.669
11	45	12.0	96.759
12	65	15.0	97.979



รูปที่ 5.8 แสดงกราฟ contour ของความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์ จากเงื่อนไขที่เหมาะสม ที่อุณหภูมิน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 75°C และอุณหภูมิสารผสม 30°C ความยาวท่อผสมสถิติ 6 เมตร



รูปที่ 5.9 องค์ประกอบของน้ำมันที่เปลี่ยนแปลงไปตามความยาวท่อผสมสถิติที่ จากเงื่อนไขที่เหมาะสม ที่อุณหภูมิน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 75°C และอุณหภูมิสารผสม 30°C

5.1.4 ผลการศึกษาหารูปแบบสมการทำนายความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยท่อผสมแบบสถิตโดยใช้เอทานอลอุณหภูมิ 75°C

ผลการทดลองการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยท่อผสมแบบสถิตที่มีความยาว 10 เมตร โดยใช้น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์อุณหภูมิ 75°C เอทานอลผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 75°C ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันผ่านท่อผสมสถิตตามเงื่อนไขการทดลองที่ได้ออกแบบมาทั้งหมด จะได้สมการทำนายความสัมพันธ์ที่มีผลต่อที่ทำการตัดพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญแล้ว ดังสมการที่ 5.12, 5.13, 5.14, 5.15 และ 5.16 โดยแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของสมการทำนายความสัมพันธ์ของสมการในตารางที่ 5.7 ซึ่งสรุปได้ว่า ปริมาณเอทานอล และ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซล แสดงปริมาณการใช้เอทานอลและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ท่อผสมสถิตความยาวต่างๆ เพื่อให้ได้เอทิลเอสเทอร์ความบริสุทธิ์ 99 wt.% ดังรูปที่ 5.10 นำสมการทำนายความสัมพันธ์ที่ 5.12 ซึ่งมีค่าทางสถิติที่น่าเชื่อถือที่สุดใช้ปริมาณสารเคมีน้อยที่สุดจากท่อผสมสถิตความยาว 6 เมตร ไปสร้างกราฟ contour เพื่อแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลกับปริมาณเอทานอล และ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ดังรูปที่ 5.11 และแสดงองค์ประกอบของน้ำมันที่เปลี่ยนแปลงไปตามความยาวท่อผสมสถิต ดังรูปที่ 5.12

$$\text{Ester (1 meter)} = \beta_0 + \beta_1K + \beta_2EK + \beta_3K^2 + \beta_4E^2K + \beta_5EK^2 + \beta_6K^3 \quad (5.12)$$

$$\text{Ester (3 meter)} = \beta_0 + \beta_1E + \beta_2K + \beta_3E^2 + \beta_4EK + \beta_5E^2K \quad (5.13)$$

$$\text{Ester (5 meter)} = \beta_0 + \beta_1E + \beta_2K + \beta_3E^2 + \beta_4EK + \beta_5E^2K \quad (5.14)$$

$$\text{Ester (8 meter)} = \beta_0 + \beta_1E + \beta_2K + \beta_3E^2 + \beta_4EK + \beta_5E^2K \quad (5.15)$$

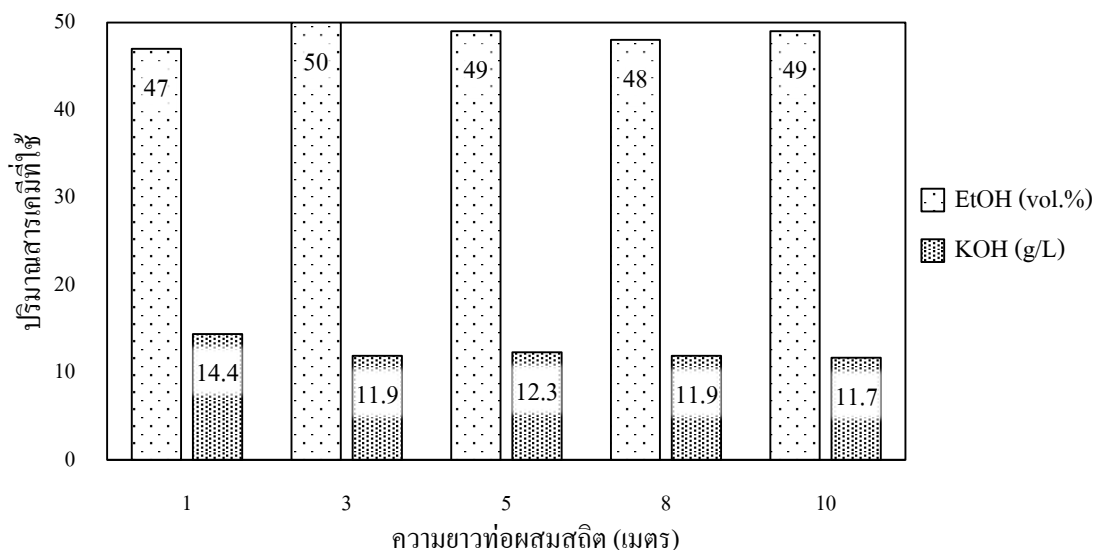
$$\text{Ester (10 meter)} = \beta_0 + \beta_1E + \beta_2K + \beta_3E^2 + \beta_4EK + \beta_5E^2K \quad (5.16)$$

โดยที่

Ester = เปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซล, E = เอทานอล, K = โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และ β = ค่าสัมประสิทธิ์

ตารางที่ 5.7 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของสมการทำนายความสัมพันธ์ของสมการ ที่อุณหภูมิน้ำมัน
ปาล์มบริสุทธิ์ 75°C และอุณหภูมิสารผสม 75°C

สัมประสิทธิ์	ความยาวของท่อผสมสติก				
	1 เมตร	3 เมตร	5 เมตร	8 เมตร	10 เมตร
β_0	392.38	-336.41	-275.67	-276.37	-183.98
β_1	-90.45	16.44	13.97	14.13	10.62
β_2	0.229	29.55	24.92	25.34	19.11
β_3	7.659	-0.151	-0.126	-0.129	-0.09628
β_4	-0.00114	-1.119	-0.936	-0.958	-0.724
β_5	-0.00842	0.01027	0.00853	0.00875	0.00662
β_6	-0.204	-	-	-	-
β_0 - value	0.0000077	0.000140	0.0000513	0.0000732	0.00001527
β_1 - value	0.0000156	0.000112	0.0000331	0.0000451	0.00000457
β_2 - value	0.0000002	0.0000984	0.0000304	0.0000401	0.00000398
β_3 - value	0.0000165	0.000303	0.0000999	0.000130	0.00001397
β_4 - value	0.0000010	0.000326	0.000109	0.000138	0.00001402
β_5 - value	0.0000020	0.000853	0.000305	0.000380	0.00003999
β_6 - value	0.0000201	-	-	-	-
R^2	0.998	0.983	0.991	0.989	0.995
R^2_{adjusted}	0.996	0.970	0.984	0.979	0.991
$R^2_{\text{prediction}}$	0.960	0.835	0.911	0.890	0.955



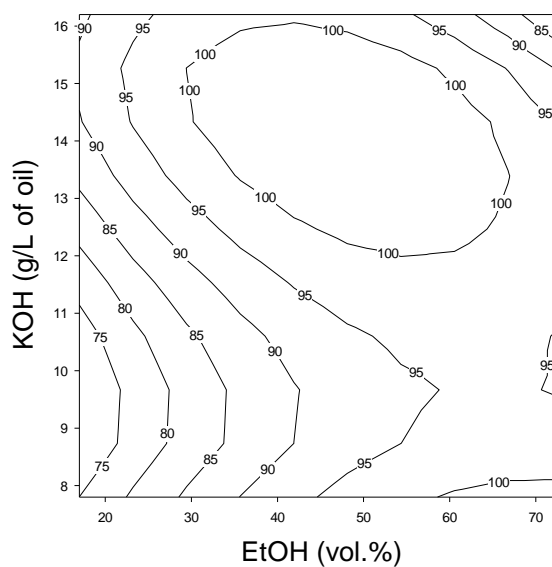
รูปที่ 5.10 แสดงปริมาณการใช้เอทานอลและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ท่อผสมสเถิตความยาวต่างๆเพื่อให้ได้เอทิลเอสเทอร์ความบริสุทธิ์ 99 wt.% ที่อุณหภูมิสารผสม 75°C

ตารางที่ 5.8 แสดงข้อมูลในการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยท่อผสมสเถิตความยาว 1 เมตร ที่อุณหภูมิน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 75°C และอุณหภูมิสารผสม 75°C

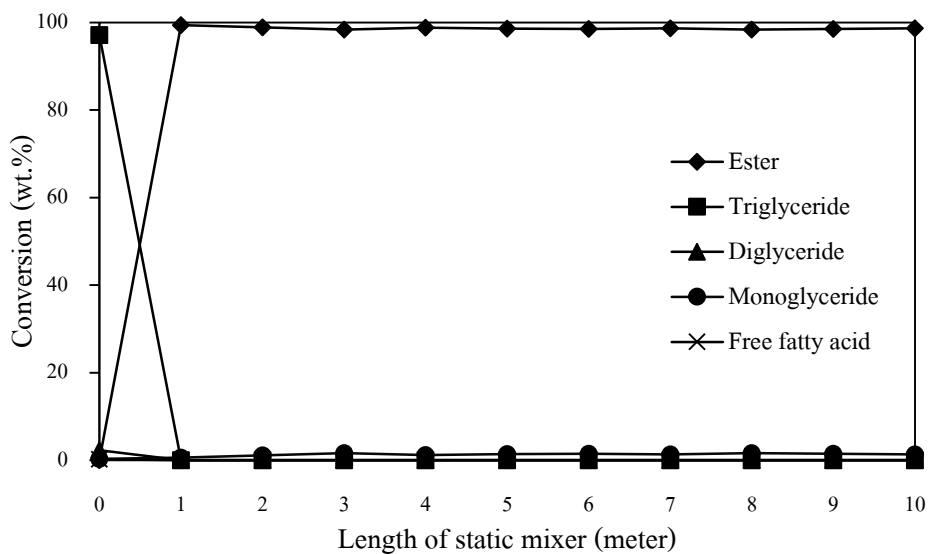
การทดลองที่	(E)	(K)	(Ester)
	เอทานอล (vol.%)	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (g/L of oil)	ความบริสุทธิ์ ของเอสเทอร์ (wt.%)
1	17	12.0	79.010
2	45	16.2	98.688
3	65	9.0	96.673
4	73	12.0	95.690
5	45	12.0	98.569
6	25	9.0	78.035
7	45	7.8	94.947

ตารางที่ 5.8 (ต่อ) แสดงข้อมูลในการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยท่อผสมสติกความยาว 1 เมตร ที่อุณหภูมิน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 75°C และอุณหภูมิสารผสม 75°

การทดลองที่	(E) เอทานอล (vol.%)	(K) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (g/L of oil)	(Ester) ความบริสุทธิ์ของ เอสเตอร์ (wt.%)
8	45	12.0	98.402
9	25	15.0	97.709
10	45	12.0	98.186
11	45	12.0	98.527
12	65	15.0	98.039

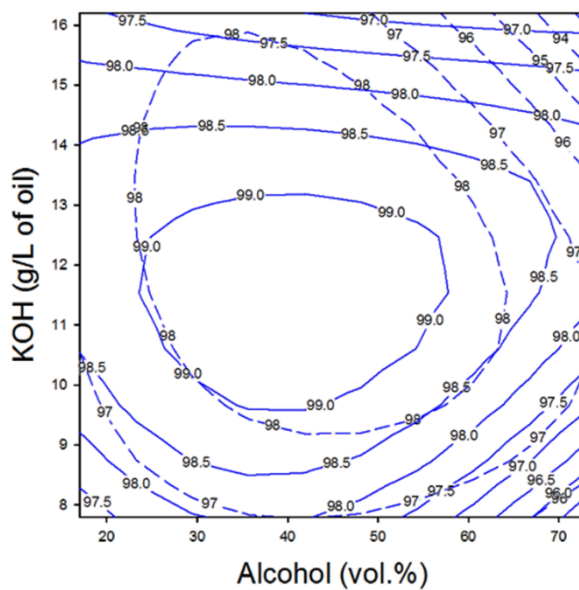


รูปที่ 5.11 แสดงกราฟ contour ของความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเตอร์ จากเงื่อนไขที่เหมาะสม ที่อุณหภูมิน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 75°C และอุณหภูมิสารผสม 75°C ความยาวท่อผสมสติก 1 เมตร



รูปที่ 5.12 องค์ประกอบของน้ำมันที่เปลี่ยนแปลงไปตามความยาวท่อผสมสติกที่ จากเงื่อนไขที่เหมาะสม ที่อุณหภูมิน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 75°C และอุณหภูมิสารผสม 75°C

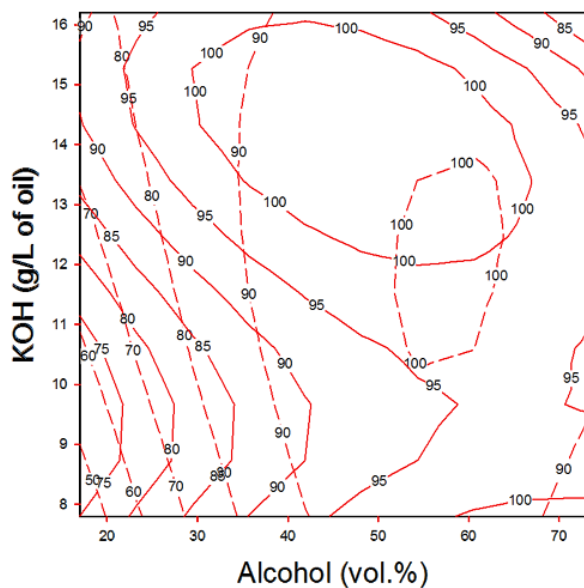
การเปรียบเทียบผลการทดลองการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยท่อผสมสติกโดยการใส่เมทานอลดังแสดงในรูปที่ 5.9 จะเห็นว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ลดลง ความยาวของท่อผสมสติกลดลงจาก 5 เมตร เหลือเพียง 1 เมตร แต่ปริมาณการใช้เมทานอลยังคงเท่าเดิมที่ 23 vol.% ทำให้ได้ไบโอดีเซลที่มีเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์สูงกว่า 99 wt.%



--- เมทานอล 30°C ————— เมทานอล 60°C

รูปที่ 5.13 แสดงกราฟ contour ของความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ จากเงื่อนไขที่เหมาะสม ที่อุณหภูมิน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 60°C และอุณหภูมิสารผสม 30°C และ 60°C

การเปรียบเทียบผลการทดลองการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยท่อผสมสเถิต โดยการใช้เอทานอล ดังแสดงในรูปที่ 5.10 ทำให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิสารผสมนั้นส่งผลให้ ปริมาณการใช้เอทานอลลดลงได้ถึง 10 vol.% และช่วยลดความยาวท่อผสมสเถิตให้การทำปฏิกิริยา จาก 6 เมตร เหลือเพียง 1 เมตร แต่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้จะเพิ่มขึ้น เล็กน้อย ทำให้ได้ไบโอดีเซลที่มีเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์สูงกว่า 99 wt.%

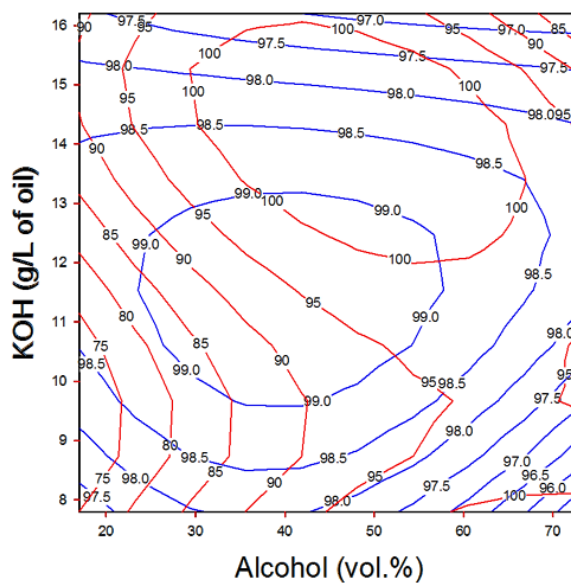


--- เอทานอล 30°C

— เอทานอล 75°C

รูปที่ 5.14 แสดงกราฟ contour ของความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์ จากเงื่อนไขที่เหมาะสม ที่อุณหภูมิน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 75°C และอุณหภูมิสารผสม 30°C และ 75°C

การเปรียบเทียบผลการทดลองการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยท่อผสมสติดที่มีความยาว 1 เมตร จากเงื่อนไขที่เหมาะสม โดยเปรียบเทียบระหว่างการใช้แอลกอฮอล์ 2 ชนิด คือ เมทานอล และ เอทานอล ดังแสดงในรูปที่ 5.11 ทำให้ได้สภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ด้วยท่อผสมแบบสติดที่อัตราการไหลของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 20 ลิตรต่อชั่วโมง โดยได้ไบโอดีเซลบริสุทธิ์มากกว่า 96.5 wt.% จากเงื่อนไขการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 60°C ปริมาณเมทานอล 23 vol.% ผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 11.5 g/L of oil ที่อุณหภูมิ 60°C ทำปฏิกิริยาผ่านท่อผสมสติดความยาว 1 เมตร และเงื่อนไขการผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 75°C ปริมาณเมทานอล 47 vol.% ผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 14.4 g/L of oil ที่อุณหภูมิ 75°C ทำปฏิกิริยาผ่านท่อผสมสติดความยาว 1 เมตร



— เอทานอล 75°C — เมทานอล 60°C

รูปที่ 5.15 แสดงกราฟ contour ของความบริสุทธิ์ของเอสเทอร์ จากเงื่อนไขที่เหมาะสม ระหว่างการใช้เอทานอลและเมทานอล

5.2 สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ด้วยท่อผสมสถิต

การคำนวณหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ด้วยท่อผสมสถิต ภายใต้เงื่อนไขการทดลองทั้งหมดที่ได้ทำการออกแบบไว้ตามขอบเขตของตัวแปรอิสระ คือ ปริมาณแอลกอฮอล์ ($17 \leq A \leq 73\%$ โดยปริมาตร) และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ($7.8 \leq K \leq 16.2\%$ โดยปริมาตร) ควบคุมอัตราการไหลของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 20 ลิตร/ชั่วโมง น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์อุณหภูมิ 60°C เมทานอลผสมตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 30°C และ 60°C หลังจากนั้นทำการทดลองตามเงื่อนไขเดิมแต่เปลี่ยนชนิดของแอลกอฮอล์เป็นเอทานอลแทนการใช้เมทานอล ควบคุมอัตราการไหลของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 20 ลิตร/ชั่วโมง น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์อุณหภูมิ 75°C เอทานอลผสมตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 30°C และ 75°C โดยใช้โปรแกรม excel solver เพื่อทำการแก้ไขสมการทำนายความสัมพันธ์ และนำสภาวะที่เหมาะสมที่สุดนี้มาทำการทดลอง เพื่อ

หาเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลที่สูงสุดเพื่อให้ตรงตามขอบเขตของการวิจัย คือ ได้ไบโอดีเซลที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลมากกว่า 96.5 wt.% พบสถานะที่เหมาะสมของการทดลองดังแสดงในตารางที่ 5.9

ตารางที่ 5.9 แสดงสถานะที่ดีที่สุดของการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยท่อผสมสติด

เงื่อนไข การทดลอง	อุณหภูมิ (°C)		ปริมาณ แอลกอฮอล์ (vol.%)	โพแทสเซียม ไฮดรอกไซด์ (g/L of oil)	ความยาว ท่อผสมสติด (meter)	ความบริสุทธิ์ของ เอสเทอร์ (wt.%)	
	น้ำมัน	แอลกอฮอล์				TLC/FID	GC
	ปาล์ม บริสุทธิ์	ผสม KOH					
MeOH 23vol.%, KOH 13.4g/L	60	30	23	13.4	5	97.615	-
MeOH 23vol.%, KOH 11.5g/L	60	60	23	11.5	1	99.370	96.70
EtOH 58vol.%, KOH 12.0g/L	75	30	58	12.0	6	99.369	-
EtOH 47vol.%, KOH 14.4g/L	75	75	47	14.4	1	99.340	98.11

5.3 เปอร์เซ็นต์ผลได้จากการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ด้วยท่อผสมสติด

การหาเปอร์เซ็นต์ผลได้จากการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ด้วยท่อผสมสติดที่สถานะที่เหมาะสมที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 5.9 และได้แสดงอัตราการไหลของสารตั้งต้นของสถานะดังกล่าวดังแสดงในตารางที่ 5.10 ทำการทดลองสถานะที่ดีที่สุดทั้งหมดเพื่อหาเปอร์เซ็นต์ผลได้ โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำมันจากเครื่องปฏิกรณ์ประมาณ 500 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ประมาณ 1 วัน เพื่อให้แน่ใจว่ากลีเซอรอลที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันได้แยกชั้นอย่างสมบูรณ์ หลังจากนั้นทำการแยกกลีเซอรอลออกไปเพื่อทำการวัดปริมาตร ผลที่ได้เป็นส่วนสำคัญของปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลดิบ ปริมาณของกลีเซอรอล และปริมาณผลได้ของไบโอดีเซลบริสุทธิ์ ดังแสดงในตารางที่ 5.11 จากข้อมูลดังกล่าวสามารถนำมาคำนวณหาค่าการ

ผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ด้วยท่อผสมสเถิตที่สภาวะที่เหมาะสม และเปอร์เซ็นต์ผลได้ (% yield) จากสมการที่ 5.17 ทำให้ได้กำลังการผลิตไบโอดีเซล ดังแสดงในตารางที่ 5.12

$$\text{เปอร์เซ็นต์ผลได้} = (\text{ปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้} / \text{ปริมาณน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์เริ่มต้น}) \times 100 \quad (5.17)$$

ตารางที่ 5.10 แสดงอัตราการไหลของสารตั้งต้น ที่สภาวะที่เหมาะสมที่สุด

สารตั้งต้น	อัตราการไหล (ลิตร/ชั่วโมง)			
	MeOH 23vol.%	MeOH 23vol.%	EtOH 58vol.%	EtOH 47vol.%
	KOH 13.4g/L	KOH 11.5g/L	KOH 12.0g/L	KOH 14.4g/L
น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์	20	20	20	20
แอลกอฮอล์+KOH	4.6	4.6	11.6	9.4
รวม	24.6	24.6	31.6	29.4

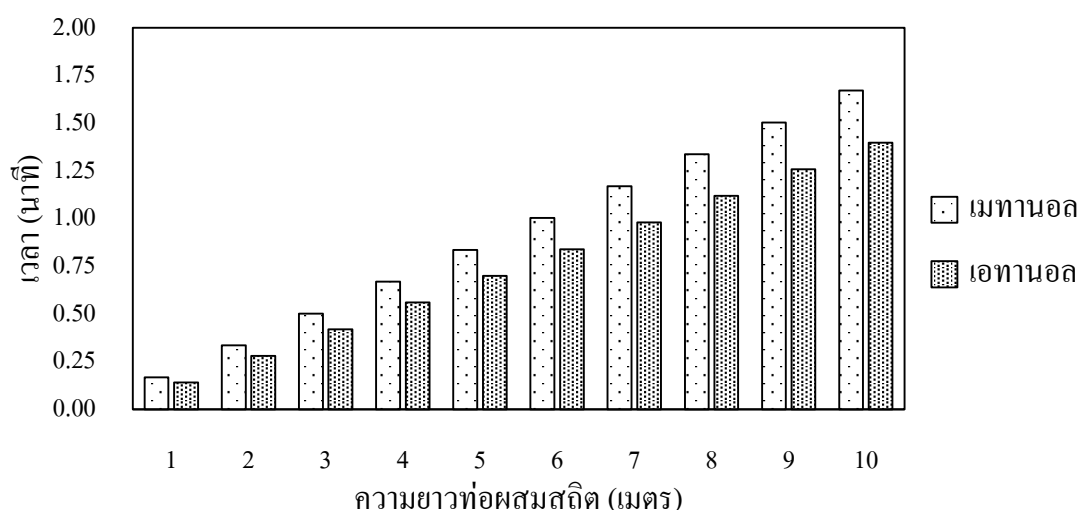
ตารางที่ 5.11 แสดงอัตราส่วนของปริมาณน้ำมันที่แยกออกจากกลีเซอรอล ปริมาณกลีเซอรอล และปริมาณผลได้ของไบโอดีเซลบริสุทธิ์

เงื่อนไขการทดลอง	การแยกชั้น (% โดยปริมาตร)		ไบโอดีเซลบริสุทธิ์ (% โดยปริมาตร)
	ไบโอดีเซลดิบ	กลีเซอรอล	
MeOH 23vol.%, KOH 13.4g/L, SM 5m	87.16	12.84	81.58
MeOH 23vol.%, KOH 11.5g/L, SM 1m	88.88	11.12	82.86
EtOH 58vol.%, KOH 12.0g/L, SM 6m	94.92	5.08	59.76
EtOH 47vol.%, KOH 14.4g/L, SM 1m	95.37	4.63	63.61

ตารางที่ 5.12 แสดงกำลังการผลิตจากสภาวะที่เหมาะสมที่สุด

เงื่อนไขการทดลอง	กำลังการผลิต (L/hr)	
	ไบโอดีเซลดิบ	ไบโอดีเซลบริสุทธิ์
MeOH 23vol.%, KOH 13.4g/L, SM 5m	21.44	20.07
MeOH 23vol.%, KOH 11.5g/L, SM 1m	21.86	20.38
EtOH 58vol.%, KOH 12.0g/L, SM 6m	30.00	18.88
EtOH 47vol.%, KOH 14.4g/L, SM 1m	28.04	18.70

จากระบบผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ด้วยท่อผสมแบบสถิติจากเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด เมื่อทำการเปรียบเทียบความยาวท่อผสมแบบสถิติที่ใช้ในกระบวนการผลิตกับเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยนับตั้งแต่น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ และแอลกอฮอล์ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เริ่มไหลเข้าท่อผสมสถิติจนผ่านท่อผสมแบบสถิติความยาว 10 เมตร แสดงเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยาดังรูปที่ 5.16 จะเห็นว่าใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาไม่ถึง 2 นาที



รูปที่ 5.16 แสดงเวลาที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์เมื่อทำปฏิกิริยาผ่านท่อผสมสถิติที่ความยาวต่างๆ

5.4 คุณสมบัติของไบโอดีเซลจากกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องด้วยท่อผสมสถิต

จากการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ด้วยท่อผสมแบบสถิต โดยใช้ท่อผสมสถิตความยาวเพียงแค่ 1 เมตร ทำให้ได้สภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้แอลกอฮอล์ทั้งสองชนิด คือ เมทานอล 23% โดยปริมาตร ผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 11.5 g/L of oil ที่อุณหภูมิ 60°C, อุณหภูมิของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 60°C และ เอทานอล 47% โดยปริมาตร ผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 14.4 g/L of oil ที่อุณหภูมิ 75°C, อุณหภูมิของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 75°C ต่อมาได้ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบอื่นๆ ผ่านตามมาตรฐานไบโอดีเซลชุมชน และใกล้เคียงหรือเทียบเท่ามาตรฐานไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์ ดังแสดงในตารางที่ 5.13

ตารางที่ 5.13 แสดงองค์ประกอบไบโอดีเซลจากกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องด้วยท่อผสมแบบสถิต

คุณสมบัติ	ผลการทดลอง		มาตรฐาน	มาตรฐาน
	Methyl Ester	Ethyl Ester	ไบโอดีเซลชุมชน พ.ศ. 2549	กรมธุรกิจพลังงาน พ.ศ. 2552
เอสเทอร์ (wt.%)	96.70±0.03	98.11±0.03	-	≥ 96.5
กรดไลโนเลอิก (wt.%)	0.06±0.001	ไม่พบ	-	≤ 12
ความหนาแน่น ณ 15°C (kg/m ³)	865	860	860-900	860-900
ความหนืด ณ 40°C (cSt)	4.9	5.08	1.9-8.0	3.5-5.0
จุดวาบไฟ (°C)	147	167	≥ 120	≥ 120
กำมะถัน (wt.%)	< 0.0002	< 0.0002	≤ 0.0015	≤ 0.0010
เถ้าซัลเฟต (wt.%)	< 0.005	< 0.005	≤ 0.02	≤ 0.02
น้ำและตะกอน (%vol.)	< 0.05	0.05	≤ 0.2	-
การกัดกร่อนแผ่นทองแดง	No.1a	No.1a	≤ No. 3	≤ No. 1
ค่าความเป็นกรด (mg KOH/g)	0.13	0.24	≤ 0.80	≤ 0.50
แอลกอฮอล์ (wt.%)	< 0.01	< 0.01	-	≤ 0.20
ค่าไอโอดีน (g Iodine / 100g)	57.64±0.77	56.27±0.89	-	≤ 120

ตารางที่ 5.13 (ต่อ) แสดงองค์ประกอบไบโอดีเซลจากกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องด้วยท่อผสมแบบสถิต

คุณสมบัติ	ผลการทดลอง		มาตรฐาน	มาตรฐาน
	Methyl Ester	Ethyl Ester	ไบโอดีเซล ชุมชน พ.ศ. 2549	กรมธุรกิจ พลังงาน พ.ศ. 2552
ไตร-กลีเซอไรด์ (wt.%)	1.52±0.015	0.034±0.000	-	≤ 0.20
ได-กลีเซอไรด์ (wt.%)	0.564±0.005	0.215±0.002	-	≤ 0.20
โมนอ-กลีเซอไรด์ (wt.%)	0.315±0.003	0.819±0.001	-	≤ 0.80
กลีเซอรินอิสระ (wt.%)	ไม่พบ	ไม่พบ	≤ 0.02	≤ 0.02
กลีเซอรินทั้งหมด (wt.%)	0.321±0.002	0.246±0.000	≤ 1.5	≤ 0.25

บทที่ 6

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง

ออกแบบและสร้างระบบผลิตเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์แบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ด้วยท่อผสมแบบสถิต สามารถสรุปผลการทดลอง ดังนี้

6.1.1 การหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตเมทิลเอสเทอร์แบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ด้วยท่อผสมแบบสถิต โดยใช้เทคนิค response surface methodology, RSM และใช้เทคนิค central composite design, CCD ในการออกแบบการทดลองที่มีตัวแปรอิสระเกี่ยวข้องกับ 2 ตัวแปร คือ ปริมาณเมทานอล และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เมื่อนำผลการทดลองไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MS Excel และ Solver Tool ได้สมการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์กับตัวแปรอิสระที่ผ่านท่อผสมสถิตความยาว 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 เมตร ได้สภาวะที่เหมาะสมที่สุดภายใต้เงื่อนไข เมทานอล 23% โดยปริมาตร และตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 11.5 g/L of oil ที่อุณหภูมิ 60°C อุณหภูมิ น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 60°C ทำปฏิกิริยากันด้วยการไหลผ่านท่อผสมแบบสถิตความยาว 1 เมตร สำหรับการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ด้วยท่อผสมแบบสถิต โดยใช้เมทานอลในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลได้เปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ 96.70% โดยน้ำหนัก

6.1.2 การหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตเอทิลเอสเทอร์แบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ด้วยท่อผสมแบบสถิต โดยใช้เทคนิค response surface methodology, RSM และใช้เทคนิค central composite design, CCD ในการออกแบบการทดลองที่มีตัวแปรอิสระเกี่ยวข้องกับ 2 ตัวแปร คือ ปริมาณเอทานอล และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ได้สมการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์กับตัวแปรอิสระที่ผ่านท่อผสมสถิตความยาว 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 เมตร ได้สภาวะที่เหมาะสมที่สุดภายใต้เงื่อนไข เอทานอล 47% โดยปริมาตร และตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 14.4 g/L of oil ที่อุณหภูมิ 75°C อุณหภูมิ น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 75°C ทำปฏิกิริยากันด้วยการไหลผ่านท่อผสมแบบสถิตความยาว

1 เมตร สำหรับการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ด้วยท่อผสมแบบสถิตโดยใช้เอทานอลในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลได้เปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ 98.11% โดยน้ำหนัก

6.1.3 เปอร์เซนต์ผลได้จากการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ด้วยท่อผสมสถิตที่สภาวะที่เหมาะสมที่สุดจากการใช้เมทานอล ได้ไบโอดีเซลดิบที่ประมาณ 89% โดยปริมาตร กลีเซอรอลที่ประมาณ 11% โดยปริมาตร หลังจากทำการล้างสิ่งปนเปื้อนออกจะได้ไบโอดีเซลบริสุทธิ์ประมาณ 83% โดยปริมาตร ส่วนเปอร์เซนต์ผลได้จากการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ด้วยท่อผสมสถิตที่สภาวะที่เหมาะสมที่สุดจากการใช้เอทานอล ได้ไบโอดีเซลดิบที่ประมาณ 95% โดยปริมาตร กลีเซอรอลที่ประมาณ 5% โดยปริมาตร หลังจากทำการล้างสิ่งปนเปื้อนออกจะได้ไบโอดีเซลบริสุทธิ์ประมาณ 64% โดยปริมาตร ซึ่งจะได้น้อยกว่าการใช้เมทานอล

6.2 ข้อเสนอแนะ

6.2.1 ระบบการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยท่อผสมแบบสถิต เหมาะสำหรับการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันที่มีค่ากรดไขมันอิสระต่ำ คือ น้อยกว่า 1% โดยน้ำหนัก โดยสามารถใช้วัตถุดิบอื่นที่ไม่ใช่ น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์แทนได้ แต่เงื่อนไขสภาวะที่เหมาะสมจะเปลี่ยนแปลงไปไม่เป็นไปตามผลงานวิจัยนี้

6.2.2 ควรมีการศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ เพื่อเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตจากการใช้เมทานอลและเอทานอล

บรรณานุกรม

- กรมควบคุมมลพิษ. 2558. ข้อมูลความปลอดภัยเคมีภัณฑ์ (ออนไลน์). สืบค้นจาก : <http://msds.pcd.go.th/index.asp> [21 เมษายน 2558]
- การผลิตเมทานอลจากก๊าซธรรมชาติ. สืบค้นจาก : http://lib3.dss.go.th/fulltext/dss_j/2527_105_16.pdf. [18 กันยายน 2558]
- ธนาคารแห่งประเทศไทย. 2555. รายงานสถานการณ์เอทานอลปี 2555 และแนวโน้มปี 2556 (ออนไลน์). สืบค้นจาก : http://www.bot.or.th/Thai/EconomicConditions/Thai/Northeast/commodities/Doclib_CommodityYearly/Ethanol%20Report_2555%20-last.pdf. [14 กันยายน 2556]
- มนตรี โคตรคันทา. 2558. แอลกอฮอล์ (ออนไลน์). สืบค้นจาก : http://www.krumontree.com/science/alcohol_00.html [21 เมษายน 2558]
- วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. 2558. ปาล์มน้ำมัน (ออนไลน์). สืบค้นจาก : <https://th.wikipedia.org/wiki/ปาล์มน้ำมัน> [21 เมษายน 2558]
- สมาคมการค้าผู้ผลิตเอทานอลไทย. 2556. กระบวนการผลิตเอทานอล (ออนไลน์). สืบค้นจาก : <http://www.thaiethanol.com/> [21 เมษายน 2558]
- สิทธิพันธ์ ท่อแก้ว. จลนศาสตร์วิศวกรรมเคมีและการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์. โครงการส่งเสริมการผลิตเอกสารชุดการเรียนรู้ที่เป็นการสรุปเนื้อหาในรูปแบบสื่ออิเล็กทรอนิกส์. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
- สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร. 2546. การแปรรูปปาล์มน้ำมัน (ออนไลน์). สืบค้นจาก : <http://www.arda.or.th/kasetinfo/south/palm/used/01-02.php> [21 เมษายน 2558]
- Abderrahim B., Mercedes M. and Jose A. (2009). Production of biodiesel from bioethanol and Brassica carinata oil: Oxidation stability study, *Bioresource Technology*. 100, pp. 2234–2239.
- Alamsyah R., Tambunan A.H., Purwanto Y.A. and Kusdiana D. (2010). Comparison of static-mixer and blade agitator reactor in biodiesel production, *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, vol.12(1), March 2010, pp.99-106.

- B. Baiju, M.K. Naik and L.M. Das (2009). A comparative evaluation of compression ignition engine characteristics using methyl and ethyl esters of Karanja oil, *Renewable Energy*. 34, pp. 1616–1621.
- Crabbe E., Nalasco-Hipolito, C. Kobayashi G., Sonomoto K. and Ishizaki A. (2001). Biodiesel production from crude palm oil and evaluation of butanol extraction and fuel properties. *Process Biochemistry*. 37. 1, pp. 65-71.
- Cvengros J. and Povazanec F. (1995). Production and treatment of rapeseed oil methyl esters as alternative fuels for diesel engines. *Biosource Technology*. 55, pp. 145-152.
- Encinar J.M., González J.F. and Rodríguez-Reinares A. (2007). Ethanolysis of used frying oil. Biodiesel preparation and characterization. *Fuel Processing Technology*. 88, pp. 513–522.
- Ghadge S.V. and Raheman H. (2005). Process optimization for biodiesel production from mahua (*Madhuca indica*) oil using response surface methodology. *Bioresource Technology*. 97, pp. 379-384.
- Hem J., Bryan R.M., Joe T. and Terry W. (2010). Preparation and fuel properties of mixtures of soybean oil methyl and ethyl esters. *Biomass and Bioenergy*. 34, pp. 14-20.
- Leng D.E., Katti S.S. and Atiemo-Obeng V. (2008). Industrial mixing technology, pp. 615-707. In J.J. Albright, L.F. (ed). *Albright's chemical engineering handbook*. CRC Press / Taylor and Francis Group. New York.
- Qiang L., Jingyang X., Wei D., Yang L. and Dehua L. (2013). Ethanol as the acyl acceptor for biodiesel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 25, pp. 742–748.
- Stamenkovic O.S., Velickovic A.V. and Veljkovic V.B. (2011). The production of biodiesel from vegetable oils by ethanolysis: Current state and perspectives. *Fuel*. 90, pp. 3141-3155.
- Saka S. and Kusdiana D. (2001). Biodiesel fuel from rapeseed oil as prepared in supercritical methanol. *Fuel*. 80, pp. 225-231.
- Srivastava A. and Prasad R. (2000). Triglyceride-based diesel fuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 4, pp. 111-133.

- Sungwornpriansakul P., Hiroi J., Nigahara Y., Jayasinghe T. K. and Yoshikawa K. (2013). Enhancement of biodiesel production reaction employing the static mixing. *Fuel Processing Technology*, 116, pp. 1-8.
- Thakur R. K., Vial Ch., Nigam K. D. P., Nauman E. B. and Djelveh G. (2003). Static mixers in the process industries – A review, *Trans IChemE*, vol.81.
- Thompson J.C. and He B.B. (2007). Biodiesel production using static mixers, *Trans. ASABE*, vol.50 (1), pp. 161-165.
- Tiwari A.K., Kumar A. and Raheman H. (2007). Biodiesel production from jatropha oil (*Jatropha curcas*) with high free fatty acids: An optimized process. *Biomass and Bioenergy*, 31, pp. 569-575.
- Wright H.J., Segur J.B., Clark H.V., Coburn S.K., Langdon E.E. and Dupuis R.N. (1944). A report on ester interchange. *Oil and Soap*, 21, pp. 145-148.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
(ตัวอย่างการคำนวณ)

ตารางที่ ก.1 คุณสมบัติของสารเคมี

Name	Molecular formula	Molar mass (g/mole)	Density (g/ml)	Melting point (°C)	Boiling point (°C)
Methanol	CH ₃ OH	32.05	0.792	-97	64.7
Ethanol	C ₂ H ₆ O	46.07	0.789	-114.3	78.4
Potassium hydroxide	KOH	56.106	2.044	360	1320

ตารางที่ ก.2 คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ใช้ในงานวิจัย

คุณสมบัติและองค์ประกอบ	หน่วย
ความหนาแน่น (ที่อุณหภูมิ 75°C)	kg/L
กรดไขมันอิสระ	%wt
ไตรกลีเซอไรด์	%wt
ไดกลีเซอไรด์	%wt
โมนोगลิเซอไรด์	%wt
เอสเทอร์	%wt
ค่าความเป็นกรด	mg KOH/g
มวลโมเลกุล	g/mol

ตารางที่ ก.3 องค์ประกอบกรดไขมันหลักของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์

Free fatty acid	Trait	wt. %
caprylic acid	C8:0	0.010
Nonanoic acid	C9:0	0.000
Capric acid	C10:0	0.014
Undecylic acid	C11:0	0.000
Lauric acid	C12:0	0.174
Tridecylic acid	C13:0	0.000
myristic acid	C14:0	0.811
Pentadecylic acid	C15:0	0.044
palmitic acid	C16:0	36.381
palmitoleic acid	C16:1	0.219
margaric acid	C17:0	0.095
stearic acid	C18:0	4.075
oleic acid	C18:1	45.750
linoleic acid	C18:2	10.733
gamma linoleic acid	C18:3	0.207
arachidic acid	C20:0	0.370
eicosenoic acid	C20:1	0.199
Behenic acid	C22:0	0.076
Erucic acid	C22:1	0.000
Lignoceric acid	C24:0	0.074
Nervonic acid	C24:1	0.000

ตารางที่ ก.4 การคำนวณน้ำหนักโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์

Free fatty acid	wt.%	molar mass of TG (g/mol)
caprylic acid	0.010	470.697
Nonanoic acid	0.000	512.778
Capric acid	0.014	554.859
Undecylic acid	0.000	596.94
Lauric acid	0.174	639.021
Tridecylic acid	0.000	681.102
myristic acid	0.811	723.183
Pentadecylic acid	0.044	765.264
palmitic acid	36.381	807.345
palmitoleic acid	0.219	801.345
margaric acid	0.095	849.426
stearic acid	4.075	891.507
oleic acid	45.750	885.507
linoleic acid	10.733	879.426
gamma linoleic acid	0.207	873.507
arachidic acid	0.370	975.669
eicosenoic acid	0.199	969.669
Behenic acid	0.076	1059.831
Erucic acid	0.000	1095.912
Lignoceric acid	0.074	1143.993
Nervonic acid	0.000	1137.993

ค่าเฉลี่ยน้ำหนักโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ = 848.553 กรัม/โมล

ตารางที่ ก.5 การคำนวณน้ำหนักโมเลกุลของกรดไขมันอิสระ

Free fatty acid	wt. %	molar mass of FFA (g/mol)
caprylic acid	0.010	144.210
Nonanoic acid	0.000	158.230
Capric acid	0.014	172.260
Undecylic acid	0.000	186.290
Lauric acid	0.174	200.320
Tridecylic acid	0.000	214.340
myristic acid	0.811	228.370
Pentadecylic acid	0.044	242.400
palmitic acid	36.381	256.420
palmitoleic acid	0.219	254.410
margaric acid	0.095	270.450
stearic acid	4.075	284.480
oleic acid	45.750	282.460
linoleic acid	10.733	280.450
gamma linoleic acid	0.207	278.430
arachidic acid	0.370	312.530
eicosenoic acid	0.199	310.510
Behenic acid	0.076	340.580
Erucic acid	0.000	338.570
Lignoceric acid	0.074	368.630
Nervonic acid	0.000	366.648

ค่าเฉลี่ยน้ำหนักโมเลกุลของกรดไขมันอิสระ = 270.248 กรัม/โมล

ตารางที่ ก.6 การคำนวณน้ำหนักโมเลกุลของเอสเทอร์

Free fatty acid	wt. %	molar mass of Ester (g/mol)
caprylic acid	0.010	158.243
Nonanoic acid	0.000	172.27
Capric acid	0.014	186.297
Undecylic acid	0.000	200.324
Lauric acid	0.174	214.351
Tridecylic acid	0.000	228.378
myristic acid	0.811	242.405
Pentadecylic acid	0.044	256.432
palmitic acid	36.381	270.459
palmitoleic acid	0.219	268.459
margaric acid	0.095	284.486
stearic acid	4.075	298.513
oleic acid	45.750	296.513
linoleic acid	10.733	294.513
gamma linoleic acid	0.207	278.486
arachidic acid	0.370	326.567
eicosenoic acid	0.199	324.567
Behenic acid	0.076	354.621
Erucic acid	0.000	366.648
Lignoceric acid	0.074	382.675
Nervonic acid	0.000	380.675

ค่าเฉลี่ยน้ำหนักโมเลกุลของเอสเทอร์ = 284.159 กรัม/โมล

การคำนวณมวลโมลเฉลี่ยของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์

$$\begin{aligned} \text{มวลโมลเฉลี่ยของ} &= \left[\left(\frac{97.097}{100} \right) \times 848.553 \right] + \left[\left(\frac{0.268}{100} \right) \times 270.248 \right] + \left[\left(\frac{0.000}{100} \right) \times 284.159 \right] \\ \text{น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์} & \\ &= 824.644 \text{ กรัม/โมล} \end{aligned}$$

การคำนวณเปอร์เซ็นต์ผลได้ (%yield)

เจือไนเอทานอล 47 vol.% ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 14.4 g/L of oil

$$\begin{aligned} \text{เปอร์เซ็นต์ผลได้} &= \frac{\left[\left(\frac{329.5 \text{ ml}}{518 \text{ ml}} \right) \times 100 \text{ vol.} \% \right]}{100 \text{ vol.} \%} \times 100 \\ \text{ไบโอดีเซลบริสุทธิ์} & \\ &= 63.61 \text{ vol.} \% \end{aligned}$$

อัตราการไหลน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 20 L/hr. (100 vol.%)

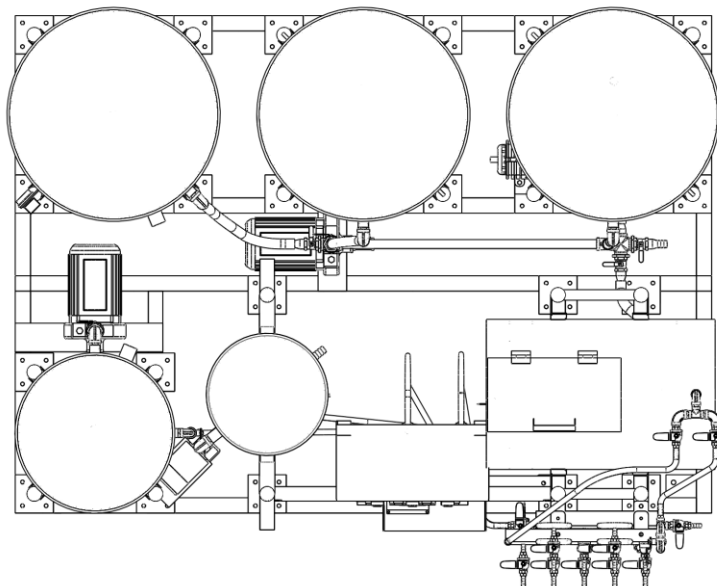
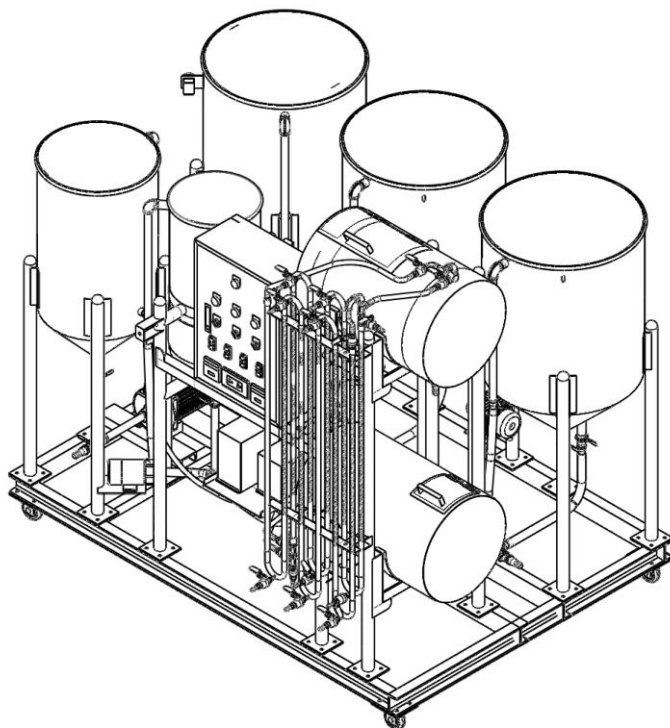
อัตราการไหลเอทานอล 9.4 L/hr. (47 vol.%)

$$\begin{aligned} \text{กำลังการผลิต} &= \left(\frac{20.0 + 9.4}{100} \right) \times 63.61 \\ \text{ไบโอดีเซลบริสุทธิ์} & \\ &= 18.70 \text{ L/hr.} \end{aligned}$$

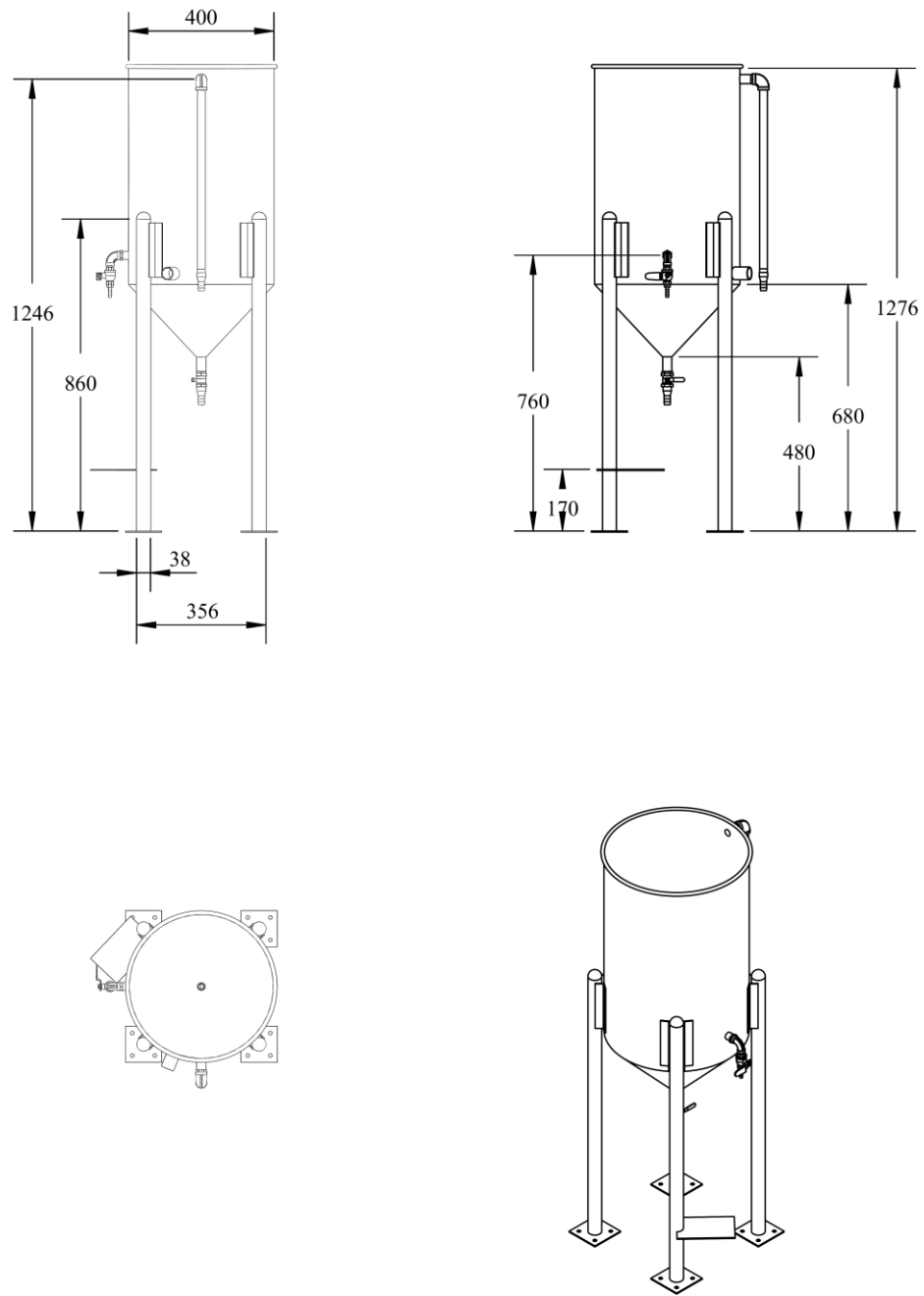
ภาคผนวก ข
(แบบของชุดทดลอง)

ตารางที่ ข.1 รายการชิ้นส่วนอุปกรณ์ของชุดทดลองการผลิตเอซิลเอสเตอร์แบบต่อเนื่องด้วยท่อผสมแบบสถิต

ลำดับที่	ชื่อ	จำนวน	หน่วย	ขนาด	หมายเหตุ
1	เครื่องผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง	1	เครื่อง	ตามแบบ	รูปที่ ข.1
	- ถังน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์	1	ถัง	ตามแบบ	รูปที่ ข.2
	- ถังแอลกอฮอล์ผสมตัวเร่งปฏิกิริยา KOH	1	ถัง	ตามแบบ	รูปที่ ข.3
	- ถังแยกไบโอดีเซลดิบ	1	ถัง	ตามแบบ	รูปที่ ข.4
	- ถังพักไบโอดีเซลดิบ	1	ถัง	ตามแบบ	รูปที่ ข.5
	- ถังล้างไบโอดีเซล	1	ถัง	ตามแบบ	รูปที่ ข.6
	- ถังเก็บไบโอดีเซลบริสุทธิ์	1	ถัง	ตามแบบ	รูปที่ ข.7
2	ชุดท่อผสมแบบสถิต	1	ชุด	ตามแบบ	รูปที่ ข.8
3	ชุดประกอบฐานรองเครื่อง	1	ชุด	ตามแบบ	รูปที่ ข.9
4	ตู้ควบคุมระบบไฟฟ้า	1	ชุด	-	-
5	Digital dosing pump: GRUNDFOS	1	ตัว	DME 48-3	-
6	Digital dosing pump: GRUNDFOS	1	ตัว	DDA 30-4	-
7	Magnetic driven pump: SANISO	1	ตัว	PMD-211	-
8	Centrifugal pump:	2	ตัว	WCH-3755	-
9	Immersion heater	1	อัน	2000W	-
10	Immersion heater	1	อัน	2000W	-
11	Band heater	1	อัน	2000W	-

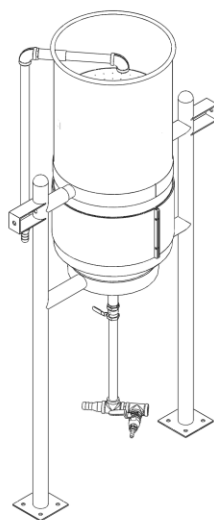
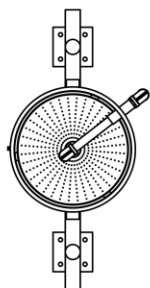
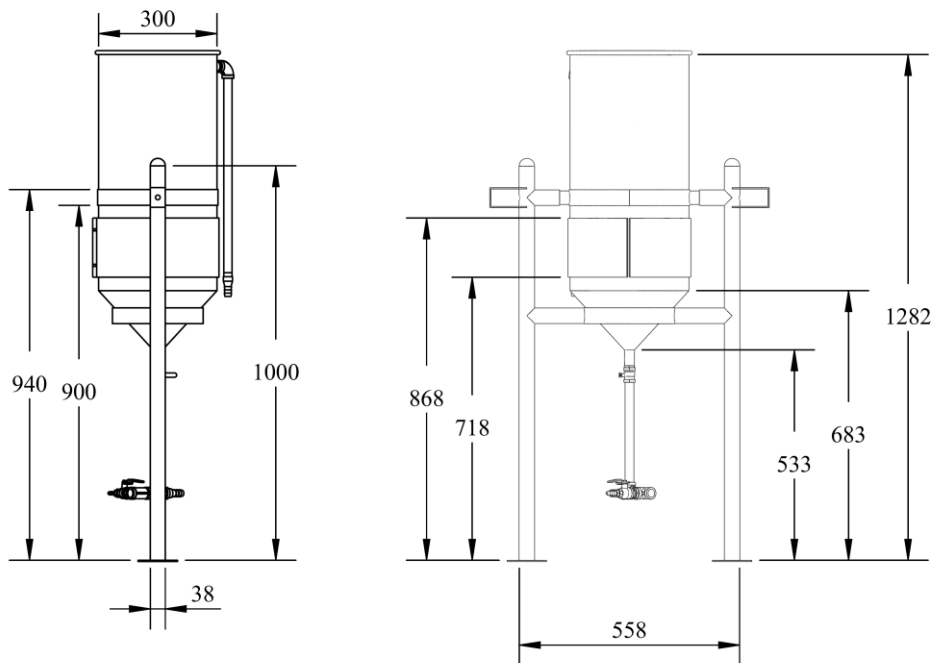


รูปที่ ข.1 แบบของ เครื่องผลิตไ้ ไอ้ดีเซลแบบต่อเนื่อง



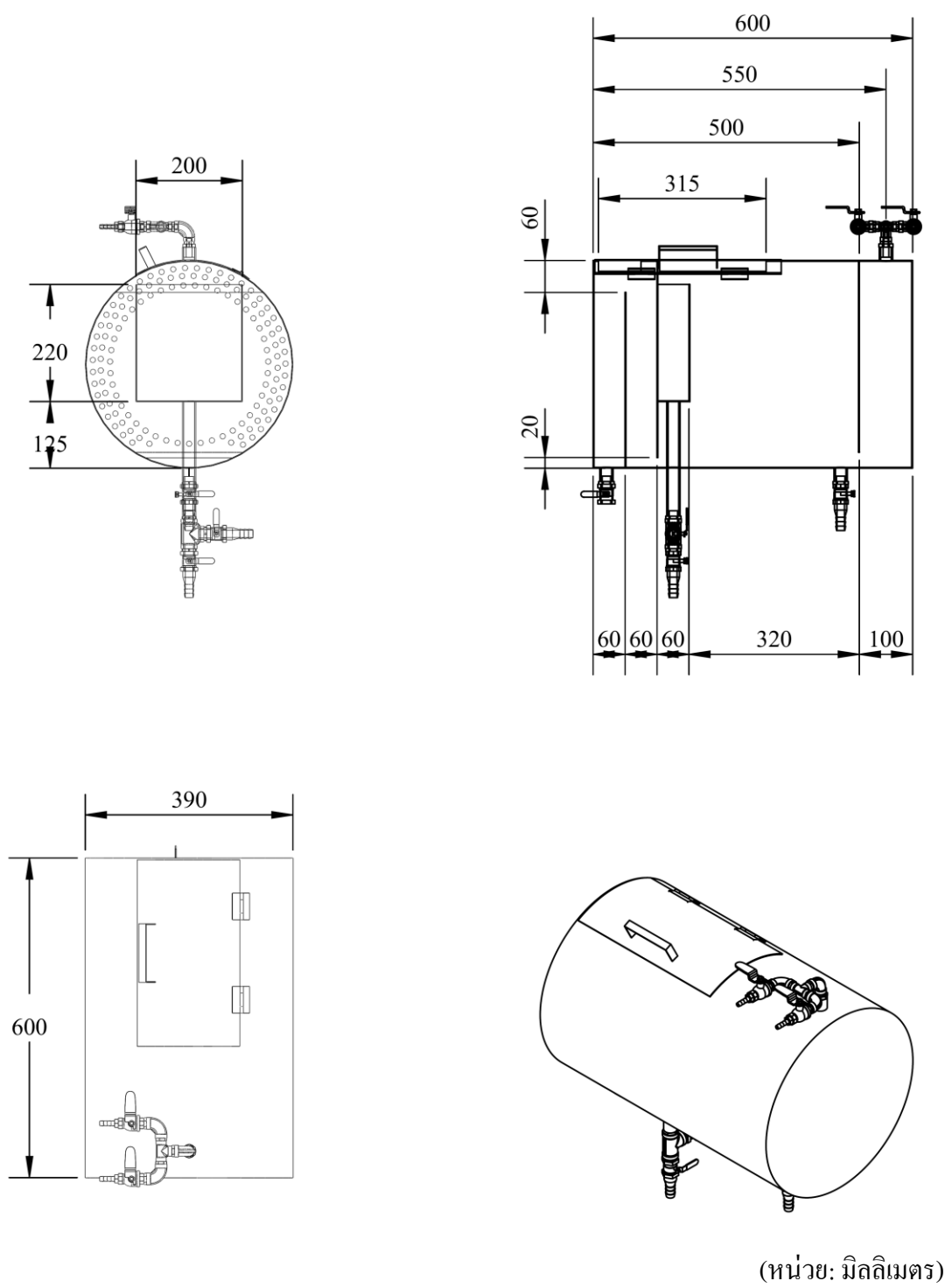
(หน่วย: มิลลิเมตร)

รูปที่ ข.2 แบบของ ถังน้ำมันพลาสติกบริสุทธิ์

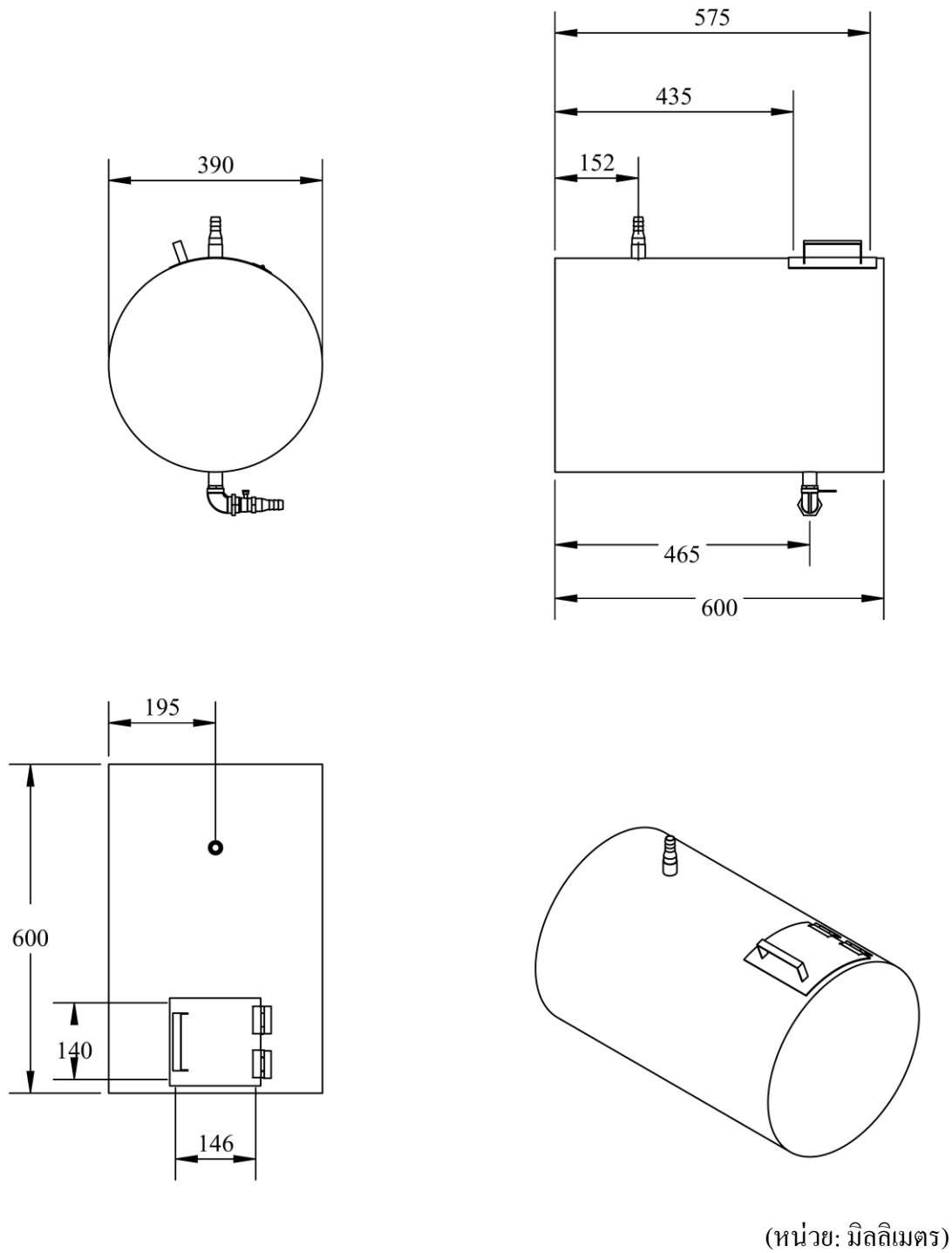


(หน่วย: มิลลิเมตร)

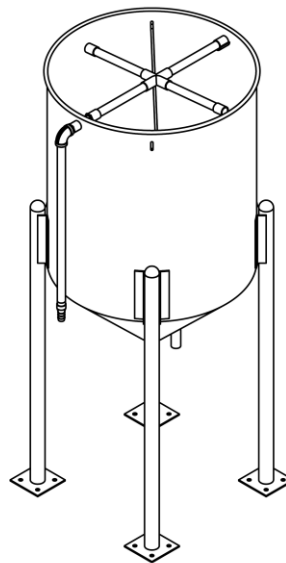
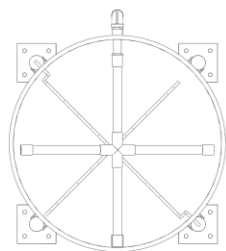
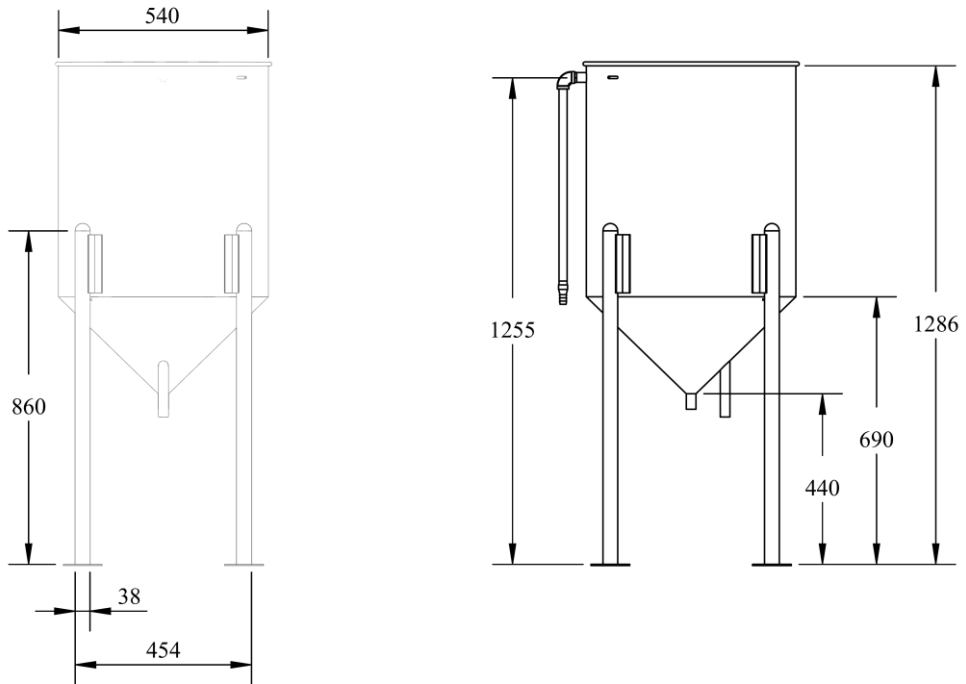
รูปที่ ข.3 แบบของ ถังแอลกอฮอล์ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ ข.4 แบบของ ถังแยกไบ โอดีเซลคิบ

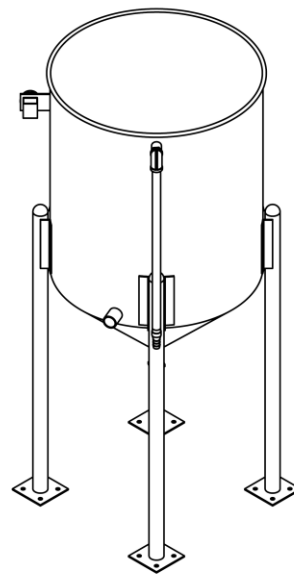
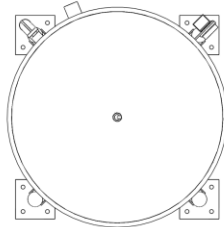
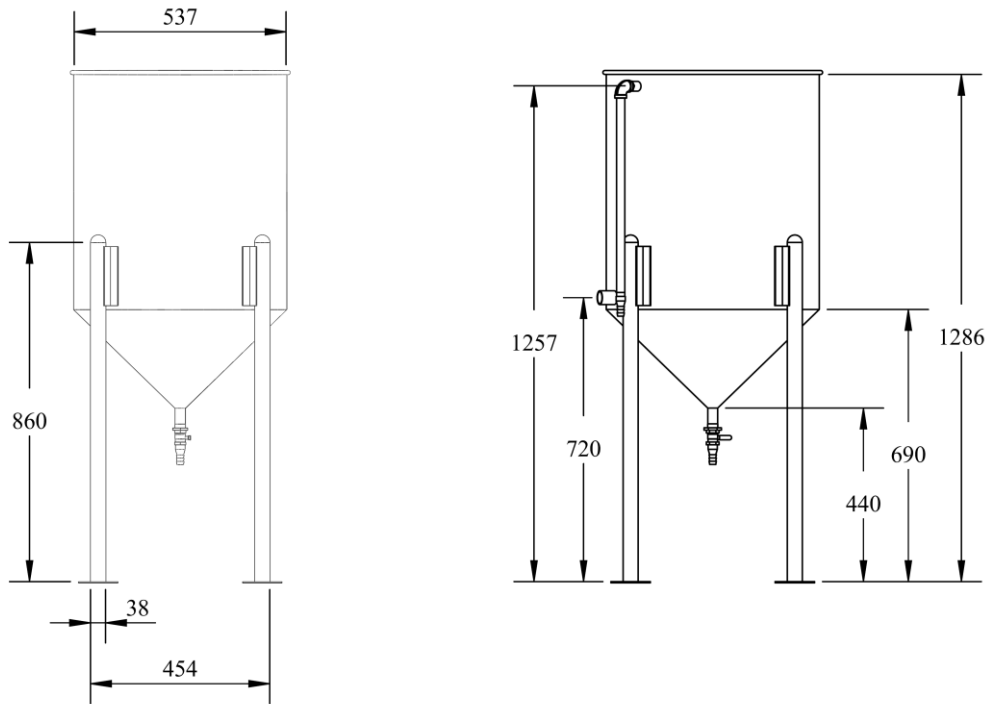


รูปที่ ข.5 แบบของ ถังพักไบโอดีเซลดิบ



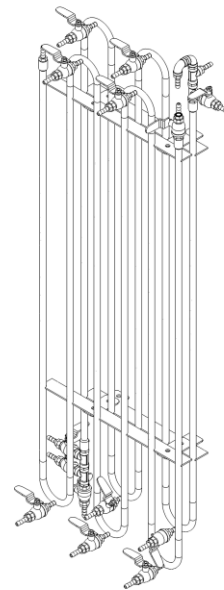
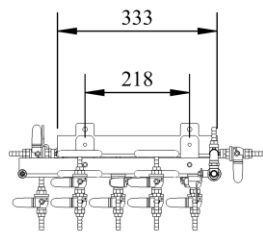
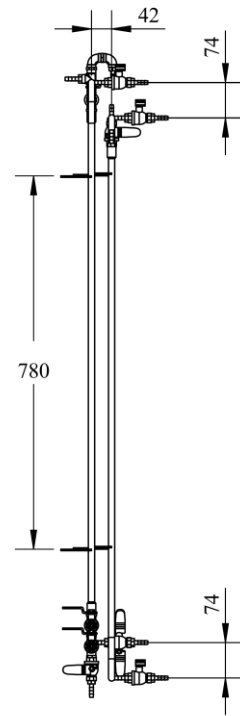
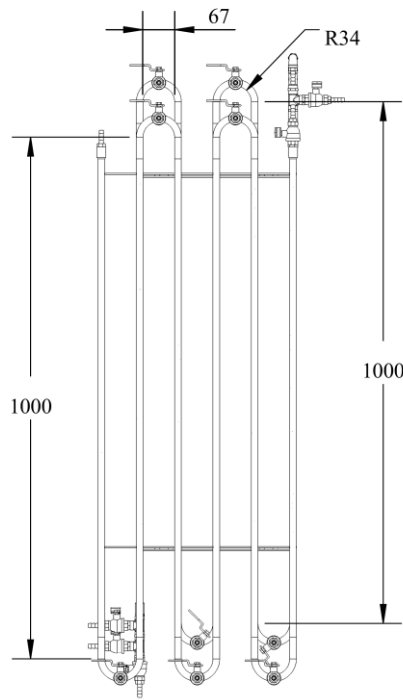
(หน่วย: มิลลิเมตร)

รูปที่ ข.6 แบบของ ถังล้างใบ โอดีเซลคิบ



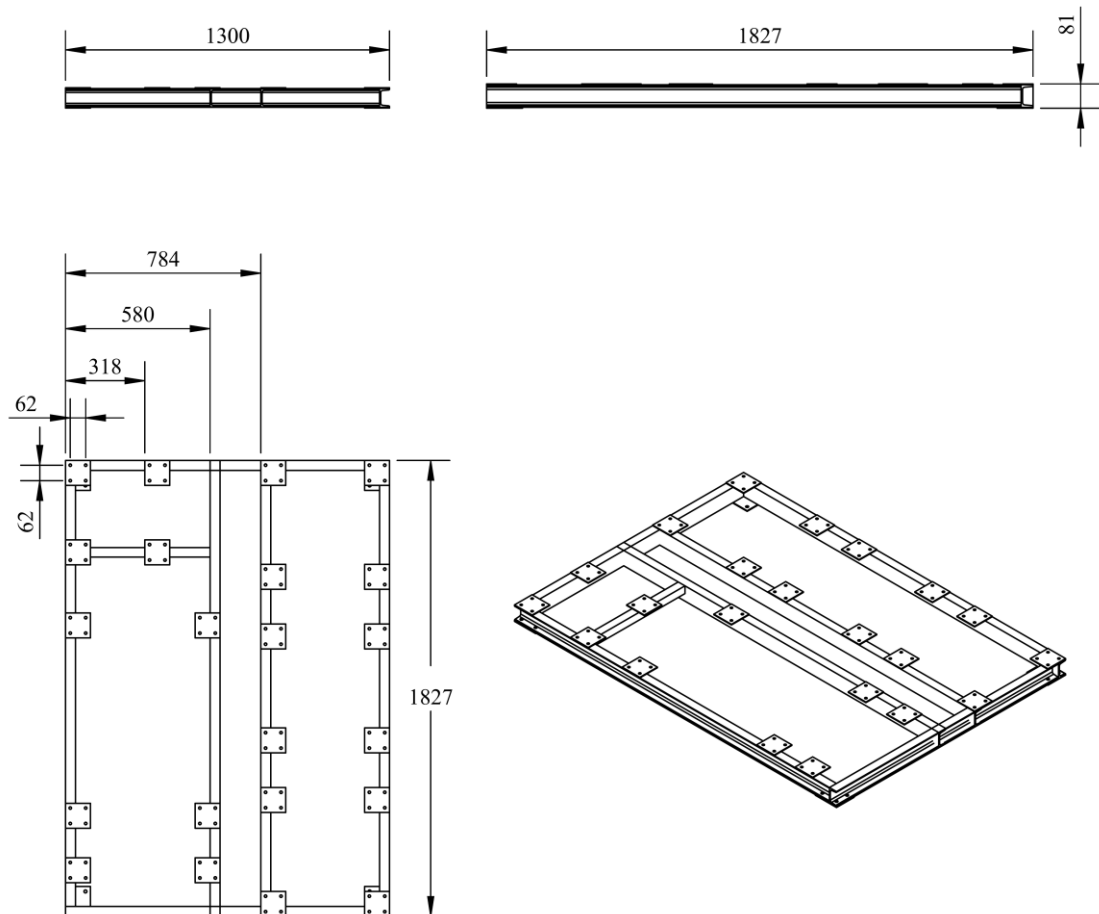
(หน่วย: มิลลิเมตร)

รูปที่ ข.7 แบบของ ถังเก็บไป โอดีเซลบริสุทธิ์



(หน่วย: มิลลิเมตร)

รูปที่ ข.8 แบบของ ชุดท่อผสมแบบสถิต



(หน่วย: มิลลิเมตร)

รูปที่ ข.9 ชุดประกอบฐานรองเครื่อง

ภาคผนวก ค
(ขั้นตอนการออกแบบแผนการตลาด)

ขั้นตอนการออกแบบแผนการทดลองด้วยวิธีพื้นที่ผิวตอบสนอง

1. การกำหนดตัวแปรอิสระ

ตัวแปรที่จะทำการศึกษามี 2 ตัวแปร คือ ปริมาณแอลกอฮอล์ (A) และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (K) เพื่อวิเคราะห์หาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนอง (เปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซล, *Ester*)

2. การกำหนดช่วงของตัวแปรอิสระ

การกำหนดช่วงของตัวแปรอิสระนั้นมีความสำคัญต่อเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดของผลตอบ-สนองที่จะทำการศึกษามาก ซึ่งช่วงของตัวแปรอิสระไม่ควรกว้างเกินไป เพราะจะทำให้ความแม่นยำในการหาเงื่อนไขการทดลองที่เหมาะสมลดลง จึงกำหนดช่วงการแปรค่าของตัวแปรอิสระในโปรแกรม essential experimental design and essential regression version 2.209 ดังแสดงในรูปที่ ค.1 และได้แสดงผลของช่วงการแปรค่าของตัวแปรอิสระในตารางที่ ค.1

Factor Name	Units	Low Value	High Value
alcohol	vol. %	25	65
KOH	gKOH/L	9	15

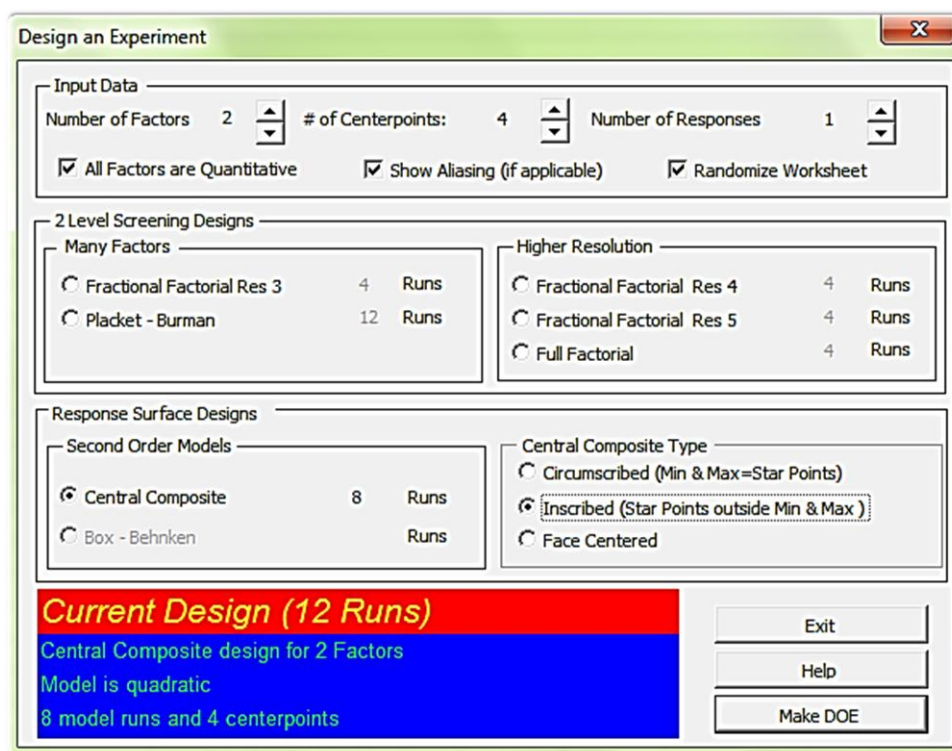
รูปที่ ค.1 ช่วงการแปรค่าของตัวแปรอิสระ

ตารางที่ ค.1 แสดงช่วงการแปรค่าของตัวแปรอิสระ

ตัวแปรอิสระ	หน่วย	ระดับของตัวแปรอิสระ				
		-1.414	-1	0	1	1.414
แอลกอฮอล์	% โดยปริมาตร	17	25	45	65	73
โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	g / Liter of oil	7.8	9	12	15	16.2

3. การเลือกวิธีวิเคราะห์การวางแผนการทดลอง

ออกแบบเงื่อนไขการทดลองด้วยวิธี central composite design (CCD) โดยมี 2 ตัวแปรอิสระ ที่ 5 ระดับของ code ตัวแปรอิสระ และมีตัวแปรผลตอบสนอง 1 ตัว ดังแสดงในรูปที่ ค.2



รูปที่ ค.2 วิธีวิเคราะห์การวางแผนการทดลอง

ภาคผนวก ง
(ข้อมูลจากผลการทดลอง)

ตารางที่ ง.1 ผลการทดลองที่ 1 : เงื่อนไข เมทานอล 17% โดยปริมาตร อุณหภูมิ 30°C, ตัวเร่งปฏิกิริยา โพลแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 12 gKOH.L⁻¹

Length of SM (meter)	Ester (wt.%)	FFA (wt.%)	TG (wt.%)	DG (wt.%)	MG (wt.%)
0	0.000	0.268	97.097	2.288	0.347
1	93.693	0.000	2.681	0.335	3.291
2	95.520	0.000	1.355	0.000	3.125
3	94.020	0.000	1.294	0.190	4.496
4	93.290	0.000	1.667	0.000	5.044
5	95.798	0.000	1.660	0.059	2.483
6	96.455	0.000	1.209	0.000	2.336
7	94.015	0.000	1.653	0.172	4.161
8	96.160	0.000	0.847	0.344	2.650
9	95.136	0.000	1.321	0.159	3.386
10	96.594	0.000	0.925	0.000	2.482

ตารางที่ ง.2 ผลการทดลองที่ 2 : เงื่อนไข เมทานอล 45% โดยปริมาตร อุณหภูมิ 30°C, ตัวเร่งปฏิกิริยา โพลแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 16.2 gKOH.L⁻¹

Length of SM (meter)	Ester (wt.%)	FFA (wt.%)	TG (wt.%)	DG (wt.%)	MG (wt.%)
0	0.000	0.268	97.097	2.288	0.347
1	95.366	0.000	0.000	0.000	4.634
2	95.897	0.000	0.000	0.000	4.103
3	99.462	0.000	0.000	0.000	0.538
4	99.193	0.000	0.000	0.000	0.807
5	98.232	0.000	0.000	0.000	1.768
6	98.259	0.000	0.000	0.000	1.741
7	97.320	0.000	0.000	0.000	2.680
8	98.615	0.000	0.000	0.000	1.385
9	97.386	0.000	0.000	0.000	2.614
10	97.207	0.000	0.000	0.000	2.794

ตารางที่ ๓.3 ผลการทดลองที่ 3 : เงื่อนไข เมทานอล 65% โดยปริมาตร อุณหภูมิ 30°C, ตัวเร่งปฏิกิริยา โพลีเอทิลีนไฮดรอกไซด์ 9 gKOH.L⁻¹

Length of SM (meter)	Ester (wt.%)	FFA (wt.%)	TG (wt.%)	DG (wt.%)	MG (wt.%)
0	0.000	0.268	97.097	2.288	0.347
1	96.912	0.000	0.000	0.000	3.089
2	97.831	0.000	0.000	0.000	2.169
3	96.292	0.000	0.000	0.000	3.709
4	96.534	0.000	0.000	0.000	3.466
5	97.780	0.000	0.000	0.000	2.220
6	98.550	0.000	0.000	0.000	1.450
7	97.414	0.000	0.000	0.000	2.587
8	97.156	0.000	0.000	0.000	2.844
9	96.611	0.000	0.000	0.000	3.389
10	97.743	0.000	0.000	0.000	2.257

ตารางที่ ๓.4 ผลการทดลองที่ 4 : เงื่อนไข เมทานอล 73% โดยปริมาตร อุณหภูมิ 30°C, ตัวเร่งปฏิกิริยา โพลีเอทิลีนไฮดรอกไซด์ 12 gKOH.L⁻¹

Length of SM (meter)	Ester (wt.%)	FFA (wt.%)	TG (wt.%)	DG (wt.%)	MG (wt.%)
0	0.000	0.268	97.097	2.288	0.347
1	96.541	0.000	0.000	0.000	3.459
2	97.742	0.000	0.000	0.000	2.258
3	98.185	0.000	0.000	0.000	1.815
4	98.740	0.000	0.000	0.000	1.260
5	96.992	0.000	0.000	0.000	3.009
6	97.150	0.000	0.000	0.000	2.850
7	97.423	0.000	0.000	0.000	2.577
8	97.645	0.000	0.000	0.000	2.355
9	96.214	0.000	0.000	0.000	3.786
10	97.296	0.000	0.000	0.000	2.705

ตารางที่ ๖.5 ผลการทดลองที่ 5 : เงื่อนไข เมทานอล 45% โดยปริมาตร อุณหภูมิ 30°C, ตัวเร่งปฏิกิริยา โพลแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 12 gKOH.L⁻¹

Length of SM (meter)	Ester (wt.%)	FFA (wt.%)	TG (wt.%)	DG (wt.%)	MG (wt.%)
0	0.000	0.268	97.097	2.288	0.347
1	97.148	0.000	0.000	0.381	2.471
2	95.451	0.000	0.000	0.000	4.549
3	96.162	0.000	0.000	0.000	3.838
4	97.539	0.000	0.000	0.000	2.461
5	96.294	0.000	0.000	0.000	3.706
6	96.976	0.000	0.000	0.000	3.025
7	97.930	0.000	0.000	0.117	1.953
8	97.640	0.000	0.000	0.000	2.360
9	95.691	0.000	0.000	0.000	4.309
10	96.810	0.000	0.000	0.000	3.190

ตารางที่ ๖.6 ผลการทดลองที่ 6 : เงื่อนไข เมทานอล 25% โดยปริมาตร อุณหภูมิ 30°C, ตัวเร่งปฏิกิริยา โพลแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 9 gKOH.L⁻¹

Length of SM (meter)	Ester (wt.%)	FFA (wt.%)	TG (wt.%)	DG (wt.%)	MG (wt.%)
0	0.000	0.268	97.097	2.288	0.347
1	98.908	0.000	0.000	0.000	1.092
2	99.007	0.000	0.000	0.000	0.993
3	98.408	0.000	0.000	0.000	1.592
4	98.955	0.000	0.000	0.000	1.046
5	96.124	0.000	0.000	0.000	3.876
6	97.576	0.000	0.000	0.000	2.424
7	98.300	0.000	0.000	0.000	1.700
8	98.478	0.000	0.000	0.000	1.522
9	98.080	0.000	0.000	0.000	1.920
10	98.326	0.000	0.000	0.000	1.674

ตารางที่ ๗.7 ผลการทดลองที่ 7 : เงื่อนไข เมทานอล 45% โดยปริมาตร อุณหภูมิ 30°C, ตัวเร่งปฏิกิริยา โพลีเอทิลีนไฮดรอกไซด์ 7.8 gKOH.L⁻¹

Length of SM (meter)	Ester (wt.%)	FFA (wt.%)	TG (wt.%)	DG (wt.%)	MG (wt.%)
0	0.000	0.268	97.097	2.288	0.347
1	97.296	0.000	0.000	0.000	0.240
2	97.502	0.000	0.000	0.000	2.498
3	97.142	0.000	0.000	0.908	1.950
4	98.573	0.000	0.000	0.000	1.427
5	97.789	0.000	0.000	0.000	2.212
6	96.893	0.000	0.000	0.000	3.108
7	98.852	0.000	0.000	0.000	1.148
8	99.074	0.000	0.000	0.000	0.926
9	96.362	0.000	0.000	0.658	2.981
10	95.456	0.000	0.000	0.000	4.544

ตารางที่ ๗.8 ผลการทดลองที่ 8 : เงื่อนไข เมทานอล 45% โดยปริมาตร อุณหภูมิ 30°C, ตัวเร่งปฏิกิริยา โพลีเอทิลีนไฮดรอกไซด์ 12 gKOH.L⁻¹

Length of SM (meter)	Ester (wt.%)	FFA (wt.%)	TG (wt.%)	DG (wt.%)	MG (wt.%)
0	0.000	0.268	97.097	2.288	0.347
1	97.047	0.000	0.000	0.259	2.695
2	97.172	0.000	0.000	0.000	2.828
3	98.564	0.000	0.000	0.000	1.436
4	98.332	0.000	0.000	0.000	1.668
5	96.814	0.000	0.000	0.000	3.186
6	97.828	0.000	0.000	0.000	2.172
7	97.959	0.000	0.000	0.000	2.041
8	97.056	0.000	0.000	0.000	2.944
9	97.935	0.000	0.000	0.000	2.066
10	97.720	0.000	0.000	0.000	2.280

ตารางที่ ๙.9 ผลการทดลองที่ 9 : เงื่อนไข เมทานอล 25% โดยปริมาตร อุณหภูมิ 30°C, ตัวเร่งปฏิกิริยา โพลีสเตียมไฮดรอกไซด์ 15 gKOH.L⁻¹

Length of SM (meter)	Ester (wt.%)	FFA (wt.%)	TG (wt.%)	DG (wt.%)	MG (wt.%)
0	0.000	0.268	97.097	2.288	0.347
1	98.199	0.000	0.000	0.000	1.801
2	99.069	0.000	0.000	0.000	0.931
3	96.816	0.000	0.000	0.000	2.390
4	95.751	0.000	0.000	0.457	3.792
5	97.856	0.000	0.000	0.212	1.932
6	97.992	0.000	0.000	0.000	2.008
7	97.173	0.000	0.000	0.000	2.827
8	97.921	0.000	0.000	0.000	2.079
9	97.553	0.000	0.000	0.000	2.447
10	97.318	0.000	0.000	0.000	2.682

ตารางที่ ๙.10 ผลการทดลองที่ 10 : เงื่อนไข เมทานอล 45% โดยปริมาตร อุณหภูมิ 30°C, ตัวเร่งปฏิกิริยา โพลีสเตียมไฮดรอกไซด์ 12 gKOH.L⁻¹

Length of SM (meter)	Ester (wt.%)	FFA (wt.%)	TG (wt.%)	DG (wt.%)	MG (wt.%)
0	0.000	0.268	97.097	2.288	0.347
1	96.802	0.000	0.000	0.000	3.198
2	97.901	0.000	0.000	0.000	2.098
3	97.505	0.000	0.069	0.794	2.426
4	97.536	0.000	0.000	0.000	2.464
5	97.636	0.000	0.000	0.000	2.364
6	96.552	0.000	0.000	0.000	3.448
7	96.933	0.000	0.000	0.000	3.067
8	97.517	0.000	0.000	0.000	2.483
9	99.137	0.000	0.000	0.000	0.864
10	99.159	0.000	0.000	0.000	0.841

ตารางที่ ง.11 ผลการทดลองที่ 11 : เงื่อนไข เมทานอล 45%โดยปริมาตร อุณหภูมิ 30°C, ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 12 gKOH.L⁻¹

Length of SM (meter)	Ester (wt.%)	FFA (wt.%)	TG (wt.%)	DG (wt.%)	MG (wt.%)
0	0.000	0.268	97.097	2.288	0.347
1	98.779	0.000	0.000	0.000	1.221
2	98.601	0.000	0.000	0.000	1.399
3	95.953	0.000	0.000	0.000	4.047
4	95.960	0.000	0.000	0.000	4.041
5	98.137	0.000	0.000	0.000	1.863
6	98.153	0.000	0.000	0.000	1.847
7	98.204	0.000	0.000	0.000	1.796
8	97.086	0.000	0.000	0.000	2.914
9	97.232	0.000	0.000	0.000	2.768
10	97.720	0.000	0.000	0.000	2.280

ตารางที่ ง.12 ผลการทดลองที่ 12 : เงื่อนไข เมทานอล 65%โดยปริมาตร อุณหภูมิ 30°C, ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 15 gKOH.L⁻¹

Length of SM (meter)	Ester (wt.%)	FFA (wt.%)	TG (wt.%)	DG (wt.%)	MG (wt.%)
0	0.000	0.268	97.097	2.288	0.347
1	97.891	0.000	0.000	0.000	2.110
2	96.952	0.000	0.000	0.000	3.048
3	96.310	0.000	0.000	0.000	3.690
4	97.817	0.000	0.000	0.000	2.183
5	97.049	0.000	0.000	0.000	2.951
6	97.507	0.000	0.000	0.000	2.493
7	97.384	0.000	0.000	0.000	2.616
8	97.967	0.000	0.000	0.000	2.033
9	97.292	0.000	0.000	0.000	2.708
10	97.284	0.000	0.000	0.000	2.716

ตารางที่ ง.13 ผลการทดลองที่ 13 : เงื่อนไข เมทานอล 17%โดยปริมาตร อุณหภูมิ 60°C, ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 12 gKOH.L⁻¹

Length of SM (meter)	Ester (wt.%)	FFA (wt.%)	TG (wt.%)	DG (wt.%)	MG (wt.%)
0	0.000	0.268	97.097	2.288	0.347
1	98.996	0.000	0.185	0.305	0.513
2	98.080	0.000	0.732	0.456	0.731
3	97.351	0.000	0.703	0.444	1.502
4	96.785	0.000	1.604	1.038	0.573
5	98.737	0.000	0.178	0.290	0.795
6	98.445	0.000	0.000	0.548	1.007
7	98.259	0.000	0.230	0.594	0.918
8	97.275	0.000	1.697	0.677	0.351
9	96.445	0.000	1.940	0.884	0.732
10	97.474	0.000	1.309	0.594	0.623

ตารางที่ ง.14 ผลการทดลองที่ 14 : เงื่อนไข เมทานอล 45%โดยปริมาตร อุณหภูมิ 60°C, ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 16.2 gKOH.L⁻¹

Length of SM (meter)	Ester (wt.%)	FFA (wt.%)	TG (wt.%)	DG (wt.%)	MG (wt.%)
0	0.000	0.268	97.097	2.288	0.347
1	98.280	0.000	0.000	0.000	1.721
2	98.911	0.000	0.000	0.000	1.090
3	98.273	0.000	0.000	0.000	1.727
4	98.844	0.000	0.000	0.000	1.155
5	98.709	0.000	0.000	0.000	1.291
6	98.904	0.000	0.000	0.000	1.097
7	98.641	0.000	0.000	0.000	1.359
8	98.569	0.000	0.000	0.000	1.431
9	98.887	0.000	0.000	0.000	1.114
10	98.230	0.000	0.000	0.000	1.770

ตารางที่ ง.15 ผลการทดลองที่ 15 : เงื่อนไข เมทานอล 65%โดยปริมาตร อุณหภูมิ 60°C, ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 9 gKOH.L⁻¹

Length of SM (meter)	Ester (wt.%)	FFA (wt.%)	TG (wt.%)	DG (wt.%)	MG (wt.%)
0	0.000	0.268	97.097	2.288	0.347
1	98.515	0.000	0.000	0.000	1.485
2	98.129	0.000	0.000	0.000	1.871
3	98.806	0.000	0.000	0.000	1.194
4	98.116	0.000	0.000	0.000	1.884
5	98.694	0.000	0.000	0.000	1.306
6	98.668	0.000	0.000	0.000	1.332
7	98.924	0.000	0.000	0.000	1.076
8	99.005	0.000	0.000	0.000	0.995
9	98.307	0.000	0.000	0.000	1.694
10	98.753	0.000	0.000	0.000	1.247

ตารางที่ ง.16 ผลการทดลองที่ 16 : เงื่อนไข เมทานอล 73%โดยปริมาตร อุณหภูมิ 60°C, ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 12 gKOH.L⁻¹

Length of SM (meter)	Ester (wt.%)	FFA (wt.%)	TG (wt.%)	DG (wt.%)	MG (wt.%)
0	0.000	0.268	97.097	2.288	0.347
1	99.071	0.000	0.000	0.063	0.866
2	99.326	0.000	0.000	0.000	0.674
3	99.319	0.000	0.000	0.000	0.681
4	98.785	0.000	0.000	0.000	1.215
5	98.464	0.000	0.000	0.000	1.536
6	98.933	0.000	0.000	0.000	1.067
7	98.835	0.000	0.000	0.000	1.166
8	98.731	0.000	0.000	0.100	1.169
9	98.581	0.000	0.000	0.000	1.419
10	99.147	0.000	0.000	0.000	0.853

ตารางที่ ง.17 ผลการทดลองที่ 17 : เงื่อนไข เมทานอล 45%โดยปริมาตร อุณหภูมิ 60°C, ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 12 gKOH.L⁻¹

Length of SM (meter)	Ester (wt.%)	FFA (wt.%)	TG (wt.%)	DG (wt.%)	MG (wt.%)
0	0.000	0.268	97.097	2.288	0.347
1	98.696	0.000	0.000	0.000	1.304
2	98.954	0.000	0.000	0.000	1.046
3	98.756	0.000	0.000	0.103	1.141
4	99.085	0.000	0.000	0.000	0.916
5	98.806	0.000	0.000	0.000	1.194
6	98.734	0.000	0.000	0.000	1.266
7	98.671	0.000	0.000	0.000	1.329
8	99.246	0.000	0.000	0.000	0.754
9	98.924	0.000	0.000	0.000	1.076
10	98.448	0.000	0.000	0.000	1.552

ตารางที่ ง.18 ผลการทดลองที่ 18 : เงื่อนไข เมทานอล 25%โดยปริมาตร อุณหภูมิ 60°C, ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 9 gKOH.L⁻¹

Length of SM (meter)	Ester (wt.%)	FFA (wt.%)	TG (wt.%)	DG (wt.%)	MG (wt.%)
0	0.000	0.268	97.097	2.288	0.347
1	98.456	0.000	0.000	0.000	1.543
2	98.978	0.000	0.000	0.000	1.022
3	98.542	0.000	0.000	0.000	1.458
4	98.978	0.000	0.000	0.000	1.022
5	98.927	0.000	0.000	0.000	1.074
6	98.519	0.000	0.000	0.000	1.481
7	99.168	0.000	0.000	0.000	0.832
8	98.776	0.000	0.000	0.000	1.224
9	98.777	0.000	0.000	0.000	1.223
10	98.680	0.000	0.000	0.000	1.320

ตารางที่ ง.19 ผลการทดลองที่ 19 : เงื่อนไข เมทานอล 45%โดยปริมาตร อุณหภูมิ 60°C, ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 7.8 gKOH.L⁻¹

Length of SM (meter)	Ester (wt.%)	FFA (wt.%)	TG (wt.%)	DG (wt.%)	MG (wt.%)
0	0.000	0.268	97.097	2.288	0.347
1	97.894	0.000	0.000	0.000	2.106
2	99.159	0.000	0.000	0.000	0.841
3	98.515	0.000	0.000	0.000	1.485
4	99.306	0.000	0.000	0.000	0.694
5	98.673	0.000	0.000	0.000	1.327
6	98.809	0.000	0.000	0.000	1.191
7	98.693	0.000	0.000	0.000	1.307
8	98.908	0.000	0.000	0.000	1.091
9	98.741	0.000	0.000	0.000	1.259
10	99.007	0.000	0.000	0.000	0.994

ตารางที่ ง.20 ผลการทดลองที่ 20 : เงื่อนไข เมทานอล 45%โดยปริมาตร อุณหภูมิ 60°C, ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 12 gKOH.L⁻¹

Length of SM (meter)	Ester (wt.%)	FFA (wt.%)	TG (wt.%)	DG (wt.%)	MG (wt.%)
0	0.000	0.268	97.097	2.288	0.347
1	99.117	0.000	0.000	0.000	0.883
2	99.029	0.000	0.000	0.000	0.971
3	98.057	0.000	0.000	0.000	1.943
4	98.696	0.000	0.000	0.000	1.305
5	98.791	0.000	0.000	0.000	1.209
6	99.294	0.000	0.000	0.000	0.707
7	98.512	0.000	0.000	0.000	1.488
8	99.298	0.000	0.000	0.000	0.702
9	98.692	0.000	0.000	0.000	1.308
10	98.971	0.000	0.000	0.000	1.029

ตารางที่ ง.21 ผลการทดลองที่ 21 : เงื่อนไข เมทานอล 25%โดยปริมาตร อุณหภูมิ 60°C, ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 15 gKOH.L⁻¹

Length of SM (meter)	Ester (wt.%)	FFA (wt.%)	TG (wt.%)	DG (wt.%)	MG (wt.%)
0	0.000	0.268	97.097	2.288	0.347
1	97.825	0.000	0.000	0.000	2.175
2	98.673	0.000	0.000	0.000	1.327
3	98.692	0.000	0.000	0.000	1.309
4	99.133	0.000	0.000	0.000	0.868
5	99.140	0.000	0.000	0.000	0.860
6	99.719	0.000	0.000	0.000	0.281
7	99.304	0.000	0.000	0.000	0.696
8	98.593	0.000	0.000	0.000	1.407
9	98.632	0.000	0.000	0.000	1.369
10	98.948	0.000	0.000	0.000	1.051

ตารางที่ ง.22 ผลการทดลองที่ 22 : เงื่อนไข เมทานอล 45%โดยปริมาตร อุณหภูมิ 60°C, ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 12 gKOH.L⁻¹

Length of SM (meter)	Ester (wt.%)	FFA (wt.%)	TG (wt.%)	DG (wt.%)	MG (wt.%)
0	0.000	0.268	97.097	2.288	0.347
1	98.796	0.000	0.000	0.000	1.204
2	98.552	0.000	0.000	0.000	1.448
3	98.836	0.000	0.000	0.000	1.164
4	98.757	0.000	0.000	0.000	1.243
5	98.858	0.000	0.000	0.000	1.142
6	99.076	0.000	0.000	0.000	0.925
7	98.922	0.000	0.000	0.000	1.079
8	98.707	0.000	0.000	0.000	1.293
9	98.738	0.000	0.000	0.000	1.262
10	99.198	0.000	0.000	0.000	0.802

ตารางที่ ง.23 ผลการทดลองที่ 23 : เงื่อนไข เมทานอล 45%โดยปริมาตร อุณหภูมิ 60°C, ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 12 gKOH.L⁻¹

Length of SM (meter)	Ester (wt.%)	FFA (wt.%)	TG (wt.%)	DG (wt.%)	MG (wt.%)
0	0.000	0.268	97.097	2.288	0.347
1	98.902	0.000	0.000	0.000	1.098
2	98.773	0.000	0.000	0.540	0.687
3	98.573	0.000	0.000	0.000	1.427
4	99.224	0.000	0.000	0.000	0.776
5	98.716	0.000	0.000	0.000	1.284
6	98.911	0.000	0.000	0.000	1.089
7	98.891	0.000	0.000	0.000	1.109
8	98.967	0.000	0.000	0.000	1.033
9	98.525	0.000	0.000	0.000	1.475
10	98.803	0.000	0.000	0.000	1.198

ตารางที่ ง.24 ผลการทดลองที่ 24 : เงื่อนไข เมทานอล 65%โดยปริมาตร อุณหภูมิ 60°C, ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 15 gKOH.L⁻¹

Length of SM (meter)	Ester (wt.%)	FFA (wt.%)	TG (wt.%)	DG (wt.%)	MG (wt.%)
0	0.000	0.268	97.097	2.288	0.347
1	98.569	0.000	0.000	0.000	1.431
2	98.553	0.000	0.000	0.000	1.447
3	97.855	0.000	0.000	0.000	2.145
4	98.743	0.000	0.000	0.000	1.256
5	97.764	0.000	0.000	0.000	2.237
6	98.027	0.000	0.000	0.000	1.973
7	98.301	0.000	0.000	0.000	1.699
8	99.075	0.000	0.000	0.000	0.925
9	99.302	0.000	0.000	0.000	0.698
10	98.858	0.000	0.000	0.000	1.143

ตารางที่ ง.25 ผลการทดลองที่ 25 : เงื่อนไข เอทานอล 17%โดยปริมาตร อุณหภูมิ 30°C, ตัวเร่ง
ปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 12 gKOH.L⁻¹

Length of SM (meter)	Ester (wt.%)	FFA (wt.%)	TG (wt.%)	DG (wt.%)	MG (wt.%)
0	0.000	0.268	97.097	2.288	0.347
1	69.826	0.000	3.602	3.746	22.826
2	64.710	0.000	6.736	3.370	25.185
3	68.992	0.000	3.495	4.956	22.557
4	68.399	0.000	5.367	6.070	20.165
5	68.023	0.000	8.813	11.700	11.464
6	67.822	0.000	8.415	9.412	14.350
7	71.231	0.000	6.957	9.125	12.688
8	70.199	0.000	6.526	8.493	14.782
9	71.850	0.000	8.379	11.185	8.587
10	68.985	0.000	8.654	10.673	11.688

ตารางที่ ง.26 ผลการทดลองที่ 26 : เงื่อนไข เอทานอล 45%โดยปริมาตร อุณหภูมิ 30°C, ตัวเร่ง
ปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 16.2 gKOH.L⁻¹

Length of SM (meter)	Ester (wt.%)	FFA (wt.%)	TG (wt.%)	DG (wt.%)	MG (wt.%)
0	0.000	0.268	97.097	2.288	0.347
1	95.880	0.000	0.249	0.000	3.871
2	98.322	0.000	0.000	0.000	1.678
3	98.728	0.000	0.000	0.000	1.272
4	98.088	0.000	0.000	0.000	1.912
5	96.940	0.000	0.000	0.000	3.060
6	95.864	0.000	0.000	0.131	4.005
7	96.055	0.000	0.000	0.000	3.945
8	97.047	0.000	0.000	0.000	2.953
9	96.749	0.000	0.000	0.000	3.251
10	96.982	0.000	0.000	0.000	3.018

ตารางที่ ง.27 ผลการทดลองที่ 27 : เงื่อนไข เอทานอล 65%โดยปริมาตร อุณหภูมิ 30°C, ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 9 gKOH.L⁻¹

Length of SM (meter)	Ester (wt.%)	FFA (wt.%)	TG (wt.%)	DG (wt.%)	MG (wt.%)
0	0.000	0.268	97.097	2.288	0.347
1	96.910	0.000	0.000	0.358	2.732
2	96.116	0.000	0.000	0.168	3.716
3	97.178	0.000	0.000	0.536	2.286
4	97.702	0.000	0.000	0.062	2.236
5	95.755	0.000	0.000	1.417	2.827
6	96.001	0.000	0.000	1.883	2.117
7	94.364	0.000	0.000	0.289	5.347
8	94.487	0.000	0.000	0.000	5.513
9	96.187	0.000	0.000	0.023	3.790
10	95.783	0.000	0.000	0.000	4.217

ตารางที่ ง.28 ผลการทดลองที่ 28 : เงื่อนไข เอทานอล 73%โดยปริมาตร อุณหภูมิ 30°C, ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 12 gKOH.L⁻¹

Length of SM (meter)	Ester (wt.%)	FFA (wt.%)	TG (wt.%)	DG (wt.%)	MG (wt.%)
0	0.000	0.268	97.097	2.288	0.347
1	97.706	0.000	0.000	1.158	1.136
2	97.611	0.000	0.000	1.057	1.331
3	97.986	0.000	0.000	0.862	1.152
4	97.551	0.000	0.000	0.548	1.901
5	95.580	0.000	0.000	0.000	4.420
6	96.024	0.000	0.000	0.000	3.976
7	97.186	0.000	0.000	0.895	1.919
8	97.888	0.000	0.000	0.411	1.701
9	97.182	0.000	0.000	0.000	2.818
10	97.484	0.000	0.000	0.000	2.516

ตารางที่ 3.29 ผลการทดลองที่ 29 : เงื่อนไข เอทานอล 45%โดยปริมาตร อุณหภูมิ 30°C, ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 12 gKOH.L⁻¹

Length of SM (meter)	Ester (wt.%)	FFA (wt.%)	TG (wt.%)	DG (wt.%)	MG (wt.%)
0	0.000	0.268	97.097	2.288	0.347
1	97.849	0.000	0.000	0.281	1.870
2	95.950	0.000	0.000	0.513	3.536
3	98.005	0.000	0.000	0.000	1.996
4	97.641	0.000	0.000	0.000	2.359
5	94.553	0.000	0.000	0.000	5.448
6	94.101	0.000	0.000	0.000	5.900
7	96.178	0.000	0.000	0.770	3.053
8	95.761	0.000	0.000	0.133	4.106
9	91.597	0.000	0.000	0.000	8.403
10	93.957	0.000	0.000	0.000	6.043

ตารางที่ 3.30 ผลการทดลองที่ 30 : เงื่อนไข เอทานอล 25%โดยปริมาตร อุณหภูมิ 30°C, ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 9 gKOH.L⁻¹

Length of SM (meter)	Ester (wt.%)	FFA (wt.%)	TG (wt.%)	DG (wt.%)	MG (wt.%)
0	0.000	0.268	97.097	2.288	0.347
1	45.127	0.000	30.176	15.718	8.980
2	48.185	0.000	25.787	17.565	8.464
3	53.987	0.000	21.238	13.799	10.976
4	49.505	0.000	24.411	14.598	11.486
5	65.299	0.000	7.208	9.947	17.546
6	65.755	0.000	9.735	10.680	13.831
7	62.543	0.000	9.882	9.772	17.804
8	61.208	0.000	11.464	13.303	14.026
9	64.722	0.000	7.913	8.739	18.626
10	68.127	0.000	10.203	12.049	9.622

ตารางที่ 3.31 ผลการทดลองที่ 31 : เงื่อนไข เอทานอล 45%โดยปริมาตร อุณหภูมิ 30°C, ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 7.8 gKOH.L⁻¹

Length of SM (meter)	Ester (wt.%)	FFA (wt.%)	TG (wt.%)	DG (wt.%)	MG (wt.%)
0	0.000	0.268	97.097	2.288	0.347
1	96.557	0.000	0.000	0.841	2.602
2	96.189	0.000	0.000	0.978	2.833
3	96.049	0.000	0.000	1.262	2.689
4	97.263	0.000	0.000	0.317	2.420
5	95.387	0.000	0.000	1.843	2.771
6	95.207	0.000	0.000	1.816	2.977
7	95.147	0.000	0.000	1.071	3.782
8	95.272	0.000	0.000	1.266	3.463
9	94.942	0.000	0.000	0.732	4.326
10	96.019	0.000	0.000	0.150	3.831

ตารางที่ 3.32 ผลการทดลองที่ 32 : เงื่อนไข เอทานอล 45%โดยปริมาตร อุณหภูมิ 30°C, ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 12 gKOH.L⁻¹

Length of SM (meter)	Ester (wt.%)	FFA (wt.%)	TG (wt.%)	DG (wt.%)	MG (wt.%)
0	0.000	0.268	97.097	2.288	0.347
1	95.646	0.000	0.000	0.349	4.005
2	95.772	0.000	0.000	0.000	4.228
3	97.321	0.000	0.000	0.215	2.464
4	97.741	0.000	0.000	0.000	2.259
5	97.167	0.000	0.000	0.253	2.580
6	97.931	0.000	0.000	0.133	1.936
7	96.597	0.000	0.000	0.000	3.403
8	97.623	0.000	0.000	0.169	2.208
9	97.655	0.000	0.000	0.061	2.284
10	98.360	0.000	0.000	0.000	1.641

ตารางที่ ง.33 ผลการทดลองที่ 33 : เงื่อนไข เอทานอล 25%โดยปริมาตร อุณหภูมิ 30°C, ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 15 gKOH.L⁻¹

Length of SM (meter)	Ester (wt.%)	FFA (wt.%)	TG (wt.%)	DG (wt.%)	MG (wt.%)
0	0.000	0.268	97.097	2.288	0.347
1	85.509	0.000	2.072	3.509	8.911
2	87.554	0.000	1.605	3.782	7.059
3	72.426	0.000	8.600	8.751	10.223
4	82.055	0.000	4.932	6.515	6.498
5	74.006	0.000	6.159	6.957	12.879
6	77.243	0.000	4.005	6.191	12.561
7	84.319	0.000	2.885	5.490	7.306
8	82.789	0.000	4.876	5.611	6.724
9	81.950	0.000	3.189	5.534	9.327
10	77.228	0.000	6.245	6.618	9.909

ตารางที่ ง.34 ผลการทดลองที่ 34 : เงื่อนไข เอทานอล 45%โดยปริมาตร อุณหภูมิ 30°C, ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 12 gKOH.L⁻¹

Length of SM (meter)	Ester (wt.%)	FFA (wt.%)	TG (wt.%)	DG (wt.%)	MG (wt.%)
0	0.000	0.268	97.097	2.288	0.347
1	96.781	0.000	0.000	0.000	3.220
2	96.869	0.000	0.000	0.000	3.131
3	96.855	0.000	0.000	0.000	3.145
4	97.375	0.000	0.000	0.000	2.625
5	95.554	0.000	0.000	0.000	4.445
6	95.683	0.000	0.000	0.000	4.317
7	93.129	0.000	0.000	0.000	6.871
8	95.338	0.000	0.000	0.000	4.662
9	96.501	0.000	0.000	0.890	2.609
10	96.319	0.000	0.000	0.000	3.681

ตารางที่ 3.35 ผลการทดลองที่ 35 : เงื่อนไข เอทานอล 45%โดยปริมาตร อุณหภูมิ 30°C, ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 12 gKOH.L⁻¹

Length of SM (meter)	Ester (wt.%)	FFA (wt.%)	TG (wt.%)	DG (wt.%)	MG (wt.%)
0	0.000	0.268	97.097	2.288	0.347
1	96.327	0.000	0.000	0.248	3.425
2	96.866	0.000	0.000	0.054	3.079
3	97.672	0.000	0.000	0.571	1.757
4	98.079	0.000	0.000	0.341	1.581
5	96.058	0.000	0.000	1.083	2.858
6	95.984	0.000	0.000	0.000	4.016
7	93.725	0.000	0.000	1.059	5.217
8	95.113	0.000	0.000	0.995	3.891
9	95.356	0.000	0.000	0.333	4.311
10	95.907	0.000	0.000	0.072	4.022

ตารางที่ 3.36 ผลการทดลองที่ 36 : เงื่อนไข เอทานอล 65%โดยปริมาตร อุณหภูมิ 30°C, ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 15 gKOH.L⁻¹

Length of SM (meter)	Ester (wt.%)	FFA (wt.%)	TG (wt.%)	DG (wt.%)	MG (wt.%)
0	0.000	0.268	97.097	2.288	0.347
1	98.666	0.000	0.000	0.336	0.997
2	98.077	0.000	0.000	0.166	1.757
3	97.685	0.000	0.000	0.098	2.217
4	96.666	0.000	0.000	0.000	3.334
5	97.667	0.000	0.000	0.000	2.333
6	98.144	0.000	0.000	0.000	1.856
7	96.205	0.000	0.000	0.000	3.796
8	96.235	0.000	0.000	0.000	3.766
9	97.428	0.000	0.000	0.000	2.572
10	98.042	0.000	0.000	0.000	1.958

ตารางที่ 3.37 ผลการทดลองที่ 37 : เงื่อนไข เอทานอล 17%โดยปริมาตร อุณหภูมิ 75°C, ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 12 gKOH.L⁻¹

Length of SM (meter)	Ester (wt.%)	FFA (wt.%)	TG (wt.%)	DG (wt.%)	MG (wt.%)
0	0.000	0.268	97.097	2.288	0.347
1	79.010	0.000	5.798	6.890	8.302
2	74.668	0.000	8.394	8.176	8.762
3	65.848	0.000	16.803	10.191	7.158
4	65.772	0.000	14.563	10.032	9.633
5	64.431	0.000	15.437	11.470	8.664
6	60.310	0.000	19.737	11.231	8.723
7	61.420	0.000	16.566	11.623	10.392
8	68.080	0.000	13.894	10.559	7.466
9	67.486	0.000	13.010	9.085	10.420
10	73.582	0.000	11.416	8.359	6.644

ตารางที่ 3.38 ผลการทดลองที่ 38 : เงื่อนไข เอทานอล 45%โดยปริมาตร อุณหภูมิ 75°C, ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 16.2 gKOH.L⁻¹

Length of SM (meter)	Ester (wt.%)	FFA (wt.%)	TG (wt.%)	DG (wt.%)	MG (wt.%)
0	0.000	0.268	97.097	2.288	0.347
1	98.688	0.000	0.000	0.000	1.313
2	99.334	0.000	0.000	0.000	0.666
3	98.988	0.000	0.000	0.000	1.012
4	98.753	0.000	0.000	0.000	1.247
5	99.226	0.000	0.000	0.000	0.774
6	98.990	0.000	0.000	0.000	1.010
7	98.746	0.000	0.000	0.000	1.254
8	98.542	0.000	0.000	0.000	1.458
9	99.466	0.000	0.000	0.000	0.534
10	98.603	0.000	0.000	0.000	1.397

ตารางที่ 3.39 ผลการทดลองที่ 39 : เงื่อนไข เอทานอล 65%โดยปริมาตร อุณหภูมิ 75°C, ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 9 gKOH.L⁻¹

Length of SM (meter)	Ester (wt.%)	FFA (wt.%)	TG (wt.%)	DG (wt.%)	MG (wt.%)
0	0.000	0.268	97.097	2.288	0.347
1	98.118	0.000	0.000	0.917	0.965
2	98.808	0.000	0.000	0.357	0.835
3	96.964	0.000	0.000	2.197	0.839
4	97.950	0.000	0.000	0.962	1.088
5	97.826	0.000	0.000	0.944	1.229
6	96.842	0.000	0.000	1.947	1.211
7	96.936	0.000	0.000	2.054	1.010
8	97.375	0.000	0.000	1.150	1.475
9	98.059	0.000	0.000	0.000	1.941
10	98.828	0.000	0.000	0.000	1.171

ตารางที่ 3.40 ผลการทดลองที่ 40 : เงื่อนไข เอทานอล 73%โดยปริมาตร อุณหภูมิ 75°C, ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 12 gKOH.L⁻¹

Length of SM (meter)	Ester (wt.%)	FFA (wt.%)	TG (wt.%)	DG (wt.%)	MG (wt.%)
0	0.000	0.268	97.097	2.288	0.347
1	95.690	0.000	0.000	3.280	1.031
2	96.284	0.000	0.000	2.604	1.112
3	90.621	0.000	0.000	7.735	1.645
4	93.176	0.000	0.000	6.049	0.774
5	98.044	0.000	0.000	0.181	1.775
6	96.063	0.000	0.000	2.250	1.687
7	93.773	0.000	0.000	3.957	2.270
8	95.614	0.000	0.000	2.456	1.930
9	94.348	0.000	0.000	4.157	1.495
10	98.745	0.000	0.000	0.390	0.866

ตารางที่ ๓.41 ผลการทดลองที่ 41 : เงื่อนไข เอทานอล 45%โดยปริมาตร อุณหภูมิ 75°C, ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 12 gKOH.L⁻¹

Length of SM (meter)	Ester (wt.%)	FFA (wt.%)	TG (wt.%)	DG (wt.%)	MG (wt.%)
0	0.000	0.268	97.097	2.288	0.347
1	98.569	0.000	0.000	0.000	1.432
2	99.168	0.000	0.000	0.000	0.832
3	98.309	0.000	0.000	0.290	1.401
4	98.060	0.000	0.000	0.000	1.941
5	98.329	0.000	0.000	0.000	1.671
6	98.772	0.000	0.000	0.020	1.207
7	98.822	0.000	0.000	0.000	1.178
8	99.447	0.000	0.000	0.000	0.554
9	99.161	0.000	0.000	0.000	0.839
10	98.455	0.000	0.000	0.000	1.545

ตารางที่ ๓.42 ผลการทดลองที่ 42 : เงื่อนไข เอทานอล 25%โดยปริมาตร อุณหภูมิ 75°C, ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 9 gKOH.L⁻¹

Length of SM (meter)	Ester (wt.%)	FFA (wt.%)	TG (wt.%)	DG (wt.%)	MG (wt.%)
0	0.000	0.268	97.097	2.288	0.347
1	78.035	0.000	6.227	8.253	7.487
2	43.604	0.000	32.242	14.875	9.279
3	48.773	0.000	26.556	12.588	12.082
4	60.037	0.000	15.173	9.388	15.402
5	54.949	0.000	13.462	10.275	21.315
6	51.664	0.000	28.262	12.531	7.544
7	60.848	0.000	16.987	11.899	10.267
8	56.067	0.000	21.761	12.817	9.355
9	55.840	0.000	21.086	11.606	11.468
10	67.459	0.000	17.882	7.955	6.704

ตารางที่ ๓.43 ผลการทดลองที่ 43 : เงื่อนไข เอทานอล 45%โดยปริมาตร อุณหภูมิ 75°C, ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 7.8 gKOH.L⁻¹

Length of SM (meter)	Ester (wt.%)	FFA (wt.%)	TG (wt.%)	DG (wt.%)	MG (wt.%)
0	0.000	0.268	97.097	2.288	0.347
1	94.947	0.000	0.000	1.356	3.698
2	98.724	0.000	0.000	0.130	1.146
3	98.999	0.000	0.000	0.000	1.001
4	98.954	0.000	0.000	0.000	1.046
5	98.564	0.000	0.000	0.000	1.436
6	99.191	0.000	0.000	0.000	0.809
7	98.731	0.000	0.000	0.000	1.269
8	98.821	0.000	0.000	0.194	0.985
9	99.008	0.000	0.000	0.181	0.811
10	98.864	0.000	0.000	0.372	0.763

ตารางที่ ๓.44 ผลการทดลองที่ 44 : เงื่อนไข เอทานอล 45%โดยปริมาตร อุณหภูมิ 75°C, ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 12 gKOH.L⁻¹

Length of SM (meter)	Ester (wt.%)	FFA (wt.%)	TG (wt.%)	DG (wt.%)	MG (wt.%)
0	0.000	0.268	97.097	2.288	0.347
1	98.402	0.000	0.000	0.000	1.599
2	98.700	0.000	0.000	0.000	1.300
3	97.876	0.000	0.000	1.362	0.763
4	98.545	0.000	0.000	0.000	1.455
5	99.115	0.000	0.000	0.000	0.885
6	98.280	0.000	0.000	0.653	1.067
7	98.531	0.000	0.000	0.161	1.309
8	98.658	0.000	0.000	0.000	1.342
9	98.876	0.000	0.000	0.372	0.752
10	98.476	0.000	0.000	0.000	1.524

ตารางที่ 3.45 ผลการทดลองที่ 45 : เงื่อนไข เอทานอล 25%โดยปริมาตร อุณหภูมิ 75°C, ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 15 gKOH.L⁻¹

Length of SM (meter)	Ester (wt.%)	FFA (wt.%)	TG (wt.%)	DG (wt.%)	MG (wt.%)
0	0.000	0.268	97.097	2.288	0.347
1	98.695	0.000	0.000	0.417	0.887
2	97.505	0.000	0.000	0.856	1.639
3	96.766	0.000	0.000	1.758	1.477
4	98.460	0.000	0.000	0.878	0.661
5	96.081	0.000	0.000	2.025	1.894
6	97.999	0.000	0.000	1.378	0.623
7	97.760	0.000	0.000	0.896	1.344
8	97.289	0.000	0.000	1.850	0.860
9	96.771	0.000	0.000	2.313	0.917
10	98.448	0.000	0.000	0.976	0.576

ตารางที่ 3.46 ผลการทดลองที่ 46 : เงื่อนไข เอทานอล 45%โดยปริมาตร อุณหภูมิ 75°C, ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 12 gKOH.L⁻¹

Length of SM (meter)	Ester (wt.%)	FFA (wt.%)	TG (wt.%)	DG (wt.%)	MG (wt.%)
0	0.000	0.268	97.097	2.288	0.347
1	98.186	0.000	0.000	0.000	1.814
2	98.844	0.000	0.000	0.000	1.157
3	98.665	0.000	0.000	0.000	1.336
4	99.232	0.000	0.000	0.000	0.768
5	99.150	0.000	0.000	0.000	0.850
6	99.116	0.000	0.000	0.000	0.884
7	99.344	0.000	0.000	0.000	0.656
8	99.552	0.000	0.000	0.000	0.448
9	98.754	0.000	0.000	0.000	1.246
10	98.822	0.000	0.000	0.000	1.178

ตารางที่ ๓.47 ผลการทดลองที่ 47 : เงื่อนไข เอทานอล 45%โดยปริมาตร อุณหภูมิ 75°C, ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 12 gKOH.L⁻¹

Length of SM (meter)	Ester (wt.%)	FFA (wt.%)	TG (wt.%)	DG (wt.%)	MG (wt.%)
0	0.000	0.268	97.097	2.288	0.347
1	98.527	0.000	0.000	0.000	1.474
2	98.753	0.000	0.000	0.527	0.721
3	98.714	0.000	0.000	0.000	1.286
4	99.164	0.000	0.000	0.000	0.836
5	98.387	0.000	0.000	0.000	1.613
6	99.205	0.000	0.000	0.000	0.795
7	98.751	0.000	0.000	0.000	1.249
8	99.493	0.000	0.000	0.000	0.507
9	98.576	0.000	0.000	0.000	1.424
10	99.393	0.000	0.000	0.000	0.607

ตารางที่ ๓.48 ผลการทดลองที่ 48 : เงื่อนไข เอทานอล 65%โดยปริมาตร อุณหภูมิ 75°C, ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 15 gKOH.L⁻¹

Length of SM (meter)	Ester (wt.%)	FFA (wt.%)	TG (wt.%)	DG (wt.%)	MG (wt.%)
0	0.000	0.268	97.097	2.288	0.347
1	98.039	0.000	0.000	0.274	1.688
2	98.498	0.000	0.000	0.468	1.034
3	98.260	0.000	0.000	0.636	1.105
4	97.823	0.000	0.000	1.446	0.731
5	98.595	0.000	0.000	0.853	0.552
6	98.687	0.000	0.000	0.779	0.534
7	97.844	0.000	0.000	1.446	0.710
8	97.752	0.000	0.000	1.527	0.720
9	97.229	0.000	0.000	1.930	0.841
10	99.262	0.000	0.000	0.134	0.604

ตารางที่ ๓.49 ผลการทดลองสภาวะที่เหมาะสมที่สุด : เงื่อนไข เมทานอล 23% โดยปริมาตร อุณหภูมิ 30°C, ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 13.4 gKOH.L⁻¹

Length of SM (meter)	Ester (wt.%)	FFA (wt.%)	TG (wt.%)	DG (wt.%)	MG (wt.%)
0	0.000	0.268	97.097	2.288	0.347
1	94.313	0.000	3.136	0.999	1.552
2	98.174	0.000	0.101	0.000	1.726
3	98.198	0.000	0.000	0.109	1.693
4	98.807	0.000	0.000	0.000	1.193
5	99.238	0.000	0.000	0.000	0.762
6	98.739	0.000	0.000	0.000	1.261
7	98.457	0.000	0.000	0.000	1.543
8	98.222	0.000	0.000	0.000	1.778
9	99.080	0.000	0.000	0.000	0.920
10	98.823	0.000	0.000	0.000	1.178

ตารางที่ ๓.50 ผลการทดลองสภาวะที่เหมาะสมที่สุด : เงื่อนไข เมทานอล 23% โดยปริมาตร อุณหภูมิ 60°C, ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 11.5 gKOH.L⁻¹

Length of SM (meter)	Ester (wt.%)	FFA (wt.%)	TG (wt.%)	DG (wt.%)	MG (wt.%)
0	0.000	0.268	97.097	2.288	0.347
1	99.421	0.000	0.000	0.000	0.579
2	98.347	0.000	0.000	0.000	1.654
3	98.642	0.000	0.000	0.000	1.358
4	98.382	0.000	0.000	0.000	1.618
5	98.890	0.000	0.000	0.000	1.110
6	98.692	0.000	0.000	0.000	1.308
7	98.461	0.000	0.000	0.000	1.539
8	98.627	0.000	0.000	0.000	1.373
9	98.130	0.000	0.000	0.000	1.870
10	97.924	0.000	0.000	0.000	2.076

ตารางที่ ๓.51 ผลการทดลองสภาวะที่เหมาะสมที่สุด : เงื่อนไข เมทานอล 58% โดยปริมาตร อุณหภูมิ 30°C, ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 12.0 gKOH.L⁻¹

Length of SM (meter)	Ester (wt.%)	FFA (wt.%)	TG (wt.%)	DG (wt.%)	MG (wt.%)
0	0.000	0.268	97.097	2.288	0.347
1	98.041	0.000	0.000	0.000	1.959
2	98.105	0.000	0.000	0.000	1.895
3	97.976	0.000	0.000	0.000	2.024
4	98.532	0.000	0.000	0.000	1.468
5	98.247	0.000	0.000	0.000	1.753
6	99.369	0.000	0.000	0.000	0.632
7	98.589	0.000	0.000	0.000	1.411
8	98.390	0.000	0.000	0.000	1.610
9	98.196	0.000	0.000	0.000	1.804
10	98.596	0.000	0.000	0.000	1.404

ตารางที่ ๓.52 ผลการทดลองสภาวะที่เหมาะสมที่สุด : เงื่อนไข เมทานอล 47% โดยปริมาตร อุณหภูมิ 75°C, ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 14.4 gKOH.L⁻¹

Length of SM (meter)	Ester (wt.%)	FFA (wt.%)	TG (wt.%)	DG (wt.%)	MG (wt.%)
0	0.000	0.268	97.097	2.288	0.347
1	99.418	0.000	0.000	0.000	0.582
2	98.865	0.000	0.000	0.000	1.135
3	98.383	0.000	0.000	0.000	1.618
4	98.838	0.000	0.000	0.000	1.162
5	98.608	0.000	0.000	0.000	1.392
6	98.495	0.000	0.000	0.000	1.505
7	98.663	0.000	0.000	0.000	1.337
8	98.384	0.000	0.000	0.000	1.616
9	98.540	0.000	0.000	0.000	1.459
10	98.633	0.000	0.000	0.000	1.367









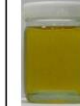









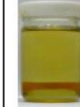








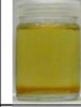





















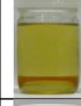


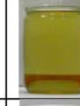
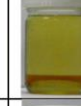










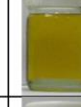





































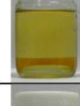










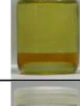


















ตารางที่ น.53 การแยกชั้นระหว่างไบโอดีเซลและกลีเซอรอลที่เงื่อนไข เมทานอล อุณหภูมิ 30°C

EXP.	Length of static mixer (meter)										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											
11											
12											


















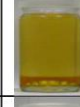
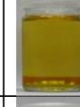

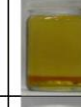























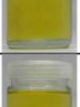
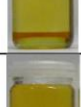
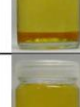
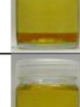
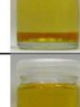
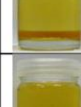

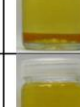



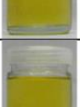
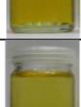
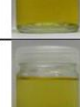
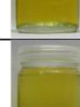
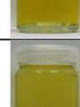
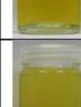

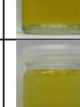
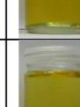





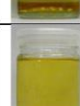

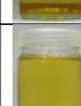

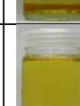








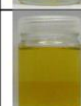
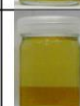
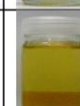









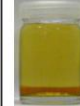

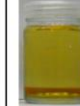









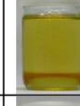
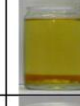
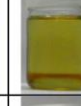
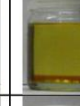






















ตารางที่ ๓.54 การแยกชั้นระหว่างไบโอดีเซลและกลีเซอรอลที่เงื่อนไข เมทานอล อุณหภูมิ 60°C

EXP.	Length of static mixer (meter)										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											
11											
12											

ตารางที่ ๓.55 การแยกชั้นระหว่างไบโอดีเซลและกลีเซอรอลที่เงื่อนไข เอทานอล อุณหภูมิ 30°C

EXP.	Length of static mixer (meter)										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											
11											
12											

ตารางที่ น.56 การแยกชั้นระหว่างไบโอดีเซลและกลีเซอรอลที่เงื่อนไข เอทานอล อุณหภูมิ 75°C

EXP.	Length of static mixer (meter)										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											
11											
12											

ภาคผนวก จ
(ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่วิทยานิพนธ์)

Continuous Transesterification for Ethyl Ester Production from Refined Palm Oil through Static Mixer

Kichaphum Wijitsopa^{1,a}, Krit Somnuk^{1,b}, Thanansak Theppaya^{1,c} and Gumpon Prateepchaikul^{1,d}

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla, Thailand, 90112

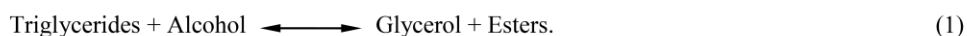
^akichakae@gmail.com, ^bsomnuk_7@hotmail.com, ^cthanansak.t@psu.ac.th, ^dgumpon.p@psu.ac.th

Keywords: ethyl ester; static mixer; ethanol; continuous; transesterification.

Abstract. In this study, the commercial grade of ethanol was used to produce the biodiesel from refined palm oil (RPO) through the continuous static mixer system. The ethanol, an alternative alcohol to adopt in the ethyl ester production, can be used instead of methanol, and this alcohol is more eco-friendly than methanol. The 6-meter in length of SUS304 static mixer reactor is an essential part of mixing the RPO and solution of ethanol and potassium hydroxide to accelerate the base-catalyzed transesterification. The ethanol were varied at the volumetric flow rate of 30, 40, 50, 60 vol.%, KOH as base-catalyst was varied with the weight to volume of oil of 10,12,14 gKOH.L⁻¹, to investigate the suitable condition which can converted the glycerides to the maximum purity of ethyl ester. The results showed that all varied conditions, the ethyl ester conversion was rapidly increased from 0 to over 95 wt.% when the flowing mixtures flowed through the 1 meter of static mixer. Furthermore, the highest purity of ethyl ester from RPO was succeeded when the condition: the 60 vol.% ethanol, the 14 gKOH.L⁻¹ of catalyst, 5-meter of static mixer, and 75 °C temperature of RPO, was used in the continuous static mixer.

Introduction

Generally, the methanol is mostly used to produce biodiesel in many countries. But, methanol which can be produced through the synthetic processes such as the natural gas, coal, and biomass crops or from natural gas, is a toxic chemical [1,2]. While, the commercial ethanol was produced by fermentation from the renewable agricultural resources, therefore, the ethanol is more eco-friendly than methanol [1,2,3]. The tri-, di-, mono-glyceride in oils are directly converted to ester via the base-catalyzed transesterification reaction with ethanol. In addition, the final products are the fatty acid ethyl ester (FAEE or biodiesel) and glycerol, as shown in Eq. 1 [4].



In the literature reviews for the continuous and circulation transesterification processes for biodiesel production from low free fatty acid (FFA) oils, Peterson et al. [5] studied the continuous flow transesterification reaction which the horizontal PVC pipes were used as the continuous reactor, to reduce time, and cost of biodiesel production. The 380 mL.min⁻¹ of vegetable oil and 111 mL.min⁻¹ of alcohol/catalyst were fed through the series of static mixers at the inlet. Subsequently, the mixtures will flow through the continuous reactor until the products flowed out of the static mixers at the outlet of reactor. The results showed that both 0.016% of free glycerol and 0.236% of total glycerol have met the ASTM PS121-99 specification for biodiesel. Sungwornpatansakul et al. [6] studied the comparison of two mixing technologies, the mechanical mixer and the static mixer. The experiments were carried out for biodiesel production from the corn oil. The mixtures (oil, MeOH, and KOH) flowed through the static mixer and were compared with the mixtures of mechanical stirring method by using the images of methanol droplet in order to investigate the potential mixing of two-technology. The results showed that the droplets of methanol can be rapidly generated with

the corn oil at the beginning of mixing when the static mixer was used. Therefore, the static mixer has the high potential mixing for the immiscible liquid, such as the blending oils with alcohol. Niseng et al, [7] studied the optimal condition of base-catalyzed transesterification in the biodiesel production from the RPO via circulation process through static mixer reactor. The result indicated that the KOH as base-catalyst is more significantly effective than methanol in methyl ester production, when the predicted model was obtained to predict the response surface models. According to predicted model, the suitable conditions: 23.81 vol.% MeOH and 11.8 wt.% KOH under 60 °C temperature, and 60 min reaction time, were conducted in the circulation process through static mixer. Somnuk et al, [4] studied the two-stage continuous process of methyl ester from high FFA of mixed crude palm oil (MCPO) using the continuous static mixer coupled with high-intensity of ultrasound, and Somnuk et al, [8] studied the use of circulation process through static mixer reactor for producing the biodiesel from MCPO. Both continuous and circulation processes can be expeditiously used to produce methyl ester via the static mixers of two-step process. Consequently, there are many advantages for using static mixer in biodiesel production, instead of the conventional mechanical stirrer such as; shorter reaction time, lower operating cost, lower maintenance cost, etc [9]. However, very few researchers study the use of the static mixer as a continuous reactor to produce the esters with the commercial grade of ethanol. Thus, the objective of this research was to study the conversion of ethyl ester, triglyceride (TG), diglyceride (DG), monoglyceride (MG), and free fatty acid (FFA) of the biodiesel production process from refined palm oil (RPO) with the 99% commercial grade of ethanol (30, 40, 50, and 60 vol.%), and KOH as a base-catalyst (10, 12, and 14 gKOH.L⁻¹), when these mixtures flowed through the 6-meter of static mixer reactor.

Materials and Methods

Materials. In Thailand, the refinery capacity of refined palm oil (RPO) is approximately 846,421 tonnes in 2013 [10]. Therefore, the RPO was purchased from local market to use as the raw materials for the continuous transesterification process with base-catalyst. The compositions of RPO compose of 0.268 wt.% of FFA, 97.097 wt.% of TG, 2.288 wt.% of DG, 0.347 wt.% of MG, and 0.875 kg.L⁻¹ of density at 75°C. Two commercial grades of chemical reactants which were used in these experiments: the 95% potassium hydroxide (KOH) and 99% ethanol (EtOH). The KOH will be dissolved in ethanol, An analytical instruments of purified biodiesel, a thin layer chromatograph with flame ionization detection (TLC/FID, model: IATROSCAN MK-65; Mishubishi Kagaku Iatron Inc., Tokyo, Japan), was used to analyze the percentages of ethyl ester, TG, DG, MG, and FFA in the biodiesel.

Methods.

Apparatus. The schematic diagram of the experiment setup was shown in Fig. 1. The 6-m in length of SUS304 static mixer reactor is an essential part of mixing the RPO and solution of ethanol and potassium hydroxide to accelerate the base-catalyzed transesterification. The dimensions of mixing elements were: 10 mm width, 15 mm length, and 1 mm thickness. The elements of static mixer were 180° twisted and were 90° connected with the next elements of mixing. The 6-m of static mixer was installed in the 10 mm SUS304 stainless steel tube, which was insulated by the rubber foam insulation tube to prevent the heat loss from the inside of static mixer reactor. Because, the exothermic reaction occurs when the temperature of a system increases due to the transition period of glycerides in RPO was changed to the ester by transesterification with base-catalyst.

Procedures. The RPO was heated to the temperature of 75 °C with the 500W electric immersion heater. The 20 L.hr⁻¹ RPO and the required flow rate of potassium hydroxide and ethanol solution, were continuously fed into the 10-meter of static mixer reactor by the two digital dosing pumps (Grundfos alldos, models: DME 48-3 and DMS 12-3, respectively). The two-parameters: ethanol and potassium hydroxide were varied to investigate the conversion of ester, TG, DG, MG, FFA. The ethanol were varied at the volumetric flow rate of 30, 40, 50, 60 vol.%, the KOH as base-

catalyst was varied with the weight to volume of oil of 10,12,14 gKOH.L⁻¹, as well. In the startup continuous process, after completing installation of the two pumps flow rate, both substances were added into the continuous reactor at the feeding ports. The approximately 20 mL samples were collected at the 6-locations (at the 1 to 6 meters) of the sampling ports, as shown in Fig. 1. All samples were rapidly cooled by cold water to stop the rate of reaction. Then, the samples were washed by warm water to remove the residual ethanol and glycerol, to contribute the analysis by using TLC/FID for determining the composition of ester, TG, DG, MG, and FFA in the purified biodiesel.

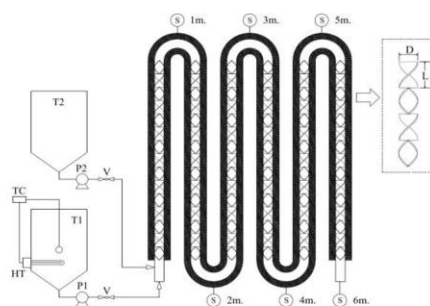


Fig. 1. Schematic diagram of the experiment setup (L: length of element, D: diameter of element, T1: RPO tank, T2: ethanol mixed with potassium tank, P1: oil pump, P2: chemical pump, HT: heater, V: valve, S: sampling port, and TC: temperature control).

Results and Discussions

Effect of base-catalyst and ethanol. The purity of ethyl ester from the base-catalyzed transesterification with varied volume of ethanol (30, 40, 50, and 60 vol.%) by using the 6-meter of continuous static mixer reactor under the weight percent of base-catalysts of 10, 12, and 14 gKOH.L⁻¹, were shown in Fig. 2(a), 2(b), and 2(c), respectively. As shown in Fig.2(a), the 10 gKOH.L⁻¹ which was the lowest base-catalyst of this study, and was dissolved in the 30, 40, 50, and 60 vol.% ethanol. The results clearly showed that all trend lines of ethyl ester conversions sharply increased from 0 wt.% to over 95 wt.%, when the mixtures flowed through the 1 meter of static mixer. However, for the lowest values of both 30 vol.% ethanol with 10 gKOH.L⁻¹ catalyst, cannot convert the glycerides to over 96 wt.% of ester, although the mixtures were fed through the maximum length of static mixer (at 6 meter). Moreover, the increasing volume of ethanol has significant with the increasing of the purity of ethyl ester. Because, when the 10 vol.% of increased volume of ethanol was added from 30 to 40, 50, and 60 vol.% EtOH in process, the levels of ethyl esters were significantly increased, which the maximal ethyl ester of 97.178, 97.393, and 97.859 wt.% were manifested for the 40, 50, and 60 vol.% EtOH, respectively. In addition the maximum purities of ethyl esters surprisingly indicated that the glycerides were almost converted to ester after flowing through the 5 meters of static mixer. While all trend lines of the ethyl ester conversions slowly lowered after 5 meters. Consequently, the excess length of static mixer may causes the reversible reaction during the transesterification by base-catalyst. As shown in Fig.2(b), the 12 gKOH.L⁻¹ was dissolved in the 30, 40, 50, and 60 vol.% ethanol. Certainly, these concentrations of alkaline ethanol solution are stronger than the 10 gKOH.L⁻¹ alkaline concentrations as mentioned above. The results of 12 gKOH.L⁻¹ catalyst showed that the highest ethyl esters of 98.577 wt.% (for 40 vol.% EtOH), 98.755 (for 50 vol.% EtOH), and 98.799 wt.% (for 60 vol.% EtOH), were succeeded when the mixtures were fed through the 6-meter of static mixer. Moreover, these results conclusively showed that the lowest ethanol of 30 vol.% with 12 gKOH.L⁻¹ cannot convert the glycerides in RPO to over 96 wt.% of ester from 0 to 6 meters in the continuous reactor. However, the glycerides of these conditions (12 gKOH.L⁻¹ catalyst) were almost converted to ethyl esters,

which had the percentage of ester more than the ethyl ester production with 10 gKOH.L⁻¹ catalyst. Subsequently, the results of the highest catalyst, the alkaline solution: 14 gKOH.L⁻¹ catalyst was dissolved in the 30, 40, 50, and 60 vol.% ethanol, as shown in Fig.2(c). In all cases of the 30 vol.% EtOH at 10, 12, and 14 gKOH.L⁻¹, cannot produced the purity of ethyl ester greater than 96 wt.%. For the 40, 50, and 60 vol.% of EtOH with 14 gKOH.L⁻¹, the purities of ethyl esters are quite high and close the maximum level of ester content, when the mixtures flowed through the 3 meters of static mixer. However, when the flowing mixtures of the condition: 40 and 50 vol.% of EtOH with 14 gKOH.L⁻¹, flowed through 4 meters of static mixer, the two trend lines (40 and 50 vol.% EtOH) of ethyl esters slowly fell and appeared prominently after flowed through the 5 and 6 meters. The highest ethyl esters of 98.506 wt.% (for 40 vol.% EtOH), 98.643 (for 50 vol.% EtOH), and 99.044 wt.% (for 60 vol.% EtOH), were achieved when the mixtures were fed through the 5-meters of static mixer. As shown in Figs.2(a)-2(c), the volume of ethanol has a high significance level to increase the purity of ethyl ester, such that the ethanol should be added more than 30 vol.% in the biodiesel production from RPO by using the continuous static mixer. Moreover, the increasing concentrations of alkaline ethanol solution extremely affected with the increasing purities of esters.

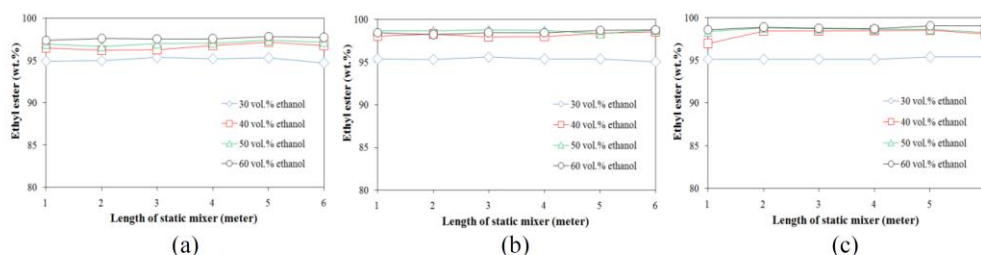


Fig. 2. Purity of ethyl ester from the transesterification with varied volume of ethanol (30, 40, 50, and 60 vol.%) by using the 6-meter of continuous static mixer reactor under the base-catalysts of 10 gKOH.L⁻¹ (a), 12 gKOH.L⁻¹ (b), and 14 gKOH.L⁻¹ (c) at 75 °C of initial temperature of RPO.

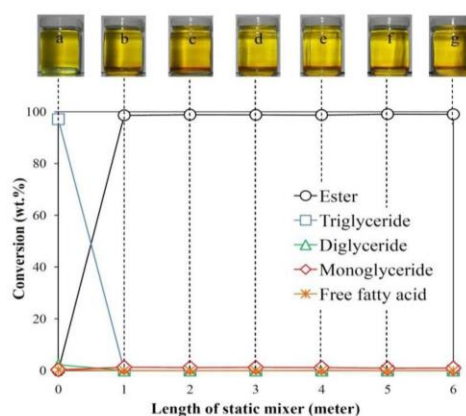


Fig. 3. The conversions of ester, TG, DG, MG, and FFA of suitable condition: 60 vol.% of ethanol, 14 gKOH.L⁻¹ of base-catalyst, and 75 °C of initial temperature of RPO, when the mixtures flowed through the 6-meter of continuous static reactor (a: RPO; b, c, d, e, f, and g, were the crude biodiesels and glycerols at 1, 2, 3, 4, 5, and 6 m, respectively).

From Fig. 3, the recommended condition: the 60 vol.% ethanol, the 14 gKOH.L⁻¹ of catalyst, 5-meter of static mixer, and 75 °C temperature of RPO, was used to produce the biodiesel from RPO

by using the continuous static mixer. The major glyceride (TG) in RPO was speedily converted to ester when the flowing mixture flowed through the 1 meter of static mixer. Moreover, the reaction temperature of mixtures in the static mixer at the positions of 1, 2, 3, 4, 5, and 6 meters were 54.9, 54.4, 54.4, 54.3, 54.2, and 54.2 °C, respectively, when the 75 °C of 20 L.hr⁻¹ RPO was fed into the reactor and mixed with 30 °C (at the room temperature) of 60 vol.% ethanol at the inlet port.

Conclusions

In all conditions, the ethyl ester conversion was rapidly increased from 0 to over 95 wt.% when the flowing mixtures flowed through 1 meter of static mixer by the continuous base-catalyzed transesterification. The highest purity of ethyl ester from RPO was succeeded when the recommended condition: the 60 vol.% ethanol, the 14 gKOH.L⁻¹ of catalyst, 5-meter of static mixer, and 75 °C temperature of RPO, was used in the continuous static mixer. Consequently, the commercial ethanol is an alternative alcohol to adopt in the biodiesel production, can be used instead of methanol. Moreover, the ethanol is more eco-friendly than methanol.

Acknowledgements

This work was supported by Prince of Songkla University for providing research funds.

References

- [1] Q. Li, J. Xu, W. Du, Y. Li and D. Liu: *Ethanol as the Acyl Acceptor for Biodiesel Production* (Renewable and Sustainable Energy Reviews, United Kingdom 2013).
- [2] F.C. Silva, K.S.B. Cavalcante, H.C. Louzeiro, K.R.M. Moura, A.P. Maciel and L.E.B. Soledade: *Production of Biodiesel from Babassu Oil using Methanol-Ethanol Blends* (Ecletica Quimica, Brazil 2010).
- [3] B. Baiju, M.K. Naik and L.M. Das: *A Comparative Evaluation of Compression Ignition Engine Characteristics Using Methyl and Ethyl Esters of Karanja Oil* (Renewable Energy, Netherlands 2009).
- [4] K. Somnuk, P. Smithmaitrie, G. Prateepchaikul: *Two-Stage Continuous Process of Methyl Ester from High Free Fatty Acid Mixed Crude Palm Oil Using Static Mixer Coupled With High-Intensity of Ultrasound* (Energy Conversion and Management, United Kingdom 2013).
- [5] C.L. Peterson, J.L. Cook, J.C. Thompson and J.S. Taberski: *Continuous Flow Biodiesel Production* (Applied Engineering in Agriculture, United States 2002).
- [6] P. Sungwornpatansakul, J. Hiroi, Y. Nigahara, T.K. Jayasinghe and K. Yoshikawa: *Enhancement of Biodiesel Production Reaction Employing the Static Mixing* (Fuel Processing Technology, Netherlands 2013).
- [7] S. Niseng, K. Somnuk and G. Prateepchaikul: *Optimization of Base-Catalyzed Transesterification in Biodiesel Production from Refined Palm Oil Via Circulation Process Through Static Mixer Reactor* (Trans Tech Publications, Switzerland 2014).
- [8] K. Somnuk, S. Niseng, G. Prateepchaikul: *Optimization of High Free Fatty Acid Reduction in Mixed Crude Palm Oils Using Circulation Process Through Static Mixer Reactor and Pilot-Scale of Two-Step Process* (Energy Conversion and Management, United Kingdom 2014).
- [9] R.K. Thakur, Ch. Vial, K.D.P. Nigam, E.B. Nauman and G. Djelveh: *Static Mixers in the Process Industries-A Review* (Trans Institution of Chemical Engineers, United Kingdom 2003).
- [10] Information on http://agri.dit.go.th/web_dit_sec4/home/view_multi.aspx?menu_id=687&name=%E0%B8%9B%E0%B8%B5%202556

AEC-40

การเปรียบเทียบการผลิตเมทิลเอสเตอร์และเอทิลเอสเตอร์แบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มกลั่น
บริสุทธิ์ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบสถิต

Comparison of Continuous Production of Methyl- and Ethyl-Ester from Refined Palm Oil by
using Static Mixer Reactor

กิจภูมิ วิจิตรโสภา^{1*}, กฤษ สมณี¹ และ กำพล ประทีปชัยกุล¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

*ติดต่อ: E-mail: kichakae@hotmail.com, เบอร์โทรศัพท์ 074-287222, เบอร์โทรสาร 074-558830

บทคัดย่อ

การศึกษาและเปรียบเทียบการใช้เมทานอลและเอทานอลเกรดเชิงการค้าในกระบวนการผลิตเมทิลเอสเตอร์และเอทิลเอสเตอร์แบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ด้วยท่อผสมแบบสถิต โดยท่อผสมสถิตมีความยาว 10 เมตร ทำหน้าที่ผสมและเร่งการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน ระหว่าง น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ แอลกอฮอล์ และตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โดยแปรค่าเงื่อนไข ปริมาณแอลกอฮอล์ 17, 45 และ 73 vol.% ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 7.8, 12 และ 16.2 gKOH.L⁻¹ เพื่อหาค่าความบริสุทธิ์ของเอสเตอร์ จากการทดลองพบว่า สามารถผลิตเอสเตอร์ได้ความบริสุทธิ์มากกว่า 98 wt.% สำหรับการผลิตเมทิลเอสเตอร์คือ เมทานอล 45 vol.% ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 12 gKOH.L⁻¹ ความยาวท่อผสมสถิต 3 เมตร และที่อุณหภูมิ 60°C และที่เงื่อนไขสำหรับการผลิตเอทิลเอสเตอร์คือ เอทานอล 73 vol.% ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 12 gKOH.L⁻¹ ความยาวท่อผสมสถิต 8 เมตร และที่อุณหภูมิ 75°C

คำหลัก: เมทิลเอสเตอร์, เอทิลเอสเตอร์, ท่อผสมสถิต, การผลิตแบบต่อเนื่อง

Abstract

In this study, the commercial grades of methanol (MeOH) and ethanol (EtOH) were used to compare in the continuous production of methyl- and ethyl-ester from refined palm oil by using static mixer reactor. The system consists of 10 meters in length of static mixer (SM), the SM was conducted to mix and accelerate the esterification reaction of refined palm oil (RPO), alcohol (methanol and ethanol), and KOH as base-catalyst. The various parameters used were alcohol (17, 45 and 73 vol.%) and the base-catalyst of 7.8, 12, and 16.2 gKOH.L⁻¹ to investigate the purity of ester. The results showed that the over 98 wt.% purity of methyl- and ethyl-ester were achieved under the condition for MeOH: the 45 vol.% methanol, 12 gKOH.L⁻¹, 3 m in length of SM, and 60°C temperature; under the condition for EtOH: the 73 vol.% ethanol, 12 gKOH.L⁻¹, 8 m in length of SM, and 75°C temperature.

Keywords: methyl ester, ethyl ester, static mixer, continuous process.

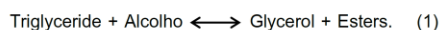
1. บทนำ

ไบโอดีเซลเป็นพลังงานทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากราคาน้ำมันดีเซลที่เพิ่มสูงขึ้นและปริมาณเชื้อเพลิงฟอสซิลกำลังลดลงและอาจจะหมดไปในอนาคต ดังนั้นไบโอดีเซล

ถือเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะมาทดแทนน้ำมันดีเซลได้ กระบวนการผลิตไบโอดีเซลคือการนำน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์โดยการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันกับแอลกอฮอล์โดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดังแสดงใน

AEC-40

สมการที่ (1) เพื่อเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบภายในน้ำมัน เช่น ไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ เป็นเอสเทอร์ [1]



ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลนั้น สิ่งที่ขาดไม่ได้คือ แอลกอฮอล์ ดังแสดงในสมการที่ (1) แอลกอฮอล์ที่ใช้ผลิตไบโอดีเซลทั่วไปเป็นเมทานอล เป็นของเหลวใส ระเหยได้ เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการทางกลั่นปิโตรเคมี จึงมีความเป็นพิษต่อร่างกายสูงถึงขั้นเสียชีวิตได้ และ แอลกอฮอล์อีกชนิดหนึ่งซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเมทานอล คือ เอทานอล เป็นของเหลวใส ระเหยได้ ไวไฟสูง สามารถละลายน้ำได้ ได้จากการหมักพืช เช่น อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด เป็นน้ำตาลแล้วเปลี่ยนน้ำตาลให้เป็น แอลกอฮอล์ ดังนั้นเอทานอลสามารถกินได้ เชื้อเพลิงจากเอทานอลเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและในอนาคตราคาเอทานอลมีแนวโน้มที่จะลดลง [2-5]

กระบวนการผลิตไบโอดีเซลทั่วไปจะใช้วิธีการกวนเพื่อให้ไขมันและสารเคมีทำปฏิกิริยากันได้เป็นไบโอดีเซล แต่ต้องใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา จึงมีการเปรียบเทียบการผสมด้วยการกวนและการผสมแบบทอสมสติด Silva และคณะ (2010) ทำการทดสอบการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันข้าวโพดทำปฏิกิริยากับเมทานอลและตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ทำการถ่ายรูปเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการผสมพบว่าที่เวลาเดียวกันการผสมโดยทอสมสติดมีประสิทธิภาพการผสมดีกว่าการกวนผสม [6] นอกจากนั้นทอสมสติดยังมีข้อดีดังนี้ ใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อยกว่า ต้นทุนการสร้างต่ำกว่า การซ่อมแซมง่ายกว่า และใช้เวลาในการผลิตน้อยกว่าแบบการกวนผสม [7] การใช้ทอสมสติดในกระบวนการผลิตแบบหมุนวนมีการทำกันแพร่หลาย เช่น Somnuk และคณะ (2014) ได้ศึกษากระบวนการผลิตเมธิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มดิบที่บรวมนโดยใช้ทอสมสติดแบบหมุนวน [1] Thompson และคณะ (2007) ได้ศึกษากระบวนการผลิตเมธิลเอสเทอร์จากน้ำมันคาโนล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ผ่านทอสมสติดแบบหมุนวน ที่อุณหภูมิ 60°C ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1.5 wt.% ใช้เวลา 30 นาที [8] Niseng และคณะ (2014) ได้ศึกษากระบวนการผลิตเมธิลเอสเทอร์จากน้ำมัน

ปาล์มบริสุทธิ์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ผ่านทอสมสติดแบบหมุนวน โดยใช้วิธีพื้นที่ตอบสนอง ได้เงื่อนไขที่เหมาะสมที่ ปริมาณเมทานอล 23.81 vol.% ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 11.8 wt.% อุณหภูมิ 60°C ภายในเวลา 60 นาที [9] ต่อมาเป็นกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้เอทานอลแทนเมทานอล และเอทานอลผสม-เมทานอล Kulkarni และคณะ (2007) พบว่าไบโอดีเซลที่ได้มีคุณสมบัติการหล่อลื่นที่ต่างกัน คือ เอธิลเอสเทอร์ > เอธิลผสมเมธิลเอสเทอร์ > เมธิลเอสเทอร์ [10] Fadhil และคณะ (2014) ได้ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันมัสตาร์ดทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันกับเอทานอลและตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ได้เงื่อนไขที่เหมาะสมที่ ปริมาณน้ำมันต่อเอทานอล 8:1 โดยโมล ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อน้ำหนักของน้ำมัน อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60°C ภายในเวลา 60 นาที ในการกวนผสมควบคุมความเร็วรอบที่ 600 รอบต่อนาที [11] ต่อมา Veličković และคณะ (2013) มีการศึกษาการผลิตเอธิลเอสเทอร์จากน้ำมันดอกทานตะวันและได้เงื่อนไขที่เหมาะสมที่ ปริมาณน้ำมันต่อเอทานอล 12:1 โดยโมล ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อน้ำหนักของน้ำมัน อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 75°C ในการกวนผสมควบคุมความเร็วรอบที่ 600 รอบต่อนาที [12] แต่การศึกษากระบวนการผลิตเอธิลเอสเทอร์แบบต่อเนื่องมีน้อยมาก ดังนั้นจึงทำการศึกษารองประกอบของเอสเทอร์ และเปรียบเทียบการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยทอสมสติดโดยใช้เมทานอลและเอทานอลที่ อุณหภูมิ 30°C ทำปฏิกิริยาผ่านทอสมสติดความยาว 10 เมตร

2. วัตถุประสงค์และการทดลอง

2.1 วัสดุ

น้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์ (refined palm oil, RPO) มีองค์ประกอบดังนี้ 0.268 wt.%, 97.097 wt.%, 2.288 wt.% และ 0.347 wt.% คือ คาร์บอนไฮดรอกไซด์ ไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และ โมโนกลีเซอไรด์ ตามลำดับ สารเคมีที่ใช้เป็นระดับอุตสาหกรรม โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ความเข้มข้น 95% เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาละลายเข้ากับแอลกอฮอล์ ซึ่งใช้แอลกอฮอล์ 2 ชนิด คือ เมทานอลความบริสุทธิ์ 98% และ เอทานอลความบริสุทธิ์

AEC-40

99% ทำการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของเอสเทอร์ด้วยเทคนิค thin layer chromatograph with flame ionization detection (TLC/FID)

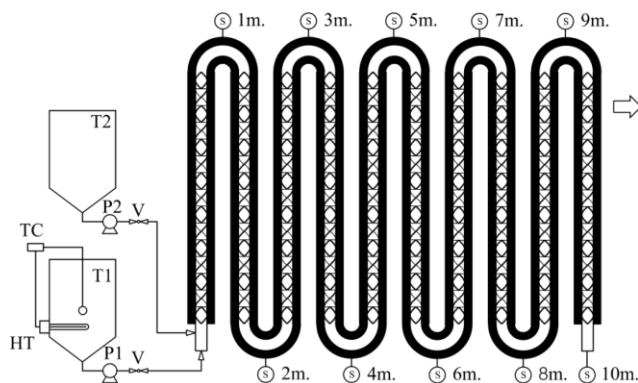
2.2. อุปกรณ์

ไดอะแกรมชุดทดลองของกระบวนการผลิตไบโอ-ดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยท่อผสมแบบสถิต (รูปที่ 1) เป็นชุดท่อผสมแบบสถิตความยาว 10 เมตร ทำหน้าที่ในการผสมน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์เข้ากับแอลกอฮอล์และตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จะประกอบด้วยแผ่นมิดที่ทำขึ้นจากแผ่นสแตนเลส SUS304 กว้าง 10 มิลลิเมตร ยาว 15 มิลลิเมตร และหนา 1 มิลลิเมตร บิดเป็นมุม 180° และเชื่อมต่อกันทำมุม 90° ติดตั้งภายในท่อสแตนเลส SUS304 ที่หุ้มด้วยฉนวนเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนขณะทำปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์ เนื่องจากอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบจากน้ำมันให้เป็นไบโอดีเซล

2.3 การทดลอง

ทำการอุ่นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ในถัง T1 เพื่อลดความหนืดโดยให้ความร้อนจากฮีตเตอร์ จนอุณหภูมิน้ำมัน 60°C และ 75°C กรณีที่ใช้เมทานอล (จุดเดือด 64.7°C) และ เอทานอล (จุดเดือด 78.4°C) ตามลำดับ ผสมแอลกอฮอล์กับตัวเร่งปฏิกิริยา KOH ตามเงื่อนไขการทดลองในถัง T2 โดยใช้ปั๊มไหลวนแอลกอฮอล์เพื่อละลาย

ตัวเร่งปฏิกิริยา KOH ให้ละลายเข้าด้วยกันจนหมด ปรับอัตราการไหลของปั๊ม (P1, Grundfos alldos, model: DME 48-3) เพื่อป้อนน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่อัตราการไหล 20 ลิตรต่อชั่วโมง และปรับอัตราการไหลของปั๊ม (Grundfos alldos, model: DDA 30-4) เพื่อใช้ในการป้อนแอลกอฮอล์ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ การทดลองนี้มีตัวแปรอิสระ 2 ตัว คือ ปริมาณแอลกอฮอล์ และ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เพื่อเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ให้เป็นไบโอดีเซล ใช้ปริมาณแอลกอฮอล์ 17, 45 และ 73 vol.% (เมทานอล 1:4, 1:10 และ 1:17 เอทานอล 1:3, 1:7 และ 1:12) ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 7.8, 12 และ 16.2 gKOH.L⁻¹ เมื่อปรับอัตราการไหลของปั๊มทั้งสองแล้วทำการเปิดปั๊ม วัดอุณหภูมิและสารเคมีจะถูกป้อนเข้าสู่ระบบการผลิตไบโอ-ดีเซลแบบต่อเนื่องผ่านท่อผสมแบบสถิต จากนั้นทำเก็บตัวอย่างประมาณ 20 มิลลิลิตร ที่ตำแหน่งความยาวท่อผสมสถิต 1-10 เมตร ดังรูปที่ 1 นำตัวอย่างที่เก็บเข้าเย็นทันทีเพื่อหยุดการเกิดปฏิกิริยา จากนั้นล้างตัวอย่างด้วยน้ำร้อนเพื่อล้างเอากลิเซอรอลและสิ่งเจือปนออกจึงได้ไบโอดีเซลบริสุทธิ์ ทำการวิเคราะห์ไบโอดีเซลด้วยเทคนิค TLC/FID เพื่อศึกษาองค์ประกอบของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์



รูปที่ 1 แบบชุดทดลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบสถิต (S: ตำแหน่งที่เก็บตัวอย่าง, T1: ถังน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์, T2: ถังแอลกอฮอล์ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาเบส, P1: ปั๊มน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์, P2: ปั๊มแอลกอฮอล์ผสม, HT: heater, V: วาล์ว, TC: ชุดควบคุมอุณหภูมิ, D: ความกว้างของแผ่นมิด, L: ความยาวของแผ่นมิด)

AEC-40**3. ผลและการอภิปรายผลการทดลอง****3.1 การแยกชั้นของกลีเซอรอล**

การแยกชั้นระหว่างไบโอดีเซลและกลีเซอรอลที่เก็บตัวอย่างจากท่อผสมสติก ความยาว 1 เมตร จะเห็นว่าการผลิตโดยใช้เมทานอลจะเกิดการแยกชั้นชัดเจนตั้งแต่ที่ปริมาณเมทานอล 17 vol.% รูปที่ 2 (ก) แต่ที่ปริมาณเมทานอล 45 และ 73 vol.% รูปที่ 2 (ข) และ (ค) ประสิทธิภาพในการแยกชั้นจะลดลงและเกิดการแขวนลอยเนื่องจากเมทานอลมากเกินไป ส่วนการผลิตโดยใช้เอทานอลที่ 17 vol.% รูปที่ 3 (ก) จะไม่เกิดการแยกชั้นเนื่องจากปริมาณเอทานอลน้อยเกินไป ทำให้เกิดสบูในชั้นตอนการล้างและได้ปริมาณไบโอดีเซลน้อย ต่อมาที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเบส 7.8, 12 และ 16.2 gKOH.L⁻¹ และปริมาณแอลกอฮอล์ 45 vol.% ผ่านท่อผสมสติกความยาว 1 เมตร รูปที่ 4 และ รูปที่ 5 เกิดการแยกชั้นทุกเงื่อนไข แสดงว่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยานี้สำคัญต่อการแยกชั้นน้อย แต่จะช่วยให้การเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ไบโอดีเซลที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์สูง

3.2 ความยาวของท่อผสมแบบสติก

จากการทดลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบสติกความยาว 10 เมตร จากการวิเคราะห์ตัวอย่างเอสเทอร์ที่ความยาวท่อผสมสติก 1 ถึง 10 เมตร จะเห็นว่าความยาวท่อผสม 1 เมตร สามารถเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของน้ำมันให้เป็นเอสเทอร์ที่มีความบริสุทธิ์สูง โดยการผลิตเมธิลเอสเทอร์จะใช้ความยาวในการผสมน้อยกว่าการผลิตเอทิลเอสเทอร์

3.3 ความบริสุทธิ์ของเอสเทอร์

จากการทดลองกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบสติกโดยใช้เมทานอลและเอทานอลนั้น สามารถผลิตไบโอดีเซลความบริสุทธิ์สูงถึง 98 wt.% ได้

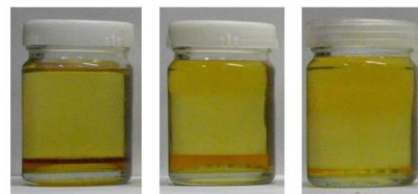
3.4 ปริมาณการใช้แอลกอฮอล์

จากการทดลองที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเบสเท่ากัน 12 gKOH.L⁻¹ รูปที่ 6 กรณีใช้เมทานอลต่ำสุด 17 vol.% ทำให้ได้ไบโอดีเซลเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์สูงถึง 90 wt.% แต่เมื่อใช้เอทานอลได้ไบโอดีเซลเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์เพียง 70 wt.% แสดงว่าต้องใช้ปริมาณเอทานอลสูงกว่าปริมาณเมทานอลในการผลิตไบโอดีเซล เมื่อเพิ่มปริมาณ

เมทานอลและเอทานอลเป็น 45 wt.% ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้นเป็น 98 และ 96 wt.% ตามลำดับ ต่อมาเพิ่มปริมาณแอลกอฮอล์ขึ้นเป็น 73 vol.% ซึ่งเป็นปริมาณสูงสุด กรณีใช้เมทานอลทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ลดลง แต่เอทานอลยังคงเพิ่มสูงขึ้น

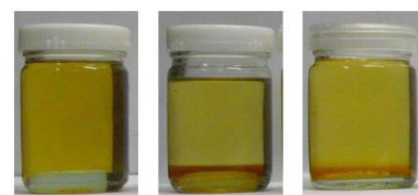
3.5 ปริมาณการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

จากการทดลองที่ปริมาณแอลกอฮอล์เท่ากัน 45 vol.% รูปที่ 7 ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเบส 7.8 และ 12 gKOH.L⁻¹ ค่าเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลที่ได้จะเพิ่มขึ้นตามความยาวของท่อผสมสติก แสดงว่าปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเบสมีผลต่อความยาวท่อผสมสติกในการทำปฏิกิริยา และที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเบสสูงสุด 16.2 gKOH.L⁻¹ ค่าเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์จะสูงที่ความยาวท่อผสมสติกน้อยและจะลดลงเล็กน้อยเมื่อความยาวท่อผสมสติกเพิ่มขึ้น



(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 2 การแยกชั้นระหว่างไบโอดีเซลกับกลีเซอรอล (12 gKOH.L⁻¹) ที่ปริมาณเมทานอลต่างๆ (ก) 17 vol.% (89.687 wt.% ester), (ข) 45 vol.% (97.968 wt.% ester) และ (ค) 73 vol.% (97.305 wt.% ester) ที่ความยาว 1 เมตร ของ SM



(ก) (ข) (ค)

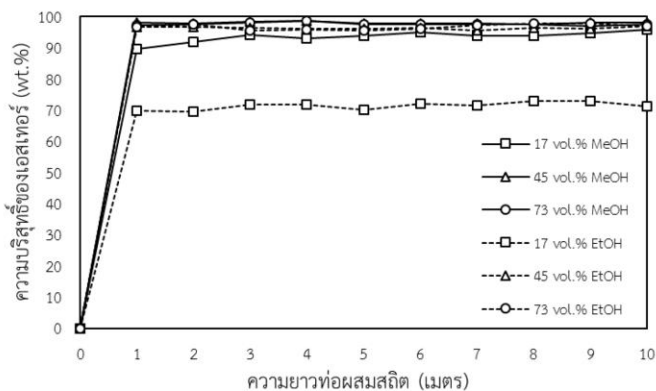
รูปที่ 3 การแยกชั้นระหว่างไบโอดีเซลกับกลีเซอรอล (12 gKOH.L⁻¹) ที่ปริมาณเอทานอลต่างๆ (ก) 17 vol.% (69.826 wt.% ester), (ข) 45 vol.% (96.639 wt.% ester) และ (ค) 73 vol.% (96.601 wt.% ester) ที่ความยาว 1 เมตร ของ SM

AEC-40

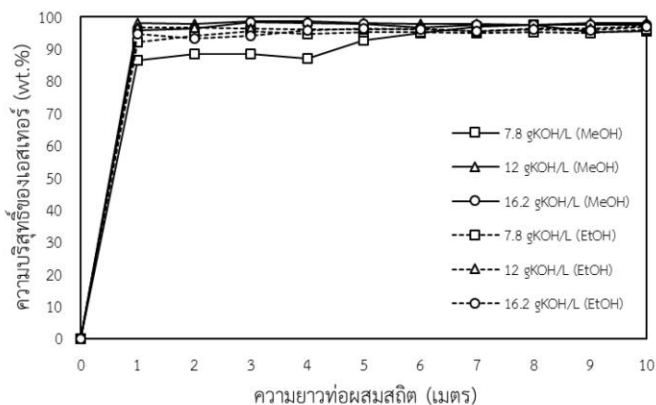


รูปที่ 4 การแยกชั้นระหว่างไบโอดีเซลกับกลีเซอรอล (45 vol.% MeOH) ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเบสต่างๆ (ก) 7.8 gKOH.L⁻¹ (86.548 wt.% ester), (ข) 12 gKOH.L⁻¹ (97.968 wt.% ester) และ (ค) 16.2 gKOH.L⁻¹ (95.750 wt.% ester) ที่ความยาว 1 เมตร ของ SM

รูปที่ 5 การแยกชั้นระหว่างไบโอดีเซลกับกลีเซอรอล (45 vol.% EtOH) ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเบสต่างๆ (ก) 7.8 gKOH.L⁻¹ (92.052 wt.% ester), (ข) 12 gKOH.L⁻¹ (96.639 wt.% ester) และ (ค) 16.2 gKOH.L⁻¹ (94.584 wt.% ester) ที่ความยาว 1 เมตร ของ SM



รูปที่ 6 ความบริสุทธิ์ของเอสเทอร์ที่ปริมาณแอลกอฮอล์ต่างๆ ที่ต่อผลผลิตความยาว 1-10 เมตร (12 gKOH.L⁻¹)



รูปที่ 7 ความบริสุทธิ์ของเอสเทอร์ที่ปริมาณ KOH ต่างๆ ผ่านต่อผลผลิตความยาว 10 เมตร (45 vol.% alcohol)

AEC-40

4. สรุปผลการทดลอง

จากเงื่อนไขการทดลองทั้งหมดในการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยท่อผสมแบบสถิตโดยใช้เมทานอลและเอทานอล เมื่อวัดอุณหภูมิต่อผสมสถิตความยาวเพียง 1 เมตร องค์ประกอบของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์จะเปลี่ยนเป็นเอสเทอร์ที่มีค่าความบริสุทธิ์สูงอย่างรวดเร็ว โดยปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการผลิตจะน้อยกว่าปริมาณเอทานอล เนื่องจากราคาเมทานอลถูกกว่าเอทานอลทำให้ต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซลจากเมทานอลต่ำกว่าการใช้เอทานอล แต่เอทานอลสามารถผลิตได้จากพืชและไบโอดีเซลที่ผลิตจากเอทานอลเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เอทานอลจึงอาจเป็นทางเลือกหนึ่งในการผลิตไบโอดีเซลต่อไปในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัยเพื่อดำเนินการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Somnuk, K. Niseng, S. and Prateepchaikul, G. (2014). Optimization of high free fatty acid reduction in mixed crude palm oils using circulation process through static mixer reactor and pilot-scale of two-step process. *Energy Conversion and Management*, Vol. 80, pp. 374–381.
- [2] Li, Q. Xu, J. Du, W. Li, Y. and Liu, D. (2013). Ethanol as the acyl acceptor for biodiesel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 25, pp. 742–748.
- [3] ศูนย์สื่อสารวิทยาศาสตร์ไทย สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (2556). *เอทิล-เมทิล แอลกอฮอล์ เรียกชื่อผิด พิษถึงตาย* [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา <http://www.nstda.or.th/sci2pub/thaismc/factsheet/hotnews/FS-062.pdf>, เข้าดูเมื่อวันที่ 27/04/2558.
- [4] สมาคมการค้าผู้ผลิตเอทานอลไทย (2558). *ราคาอ้างอิงเอทานอล* [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา <http://www.thaioethanol.com/th/statistical-data/price.html>, เข้าดูเมื่อวันที่ 27/04/2558.

- [5] Silva, F.C. Cavalcante, K.S.B. Louzeiro, H.C. Moura, K.R.M. Maciel, A.P. and Soledade, L.E.B. (2010). Production of Biodiesel from Babassu Oil using Methanol-Ethanol Blends. *Ecletica Quimica*, Vol. 35, pp. 47-54.
- [6] Sungwornpatansakul, P. Hiroi, J. Nigahara, Y. Jayasinghe, T. K. and Yoshikawa, K. (2013). Enhancement of biodiesel production reaction employing the static mixing. *Fuel Processing Technology*, Vol. 116, pp. 1–8.
- [7] Thakur, R. Vial, C. and Nigam, K. (2007). Static mixers in the process industries—a review. *Institution of Chemical Engineers*, Vol. 81, pp. 787–826.
- [8] Thompson, J. C. and He, B. B. (2007). Biodiesel Production Using Static Mixers. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, Vol. 50, pp. 161–166.
- [9] Niseng, S. Somnuk, K. and Prateepchaikul, G. (2014). Optimization of Base-Catalyzed Transesterification in Biodiesel Production from Refined Palm Oil via Circulation Process through Static Mixer Reactor. *Advanced Materials Research*, Vol. 931–932, pp. 1038–1042.
- [10] Kulkarni, M. G. Dalai, a. K. and Bakhshi, N. N. (2007). Transesterification of canola oil in mixed methanol/ethanol system and use of esters as lubricity additive. *Bioresource Technology*, Vol. 98, pp. 2027–2033.
- [11] Fadhil, A. B. and Abdulahad, W. S. (2014). Transesterification of mustard (*Brassica nigra*) seed oil with ethanol: Purification of the crude ethyl ester with activated carbon produced from de-oiled cake. *Energy Conversion and Management*, Vol. 77, pp. 495–503.
- [12] Veličković, Ana V. Stamenković, Olivera S. Todorović, Zoran B. and Veljković, Vlada B. (2013). Application of the full factorial design to optimization of base-catalyzed sunflower oil ethanolysis. *Fuel*, Vol. 104, pp. 433-442.

ภาคผนวก ฉ
(การตรวจสอบผลการทดลอง)



ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110
โทรศัพท์ 074-286904-7 โทรสาร 074-212813 อีเมล sec-all@group.psu.ac.th เว็บไซต์ http://www.sec.psu.ac.th

วิสัยทัศน์: เป็นองค์กรภาครัฐที่เติบโตด้วยความมุ่งมั่นสู่การเป็นองค์กรที่มีสมรรถนะสูง
และยั่งยืนจากการให้บริการทดสอบด้วยเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

F-RES-033 ฉบับที่ 2 บังคับใช้ 05/06/2558

รายงานผลการทดสอบ

เลขที่รายงาน:	C1132/58	หน้า:	1/1
เลขที่ใบขอใช้บริการฯ:	4364/58	วันที่รับตัวอย่าง:	12 พฤศจิกายน 2558
ชื่อและที่อยู่ลูกค้า:	นายกิจภูมิ วิจิตรโสภา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์		
ชื่อตัวอย่าง:	Methyl Ester (60°C)		
รายละเอียดตัวอย่าง:	น้ำมัน ไบโอดีเซล		

ผลการทดสอบ:

ลำดับที่	พารามิเตอร์	หน่วย	เครื่องมือ/วิธีการทดสอบ	ผลการทดสอบ \pm SD	เกณฑ์	สรุป
1.	ค่าไอโอดีน	g Iodine/100g	EN 14111	57.64 \pm 0.77	\leq 120	ผ่าน
2.	กำมะถัน	% wt.	XRF	< 0.0002	< 0.0010	ผ่าน
3.	เมทานอล	% wt.	EN 14110	< 0.01	\leq 0.20	ผ่าน
4.	โมนอกลิเซอไรด์	% wt.	EN 14105	0.315 \pm 0.003	\leq 0.80	ผ่าน
5.	ไดกลิเซอไรด์	% wt.	EN 14105	0.564 \pm 0.005	\leq 0.20	ไม่ผ่าน
6.	ไตรกลิเซอไรด์	% wt.	EN 14105	1.52 \pm 0.015	\leq 0.20	ไม่ผ่าน
7.	กลีเซอรินอิสระ	% wt.	EN 14105	ไม่พบ	\leq 0.02	ผ่าน
8.	กลีเซอรินทั้งหมด	% wt.	EN 14105	0.321 \pm 0.002	\leq 0.25	ไม่ผ่าน
9.	เอสเทอร์	% wt.	EN 14103	96.70 \pm 0.03	\geq 96.5	ผ่าน
10.	กรดลิโนเลนิกมethylเอสเทอร์	% wt.	EN 14103	0.06 \pm 0.001	\leq 12	ผ่าน

- ผลการทดสอบข้างใบขอใช้บริการ (F-ASO-054) เลขที่ 4364/58

- SD = Standard Deviation

- XRF = X-Ray Fluorescence Spectrometer

- อ้างอิงตามประกาศกรมธุรกิจพลังงาน เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน

(นางรุสณี กุลวิจิตร)

หัวหน้าฝ่ายบริการเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

๑๖ พฤศจิกายน ๒๕๕๘

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาเพียงบางส่วน
ออกวันทำทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์



ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110

โทรศัพท์ 074-286904-7 โทรสาร 074-212813 อีเมล sec-all@group.psu.ac.th เว็บไซต์ http://www.sec.psu.ac.th

วิสัยทัศน์: เป็นองค์กรภาครัฐที่เติบโตด้วยความมุ่งมั่นสู่การเป็นองค์กรที่มีสมรรถนะสูง
และยั่งยืนจากการให้บริการทดสอบด้วยเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

F-RES-033 ฉบับที่ 2 บังคับใช้ 05/06/2558

รายงานผลการทดสอบ

เลขที่รายงาน:	C1168/58	หน้า:	1/1
เลขที่ใบขอใช้บริการฯ:	4491/58	วันที่รับตัวอย่าง:	20 พฤศจิกายน 2558
ชื่อและที่อยู่ลูกค้า:	นายกิจภูมิ วิจิตร โสกา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์		
ชื่อตัวอย่าง:	Methyl Ester (60 °C)		
รายละเอียดตัวอย่าง:	น้ำมัน ไบโอดีเซล		

ผลการทดสอบ:

ลำดับที่	พารามิเตอร์	หน่วย	เครื่องมือ/วิธีการทดสอบ	ผลการทดสอบ \pm SD	เกณฑ์	สรุป
1.	เจ้าชัลเฟต	% wt.	ASTM D 874	< 0.005	\leq 0.02	ผ่าน

-ผลการทดสอบอ้างอิงใบขอใช้บริการ (F-ASO-054) เลขที่ 4491/58

-SD = Standard Deviation

-อ้างอิงตามประกาศกรมธุรกิจพลังงาน เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมัน

(นางรุสณี กุลวิจิตร)

หัวหน้าฝ่ายบริการเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

4 ธันวาคม 2558

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้คือไม่ผูกทำสำเนาเพียงบางส่วน
ยกเว้นที่ทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์



ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม อ.หาดใหญ่ อ.สงขลา 90110
โทรศัพท์ 074-286904-7 โทรสาร 074-212813 อีเมล sec-all@group.psu.ac.th เว็บไซต์ http://www.sec.psu.ac.th

วิสัยทัศน์: เป็นองค์กรภาครัฐที่เติบโตด้วยความมุ่งมั่นสู่การเป็นองค์กรที่มีสมรรถนะสูง
และยั่งยืนจากการให้บริการทดสอบด้วยเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

F-RES-033 ฉบับที่ 2 บังคับใช้ 05/06/58

รายงานผลการทดสอบ

เลขที่รายงาน: C 1151/58	หน้า: 1/1
เลขที่ใบขอใช้บริการฯ: 4364/58 และ 4572/58	วันที่รับตัวอย่าง: 12 พฤศจิกายน 2558
ชื่อและที่อยู่ลูกค้า: นายกิจภูมิ วิจิตร โสภา วิศวกรรมการเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	
ชื่อตัวอย่าง: Ethyl Ester (75 °C)	
รายละเอียดตัวอย่าง: น้ำมันไบโอดีเซล	

ผลการทดสอบ:

ลำดับที่	พารามิเตอร์	หน่วย	เครื่องมือ/วิธีการทดสอบ	ผลการทดสอบ \pm SD	เกณฑ์	สรุป
1.	ค่าไอโอดีน	g Iodine/100g	EN 14111	56.27 \pm 0.89	\leq 120	ผ่าน
2.	กำมะถัน	% wt.	XRF	< 0.0002	< 0.0010	ผ่าน
3.	โมโนกลีเซอไรด์	% wt.	EN 14105	0.819 \pm 0.001	\leq 0.80	ไม่ผ่าน
4.	ไดกลีเซอไรด์	% wt.	EN 14105	0.215 \pm 0.002	\leq 0.20	ไม่ผ่าน
5.	ไตรโนกลีเซอไรด์	% wt.	EN 14105	0.034 \pm 0.000	\leq 0.20	ผ่าน
6.	กลีเซอรินอิสระ	% wt.	EN 14105	ไม่พบ	\leq 0.02	ผ่าน
7.	กลีเซอรินทั้งหมด	% wt.	EN 14105	0.246 \pm 0.000	\leq 0.25	ผ่าน
8.	เอสเทอร์	% wt.	EN 14103	98.11 \pm 0.03	\geq 96.5	ผ่าน
9.	กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์	% wt.	EN 14103	ไม่พบ	\leq 0.20	ผ่าน
10.	เอทานอล	% wt.	EN 14110	< 0.01	\leq 0.20	ผ่าน

- ผลการทดสอบอ้างอิงใบขอใช้บริการ (F-ASO-054) เลขที่ 4364/58 และ (F-ASO-022) เลขที่ 4572/58
- SD = Standard Deviation
- XRF = X-Ray Fluorescence Spectrometer
- ขีดจำกัดของการวัดปริมาณ (LOQ): Ethanol = 0.01% wt.
- ขีดต่ำสุดของการวัด (LLD): S = 0.0002 % wt.
- อ้างอิงตามประกาศกรมธุรกิจพลังงาน เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน
- รายงานเพิ่มเติมรายงานผลการทดสอบแบบรวมเลขที่ C1133/58

(นางรุสนีย์ กุลวิจิตร)

หัวหน้าฝ่ายบริการเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

2 ธันวาคม 2558

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาเพียงบางส่วน
ยกเว้นทำทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์



ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110

โทรศัพท์ 074-286904-7 โทรสาร 074-212813 อีเมล sec-all@group.psu.ac.th เว็บไซต์ http://www.sec.psu.ac.th

วิสัยทัศน์: เป็นองค์กรภาครัฐที่เติบโตด้วยความมุ่งมั่นสู่การเป็นองค์กรที่มีสมรรถนะสูง
และยั่งยืนจากการให้บริการทดสอบด้วยเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

F-RES-033 ฉบับที่ 2 บังคับใช้ 05/06/2558

รายงานผลการทดสอบ

เลขที่รายงาน:	C1169/58	หน้า:	1/1
เลขที่ใบขอใช้บริการฯ:	4491/58	วันที่รับตัวอย่าง:	20 พฤศจิกายน 2558
ชื่อและที่อยู่ลูกค้า:	นายกิจภูมิ วิจิตร โสภา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์		
ชื่อตัวอย่าง:	Ethyl Ester (75 °C)		
รายละเอียดตัวอย่าง:	น้ำมัน ไบโอดีเซล		

ผลการทดสอบ:

ลำดับที่	พารามิเตอร์	หน่วย	เครื่องมือ/วิธีการทดสอบ	ผลการทดสอบ \pm SD	เกณฑ์	สรุป
1.	เอ้าซิลเฟด	% wt.	ASTM D 874	< 0.005	\leq 0.02	ผ่าน

-ผลการทดสอบอ้างอิงใบขอใช้บริการ (F-ASO-054) เลขที่ 4491/58

-SD = Standard Deviation

-อ้างอิงตามประกาศกรมธุรกิจพลังงาน เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมัน

(นางรุสนี กุลวิจิตร)

หัวหน้าฝ่ายบริการเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

๔ ธันวาคม 2558

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาเพื่อบางส่วน
ยกเว้นทำทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์



ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
 ตู้ ปณ. 2 คอหงส์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112 เว็บไซต์ chem.eng.psu.ac.th
 โทรศัพท์ 074-287055-6 โทรสาร 074-558833 อีเมลล์ kunyanunt.c@psu.ac.th



รายงานผลการทดสอบ

ใบขอรับบริการเลขที่ 8/2559

บันทึกงานเลขที่ Pe4/2559

วันที่รับตัวอย่าง 12 พฤศจิกายน พ.ศ.2558
 ชื่อผู้ขอรับบริการ นายกิจภูมิ วิจิตรโสภา
 ที่อยู่ 112/9 ม.6 ต.เจ๊ะเห อ.ตากใบ จ.นราธิวาส
 ชื่อ/ชนิดของตัวอย่าง ไบโอดีเซล

รายงานผลการทดลอง

ชื่อตัวอย่าง	รายการทดสอบ	วิธีการทดสอบ	ค่ามาตรฐาน	ผลการทดสอบ
1. Methyl Ester (60°C)	จุดวาบไฟ (Flash Point)	ASTM-D93	> 120 °C	147°C
	ความหนืด ณ 40 องศาเซลเซียส (Viscosity at 40°C)	ASTM-D445	3.5-5 cSt	4.9 cSt
	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (Copper Corrosion)	ASTM-130	≤No.1	No.1a
2. Ethyl Ester (75°C)	จุดวาบไฟ (Flash Point)	ASTM-D93	> 120 °C	167 °C
	ความหนืด ณ 40 องศาเซลเซียส (Viscosity at 40°C)	ASTM-D445	3.5-5 cSt	5.08 cSt
	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (Copper Corrosion)	ASTM-130	≤No.1	No.1a

หมายเหตุ : -

(นายธนากร เกียรติขวัญบุตร)

นักวิทยาศาสตร์ผู้ทดสอบ
 20/11/2558

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สินินามู จงคง)

รองหัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมเคมีฝ่ายบริการวิชาการและประกันคุณภาพ
 20/11/58

ลงวันที่ทำการทดสอบเสร็จ 20/11/58

หมายเหตุ - รายงานนี้รับรองเฉพาะตัวอย่างที่ตรวจวิเคราะห์/ทดสอบเท่านั้น
 - ห้ามคัดถ่ายรายงานผลแต่เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษร



B039/2558

สถานวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจากน้ำมันปาล์มและพืชน้ำมัน
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110
Specialized Research and Development Center for Alternative Energy from Palm Oil
and Oil Crops, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University,
P.O.Box 2 Hat Yai, Songkhla 90110 Tel.: 0-7428-7185 Fax: 0-7428-7185
www.biodiesel.eng.psu.ac.th

รายงานผลการทดสอบ

ชื่อและที่อยู่ลูกค้า : ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
วันที่รับตัวอย่าง : 23/11/2558 วันที่ทำการทดสอบ : 24/11/2558
รายการทดสอบ ปริมาณน้ำและตะกอน (Water and sediment)
วิธีการทดสอบ : อ้างอิง ASTM D 2709-96
เครื่องมือทดสอบ : Centrifuge (Koehler Benchmark 2000)
สภาวะการทดสอบ : Relative centrifuge force (rcf) 800 ± 60
รายละเอียดตัวอย่าง : ไป โอดีเซล จำนวน 2 ตัวอย่าง
ผลการทดสอบ :

ตัวอย่าง	รายละเอียด	Volumetric percent sediment (%v/v)
1	ME 60 C (4364/58)	น้อยกว่า 0.05
2	EE 75 C (4364/58)	0.05

(นายสมหมาย โอชาพันธุ์)

ผู้ทดสอบ

(นายทรงธรรม โพธิ์ถาวร)

ผู้ตรวจสอบ

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนา
เพียงบางส่วน ยกเว้นทำทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางสถานวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจาก
น้ำมันปาล์มและพืชน้ำมัน

หน้าที่ 1 จาก 1

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายกิจภูมิ วิจิตรโสภา
 รหัสประจำตัวนักศึกษา 52512035
 วุฒิกการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์	2555

ทุนการศึกษา

ทุนการศึกษาประเภททุนมหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ (National Research University) จากสำนักวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ทุนการศึกษาประเภททุนงบประมาณแผ่นดิน จากสำนักวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ทุนการศึกษาประเภททุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ จากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Kichaphum Wijitsopa, Krit Somnuk, Thanansak Theppaya, Gumpon Prateepchaikul. 2015. Continuous Transesterification for Ethyl Ester Production from Refined Palm Oil through Static Mixer. Applied Mechanics and Materials 705: 64-68.

กิจภูมิ วิจิตรโสภา, กฤษ สมนึก และ กำพล ประทีปชัยกูร. 2015. “การเปรียบเทียบการผลิตเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์แบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบสถิต”. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 29. 1-3 กรกฎาคม 2015. จังหวัดนครราชสีมา.