



ระบบผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสม  
แบบสถิตร่วมกับคลื่นเสียงอัลตราโซนิก

Continuous Biodiesel Production from Palm Fatty Acid Distillate  
Using Static Mixer Coupled with Ultrasonic Irradiation

ทณงศักดิ์ ประสิทธิ์  
Tanongsak Prasit

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

2560

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



ระบบผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสม  
แบบสถิตร่วมกับคลื่นเสียงอัลตราโซนิก  
Continuous Biodiesel Production from Palm Fatty Acid Distillate  
Using Static Mixer Coupled with Ultrasonic Irradiation

ทณงศักดิ์ ประสิทธิ์  
Tanongsak Prasit

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

2560

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์      ระบบผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์  
 ท่อผสมแบบสถิตร่วมกับคลื่นเสียงอัลตราโซนิก

ผู้เขียน              นายทองศักดิ์ ประสิทธิ์

สาขาวิชา            วิศวกรรมเครื่องกล

**อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก**

**คณะกรรมการสอบ**

.....  
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษ สมนึก)

.....ประธานกรรมการ  
 (รองศาสตราจารย์ กำพล ประทีปชัยกุล)

.....กรรมการ  
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษ สมนึก)

.....กรรมการ  
 (ดร.ฐานันดรศักดิ์ เทพญา)

.....กรรมการ  
 (รองศาสตราจารย์ ดร.สุกฤทธิรา รัตนวิไล)

.....กรรมการ  
 (ดร.บุญรอด สัจจกุลนุกิจ)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
 ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา  
 วิศวกรรมเครื่องกล

.....  
 (รองศาสตราจารย์ ดร.ดำรงศักดิ์ ฟาร์รุ่งแสง)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ .....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษ สมนึก)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลงชื่อ .....

(นายทองศักดิ์ ประสิทธิ์)

นักศึกษา



ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ  
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ .....

(นายทงศักดิ์ ประสิทธิ์)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	ระบบผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์ ท่อผสมแบบสถิตร่วมกับคลื่นเสียงอัลตราโซนิก
ผู้เขียน	นายทงศักดิ์ ประสิทธิ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา	2560

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมัน (palm fatty acid distillate, PFAD) ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบสถิตร่วมกับคลื่นเสียงอัลตราโซนิก PFAD เป็นผลพลอยได้ที่มีราคาถูกได้จากกระบวนการกลั่นทางกายภาพของน้ำมันปาล์มดิบ (crude palm oil, CPO) ให้เป็นน้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์ (refined palm oil, RPO) เพื่อเป็นน้ำมันสำหรับการบริโภค ซึ่ง PFAD ไม่ได้เป็นน้ำมันสำหรับการบริโภค และปกติใช้ในการผลิตสบู่ การผลิตอาหารสัตว์ และอุตสาหกรรมนมโอเลโอเคมีคอล นอกจากนี้ยังใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตอาหารเพื่อสุขภาพและอุตสาหกรรมยา เนื่องจากสามารถสกัดวิตามินอีได้จาก PFAD โดยมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นกรดไขมันอิสระ (free fatty acid, FFA) เท่ากับ 90.57 wt.% และมีศักยภาพสำหรับการนำมาเป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากมีราคาถูกกว่าน้ำมันสำหรับการบริโภค เช่น น้ำมันปาล์มดิบ น้ำมันมะพร้าว และน้ำมันถั่วเหลือง เป็นต้น การประยุกต์ใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิกช่วยในการผสมของเหลวที่ไม่สามารถผสมเข้ากันได้ (immiscible liquid) เพื่อลดเวลาในการทำปฏิกิริยา ลดปริมาณสารเคมี และเพิ่มปริมาณผลได้ของไบโอดีเซล ในการออกแบบอุปกรณ์ทดลองใช้ท่อผสมแบบสถิตชนิดขดเกลียวที่มีความยาว เท่ากับ 5 m ในการผสม PFAD เมทานอล และกรดซัลฟิวริก ก่อนไหลผ่านเข้าเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก ซึ่งมีการติดตั้งอัลตราโซนิกเคลมป์ 16 หัว แต่ละหัวทำงานที่ความถี่ เท่ากับ 20 kHz และกำลังของคลื่น เท่ากับ 400 W โดยติดตั้งตามความยาวของเครื่องปฏิกรณ์ที่ระยะห่างกัน เท่ากับ 100 mm กำลังของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก เท่ากับ 16×400 W เกิดจากแหล่งกำเนิดคลื่นไปยังอัลตราโซนิกเคลมป์ โดยมีกำลังสูงสุดของคลื่นรวมเท่ากับ 6400 W ซึ่งการผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD ได้ออกแบบการทดลอง 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 ใช้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ขั้นตอนที่ 2 ใช้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน และขั้นตอนที่ 3 ใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ซึ่งการ ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลได้ออกแบบการทดลองด้วยวิธีการออกแบบประสมกลาง (central composite design, CCD) และวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (response surface methodology, RSM) โดยตัวแปรที่ศึกษาที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ เช่น ปริมาณเมทานอล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และความยาวของท่ออัลตราโซนิก สำหรับขั้นตอนที่ 1 แปรค่าปริมาณเมทานอล เท่ากับ 19.8-70.2 vol.% ปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 0.0-10.0 vol.% และความยาวของท่ออัลตราโซนิก เท่ากับ 100-700 mm จากการทดลอง พบว่า ได้ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ เท่ากับ 60.24 wt.% และมีปริมาณผลได้ เท่ากับ 103.93 vol.% ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม คือ ปริมาณเมทานอล เท่ากับ 45.7 vol.% ปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 7.0 vol.% และความยาวของท่ออัลตราโซนิก เท่ากับ 400 mm หรือเวลาทำ

ปฏิกิริยาในท่อประมาณ 10.4 s สำหรับขั้นตอนที่ 2 แปรค่าปริมาณเมทานอล เท่ากับ 26.4-93.6 vol.% ปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 0.6-7.4 vol.% และความยาวของท่ออัลตราโซนิก เท่ากับ 100-700 mm จากการทดลอง พบว่า ได้ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ เท่ากับ 91.32 wt.% และมีปริมาณผลได้ เท่ากับ 107.63 vol.% ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม คือ ปริมาณเมทานอล เท่ากับ 59.6 vol.% ปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 3.1 vol.% และความยาวของท่ออัลตราโซนิก เท่ากับ 400 mm หรือเวลาทำปฏิกิริยาในท่อ ประมาณ 10.4 s และขั้นตอนที่ 3 แปรค่าปริมาณเมทานอล เท่ากับ 7.9-21.1 vol.% และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1.2-6.8 g.L<sup>-1</sup> จากการทดลอง พบว่า ได้ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ เท่ากับ 97.11 wt.% และมีปริมาณผลได้ของไบโอดีเซลดิบ เท่ากับ 115.71 vol.% และปริมาณผลได้ของไบโอดีเซลบริสุทธิ์ เท่ากับ 91.67 vol.% ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม คือ ปริมาณเมทานอล เท่ากับ 13.4 vol.% ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 4.0 g.L<sup>-1</sup> โดยใช้เวลาทำปฏิกิริยาในท่อ เท่ากับ 18.2 s ซึ่งทั้ง 3 ขั้นตอนใช้ปริมาณเมทานอลรวม เท่ากับ 118.7 vol.% ปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 10.1 vol.% ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 4.0 g.L<sup>-1</sup> และเวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 39.0 s โดยไบโอดีเซลที่ผลิตได้มีความบริสุทธิ์สูงกว่ามาตรฐานไบโอดีเซลชุมชน และมีคุณสมบัติอื่น ๆ ผ่านมาตรฐานไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์

<b>Thesis</b>	Continuous Biodiesel Production from Palm Fatty Acid Distillate Using Static Mixer Coupled with Ultrasonic Irradiation
<b>Author</b>	Mr. Tanongsak Prasit
<b>Major Program</b>	Mechanical Engineering
<b>Academic Year</b>	2017

## ABSTRACT

In this research, the continuous biodiesel production process from palm fatty acid distillate (PFAD) was studied using static mixer coupled with ultrasonic irradiation. The PFAD is a by-product of low market value from the physical refining of crude palm oil (CPO) to edible grade refined palm oil (RPO). The PFAD is not of edible grade, and it is normally used in making soap or animal feed, or by oleochemical industries in general. It can also be used as raw material by the health food and the pharmaceutical industries, as vitamin E can be extracted from PFAD. The PFAD mainly consists of FFA (90.57 wt.%) and it is a promising feedstock for biodiesel production as a potential feedstock for biofuels. Moreover, PFAD is cheaper than the edible oils such as crude palm oil, coconut oil and soybean oil. The ultrasound was assisted the mixing of immiscible liquid for biodiesel production by sonochemical effects on reaction. It was applied in the biodiesel production to decrease reaction time, decrease chemical reactants, and increase yield of biodiesel. In the experiment setup, 5 m of static mixer length was installed for premixing the PFAD, methanol, and sulfuric acid, subsequently, the mixtures were flowed through the ultrasonic tubular reactor (US). The US consisted of 16 units ultrasound clamps attached. Each clamp was operated at fixed frequency of 20 kHz with maximally 400 W power in this study. The ultrasound clamps were fixed in sequence along the length of the reactor at locations 100 mm apart. The ultrasonic power provided maximally 16×400 W input from ultrasonic generator to the ultrasound clamps, for a sum total of 6400 W at full ultrasonic power. The three steps for continuous biodiesel production process from PFAD were esterification first, esterification second, and transesterification third, and these were optimized using models fit by the response surface methodology (RSM) with central composite design (CCD). The manipulated variables: methanol content, catalyst amount, and length of US reactor were optimized the ester purity using RSM. For the 1<sup>st</sup>-step esterification, the ranges of variables: methanol content (19.8-70.2 vol.%), sulfuric acid (0-10.0 vol.%), and length of US reactor (100-700 mm), were studied. The results showed that 60.24

wt.% of methyl ester and 103.93 vol.% of yield were achieved under the condition was 45.7 vol.% methanol, 7.0 vol.% sulfuric acid and 400 mm length of US reactor (approximately 10.40 s of residence time). For the 2<sup>nd</sup>-step esterification, the ranges of variables: methanol content (26.4-93.6 vol.%), sulfuric acid (0.6-7.4 vol.%), and length of US reactor (100-700 mm), were studied. The results showed that 91.32 wt.% of methyl ester and 107.63 vol.% of yield were achieved under the condition was 59.6 vol.% methanol, 3.1 vol.% sulfuric acid and 400 mm length of US reactor (approximately 10.40 s of residence time). For the 3<sup>rd</sup>-step transesterification, the ranges of variables: methanol content (7.9-21.1 vol.%) and potassium hydroxide (1.2-6.8 g.L<sup>-1</sup>) were studied. The results showed that 97.11 wt.% of methyl ester, 115.71 vol.% of crude biodiesel yield and 91.67 vol.% of biodiesel yield were achieved under the condition was 13.4 vol.% methanol, 4.0 g.L<sup>-1</sup> potassium hydroxide and 18.20 s of residence time. The total chemical consumptions of three-step process were 118.7 vol.% methanol, 10.1 vol.% sulfuric acid, 4.0 g.L<sup>-1</sup> potassium hydroxide and 39.0 s reaction time. The final 97.11 wt.% ester purity meets the specifications of commercial-based biodiesel, and Moreover, other characteristics of methyl ester is very close to methyl ester specifications of both the specifications of commercial-based biodiesel and biodiesel community for use in an agricultural engine.

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษ สมนึก อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาแนะนำในการดำเนินงานวิจัยให้สามารถผ่านไปได้อย่างดีเสมอมา จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ กำพล ประทีปชัยกูร ดร.ฐานันดรศักดิ์ เทพญา รองศาสตราจารย์ ดร.สุกฤทธิรา รัตนวิไล และ ดร.บุญรอด สัจจกุลนุกิจ ที่ได้สละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ ประจำปีงบประมาณ 2559 ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน ที่สนับสนุนทุนในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนทุนการศึกษาประเภททุนโครงการศิษย์ก้นกุฏิ ระดับปริญญาโท

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่อำนวยความสะดวกด้านเครื่องมือและสถานที่ในการทำวิจัย

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้า รวมถึงเพื่อน ๆ พี่ ๆ และน้อง ๆ ที่สนับสนุน ส่งเสริม และเป็นกำลังใจแก่ข้าพเจ้าตลอดมา จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงมาด้วยดี

ทงศักดิ์ ประสิทธิ์

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(10)
รายการตาราง	(16)
รายการรูปประกอบ	(18)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(21)
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 บทนำต้นเรื่อง	1
1.2 การตรวจเอกสาร	3
1.2.1 สถานการณ์ปาล์มน้ำมัน	3
1.2.2 สถานการณ์พลังงานทดแทนและไบโอดีเซลของประเทศไทย	4
1.2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
1.2.3.1 ส่วนกลั่นกรดไขมัน	6
1.2.3.2 การผลิตไบโอดีเซลแบบกะ	10
1.2.3.3 การผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง	11
1.2.3.4 การผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมัน	11
1.2.3.5 การผลิตไบโอดีเซลด้วยท่อผสมแบบสถิต	12
1.2.3.6 การผลิตไบโอดีเซลด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิก	13
1.2.3.6.1 การผลิตไบโอดีเซลด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกแบบกะ	13
1.2.3.6.2 การผลิตไบโอดีเซลด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกแบบต่อเนื่อง	14
1.2.3.6.3 การผลิตไบโอดีเซลด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกแบบหลายขั้นตอน	15
1.2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไบโอดีเซล	17
1.2.4.1 ปริมาณน้ำและกรดไขมันอิสระ	17
1.2.4.2 อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน	17
1.2.4.3 ชนิดและความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา	18
1.2.4.4 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา	18
1.2.4.5 เวลาทำปฏิกิริยา	19
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	23
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	23
1.5 ขอบเขตของโครงการวิจัย	23

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2 ทฤษฎี	24
2.1 ไบโอดีเซล	24
2.1.1 นิยาม และความหมายของไบโอดีเซล	24
2.1.2 ปฏิกริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน	25
2.1.3 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน	25
2.1.4 ตัวเร่งปฏิกริยาวิวิธพันธุ์	26
2.1.5 ตัวเร่งปฏิกริยาเอกพันธุ์	26
2.1.6 เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน	26
2.1.7 กรดไขมันอิสระ	26
2.1.8 ค่าความเป็นกรด	27
2.1.9 ข้อดีของไบโอดีเซล	27
2.1.9.1 ด้านสิ่งแวดล้อม	27
2.1.9.2 ด้านสมรรถนะของเครื่องยนต์	27
2.1.10 ข้อด้อยของไบโอดีเซล	28
2.2 เครื่องปฏิกรณ์ผลิตไบโอดีเซล	28
2.2.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ	28
2.2.2 เครื่องปฏิกรณ์ไหลแบบต่อเนื่อง	29
2.2.3 เครื่องปฏิกรณ์อัลตราโซนิก	30
2.2.4 เครื่องปฏิกรณ์แบบวิกฤติยั้งยวด	30
2.3 ท่อผสมแบบสถิต	30
2.4 คลื่นเสียงอัลตราโซนิก	32
2.4.1 ปรากฏการณ์แคปพิเตชัน	32
2.4.1.1 แคปพิเตชันแบบถาวร	33
2.4.1.2 แคปพิเตชันแบบชั่วคราว	33
2.4.2 ตัวแปลงสัญญาณของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก	33
2.4.1.1 ตัวแปลงสัญญาณที่ขับเคลื่อนด้วยของเหลว	34
2.4.1.2 ตัวแปลงสัญญาณชนิดแมกนีโทสตริกทิฟ	34
2.4.1.3 ตัวแปลงสัญญาณชนิดโซอิล็คตริก	34
2.4.3 การประยุกต์ใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิก	35
2.4.3.1 คลื่นเสียงอัลตราโซนิกแบบอ่า่งล่าง	35
2.4.3.2 คลื่นเสียงอัลตราโซนิกแบบโพรบ	35
2.4.3.4 คลื่นเสียงอัลตราโซนิกแบบท่อ	35
2.4.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการประยุกต์ใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิก	38



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.4.1 จำนวนและตำแหน่งของตัวแปลงสัญญาณ	38
2.4.4.2 ความถี่ของการแผ่รังสี	39
2.4.4.3 พลังงานของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก	39
3 การออกแบบเครื่องปฏิบัติการที่ผสมแบบสถิตร่วมกับคลื่นเสียงอัลตราโซนิก	40
3.1 คลื่นเสียงอัลตราโซนิก	40
3.2 ท่อผสมแบบสถิตชนิดขดเกลียว	44
3.3 ถังวัดอุทกิตและสารเคมี	46
3.4 ถังแยกแบบต่อเนื่อง	46
4 อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย	48
4.1 วัดอุทกิต สารเคมี และอุปกรณ์ในการวิจัย	48
4.1.1 วัดอุทกิตที่ใช้ในการวิจัย	48
4.1.1.1 น้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์	48
4.1.1.2 น้ำมันส่วนกลั่นกรดไขมัน	48
4.1.2 สารเคมีที่ใช้การผลิตไบโอดีเซล	48
4.1.3 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมัน	48
4.2 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	48
4.2.1 การทดลองผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกแบบกะ	49
4.2.1.1 อุปกรณ์ในการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกแบบกะ	49
4.2.1.2 ขั้นตอนการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกแบบกะ	49
4.2.2 การทดลองผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันแบบหมุนวนด้วยท่อผสมแบบสถิตชนิดขดเกลียว	50
4.2.2.1 อุปกรณ์ในการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันแบบหมุนวนด้วยท่อผสมแบบสถิตชนิดขดเกลียว	50
4.2.2.2 ขั้นตอนการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันแบบหมุนวนด้วยท่อผสมแบบสถิตชนิดขดเกลียว	50
4.2.3 การทดลองผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิบัติการคลื่นเสียงอัลตราโซนิก	51
4.2.3.1 อุปกรณ์ในการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์แบบต่อเนื่อง	51

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.3.2 ขั้นตอนการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มกลั่น- บริสุทธิ์แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก	52
4.2.4 การทดลองผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขปาล์มแบบต่อเนื่องด้วย เครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก แบบ 3 ขั้นตอน	53
4.2.4.1 อุปกรณ์ในการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไข- ปาล์มแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก แบบ 3 ขั้นตอน	53
4.2.4.2 ขั้นตอนการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขปาล์ม แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก แบบ 3 ขั้นตอน	54
4.2.4.2.1 ขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไข ปาล์มแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัล ตราโซนิก ขั้นตอนที่ 1	54
4.2.4.2.2 ขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไข ปาล์มแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่น เสียงอัลตราโซนิก ขั้นตอนที่ 2	54
4.2.4.2.3 ขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไข ปาล์มแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องคลื่นเสียงอัลตราโซ- นิก ขั้นตอนที่ 3	55
4.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมัน	60
4.3.1 เทคนิคการไทเทรต	60
4.3.2 เทคนิค thin layer chromatography-flame ionization detector (TLC-FID)	60
4.3.3 เทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ (nuclear magnetic resonance spectroscopy, NMR)	61
4.4 การออกแบบการทดลอง	62
4.5 การหารูปแบบสมการทำนายความสัมพันธ์	63
5 ผลการทดลอง	65
5.1 ผลการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขปาล์มด้วยคลื่นเสียงอัลตรา- โซนิกแบบกะ	65
5.1.1 ผลของเมทานอลที่มีผลต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์	65

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.1.2 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์	65
5.2 ผลการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันแบบหมุนวนด้วยท่อผสมแบบสถิตชนิดขดเกลียว	67
5.2.1 ผลของเมทานอลที่มีผลต่อการลดค่าความเป็นกรดของ PFAD	67
5.2.2 ผลของกรดซัลฟิวริกที่มีผลต่อการลดค่าความเป็นกรดของ PFAD	67
5.2.3 ผลของเวลาทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อการลดค่าความเป็นกรดของ PFAD	68
5.3 ผลการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบสถิตร่วมกับคลื่นเสียงอัลตราโซนิก	70
5.4 ผลการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก แบบ 3 ขั้นตอน	73
5.4.1 ผลจากทดลองผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก ขั้นตอนที่ 1	73
5.4.2 ผลการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก ขั้นตอนที่ 2	77
5.4.3 ผลการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก ขั้นตอนที่ 3	81
5.5 การศึกษาปริมาณการใช้สารเคมี เวลาทำปฏิกิริยา และปริมาณผลได้ของการผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก แบบ 3 ขั้นตอน	83
5.5.1 ปริมาณสารเคมี และเวลาทำปฏิกิริยา	83
5.5.2 ปริมาณผลได้ของไบโอดีเซล	83
5.6 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของไบโอดีเซลตามมาตรฐาน	89
5.7 การวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์	89
5.7.1 ต้นทุนวัตถุดิบและสารเคมี	89
5.7.2 ต้นทุนพลังงานไฟฟ้า	89
6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	93
6.1 บทสรุป	93
6.1.1 สภาพที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล	93
6.1.2 ปริมาณสารเคมี เวลาทำปฏิกิริยา และปริมาณผลได้	93
6.1.3 คุณสมบัติของไบโอดีเซล	94
6.1.4 การวิเคราะห์ต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซล	94
6.2 ข้อเสนอแนะ	94
บรรณานุกรม	96

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก	107
ก ตัวอย่างการคำนวณ	108
ข การออกแบบการทดลอง	113
ค การพิจารณาค่าทางสถิติของสมการทำนายความสัมพันธ์	118
ง ตารางการแจกแจงแบบเอฟ	124
จ ลักษณะและคุณภาพของไปโอดีเซล	126
ฉ ผลการวิเคราะห์ไปโอดีเซล	130
ช ตัวอย่างการวิเคราะห์ด้วย เทคนิค NMR	149
ซ การเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ	152
ณ แบบชุดทดลอง	189
ประวัติผู้เขียน	204

## รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	ปริมาณการผลิตน้ำมันปาล์มดิบของประเทศในแถบภูมิภาคอาเซียน	4
1.2	การผลิตและการค้าน้ำมันปาล์มของประเทศไทย	4
1.3	ปริมาณการใช้พลังงานทดแทนของประเทศไทย	5
1.4	รายชื่อผู้ผลิตไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน	6
1.5	การประเมินปริมาณของส่วนกลั่นกรดไขมันของประเทศไทยในแถบภูมิภาคอาเซียน	9
1.6	คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบของของส่วนกลั่นกรดไขมัน	10
1.7	องค์ประกอบของกรดไขมันของส่วนกลั่นกรดไขมัน	10
1.8	สรุปการทบทวนเอกสารกระบวนการการผลิตไบโอดีเซล	20
1.9	สรุปการทบทวนเอกสารกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิก	21
2.1	ลักษณะการประยุกต์ใช้งานของท่อผสมแบบสถิตชนิดต่าง ๆ	32
2.2	เครื่องปฏิกรณ์อัลตราโซนิกประเภทต่าง ๆ	38
3.1	ลักษณะของการผสมของสารทำปฏิกิริยาระหว่างส่วนกลั่นกรดไขมัน เมทานอล และกรดซัลฟิวริก โดยใช้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันที่กำลังของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก เท่ากับ 400 W และความถี่ เท่ากับ 20, 25, 30 และ 50 kHz	42
4.1	ช่วงและระดับการแปรค่าของตัวแปรอิสระสำหรับการผลิตไบโอดีเซล	63
5.1	ผลการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก ขั้นตอนที่ 1	74
5.2	ค่าทางสถิติของสมการทำนายความสัมพันธ์ของขั้นตอนที่ 1	76
5.3	เงื่อนไขที่เหมาะสม และเงื่อนไขที่แนะนำขั้นตอนที่ 1	77
5.4	ผลการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก ขั้นตอนที่ 2	78
5.5	ค่าทางสถิติของสมการทำนายความสัมพันธ์ของขั้นตอนที่ 1 ขั้นตอนที่ 2	80
5.6	เงื่อนไขที่เหมาะสม และเงื่อนไขที่แนะนำขั้นตอนที่ 2	81
5.7	ผลการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก ขั้นตอนที่ 3	82
5.8	ค่าทางสถิติของสมการทำนายความสัมพันธ์ของขั้นตอนที่ 1 ขั้นตอนที่ 2 ขั้นตอนที่ 3	83
5.9	พลังงานความร้อนที่ใช้ในกระบวนการกลั่นเมทานอล	84
5.10	เงื่อนไขที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก แบบ 3 ขั้นตอน	86
5.11	ปริมาณผลได้ของไบโอดีเซลจาก PFAD แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก แบบ 3 ขั้นตอน	86
5.12	คุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ผลิตจาก PFAD แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก แบบ 3 ขั้นตอน	90

## รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
5.13	ต้นทุนสารเคมีที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก แบบ 3 ชั้นตอน	91
5.14	ต้นทุนจากพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก แบบ 3 ชั้นตอน	92

## รายการรูปประกอบ

รูปที่		หน้า
1.1	กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม	8
1.2	ส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์ม (PFAD)	9
	(ก) PFAD ที่อุณหภูมิ 30°C	
	(ข) PFAD ที่อุณหภูมิ 43°C	
2.1	ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน	25
2.2	ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน	25
2.3	เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบกะ	28
2.4	เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง	29
	(ก) เครื่องปฏิกรณ์ CSTR ต่ออนุกรม	
	(ข) เครื่องปฏิกรณ์ CSTR แบบหลายชั้น	
	(ค) เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล	
2.5	ลักษณะการไหลผสมด้วยท่อผสมแบบสถิติ	31
2.6	รูปแบบของ mixing element	31
	(ก) Chemineer Kenics static mixers	
	(ข) Ross ISG static mixer	
	(ค) Sulzer or Koch static mixers	
	(ง) Ross static mixers	
2.7	การเกิดฟองอากาศและการระเบิดภายในของโมเลกุล	33
2.8	การประยุกต์ใช้อัลตราโซนิกแบบอ่างอัลตราโซนิกในการผลิตไบโอดีเซล	36
2.9	ชุดทดลองผลิตไบโอดีเซลด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกแบบ probe	36
2.10	การประยุกต์ใช้อัลตราโซนิกแบบท่อ	37
3.1	การติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์อัลตราโซนิกแบบท่อ	43
3.2	ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์จาก PFAD ที่เงื่อนไขปริมาณเมทานอล เท่ากับ 45 vol.% ปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 5 vol.% และอัตราการไหลของ PFAD เท่ากับ 25 L.h <sup>-1</sup>	43
3.3	เครื่องปฏิกรณ์ผลิตไบโอดีเซลด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกร่วมกับคลื่นเสียงอัลตราโซนิก	45
3.4	ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์จาก PFAD ที่เงื่อนไขปริมาณเมทานอล เท่ากับ 45 vol.% ปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 5 vol.% และอัตราการไหลของ PFAD 25 เท่ากับ L.h <sup>-1</sup> สำหรับกรณีไม่ใช้ท่อผสมแบบสถิติชนิดขดเกลียว กรณีใช้ท่อผสมแบบสถิติชนิดขดเกลียว 2 m และกรณีใช้ท่อผสมแบบสถิติชนิดขดเกลียว 5 m	45

### รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.5	ค่าความเป็นกรดของน้ำมันลดกรดไขมันอิสระจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD (ก) ขั้นตอนที่ 1 (ข) ขั้นตอนที่ 2	47
4.1	เครื่องปฏิกรณ์อัลตราโซนิคชนิดโพรบแบบกะ	50
4.2	ชุดทดลองของเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมชนิดขดเกลียวแบบหมุนวน	51
4.3	ชุดทดลองผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์แบบต่อเนื่อง	53
4.4	เครื่องผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขปาล์มแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิค แบบ 3 ขั้นตอน	56
4.5	เครื่องผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขปาล์มแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิค ขั้นตอนที่ 1 (ก) ด้านหน้าของเครื่องปฏิกรณ์ (ข) ด้านหลังของเครื่องปฏิกรณ์	57
4.6	เครื่องผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขปาล์มแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิค ขั้นตอนที่ 2 และขั้นตอนที่ 3 (ก) ด้านหน้าของเครื่องปฏิกรณ์ (ข) ด้านหลังของเครื่องปฏิกรณ์	58
4.7	แผนผังระบบผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขปาล์มแบบต่อเนื่องด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิค แบบ 3 ขั้นตอน	59
4.8	ตัวอย่าง $^1\text{H-NMR}$ สเปกตรัมของสารอินทรีย์	62
5.1	ปริมาณเมทิลเอสเทอร์และกรดไขมันอิสระจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD ด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิคชนิดโพรบแบบกะ	66
5.2	การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดของ PFAD ของกระบวนการผลิตไบโอดีเซล (ก) ปริมาณเมทานอล เท่ากับ 60 wt.% (ข) ปริมาณเมทานอล เท่ากับ 80 wt.% (ค) ปริมาณเมทานอล เท่ากับ 100 wt.%	70
5.3	การเปรียบเทียบความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ของกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน โดยใช้ PF, SM, US และ SM/US ภายใต้เงื่อนไขเมทานอล 20 vol.% ที่อัตราการไหลของ RPO 20 L.h <sup>-1</sup> อุณหภูมิ 60°C (ก) KOH เท่ากับ 4 g.L <sup>-1</sup> (ข) KOH เท่ากับ 12 g.L <sup>-1</sup>	72



### รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.4	แสดง contour plot ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์กับตัวแปรอิสระต่าง ๆ ของ ขั้นตอนที่ 1 ที่เงื่อนไข PFAD มีอัตราการไหล เท่ากับ $25 \text{ L.h}^{-1}$ (ข) ความยาวท่ออัลตราโซนิกกับปริมาณกรดซัลฟิวริก (ค) ปริมาณเมทานอลปริมาณกรดซัลฟิวริก	75
5.5	ความสัมพันธ์ของปริมาณเมทานอลที่มีผลต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์ของขั้นตอนที่ 1	76
5.6	แสดง contour plot ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์กับตัวแปรอิสระต่างๆ ของ ขั้นตอนที่ 2 ที่เงื่อนไข PFAD มีอัตราการไหล เท่ากับ $25 \text{ L.h}^{-1}$ (ก) ความยาวท่ออัลตราโซนิกกับปริมาณเมทานอล (ข) ความยาวท่ออัลตราโซนิกกับปริมาณกรดซัลฟิวริก (ค) ปริมาณเมทานอลกับปริมาณกรดซัลฟิวริก	79
5.7	ความสัมพันธ์ของปริมาณเมทานอลที่มีผลต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์ของขั้นตอนที่ 2	80
5.8	แสดง contour plot ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ของปริมาณโพแทสเซียม- ไฮดรอกไซด์กับปริมาณเมทานอล ของขั้นตอนที่ 2	82
5.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์กับเวลาทำปฏิกิริยา ของการผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตรา โซนิก แบบ 3 ขั้นตอน	85
5.10	วัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD แบบต่อเนื่อง ด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก แบบ 3 ขั้นตอน (ก) PFAD ที่อุณหภูมิ $30^{\circ}\text{C}$ (ข) PFAD ที่อุณหภูมิ $43^{\circ}\text{C}$ (ค) น้ำมันลดกรดไขมันอิสระจากขั้นตอนที่ 1 (ง) น้ำมันลดกรดไขมันอิสระจากขั้นตอนที่ 2 (จ) เมทิลเอสเทอร์ดิบจากขั้นตอนที่ 3 (ฉ) เมทิลเอสเทอร์บริสุทธิ์จาก PFAD	87
5.11	แผนภาพสมดุลปริมาตร (vol.%) ของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก แบบ 3 ขั้นตอน	88

## สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

คำย่อ/ตัวย่อ	ชื่อเต็มภาษาอังกฤษ	ชื่อเต็มภาษาไทย
atm	atmospheric pressure	ความดันบรรยากาศ
A	surface area	พื้นที่ผิว
AED	acoustic energy density	ความหนาแน่นของพลังงาน
AOCS	The American Oil Chemists' Society Official	องค์กรวิชาชีพด้านเคมีเกี่ยวกับ ไขมันและน้ำมัน
AV	acid value	ค่าความเป็นกรด
ASTM	American Society for Testing and Materials	สมาคมการทดสอบและวัสดุ อเมริกา
Ba(OH) <sub>2</sub>	barium hydroxide	-
Ba(OH) <sub>2</sub> ·8H <sub>2</sub> O	barium hydroxide octahydrate	-
CCD	central composite design	-
CDCl <sub>3</sub>	deuterated chloroform	-
CO	carbon monoxide	แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์
CO <sub>2</sub>	carbon dioxide	แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
CPKO	crude palm kernel oil	น้ำมันเมล็ดในปาล์มดิบ
CPO	crude palm oil	น้ำมันปาล์มดิบ
CSTR	continuous stirred tank reactor	เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนผสม แบบต่อเนื่อง
EN	European standards	มาตรฐานยุโรป
F	frequency	ความถี่
FAME	fatty acid methyl ester	เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน
FFA	free fatty acid	กรดไขมันอิสระ
FID	free induction decay	-
FT-NMR	fourier transform nuclear magnetic resonance	-
g.L <sup>-1</sup>	grams per liter	กรัมต่อลิตร
G	gas	แก๊ส
GC	gas chromatography	-
h	hour	ชั่วโมง
hp	horsepower	แรงม้า
HPLC	high performance liquid chromatography	-
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	sulfuric acid	กรดซัลฟิวริก

### สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

HT	heater	ฮีตเตอร์
IEA	International Energy Agency	สำนักงานพลังงานสากล
$k$	number of variable	จำนวนตัวแปรอิสระ
kg	kilograms	กิโลกรัม
kHz	kilohertz	กิโลเฮิร์ตซ์
ktoe	kilotons of oil equivalent	พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ
kW	kilowatt	กิโลวัตต์
K	potassium hydroxide	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์
KOCH <sub>3</sub>	potassium methoxide	โพแทสเซียมเมทรอกไซด์
KOH	potassium hydroxide	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์
$L$	length of US reactor	ความยาวท่ออัลตราโซนิก
L	liter	ลิตร
L	liquid	ของเหลว
$L.h^{-1}$	liter per hour	ลิตรต่อชั่วโมง
m	meter	เมตร
min	minute	นาที
$mgKOH.g^{-1}$	milligrams potassium hydroxide per grams	มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม
mL	milliliter	มิลลิลิตร
$mL.min^{-1}$	milliliter per minute	มิลลิลิตรต่อนาที
mm	millimeter	มิลลิเมตร
$M$	methanol	เมทานอล
$ME$	methyl ester	เมทิลเอสเทอร์
MCPO	mixed crude palm oil	น้ำมันปาล์มดิบหีบรวม
MeOH	methanol	เมทานอล
$ML.day^{-1}$	million liter per day	ล้านลิตรต่อวัน
MPa	mega Pascal	เมกะปาสคาล
NMR	nuclear magnetic resonance spectroscopy	นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์
NO <sub>x</sub>	nitrogen oxide	ไนโตรเจนออกไซด์
$N_{Re}$	Reynolds number	ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์
O <sub>2</sub>	oxygen	แก๊สออกซิเจน
P	pump	ปั๊ม
P	ultrasonic power	กำลังของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก

### สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

PF	plug flow	การไหลผ่านท่อกลาง
PFAD	palm fatty acid distillate	ส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์ม
PSI	pound per square inch	ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
Q	flow rate	อัตราการไหลรวมของสารทำ ปฏิกิริยา
R <sup>2</sup>	coefficient of multiple determination	สัมประสิทธิ์การตัดสินใจเชิงซ้อน
SO <sub>2</sub>	sulfur dioxide	แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์
r <sub>f</sub>	radiofrequency	-
rpm	revolutions per minute	รอบต่อนาที
RBDOL	refined bleached deodorized olein	น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์
RBDPO	refined bleached deodorized palm oil	น้ำมันปาล์มกึ่งบริสุทธิ์
RBDPS	refined bleached deodorized palm stearin	ไขมันปาล์มกึ่งบริสุทธิ์
RPO	refined palm oil	น้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์
RSM	response surface methodology	วิธีพื้นผิวตอบสนอง
s	second	วินาที
S	sulfuric	กรดซัลฟิวริก
S	sampling	เก็บตัวอย่าง
S	solid	ของแข็ง
SM	static mixer	ท่อผสมแบบสถิต
SM/US	static mixer couple with ultrasound	การใช้ท่อผสมแบบสถิตร่วมกับ คลื่นเสียงอัลตราโซนิก
t	time	เวลา
T	tank	ถัง
TC	temperature control	ตัวควบคุมอุณหภูมิ
THB	Thai bath	บาท
TLC/FID	thin layer chromatography with flame ionization detection	-
TMS; (CH <sub>3</sub> ) <sub>4</sub> Si	tetramethylsilane	-
UG	ultrasonic generator	แหล่งกำเนิดคลื่นเสียง
UI	ultrasonic intensity	ความเข้มของคลื่นเสียงอัลตราโซ- นิก
US	ultrasonic	คลื่นเสียงอัลตราโซนิก

### สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

USDA	United States Department of Agriculture	กระทรวงเกษตรสหรัฐอเมริกา
v	valve	วาล์ว
vol.%	percentage by volume	ร้อยละโดยปริมาตร
V	volume	ปริมาตรของต่าง
wt.%	percentage by weight	ร้อยละโดยน้ำหนัก
W	watt	วัตต์
WCO	waste cooking oil	น้ำมันใช้แล้ว
X	variable	ตัวแปรอิสระ
Y	response function	ฟังก์ชันตอบสนอง
°	degree	องศา
°C	degree Celsius	องศาเซลเซียส
$\beta$	coefficient	สัมประสิทธิ์

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 บทนำต้นเรื่อง

พลังงานและน้ำมันเชื้อเพลิงเป็นตัวแปรที่สำคัญในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจและการดำเนินชีวิตของในแต่ละประเทศทั่วโลก โดยหากเกิดปัญหาวิกฤติทางด้านพลังงานและราคาของน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีความผันผวนอยู่ตลอดเวลา อาจส่งผลกระทบต่อทั้งทางด้านเศรษฐกิจ สังคม และความมั่นคงของประเทศได้ สำหรับประเทศไทยเป็นอีกประเทศหนึ่งที่มีความเสี่ยงด้านพลังงาน เนื่องจากมีข้อจำกัดในการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิง และมีแหล่งพลังงานไม่เพียงพอต่อความต้องการที่เพิ่มสูงขึ้น อีกทั้งยังต้องนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2017) ซึ่งในปัจจุบันพลังงานผลิตได้จากเชื้อเพลิงฟอสซิล ทำให้เกิดปัญหาด้านมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมและส่งผลกระทบต่อสุขภาพของประชากร และเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน เนื่องจากการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (IEA, 2010)

ด้วยปัญหาดังกล่าวข้างต้นจึงทำให้ทุกประเทศทั่วโลกตระหนักถึงการค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับพลังงานทดแทน สำหรับประเทศไทยมีผลผลิตทางการเกษตรหลายชนิดที่สามารถนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตพลังงานทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลได้ เช่น มันสำปะหลัง และอ้อยในการผลิตเอทานอล ปาล์มน้ำมัน และสบู่ดำในการผลิตไบโอดีเซล เป็นต้น (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2008) ซึ่งไบโอดีเซลเป็นทางเลือกหนึ่งผลิตจากทรัพยากรหมุนเวียนที่มีอยู่ภายในประเทศ เช่น น้ำมันพืช และไขมันสัตว์ (Lam and Lee, 2011) และคุณสมบัติการเผาไหม้ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล และสามารถใช้ทดแทนกันได้โดยไม่ต้องปรับแต่งเครื่องยนต์ อีกทั้งยังสามารถลดการปล่อยแก๊สที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Ping and Yusof, 2009; Ciolkosz, 2015; Shahir *et al.*, 2015)

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีศักยภาพในการผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากมีพืชน้ำมันจำนวนมาก เช่น ปาล์มน้ำมัน มะพร้าว ถั่วเหลือง ถั่วลิสง และงา โดยเฉพาะปาล์มน้ำมัน และในปี ค.ศ. 2016 สามารถผลิตน้ำมันปาล์มได้เท่ากับ 2.0 million tons เป็นอันดับสามของประเทศในภูมิภาคอาเซียน รองจากประเทศอินโดนีเซีย และประเทศมาเลเซีย ซึ่งสามารถผลิตได้ เท่ากับ 34.0 และ 18.7 million tons ตามลำดับ (USDA, 2017) ในปี ค.ศ. 2017 ประเทศไทยมีโรงงานผลิตไบโอดีเซลจำนวน 13 แห่ง และมีกำลังการผลิตไบโอดีเซลรวม เท่ากับ 6,618,600 L.day<sup>-1</sup> ซึ่งส่วนใหญ่ใช้น้ำมันปาล์มดิบ (crude palm oil, CPO) และไขปาล์มกึ่งบริสุทธิ์ (refined bleached deodorized palm stearin, RBDPS) เป็นวัตถุดิบในการผลิต (กรมธุรกิจพลังงาน, 2017) แต่ น้ำมัน CPO เป็นน้ำมันที่ต้องนำไปผ่านกระบวนการกลั่นเพื่อให้ได้น้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์ (refined palm oil, RPO) ซึ่งเป็นน้ำมันสำหรับการบริโภค โดยในปี ค.ศ. 2016 มีความต้องการใช้น้ำมันปาล์มเพื่อบริโภค เท่ากับ 990,000 tons (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2016) ซึ่งถ้านำน้ำมัน CPO มาเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลมากเกินไปก็ทำให้ตลาดน้ำมันปาล์มเกิดความขาดแคลน ดังเช่นในปี ค.ศ. 2010-2011 จนต้องนำเข้าน้ำมันปาล์มจากประเทศมาเลเซีย (บวร, 2011) จึงได้มีการศึกษาวิจัยหาพืชทดแทนที่ไม่

เป็นปัจจัยสำหรับการนำมาผลิตเป็นอาหาร เช่น น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันละหุ่ง แต่ก็ยังมีปริมาณไม่เพียงพอ ประกอบกับ ในปี ค.ศ. 2017 กรมธุรกิจพลังงานได้มีการปรับเพิ่มการใช้สัดส่วนผสมของไบโอดีเซล B100 ในน้ำมันดีเซลหมุนเร็วจาก B5 เป็น B7 และมีปริมาณการจำหน่ายน้ำมันดีเซลหมุนเร็ว (B7) เฉลี่ยเท่ากับ  $60.33 \text{ ML.day}^{-1}$  (ข้อมูลถึงเดือนกันยายน 2017, กรมธุรกิจพลังงาน, 2017) และตามแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก ค.ศ. 2015-2036 มีเป้าหมายในการผลิตไบโอดีเซล เท่ากับ  $14 \text{ ML.day}^{-1}$  โดยมีมาตรการเพิ่มปริมาณการใช้ไบโอดีเซลเป็น B10 ในยานยนต์ส่วนตัว และ B20 ในยานยนต์ภาคขนส่ง (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2017) ดังนั้นจำเป็นต้องแสวงหาวัตถุดิบทางเลือกเพื่อให้เพียงพอต่อปริมาณความต้องการ

สำหรับกระบวนการกลั่นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ มีผลพลอยได้ที่มีศักยภาพและสามารถนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลได้ คือ ส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์ม (palm fatty acid distillate, PFAD) (Shuit and Tan, 2014) ซึ่ง PFAD มีปริมาณ เท่ากับ 4.45% ของน้ำมันปาล์มดิบ (Cho *et al.*, 2013) โดยในปี ค.ศ. 2016 ประเทศไทยมีปริมาณ PFAD เท่ากับ 89,000 tons ซึ่งสามารถใช้เป็นวัตถุดิบทางเลือกสำหรับการผลิตไบโอดีเซลได้ เนื่องจากไม่มีประเด็นด้านการนำมาผลิตเป็นอาหาร และ PFAD ใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมผลิตสบู่ อุตสาหกรรมอาหารสัตว์ อุตสาหกรรมผลิตจารบี และการสกัดวิตามินอี เป็นต้น (Top, 2010) แต่ PFAD มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นกรดไขมันอิสระ (free fatty acid, FFA) สูงมากกว่า 80 wt.% ดังนั้น จึงจำเป็นต้องลดปริมาณ FFA ใน PFAD หรือเปลี่ยนโครงสร้างของ FFA ให้เป็นไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันในขั้นตอนที่ 1 แล้วนำไปทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในขั้นตอนที่ 2 (Chongkhong *et al.*, 2007) ซึ่งปัญหาของการนำ PFAD มาเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล คือ ใช้สารเคมีในปริมาณมาก มีปริมาณผลได้ต่ำ ความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลต่ำ ใช้พลังงานและเวลาทำปฏิกิริยาสูง (Desmane *et al.*, 2009; Yujaroen *et al.*, 2009)

ปัญหาสำคัญของการผลิตไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์ คือ ต้นทุนในการผลิตสูง (Canakci and Van Gerpen, 2001) ทำให้งานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นการพัฒนาวิธีการลดต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซล โดยการพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์รูปแบบใหม่โดยการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างน้ำมันและสารเคมีขณะผสมกัน ทำให้มีประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น (Ataya *et al.*, 2008) ซึ่งการผลิตไบโอดีเซลในเชิงพาณิชย์ใช้กระบวนการผสมแบบกะ และแบบต่อเนื่อง (Marchetti *et al.*, 2007) แต่กระบวนการแบบกะมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น น้ำมันและสารเคมีไม่สามารถผสมเข้ากันได้อย่างสมบูรณ์ ใช้สารเคมีปริมาณมาก และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานาน (Stamenković *et al.*, 2007) ซึ่งมีวิธีที่สามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้ เช่น การประยุกต์ใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิก และคลื่นไมโครเวฟ เป็นต้น (Veljković *et al.*, 2012) และมีทีมวิจัยจำนวนมากที่ประยุกต์ใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิกที่มีความถี่ต่ำมาช่วยในการผลิตไบโอดีเซล โดยมีข้อดี คือ เพิ่มการถ่ายโอนมวลระหว่างสารทำปฏิกิริยา ประสิทธิภาพในการผลิตไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น ปริมาณผลได้ของไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น ลดเวลาในการทำปฏิกิริยา และลดต้นทุนในการผลิต (Stavarache *et al.*, 2005; Sungwornpatansakul *et al.*, 2013; Ghanem *et al.*, 2014)

สำหรับวัตถุประสงค์และแนวคิดของงานวิจัยนี้ คือ เพื่อศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบสตีร์ร่วมกับคลื่นเสียงอัล-

ตราไซนิก โดยใช้ความถี่ต่ำ ทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันและปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ศึกษาตัวแปรอิสระที่มีอิทธิพลต่อปริมาณผลได้ และความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซล เช่น ปริมาณเมทานอล ปริมาณกรดซัลฟิวริก ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เวลาในการผลิตไบโอดีเซล และความยาวของท่ออัลตราไซนิก

## 1.2 การตรวจเอกสาร

### 1.2.1 สถานการณ์ปาล์มน้ำมัน

ในปี ค.ศ. 1434 มีรายงานการพบปาล์มน้ำมันครั้งแรกในทวีปแอฟริกา และได้มีการตั้งชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Elaeis guineensis* ใน ค.ศ. 1763 โดย Nikolaus Joseph von Jacquin จากนั้นในปี ค.ศ. 1848 มีชาวโปรตุเกสนำปาล์มน้ำมันเข้ามาปลูกในทวีปเอเชียในสวนพฤกษศาสตร์ที่เมืองโบกอร์ ประเทศอินโดนีเซีย และแพร่กระจายพันธุ์ไปยังเกาะสุมาตรา จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1929 เริ่มมีการปลูกเพื่อการค้าที่ประเทศมาเลเซียหลังจากได้รับความสนใจ และมีการค้นคว้าวิจัยอย่างจริงจังที่กรมวิชาการเกษตรในรัฐ Selangor และถูกนำเข้ามาในประเทศไทยตั้งแต่ปี ค.ศ. 1929 ที่สถานีทดลองยางคองหงส์ จังหวัดสงขลา และสถานีกสิกรรมพลู จังหวัดจันทบุรี โดยปลูกเป็นปาล์มประดับ จนในปี ค.ศ. 1968 มีการส่งเสริมให้ปลูกเป็นพื้นที่ขนาดใหญ่ในจังหวัดสตูล โดยนิคมสร้างตนเองพัฒนาภาคใต้ในเนื้อที่ประมาณ 20,000 rais และหลังจากนั้นก็มีการขยายพื้นที่ปลูกเพิ่มขึ้นจนถึงปัจจุบัน (อมรรัตน์ และคณะ, 2001)

ปาล์มน้ำมันมีปริมาณมากในประเทศแถบภูมิภาคอาเซียน ได้แก่ อินโดนีเซีย มาเลเซีย ไทย และฟิลิปปินส์ จากตารางที่ 1.1 ในปี ค.ศ. 2016 ประเทศแถบภูมิภาคอาเซียน สามารถผลิตน้ำมันปาล์มดิบได้ เท่ากับ 54.95 million tons โดยเพิ่มขึ้นจากปี ค.ศ. 2015 ประมาณ 6.52% ซึ่งแต่ละประเทศสามารถผลิตน้ำมันปาล์มดิบได้ เท่ากับ 34.00, 18.86, 2.00 และ 0.09 million tons ตามลำดับ (USDA, 2017)

จากตารางที่ 1.2 ในปี ค.ศ. 2016 ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมัน เท่ากับ 5,185,726 rais โดยเพิ่มขึ้นจากปี ค.ศ. 2015 คิดเป็น 3.45% และสามารถผลิตน้ำมันปาล์มดิบ เท่ากับ 2.41 tons.rais<sup>-1</sup> และพื้นที่เก็บเกี่ยวปาล์มน้ำมันมีปริมาณเพิ่มขึ้นจากปี ค.ศ. 2015 เท่ากับ 6.2% เนื่องจากปริมาณปาล์มน้ำมันที่ปลูกใน ปี ค.ศ. 2013 เริ่มให้ผลผลิตเพิ่มขึ้นในทุกภาค แต่สำหรับผลผลิตต่อไร่ และภาพรวมผลผลิตทั้งหมดลดลง เพราะพื้นที่เพาะปลูกในพื้นที่ภาคใต้ซึ่งเป็นแหล่งผลิตใหญ่มีผลกระทบเนื่องจากปัญหาภัยแล้ง ในปี ค.ศ. 2014-2015 ทำให้มีปริมาณน้ำฝนน้อยกว่าปกติ ส่งผลให้ปาล์มน้ำมันขาดน้ำ ทะลายปาล์มแห้งเกิดความเสียหาย และสำหรับในพื้นที่ภาคอื่น ๆ ผลผลิตที่เก็บเกี่ยวในช่วงหน้าแล้ง ทะลายปาล์มจะมีขนาดเล็กและน้ำหนักน้อย ดังแสดงในตารางที่ 1.3 (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2016)

สำหรับปริมาณความต้องการใช้น้ำมันปาล์ม จากตารางที่ 1.2 แบ่งออกเป็น ความต้องการเพื่อการบริโภค และความต้องการเชิงการค้า โดยในปี ค.ศ. 2016 มีความต้องการใช้น้ำมันปาล์มดิบเพื่อการบริโภคลดลงจากปี ค.ศ. 2015 เท่ากับ 5.71% และมีความต้องการใช้น้ำมันปาล์มดิบเพื่อผลิตไบโอดีเซลลดลงจากปี ค.ศ. 2015 เท่ากับ 1.20% เนื่องจากกระทรวงพลังงาน



ประกาศปรับสัดส่วนผสมของไบโอดีเซลในน้ำมันดีเซล 2 ครั้ง คือ ครั้งแรกปรับลดจาก 7% เหลือเท่ากับ 5% และครั้งที่ 2 ปรับลดจาก 5% เหลือเหลือ 3% ทั้งนี้เพื่อช่วยรักษาเสถียรภาพราคา และป้องกันการขาดแคลนน้ำมันปาล์มสำหรับการบริโภค (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2016)

ตารางที่ 1.1 ปริมาณการผลิตน้ำมันปาล์มดิบของประเทศในแถบภูมิภาคอาเซียน (USDA, 2017)

Country	Production (tons)				
	2012	2013	2014	2015	2016
Indonesia	28,500,000	30,500,000	33,000,000	32,000,000	34,000,000
Malaysia	19,321,000	20,161,000	19,879,000	17,700,000	18,860,000
Thailand	2,135,000	2,000,000	2,068,000	1,804,000	2,000,000
Philippines	106,000	95,000	87,000	85,000	95,000
Total	50,062,000	52,756,000	55,034,000	51,589,000	54,955,000

ตารางที่ 1.2 การผลิตและการค่าน้ำมันปาล์มของประเทศไทย (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2016)

Palm oil	Quantity		
	2014	2015	2016
Production			
Perennial space (rais)	4,621,253	5,012,799	5,185,726
Yielded space (rais)	4,023,819	4,297,385	4,563,895
Product (tons)	12,472,505	12,046,512	10,996,663
Product (tons.rais <sup>-1</sup> )	3.10	2.80	2.41
Commercial			
Food consumption (tons)	940,000	1,050,000	990,000
Biodiesel production (tons)	840,000	830,000	820,000
Import (tons)	127,738	158,008	116,037
Export (tons)	355,331	131,189	117,538

### 1.2.2 สถานการณ์พลังงานทดแทนและไบโอดีเซลของประเทศไทย

จากตารางที่ 1.3 พบว่า ปริมาณการใช้พลังงานทดแทนของประเทศไทยเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยในปี ค.ศ. 2016 มีการใช้พลังงานทดแทนเพิ่มขึ้นจากปี ค.ศ. 2015 เท่ากับ 9.66% และคาดว่าในปี ค.ศ. 2017 จะมีปริมาณการใช้พลังงานทดแทนเพิ่มขึ้นอีก 7.19% ซึ่งกระทรวงพลังงานสนับสนุนให้มีการใช้พลังงานทดแทนในทุกภาคส่วน เพื่อลดปริมาณการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล และช่วยลดการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2017) โดยประเทศไทยมีความสามารถผลิตพลังงานทดแทนได้ เช่น การผลิตพลังงานไฟฟ้า การผลิตพลังงานความร้อน และการใช้เชื้อเพลิงชีวภาพ

ในปี ค.ศ. 2017 ประเทศไทยมีบริษัทผู้ผลิตไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันโดยได้รับอนุญาตจากกรมธุรกิจพลังงานให้ผลิตเพื่อจำหน่าย เท่ากับ 13 บริษัท ดังแสดงในตารางที่ 1.4 โดยมีกำลังการผลิตของไบโอดีเซล เท่ากับ  $6,618,600 \text{ L.day}^{-1}$  วัตถุดิบที่นำมาผลิตไบโอดีเซลส่วนใหญ่ คือ น้ำมันปาล์มดิบ (crude palm oil, CPO) และไขปาล์มกึ่งบริสุทธิ์ (refined bleached deodorized palm stearin, RBDPS) (กรมธุรกิจพลังงาน, 2017) จากข้อมูลดังกล่าวเมื่อเปรียบเทียบกับเป้าหมายของสำนักนโยบายและแผนพลังงาน คือ  $14,000,000 \text{ L.day}^{-1}$  ในปี ค.ศ. 2036 จึงช่วยสนับสนุนการค้นคว้าวิจัยด้านวัตถุดิบทางเลือก นอกจากการเพิ่มผลผลิตน้ำมันปาล์ม

ตารางที่ 1.3 ปริมาณการใช้พลังงานทดแทนของประเทศไทย (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2017)

Alternative energy	Quantity (ktoe)			
	2014	2015	2016	2017 <sup>(1)</sup>
Electricity	1,467	1,556	2,122	2,861.41
Heat	5,775	6,579	7,182	7,115.10
Biofuels	1,783	1,942	1,747	1,869.51
Total	9,025	10,077	11,051	11,846

หมายเหตุ: <sup>(1)</sup> เป้าหมายสำหรับในปี ค.ศ. 2017

ตารางที่ 1.4 รายชื่อผู้ผลิตไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (กรมธุรกิจพลังงาน, 2017)

List	Company	Raw material	Capacity (L.day <sup>-1</sup> )
1	Bio Energy Plus 2 Co., Ltd.	CPO, RBDPO, RBDPS	200,000
2	Bio Synergy Co., Ltd.	CPO, RBDPO, vegetable oil	30,000
3	Bangchak Biofuel Co., Ltd.	CPO, RBDPO, RBDPS	810,000
4	Global Green Chemicals PCL.	CPO	1,028,600
5	Bangchak Petroleum PCL.	CPO, RBDPO, vegetable oil	50,000
6	Energy Absolute PCL.	CPO, RBDPS	800,000
7	Pathum Vegetable Oil Co., Ltd.	CPO, RBDPO, RBDPS	1,400,000
8	GI Green Power Co., Ltd.	RBDPS	200,000
9	A I Energy PCL.	RBDPO	500,000
10	Verasuwan Co., Ltd.	RBDPO, RBDPS	200,000
11	New Biodiesel Co., Ltd.	CPO	1,000,000
12	Trang palm oil Co., Ltd.	CPO	100,000
13	Absolute Power P Co., Ltd.	RBDPO, RBDPS	300,000
Total			6,618,600

หมายเหตุ: น้ำมันปาล์มดิบ (crude palm oil, CPO) น้ำมันปาล์มกึ่งบริสุทธิ์ (refined bleached deodorized palm oil, RBDPO) และ ไชปาล์มบริสุทธิ์ (refined bleached deodorized palm stearin, RBDPS)

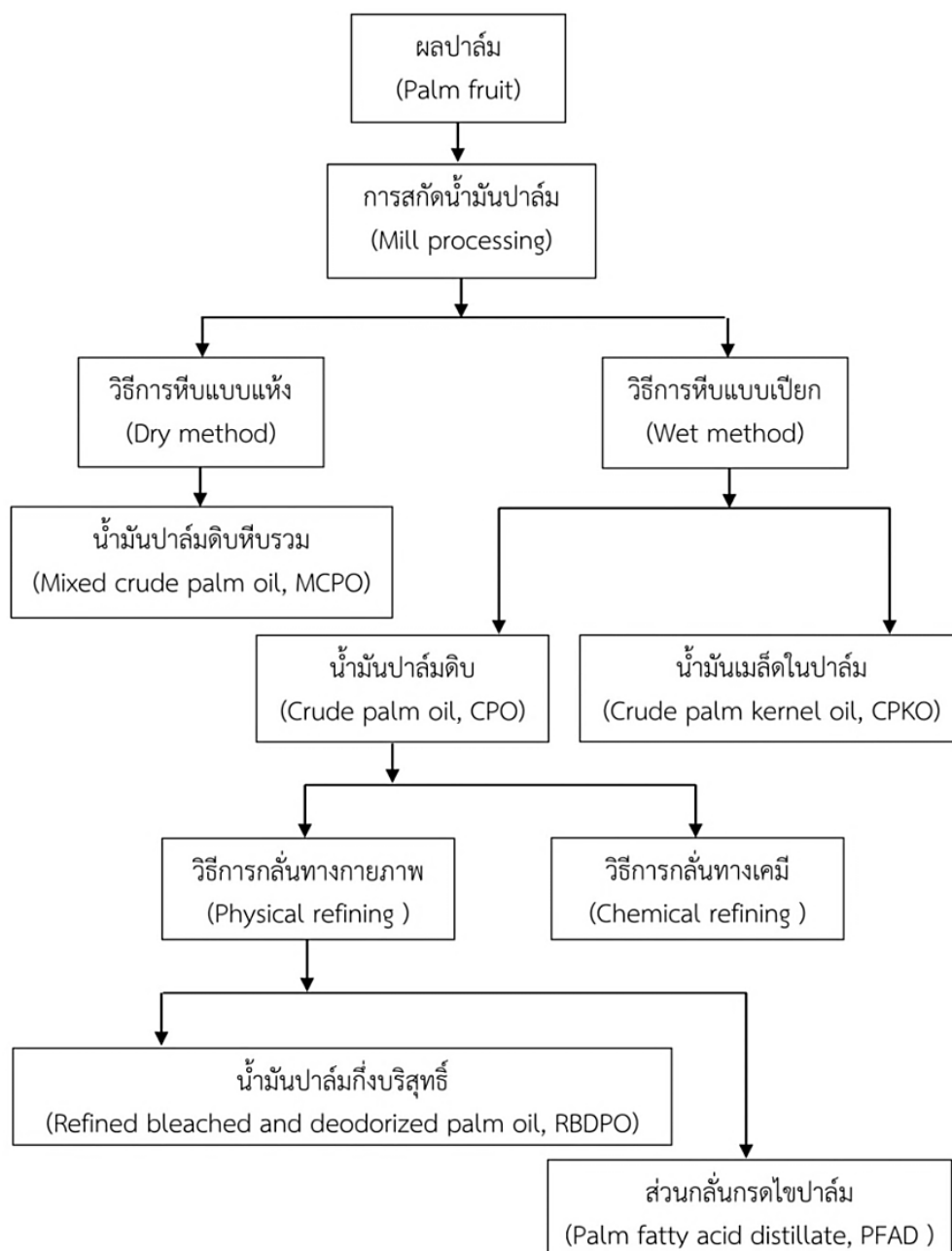
### 1.2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับการนำส่วนกลั่นกรดไขมันมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลเพื่อทดแทนน้ำมันดีเซล การประยุกต์ใช้ท่อผสมแบบสถิต และคลื่นเสียงอัลตราโซนิคช่วยในการผลิตไบโอดีเซลมีงานวิจัยทั้งในประเทศและต่างประเทศจำนวนมาก ทำให้มีข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับงานวิจัยนี้ เช่น ส่วนกลั่นกรดไขมัน การผลิตไบโอดีเซลแบบกะ การผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง การผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมัน การผลิตไบโอดีเซลด้วยท่อผสมแบบสถิต การผลิตไบโอดีเซลด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิค และปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไบโอดีเซล

#### 1.2.3.1 ส่วนกลั่นกรดไขมัน

สำหรับกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ แบบมาตรฐาน (หีบน้ำมันแยกหรือวิธีการหีบแบบเปียก) และแบบหีบรวม (วิธีการหีบแบบแห้ง) ซึ่งการหีบน้ำมันแบบมาตรฐานมีกำลังการผลิต เท่ากับ 30-80 tons.h<sup>-1</sup> และได้น้ำมันที่มีคุณภาพสูงกว่าการหีบรวม (สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร, 2015) จากรูปที่ 1.1 เริ่มจากการนำผลปาล์มทั้งทะลายเข้ากระบวนการการอบด้วยไอน้ำ และแยกผลปาล์มออกจากทะลาย จากนั้นนำผลปาล์มเข้าเครื่องหีบ

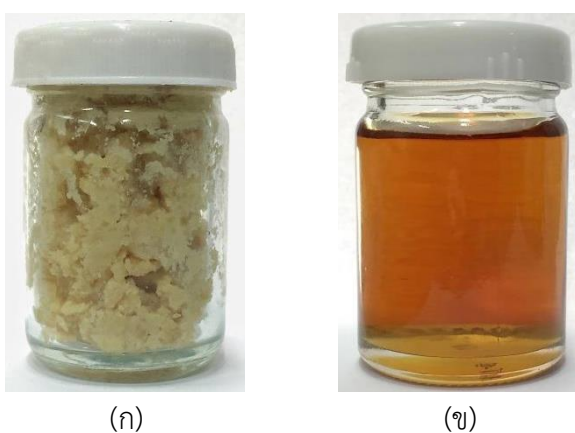
แบบเกลียวอัดคู่ จะได้น้ำมันปาล์มดิบ (crude palm oil, CPO) และน้ำมันเมล็ดในปาล์มดิบ (crude palm kernel oil, CPKO) จากนั้นนำน้ำมัน CPO เข้ากระบวนการกลั่นบริสุทธิ์น้ำมันปาล์ม ซึ่งกระบวนการกลั่นแบ่งออกเป็น 2 วิธีการ คือ วิธีการกลั่นทางกายภาพ และวิธีการกลั่นทางเคมี โดยวิธีการกลั่นทางกายภาพ เริ่มจากการกำจัดฟอสโฟลิพิด (phospholipids) ออกจากน้ำมัน CPO ด้วยน้ำ แล้วทำปฏิกิริยากับกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 80-85% ที่อุณหภูมิ เท่ากับ 90-100°C เป็นเวลา เท่ากับ 15-30 min และเติมสารฟอกสีในสภาพสุญญากาศ ที่อุณหภูมิ เท่ากับ 90-100°C เป็นเวลา เท่ากับ 30-45 min จากนั้นกรองน้ำมันและกลั่นโดยใช้ไอน้ำที่มีอุณหภูมิ เท่ากับ 240-270°C เป็นเวลา เท่ากับ 60-120 min จะได้น้ำมันน้ำมันปาล์มกึ่งบริสุทธิ์ (refined bleached deodorized palm oil, RBDPO) โดยกระบวนการนี้จะได้กรดไขมันอิสระออกมาในรูปของส่วนกลั่นกรดไขมัน (palm fatty acid distillate, PFAD) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ (by-product) จากนั้นนำ RBDPO แยกไข เรียกว่า ไขปาล์มบริสุทธิ์ (refined bleached deodorized stearin, RBDPS) ออกเพื่อให้ได้น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ (refined bleached deodorized olein, RBDOL) (สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร, 2015)



รูปที่ 1.1 กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม (สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร, 2015)

PFAD มีปริมาณประมาณ 4.45 wt.% ของน้ำมันปาล์มดิบ (Cho *et al.*, 2013) จากตารางที่ 1.5 ในปี ค.ศ. 2016 ประเทศในแถบภูมิภาคอาเซียนสามารถผลิตน้ำมันปาล์มดิบได้ทั้งหมด เท่ากับ 54.95 million tons ดังนั้นจะมีปริมาณของ PFAD ประมาณ 2.44 million tons และประเทศไทยสามารถผลิตน้ำมันปาล์มดิบได้ เท่ากับ 2.00 million tons และมีปริมาณ PFAD ประมาณ 89,000 tons

จากรูปที่ 1.2 PFAD มีลักษณะกึ่งของแข็งสีน้ำตาลใสที่อุณหภูมิห้อง (30°C) และละลายเป็นสีน้ำตาลเมื่อได้รับความร้อน (43°C) (Shuit and Tan, 2014; ศิริกานต์, 2015) ประกอบด้วยกรดไขมันอิสระ (free fatty acid, FFA) มากกว่า 90 wt.% โดยมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็น palmitic acid และ oleic acid กลิเซอไรด์ และเอสเทอร์ ดังแสดงในตารางที่ 1.6 และ ตารางที่ 1.7 (Ping and Yusof, 2009; Metre and Nath, 2015; ณัฐพล, 2017) PFAD ใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมผลิตสบู่ อุตสาหกรรมอาหารสัตว์ อุตสาหกรรมผลิตจารบี และการสกัดวิตามินอี เป็นต้น (Ping and Yusof, 2009; Top, 2010) และยังเป็นวัตถุดิบต้นหุนต่ำที่มีศักยภาพในการนำมาผลิตไบโอดีเซล และไม่มีประเด็นด้านการนำมาเป็นอาหาร (Lee and Ofori-Boateng, 2013)



รูปที่ 1.2 ลักษณะของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์ม (PFAD)  
(ก) PFAD ที่อุณหภูมิ 30°C และ (ข) PFAD ที่อุณหภูมิ 43°C

ตารางที่ 1.5 การประเมินปริมาณของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มของประเทศในแถบภูมิภาคอาเซียน<sup>(1)</sup>

Country	Production (tons)				
	2012	2013	2014	2015	2016
Indonesia	1,268,250	1,357,250	1,468,500	1,424,000	1,513,000
Malaysia	859,785	897,165	884,616	787,650	834,375
Thailand	95,008	89,000	92,026	80,278	89,000
Philippines	4,717	4,228	3,872	3,783	4,228
Total	2,227,760	2,347,643	2,449,014	2,295,711	2,440,603

หมายเหตุ: <sup>(1)</sup> ปริมาณประมาณ 4.45 wt.% ของน้ำมันปาล์มดิบ (Cho *et al.*, 2013)

ตารางที่ 1.6 คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์ม (ณัฐพล, 2017)

Property	Content
Molecular weight ( $\text{g.mol}^{-1}$ )	254.21
Viscosity at 60°C (cSt)	12.68
Density at 60°C ( $\text{g.cm}^{-1}$ )	0.861
Free fatty acid (wt.%)	90.609
Triglyceride (wt.%)	1.312
Diglyceride (wt.%)	2.332
Monoglyceride (wt.%)	4.792
Ester (wt.%)	0.955
Acid value ( $\text{mg.KOH.g}^{-1}$ )	265

ตารางที่ 1.7 องค์ประกอบของกรดไขมันของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์ม (ณัฐพล, 2017)

FFA	Trait	Amount (wt.%)
Palmitic acid	C16:0	46.54
Oleic acid	C18:1	36.89
Linoleic acid	C18:2	8.60
Stearic acid	C18:0	4.26
Myristic acid	C14:0	1.12
Gamma linoleic acid	C18:3	0.28
Arachidic acid	C20:0	0.28
Lauric acid	C12:0	0.22
Eicosenoic acid	C20:1	0.17
Pamitoleic acid	C16:1	0.14
Margaric acid	C17:0	0.11
Pentadecylic acid	C15:0	0.05
Behenic acid	C22:0	0.05
Lignoceric acid	C24:0	0.03
Erucic acid	C22:1	0.01
Capric acid	C10:0	0.01

### 1.2.3.2 การผลิตไบโอดีเซลแบบกะ

การผลิตไบโอดีเซลแบบกะ (batch process) เป็นการนำสารตั้งต้นทั้งหมดป้อนเข้าไปในถังปฏิกรณ์ แล้วจึงเริ่มทำปฏิกิริยา เมื่อเสร็จสิ้นปฏิกิริยาตามเวลาที่กำหนดจึงนำผลิตภัณฑ์ออกจากถังปฏิกรณ์ โดยทั่วไปจะใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนโดยมีใบกวนสำหรับกวนผสม เพื่อให้คุณสมบัติของการทำปฏิกิริยาเท่ากันทั่วทั้งถังปฏิกรณ์ และสารทำปฏิกิริยาผสมเข้ากันได้ดี

(ชาวลิต, 2008) ซึ่งได้มีทีมนักวิจัยศึกษากระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบกะ เช่น ทีมนักวิจัยของ Jain and Sharma. (2010) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำด้วยกระบวนการแบบสองขั้นตอน มีเงื่อนไขที่เหมาะสม คือ ขั้นตอนแรกใช้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล:น้ำมัน เท่ากับ 7:1 ปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 1 wt.% ความเร็วในการกวนผสม เท่ากับ 400 rpm และอุณหภูมิ เท่ากับ 65°C พบว่า ได้ปริมาณผลได้ของไบโอดีเซล เท่ากับ 21.2 wt.% และขั้นตอนที่ 2 ใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล:น้ำมัน เท่ากับ 7:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1 wt.% และอุณหภูมิ เท่ากับ 50°C พบว่า สามารถผลิตไบโอดีเซลมีปริมาณผลได้ เท่ากับ 90.1 wt.% และทีมนักวิจัยของ Kawentar and Budiman. (2013) ได้ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้วโดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ พบว่า เงื่อนไขที่ดีที่สุดที่สามารถผลิตเมทิลเอสเทอร์ได้ความบริสุทธิ์ เท่ากับ 92.76 wt.% คือ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล:น้ำมัน เท่ากับ 6.18:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1 wt.% และอุณหภูมิ เท่ากับ 66.5°C

### 1.2.3.3 การผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง

การผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง (continuous process) เป็นการนำสารตั้งต้นป้อนเข้าที่ทางเข้าของเครื่องปฏิกรณ์อย่างต่อเนื่อง และผลิตผลิตภัณฑ์ที่ได้ไหลออกมาที่ทางออก (He and Gerpen, 2015) ซึ่งมีทีมนักวิจัยที่ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการแบบต่อเนื่อง เช่น ทีมนักวิจัยของ Somnuk *et al.* (2014) ศึกษาการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลแบบสองขั้นตอนจากน้ำมันปาล์มดิบชนิดกรดไขมันอิสระสูงด้วยท่อผสมแบบสตีตหมุนวน ในขั้นตอนแรกใช้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้เงื่อนไขปริมาณเมทานอล เท่ากับ 19.8 vol.% ปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 2.0 vol.% เวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 50 min อุณหภูมิ เท่ากับ 60°C และอัตราการไหลของน้ำมัน เท่ากับ 40 L.h<sup>-1</sup> ผ่านท่อผสมแบบสตีตความยาว เท่ากับ 5 m พบว่า สามารถลดค่าความเป็นกรดในน้ำมันจาก 30 mgKOH.g<sup>-1</sup> เหลือเท่ากับ 2 mgKOH.g<sup>-1</sup> และสำหรับขั้นตอนที่สองใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้เงื่อนไขปริมาณเมทานอล เท่ากับ 23.81 vol.% ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 11.8 wt.% เวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 60 min อุณหภูมิ เท่ากับ 60°C และอัตราการไหลของน้ำมัน เท่ากับ 40 L.h<sup>-1</sup> ผ่านท่อผสมแบบสตีตความยาว เท่ากับ 5 m พบว่า สามารถผลิตไบโอดีเซลที่มีความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์มากกว่า 96.5 wt.% ทีมนักวิจัยของ Gui *et al.* (2015) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันเมล็ดฝ้าย โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์ที่บรรจุด้วยโซเดียมซิลิเคท พบว่า ได้ปริมาณผลได้ของไบโอดีเซล เท่ากับ 98.8 wt.% โดยใช้เงื่อนไขอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล:น้ำมัน เท่ากับ 12:1 ปริมาณโซเดียมซิลิเคท เท่ากับ 2 wt.% เวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 180 min อุณหภูมิ เท่ากับ 65°C และอัตราการไหลน้ำมัน เท่ากับ 60 mL.h<sup>-1</sup>

### 1.2.3.4 การผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์ม

ทีมนักวิจัยของ Chongkhong *et al.* (2007) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนผสมแบบต่อเนื่อง (continuous stirred tank reactor, CSTR) โดยมีเงื่อนไขที่เหมาะสม คือ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล:PFAD เท่ากับ 8:1 ปริมาณกรดซัลฟิว-



ริก เท่ากับ 1.834 wt.% เวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 60 min และอุณหภูมิ เท่ากับ 70°C พบว่า กรดไขมันอิสระลดลงจาก 93 wt.% เหลือน้อยกว่า 2 wt.% ทีมวิจัยของ Chongkhong *et al.* (2009) ได้ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจาก PFAD โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ CSTR ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการแบบต่อเนื่องกับกระบวนการแบบกะภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน พบว่า การผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการแบบต่อเนื่องได้ความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลสูงกว่ากระบวนการแบบกะ ซึ่งเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน คือ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล:PFAD :กรดซัลฟิวริก เท่ากับ 8.8:1:0.05 เวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 60 min และอุณหภูมิ เท่ากับ 75°C พบว่า ปริมาณกรดไขมันอิสระลดลงจาก 93 wt.% เหลือเท่ากับ 1.5 wt.% ทีมวิจัยของ Yujaroen *et al.* (2009) ศึกษาการใช้ PFAD เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลด้วยการไฮโดรไลซิส ที่อุณหภูมิ เท่ากับ 300°C อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล:PFAD เท่ากับ 6:1 และเวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 30 min พบว่า สามารถผลิตไบโอดีเซลมีปริมาณผลได้ เท่ากับ 95 wt.% ทีมวิจัยของ Deshmane *et al.* (2009) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD ด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกแบบอ่างอัลตราโซนิก โดยใช้กำลังของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก เท่ากับ 1000 W ความถี่ เท่ากับ 25 kHz พบว่า เงื่อนไขที่เหมาะสมของการผลิตไบโอดีเซล คือ อัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอล:PFAD เท่ากับ 5:1 ปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 5 wt.% เวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 360 min และอุณหภูมิ เท่ากับ 60°C ได้ความบริสุทธิ์ของไอโซโพรพานอลเอสเทอร์ เท่ากับ 80 wt.% ทีมวิจัยของ Soysuwan and Somnuk, (2015) ศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการผลิตเมทิลเอสเทอร์จาก PFAD ด้วยกระบวนการกวนผสมแบบกะ โดยใช้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันขั้นตอนเดียว พบว่า ที่เงื่อนไขปริมาณเมทานอล เท่ากับ 100.6 wt.% ปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 9.4 wt.% เวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 91.5 min อุณหภูมิ เท่ากับ 60°C และความเร็วยกของการกวนผสม เท่ากับ 300 rpm ได้ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ เท่ากับ 97.028 wt.% ปริมาณผลได้ของไบโอดีเซลดิบ เท่ากับ 115.97 wt.% และไบโอดีเซลบริสุทธิ์ เท่ากับ 99.63 wt.%

#### 1.2.3.5 การผลิตไบโอดีเซลด้วยท่อผสมแบบสถิต

ทีมวิจัยของ Santacesaria *et al.* (2012) ศึกษากระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบสถิตแบบท่อ พบว่า ท่อผสมแบบสถิตทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสของสารทำปฏิกิริยาสัมผัสกันได้ดี ให้ปริมาณผลได้สูง และในเวลาทำปฏิกิริยาประมาณ 1 min ทีมวิจัยของ Sungwornpatansakul *et al.* (2013) ได้ศึกษาการเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการกวนผสมกับการประยุกต์ใช้ท่อผสมแบบสถิตในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล พบว่า ประสิทธิภาพ และจลนศาสตร์ของการเปลี่ยนเป็นไบโอดีเซลที่ใช้ท่อผสมแบบสถิตดีกว่ากระบวนการกวนผสม ซึ่งท่อผสมแบบสถิตทำให้น้ำมันกับเมทานอลผสมกันได้ดี เวลาในการทำปฏิกิริยาลดลง และประหยัดพลังงาน ทีมวิจัยของ Somnuk *et al.* (2016) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยท่อผสมแบบสถิตจากน้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์ (refined palm oil, RPO) และใช้วิธีพื้นผิวตบสนองในการหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการผลิตเมทิลและเอทิลเอสเทอร์ให้ได้ความบริสุทธิ์มากกว่า 96.5 wt.% พบว่า เงื่อนไขที่เหมาะสมในการผลิตเมทิลเอสเทอร์ คือ ปริมาณเมทานอล เท่ากับ 44.7 vol.% ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 11.2 g.L<sup>-1</sup> และความยาวของท่อผสมแบบสถิต เท่ากับ 4.8 m และเงื่อนไขที่เหมาะสมในการ

ผลิตเอทิลเอสเทอร์ คือ ปริมาณเอทานอล เท่ากับ 45.3 vol.% ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ  $12.5 \text{ g.L}^{-1}$  และความยาวของท่อผสมแบบสถิต เท่ากับ 5.1 m ที่มิจัยของ Santana *et al.* (2017) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบสถิต พบว่า ได้ปริมาณผลได้ของไบโอดีเซลสูง เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์แบบนี้ทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วน ส่งผลให้น้ำมันและแอลกอฮอล์ผสมกันได้ดี อัตราการเปลี่ยนเป็นไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น และมีค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number,  $N_{Re}$ ) เท่ากับ 100 ที่เงื่อนไขอัตราส่วนของอัตราส่วนโดยโมลของเอทานอล:น้ำมัน เท่ากับ 9:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1 wt.% และอุณหภูมิ เท่ากับ  $50^{\circ}\text{C}$  พบว่า สามารถผลิตเอทิลเอสเทอร์ได้ความบริสุทธิ์ เท่ากับ 99.53 wt.%

#### 1.2.3.6 การผลิตไบโอดีเซลด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิก

การประยุกต์ใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิกในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล มีวัตถุประสงค์เพื่อช่วยให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น ช่วยลดปริมาณสารเคมี และต้นทุนผลิต ซึ่งสำหรับการทบทวนเอกสารในงานวิจัยนี้ สามารถแบ่งประเภทของการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิกเป็น 3 ประเภท คือ การผลิตไบโอดีเซลด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกแบบกะ การผลิตไบโอดีเซลด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกแบบต่อเนื่อง และการผลิตไบโอดีเซลด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกแบบหลายขั้นตอน

##### 1.2.3.6.1 การผลิตไบโอดีเซลด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกแบบกะ

ที่มิจัยของ Deshmane *et al.* (2009) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD โดยใช้กำลังของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก เท่ากับ 1000 W และความถี่ เท่ากับ 25 kHz พบว่า เงื่อนไขที่ดีที่สุดในการผลิตไบโอดีเซล คือ อัตราส่วนโมลของไอโซโพรพานอล:PFAD เท่ากับ 5:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 5 wt.% เวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 360 min และอุณหภูมิ เท่ากับ  $60^{\circ}\text{C}$  ได้ความบริสุทธิ์ของไอโซโพรพานอลเอสเทอร์ เท่ากับ 80 wt.% ที่มิจัยของ Santos *et al.* (2010) ศึกษาการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมัน *Oreochromis niloticus* (Nile tilapia) oil โดยใช้กำลังของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก เท่ากับ 3 W และความถี่ เท่ากับ 40 kHz พบว่า สามารถผลิตเมทิลเอสเทอร์ได้ปริมาณผลได้สูงสุด เท่ากับ 98.2 wt.% ที่เงื่อนไขอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล:น้ำมัน เท่ากับ 9:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 2 wt.% เวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 90 min และอุณหภูมิ เท่ากับ  $30^{\circ}\text{C}$  ที่มิจัยของ Hingu *et al.* (2010) เปรียบเทียบการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้วโดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันด้วยกระบวนการกวนผสม และการประยุกต์ใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิก ซึ่งมีกำลังของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก เท่ากับ 200 W และความถี่ เท่ากับ 20 kHz โดยใช้เงื่อนไขอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล:น้ำมัน เท่ากับ 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1 wt.% เวลาทำปฏิกิริยา 40 min และอุณหภูมิ เท่ากับ  $45^{\circ}\text{C}$  และความเร็รรอบในการกวนผสม เท่ากับ 1000 rpm พบว่า สามารถผลิตเมทิลเอสเทอร์ได้ความบริสุทธิ์ เท่ากับ 89.5 wt.% และ 57.5 wt.% สำหรับการใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิก และการกวนผสม ตามลำดับ ที่มิจัยของ Manh *et al.* (2012) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันตุง (Tung oil) โดยใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิก โดยใช้กำลังของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก เท่ากับ 270 W และความถี่ เท่ากับ 20 kHz พบว่า ปริมาณผลได้ของไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นขณะที่ความหนืดจลนศาสตร์ (kinematic viscosity) ลดลง และอุณหภูมิ

ของการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น โดยใช้เงื่อนไข คือ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล:น้ำมัน เท่ากับ 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 2 wt.% เวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 5 min และอุณหภูมิ เท่ากับ 25°C สามารถผลิตไบโอดีเซลได้ปริมาณผลได้ เท่ากับ 98.33 wt.% และค่าความหนืดจลนศาสตร์ เท่ากับ  $4.26 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  ที่วิจัยของ Sáez-Bastante *et al.* (2014) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากกรดไขมัน 2 ชนิด คือ กรดไขมันไม่อิ่มตัว (น้ำมันเมล็ดเรพ และน้ำมันถั่วเหลือง) และกรดไขมันอิ่มตัว (น้ำมันมะพร้าว และน้ำมันปาล์ม) โดยใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิก ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในชุดทดลองแบบกะ ใช้กำลังของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก เท่ากับ 400 W และความถี่ เท่ากับ 20 kHz พบว่า ที่เงื่อนไขอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล:น้ำมัน เท่ากับ 5:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.8 wt.% สามารถผลิตเมทิลเอสเทอร์ได้ความบริสุทธิ์ที่ดีที่สุด คือ 95.03 wt.% (น้ำมันเมล็ดเรพ) 94.66 wt.% (น้ำมันถั่วเหลือง) 81.37 wt.% (น้ำมันมะพร้าว) และ 93.08 wt.% (น้ำมันปาล์ม) ที่วิจัยของ Manickam *et al.* (2014) ศึกษาการเปรียบเทียบการผลิตไบโอดีเซลระหว่างวิธีการกวนผสม กับการประยุกต์ใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิกช่วยในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้ น้ำมันปาล์มเป็นวัตถุดิบ และใช้กำลังของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก เท่ากับ 300 W และความถี่ เท่ากับ 28, 40 และ 70 kHz พบว่า การใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิกทั้ง 3 ความถี่ สามารถผลิตไบโอดีเซลได้ปริมาณผลได้สูงสุด เท่ากับ 93 wt.% ที่เงื่อนไขอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล:น้ำมัน เท่ากับ 3:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1 wt.% เวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 15 min และอุณหภูมิ เท่ากับ 60°C ซึ่งสำหรับวิธีการกวนผสมได้ปริมาณผลได้ของไบโอดีเซล เท่ากับ 75 wt.% และใช้เวลา ทำปฏิกิริยา เท่ากับ 360 min หรือ ใช้เวลาทำปฏิกิริยานานกว่าการใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิก เท่ากับ 24% ที่วิจัยของ Hayyan *et al.* (2014) ศึกษาการลดกรดไขมันอิสระของน้ำมันปาล์มเกรดต่ำ (low grade palm oil, LPGO) ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิก โดยแปรค่าเวลา ทำปฏิกิริยา 30-300 min พบว่า เงื่อนไขที่ดีที่สุด คือ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล:น้ำมัน เท่ากับ 10:1 ปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 2 wt.% เวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 300 min และอุณหภูมิ เท่ากับ 50°C สามารถลดปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันจาก 20 wt.% เหลือเท่ากับ 3 wt.%

#### 1.2.3.6.2 การผลิตไบโอดีเซลด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกแบบ

ต่อเนื่อง

ที่วิจัยของ Cintas *et al.* (2010) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจาก น้ำมันถั่วเหลืองโดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก ซึ่งมี กำลังของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก เท่ากับ 600 W และความถี่ เท่ากับ 21.5 kHz โดยใช้ น้ำมันเริ่มต้น เท่ากับ 1.6 L โดยมีอัตราส่วนโดยมวลของน้ำมัน:เมทานอล:โซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 80:19.5:0.5 เวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 60 min อุณหภูมิ เท่ากับ 45°C และอัตราการไหลของน้ำมัน เท่ากับ  $55 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$  ขณะเดียวกันเพื่อลดปริมาณการใช้พลังงานสามารถใช้กระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกใช้วิธีการกวนผสม โดยใช้เวลาในการกวนผสม เท่ากับ 30 min และอุณหภูมิ ทำปฏิกิริยา เท่ากับ 45°C และขั้นตอนที่ 2 ใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิกเป็นเวลา เท่ากับ 35 min ที่อุณหภูมิเดียวกัน พบว่า สามารถเปลี่ยนองค์ประกอบของน้ำมันถั่วเหลืองให้เป็นเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้น 10-20% และมีการใช้พลังงานไฟฟ้า เท่ากับ  $0.28 \text{ k W h} \cdot \text{L}^{-1}$  ที่วิจัยของ Thanh *et al.* (2010) ได้

ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้ว (waste cooking oil, WCO) โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิกแบบต่อเนื่องในกระบวนการ 2 ขั้นตอน ใช้กำลังของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก เท่ากับ 1000 W และความถี่ เท่ากับ 20 kHz สำหรับขั้นตอนแรกใช้เงื่อนไขอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล:WCO เท่ากับ 2.5:1 และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.7 wt.% และในขั้นตอนที่ 2 ใช้เงื่อนไขอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล:WCO เท่ากับ 1.5:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.3 wt.% และเวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 1 min พบว่า สามารถผลิตไบโอดีเซลได้ปริมาณผลได้เท่ากับ 81 wt.% และ 99 wt.% ตามลำดับ ที่วิจัยของ Boffito *et al.* (2013) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิกในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ และแบบต่อเนื่อง พบว่า การผลิตไบโอดีเซลในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะโดยใช้กระบวนการแบบหลายขั้นตอนจะมีข้อจำกัดด้านการถ่ายโอนมวล และพบว่าเครื่องปฏิกรณ์อัลตราโซนิกแบบ rosette cell ร่วมกับแคปิวิตีชันจากคลื่นเสียง (acoustic cavitation) ทำให้ปริมาณผลได้ของไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นมากกว่า 90 wt.% โดยใช้เวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 5 min เครื่องปฏิกรณ์แบบกะใช้เวลา เท่ากับ 90 min และเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิกแบบต่อเนื่องใช้เวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 18 s ซึ่งการใช้เครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิกแบบต่อเนื่องสามารถลดเวลาในการผลิตไบโอดีเซล เท่ากับ 99.92% เมื่อเทียบกับการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ที่วิจัยของ Choedkiatsakul *et al.* (2014) ได้ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกวนผสมร่วมกับคลื่นเสียงอัลตราโซนิก ซึ่งใช้กำลังของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก เท่ากับ 800 W และความถี่ เท่ากับ 20 และ 50 kHz ติดตั้งตัวแปลงสัญญาณของคลื่นเสียงอัลตราโซนิกตามความยาวของเครื่องปฏิกรณ์จำนวน 4 ตำแหน่ง พบว่า สามารถผลิตไบโอดีเซลมีความบริสุทธิ์ เท่ากับ 93.78 wt.% ที่เงื่อนไขอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล:น้ำมัน เท่ากับ 6:1 ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1 wt.% เวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 5 min และอัตราการไหลของน้ำมัน เท่ากับ 55 mL.min<sup>-1</sup> ขณะที่การใช้เครื่องปฏิกรณ์กวนผสมใช้เวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 60 min ซึ่งสามารถลดเวลาในการผลิตไบโอดีเซลได้ เท่ากับ 91.67% เมื่อเทียบกับการใช้เครื่องปฏิกรณ์กวนผสม ที่วิจัยของ Delavari *et al.* (2015) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้วแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบขดเกลียวที่มีความยาว เท่ากับ 20 m และใช้ร่วมกับอ่างอัลตราโซนิกที่มีกำลังของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก เท่ากับ 400 และ 1500 W พบว่า เงื่อนไขอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล:น้ำมัน เท่ากับ 8.6:1 ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.5 wt.% เวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 3 min และอัตราการไหลของน้ำมัน เท่ากับ 60 L.h<sup>-1</sup> สามารถผลิตไบโอดีเซลได้ปริมาณผลได้มากกว่า 90 wt.%

#### 1.2.3.6.3 การผลิตไบโอดีเซลด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกแบบหลายขั้นตอน

ที่วิจัยของ Deng *et al.* (2010) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำด้วยกระบวนการแบบ 2 ขั้นตอน ด้วยเครื่องปฏิกรณ์อัลตราโซนิก โดยใช้กำลังของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก เท่ากับ 210 W พบว่า เมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะมีปริมาณผลได้ของไบโอดีเซล เท่ากับ 47.2 wt.% เนื่องจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบสในการผลิตไบโอดีเซลกับน้ำมันที่มีกรดไขมันอิสระสูงจะทำให้เกิดปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน (saponification reaction) หรือเกิดสบู่ ส่งผลให้ปริมาณผลได้ของไบโอดีเซลลดลง เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถ

ผลิตไบโอดีเซลมีปริมาณผลได้ เท่ากับ 92.8 wt.% แต่ต้องใช้เวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 240 min และเมื่อใช้กระบวนการแบบ 2 ขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และเวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 60 min สามารถลดค่าความเป็นกรดของจาก  $10.45 \text{ mgKOH.g}^{-1}$  เหลือเท่ากับ  $1.2 \text{ mgKOH.g}^{-1}$  ที่อุณหภูมิ เท่ากับ  $60^{\circ}\text{C}$  และขั้นตอนที่ 2 ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า สามารถผลิตไบโอดีเซลมีปริมาณผลได้ เท่ากับ 96.4 wt.% และมีค่าความเป็นกรด เท่ากับ  $0.32 \text{ mgKOH.g}^{-1}$  ที่เวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 30 min ซึ่งเวลาในการทำปฏิกิริยาลดลง เท่ากับ 62% เมื่อเทียบกับการผลิตไบโอดีเซลขั้นตอนเดียว ทีมวิจัยของ Somnuk *et al.* (2013) ได้ศึกษากระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอน จากน้ำมันปาล์มดิบชนิดกรดไขมันอิสระสูงแบบต่อเนื่องโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบสถิตร่วมกับคลื่นเสียงอัลตราโซนิก ขนาด 100 mL โดยมีกำลังของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก เท่ากับ 1000 W จำนวน 2 ตัว และความถี่ เท่ากับ 18 kHz สำหรับขั้นตอนแรกใช้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ที่เงื่อนไขปริมาณเมทานอล เท่ากับ 18 vol.% ปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 2.7 vol.% อัตราการไหลของน้ำมัน เท่ากับ  $20 \text{ L.h}^{-1}$  และอุณหภูมิ เท่ากับ  $60^{\circ}\text{C}$  พบว่า สามารถลดค่าความเป็นกรดจาก  $28 \text{ mgKOH.g}^{-1}$  เหลือเท่ากับ  $2 \text{ mgKOH.g}^{-1}$  และสำหรับขั้นตอนที่ 2 ใช้เงื่อนไขปริมาณเมทานอล เท่ากับ 18 vol.% ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ  $8 \text{ g.L}^{-1}$  อัตราการไหลของน้ำมัน เท่ากับ  $20 \text{ L.h}^{-1}$  เวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 20 s และอุณหภูมิ เท่ากับ  $30^{\circ}\text{C}$  สามารถผลิตไบโอดีเซลมีปริมาณผลได้ของน้ำมันลดกรดไขมันอิสระ เท่ากับ 103.3 vol.% ไบโอดีเซลดิบ เท่ากับ 105.4 vol.% และไบโอดีเซลบริสุทธิ์ เท่ากับ 92.5 vol.% ทีมวิจัยของ Dubey *et al.* (2015) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมัน Nagchampa ซึ่งมีค่าความเป็นกรด เท่ากับ  $31 \text{ mgKOH.g}^{-1}$  ด้วยกระบวนการ 2 ขั้นตอนโดยใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิก โดยใช้กำลังของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก เท่ากับ 120 W และความถี่ เท่ากับ 20 kHz ขั้นตอนแรกใช้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ที่เงื่อนไขอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล:น้ำมัน เท่ากับ 4:1 ปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 1 wt.% เวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 180 min และอุณหภูมิ เท่ากับ  $40^{\circ}\text{C}$  พบว่า สามารถผลิตไบโอดีเซลมีปริมาณผลได้ เท่ากับ 67.8 wt.% และขั้นตอนที่ 2 ใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ที่เงื่อนไขอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล:น้ำมัน เท่ากับ 10:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 2.5 wt.% เวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 150 min พบว่า สามารถผลิตไบโอดีเซลมีปริมาณผลได้ เท่ากับ 78.7 wt.% ทีมวิจัยของ Maghami *et al.* (2015) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเหลือทิ้งจากโรงงานปลาป่นที่มีค่าความเป็นกรด เท่ากับ  $10.5 \text{ mgKOH.g}^{-1}$  โดยการใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิกที่มีกำลัง เท่ากับ 300 W และความถี่ เท่ากับ 20 kHz ขั้นตอนแรกทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ที่เงื่อนไขอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล:น้ำมัน เท่ากับ 9:1 ปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 1 wt.% เวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 60 min และอุณหภูมิ เท่ากับ  $60^{\circ}\text{C}$  สามารถลดค่าความเป็นกรดให้เหลือ เท่ากับ  $0.65 \text{ mgKOH.g}^{-1}$  และขั้นตอนที่ 2 ใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ที่เงื่อนไขอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล:น้ำมัน เท่ากับ 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1 wt.% เวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 30 min และอุณหภูมิ เท่ากับ  $50^{\circ}\text{C}$  สามารถผลิตไบโอดีเซลมีปริมาณผลได้ เท่ากับ 79.6 wt.% และความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ เท่ากับ 87 wt.% ทีมวิจัยของ Saha and Goud. (2015) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันหยีนน้ำ (karanja oil) ซึ่งมีค่าความเป็นกรด เท่ากับ  $33 \text{ gKOH.g}^{-1}$  หรือค่ากรดไขมันอิสระ เท่ากับ 18 wt.% โดยใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิกที่มีกำลัง เท่ากับ 80 W และความถี่ เท่ากับ 30 kHz ด้วย

กระบวนการแบบ 2 ขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ที่เงื่อนไขอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล:น้ำมัน เท่ากับ 9:1 ปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 0.5 wt.% เวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 90 min และอุณหภูมิ เท่ากับ 30°C พบว่า สามารถผลิตเมทิลเอสเทอร์ได้ความบริสุทธิ์ เท่ากับ 84 wt.% และขั้นตอนที่ 2 ใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยมีความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ เท่ากับ 87 wt.% ที่เงื่อนไขอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล:น้ำมัน เท่ากับ 9:1 ปริมาณ barium hydroxide octahydrate ( $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ) เท่ากับ 5 wt.% เวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 90 min และอุณหภูมิ เท่ากับ 30°C ที่มวิจัยของ Sarve *et al.* (2016) ศึกษาการใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิกช่วยในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมัน *Schleichera triguga* ที่มีค่าความเป็นกรด เท่ากับ  $21.65 \text{ mgKOH.g}^{-1}$  ด้วยกระบวนการแบบ 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกใช้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ที่เงื่อนไขอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล:น้ำมัน เท่ากับ 4:1 ปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 1 vol.% เวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 20 min และอุณหภูมิ 40°C พบว่า สามารถลดค่าความเป็นกรดเหลือ เท่ากับ  $0.84 \text{ mgKOH.g}^{-1}$  และสำหรับขั้นตอนที่ 2 ใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ที่เงื่อนไขอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล:น้ำมัน เท่ากับ 9:1 ปริมาณของ  $\text{Ba}(\text{OH})_2$  เท่ากับ 3 wt.% เวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 80 min และอุณหภูมิ เท่ากับ 50°C พบว่า สามารถผลิตไบโอดีเซลได้ความบริสุทธิ์ เท่ากับ 96.8 wt.% สำหรับสรุปการทบทวนเอกสารการผลิตไบโอดีเซล และสรุปการทบทวนเอกสารการผลิตไบโอดีเซลด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิก สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1.8 และตารางที่ 1.9 ตาม ลำดับ

#### 1.2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไบโอดีเซล

ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลทั้งการใช้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน และปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน มีปัจจัยที่สำคัญหลายประการที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ และปริมาณผลได้ของไบโอดีเซล เช่น ปริมาณน้ำและกรดไขมันอิสระ อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน ชนิดและความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา และเวลาทำปฏิกิริยา

##### 1.2.4.1 ปริมาณน้ำและกรดไขมันอิสระ

ปริมาณน้ำและกรดไขมันอิสระของวัตถุดิบมีผลต่อความบริสุทธิ์ และปริมาณผลได้ของไบโอดีเซล เนื่องจากทำให้เกิดปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน หรือทำให้เกิดสบู่ ส่งผลให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง ลดอัตราการเกิดเอสเทอร์ของกรดไขมัน และมีปริมาณผลได้ของไบโอดีเซลต่ำ (Freedman *et al.*, 1984; Kusdiana and Saka, 2004; Chongkhong, 2007) ที่มวิจัยของ Ma *et al.*, 1998 สรุปว่า การผลิตไบโอดีเซลจากไขมันวัวควรมีปริมาณน้ำไม่เกิน 0.06 wt.% และปริมาณกรดไขมันอิสระน้อยกว่า 0.5 wt.% และที่มวิจัยของ Freedman *et al.*, 1984 สรุปว่า การผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจะต้องมีปริมาณกรดไขมันอิสระน้อยกว่า 1 wt.%

##### 1.2.4.2 อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน

อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่ออัตราการเปลี่ยนเป็นไบโอดีเซล ในทางทฤษฎีของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันต้องใช้อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์:น้ำมัน เท่ากับ 3:1 และสำหรับปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาย้อน-

กลับ ดังนั้นการเพิ่มปริมาณแอลกอฮอล์ทำให้เกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าตามหลักจลนศาสตร์ ทำให้ปริมาณผลได้ของไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น แต่ในทางปฏิบัติควรใช้อัตราส่วนของแอลกอฮอล์สูงกว่าทางทฤษฎีเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าอย่างสมบูรณ์ แต่หากใช้ปริมาณแอลกอฮอล์สูงก็จะเป็นปัญหาการใช้ต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซลสูง จึงจำเป็นต้องศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมของปริมาณการใช้แอลกอฮอล์ (Ramadhas *et al.*, 2005; Choudhury *et al.*, 2013) ซึ่งอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลมีผลต่อการลดปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันอย่างมีนัยสำคัญ โดยเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล พบว่า ปริมาณกรดไขมันอิสระลดลงเรื่อย ๆ จนเข้าสู่สภาวะสมดุล (Maddikeri *et al.*, 2013; Gole and Gogate, 2014; Mohod *et al.*, 2017) โดยที่มววิจัยของ Kumar *et al.*, 2014 ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกและการกวนผสมแบบกะ โดยการแปรค่าอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล:น้ำมัน คือ 3:1-6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.75 wt.% เวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 30 min ใช้กำลังของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก เท่ากับ 100 W และความถี่ เท่ากับ 24 kHz พบว่า ที่เงื่อนไขอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล:น้ำมัน เท่ากับ 5:1 สามารถผลิตเมทิลเอสเทอร์ได้ความบริสุทธิ์สูงสุด เท่ากับ 97.63 wt.% แต่หากใช้วิธีการกวนผสม ต้องใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล:น้ำมัน เท่ากับ 10:1 และที่มววิจัยของ Mohod *et al.*, 2017 ใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล:น้ำมันหรือน้ำ เท่ากับ 5:1 ปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 2 wt.% และใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิกที่มีกำลัง เท่ากับ 150 W และความถี่ เท่ากับ 36 kHz ช่วยในการผลิตไบโอดีเซล พบว่า สามารถลดค่าความเป็นกรดของน้ำมันจาก  $14.15 \text{ mgKOH.g}^{-1}$  เหลือเท่ากับ  $2.7 \text{ mgKOH.g}^{-1}$

#### 1.2.4.3 ชนิดและความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา

การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันซึ่งเหมาะสำหรับวัตถุดิบที่มีกรดไขมันอิสระสูงมักจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรด เช่น กรดซัลฟิวริก กรดไฮโดรคลอริก และ กรดฟอสฟอริก (Zhang *et al.*, 2003) และสำหรับการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ปฏิกิริยารานส์เอสเทอร์ฟิเคชันมักจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบส เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งทำให้ปริมาณผลได้ที่สูง (Leung *et al.*, 2010; Nasir *et al.*, 2014) แต่การใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยารานส์เอสเทอร์ฟิเคชันต้องใช้อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน อุณหภูมิ และความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาสูง (Freedman *et al.*, 1984) โดยที่มววิจัยของ Cao and Zhang, 2015 ศึกษาผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยแปรค่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.5, 0.75, 1, 1.25 and 1.5 wt.% อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล:น้ำมัน เท่ากับ 8:1 ความเร็วรอบในการกวนผสม เท่ากับ 500 rpm และอุณหภูมิ เท่ากับ  $65^{\circ}\text{C}$  พบว่า ปริมาณผลได้ของไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น และได้ปริมาณผลได้ เท่ากับ 94 wt.% ที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1.25 wt.%

#### 1.2.4.4 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา

อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการทำปฏิกิริยาของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจะใช้อุณหภูมิใกล้ถึงจุดเดือดของแอลกอฮอล์ โดยทั่วไปจะอยู่ในช่วง ระหว่าง  $50\text{-}60^{\circ}\text{C}$  (Duarte *et al.*, 2007) สำหรับการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิกไม่จำเป็นต้องให้ความร้อนจาก

แหล่งพลังงานภายนอก เนื่องจากพลังงานจากการสั่นของคลื่นเสียงอัลตราโซนิกที่ทำให้สารทำปฏิกิริยาผสมกันส่งผลให้อุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น และหากใช้อุณหภูมิทำปฏิกิริยาสูงเกินส่งผลให้ประสิทธิภาพของการใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิกลดลง (Suganya *et al.*, 2014) และอุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาต่ำจะลดอัตราการเกิดปฏิกิริยา (Okitsu *et al.*, 2010) โดยที่มวิจัยของ Encinar *et al.*, 2015 ศึกษาปริมาณผลได้ของไบโอดีเซลโดยการแปรค่าอุณหภูมิ พบว่า ปริมาณผลได้ของไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิ เท่ากับ 35°C ซึ่งอุณหภูมิดังกล่าวเหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน และที่มวิจัยของ Delavari *et al.*, 2015 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยากับปริมาณผลได้ของไบโอดีเซล พบว่า ปริมาณผลได้ของไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา และมีปริมาณผลได้ของไบโอดีเซลสูงสุด เท่ากับ 91 wt.% ที่อุณหภูมิ เท่ากับ 60°C ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.5 wt.% อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล:น้ำมัน เท่ากับ 6:1 และใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิกเป็นเวลา เท่ากับ 20 min

#### 1.2.4.5 เวลาทำปฏิกิริยา

อัตราการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลขึ้นอยู่กับเวลาในการทำปฏิกิริยา โดยมีปริมาณผลได้ของไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นในช่วงแรก และลดลง หรือเข้าสู่สภาวะสมดุลเมื่อเวลาทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น (Ramadhas *et al.*, 2005; Worapun *et al.*, 2012) โดยที่มวิจัยของ Subhedar *et al.*, 2015 เปรียบเทียบกระบวนการผลิตไบโอดีเซลระหว่างการกวนผสมและการใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิก พบว่า การใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิกใช้เวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 5 min สามารถผลิตไบโอดีเซลได้ปริมาณผลได้สูงสุด เท่ากับ 96 wt.% และสำหรับการกวนผสมใช้เวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 25 min สามารถผลิตไบโอดีเซลได้ปริมาณผลได้สูงสุด เท่ากับ 65 wt.% ซึ่งการใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิกสามารถลดเวลาในการผลิตไบโอดีเซลได้ เท่ากับ 80% เมื่อเทียบกับการกวนผสม และที่มวิจัยของ Trentin *et al.*, 2015 สรุปว่า ปริมาณของไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาทำปฏิกิริยา โดยสามารถผลิตไบโอดีเซลได้ปริมาณผลได้มากที่สุด เท่ากับ 80 wt.% ที่เวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 270 min จากนั้นปริมาณผลได้ของไบโอดีเซลเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุลเมื่อเวลาทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ที่เงื่อนไขอัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์:น้ำมัน เท่ากับ 3:1 ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา เท่ากับ 2 wt.% และอุณหภูมิ เท่ากับ 70°C



ตารางที่ 1.8 สรุปการทบทวนเอกสารกระบวนการการผลิตไบโอดีเซล

Authors	Process	Reactors	Raw material	Alcohol (vol.%)	Catalyst (wt.%)	Temperature (°C)	Time (min)	Yield (%)	Ester (wt.%)
Chongkhong <i>et al.</i> , 2007	2 <sup>nd</sup> -step: Continuous	CSTR <sup>(1)</sup>	Palm fatty acid distillate	MeOH (8:1) MeOH (23.8)	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (1.83) KOH (10.2)	70, 65	60, 15	-	>96.5
Yujaroen <i>et al.</i> , 2009	Hydrolysis	-	Palm fatty acid distillate	MeOH (6:1)	-	300	30	-	95
Deshmane <i>et al.</i> , 2009	1 <sup>st</sup> -step: Batch	Ultrasonic bath (1 kW, 25 kHz)	Palm fatty acid distillate	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O (5:1)	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (5)	60	360	-	80
Jain and Sharma, 2010	2 <sup>nd</sup> -step: Batch	Stirrer (400 rpm)	Jatropha oil	MeOH (7:1)	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (1) KOH (1)	65, 50	180	90.1	-
Kawentar and Budiman, 2013	1 <sup>st</sup> -step: Batch	Stirrer	Used cooking oil	MeOH (6.81:1)	KOH (1)	66.5	60	-	92.76
Somnuk <i>et al.</i> , 2014	2 <sup>nd</sup> -step: Continuous	Static mixer	Crude palm oil	MeOH (19.8) MeOH (23.8)	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (2 vol.%) KOH (11.8)	60, 60	-	-	>96.5
Gui <i>et al.</i> , 2015	1 <sup>st</sup> -step: Continuous	Column	Cottonseed oil	MeOH (12:1)	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (2)	65	-	-	98.8
Soysuwan and Somnuk, 2015	1 <sup>st</sup> -step: Batch	Stirrer (300 rpm)	Palm fatty acid distillate	MeOH (100.6 wt.%)	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (9.4)	60	91.5	99.63	97.03
Somnuk <i>et al.</i> , 2016	1 <sup>st</sup> -step: Continuous	Static mixer (4.8, 5.1)	Refined palm oil	MeOH (44.7) EtOH (45.3)	KOH (11.2) KOH (12.5)	60	-	-	>96.5
Santana <i>et al.</i> , 2017	1 <sup>st</sup> -step: Continuous	Static mixer	Sunflower oil	EtOH (9:1)	KOH (1)	60	-	-	99.53

หมายเหตุ: <sup>(1)</sup> CSTR: continuous stirred tank reactor

ตารางที่ 1.9 (ต่อ) สรุปการทบทวนเอกสารกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิก

Authors	Process	Reactors	Raw material	Alcohol (vol.%)	Catalyst (wt.%)	Temperature (°C)	Time (min)	Yield (%)	Ester (wt.%)
Deshmane <i>et al.</i> , 2009	1 <sup>st</sup> -step: Batch	Ultrasonic bath (1000 W, 25 kHz)	Palm fatty acid distillate	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O (5:1)	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (5)	60	360	-	80
Santos <i>et al.</i> , 2010	1 <sup>st</sup> -step: Batch	Ultrasonic bath (3 W, 40 kHz)	Nile tilapia oil	MeOH (9:1)	KOH (2)	30	90	-	98.2
Hingu <i>et al.</i> , 2010	1 <sup>st</sup> -step: Batch	Ultrasonic probe (200 W, 20 kHz)	Waste cooking oil	MeOH (6:1)	KOH (1)	45	40	-	-
Cintas <i>et al.</i> , 2010	1 <sup>st</sup> -step: Continuous	Ultrasonic flow (600 W, 21.5)	Soybean oil	MeOH (19.5:1)	KOH (0.5)	45	60	-	-
Thanh <i>et al.</i> , 2010	2 <sup>nd</sup> -step: Continuous	Ultrasonic flow (1000 W, 20)	Waste cooking oil	MeOH (25:1) MeOH (1.5:1)	KOH (0.7) KOH (0.3)	25	<1	99	-
Manh <i>et al.</i> , 2010	1 <sup>st</sup> -step: Batch	Ultrasonic probe (220 W, 20 kHz)	Tung oil	MeOH (6:1)	KOH (2)	25	5	98.33	-
Somnuk <i>et al.</i> , 2010	2 <sup>nd</sup> -step: Continuous	Static mixer Ultrasonic (1000 W, 18 kHz)	Mixed crude palm oil	MeOH (18 vol.%) MeOH (18 vol.%)	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (2.7 vol.%) KOH (8)	60, 30	<0.3 3	92.5	-
Sáez-Bastante <i>et al.</i> , 2014	1 <sup>st</sup> -step: Batch	Ultrasonic probe (400 W, 20 kHz)	Rapeseed oil Soybean oil Coconut oil Palm oil	MeOH (5:1)	KOH (0.8)	-	-	-	95.03 94.66 81.37 93.08
Manickam <i>et al.</i> , 2014	1 <sup>st</sup> -step: Batch	Ultrasonic probe (300 W, 28, 40, 70 kHz)	Palm oil	MeOH (3:1)	KOH (1)	60	15	93	-

ตารางที่ 1.9 สรุปการทบทวนเอกสารกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิก

Authors	Process	Reactors	Raw material	Alcohol (vol.%)	Catalyst (wt.%)	Temperature (°C)	Time (min)	Yield (%)	Ester (wt.%)
Choedkiatsakul <i>et al.</i> , 2014	1 <sup>st</sup> -step: Continuous	Mechanical stirred (160 rpm) Ultrasonic (800 W, 20, 50 kHz)	Palm oil	MeOH (6:1)	NaOH (1)	45	5	-	93.78
Delavari <i>et al.</i> , 2015	1 <sup>st</sup> -step: Continuous	Helicoidal reactor (20 m) Ultrasonic bath (1500 W, 20 kHz)	Waste cooking oil	MeOH (8.6:1)	NaOH (0.5)	60	3.1	>90	-
Dubey <i>et al.</i> , 2015	2 <sup>nd</sup> -step: Batch	Ultrasonic probe (120 W, 20 kHz)	Nagchampa oil	MeOH (12:1) MeOH (4:1)	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (2.5) CaO (1)	60, 60	150	79	-
Maghami <i>et al.</i> 2015	2 <sup>nd</sup> -step: Batch	Ultrasonic probe (120 W, 20 kHz)	Waste fish oil	MeOH (12:1) MeOH (6:1)	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (1) KOH (1)	60, 50	30	79.6	87
Saha and Goud, 2015	2 <sup>nd</sup> -step: Batch	Ultrasonic probe (100 W, 30 kHz)	Karanja oil	MeOH (9:1) MeOH (9:1)	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (0.5) Ba(OH) <sub>2</sub> ·(5)	30	90	-	84
Sarve <i>et al.</i> , 2016	2 <sup>nd</sup> -step: Batch	Ultrasonic probe (250 W, 20 kHz)	Schleichera triguga oil	MeOH (4:1) MeOH (9:1)	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (1) Ba(OH) <sub>2</sub> (3)	40, 50	100	-	96.8

### 1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.3.1 เพื่อออกแบบและสร้างระบบผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขปาล์มแบบต่อเนื่องที่มีค่ากรดไขมันอิสระสูงมากกว่า 80 wt.% ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ที่ผสมแบบสติดรุ่มกับคลื่นเสียงอัลตราโซนิก และมีกำลังการผลิต 20 L.h<sup>-1</sup>

1.3.2 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขปาล์มแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์ที่ผสมแบบสติดรุ่มกับคลื่นเสียงอัลตราโซนิก

1.3.3 เพื่อสามารถผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขปาล์มแบบต่อเนื่องให้มีค่าความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์สูงกว่า 96.5 wt.%

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้เครื่องผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขปาล์มแบบต่อเนื่องที่มีค่ากรดไขมันอิสระสูงมากกว่า 80 wt.% ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ที่ผสมแบบสติดรุ่มกับคลื่นเสียงอัลตราโซนิก และมีกำลังการผลิต 20 L.h<sup>-1</sup>

1.4.2 ได้สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขปาล์มแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์ที่ผสมแบบสติดรุ่มกับคลื่นเสียงอัลตราโซนิก

1.4.3 ได้น้ำมันไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขปาล์มที่มีความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์มากกว่า 96.5 wt.%

### 1.5 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.5.1 ส่วนกลั่นกรดไขปาล์มมีค่ากรดไขมันอิสระมากกว่า 80 wt.%

1.5.2 ทดสอบกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขปาล์มแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์ที่ผสมแบบสติดรุ่มกับคลื่นเสียงอัลตราโซนิก ที่มีกำลังการผลิต 20 L.h<sup>-1</sup> โดยควบคุมความถี่ของคลื่นเสียงอัลตราโซนิกที่ 20 ± 2 kHz

1.5.3 ตัวแปรที่จะศึกษา เช่น ปริมาณเมทานอล ปริมาณกรดซัลฟิวริก ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และความยาวท่ออัลตราโซนิก

1.5.4 ทดสอบหาสภาวะที่เหมาะสมของระบบผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขปาล์มแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์ที่ผสมแบบสติดรุ่มกับคลื่นเสียงอัลตราโซนิก โดยไบโอดีเซลที่ได้มีความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์มากกว่า 96.5 wt.%

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### 2.1 ไบโอดีเซล

ในปี ค.ศ. 1893 ดร.รูดอล์ฟ ดีเซล (Rudolf C. Diesel) วิศวกรชาวเยอรมัน ผู้ประดิษฐ์เครื่องยนต์ดีเซล ได้คิดค้นและทดลองนำน้ำมันถั่วเหลืองมาใช้กับเครื่องยนต์ลูกสูบเดี่ยวที่ทำจากเหล็กยาว เท่ากับ 3 m พบว่า เครื่องยนต์สามารถเดินเครื่องได้ และสามารถใช้งานได้ดี (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2017)

การศึกษาการผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทยเกิดขึ้นในปี ค.ศ. 1983 โดยมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ค้นคว้าวิจัยและพัฒนาโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มขนาดเล็กที่ใช้เงินลงทุนต่ำ ต่อมาในปี ค.ศ. 1984 ได้จัดตั้งอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มขนาดเล็กอันเนื่องมาจากพระราชดำริ และในปี ค.ศ. 1988 มีการสร้างโรงงานแปรรูปน้ำมันปาล์มขนาดเล็กครบวงจรที่ศูนย์ศึกษาการพัฒนาพิกุลทองอันเนื่องมาจากพระราชดำริ จังหวัดนราธิวาส และเริ่มทดลองนำน้ำมันปาล์มมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล จากการทดสอบพบว่า น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 100% สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลโดยไม่ต้องผสมกับน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ หรืออาจใช้ผสมกับน้ำมันดีเซลได้ตั้งแต่ 0.01% ถึง 99.9% และจากความสำเร็จดังกล่าวได้จดสิทธิบัตรการประดิษฐ์ เรื่อง การใช้น้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล เมื่อวันที่ 9 เมษายน ค.ศ. 2001 จนกระทั่งวันที่ 7 พฤษภาคม ค.ศ. 2004 ได้มีการติดตั้งระบบผลิตเอทิลเอสเทอร์โดยโครงการส่วนพระองค์สวนจิตรลดา (กระทรวงพลังงาน, 2006)

##### 2.1.1 นิยาม และความหมายของไบโอดีเซล

ไบโอดีเซล (biodiesel) หมายถึง แอลคิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (alkyl ester of fatty acid) โดยมีสูตรทางเคมี คือ  $R_1COOR_2$  สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลได้โดยตรง หรือผสมกับน้ำมันดีเซล โดยที่  $R_1$  หมายถึง กลุ่มแอลคิลของจากไขมัน และ  $R_2$  หมายถึง กลุ่มแอลคิลจากแอลกอฮอล์ และไบโอดีเซลเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงตามพระราชบัญญัติการค้า น้ำมันเชื้อเพลิง ค.ศ. 2000 (กระทรวงพลังงาน, 2005)

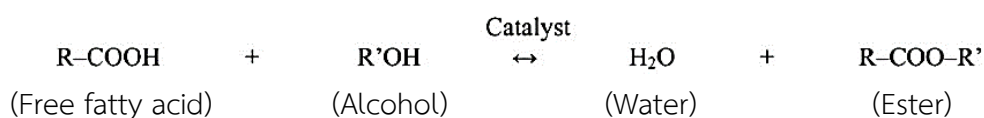
ไบโอดีเซล คือ น้ำมันเชื้อเพลิงที่สามารถนำมาเป็นพลังงานทดแทนน้ำมันดีเซล ซึ่งได้มาจากน้ำมันพืช หรือไขมันสัตว์ โดยนำมาทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแอลกอฮอล์ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2014) และไบโอดีเซลเป็นพลังงานทางเลือกที่สามารถใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลโดยไม่ต้องปรับแต่งเครื่องยนต์ หรือมีการปรับแต่งเล็กน้อยสำหรับเครื่องยนต์บางประเภท (Shahir *et al.*, 2015; Ciolkosz, 2015)

ไบโอดีเซล คือ เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากน้ำมันพืช หรือไขมันสัตว์ มีสมบัติทางเชื้อเพลิงใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล แต่มีปริมาณกำมะถันต่ำหรือไม่มีกำมะถันเจือปนจึงจัดเป็นเชื้อเพลิงสะอาด สามารถผลิตได้หลายวิธี เช่น การทำน้ำมันให้เป็นไมโครอิมัลชัน (micro emulsion) การไฟ-

โรไลส์ (pyrolysis) การเติมไฮโดรเจน (hydrogenation) เอสเทอร์ฟิเคชัน (esterification) และทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (transesterification) เป็นต้น (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2014)

### 2.1.2 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

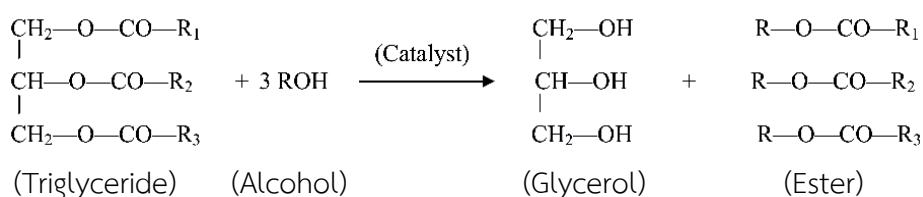
ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (esterification reaction) เป็นปฏิกิริยาของกรดอินทรีย์กับแอลกอฮอล์ โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ เอสเทอร์ และน้ำ ดังรูปที่ 2.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ส่วนใหญ่ เช่น กรดซัลฟูริก กรดไฮโดรคลอริก และกรดฟอสฟอริก เป็นต้น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถผันกลับได้ ซึ่งการใช้ปริมาณแอลกอฮอล์มากเกินไปทำให้เกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้า ส่งผลให้ได้ปริมาณเอสเทอร์สูง และปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเป็นขั้นตอนในการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระสูง (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2014)



รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (Marchetti *et al.*, 2010)

### 2.1.3 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (transesterification reaction) เป็นการทำให้ปฏิกิริยาของไตรกลีเซอไรด์ที่เป็นองค์ประกอบของน้ำมันพืช หรือไขมันสัตว์ กับแอลกอฮอล์ เป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ จากรูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นถึงการทำให้ปฏิกิริยาของไตรกลีเซอไรด์ 1 mol ทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ 3 mol จะได้ผลิตภัณฑ์ คือ เอสเทอร์ 3 mol และกลีเซอรอล 1 mol ในทางปฏิบัติต้องใช้ปริมาณแอลกอฮอล์มากเกินไป ซึ่งควรใช้อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อไตรกลีเซอไรด์มากกว่า 3 mol เพื่อให้ปฏิกิริยาไปข้างหน้ามากขึ้น ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมเมทอกไซด์ และโพแทสเซียมเมทอกไซด์ เหมาะสำหรับการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันที่มีกรดไขมันอิสระน้อยกว่า 1 wt.% (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2014)



รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Boro *et al.*, 2012)

#### 2.1.4 ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์

ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ (heterogeneous catalyst) ส่วนใหญ่มีสถานะเป็นของแข็ง ไม่ละลายในระหว่างการทำปฏิกิริยาทั้งในสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ได้แก่ สารประกอบออกไซด์ของแบเรียม แมกนีเซียม แคลเซียม และแลนทานัม เช่น แคลเซียมออกไซด์ แคลเซียมคาร์บอเนต และไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นต้น (สุภกร และคณะ, 2009) ข้อดีของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ คือ แยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ได้ง่าย ลดของเสียจากกระบวนการผลิต และนำมาใช้ซ้ำได้ แต่การเร่งปฏิกิริยาเกิดขึ้นช้า ต้องใช้อุณหภูมิสูง และตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณมาก (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2014)

#### 2.1.5 ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธุ์

ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธุ์ (homogeneous catalyst) คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถละลายเป็นเนื้อเดียวกันในระหว่างการทำปฏิกิริยาทั้งในสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ ทำให้เกิดการถ่ายเทมวลเร็วขึ้นส่งผลให้ปฏิกิริยาจึงเกิดได้เร็วขึ้น ราคาของตัวเร่งปฏิกิริยามีราคาไม่แพง ข้อเสีย คือ กรดหรือเบสมีฤทธิ์กัดกร่อน เป็นพิษ และไม่สามารถนำมาใช้ซ้ำได้ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2014) ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธุ์ชนิดเบส เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธุ์ชนิดกรด เช่น กรดซัลฟิวริก และกรดฟอสฟอริก เป็นต้น (วรลักษณ์, 2014)

#### 2.1.6 เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน

เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (fatty acid methyl ester, FAME) เป็นสารอินทรีย์ประเภทเอสเทอร์ที่ประกอบด้วยหมู่เอสเทอร์ 1 หมู่ (monoester) สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันของกรดไขมันกับเมทานอล หรือปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์กับเมทานอล สูตรโมเลกุล  $R-COO-CH_3$  โดย R คือ สายไฮโดรคาร์บอนโซ่ตรงของกรดไขมัน เป็นองค์ประกอบหลักในไบโอดีเซล สมบัติทางเชื้อเพลิงใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม แต่การเผาไหม้ให้ไอเสียที่สะอาดกว่า เนื่องจากไม่มีกำมะถัน และสารแอมโมเนีย มีสมบัติการหล่อลื่นเครื่องยนต์ดี และย่อยสลายได้เองด้วยกระบวนการทางชีวภาพ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2014)

#### 2.1.7 กรดไขมันอิสระ

กรดไขมันอิสระ (free fatty acid, FFA) เป็นกรดอินทรีย์ที่แยกตัวจากไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันพืช หรือไขมันสัตว์ เกิดจากการไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ของไตรกลีเซอไรด์ โดยมีกรด เบส หรือเอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับความร้อน สภาพกรดอ่อนของกรดไขมันอิสระทำให้ค่าความเป็นกรด (acid value) ของน้ำมันพืชสูงขึ้น และเร่งการเกิดออกซิไดส์ของน้ำมันพืช น้ำมันพืชที่มีกรดไขมันอิสระประเภทกรดไขมันไม่อิ่มตัวจะเกิดการออกซิไดส์ และเหม็นหืนได้อย่างรวดเร็ว (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2014)

### 2.1.8 ค่าความเป็นกรด

ค่าความเป็นกรด (acid value, AV) เป็นข้อกำหนดคุณภาพของวัตถุดิบของน้ำมันพืช หรือไขสัตว์ สำหรับการผลิตไบโอดีเซล และข้อกำหนดสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซล ค่าความเป็นกรดแสดงถึงปริมาณกรดในน้ำมันในรูปแบบทั้งปริมาณของกรดไขมันอิสระ หรือตัวเร่งปฏิกิริยากรด ได้จากการไทเทรตกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ตามวิธีทดสอบ ASTM D664 หรือ EN 14104 แสดงค่าในหน่วยมิลลิกรัมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมของน้ำมัน ( $\text{mgKOH.g}^{-1}$ ) (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2014)

### 2.1.9 ข้อดีของไบโอดีเซล

การใช้ไบโอดีเซลมาทดแทนน้ำมันดีเซลที่ได้จากเชื้อเพลิงฟอสซิล โดยมีข้อดีทั้งด้านสิ่งแวดล้อม และด้านสมรรถนะของเครื่องยนต์

#### 2.1.9.1 ด้านสิ่งแวดล้อม

การใช้ไบโอดีเซลสามารถลดการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_2$ ) และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่เกิดจากการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ เนื่องจากเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ เพราะมีออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) เป็นองค์ประกอบ ประมาณ 10-12% (Ciolkosz, 2015; Yasin *et al.*, 2017) โดยคณะกรรมการไบโอดีเซลแห่งชาติ (National Biodiesel Board) และสำนักงานป้องกันสิ่งแวดล้อม (US Environmental Agency) ของประเทศสหรัฐอเมริกา ทดลองใช้ไบโอดีเซลสูตรต่าง ๆ กับเครื่องยนต์ดีเซล พบว่า ไบโอดีเซลสูตร B100 สามารถลดการปลดปล่อยแก๊ส  $\text{CO}_2$  ได้เท่ากับ 78% และไบโอดีเซลสูตร B20 สามารถลดการปลดปล่อยแก๊ส  $\text{CO}_2$  ได้เท่ากับ 15.66% และกรมอุทกหารเรือกองทัพเรือ ได้ทดลองใช้ไบโอดีเซลกับเครื่องยนต์ดีเซล ขนาด 145 hp พบว่า สามารถลดควันดำจากการเผาไหม้ ได้เท่ากับ 50% ลดแก๊ส  $\text{CO}_2$  ได้เท่ากับ 78% ลดแก๊ส  $\text{SO}_2$  ได้เท่ากับ 99% ลดแก๊ส CO ได้เท่ากับ 20% และลดฝุ่นละออง ได้เท่ากับ 39% (มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี, 2002; สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจากน้ำมันปาล์มและพืชน้ำมัน, 2007)

#### 2.1.9.2 ด้านสมรรถนะของเครื่องยนต์

เนื่องจากไบโอดีเซลมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล จึงสามารถนำมาใช้แทนกันได้โดยไม่ต้องปรับแต่งเครื่องยนต์ และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ เนื่องจากไบโอดีเซลมีออกซิเจนผสมอยู่ ประมาณ 10-12% ทำให้การผสมระหว่างอากาศกับน้ำมันมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ และไบโอดีเซลมีค่าซีเทน (cetane number) ในช่วงเท่ากับ 60-70 ซึ่งสูงกว่าน้ำมันดีเซลทำให้ลดความล่าช้าในจุดติดไฟ (Ciolkosz, 2015; Yasin *et al.*, 2017) สถาบันวิจัยและเทคโนโลยีของ บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) ทดลองผสมไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วและน้ำมันมะพร้าว ในน้ำมันดีเซล ปริมาณ 1-2% พบว่า สามารถช่วยเพิ่มดัชนีการหล่อลื่นใช้กับน้ำมันดีเซลถึง 2 เท่า ทำให้ลดการสึกหรอของชิ้นส่วนในเครื่องยนต์ (มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี, 2002)



### 2.1.10 ข้อดีของไบโอดีเซล

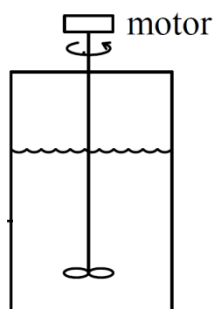
ไบโอดีเซลมีปริมาณค่าพลังงานความร้อน (heating value, HV) ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล ประมาณ 10% ส่งผลให้ความเร็วและกำลังของเครื่องยนต์ที่ใช้ไบโอดีเซลต่ำกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซล ไบโอดีเซลมีจุดชุนและจุดไหลเหสูง และความสามารถในการระเหยต่ำจึงไม่เหมาะกับการใช้งานในพื้นที่ที่อากาศหนาวมาก ๆ (Ciolkosz, 2015; Yasin *et al.*, 2017) การทดลองใช้ไบโอดีเซลในเครื่องยนต์ พบว่า มีการปลดปล่อยปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) สูงกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซล (ศุภชัยวิชัยปาล์มน้ำมันสุราษฎร์ธานี, 2017) ดังนั้นข้อดีของไบโอดีเซลเหล่านี้สามารถแก้ไขได้โดยการผสมกับน้ำมันดีเซลในอัตราส่วนต่าง ๆ (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2002)

## 2.2 เครื่องปฏิกรณ์ผลิตไบโอดีเซล

เครื่องปฏิกรณ์ในการผลิตไบโอดีเซลโดยทั่วไป สามารถแบ่งได้เป็น 5 ประเภท ได้แก่ เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ เครื่องปฏิกรณ์ไหลแบบต่อเนื่อง เครื่องปฏิกรณ์อัลตราโซนิก และเครื่องปฏิกรณ์แบบวิกฤติยงวด

### 2.2.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

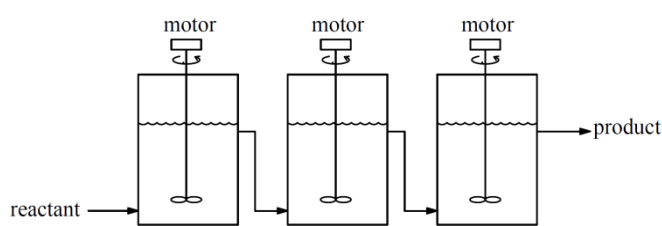
เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (batch reactor) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้แพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม จากรูปที่ 2.3 หลักการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ คือ การนำสารตั้งต้น (reactant) ใส่ไปในถังทำปฏิกิริยา แล้วมีการกวนผสม (mixing) เพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ตามเวลาที่กำหนด จากนั้นจึงนำผลิตภัณฑ์ออกจากถังปฏิกิริยาเพื่อดำเนินการขั้นตอนต่อไป ซึ่งส่วนใหญ่เครื่องปฏิกรณ์แบบกะใช้ระบบแบบถังกวน และใช้มอเตอร์สำหรับกวนผสม โดยมีข้อดีคือสามารถประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับการผลิตผลิตภัณฑ์รูปแบบต่าง ๆ เนื่องจากมีหลักการทำงานง่าย ไม่มีการสูญเสียระหว่างทำปฏิกิริยา การดำเนินการหรือการควบคุมดูแลสามารถทำได้ง่าย สามารถกำหนดระยะเวลาในการดำเนินการแต่ละครั้งให้เท่ากันได้ และต้นทุนในการผลิตต่ำ สำหรับข้อเสียของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ คือ ค่าใช้จ่ายด้านแรงงานสูง และผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพที่แตกต่างกันเนื่องจากการผลิตแบบครั้งต่อครั้ง (He and Gerpen, 2015)



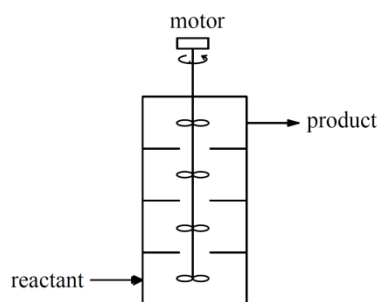
รูปที่ 2.3 เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบกะ

### 2.2.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

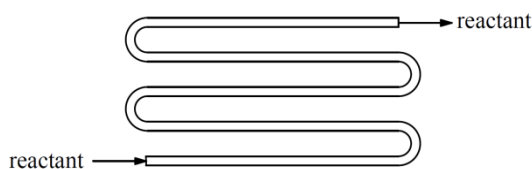
เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง (continuous reactor) มีหลักการทำงาน คือ สารตั้งต้นทั้งหมดจะถูกป้อนเข้าที่ทางเข้าของเครื่องปฏิกรณ์อย่างต่อเนื่อง และผลิตภัณฑ์ที่ได้ก็ไหลออกที่ทางออกของเครื่องปฏิกรณ์อย่างต่อเนื่องเช่นกัน ซึ่งสารตั้งต้นของปฏิกิริยาจะมีอุณหภูมิและความเข้มข้นเท่ากันตลอด โดยเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องที่นิยมใช้ในการผลิตไบโอดีเซลส่วนใหญ่ คือ เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง (continuous stirred tank reactor, CSTR) ซึ่งถังทำปฏิกิริยาของเครื่องปฏิกรณ์ CSTR มีลักษณะคล้ายกับเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบกะ แต่จะมีการออกแบบให้ต่อเนื่องหรือหลายชั้น และมีการเพิ่มระบบการไหลแบบต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 2.4(ก) และ รูปที่ 2.4(ข) และเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล (plug flow reactor) โดยให้สารตั้งต้นทำปฏิกิริยาโดยการไหลในท่อที่มีหน้าตัดเท่ากันตลอด ดังแสดงในรูปที่ 2.4(ค) ข้อดีของเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง คือ กำลังการผลิตสูงเหมาะสำหรับการผลิตในเชิงพาณิชย์ มีคุณภาพของผลิตภัณฑ์สม่ำเสมอ และลดต้นทุนในการผลิต (He and Gerpen, 2015)



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 2.4 เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

(ก) เครื่องปฏิกรณ์ CSTR ต่ออนุกรม (ข) เครื่องปฏิกรณ์ CSTR แบบหลายชั้น และ

(ค) เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล

### 2.2.3 เครื่องปฏิกรณ์อัลตราโซนิก

เครื่องปฏิกรณ์อัลตราโซนิก (ultrasonic reactor) เป็นอุปกรณ์ที่มีประโยชน์ในการผสมของเหลวที่ไม่สามารถผสมเข้ากันได้ (immiscible liquid) เช่น น้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์กับแอลกอฮอล์ ซึ่งทำให้เกิดการผสมที่รุนแรงเพื่อให้ปฏิกิริยาสามารถดำเนินการได้ในอัตราเร็วขึ้น โดยการถ่ายเทพลังงานไปยังของเหลวเพื่อให้เกิดฟองอากาศ และเกิดการระเบิดของฟองอากาศ (bubble collapse) เนื่องจากปรากฏการณ์ acoustic cavitation การใช้อัลตราโซนิกช่วยในการทำปฏิกิริยาทำให้ได้ผลได้ของไปโอติเซลที่ใกล้เคียงกับกรณีที่ใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ แต่ใช้เวลาน้อยกว่ามาก (He and Gerpen, 2015) โดยได้อธิบายรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.4

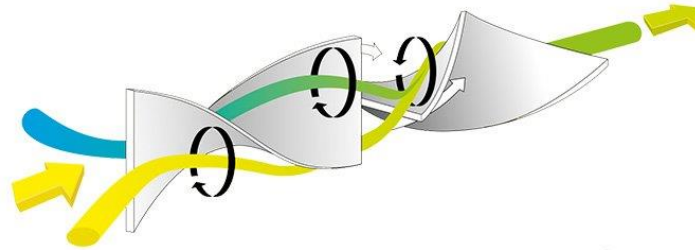
### 2.2.4 เครื่องปฏิกรณ์แบบวิกฤติยิ่งยวด

เครื่องปฏิกรณ์แบบวิกฤติยิ่งยวด (supercritical reactor) การผลิตไปโอติเซลทั่วไปจำเป็นต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยา และหลังทำปฏิกิริยาเสร็จแล้วต้องล้างกำจัดตัวเร่งปฏิกิริยาที่ตกค้างออกเพื่อให้ได้ไปโอติเซลที่มีบริสุทธิ์ แต่บางครั้งก็เกิดปัญหาขึ้นได้เพื่อหลีกเลี่ยงการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถใช้กระบวนการแบบวิกฤติยิ่งยวด (supercritical) ด้วยการใช้อุณหภูมิและความดันที่สูง โดยทั่วไปจะอยู่ที่อุณหภูมิ 300°C และความดัน 40 MPa หรือสูงกว่า โดยน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์จะต้องผสมกับแอลกอฮอล์ให้เป็นเฟสเดียวกัน จากนั้นปฏิกิริยาจะเกิดในระยะเวลารวดเร็วโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา แต่มีต้นทุนในการผลิตสูงเนื่องจากจำเป็นต้องใช้อุณหภูมิ และความดันสูง (He and Gerpen, 2015)

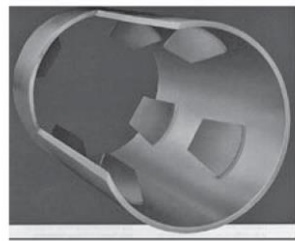
## 2.3 ท่อผสมแบบสถิต

ท่อผสมแบบสถิต (static mixer) หรือเครื่องผสมแบบสถิต เป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเคมี และอุตสาหกรรมอาหาร ประยุกต์ใช้ในการสกัด การทำปฏิกิริยา การเกิดอิมัลชัน การผสมระหว่างของเหลว-ของเหลว ของเหลว-แก๊ส และแก๊ส-แก๊ส เป็นต้น มักใช้ในกระบวนการแบบต่อเนื่อง (Chamayou *et al.*, 1996; Thakur *et al.*, 2003; Frascari *et al.*, 2008) โดยท่อผสมแบบสถิตจะประกอบด้วยไส้ท่อ (element mixing) ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์สำหรับผสม เป็นชิ้นส่วนที่ไม่มีการเคลื่อนที่ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ลักษณะของไส้ท่อผสมแบบสถิต ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และลักษณะของการประยุกต์ใช้งาน ดังแสดงในตารางที่ 2.1

สำหรับการประยุกต์ใช้ในการผลิตไปโอติเซล ซึ่งมีข้อดี คือ ลดปริมาณสารตั้งต้นและเวลาทำปฏิกิริยา มีการใช้พลังงานลดลงส่งผลให้ต้นทุนการผลิตลดลง และลดการบำรุงรักษาของอุปกรณ์ (Alamsyah *et al.*, 2010; Alam and Kim, 2014; Bockelmann and Barz, 2015) โดยการใช้ท่อผสมแบบสถิตในการผสม ทำให้เกิดการผสมดีขึ้น เนื่องจากความเข้มของการถ่ายเทมวลสูง เท่ากับ 97% (Al Taweel, *et al.*, 2013) และสำหรับงานวิจัยนี้ใช้ท่อผสมชนิด kenics static mixer เนื่องจากสามารถประยุกต์ใช้กับการผสมระหว่างของเหลว-ของเหลว ได้ดี และสร้างได้ง่ายกว่า element mixing รูปแบบอื่น ๆ



รูปที่ 2.5 ลักษณะการไหลผสมด้วยท่อผสมแบบสถิต (Ambanmba, 2012)

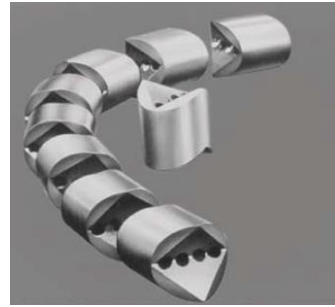


HEV

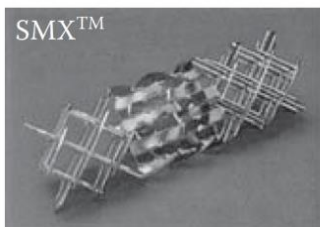
(ก)



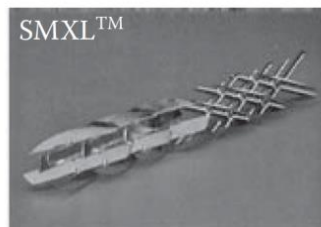
KM



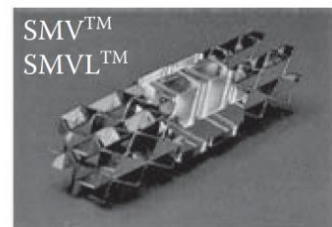
(ข)



SMX™

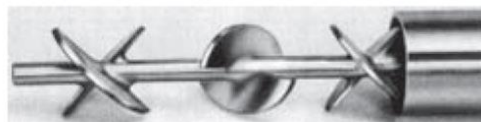


SMXL™



SMV™  
SMVL™

(ค)



LPD



LLPD

(ง)

รูปที่ 2.6 รูปแบบของ mixing element (Albright, 2008)

(ก) Chemineer Kenics static mixers, (ข) Ross ISG static mixer, (ค) Sulzer or Koch static mixers และ (ง) Ross static mixers

ตารางที่ 2.1 ลักษณะการประยุกต์ใช้งานของท่อผสมแบบสถิตชนิดต่าง ๆ (Albright, 2008)

Mixer	Laminar mixing		Turbulent mixing			
	L-L blending	S-L blending	G-G, blending	L-L dispersion	L-L dispersion	G-L dispersion
Kenics KM	✓	-	✓	✓	✓	✓
Kenics HEV	-	-	✓	-	-	-
Sulzer or Koch SMX	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Sulzer or Koch SMXL	✓	✓	-	-	-	-
Sulzer or Koch SMV	-	-	✓	✓	✓	✓
Ross LPD or LLPD	✓	-	-	✓	✓	✓
Ross ISG	✓	✓	-	-	-	-
Komax mixer	-	-	✓	✓	✓	✓
Komax ultramixer	✓	-	-	-	-	-

หมายเหตุ: L คือ ของเหลว, S คือ ของแข็ง และ G คือ แก๊ส

## 2.4 คลื่นเสียงอัลตราโซนิก

คลื่นเสียงอัลตราโซนิก (ultrasound) แบ่งออกเป็นคลื่นเสียงความถี่สูงอยู่ในช่วง 2-10 MHz และคลื่นเสียงความถี่ต่ำอยู่ในช่วง 20-100 kHz (Mason and Lorimer, 2002) ซึ่งคลื่นเสียงอัลตราโซนิกความถี่ต่ำนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล โดยสามารถเพิ่มอัตราการเปลี่ยนเป็นไบโอดีเซล เพิ่มปริมาณผลได้ ลดเวลาทำปฏิกิริยา ลดปริมาณการใช้สารเคมี และลดต้นทุนในการผลิต โดยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกจะทำให้เกิดปรากฏการณ์แคปิวเทชัน (cavitation) (Veljković *et al.*, 2012)

### 2.4.1 ปรากฏการณ์แคปิวเทชัน

คลื่นเสียงอัลตราโซนิกทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านเคมีและทางกายภาพในตัวกลาง โดยการบีบอัด (compression) และขยายตัว (rarefaction) ในระดับโมเลกุลเข้าไปเข้ามาหลายรอบจนทำให้เกิดฟองอากาศ ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งระยะระหว่างโมเลกุลจะเกิดการสั่น และแลกเปลี่ยนแก๊สจนทำให้เกิดฟองอากาศที่มีขนาดใหญ่จนกระทั่งระเบิดทำให้มีอุณหภูมิสูงถึง 5,000°C และความดัน 2,000 atm เนื่องจากระหว่างเกิดการบีบอัดและขยายตัวของฟองอากาศจะเกิดสมดุลระหว่างความดันไอทั้งภายในและภายนอก อีกทั้งพื้นที่ผิวของฟองอากาศขณะเกิดการขยายตัวมีมากกว่าพื้นที่ผิวของฟองอากาศขณะเกิดการบีบอัดตัว จึงทำให้มีการซึมผ่านของแก๊สระหว่างการขยายตัวมากกว่า และขยายตัวเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น โดยอัตราการซึมผ่านของแก๊สระหว่างการขยายตัวกับระหว่างบีบอัดในแต่ละรอบจะมีค่ามากขึ้นจนมีขนาดเรโซแนนซ์ ทำให้เกิดช่องว่างในฟองอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างรวดเร็วในหนึ่งรอบการสั่น จนเกิดการควบแน่นทันทีและเกิดการชนกันอย่างรวดเร็วระหว่างโมเลกุล ทำให้เกิดคลื่นกระแทก (shock waves) ซึ่งมีอุณหภูมิและความดันสูงมาก และ

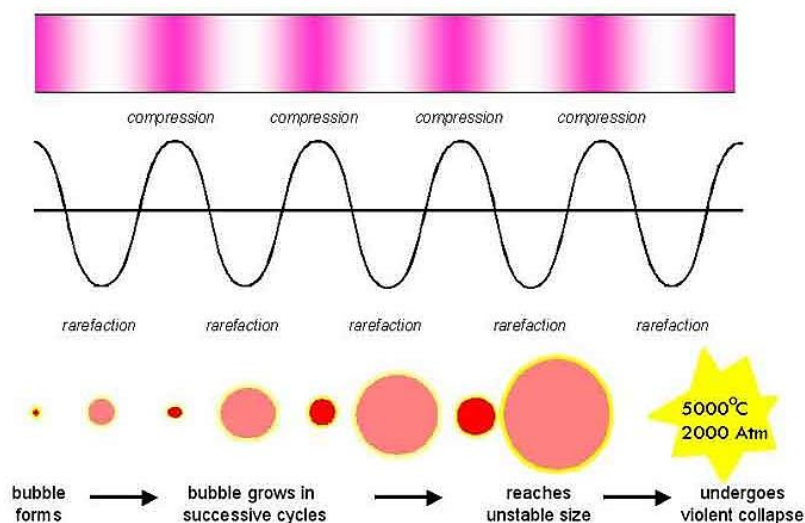
พื้นที่ที่ฟองอากาศระเบิดจะมีการปลดปล่อยพลังงานที่ใช้แรงปฏิกิริยา (Sala *et al.*, 1995; Suslick, 1988; Santos *et al.*, 2009) ซึ่งแคปิวิตีชันแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ แคปิวิตีชันแบบถาวร และ แคปิวิตีชันแบบชั่วคราว (Carstensen, 2004)

#### 2.4.1.1 แคปิวิตีชันแบบถาวร

เมื่อของเหลวหรือตัวกลางได้รับคลื่นเสียงอัลตราโซนิกด้วยการสั่นแกว่ง (oscillate) หลายรอบ แต่ฟองอากาศไม่ระเบิดออกซึ่งอาจจะเพิ่มขนาดขึ้นจนถึงขนาดเรโซแนนซ์ (resonance size) โดยขนาดของฟองอากาศที่มีความถี่ธรรมชาติเท่ากับความถี่ในการสั่นแบบบังคับ เรียกว่า แคปิวิตีชันแบบถาวร (stable cavitation)

#### 2.4.1.2 แคปิวิตีชันแบบชั่วคราว

แคปิวิตีชันแบบชั่วคราว (transient cavitation) เกิดขึ้นในช่วงที่ฟองอากาศของของเหลวได้รับความเครียด โดยเกิดการบีบอัดขณะที่ฟองอากาศขยายตัวจนทำให้เกิดการระเบิดอย่างรวดเร็ว หรือเกิดจากฟองอากาศมีการสั่นแกว่งและขยายขนาดอย่างคงที่ในช่วงเวลาหนึ่ง และเกิดการระเบิดอย่างรวดเร็วเมื่อฟองอากาศขยายจนถึงขนาดจำเพาะ



รูปที่ 2.7 การเกิดฟองอากาศและการระเบิดภายในของโมเลกุล (Electrowave, 2017)

#### 2.4.2 ตัวแปลงสัญญาณของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก

ตัวแปลงสัญญาณ (transducer) ของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก ทำหน้าที่ แปลงสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกล ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ ตัวแปลงสัญญาณที่ขับเคลื่อนด้วยของเหลว ตัวแปลงสัญญาณชนิดแมกนีโทสตริกทิฟ และตัวแปลงสัญญาณชนิดโซโนอิเล็กตริก

#### 2.4.1.1 ตัวแปลงสัญญาณที่ขับเคลื่อนด้วยของเหลว

ตัวแปลงสัญญาณที่ขับเคลื่อนด้วยของเหลว (liquid driven transducer) เป็นตัวแปลงสัญญาณที่ทำให้เกิดคลื่นอัลตราโซนิกได้โดยการบังคับของเหลวให้เคลื่อนที่ผ่านช่องขนาดเล็กและไปกระทบกับแผ่นโลหะขนาดบาง (thin blade) ซึ่งวางอยู่ในทิศการเคลื่อนที่ของของเหลว ทำให้แผ่นโลหะนั้นเกิดการสั่นไปมา ในการสั่นแต่ละครั้งจะทำให้ผิวหน้าของแผ่นโลหะเกิดการปะทะกับของเหลวเป็นผลทำให้เกิดคลื่นความดันขึ้น และทำให้เกิดปรากฏการณ์แคปพิเทชันขึ้นภายในของเหลวนั้น การเกิดคลื่นความดันสลับกับแคปพิเทชันเป็นผลทำให้ของเหลวสามารถผสมเข้ากันได้ดียิ่งขึ้น (Mason, 1990)

#### 2.4.1.2 ตัวแปลงสัญญาณชนิดแมกนีโทสตริกทิฟ

ตัวแปลงสัญญาณชนิดแมกนีโทสตริกทิฟ (magnetostrictive transducer) เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกล โดยใช้คุณสมบัติแมกนีโทสตริกชัน (magnetostriction) ซึ่งเป็นผลมาจากการที่สารเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic materials) เช่น นิกเกิล (nickel) หรือเหล็ก (iron) เกิดการเปลี่ยนแปลงของขนาดเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก (magnetic field) ลักษณะของตัวแปรสัญญาณชนิดนี้คล้ายกับโซลินอยด์ (solenoid) ที่ใช้สารเฟอร์โรแมกเนติกเป็นแกน โดยแกนดังกล่าวประกอบขึ้นจากแผ่นนิกเกิล หรือนิกเกิลอัลลอย (nickel alloy) ที่มีขนาดบางจำนวนหลายชั้นโดยรูปที่ง่ายที่สุดจะมีลักษณะเป็นวงสี่เหลี่ยมที่พันด้วยลวดทองแดงในแต่ละด้านที่อยู่ตรงกันข้าม (Mason, 1990)

#### 2.4.1.3 ตัวแปลงสัญญาณชนิดเพียโซอิเล็กตริก

ตัวแปลงสัญญาณชนิดเพียโซอิเล็กตริก (piezoelectric transducer) เป็นตัวแปลงสัญญาณที่นิยมใช้กันทั่วไปในการทำให้เกิดคลื่นเสียงอัลตราโซนิก โดยการใช้เซรามิกส์ (ceramics) ที่มีคุณสมบัติของสารเพียโซอิเล็กตริก (piezoelectric materials) เช่น แบเรียมไทแทนเตต (barium titanate) หรือเลดเมตาไนโอเบต (lead metaniobate) ซึ่งนิยมใช้ในเครื่องอัลตราโซนิกที่ใช้ทำความสะอาดสิ่งสกปรกโดยใช้ร่วมกับระบบโพรบ (probe systems) ซึ่งจะมีลักษณะเป็นแผ่นกลม มีรูตรงกลางของตัวแปลงสัญญาณ เซรามิกส์นี้จะมีเปราะและแตกหักง่ายมาก ดังนั้น จึงต้องใช้แท่งโลหะมาประกบทั้งทางด้านหน้าและด้านหลัง เพื่อช่วยป้องกันการแตกหักและป้องกันความเสียหายที่เกิดจากความร้อนส่วนเกิน โดยทำหน้าที่เป็นตัวรับความร้อน โดยทั่วไปโครงสร้างของตัวแปลงสัญญาณชนิดนี้จะประกบกันโดยใช้แผ่นเพียโซเซรามิกสองชนิด เรียกว่า sandwich construction ซึ่งจะทำให้การสั่นสะเทือนเพิ่มมากขึ้นกว่าการใช้เพียงชนิดเดียว ซึ่งมีข้อดีคือ ประสิทธิภาพในการใช้กระแสไฟฟ้าสูงกว่า 95% และสามารถปรับใช้งานได้ทุกช่วงของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก (Mason, 1990)

### 2.4.3 การประยุกต์ใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิก

การประยุกต์ใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิกสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ ได้แก่ อัลตราโซนิกแบบอ่างอัลตราโซนิก อัลตราโซนิกแบบโพรบ และอัลตราโซนิกแบบเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ และสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 2.2

#### 2.4.3.1 คลื่นเสียงอัลตราโซนิกแบบอ่างอัลตราโซนิก

คลื่นเสียงอัลตราโซนิกแบบอ่างอัลตราโซนิก (ultrasonic cleaning bath) มีความถี่อยู่ในช่วง 15-40 kHz และกำลังของคลื่นเสียงอัลตราโซนิกต่อพื้นที่อยู่ในช่วง 1-2 W.cm<sup>-2</sup> สามารถประยุกต์ใช้ได้ในระดับห้องปฏิบัติการไปจนถึงระดับอุตสาหกรรม เนื่องจากมีราคาไม่แพง ทั่วไปมีการติดตั้งตัวแปลงสัญญาณไว้บริเวณด้านข้างหรือด้านล่างของอ่าง และใช้ของเหลวเป็นตัวกลางสำหรับการกระจายพลังงาน โดยปริมาณพลังงานขึ้นอยู่กับระดับความลึกของอ่าง ซึ่งข้อเสียของคลื่นเสียงชนิดนี้ คือ พลังงานต่ำ เนื่องจากมีการสูญเสียพลังงานส่วนใหญ่ให้กับของเหลว และการกระจายพลังงานไม่สม่ำเสมอ จึงจำเป็นต้องใช้ร่วมกับอุปกรณ์อื่นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน เช่น มอเตอร์กวน เป็นต้น (Mason, 1990; Jenderka *et al.*, 2006) และการประยุกต์ใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิกแบบอ่างอัลตราโซนิกในการผลิตไบโอดีเซลแสดงได้ ดังรูปที่ 2.8

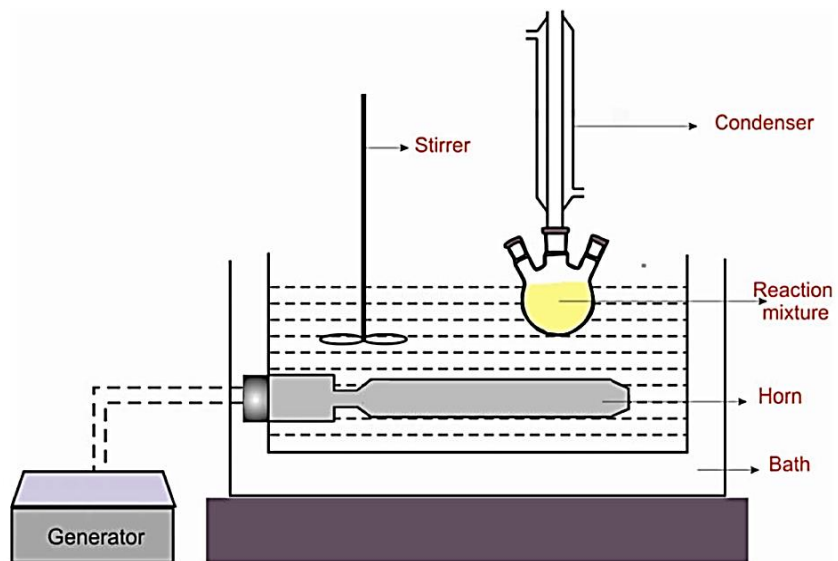
#### 2.4.3.2 คลื่นเสียงอัลตราโซนิกแบบโพรบ

คลื่นเสียงอัลตราโซนิกแบบโพรบ (ultrasonic probe) มีลักษณะคล้ายกับอ่างอัลตราโซนิก แต่มีข้อแตกต่าง คือ คลื่นเสียงอัลตราโซนิกแบบโพรบจะจุ่มลงในสารทำปฏิกิริยาโดยตรง ซึ่งมีการกระจายความเข้มของอัลตราโซนิก (ultrasonic intensity) สูงกว่าประมาณ 100 เท่า โดยโพรบของอัลตราโซนิกทำมาจากไทเทเนียมอัลลอย (titanium alloy) ซึ่งมีคุณสมบัติ คือ มีความทนทานต่อการกัดกร่อน และใช้งานได้กับอุณหภูมิสูง (Mason, 1990; Jenderka *et al.*, 2006) โดยอัลตราโซนิกแบบโพรบสามารถประยุกต์ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล แสดงได้ดังรูปที่ 2.9

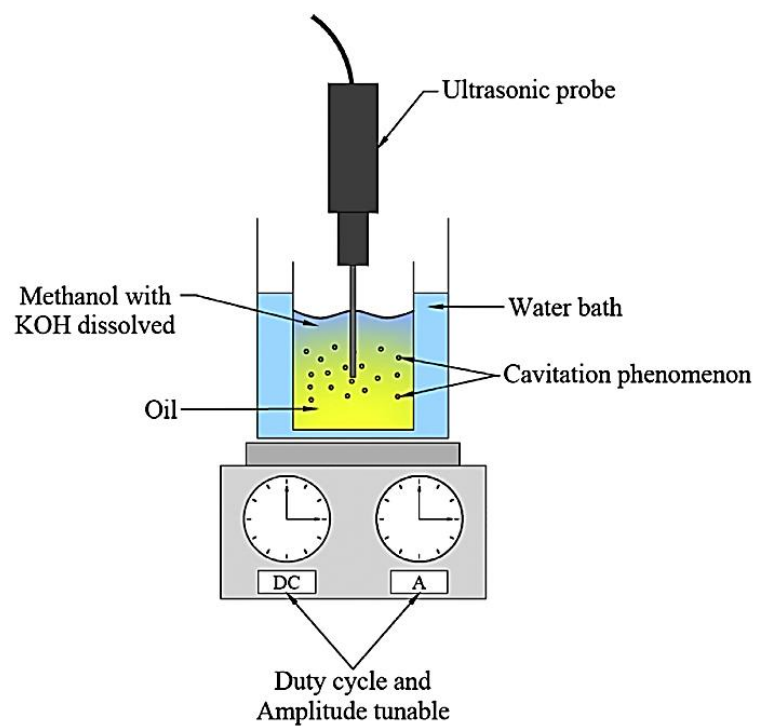
#### 2.4.3.3 คลื่นเสียงอัลตราโซนิกแบบท่อ

คลื่นเสียงอัลตราโซนิกแบบท่อ (ultrasonic tubular reactor) เป็นระบบที่ดีที่สุดสำหรับการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเคมีที่มีกำลังการผลิตขนาดใหญ่ โดยมีการติดตั้งตัวแปลง บริเวณผนังรอบท่อ มีการประยุกต์ใช้ความรู้ทางด้านโลหะมาช่วยในการออกแบบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของตัวแปลงสัญญาณ สามารถใช้ได้กับงานที่ต้องการอัตราการไหลสูงโดยไม่มีปัญหาเรื่องการอุดตัน เนื่องจากพลังงานของคลื่นเสียงอัลตราโซนิกถูกเน้นไปที่กึ่งกลางของท่อ ซึ่งที่บริเวณผิวด้านในของท่อจะมีกำลังต่ำจึงลดปัญหาของการกัดกร่อนที่ผนังท่อ (Mason, 1990) สำหรับการประยุกต์ใช้อัลตราโซนิกแบบท่อแสดงได้ ดังรูปที่ 2.10

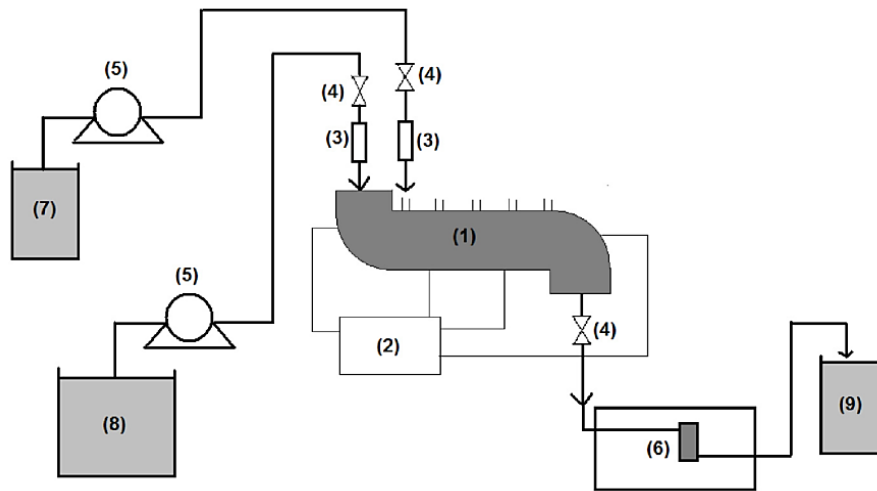




รูปที่ 2.8 การประยุกต์ใช้อัลตราโซนิกแบบอ่างอัลตราโซนิกในการผลิตไบโอดีเซล  
(Deshmane *et al.*, 2009)



รูปที่ 2.9 ชุดทดลองผลิตไบโอดีเซลด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกแบบ probe  
(Sáez-Bastante *et al.*, 2014)



รูปที่ 2.10 การประยุกต์ใช้อัลตราโซนิกแบบท่อ (Rahimi *et al.*, 2013)

(1: sonoreactor, 2: piezoelectric transducer actuator, 3: flow meter, 4: valve, 5: pump, 6: spectrophotometer, 7: sulfuric acid container, 8: base solution ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ,  $\text{NaOH}$ ,  $\text{KI}$ ,  $\text{KIO}_3$ ) container and 9: product container)

ตารางที่ 2.2 เครื่องปฏิกรณ์อัลตราโซนิกประเภทต่าง ๆ (Mason, 1990; Luo *et al.*, 2014)

Reactor	Frequency and Intensity	Advantages	Disadvantages
Ultrasonic bath	15 kHz-40 kHz, 1-2 W.cm <sup>-2</sup>	- ต้นทุนต่ำ - เหมาะกับเชิงพาณิชย์	- การกระจายพลังงานของคลื่นไม่สม่ำเสมอ- ประสิทธิภาพการเกิดฟองอากาศต่ำ
Ultrasonic probe	20-504 kHz, >100 W.cm <sup>-2</sup>	- กำลังของคลื่นสูง - เหมาะกับเชิงพาณิชย์ - ความเข้มของพลังงานสูง	- เกิดการกัดกร่อนของโพรบได้ง่าย เนื่องจากสัมผัสกับสารเคมีโดยตรง - การกระจายพลังงานของคลื่นไม่สม่ำเสมอ - การควบคุมอุณหภูมิของปฏิกิริยาทำได้ยาก
Ultrasonic tubular reactor	17-45 kHz, >3 W.cm <sup>-2</sup>	- ลดปัญหาการกัดกร่อน - สารทำปฏิกิริยาผสมกันได้ดี - กำลังการผลิตสูง - พลังงานและความเข้มของพลังงานสูง	-

#### 2.4.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการประยุกต์ใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิก

##### 2.4.4.1 จำนวนและตำแหน่งของตัวแปลงสัญญาณ

จำนวนและตำแหน่งของตัวแปลงสัญญาณ (number and position of transducers) ของคลื่นเสียงอัลตราโซนิกที่ติดตั้งในเครื่องปฏิกรณ์มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำให้เกิดปรากฏการณ์แคปพิเตชัน และเป็นปัจจัยสำหรับการปรับทิศทางของการแผ่คลื่นอัลตราโซนิกเข้าไปในของเหลวเพื่อให้เกิดความสม่ำเสมอ (Sutkar and Gogate, 2009) โดยทั่วไปจะมีการออกแบบให้ติดตั้งบนเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์และตามระดับความสูงของของเหลว และสำหรับการติดตั้งตัวแปลงสัญญาณจำนวนหลายตัว หรือหลายความถี่ ส่วนใหญ่จะติดตั้งแบบ flow cell ซึ่งสามารถใช้ได้กับระบบแบบต่อเนื่อง โดยการติดตั้งกับผนังของเครื่องปฏิกรณ์แบบสี่เหลี่ยมหรือหกเหลี่ยมในทิศทางตรงกันข้าม ทำให้ช่วยเพิ่มความรุนแรงของแคปพิเตชันและกำลังการผลิต (Sutkar and Gogate, 2009; Gogate *et al.*, 2011; Asgharzadehahmadi *et al.*, 2016)

#### 2.4.4.2 ความถี่ของการแผ่รังสี

ความถี่ของการแผ่รังสี (frequency of irradiation) ของคลื่นเสียงอัลตราโซนิกเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับการประยุกต์ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์สำหรับการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งคลื่นเสียงอัลตราโซนิกที่มีความถี่ต่ำในช่วง 10-100 kHz มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งหากใช้คลื่นเสียงความถี่สูงจะให้เกิดการกักกรองของพื้นที่ผิวของตัวแปลงสัญญาณในระบบ และมีการใช้พลังงานสูง (Sutkar and Gogate, 2009) แต่การใช้คลื่นความถี่สูงสามารถกระทำร่วมกันได้กับคลื่นความถี่ต่ำจำนวนสอง หรือหลายความถี่ ทั้งนี้เพื่อเพิ่มความรุนแรงของการเกิดปรากฏการณ์แคปิตีชัน (Servant *et al.*, 2003; Yasui *et al.*, 2005)

#### 2.4.4.3 พลังงานของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก

ความเข้มของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก (ultrasonic intensity) ถูกกำหนดโดยปริมาณกำลังที่กระจายในของเหลวต่อหน่วยพื้นที่ของพื้นที่ผิวของการกระจายพลังงาน ซึ่งมีผลต่อปริมาณ ขนาด และเวลาของฟองอากาศในของเหลว ทำให้เกิดปรากฏการณ์แคปิตีชันได้ง่ายขึ้น (Gogate *et al.*, 2011) ซึ่งระดับพลังงานและกำลังของคลื่นเสียงอัลตราโซนิกที่กระจายไปยังของเหลวจะอยู่ในรูปของ กำลังของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก (ultrasound power, P) ความเข้มของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก (ultrasonic intensity, UI) และความหนาแน่นของพลังงาน (acoustic energy density, AED) และการเกิดปรากฏการณ์แคปิตีชันขึ้นอยู่กับปริมาตรของของเหลว หรือตำแหน่งการติดตั้งของโพรบ (O'Donnell *et al.*, 2010) โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1 และ 2.2 ช่วงของความหนาแน่นของพลังงานที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์แคปิตีชันที่ดี คือ 10-1000 W.cm<sup>-3</sup> (Feng *et al.*, 2008)

$$UI = \frac{P}{A} \quad (2.1)$$

$$AED = \frac{P}{V} \quad (2.2)$$

โดยที่ UI คือ ความเข้มของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก (W.cm<sup>-2</sup>) P คือ กำลังของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก (W) A คือ พื้นที่ผิว (cm<sup>2</sup>) AED คือ ความหนาแน่นของพลังงานของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก (W.mL<sup>-1</sup>) และ V คือ ปริมาตรของของเหลว (mL<sup>-1</sup>)

### บทที่ 3

## การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบสถิตร่วมกับคลื่นเสียงอัลตราโซนิก

### 3.1 คลื่นเสียงอัลตราโซนิก

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้เทคโนโลยีที่สำคัญ คือ คลื่นเสียงอัลตราโซนิก (ultrasound, US) มาใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์ม (palm fatty acid distillate, PFAD) ได้มีการศึกษาอิทธิพลของความถี่ (frequency, F) ของคลื่นเสียงอัลตราโซนิกที่มีความสามารถและความรุนแรงในการผสม โดยศึกษาความถี่ เท่ากับ 20, 25, 30 และ 50 kHz ควบคุมกำลังของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก เท่ากับ 400 W ใช้เงื่อนไขไซปริมาณเมทานอล เท่ากับ 45 vol.% ปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 5 vol.% และเวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 60 s ซึ่งจากตารางที่ 3.1 ความถี่ของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก เท่ากับ 20 kHz และเวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 10 s พบว่า เริ่มมีความรุนแรงที่สามารถผสมสารทำปฏิกิริยาให้เข้ากันได้ และสามารถผสมได้ดีจนเป็นเนื้อเดียวกันที่เวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 40 s ที่ความถี่คลื่นเสียงอัลตราโซนิก เท่ากับ 25 kHz สารทำปฏิกิริยาเริ่มมีการผสม และมีความรุนแรงตั้งแต่เวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 20 s และมีความรุนแรงในการผสมมากขึ้นที่เวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 50 s แต่กลับพบว่าไม่สามารถทำให้แตกตัวกรดซัลฟิวริกให้ผสมกับ PFAD และเมทานอลได้ โดยจะเห็นว่ากรดซัลฟิวริกตกอยู่ด้านล่างขวดแก้ว และสำหรับความถี่คลื่นเสียงอัลตราโซนิก เท่ากับ 30 และ 50 kHz ไม่เกิดการผสมของสารทำปฏิกิริยาในเวลา 60 s โดยทั่วไปช่วงของความถี่ที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล เท่ากับ 20-40 kHz และการเกิดปรากฏการณ์แคปพิเทชันลดลงเมื่อความถี่ของอัลตราโซนิกเพิ่มขึ้น (Zhao *et al.*, 2016) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกความถี่ของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก เท่ากับ 20 kHz มาใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD เนื่องจากมีความรุนแรงของการผสมที่สามารถแตกตัวกรดซัลฟิวริกซึ่งมีความหนาแน่น เท่ากับ  $1.84 \text{ kg}\cdot\text{L}^{-1}$  (Somnuk *et al.*, 2013) ให้ผสมกับ PFAD และเมทานอลได้

























จากการศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิกช่วยในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ิฟิเคชันโดยกระบวนการแบบกะ ได้แสดงผลการทดลองในหัวข้อ 5.1 ซึ่งสรุปได้ว่าคลื่นเสียงอัลตราโซนิกมีความเป็นไปได้ในการผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD และสามารถทำปฏิกิริยาได้ในเวลาที่รวดเร็ว แต่สำหรับการใช้โพรบของอัลตราโซนิกในการทำปฏิกิริยาโดยตรงทำให้เกิดการก่กร่อนได้ง่าย เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวมีการใช้กรดซัลฟิวริกในการเร่งปฏิกิริยา อีกทั้งไม่สามารถผลิตไบโอดีเซลได้ในปริมาณมาก ซึ่งหากต้องการขยายขนาดของกำลังการผลิตก็ต้องใช้ถังทำปฏิกิริยาที่มีขนาดใหญ่ และต้องใช้กำลังของคลื่นเสียงอัลตราโซนิกสูงตามปริมาณการผสมที่เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิกเพิ่มขึ้นด้วย งานวิจัยนี้จึงได้เสนอการแก้ปัญหาของกระบวนการผลิตขนาดใหญ่ คือ ระบบผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง โดยการติดตั้งตัวแปลงสัญญาณของคลื่นเสียงอัลตราโซนิกตามความยาวของผนังท่อ โดยระบบการผลิตไบโอดีเซลด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกแบบท่อ มีข้อดี คือ อัตราการไหลสูง สามารถผลิตไบโอดีเซลได้ในปริมาณมาก ใช้ได้กับของเหลวที่มีความหนืดสูงโดยไม่มีปัญหาเรื่องการอุดตัน

พลังงานของคลื่นเสียงอัลตราโซนิกถูกเน้นไปที่กึ่งกลางของท่อ และสามารถลดปัญหาของการกัดกร่อนของโพรบ

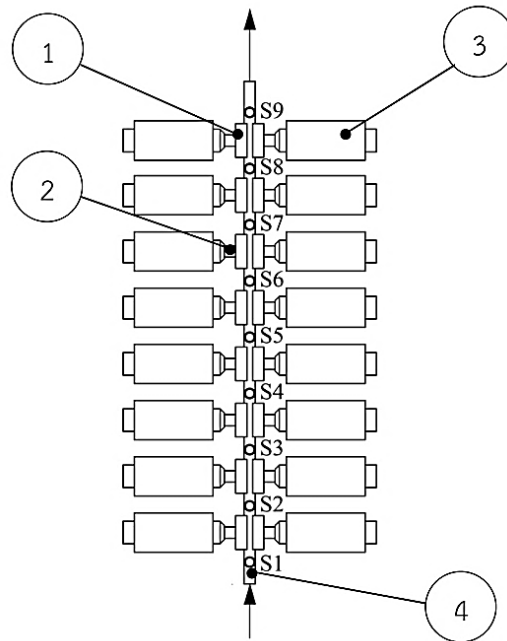
จากรูปที่ 3.1 แสดงการติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก โดยใช้ความยาวของท่อ เท่ากับ 1000 mm เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ เท่ากับ 15 mm ติดตั้งหัวอัลตราโซนิกโพรบ กำลังของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก เท่ากับ 400 W และความถี่ เท่ากับ 20 kHz จำนวน 16 หัว ซึ่งประเด็นที่ต้องระวังในการติดตั้งหัวอัลตราโซนิกให้แนบกับผนังท่อ คือ ตัวแปลงสัญญาณของอัลตราโซนิกต้องสัมผัสกับผนังท่อมากที่สุด โดยการออกแบบตัวขยายสัญญาณ (amplitude) ซึ่งรับพลังงานของคลื่นจาก ultrasonic horn ซึ่งตัวขยายสัญญาณที่แนบติดกับผนังท่อจะต้องมีผิวเรียบจึงต้องใช้เครื่อง wire cut ที่มีความเที่ยงตรงและละเอียดสูง และติดตั้งโพรบของอัลตราโซนิกให้มีระยะห่างของแต่ละตัว เท่ากับ 100 mm โดยการติดตั้งเป็นคู่ และแต่ละคูมีการปรับความถี่ไม่เท่ากัน โดยมีค่าคลาดเคลื่อนของความถี่ เท่ากับ  $\pm 2$  เพื่อป้องกันการหักล้างกันของคลื่นหากอยู่ตรงข้ามกัน สำหรับภายในของท่อได้ใส่ท่อผสม (element mixing) โดยใช้แผ่นสแตนเลสหนา เท่ากับ 2 mm และอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้าง เท่ากับ 1.5 mm ปิดเป็นเกลียวทำมุม เท่ากับ  $180^\circ$  จากนั้นเชื่อมต่อกันระหว่างเอลิเมนต์ ทำมุม เท่ากับ  $90^\circ$  โดยเอลิเมนต์ชนิดนี้ เรียกว่า twisted-ribbon ซึ่งมีความยาว เท่ากับ 15 mm และเส้นผ่านศูนย์กลาง เท่ากับ 10 mm เพื่อใช้ในการช่วยผสม PFAD เมทานอล และกรดซัลฟิวริก เมื่อไหลผ่านท่อโดยการป้อนสารทำปฏิกิริยาเข้าเครื่องปฏิกรณ์อัลตราโซนิก

การศึกษาอิทธิพลของการใช้ท่อผสมแบบสถิตร่วมกับคลื่นเสียงอัลตราโซนิก โดยการใช้น้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์ (refined palm oil, RPO) และออกแบบการทดลอง 4 การทดลอง คือ การไหลผ่านท่อกลง (plug flow, PF) การใช้ท่อผสมแบบสถิต (static mixer, SM) การใช้คลื่นอัลตราโซนิก (ultrasound, US) และการใช้ท่อผสมแบบสถิตร่วมกับอัลตราโซนิก (static mixer couple with ultrasound, SM/US) ที่เงื่อนไขปริมาณเมทานอล เท่ากับ 20 vol.% และแปรค่าปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 4 และ 12  $\text{g.L}^{-1}$  อัตราการไหลของ RPO เท่ากับ  $20 \text{ L.h}^{-1}$  และอุณหภูมิทำปฏิกิริยา เท่ากับ  $60^\circ\text{C}$  ซึ่งจะแสดงผลการทดลองในหัวข้อ 5.3 ซึ่งสรุปได้ว่าเมื่อใช้ SM ร่วมกับ US ทำให้ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ลดลง เนื่องจาก SM ไปดูดซับคลื่นเสียงอัลตราโซนิก ทำให้ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนกลีเซอไรด์เป็นไบโอดีเซลลดลง จึงไม่ควรที่จะนำมาใช้ร่วมกัน แต่อย่างไรก็ตามก็ได้ทดลองใช้ PFAD เป็นวัตถุดิบเพื่อศึกษาอิทธิพลของการใช้ SM ร่วมกับ US โดยใช้เงื่อนไขปริมาณเมทานอล เท่ากับ 45 vol.% ปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 5 vol.% และอัตราการไหลของ PFAD เท่ากับ  $25 \text{ L.h}^{-1}$  จากรูปที่ 3.2 พบว่า การใช้ SM ร่วมกับ US ก็ทำให้ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ลดลงเนื่องจากการติดตั้งท่อผสมแบบสถิตในเครื่องปฏิกรณ์อัลตราโซนิกทำให้เกิดการดูดซับของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก ทำให้ประสิทธิภาพของอัลตราโซนิกลดลง ซึ่งสอดคล้องกับกรณีที่ใช้ RPO ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงไม่มีการใส่ SM ไว้ในท่อที่มีการติดตั้งคลื่นเสียงอัลตราโซนิก

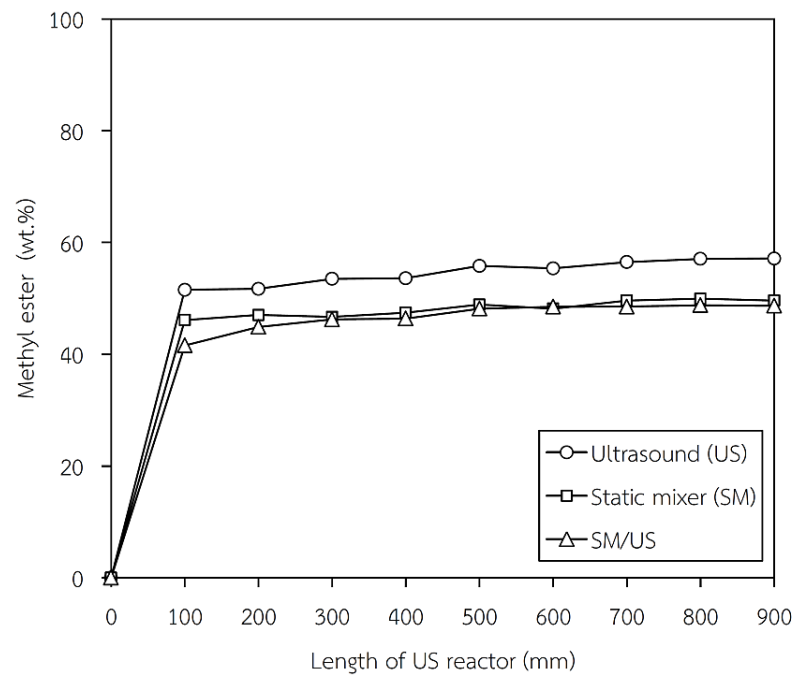
ตารางที่ 3.1 ลักษณะของการผสมของสารทำปฏิกิริยาระหว่างส่วนกลั่นกรดไซปาล์ม เมทานอล และ กรดซัลฟิวริก โดยใช้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ที่กำลังของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก เท่ากับ 400 W และ ความถี่ เท่ากับ 20, 25, 30 และ 50 kHz

F (kHz)	Time (s)					
	10	20	30	40	50	60
20						
25						
30						
50						

หมายเหตุ: F คือ ความถี่ (frequency)



รูปที่ 3.1 การติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์อัลตราโซนิกแบบท่อ  
(1: ตัวขยายสัญญาณ, 2: โพรบของอัลตราโซนิก, 3: ตัวแปลงสัญญาณ, 4: ท่ออัลตราโซนิก  
และ S1-S9: ตำแหน่งเก็บตัวอย่าง)

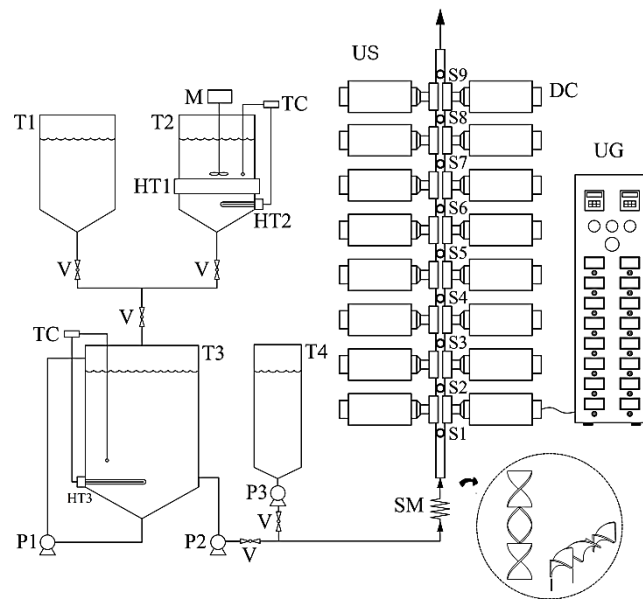


รูปที่ 3.2 ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์จาก PFAD ที่เงื่อนไขปริมาณเมทานอล เท่ากับ 45 vol.% ปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 5 vol.% และอัตราการไหลของ PFAD เท่ากับ 25 L.h<sup>-1</sup>

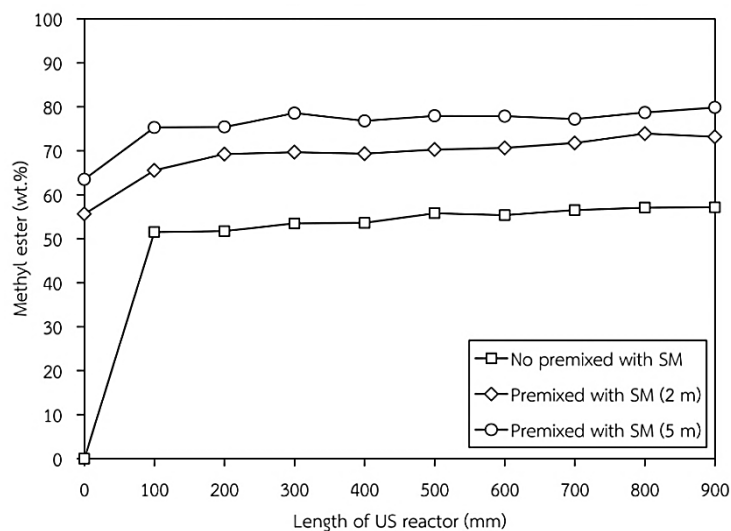


### 3.2 ท่อผสมแบบสตีตชนิดขดเกลียว

จากการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบสตีตชนิดขดเกลียว พบว่า ที่เงื่อนไขปริมาณเมทานอล เท่ากับ 45.1 vol.% ปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 5.7 vol.% และความยาวของท่อผสมแบบสตีตชนิดขดเกลียว เท่ากับ 5 m สามารถผลิตไบโอดีเซลได้ความบริสุทธิ์ เท่ากับ 71.013 vol.% สำหรับขั้นตอนที่ 1 (ณัฐพล, 2017) ด้วยเหตุผลดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจนำท่อผสมแบบสตีตชนิดขดเกลียวมาช่วยในการผสม PFAD เมทานอล และกรดซัลฟิวริก ก่อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์อัลตราโซนิก โดยคาดว่าสามารถลดการใช้ปริมาณสารเคมี และการใช้พลังงานของคลื่นเสียงอัลตราโซนิกได้ จึงได้มีการศึกษาและเปรียบเทียบผลของการใช้ท่อผสมแบบสตีตชนิดขดเกลียว โดยออกแบบการทดลอง 3 การทดลอง คือ กรณีไม่ใช้ท่อผสมแบบสตีตชนิดขดเกลียว กรณีใช้ท่อผสมแบบสตีตชนิดขดเกลียว 2 m และกรณีใช้ท่อผสมแบบสตีตชนิดขดเกลียว 5 m โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ใช้เงื่อนไขปริมาณเมทานอล เท่ากับ 45 vol.% ปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 5 vol.% และอัตราการไหลของ PFAD เท่ากับ 20 L.h<sup>-1</sup> จากรูปที่ 3.4 กรณีไม่ใช้ท่อผสมแบบสตีตชนิดขดเกลียว พบว่า ที่ความยาวของท่ออัลตราโซนิก เท่ากับ 100 mm สามารถได้ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ เท่ากับ 51.532 wt.% และได้ความบริสุทธิ์สูงสุด เท่ากับ 57.147 wt.% ที่ความยาวท่ออัลตราโซนิก เท่ากับ 900 mm กรณีใช้ท่อผสมแบบสตีตชนิดขดเกลียว 2 m ก่อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์อัลตราโซนิก พบว่า ได้ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ เท่ากับ 55.638 wt.% และเมื่อผ่านความยาวของท่ออัลตราโซนิก เท่ากับ 100 mm พบว่า ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์สูงขึ้น เท่ากับ 65.559 wt.% คิดเป็น 17.83% และเพิ่มขึ้นเท่ากับ 73.917 wt.% ที่ความยาวท่ออัลตราโซนิก เท่ากับ 800 mm และสำหรับกรณีใช้ท่อผสมแบบสตีตชนิดขดเกลียว 5 m ก่อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์อัลตราโซนิก พบว่า ได้ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ เท่ากับ 63.521 wt.% และเมื่อผ่านความยาวท่ออัลตราโซนิก 100 mm พบว่า ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์สูงขึ้น เท่ากับ 75.306 wt.% คิดเป็น 18.55% และเพิ่มขึ้นเป็น 77.940 wt.% ที่ความยาวท่ออัลตราโซนิก 500 mm และเข้าสู่ภาวะสมดุลเมื่อความยาวท่อเพิ่มขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ว่า กรณีใช้ท่อผสมแบบสตีตชนิดขดเกลียว 5 m สามารถผลิตเมทิลเอสเทอร์ได้สูงที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับ งานวิจัยของ (ณัฐพล, 2017) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ท่อผสมแบบสตีตชนิดขดเกลียว 5 m ก่อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์อัลตราโซนิก



รูปที่ 3.3 เครื่องปฏิกรณ์ผลิตไบโอดีเซลด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกร่วมกับคลื่นเสียงอัลตราโซนิก (T1: ถังเมทานอล, T2: ถัง PFAD, T3: ถังผสม, T4: ถังกรดซัลฟิวริก, P1: ปั๊มหมุนวน, P2, P3: ปั๊มต่อเนื่อง, M: มอเตอร์, HT1, HT2: ฮีตเตอร์, TC: เทอร์โมสตัส, V: วาล์ว, SM: ท่อผสมแบบสตีตชนิดชนิดเกลียว, US: เครื่องปฏิกรณ์อัลตราโซนิก, UG: ตู้กำเนิดอัลตราโซนิก, S1-S9: ตำแหน่งเก็บตัวอย่าง และ DC: พัดลมระบายความร้อน)



รูปที่ 3.4 ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์จาก PFAD ที่เงื่อนไขปริมาณเมทานอล เท่ากับ 45 vol.% ปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 5 vol.% และอัตราการไหลของ PFAD 25 เท่ากับ  $L.h^{-1}$  สำหรับกรณีไม่ใช้ท่อผสมแบบสตีตชนิดชนิดเกลียว กรณีใช้ท่อผสมแบบสตีตชนิดชนิดเกลียว 2 m และกรณีใช้ท่อผสมแบบสตีตชนิดชนิดเกลียว 5 m

### 3.3 ถังวัตถุดิบและสารเคมี

สำหรับถังวัตถุดิบและสารเคมี ได้ออกแบบให้เป็นรูปทรงกระบอก ซึ่งสามารถจัดสร้างได้ง่าย และส่วนของก้นถังจะมีลักษณะเป็นทรงกรวยเพื่อช่วยให้วัตถุดิบและสารเคมีไหลตกลงกันได้ง่าย โดยขนาดของถัง PFAD ถังเมทานอล และถังน้ำมันลดกรดไขมันอิสระ มีขนาดเท่ากับ 32 L ถังผสมระหว่าง PFAD กับเมทานอล มีขนาด เท่ากับ 60 L และถังของตัวเร่งปฏิกิริยามีขนาดเท่ากับ 6 L ซึ่งตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก และลักษณะของถังวัตถุดิบและสารเคมี แสดงในภาคผนวก ฉ

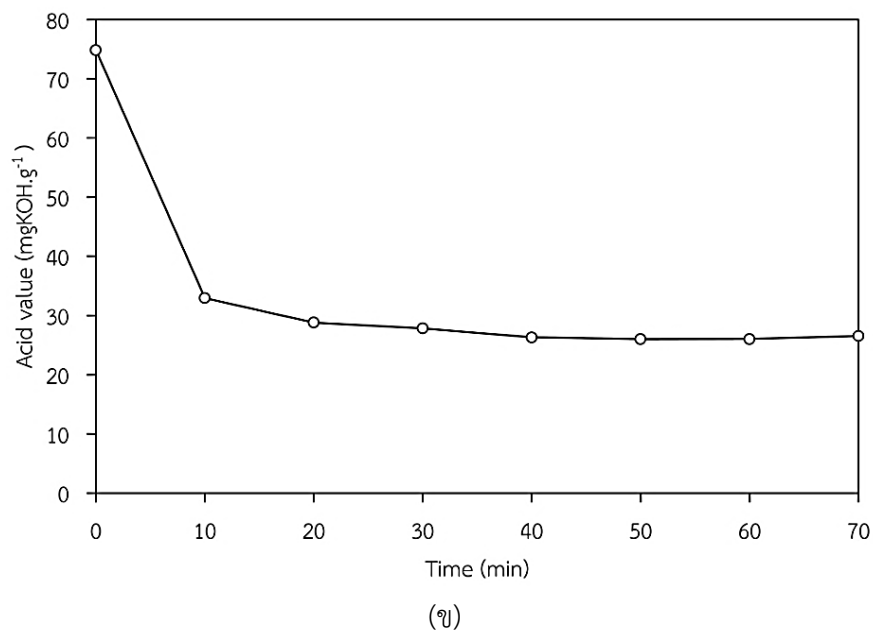
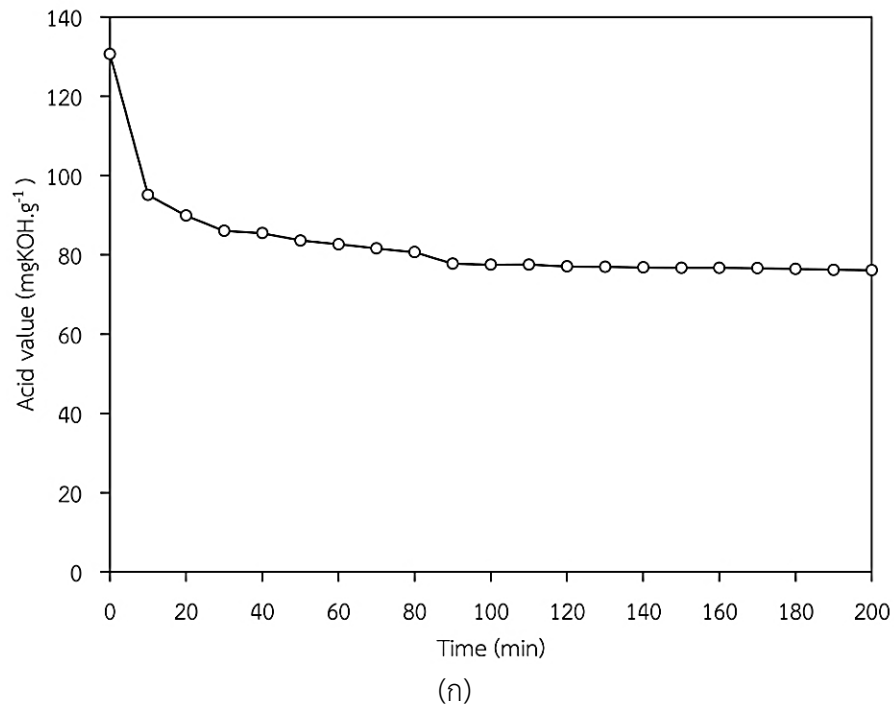
### 3.4 ถังแยกแบบต่อเนื่อง

สำหรับการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันจะได้ผลิตภัณฑ์ คือ เอสเทอร์หรือไบโอดีเซล และน้ำ ซึ่งน้ำจะมีความหนาแน่นมากกว่าจะแยกชั้นอยู่ด้านล่างและเอสเทอร์จะอยู่ด้านบน ซึ่งสำหรับการแยกชั้นที่สมบูรณ์สามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่า โดยพบว่า การแยกชั้นอย่างสมบูรณ์ของขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 2 จะใช้เวลา เท่ากับ 15 และ 10 min ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาค่าความเป็นกรด (acid value, AV) พบว่า AV ลดลงเมื่อเวลาของการแยกชั้นเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการทำปฏิกิริยายังไปข้างหน้าและยังไม่เสร็จสมบูรณ์ จึงได้มีการทดสอบหา AV ด้วยการไทเทรตน้ำมันลดกรดไขมันอิสระที่ยังไม่ผ่านกระบวนการล้าง โดยขั้นตอนที่ 1 จากรูปที่ 3.5(ก) พบว่า AV มีค่า เท่ากับ 77.78 mgKOH.g<sup>-1</sup> ที่เวลาการแยกชั้น เท่ากับ 90 min และเข้าสู่สมดุลเมื่อเวลาของการแยกชั้นเพิ่มขึ้น และขั้นตอนที่ 2 จากรูปที่ 3.5(ข) พบว่า AV มีค่า เท่ากับ 22.87 mgKOH.g<sup>-1</sup> ที่เวลาการแยกชั้น เท่ากับ 40 min และเข้าสู่สมดุลเมื่อเวลาของการแยกชั้นเพิ่มมากขึ้น และสำหรับขั้นตอนที่ 3 ซึ่งใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์ คือ เอสเทอร์ และกลีเซอรอล โดยการแยกชั้นของขั้นตอนที่ 3 นี้ จะใช้การสังเกตด้วยสายตา พบว่า เริ่มมีการแยกชั้นของกลีเซอรอลหลังจากผ่านเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก และแยกชั้นเสร็จสมบูรณ์โดยใช้เวลา เท่ากับ 30 min ซึ่งสำหรับเวลาการแยกชั้นสามารถนำไปใช้ในการออกแบบถังแยกแบบต่อเนื่อง และได้ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก และลักษณะของถังวัตถุดิบและสารเคมี แสดงในภาคผนวก ฉ

สำหรับการแยกชั้นของขั้นตอนที่ 1 ที่เงื่อนไขแนะนำ คือ ปริมาณเมทานอล เท่ากับ 45.7 vol.% และปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 7 vol.% ใช้เวลาในการแยกชั้นของเมทิลเอสเทอร์กับน้ำ เท่ากับ 90 min เมื่อกำหนดอัตราการไหลของ PFAD เท่ากับ 25 L.h<sup>-1</sup> ทำให้อัตราการไหลรวมของ PFAD เมทานอล และกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 38.2 L.h<sup>-1</sup> สามารถคำนวณขนาดของถังแยกแบบต่อเนื่องของขั้นตอนที่ 1 ได้อย่างน้อย เท่ากับ 57.3 L

ถังแยกแบบต่อเนื่องของขั้นตอนที่ 2 ที่เงื่อนไขแนะนำ คือ ปริมาณเมทานอล เท่ากับ 59.6 vol.% และปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 3.1 vol.% มีอัตราการไหลรวมของสารเคมี เท่ากับ 40.7 L.h<sup>-1</sup> และเวลาในการแยกชั้น เท่ากับ 40 min สามารถคำนวณขนาดของถังแยกได้อย่างน้อย เท่ากับ 27.1 L และถังแยกของขั้นตอนที่ 3 ที่เงื่อนไขแนะนำ คือ ปริมาณเมทานอล เท่ากับ 13.4 vol.% และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 4 g.L<sup>-1</sup> มีอัตราการไหลของสารเคมีรวม เท่ากับ

28.3 L.h<sup>-1</sup> และใช้เวลาในการแยกชั้นของเมทิลเอสเทอร์กับกลีเซอรอล เท่ากับ 30 min สามารถคำนวณขนาดถังแยกของขั้นตอนที่ 3 ได้อย่างน้อย เท่ากับ 14.1 L



รูปที่ 3.5 ค่าความเป็นกรดของน้ำมันลดกรดไขมันอิสระจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD  
(ก) ขั้นตอนที่ 1 และ (ข) ขั้นตอนที่ 2

## บทที่ 4

### อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

#### 4.1 วัตถุดิบ สารเคมี และอุปกรณ์ในการวิจัย

##### 4.1.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการวิจัย

4.1.1.1 น้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์ (refined palm oil, RPO) ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน เพื่อทดสอบความสามารถของระบบผลิตไบโอดีเซลด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบสถิตร่วมกับคลื่นเสียงอัลตราโซนิก เนื่องจากน้ำมัน RPO เป็นน้ำมันที่มีกรดไขมันอิสระต่ำและคงที่ สามารถผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันได้

4.1.1.2 ส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์ม (palm fatty acid distillate, PFAD) ใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตไบโอดีเซลด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบสถิตร่วมกับคลื่นเสียงอัลตราโซนิก ซึ่งสำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้ PFAD ทั้งการทดลองแบบกะเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตไบโอดีเซลด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิก และกระบวนการแบบต่อเนื่อง

##### 4.1.2 สารเคมีที่ใช้การผลิตไบโอดีเซล

4.1.2.1 เมทานอล (เกรดเชิงการค้าความบริสุทธิ์ 99%)

4.1.2.2 กรดซัลฟิวริก (เกรดเชิงการค้าความบริสุทธิ์ 98%)

4.1.2.3 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (เกรดเชิงการค้าความบริสุทธิ์ 95%)

##### 4.1.3 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมัน

4.1.3.1 ไอโซโพรพานอล (เกรดวิเคราะห์)

4.1.3.2 เฮกเซน (เกรดวิเคราะห์)

4.1.3.3 ไดเอทิลอีเทอร์ (เกรดวิเคราะห์)

4.1.3.4 กรดฟอร์มิก (เกรดวิเคราะห์)

4.1.3.5 เบนซีน (เกรดวิเคราะห์)

4.1.3.6 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (เกรดวิเคราะห์)

4.1.3.7 ฟีนอล์ฟทาลีน (เกรดวิเคราะห์)

#### 4.2 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

สำหรับงานวิจัยนี้ แบ่งการทดลองได้เป็น 4 การทดลอง คือ การทดลองผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกแบบกะ การทดลองผลิตไบโอดีเซลจากส่วน

กลั่นกรดไขมันแบบหมุนวนด้วยท่อผสมแบบสถิติชนิดขดเกลียว การทดลองผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์แบบต่อเนื่อง และการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก แบบ 3 ขั้นตอน

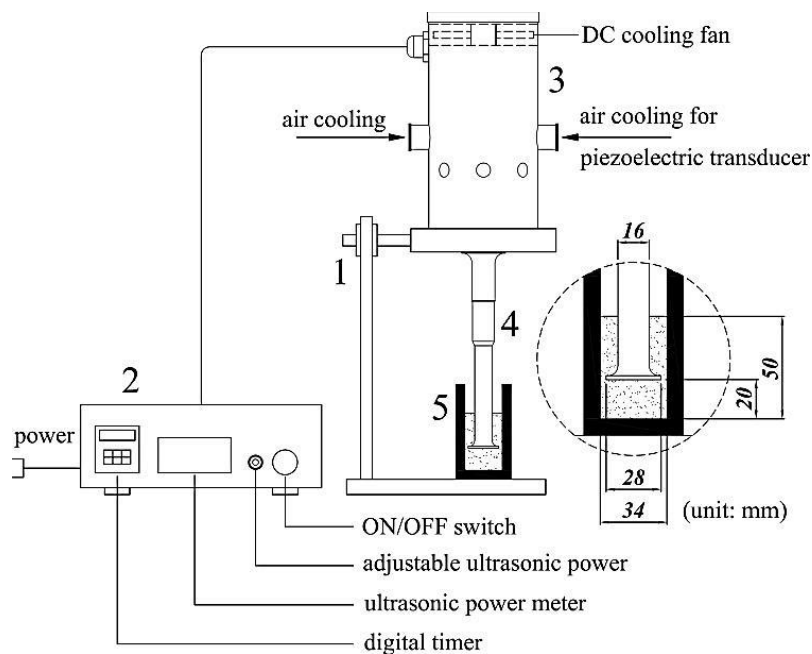
#### 4.2.1 การทดลองผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกแบบกะ

##### 4.2.1.1 อุปกรณ์ในการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกแบบกะ

จากรูปที่ 4.1 แสดงอุปกรณ์ในการทดลองศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิกในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ิฟิเคชันแบบกะ โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิกที่มีความถี่ เท่ากับ 18 kHz และกำลังของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก เท่ากับ 1000 W (model: AKHGZ-50420K)

##### 4.2.1.2 ขั้นตอนการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกแบบกะ

การทดลองนี้ได้ควบคุมเวลาในการทำปฏิกิริยา เท่ากับ 30 s แปรค่าปริมาณเมทานอล เท่ากับ 80, 90, 100, 150 และ 200 wt.% และแปรค่าปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 2.5, 5.0 และ 10.0 wt.% โดยเริ่มจากการเตรียม PFAD ปริมาณ เท่ากับ 200 g ในปิกเกอร์ขนาด 1000 mL จากนั้นนำไปให้ความร้อนจนละลายเป็นของเหลวที่อุณหภูมิ เท่ากับ 43°C พร้อมกวนด้วยแท่งแม่เหล็กกวนสาร (magnetic bar) ซึ่งจะใช้คู่กับเครื่องกวนสาร (magnetic stirrer) เพื่อให้อุณหภูมิของ PFAD เท่ากันทั้งปิกเกอร์ หลังจากนั้นจึงเติมเมทานอลที่เตรียมไว้ผสมกับ PFAD รอจนอุณหภูมิเท่ากับ 50°C จึงดูดสารผสมระหว่าง PFAD กับแอลกอฮอล์ด้วยปิเปตลงในเครื่องปฏิกรณ์ขวดแก้ว (glass reactor) หมายเลข 5 ปริมาณ เท่ากับ 30 mL พร้อมกับหยดกรดซัลฟิวริกตามสัดส่วนทดลองเข้าไปผสมกับสารผสมระหว่าง PFAD และเมทานอล จากนั้นจึงเปิดคลื่นเสียงอัลตราโซนิกเป็นเวลา เท่ากับ 30 s เมื่อปฏิกิริยาเสร็จสิ้นจึงเก็บตัวอย่าง และนำไปแช่น้ำเย็นที่อุณหภูมิ เท่ากับ 0°C ทันทีเพื่อหยุดอัตราการเกิดปฏิกิริยา หลังจากนั้นจึงนำไปโอดีเซลดิบไปล้างด้วยน้ำเพื่อกำจัดเมทานอล กรดซัลฟิวริก และสิ่งเจือปนต่างๆ ที่ตกค้างออก และนำไปอุ่นเพื่อระเหยน้ำที่ปะปนอยู่จากขั้นตอนการล้างเพื่อให้ได้ไบโอดีเซลบริสุทธิ์ เพื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบของไบโอดีเซล คือ ปริมาณเอสเทอร์ กรดไขมันอิสระ โมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ โดยใช้เทคนิค thin layer chromatography with flame ionization detection (TLC/FID) ในลำดับถัดไป



รูปที่ 4.1 เครื่องปฏิกรณ์อัลตราโซนิกชนิดโพรบแบบกะ  
(1: ขาตั้งของอัลตราโซนิกโพรบ, 2: แหล่งกำเนิดคลื่นเสียงอัลตราโซนิก, 3: ตัวแปลงสัญญาณ,  
4: ultrasonic horn และ 5: เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ)

4.2.2 การทดลองผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันแบบหมุนวนด้วยท่อผสมแบบสถิติชนิดขดเกลียว

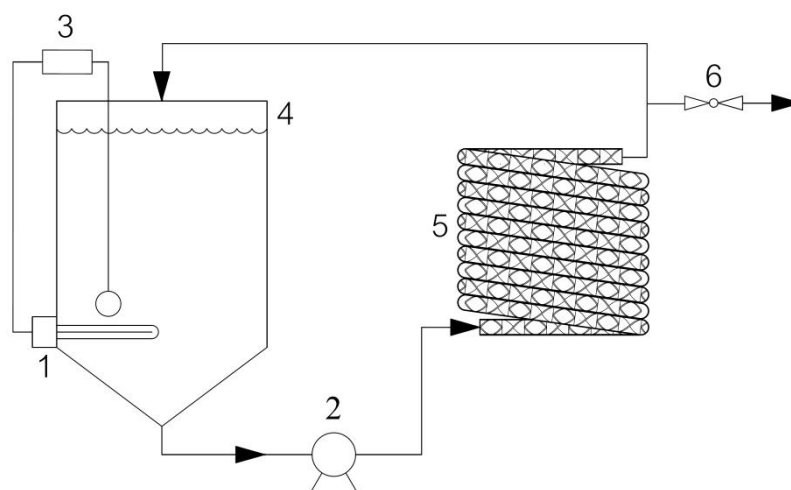
4.2.2.1 อุปกรณ์ในการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันแบบหมุนวนด้วยท่อผสมแบบสถิติชนิดขดเกลียว

จากรูปที่ 4.2 แสดงอุปกรณ์ในการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันแบบหมุนวนด้วยท่อผสมแบบสถิติชนิดขดเกลียว ซึ่งมีความยาว เท่ากับ 5 m โดย element mixing ที่ใส่ไว้ในท่อใช้แผ่นสแตนเลสหนา เท่ากับ 2 mm และอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้าง เท่ากับ 1.5 บิดเป็นเกลียวทำมุม เท่ากับ  $180^{\circ}$  จากนั้นเชื่อมต่อกันระหว่าง element mixing ทำมุม เท่ากับ  $90^{\circ}$  และ element mixing มีความยาว เท่ากับ 15 mm และเส้นผ่านศูนย์กลาง เท่ากับ 10 mm

4.2.2.2 ขั้นตอนการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันแบบหมุนวนด้วยท่อผสมแบบสถิติชนิดขดเกลียว

การทดลองผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD แบบหมุนวนด้วยท่อผสมแบบสถิติชนิดขดเกลียวใช้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน โดยแปรค่าปริมาณเมทานอล เท่ากับ 60, 80 และ

100 wt.% ปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 5, 10 และ 15 wt.% เวลาในการทำปฏิกิริยา 10-90 min และควบคุมอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เท่ากับ 60°C โดยเริ่มจากเตรียม PFAD ปริมาณ 2000 g ใส่ในถังปฏิกรณ์ หมายเลข 4 พร้อมเปิดฮีตเตอร์ หมายเลข 1 เพื่ออุ่น PFAD ให้ละลายเป็นของเหลว และเปิดปั๊มหมุนวนสารเคมี หมายเลข 2 ที่มีอัตราการไหล เท่ากับ 20 L.h<sup>-1</sup> จนกระทั่งอุณหภูมิถึง 60°C จึงเติมเมทานอลตามสัดส่วนทดลอง หมุนวน PFAD และเมทานอลให้ผสมกันด้วยท่อผสมแบบสถิติ หมายเลข 5 กระทั่งมีอุณหภูมิ เท่ากับ 50°C จึงเติมกรดซัลฟิวริกตามสัดส่วนทดลองเข้าในระบบ และเริ่มจับเวลาทันที จากนั้นเก็บตัวอย่างน้ำมันลดกรดที่เวลาทำปฏิกิริยา 10-90 min โดยเก็บทุก ๆ 10 min จากนั้นนำน้ำมันลดกรดไขมันอิสระแช่เย็นที่อุณหภูมิ เท่ากับ 0°C เพื่อหยุดอัตราการปฏิกิริยา และนำน้ำมันลดกรดมาล้างด้วยน้ำเพื่อกำจัดเมทานอล กรดซัลฟิวริก และสิ่งเจือปนต่างๆ ที่ตกค้างออก และนำไปอุ่นเพื่อระเหยน้ำที่ปะปนอยู่จากขั้นตอนการล้างเพื่อให้ได้ไบโอดีเซลบริสุทธิ์ และนำน้ำมันลดกรดไขมันอิสระไปวิเคราะห์หาค่าความเป็นกรดด้วยเทคนิคการไทเทรต ในลำดับถัดไป



รูปที่ 4.2 ชุดทดลองของเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบสถิติชนิดขดเกลียวแบบหมุนวน (1: ฮีตเตอร์, 2: ปั๊ม, 3: เทอร์โมสตัส, 4: ถังทำปฏิกิริยา, 5: ท่อผสมแบบสถิติชนิดขดเกลียว และ 6: ตำแหน่งเก็บตัวอย่าง)

4.2.3 การทดลองผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก

4.2.3.1 อุปกรณ์ในการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์แบบต่อเนื่อง

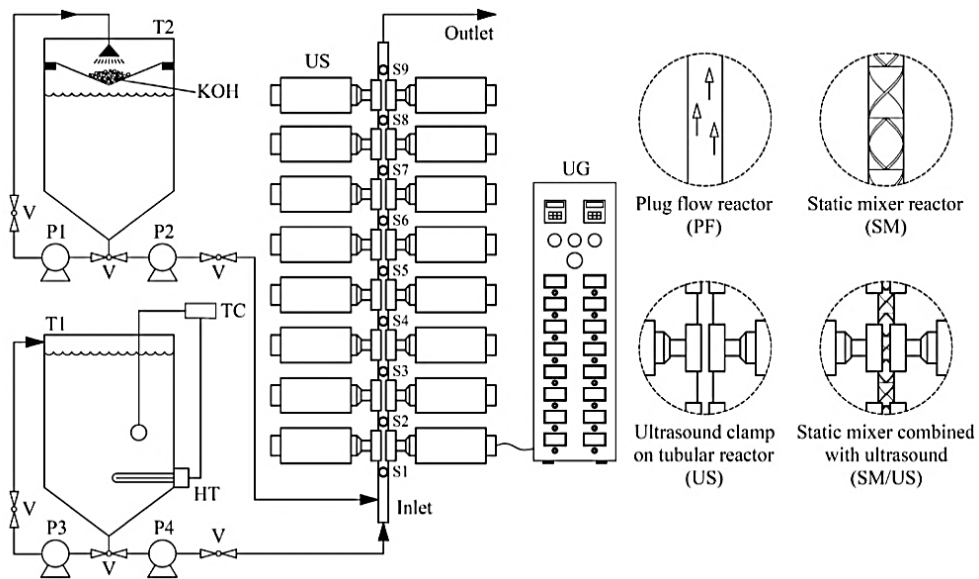
จากรูปที่ 4.3 แสดงอุปกรณ์ในการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์ (refined palm oil, RPO) แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก ซึ่งเป็นการทดลองเบื้องต้นเพื่อทดสอบผลของคลื่นเสียงอัลตราโซนิกที่มีต่อการเปลี่ยนโครงสร้างของ



กลีเซอไรด์เป็นเอสเทอร์หรือไบโอดีเซล โดยได้การออกแบบการทดลอง 4 การทดลอง คือ การไหลผ่านท่อกลวง (plug flow, PF) การใช้ท่อผสมแบบสถิต (static mixer, SM) การใช้คลื่นอัลตราโซนิก (ultrasound, US) และการใช้ท่อผสมแบบสถิตร่วมกับคลื่นเสียงอัลตราโซนิก (static mixer couple with ultrasound, SM/US) สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบสถิตใช้ความยาวของท่อ เท่ากับ 1000 mm มีเอลิเมนต์ใส่ไว้ในท่อเช่นเดียวกับเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบสถิตแบบหมุนวน และเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก ใช้ความยาวของท่อ เท่ากับ 1000 mm เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ เท่ากับ 15 mm ติดตั้งหัวอัลตราโซนิกชนิดโพรบ ขนาด 400 W และความถี่ เท่ากับ 20 kHz จำนวน 16 หัว

4.2.3.2 ขั้นตอนการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก

สำหรับการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมัน RPO แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก ใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่เงื่อนไขปริมาณเมทานอล เท่ากับ 20 vol.% และแปรค่าปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 4 และ 12 g.L<sup>-1</sup> อัตราการไหลของ RPO เท่ากับ 20 L.h<sup>-1</sup> และอุณหภูมิ เท่ากับ 60°C เริ่มจากใส่ RPO ในถัง T1 แล้วเปิดฮีตเตอร์เพื่ออุ่นน้ำมันพร้อมกับเปิดปั๊มหมุนวน P3 เพื่อให้อุณหภูมิของน้ำมัน RPO เท่ากันทั้งถัง จากนั้นเตรียมสารละลายโพแทสเซียมเมทอกไซด์ (potassium methoxide) ซึ่งเป็นสารผสมระหว่างเมทานอลกับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ในถัง T2 และเปิดปั๊มหมุนวน P1 เพื่อหมุนวนเมทานอลให้ละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นเนื้อเดียวกัน เมื่ออุ่นน้ำมัน RPO จนมีอุณหภูมิ เท่ากับ 60°C จึงเปิดปั๊มต่อเนื่อง P3 ของ PRO ที่อัตราการไหล เท่ากับ 20 L.h<sup>-1</sup> และเปิดปั๊มต่อเนื่อง P2 ของสารละลายโพแทสเซียมเมทอกไซด์ตามสัดส่วนทดลองเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์อัลตราโซนิกแคลมป์ท่อ และเก็บตัวอย่างทุก ๆ ตำแหน่งตามความยาวท่อ คือ ที่ระยะความยาวท่อ เท่ากับ 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800 และ 900 mm จากนั้นนำน้ำมันตัวอย่างแช่น้ำเย็นที่อุณหภูมิ เท่ากับ 0°C เพื่อหยุดอัตราการปฏิกิริยา และล้างด้วยน้ำเพื่อกำจัดเมทานอล โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และสิ่งเจือปนต่างๆ ที่ตกค้างออก และนำไปอุ่นเพื่อระเหยน้ำที่ปะปนอยู่จากขั้นตอนการล้างเพื่อให้ได้ไบโอดีเซลบริสุทธิ์ และนำไบโอดีเซลไปวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเทคนิค TLC/FID ในลำดับถัดไป จากนั้นทำเช่นเดียวกันโดยเปลี่ยนเป็นเครื่องปฏิกรณ์ SM, US และ SM/US ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 ชุดทดลองผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์แบบต่อเนื่อง

(T1: ถังน้ำมัน RPO, T2: ถังสารละลายโพแทสเซียมเมทรอกไซด์, HT: ฮีตเตอร์, V: วาล์ว, P1: ปัมหมุนวนของสารละลายโพแทสเซียมเมทรอกไซด์, P2: ปัมต่อเนื่องของสารละลายโพแทสเซียมเมทรอกไซด์, P3: ปัมหมุนวนของน้ำมัน RPO, P4: ปัมต่อเนื่องของน้ำมัน RPO, TC: เทอร์มิสตัท, US: เครื่องปฏิกรณ์อัลตราโซนิก, UG: ตู้กำเนิดคลื่นอัลตราโซนิก, และ S1-S9: วาล์วเก็บตัวอย่าง)

#### 4.2.4 การทดลองผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขปาล์มแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก แบบ 3 ชั้นตอน

##### 4.2.4.1 อุปกรณ์ในการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขปาล์มแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก แบบ 3 ชั้นตอน

จากรูปที่ 4.4 แสดงอุปกรณ์ในการทดลองผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก แบบ 3 ชั้นตอน รูปที่ 4.5 แสดงอุปกรณ์ในการทดลองผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก ชั้นตอนที่ 1 โดยใช้ท่อผสมแบบสถิตชนิดขดเกลียวความยาว เท่ากับ 5 m ก่อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก รูปที่ 4.6 แสดงอุปกรณ์ในการทดลองผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก ชั้นตอนที่ 2 และรูปที่ 4.7 แสดงอุปกรณ์ในการทดลองผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก ชั้นตอนที่ 3 โดยใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิกชนิดโพรมมาประยุกต์ใช้กับระบบแบบต่อเนื่อง ซึ่งมีกำลังของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก เท่ากับ 1000 W และความถี่ เท่ากับ 20 kHz

4.2.4.2 ขั้นตอนการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก แบบ 3 ขั้นตอน

เนื่องจาก PFAD มีองค์ประกอบหลักเป็นกรดไขมันอิสระ (free fatty acid, FFA) มากกว่า 90 wt.% สำหรับการผลิตไบโอดีเซลในงานวิจัยนี้จึงจำเป็นต้องนำมาลดกรดไขมันอิสระด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน 2 ขั้นตอน และนำน้ำมันลดกรดไขมันอิสระของขั้นตอนที่ 2 ไปทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ในขั้นตอนที่ 3

4.2.4.2.1 ขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก ขั้นตอนที่ 1

จากรูปที่ 4.7 เริ่มจากนำ PFAD ใส่ถัง T2 เปิดฮีตเตอร์ร้อนน้ำมัน HT1 และฮีตเตอร์จุ่มน้ำมัน HT2 ควบคุมอุณหภูมิของน้ำมัน เท่ากับ  $50^{\circ}\text{C}$  โดยใช้เทอร์โมสแตท TC รอจน PFAD เริ่มละลาย จากนั้นจึงเปิดมอเตอร์ M เพื่อกวนให้อุณหภูมิของ PFAD เท่ากันทั่วทั้งถัง ขณะเดียวกันก็เติมเมทานอลลงในถัง T1 หลังจากนั้นจึงเปิดวาล์ว V ของ PFAD และของเมทานอลให้ผสมกันในถังผสม T3 ตามสัดส่วนทดลอง เปิดฮีตเตอร์ HT3 พร้อมควบคุมอุณหภูมิของน้ำมัน เท่ากับ  $50^{\circ}\text{C}$  และเปิดปั๊มหมุนวน P1 เพื่อให้ PFAD และเมทานอลผสมเป็นเนื้อเดียวกัน และเพื่อให้อุณหภูมิของสารผสมเท่ากันทั่วทั้งถัง ขณะเดียวกันก็เติมกรดซัลฟิวริกลงในถัง T4 ลำดับถัดไปจึงเปิดปั๊มต่อเนื่องของสารผสม P2 และของกรดซัลฟิวริก P3 โดยกำหนดให้ปั๊มต่อเนื่องของ PFAD มีอัตราการไหล เท่ากับ  $25 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$  ให้ไหลผ่านท่อผสมแบบสถิตชนิดขดเกลียว SM ที่มีความยาว เท่ากับ 5 m และไหลเข้าเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก US1 รอเวลาประมาณ 2 min ให้สารผสมทั้งสามไหลเต็มท่อ จึงเปิดคลื่นเสียงอัลตราโซนิกจากตู้กำเนิดคลื่นอัลตราโซนิก UG เพื่อป้องกันการสึกหรอของอัลตราโซนิกโพรบกรณีไม่มีของเหลวอยู่ในท่อ จากนั้นรอให้สารทำปฏิกิริยากันประมาณ 2 min จึงเริ่มเก็บตัวอย่างน้ำมันลดกรดไขมันอิสระ ปริมาณ เท่ากับ 50 mL และแช่น้ำเย็นที่อุณหภูมิ เท่ากับ  $0^{\circ}\text{C}$  ทันที เพื่อยุติอัตราการปฏิกิริยา และล้างด้วยน้ำเพื่อกำจัดเมทานอล กรดซัลฟิวริก และสิ่งเจือปนต่างๆ ที่ตกค้างออก และอุ่นเพื่อระเหยน้ำที่ปะปนอยู่จากขั้นตอนการล้าง จะได้น้ำมันลดกรดไขมันอิสระจากขั้นตอนที่ 1 (1<sup>st</sup>-step esterified oil) จากนั้นนำตัวอย่างน้ำมันไปวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ (nuclear magnetic resonance spectroscopy, NMR) เพื่อหาค่าความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ในลำดับถัดไป

4.2.4.2.2 ขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก ขั้นตอนที่ 2

จากรูปที่ 4.7 เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการลดกรดไขมันอิสระด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันขั้นตอนที่ 1 เมื่อผ่านกระบวนการจากหัวข้อที่ 4.2.4.2.1 จึงปล่อยให้ น้ำมันไหลไปยังถังแยก T5 รอเวลาแยกชั้นของน้ำมันลดกรดไขมันอิสระกับน้ำ เท่ากับ 150 min จากนั้นเปิดวาล์ว V เพื่อปล่อยน้ำซึ่งอยู่ด้านล่างของถังแยกออกนอกระบบ และปล่อยน้ำมันลดกรดไขมันอิสระจากขั้นตอนที่ 1 ลงถัง T6 เปิดฮีตเตอร์ HT4 พร้อมควบคุมอุณหภูมิของน้ำมัน เท่ากับ  $50^{\circ}\text{C}$  และเปิดปั๊มหมุนวน P4 เพื่อให้อุณหภูมิของน้ำมันลดกรดไขมันอิสระจากขั้นตอนที่ 1 เท่ากันทั่วทั้งถัง ขณะเดียวกันก็เติมเมทานอลลงในถัง T7 และกรดซัลฟิวริกลงในถัง T8 ลำดับถัดไปจึงเปิดปั๊มต่อเนื่องของน้ำมันลดกรดไขมันอิสระจากขั้นตอนที่ 1 คือ P5 ปั๊มต่อเนื่องของเมทานอล P6 และปั๊ม

ต่อเนื่องของกรดซัลฟิวริก P โดยกำหนดให้บีบต่อเนื่องของน้ำมันลดกรดไขมันอิสระจากขั้นตอนที่ 1 มีอัตราการไหล เท่ากับ  $25 \text{ L.h}^{-1}$  โดยให้น้ำมันลดกรดไขมันอิสระจากขั้นตอนที่ 1 ผสมกับเมทานอล ก่อน จึงป้อนกรดซัลฟิวริกเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก US2 และทำเช่นเดียวกับขั้นตอนการทดลองในหัวข้อที่ 4.2.4.2.1 และจะได้น้ำมันลดกรดไขมันอิสระจากขั้นตอนที่ 2 ( $2^{\text{nd}}$ -step esterified oil) จากนั้นนำตัวอย่างน้ำมันไปวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันด้วยเทคนิค NMR เพื่อหาค่าความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ในลำดับถัดไป

4.2.4.2.3 ขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องคลื่นเสียงอัลตราโซนิก ขั้นตอนที่ 3

จากรูปที่ 4.7 เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการลดกรดไขมันอิสระด้วยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันขั้นตอนที่ 2 เมื่อผ่านกระบวนการจากหัวข้อที่ 4.2.4.2.2 จึงปล่อยให้ไขมันไหลไปยังถังแยก T9 รอเวลาแยกชั้นของน้ำมันลดกรดไขมันอิสระกับน้ำ เท่ากับ 30 min จากนั้นเปิดวาล์ว V เพื่อปล่อยน้ำซึ่งอยู่ด้านล่างของถังแยกออกนอกระบบ และปล่อยน้ำมันลดกรดไขมันอิสระจากขั้นตอนที่ 2 ลงถัง T10 เปิดฮีตเตอร์ HT5 พร้อมควบคุมอุณหภูมิของน้ำมัน เท่ากับ  $60^{\circ}\text{C}$  และเปิดปั๊มหมุนวน P8 เพื่อให้อุณหภูมิของน้ำมันลดกรดไขมันอิสระจากขั้นตอนที่ 2 เท่ากันทั้งถัง และนำตัวอย่างน้ำมันไทเทรตเพื่อหาค่ากรดเริ่มต้น จากนั้นจึงเตรียมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และเมทานอลในถัง T11 พร้อมเปิดปั๊มหมุนวน P10 เพื่อหมุนวนเมทานอลให้ละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และผสมเป็นเนื้อเดียวกัน ลำดับถัดไปจึงเปิดบีบต่อเนื่องของน้ำมันลดกรดไขมันอิสระจากขั้นตอนที่ 2 คือ P9 และบีบต่อเนื่องของสารละลายโพแทสเซียมเมทอกไซด์ P11 โดยกำหนดให้บีบต่อเนื่องของน้ำมันลดกรดไขมันอิสระจากขั้นตอนที่ 2 มีอัตราการไหล เท่ากับ  $25 \text{ L.h}^{-1}$  ให้สารทำปฏิกิริยาไหลเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก US3 และทำเช่นเดียวกับขั้นตอนการทดลองในหัวข้อที่ 4.2.4.2.1 และ 4.2.4.2.2 จะได้น้ำมันไบโอดีเซลดิบ (crude biodiesel) และเมื่อนำไบโอดีเซลดิบไปผ่านกระบวนการล้าง และอุ่นเพื่อระเหยน้ำที่ปะปนอยู่จากขั้นตอนการล้าง ก็จะได้น้ำมันไบโอดีเซลบริสุทธิ์ (biodiesel) จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบและคุณสมบัติของไบโอดีเซลในลำดับถัดไป

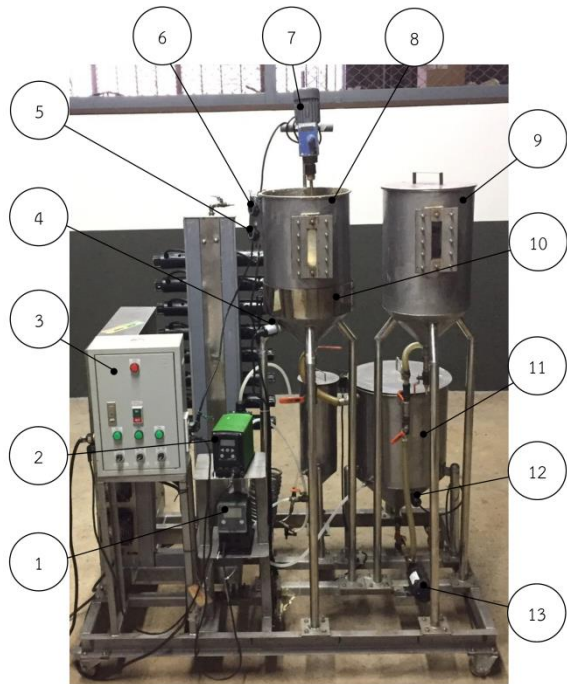


(ก)

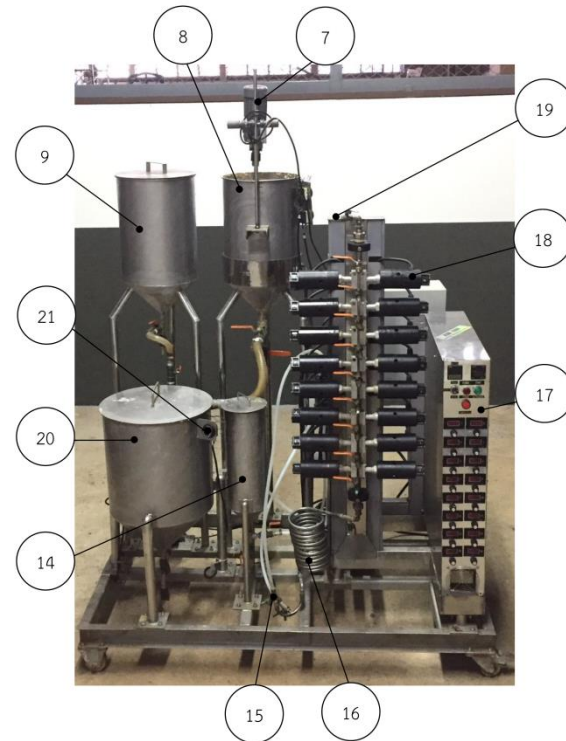


(ข)

รูปที่ 4.4 เครื่องผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากส่วนกลั่นกรดไฮโปคลอไรต์แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก แบบ 3 ขั้นตอน  
(ก) ด้านหน้าของเครื่องปฏิกรณ์ และ (ข) ด้านหลังของเครื่องปฏิกรณ์



(ก)



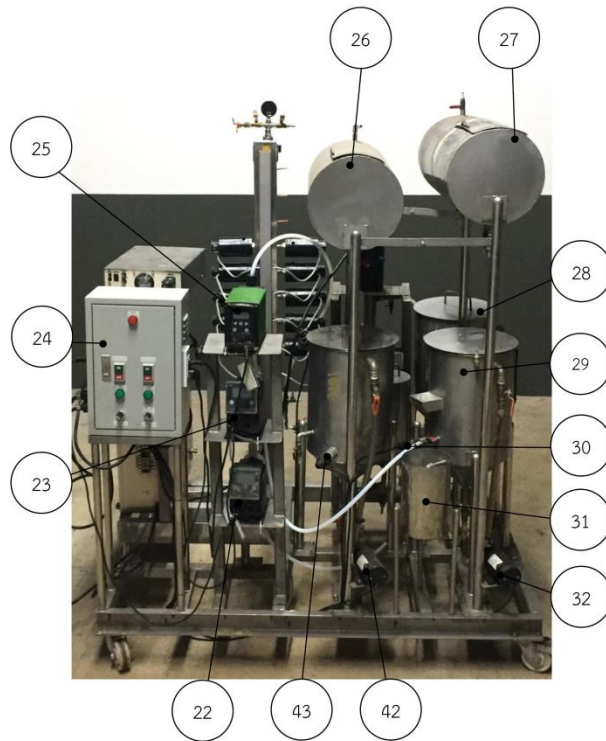
(ข)

รูปที่ 4.5 เครื่องผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก ขั้นตอนที่ 1

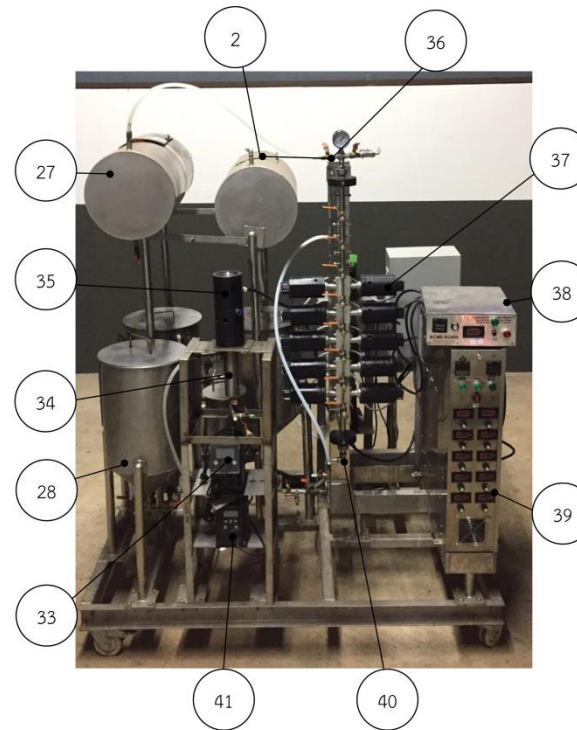
- (1: ป้อนต่อเนืองกรดซัลฟิวริก, ป้อนต่อเนืองสารผสม, 3: ตู้ควบคุม, 4: ฮีตเตอร์จุ่มถัง PFAD, 5: เทอร์โมสแตทฮีตเตอร์จุ่มถัง PFAD, 6: เทอร์โมสแตทฮีตเตอร์จุ่มถัง PFAD, 7: มอเตอร์, 8: ถัง PFAD, 9: ถังเมทานอล, 10: ฮีตเตอร์จุ่มถัง PFAD, 11: ถังผสม PFAD กับเมทานอล, 12: ฮีตเตอร์จุ่มถังผสม, 13: ป้อนหมุนวนถังผสม, 14: ถังกรดซัลฟิวริก, 15: ทางเข้าสารทำปฏิกิริยา, 16: ท่อผสมแบบสถิตชนิดขดเกลียว, 17: ตู้กำเนิดคลื่นอัลตราโซนิก, 18: หัวอัลตราโซนิก (16 ultrasonic probe, 20 kHz, 400 W/probe), 19: ทางออกผลิตภัณฑ์, 20: ถังผสม และ 21: เทอร์โมสแตทฮีตเตอร์จุ่มถังผสม

(ก) ด้านหน้าของเครื่องปฏิกรณ์ และ (ข) ด้านหลังของเครื่องปฏิกรณ์



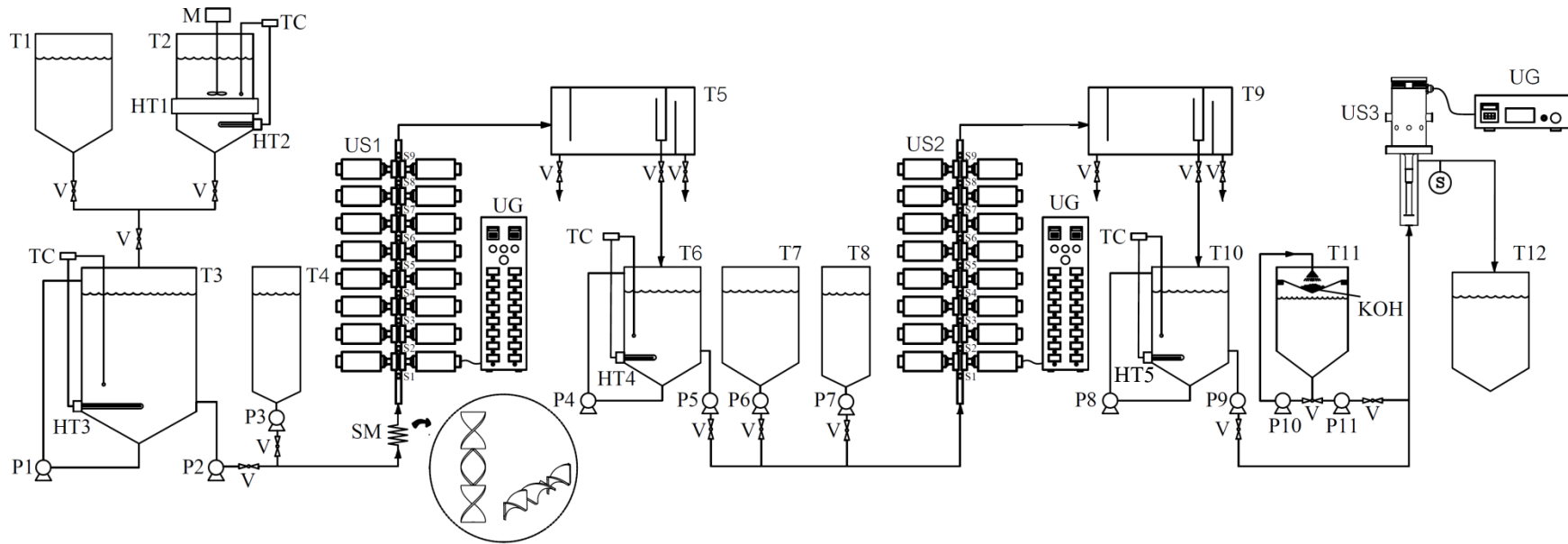


(ก)



(ข)

รูปที่ 4.6 เครื่องผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก ชั้นตอนที่ 2 และชั้นตอนที่ 3 (22: ปุ่มต่อเนื่องกรดซัลฟิวริก, 23: ปุ่มต่อเนื่องเมทานอล, 24: ตัวควบคุม, 25: ปุ่มต่อเนื่องน้ำมันจากชั้นตอนที่ 2, 26: ถังแยกน้ำมันจากชั้นตอนที่ 2, 27: ถังแยกน้ำมันจากชั้นตอนที่ 1, 28: ถังเมทานอล, 29: ถังน้ำมันจากชั้นตอนที่ 1, 30, 43: ฮีตเตอร์จุ่มน้ำมัน, 31: ถังโพแทสเซียมเมทอกไซด์, 32, 42: ปุ่มหมุนวน, 33: ปุ่มต่อเนื่องน้ำมันจากชั้นตอนที่ 3, 34: เครื่องปฏิกรณ์อัลตราโซนิกชั้นตอนที่ 3, 35: อัลตราโซนิกแบบโพรบของชั้นตอนที่ 3, 36: ทางออกผลิตภัณฑ์ชั้นตอนที่ 2, 37: หัวอัลตราโซนิก (10 ultrasonic probe, 20 kHz, 400 W/probe), 38, 39: ตัวกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิก, 40: ทางเข้าสารทำปฏิกิริยา และ 41: ปุ่มต่อเนื่องโพแทสเซียมเมทอกไซด์) (ก) ด้านหน้าของเครื่องปฏิกรณ์ และ (ข) ด้านหลังของเครื่องปฏิกรณ์



รูปที่ 4.7 แผนผังระบบผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันแบบต่อเนื่องด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิก แบบ 3 ขั้นตอน

(T1, T7: ถังเมทานอล, T2: ถัง PFAD, T3: ถังผสมระหว่าง PFAD กับเมทานอล, T4, T8: ถังกรดซัลฟิวริก, T5: ถังแยกชั้นขั้นตอนที่ 1, T6: ถังน้ำมันลดกรดไขมันอิสระขั้นตอนที่ 1, T9: ถังแยกชั้นขั้นตอนที่ 2, T10: ถังน้ำมันลดกรดไขมันอิสระขั้นตอนที่ 2, T11: ถังสารละลายโพแทสเซียมเมทอกไซด์, T12: ถังไบโอดีเซล, SM: ท่อผสมแบบสวิตช์ชนิดขดเกลียว, M: มอเตอร์, TC: เทอร์โมสตัท, HT1: ฮีตเตอร์รััดถัง PFAD, HT2: ฮีตเตอร์จุ่มถัง PFAD, HT3: ฮีตเตอร์จุ่ม, V: วาล์ว, P1, P4, P8, P10: ปั๊มหมุนวน, P2: ปั๊มต่อเนื่องของสารผสม, P3, P7: ปั๊มต่อเนื่องของกรดซัลฟิวริก, P5: ปั๊มต่อเนื่องน้ำมันลดกรดไขมันอิสระขั้นตอนที่ 1, P9: ปั๊มต่อเนื่องน้ำมันลดกรดไขมันอิสระขั้นตอนที่ 2, P11: ปั๊มต่อเนื่องสารละลายโพแทสเซียมเมทอกไซด์, US1: เครื่องปฏิกรณ์อัลตราโซนิกขั้นตอนที่ 1, US2: เครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิกขั้นตอนที่ 2, US3: เครื่องปฏิกรณ์อัลตราโซนิกขั้นตอนที่ 3, S1-S9, S: วาล์วเก็บตัวอย่าง และ UG: ตู้กำเนิดคลื่นอัลตราโซนิก)



### 4.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมัน

สำหรับขั้นตอนการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันในงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมัน 3 เทคนิค คือ เทคนิคการไทเทรต เทคนิค thin layer chromatography with flame ionization detection (TLC/FID) และเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ (nuclear magnetic resonance spectroscopy, NMR)

#### 4.3.1 เทคนิคการไทเทรต

สำหรับเทคนิคการไทเทรต เป็นเทคนิคของการหาค่าความกรด (acid value, AV) ของน้ำมัน โดยใช้วิธีของ The American Oil Chemists' Society Official Method Cd 3a-63 for Acid Value (Albright, 1998) โดยเริ่มจากการชั่งตัวอย่างน้ำมันประมาณ 1 g ในขวดรูปชมพู่ และหยดสารละลายไอโซโพรพานอลเพื่อลดความหนืด จากนั้นหยดฟีนอร์ฟทาลีนประมาณ 5-8 หยด และเขย่าให้เข้ากัน ถัดไปจึงไทเทรตสารละลายตัวอย่างด้วยสารละลายวิเคราะห์ที่บรรจุอยู่ในบิวเรตที่เตรียมจากโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ละลายอยู่ในไอโซโพรพานอลความเข้มข้น 0.05 normal จากนั้นเขย่าจนสารละลายเริ่มเปลี่ยนเป็นสีชมพูอ่อนคงที่ ประมาณ 30 s และนำไปคำนวณหาค่า AV ได้ดังสมการที่ 4.1 โดยมีมวลโมเลกุลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ คือ  $56.1 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$

$$AV = \frac{56.1 \times V \times M}{m} \quad (4.1)$$

เมื่อ AV คือ ค่าความเป็นกรด ( $\text{mgKOH}\cdot\text{g}^{-1}$ ) V คือ ปริมาตรต่างที่ใช้ (mL) M คือ ความเข้มข้นของต่าง (normal) และ m คือ น้ำหนักน้ำมันตัวอย่าง (g)

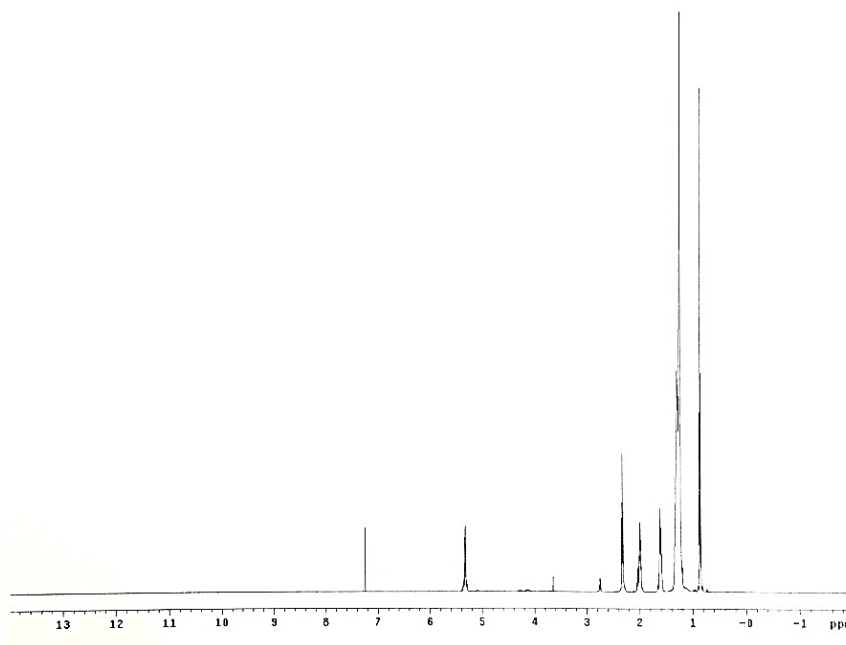
#### 4.3.2 เทคนิค thin layer chromatography with flame ionization detection (TLC/FID)

การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันด้วยเทคนิค thin layer chromatography with flame ionization detection (TLC/FID) สามารถวิเคราะห์หาปริมาณโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์ กรดไขมันอิสระ และเมทิลเอสเทอร์ และสำหรับงานวิจัยนี้ใช้เครื่อง Itronscan MK-6 และ chromarods type S-II quartz rod (Mitsubishi Kagaku Iatron., Japan) โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์ คือ นำน้ำมันตัวอย่าง 1 หยด ผสมกับสารละลายเฮกเซนปริมาณ เท่ากับ 0.75 mL และเขย่าให้เข้ากัน จากนั้นหยดสารทดสอบบน chromarod และนำ chromarod ไปแช่ในสารละลายผสมระหว่างอัตราส่วนโดยปริมาตรของ เฮกเซน:ไดเอทิลอีเทอร์:กรดฟอร์มิก เท่ากับ 50:20:0.3 รอจนสารละลายเคลื่อนที่ได้ระยะทาง เท่ากับ 8 cm จึงนำ chromarod ไปแช่ในสารละลายผสมระหว่างอัตราส่วนโดยปริมาตรของ เฮกเซน:เบนซีน เท่ากับ 1:1 และรอจนสารละลายเคลื่อนที่ได้ระยะทาง เท่ากับ 10 cm จึงนำ chromarod ไปอบด้วยเครื่อง rod dryer TK-8 ที่อุณหภูมิ เท่ากับ  $110^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา เท่ากับ 10 min และนำ chromarod ไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบ

ด้วยวิธี flame ionization detection โดยใช้ก๊าซไฮโดรเจนที่มีอัตราการไหล เท่ากับ  $165 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$  และอากาศที่อัตราการไหล เท่ากับ  $2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$

4.3.3 เทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ (nuclear magnetic resonance spectroscopy, NMR)

สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณของเมทิลเอสเทอร์จะใช้เครื่องมือทดสอบ fourier transform nuclear magnetic resonance (FT-NMR) spectrometer 500 MHz, Unity Inova, Varian, Germany และเทคนิคทดสอบ  $^1\text{H}$  observed experiment เรียกว่า เทคนิคโปรตอนเอ็นเอ็มอาร์ ( $^1\text{H}$ -NMR) ซึ่งการวัดสัญญาณของเครื่อง FT-NMR จะส่งสัญญาณคลื่นวิทยุทุกความถี่ ในช่วงที่สนใจเข้าไปยังตัวอย่างที่วิเคราะห์ เพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนสปินของนิวเคลียสทั้งหมด เรียกสภาวะดังกล่าวว่าสถานะถูกกระตุ้น (excited state) จากนั้นนิวเคลียสจะกลับสู่สถานะพื้น (ground state) โดยการคายพลังงานออกมาในรูปของคลื่นวิทยุในรูปของคลื่นที่ซ้อนกัน เรียกว่า (free induction decay, FID) โดยสามารถแยกเป็นความถี่ต่างๆ ที่มีความแรงของสัญญาณแตกต่างกัน ซึ่งผลที่ได้จากกระบวนการดังกล่าว คือ สเปกตรัม NMR ซึ่งมีลักษณะเป็นพีค ดังแสดงในรูปที่ 4.8 โดยมีแกนนอน (x-axis) เป็นค่า chemical shift (ห้องปฏิบัติการนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโคปี, 2017) โดยมีวิธีการเตรียมตัวอย่าง คือ นำน้ำมันตัวอย่างประมาณ 2-3 mg มาละลายในตัวทำละลาย deuterated chloroform ( $\text{CDCl}_3$ ) พร้อมใส่สารละลายอ้างอิง tetramethylsilane (TMS;  $(\text{CH}_3)_4\text{Si}$ ) และนำสารละลายที่ได้มาบรรจุในหลอด NMR ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 mm ที่มีความยาวไม่น้อยกว่า 15 cm จากนั้นนำหลอด NMR ที่บรรจุสารละลายใส่ลงไปใน radiofrequency ( $r_f$ ) coil ซึ่งจะวางอยู่ระหว่างขั้วแม่เหล็กกำลังสูง ทำให้ nuclei เกิดการวางตัวแบบขนานหรือสวนทางกับสนามแม่เหล็ก เพิ่มพลังงานให้แก่ nuclei ไปเรื่อยๆ โดยใช้  $r_f$  coil จนกระทั่งมีพลังงานเท่ากับความแตกต่างของระดับพลังงาน โดย nuclei จะดูดซับพลังงานเข้าไป ทำให้ nuclei เคลื่อนที่จากระดับพลังงานต่ำไปสู่ระดับพลังงานที่สูงกว่า เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า nuclear magnetic resonance และการ plot ระหว่างพลังงานที่ถูกดูดโดย nuclei ของสารตัวอย่างกับความถี่ของ  $r_f$  coil ที่ให้จะได้เป็น NMR spectrum (ห้องปฏิบัติการนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโคปี, 2017)



รูปที่ 4.8 ตัวอย่าง <sup>1</sup>H-NMR สเปกตรัมของสารอินทรีย์

#### 4.4 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์หาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจาก PFAD ด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก แบบ 3 ชั้นตอน โดยใช้เทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (response surface methodology, RSM) และออกแบบการทดลองแบบ central composite design (CCD) เพื่อหารูปแบบของสมการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับผลตอบสนอง ซึ่งสำหรับการผลิตไบโอดีเซลของงานวิจัยนี้ใช้กระบวนการแบบ 3 ชั้นตอน คือ ชั้นตอนที่ 1 และ 2 ใช้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อลดกรดไขมันอิสระของ PFAD โดยตัวแปรอิสระที่ศึกษา เช่น ปริมาณเมทานอล (*M*) ปริมาณกรดซัลฟิวริก (*S*) และความยาวของท่ออัลตราโซนิก (*L*) และชั้นตอนที่ 3 ใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยตัวแปรอิสระที่จะศึกษา เช่น ปริมาณเมทานอล (*M*) และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (*K*) โดยผลตอบสนอง คือ ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ (*ME*) โดยสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ของตัวแปรและผลตอบสนองของการผลิตไบโอดีเซลชั้นตอนที่ 1 และ 2 ดังแสดงในสมการที่ 4.2 และชั้นตอนที่ 3 ดังแสดงในสมการที่ 4.3 โดยใช้โปรแกรม essential experimental design 2.220 และกำหนดรูปแบบของการออกแบบการทดลองใน design of experiment (DOE) ซึ่งการทดลองประกอบด้วย 5 ระดับ คือ -1.682, -1, 0, +1 และ +1.682 สำหรับการผลิตไบโอดีเซลชั้นตอนที่ 1 และ 2 มีตัวแปรอิสระ 3 ตัวแปร มีจำนวนการทดลองทั้งหมด 18 การทดลอง และสำหรับชั้นตอนที่ 3 มีตัวแปรอิสระ 2 ตัวแปร มีจำนวนการทดลองทั้งหมด 12 การทดลอง โดยกำหนดช่วงและระดับของตัวแปรอิสระทั้ง 3 ชั้นตอน ในตารางที่ 4.1 และผลการออกแบบการทดลอง ดังแสดงใน ภาคผนวก ข

$$ME = f(M, S, L) \quad (4.2)$$

$$ME = f(M, K) \quad (4.3)$$

โดยที่  $ME$  คือ ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์  $M$  คือ ปริมาณเมทานอล  $S$  คือ ปริมาณกรดซัลฟิวริก  $L$  คือ ความยาวของท่ออัลตราโซนิก และ  $K$  คือ ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

ตารางที่ 4.1 ช่วงและระดับการแปรค่าของตัวแปรอิสระสำหรับการผลิตไบโอดีเซล

Process	Independent variable	Coded level				
		-1.628	-1	0	+1	+1.628
1 <sup>st</sup> -step	$M$ : methanol (vol.%)	19.8	30	45	60	70.2
	$S$ : sulfuric acid (vol.%)	0	2	5	8	10
	$L$ : length of US reactor (mm)	100	200	400	600	700
2 <sup>nd</sup> -step	$M$ : methanol (vol.%)	26.4	40	60	80	93.6
	$S$ : sulfuric acid (vol.%)	0.6	2	4	6	7.4
	$L$ : length of US reactor (mm)	100	200	400	600	700
3 <sup>rd</sup> -step	$M$ : methanol (vol.%)	7.9	10	15	20	21.1
	$K$ : potassium hydroxide (g.L <sup>-1</sup> )	1.2	2	4	6	6.8

#### 4.5 การหารูปแบบสมการทำนายความสัมพันธ์

วิธีพหุคูณตอบสนองเป็นวิธีที่ช่วยลดจำนวนครั้งในการทดลอง และสามารถหารูปแบบสมการทำนายความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระ โดยใช้ multiple regression เพื่อวิเคราะห์รูปแบบ 2<sup>nd</sup> order model โดยใช้โปรแกรม essential regression 2.220 ดังแสดงในสมการที่ 4.4 (Prateepchaikul *et al.*, 2009)

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (4.4)$$

โดยที่  $Y$  คือ ค่าของผลตอบสนอง,  $k$  คือ จำนวนตัวแปรอิสระ,  $\beta_0$ ,  $\beta_i$ ,  $\beta_{ii}$  และ  $\beta_{ij}$  คือ ค่าคงที่ สัมประสิทธิ์ของตัวแปรกำลังหนึ่ง สัมประสิทธิ์ของตัวแปรกำลังสอง และสัมประสิทธิ์ของตัวแปรร่วม ตามลำดับ และ  $X_i$ ,  $X_j$  คือ ตัวแปรอิสระ

รูปแบบสมการทำนายความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระที่ได้จากการทดลอง สามารถหาได้จากการวิเคราะห์จาก multiple regression แบบ full quadratic ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อได้สมการทำนายความสัมพันธ์ จึงพิจารณาค่า  $p$ -value ของแต่ละพจน์ ซึ่งสามารถตัดพจน์ที่มีค่า  $p$ -value สูงกว่า 0.05 ออกจากสมการได้ เนื่องจากมีนัยสำคัญต่อผลตอบสนองน้อย จากนั้นนำสมการดังกล่าวมาทดสอบค่า  $F$ -test โดยพิจารณานัยสำคัญของสมการเพื่อตัดสินใจปฏิเสธสมมติฐาน ซึ่งค่า  $F$ -test จากการคำนวณมากกว่า  $F_{critical}$  หรือ  $F_0 > F_{\alpha, i, n-1-i}$  โดยที่  $\alpha$  เท่ากับ 0.05 (ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%),  $i$  คือ พจน์ทั้งหมดของสมการ ยกเว้น  $\beta_0$ ,  $n$  คือ จำนวนการทดลอง และ  $F_{critical}$  เปิดได้จากตาราง  $F$ -test ดังแสดงในภาคผนวก ง

## บทที่ 5

### ผลการทดลอง

#### 5.1 ผลการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกแบบกะ

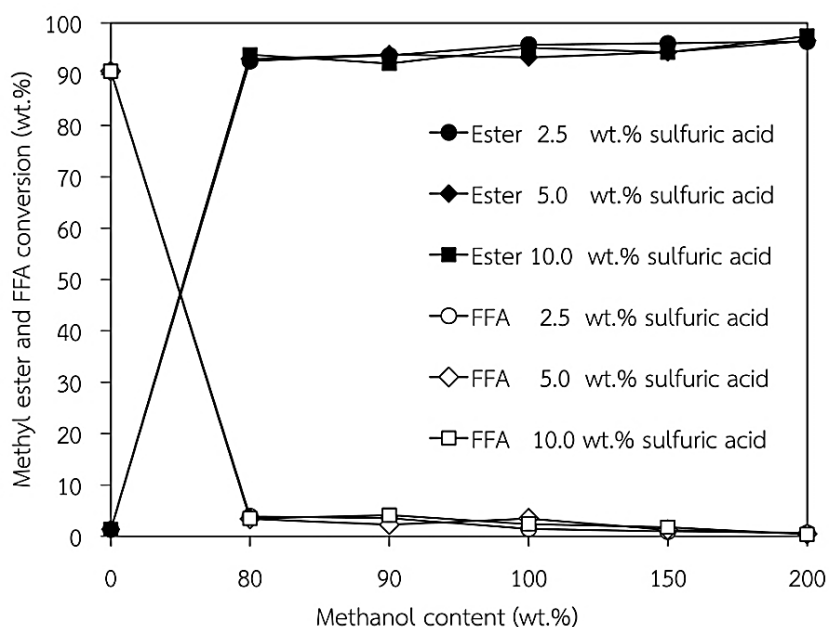
การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD ด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกแบบกะ โดยใช้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน และได้ควบคุมเวลาในการทำปฏิกิริยา เท่ากับ 30 s แปรค่าปริมาณเมทานอล เท่ากับ 80, 90, 100, 150 และ 200 wt.% และแปรค่าปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 2.5, 5.0 และ 10.0 wt.% ใช้เครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิกที่มีความถี่ เท่ากับ 18 kHz และกำลังของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก เท่ากับ 1000 W

##### 5.1.1 ผลของเมทานอลที่มีผลต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์

จากรูปที่ 5.1 พบว่า ที่ปริมาณเมทานอล เท่ากับ 80 wt.% สามารถเปลี่ยนกรดไขมันอิสระ (FFA) ซึ่งเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ของ PFAD ให้เป็นเมทิลเอสเทอร์และมีค่าอยู่ในช่วง 92-94 wt.% และเมื่อเพิ่มปริมาณเมทานอล เท่ากับ 90, 100, 150 และ 200 wt.% พบว่า เมื่อใช้ปริมาณเมทานอลน้อยกว่า 150 wt.% ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้มีค่าน้อยกว่า 96 wt.% ที่ทุกเงื่อนไขของปริมาณกรดซัลฟิวริก แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเมทานอล เท่ากับ 200 wt.% และปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 2.5, 5.0 และ 10.0 wt.% สามารถผลิตเมทิลเอสเทอร์ได้ เท่ากับ 96.368, 96.523 และ 97.435 wt.% ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณการใช้กรดซัลฟิวริก ที่เท่ากันเพื่อพิจารณาความมีนัยสำคัญของปริมาณเมทานอล พบว่า ที่เงื่อนไขกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 2.5 wt.% สามารถผลิตเมทิลเอสเทอร์ได้ความบริสุทธิ์ เท่ากับ 92.592, 93.670, 95.766, 96.011 และ 96.368 wt.% เมื่อใช้ปริมาณเมทานอล เท่ากับ 80, 90, 100, 150 และ 200 wt.% ตามลำดับ โดยปริมาณของเมทานอลที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์ด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกชนิดโพรบแบบกะอย่างมีนัยสำคัญ

##### 5.1.2 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์

จากรูปที่ 5.1 สำหรับผลของปริมาณกรดซัลฟิวริกที่ส่งต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์ด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกชนิดโพรบแบบกะ พบว่า ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์มีความใกล้เคียงกันเมื่อใช้ปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 2.5 และ 5.0 wt.% กับปริมาณเมทานอล เท่ากับ 200 wt.% แต่เมื่อเพิ่มปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 10.0 wt.% ทำให้ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้น เท่ากับ 1 wt.% โดยปริมาณของกรดซัลฟิวริกที่เพิ่มขึ้นไม่ค่อยมีผลต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกชนิดโพรบแบบกะ ซึ่งเป็นผลมาจากความหนาแน่นของกรดซัลฟิวริกที่สูงประมาณ  $1.84 \text{ kg.L}^{-1}$  (Somnuk *et al.*, 2013) ทำให้ขณะเร่งปฏิกิริยาด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิก ต้องใช้เมทานอลในปริมาณมากเพื่อช่วยเพิ่มการถ่ายเทมวลระหว่าง PFAD เมทานอล และกรดซัลฟิวริก



รูปที่ 5.1 ปริมาณเมทิลเอสเทอร์และกรดไขมันอิสระจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD ด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิคชนิดโพรบแบบกะ

จากผลการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD ที่มีปริมาณ FFA มากกว่า 90 wt.% ด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิคชนิดโพรบแบบกะ พบว่า มีการใช้ปริมาณของเมทานอลสูง เนื่องจากกรดซัลฟิวริกซึ่งมีความหนาแน่นสูงจึงตกลงด้านล่างเครื่องปฏิกรณ์ขณะทำปฏิกิริยา โดยสัดส่วนของกรดซัลฟิวริกที่เพิ่มขึ้น ทำให้คลื่นเสียงอัลตราโซนิคไม่สามารถแตกตัวกรดซัลฟิวริกได้หมด ดังนั้นการใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิคชนิดโพรบแบบกะจึงไม่เหมาะสมกับปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน โดยควรจะมีการผสมสารทั้ง 3 ชนิด ด้วยถังกวนผสม หรือท่อผสมแบบสถิต ก่อนสารผสมเข้าเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิค เพื่อลดปริมาณเมทานอลในการทำปฏิกิริยา และที่เงื่อนไขปริมาณกรดซัลฟิวริกเท่ากับ 10 wt.% และปริมาณเมทานอล เท่ากับ 200 wt.% สามารถผลิตเมทิลเอสเทอร์ได้ความบริสุทธิ์สูงสุด เท่ากับ 97.435 wt.% ซึ่งจะเห็นได้ว่าการประยุกต์ใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิคมีความเป็นไปได้ในการผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD และสามารถทำปฏิกิริยาได้ในเวลาที่รวดเร็ว

โดยได้นำผลงานนี้ไปนำเสนอในการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30 ในบทความ: การศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิคช่วยในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากกรดไขมันปาล์มน้ำมันด้วยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันแบบกะ ดังแสดงในภาคผนวก ข

## 5.2 ผลการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันแบบหมุนวนด้วยท่อผสมแบบสถิตชนิดขดเกลียว

สำหรับการผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD แบบหมุนวนด้วยท่อผสมแบบสถิตชนิดขดเกลียว มีวัตถุประสงค์เพื่อลดค่าความเป็นกรด (acid value, AV) ของ PFAD ให้มีค่าน้อยกว่า 2 mgKOH.g<sup>-1</sup> ซึ่ง PFAD มีค่า AV เท่ากับ 265 mgKOH.g<sup>-1</sup> โดยการทดลองได้แปรค่าปริมาณเมทานอล เท่ากับ 60, 80 และ 100 wt.% ปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 5, 10 และ 15 wt.% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 10-90 min ควบคุมอุณหภูมิที่ 60°C และอัตราการไหลของ PFAD เท่ากับ 20 L.h<sup>-1</sup>

### 5.2.1 ผลของเมทานอลที่มีผลต่อการลดค่าความเป็นกรดของ PFAD

จากรูปที่ 5.2 เมื่อพิจารณาที่เงื่อนไขปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 5 wt.% และปริมาณเมทานอล เท่ากับ 60 wt.% สามารถลด AV ของ PFAD จาก 265 mgKOH.g<sup>-1</sup> เหลือ เท่ากับ 7.15 mgKOH.g<sup>-1</sup> และเมื่อเพิ่มปริมาณเมทานอล เท่ากับ 80 wt.% และ 100 wt.% สามารถลด AV เหลือเท่ากับ 3.58 mgKOH.g<sup>-1</sup> และ 2.81 mgKOH.g<sup>-1</sup> ตามลำดับ เมื่อเพิ่มกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 10 wt.% สามารถลด AV เหลือเท่ากับ 2.74 mgKOH.g<sup>-1</sup> ที่เงื่อนไขปริมาณเมทานอล เท่ากับ 60 wt.% จากนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณเมทานอล เท่ากับ 80 wt.% สามารถลด AV เหลือเท่ากับ 1.52 mgKOH.g<sup>-1</sup> ตั้งแต่เวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 60 min และเริ่มเข้าสู่ภาวะสมดุลเมื่อเวลาผ่านไป แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเมทานอล เท่ากับ 100 wt.% พบว่า ไม่สามารถทำให้ลด AV น้อยกว่า 2 mgKOH.g<sup>-1</sup> เนื่องจากปริมาณเมทานอลที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดน้ำระหว่างกระบวนการทำปฏิกิริยา ซึ่งทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเจือจางลง และเมื่อเพิ่มปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 15 wt.% สามารถลด AV ได้น้อยกว่า 2 mgKOH.g<sup>-1</sup> ที่ปริมาณเมทานอล เท่ากับ 80 wt.% ใช้เวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 30 min และเข้าสู่ภาวะสมดุลเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อเพิ่มปริมาณเมทานอล เท่ากับ 100 wt.% สามารถลด AV ได้น้อยกว่า 2 mgKOH.g<sup>-1</sup> ที่เวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 10 min และเข้าสู่ภาวะสมดุลเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ดังนั้น การเพิ่มปริมาณเมทานอลมีผลต่อการลด AV ของ PFAD อย่างมีนัยสำคัญ แต่การเพิ่มปริมาณเมทานอลที่มากเกินไปจะทำให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงด้วยเช่นกัน

### 5.2.2 ผลของกรดซัลฟิวริกที่มีผลต่อการลดค่าความเป็นกรดของ PFAD

จากรูปที่ 5.2(ก) เงื่อนไขที่ปริมาณเมทานอล เท่ากับ 60 wt.% เมื่อมีการเติมกรดซัลฟิวริกลงไปผสมกับสารผสมระหว่าง PFAD และเมทานอล ด้วยการหมุนวน พบว่า สามารถลด AV ของ PFAD จาก 265 mgKOH.g<sup>-1</sup> เหลือเท่ากับ 45.0, 36.0 และ 29.0 mgKOH.g<sup>-1</sup> ที่ปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 5, 10 และ 15 wt.% ตามลำดับ โดยที่ปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 5 wt.% สามารถลด AV เหลือเท่ากับ 7.15 mgKOH.g<sup>-1</sup> และเมื่อเพิ่มปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 10 wt.% สามารถลด AV เหลือเท่ากับ 2.74 mgKOH.g<sup>-1</sup> แต่เมื่อเพิ่มปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 15 wt.% สามารถลด AV ได้เท่ากับ 4.08 mgKOH.g<sup>-1</sup> ที่เวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 60 min และเข้าสู่ภาวะสมดุลจนถึงระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา เท่ากับ 90 min จากรูปที่ 5.2(ข) เมื่อเพิ่มปริมาณเมทานอล เท่ากับ 80 wt.% พบว่า ที่ปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 5 wt.% สามารถลด AV เหลือเท่ากับ 3.58



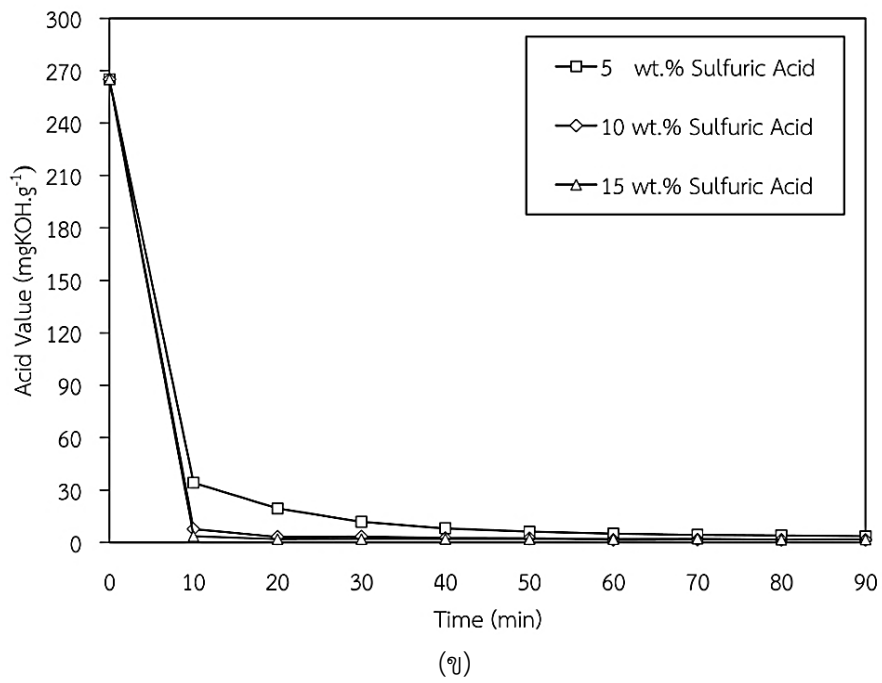
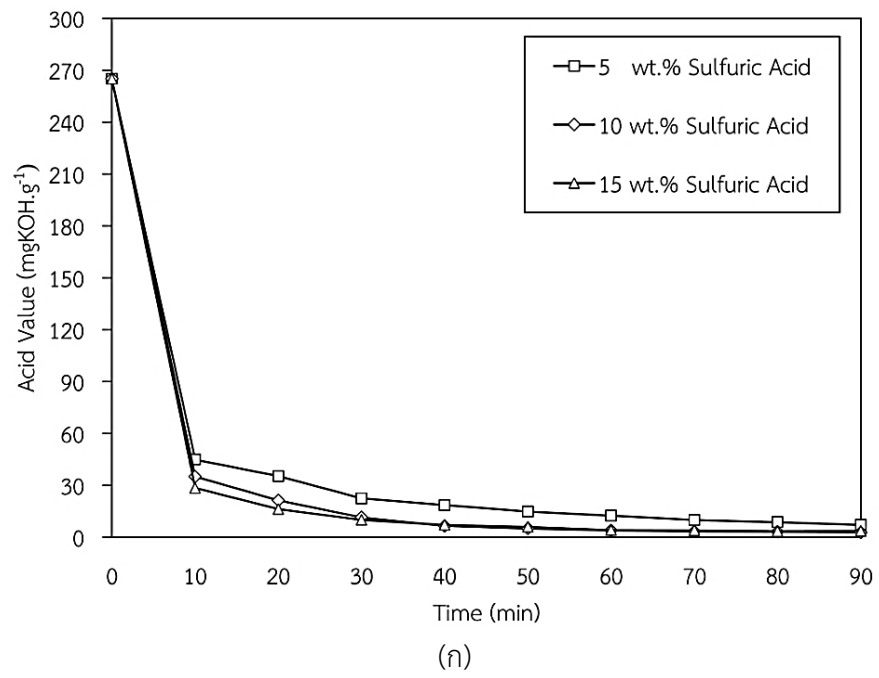
mgKOH.g<sup>-1</sup> แต่เมื่อเพิ่มปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 10 wt.% สามารถลด AV ได้น้อยกว่า 2 mgKOH.g<sup>-1</sup> ตั้งแต่เวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 60 min และลดลงเหลือน้อยที่สุด เท่ากับ 1.59 mgKOH.g<sup>-1</sup> ที่เวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 90 min และเมื่อเพิ่มปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 15 wt.% ก็สามารถลด AV ได้น้อยกว่า 2 mgKOH.g<sup>-1</sup> ตั้งแต่เวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 30 min แล้วจึงเข้าสู่ภาวะสมดุล และจากรูปที่ 5.2(ค) ที่ปริมาณเมทานอล เท่ากับ 100 wt.% สามารถลด AV ของ PFAD เหลือน้อยกว่า 3 mgKOH.g<sup>-1</sup> ที่ปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 5 wt.% และเวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 60 min และพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 10 wt.% สามารถลด AV เหลือน้อยกว่า 3 mgKOH.g<sup>-1</sup> และสามารถลด AV เหลือน้อยกว่า 2 mgKOH.g<sup>-1</sup> ที่เวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 20 min และปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 15 wt.% และลดลงเหลือ เท่ากับ 1.50 mgKOH.g<sup>-1</sup> ที่เวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 50 min ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกรดซัลฟิวริกจะสามารถลดค่าความ AV ของ PFAD ลงได้ ดังนั้นกรดซัลฟิวริกก็มีผลต่อการลดลงของ AV ของ PFAD อย่างมีนัยสำคัญเช่นเดียวกัน

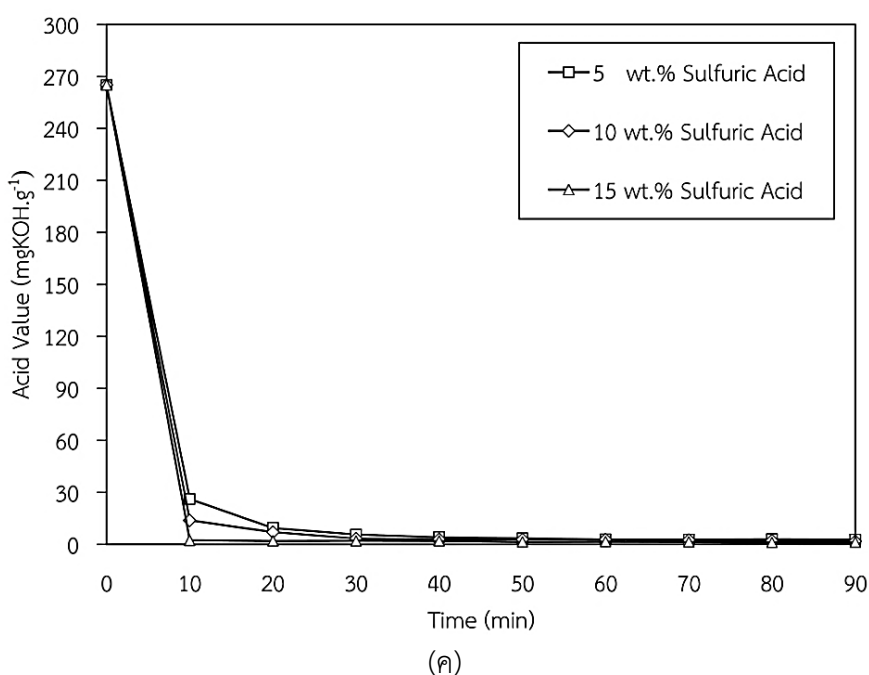
### 5.2.3 ผลของเวลาทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อการลดค่าความเป็นกรดของ PFAD

เวลาในการทำปฏิกิริยาเป็นอีกปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการลด AV ของ PFAD โดยจากรูปที่ 5.2(ก) ที่ปริมาณเมทานอล เท่ากับ 60 wt.% ปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 5, 10 และ 15 wt.% และเวลาในการทำปฏิกิริยา เท่ากับ 10 min สามารถค่าปริมาณ AV ของ PFAD จาก 265 mgKOH.g<sup>-1</sup> เหลือน้อยกว่า 50 mgKOH.g<sup>-1</sup> และเมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาก็สามารถลด AV ลงได้เรื่อย ๆ ซึ่งที่ปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 15 wt.% และเวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 60 min สามารถลด AV ได้เท่ากับ 4.08 mgKOH.g<sup>-1</sup> และเข้าสู่ภาวะสมดุลเมื่อเวลาผ่านไป และจากรูปที่ 5.2(ข) และ 5.2(ค) เมื่อถึงจุดที่ความสามารถของเวลาไม่มีผลต่อการลดลงของ AV จะเห็นว่าปริมาณ AV ก็เข้าสู่สมดุลเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า เวลาในการทำปฏิกิริยา มีผลต่อการลดลงของ AV ของ PFAD เช่นกัน

จากผลการทดลองพบว่า ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันสามารถลด AV ของ PFAD จาก 265 mgKOH.g<sup>-1</sup> ให้มีค่าน้อยกว่า 1.97 mgKOH.g<sup>-1</sup> ด้วยท่อผสมแบบสถิตชนิดขดเกลียวที่เงื่อนไขแนะนำคือ ปริมาณเมทานอล เท่ากับ 100 wt.% ปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 15 wt.% และเวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 20 min ดังนั้นท่อผสมแบบสถิตชนิดขดเกลียวสามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อในการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันขั้นตอนเดียว แต่ก็ยังมีการใช้ปริมาณสารเคมีที่สูงเนื่องจากระหว่างกระบวนการทำปฏิกิริยาได้เกิดน้ำขึ้น ส่งผลให้ความเข้มข้นของสารเคมีลดลง และประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันลดลง ดังนั้นสำหรับการทดลองผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD ด้วยท่อผสมแบบสถิตควรแยกถังสารเคมี ถังวัดอุณหภูมิ และถังทำปฏิกิริยาออกจากกัน และที่สำคัญควรแยกน้ำที่ได้จากกระบวนการทำปฏิกิริยาออก เพื่อให้ได้ความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น

โดยได้ตีพิมพ์ผลงานนี้ในวารสารวิจัยเทคโนโลยีนวัตกรรม ในบทความ: กระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากกรดไขมันปาล์มแบบหมุนวนด้วยท่อผสมแบบสถิตชนิดขดเกลียว ดังแสดงในภาคผนวก ข





รูปที่ 5.2 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดของ PFAD ของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบหมุนวนด้วยท่อผสมแบบสถิติชนิดขดเกลียว ที่เงื่อนไข (ก) ปริมาณเมทานอล เท่ากับ 60 wt.% (ข) ปริมาณเมทานอล เท่ากับ 80 wt.% และ (ค) ปริมาณเมทานอล เท่ากับ 100 wt.%

### 5.3 ผลการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบสถิติร่วมกับคลื่นเสียงอัลตราโซนิก

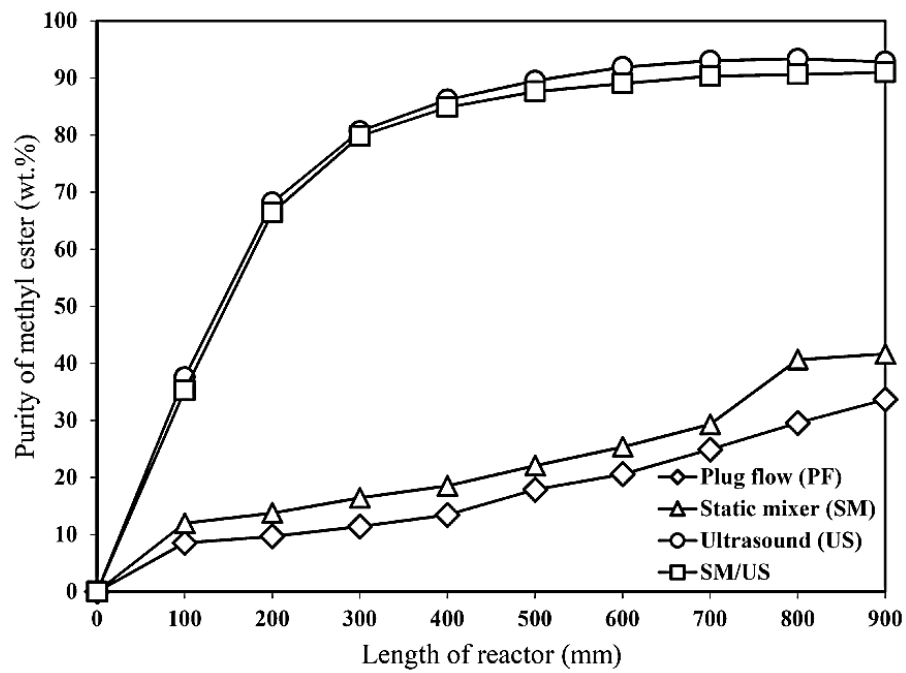
สำหรับการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์ (refined palm oil, RPO) ด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก มีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิกในการผลิตไบโอดีเซล

จากรูปที่ 5.3(ก) ปริมาณเมทานอล เท่ากับ 20 vol.% และ KOH เท่ากับ 4 g.L<sup>-1</sup> พบว่า ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นตามความยาวของเครื่องปฏิกรณ์ทุกกรณี โดยที่ความยาว เท่ากับ 900 mm ได้ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์มากที่สุด เท่ากับ 33.67, 41.65, 93.34 และ 90.98 wt.% สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ PF, SM, US และ SM/US ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มปริมาณ KOH เท่ากับ 12 g.L<sup>-1</sup> ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นตั้งแต่ความยาวของท่ออัลตราโซนิก เท่ากับ 100 mm และเข้าสู่สมดุลหลังจากความยาวของเครื่องปฏิกรณ์ของ SM, US และ SM/US เท่ากับ 300 mm โดยความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์มากที่สุด เท่ากับ 81.99, 95.70, 98.98 และ 97.67 wt.% ที่ความยาวของท่ออัลตราโซนิก เท่ากับ 900 mm (PF และ SM) 700 mm (US) และ 900 mm (SM/US) ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าเครื่องปฏิกรณ์ PF มีผลต่อการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง น้อยมากเมื่อเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์อื่นๆ โดยเครื่องปฏิกรณ์ US มีผลต่อการผลิตไบโอดีเซลจาก RPO

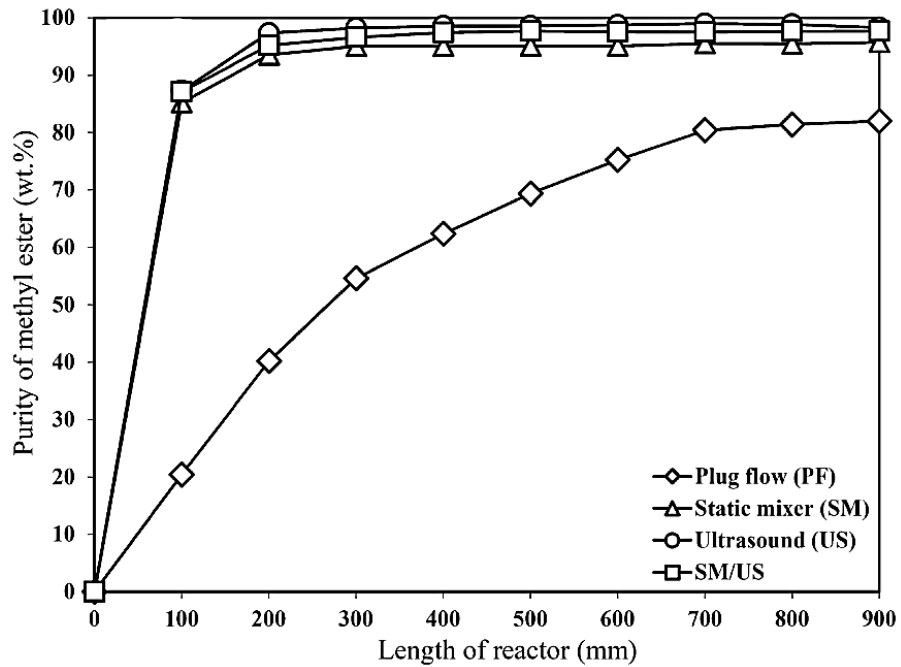
แบบต่อเนื่อง เนื่องจากอัลตราโซนิกช่วยในการถ่ายเทมวลระหว่างน้ำมันกับสารเคมีได้ดี และสำหรับเมื่อใช้ SM ร่วมกับ US กลับทำให้ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ลดลง เนื่องจาก SM ไปดูดซับคลื่นอัลตราโซนิกทำให้ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนกลีเซอไรด์เป็นไบโอดีเซลลดลง จึงไม่ควรที่จะนำมาใช้ร่วมกัน

โดยได้ตีพิมพ์ผลงานนี้ในวารสาร Energy Conversion and Management ในบทความ: Effects of mixing technologies on continuous methyl ester production: Comparison of using plug flow, static mixer, and ultrasound clamp. ดังแสดงในภาคผนวก

ซ



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.3 การเปรียบเทียบความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ของกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน โดยใช้ PF, SM, US และ SM/US ภายใต้เงื่อนไขเมทานอล เท่ากับ 20 vol.% กับ (ก) KOH เท่ากับ 4 g.L<sup>-1</sup> และ (ข) KOH เท่ากับ 12 g.L<sup>-1</sup> ที่อัตราการไหลของ RPO เท่ากับ 20 L.h<sup>-1</sup> อุณหภูมิ 60°C

## 5.4 ผลการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก แบบ 3 ขั้นตอน

5.4.1 ผลการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก ขั้นตอนที่ 1

สำหรับในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก ขั้นตอนที่ 1 โดยใช้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ซึ่งมีขอบเขตการทดลองคือ ช่วงของปริมาณเมทานอล เท่ากับ 19.8-70.2 vol.% ช่วงของปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 0-10.0 vol.% และช่วงของความยาวของท่ออัลตราโซนิก เท่ากับ 100-700 mm จากตารางที่ 5.1 พบว่า เมื่อนำน้ำมันลดกรดไขมันอิสระไปวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ด้วยเทคนิค nuclear magnetic resonance spectroscopy (NMR) สามารถผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบสถิตร่วมกับคลื่นเสียงอัลตราโซนิกมีความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์อยู่ในช่วง เท่ากับ 28.74-77.52 wt.% และสามารถเขียนรูปแบบสมการทำนายความสัมพันธ์ค่าความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์กับตัวแปรอิสระ ดังสมการที่ 5.1 ซึ่งมีค่า coefficient of multiple determination,  $R^2$  เท่ากับ 0.902 และ  $R^2_{adjusted}$  เท่ากับ 0.791 และมีค่าทางสถิติ ดังแสดงในตารางที่ 5.2 โดยจากสมการที่ 5.1 สามารถทำนายเงื่อนไขที่เหมาะสม (optimal condition) คือ ปริมาณเมทานอล เท่ากับ 70.2 vol.% ปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 6.2 vol.% และความยาวของท่ออัลตราโซนิก เท่ากับ 400 mm จะสามารถผลิตเมทิลเอสเทอร์ได้ความบริสุทธิ์ เท่ากับ 91.46 wt.% และได้แสดง contour plot ของค่าความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์กับตัวแปรอิสระต่างๆ เช่น ความยาวของท่ออัลตราโซนิกกับปริมาณเมทานอล ความยาวของท่ออัลตราโซนิกกับปริมาณกรดซัลฟิวริก และปริมาณเมทานอลกับปริมาณกรดซัลฟิวริก ดังแสดงในรูปที่ 5.4 และเนื่องจากเงื่อนไขที่เหมาะสมเป็นเงื่อนไขที่ทำให้ได้ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์สูงสุด แต่ต้องใช้ปริมาณสารเคมีทั้งเมทานอลและกรดซัลฟิวริกในปริมาณมาก ซึ่งเกินความจำเป็นสำหรับขั้นตอนที่ 1 จึงพิจารณาถึงปริมาณการใช้เมทานอล โดยพิจารณาจากสมการที่ 5.1 ดังแสดงในรูปที่ 5.5 พบว่า ที่ปริมาณเมทานอล เท่ากับ 43.7 vol.% ปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 0.1 vol.% และความยาวของท่ออัลตราโซนิก เท่ากับ 400 mm ได้ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ เท่ากับ 20.00 wt.% แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเมทานอล เท่ากับ 45.7 vol.% ปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 7.0 vol.% และความยาวของท่ออัลตราโซนิก เท่ากับ 400 mm ได้ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้น เท่ากับ 60.00 wt.% คิดเป็น 66.67% และเมื่อเพิ่มปริมาณเมทานอล เท่ากับ 66.9 vol.% ปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 6.4 vol.% และความยาวของท่ออัลตราโซนิก เท่ากับ 400 mm ได้ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้น เท่ากับ 80.00 wt.% คิดเป็น 25.00% แต่ต้องเพิ่มปริมาณเมทานอล 31.69% ดังนั้นเงื่อนไขที่แนะนำ (recommended condition) คือ ปริมาณเมทานอล เท่ากับ 45.7 vol.% ปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 7.0 vol.% และความยาวของท่ออัลตราโซนิก เท่ากับ 400 mm เมื่อได้ทดลองเพื่อยืนยัน และวิเคราะห์ด้วยเทคนิค NMR พบว่า ได้ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ เท่ากับ 60.24 wt.% ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทำนาย โดยเงื่อนไขที่เหมาะสมและเงื่อนไขแนะนำ ดังแสดง

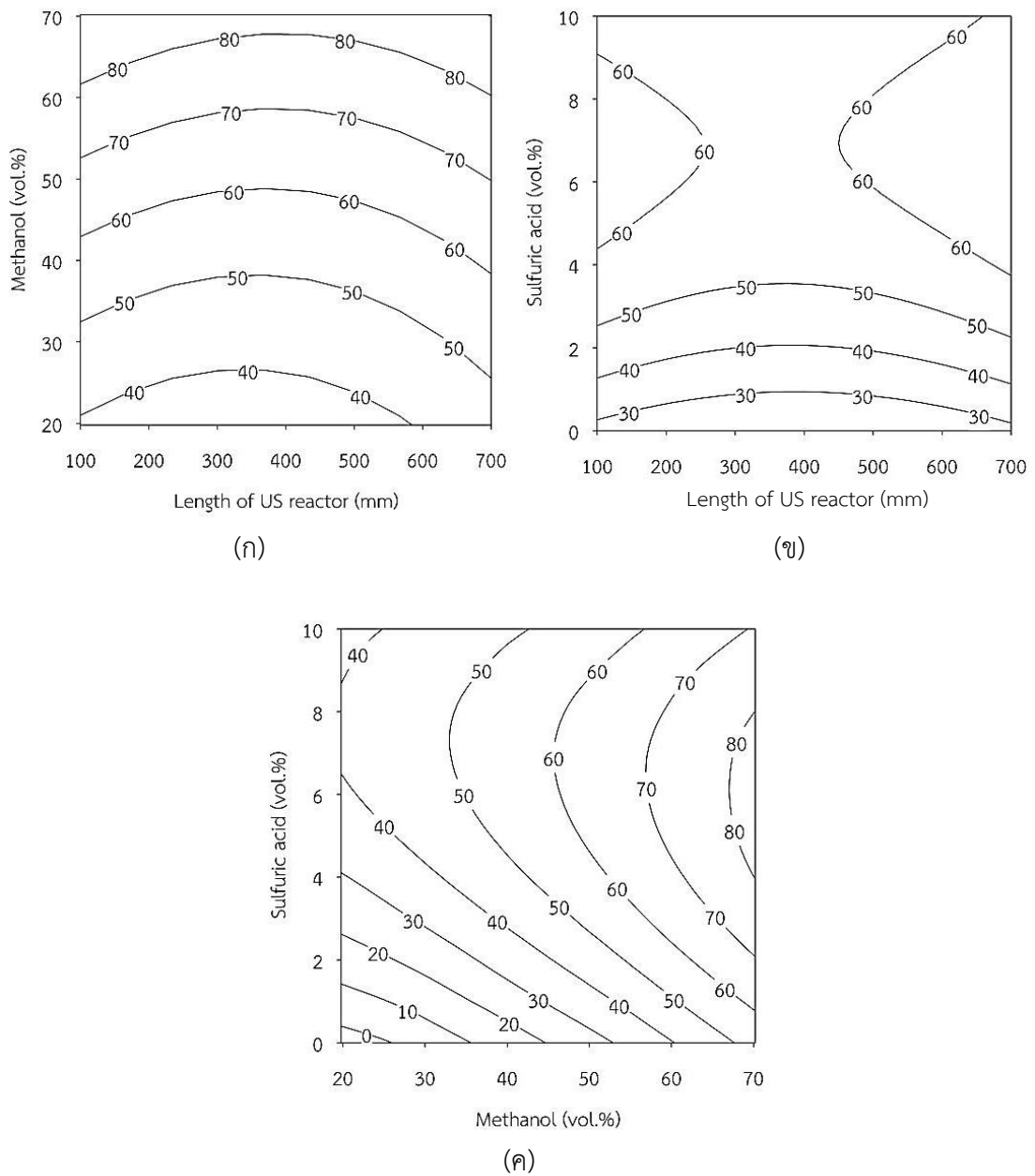
ในตารางที่ 5.3 และสามารถสรุปได้ว่าตัวแปรอิสระ คือ ปริมาณเมทานอล ปริมาณกรดซัลฟิวริก และความยาวของท่ออัลตราโซนิก มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของเมทิลเอสเทอร์อย่างมีนัยสำคัญ

$$ME = \beta_0 + \beta_1 M + \beta_2 S + \beta_3 L + \beta_4 ML + \beta_5 MS + \beta_6 SL + \beta_7 M^2 + \beta_8 S^2 + \beta_9 L^2 \quad (5.1)$$

โดยที่  $ME$  คือ ความบริสุทธิ์เมทิลเอสเทอร์ (wt.%)  $M$  คือ ปริมาณเมทานอล (vol.%)  $S$  คือ ปริมาณกรดซัลฟิวริก (vol.%) และ  $L$  คือ ความยาวของท่ออัลตราโซนิก (mm)

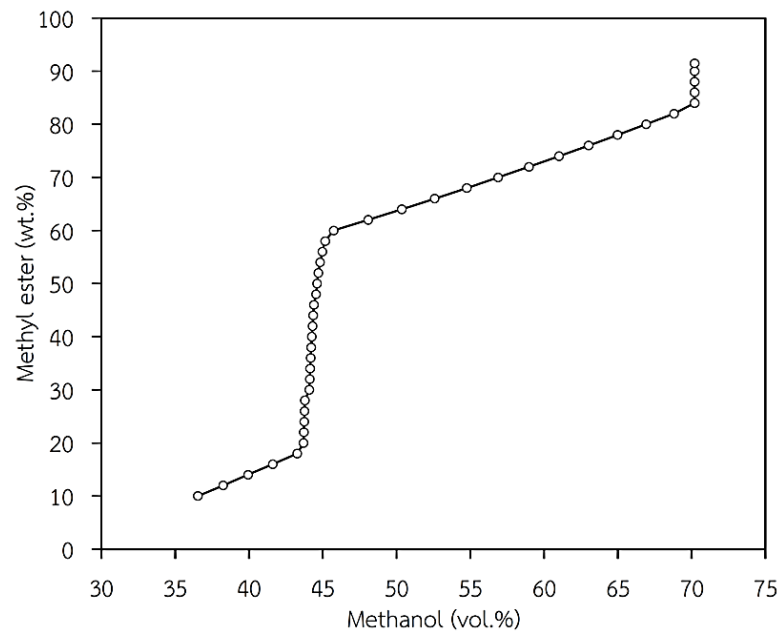
ตารางที่ 5.1 ผลการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขปาล์มแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก ขั้นตอนที่ 1

Experiment	Methanol $M$ : (vol.%)	Sulfuric acid $S$ : (vol.%)	Length of US reactor $L$ : (mm)	Methyl ester $ME$ : (wt.%)
1	19.8	5.0	400	28.74
2	30.0	2.0	200	32.68
3	30.0	2.0	600	35.35
4	30.0	8.0	200	51.81
5	30.0	8.0	600	53.05
6	45.0	0.0	400	7.73
7	45.0	5.0	100	52.62
8	45.0	5.0	400	57.79
9	45.0	5.0	400	57.85
10	45.0	5.0	400	57.55
11	45.0	5.0	400	57.40
12	45.0	5.0	700	60.91
13	45.0	10.0	400	52.49
14	60.0	2.0	200	68.80
15	60.0	2.0	600	65.07
16	60.0	8.0	200	74.07
17	60.0	8.0	600	76.43
18	70.2	5.0	400	77.52



รูปที่ 5.4 แสดง contour plot ระหว่างความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์กับตัวแปรอิสระต่างๆ ของขั้นตอนที่ 1 (ก) ความยาวของท่ออัลตราโซนิกกับปริมาณเมทานอล (ข) ความยาวของท่ออัลตราโซนิกกับปริมาณกรดซัลฟิวริก และ (ค) ปริมาณเมทานอลกับปริมาณกรดซัลฟิวริก ที่เงื่อนไข PFAD มีอัตราการไหล เท่ากับ  $25 \text{ L.h}^{-1}$





รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ของปริมาณเมทานอลที่มีผลต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์ของขั้นตอนที่ 1

ตารางที่ 5.2 ค่าทางสถิติของสมการทำนายความสัมพันธ์ของขั้นตอนที่ 1

Coefficient	Value	p-value
$\beta_0$	-18.49000	0.61500
$\beta_1$	0.97300	0.38300
$\beta_2$	13.50000	0.01540
$\beta_3$	-0.05544	0.48000
$\beta_4$	-0.00022	0.82600
$\beta_5$	-0.05611	0.41000
$\beta_6$	0.00097	0.84600
$\beta_7$	0.00379	0.71900
$\beta_8$	-0.82100	0.01284
$\beta_9$	0.00008	0.25700

$R^2$  เท่ากับ 0.902 และ  $R^2_{\text{adjusted}}$  เท่ากับ 0.791

ตารางที่ 5.3 เงื่อนไขที่เหมาะสม และเงื่อนไขที่แนะนำขั้นตอนที่ 1

Condition	Optimal	Recommended
Methanol (vol.%)	70.2	45.7
Sulfuric acid (vol.%)	6.2	7.0
Length of US reactor (mm)	700	400
Estimated methyl ester (wt.%)	91.46	60.00
Experimented methyl ester (wt.%)	88.89	60.24

5.4.2 ผลการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก ขั้นตอนที่ 2

เนื่องด้วยกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD ด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก ขั้นตอนที่ 1 ไม่สามารถทำให้ได้ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์มากกว่า 95.6 wt.% จึงจำเป็นต้องนำน้ำมันลดกรดไขมันอิสระที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 มาเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก ขั้นตอนที่ 2 ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน โดยใช้เงื่อนไขปริมาณเมทานอล เท่ากับ 45.7 vol.% ปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 7.0 wt.% และความยาวของท่ออัลตราโซนิก เท่ากับ 400 mm สามารถผลิตเมทิลเอสเทอร์มีความบริสุทธิ์ เท่ากับ 60.24 wt.% ซึ่งขอบเขตของการทดลองของขั้นตอนที่ 2 คือ ช่วงของปริมาณเมทานอล เท่ากับ 26.4-93.6 vol.% ช่วงของปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 0.6-7.4 vol.% และช่วงความยาวท่อของอัลตราโซนิก เท่ากับ 100-700 mm จากตารางที่ 5.4 พบว่า ผลการวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ด้วยเทคนิค NMR อยู่ในช่วง เท่ากับ 85.11-93.02 wt.% และสามารถเขียนรูปแบบสมการทำนายความสัมพันธ์ค่าความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์กับตัวแปรอิสระ ดังสมการที่ 5.2 ซึ่งมีค่า coefficient of multiple determination,  $R^2$  เท่ากับ 0.952 และ  $R^2_{adjusted}$  เท่ากับ 0.898 และมีค่าทางสถิติ ดังแสดงในตารางที่ 5.5 โดยจากสมการที่ 5.2 สามารถทำนายเงื่อนไขที่เหมาะสม คือ ปริมาณเมทานอล เท่ากับ 81.4 vol.% ปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 4.2 vol.% และความยาวของท่ออัลตราโซนิก เท่ากับ 400 mm จะสามารถผลิตเมทิลเอสเทอร์ได้ความบริสุทธิ์ เท่ากับ 93.73 wt.% และได้แสดง contour plot ของค่าความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์กับตัวแปรอิสระต่างๆ เช่น ความยาวของท่ออัลตราโซนิกกับปริมาณเมทานอล ความยาวของท่ออัลตราโซนิกกับปริมาณกรดซัลฟิวริก และปริมาณเมทานอลกับปริมาณกรดซัลฟิวริก ดังแสดงในรูปที่ 5.6 และทำการทดลองเพื่อยืนยัน และวิเคราะห์ด้วยเทคนิค NMR และ gas chromatography (GC) พบว่า ได้ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ เท่ากับ 90.91 wt.% และ 94.23 wt.% ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าก็ยังไม่สามารถผลิตเมทิลเอสเทอร์ได้ความบริสุทธิ์มากกว่า 96.5 wt.% เนื่องจากยังคงมีส่วนประกอบจำพวกกลีเซอไรด์ จึงจำเป็นต้องเปลี่ยนองค์ประกอบดังกล่าวให้เป็นไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก ขั้นตอนที่ 3 แต่ปริมาณการใช้สารเคมีของเงื่อนไขที่เหมาะสมยังมีปริมาณมาก จึงมีการพิจารณาปริมาณการใช้เมทานอล โดยพิจารณาจากสมการที่ 5.2 ดังแสดงในรูปที่ 5.6 พบว่า ปริมาณเมทานอล เท่ากับ 59.0 vol.% ปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 0.9 vol.% และความยาวของท่ออัลตราโซนิก เท่ากับ 400 mm ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ เท่ากับ 90.00

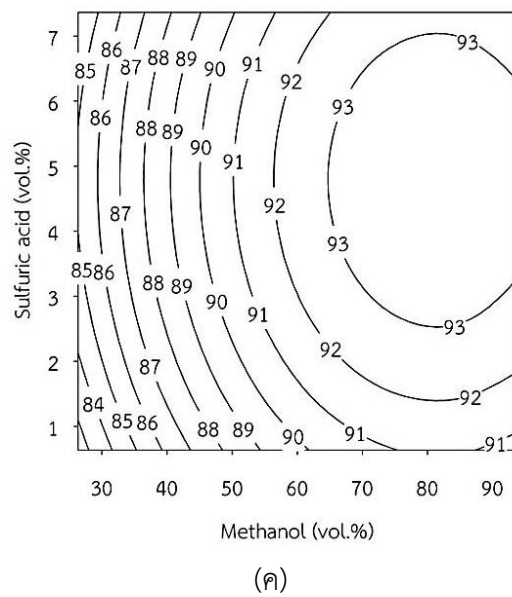
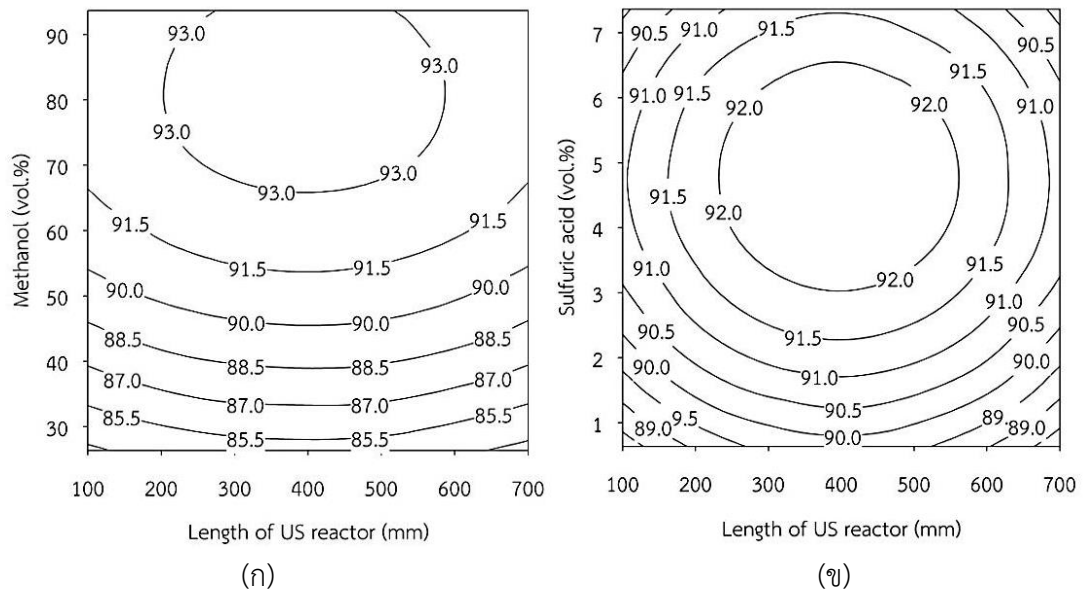
wt.% แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเมทานอล เท่ากับ 59.6 vol.% ปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 3.1 vol.% และความยาวของท่ออัลตราโซนิก เท่ากับ 400 mm ได้ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้น เท่ากับ 92.00 wt.% คิดเป็น 2.22% แต่เพิ่มปริมาณเมทานอล เท่ากับ 1.02% ดังนั้นจึงเลือกเงื่อนไขที่แนะนำ คือ ปริมาณเมทานอล เท่ากับ 59.6 vol.% ปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 3.1 vol.% และความยาวของท่ออัลตราโซนิก เท่ากับ 400 mm เมื่อทดลองยืนยัน และวิเคราะห์ด้วยเทคนิค NMR พบว่า ได้ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ เท่ากับ 91.32 wt.% โดยเงื่อนไขที่เหมาะสม และเงื่อนไขแนะนำสามารถ ดังแสดงในตารางที่ 5.6

$$ME = \beta_0 + \beta_1 M + \beta_2 S + \beta_3 L + \beta_4 ML + \beta_5 MS + \beta_6 SL + \beta_7 M^2 + \beta_8 S^2 + \beta_9 L^2 \quad (5.2)$$

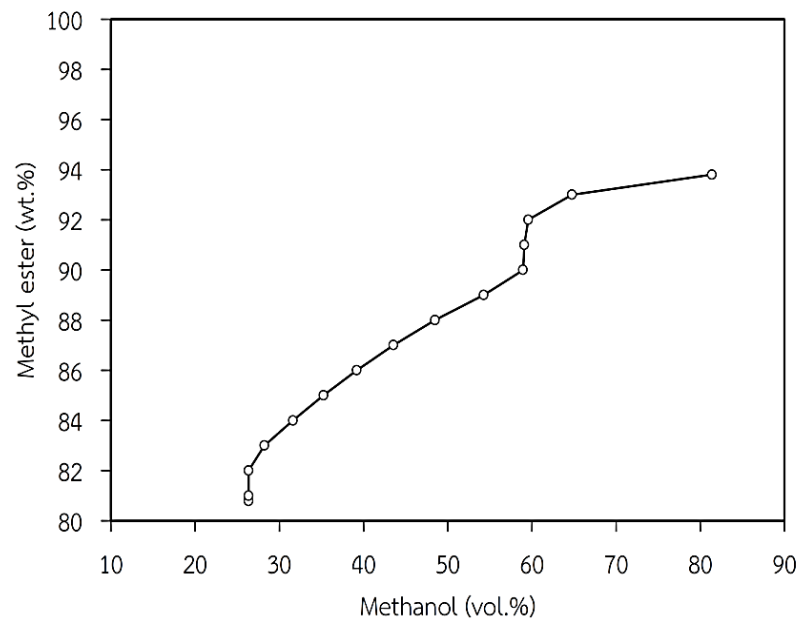
โดยที่  $ME$  คือ ความบริสุทธิ์เมทิลเอสเทอร์ (wt.%)  $M$  คือ ปริมาณเมทานอล (vol.%)  $S$  คือ ปริมาณกรดซัลฟิวริก (vol.%) และ  $L$  คือ ความยาวของท่ออัลตราโซนิก (mm)

ตารางที่ 5.4 ผลการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก ขั้นตอนที่ 2

Experiment	Methanol $M$ : (vol.%)	Sulfuric acid $S$ : (vol.%)	Length of US reactor $L$ : (mm)	Methyl ester $ME$ : (wt.%)
1	26.4	4.0	400	85.11
2	40.0	2.0	200	87.34
3	40.0	2.0	600	86.96
4	40.0	6.0	200	87.34
5	40.0	6.0	600	88.11
6	60.0	0.6	400	88.50
7	60.0	4.0	100	90.50
8	60.0	4.0	400	92.59
9	60.0	4.0	400	92.29
10	60.0	4.0	400	92.34
11	60.0	4.0	400	92.39
12	60.0	4.0	700	90.91
13	60.0	7.4	400	92.59
14	80.0	2.0	200	93.46
15	80.0	2.0	600	92.17
16	80.0	6.0	200	92.17
17	80.0	6.0	600	92.17
18	93.6	4.0	400	93.02



รูปที่ 5.6 แสดง contour plot ระหว่างความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์กับตัวแปรอิสระต่างๆ ของขั้นตอนที่ 2 (ก) ความยาวของท่ออัลตราโซนิกกับปริมาณเมทานอล (ข) ความยาวของท่ออัลตราโซนิกกับปริมาณกรดซัลฟิวริก และ (ค) ปริมาณเมทานอลกับปริมาณกรดซัลฟิวริก ที่เงื่อนไข PFAD มีอัตราการไหล เท่ากับ  $25 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$



รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ของปริมาณเมทานอลที่มีผลต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์ของขั้นตอนที่ 2

ตารางที่ 5.5 ค่าทางสถิติของสมการทำนายความสัมพันธ์ของขั้นตอนที่ 2

Coefficient	Value	<i>p</i> -value
$\beta_0$	66.58000	0.00000
$\beta_1$	0.51800	0.00021
$\beta_2$	1.64700	0.04820
$\beta_3$	0.01408	0.10400
$\beta_4$	-0.00005	0.49200
$\beta_5$	-0.00762	0.32600
$\beta_6$	0.00076	0.32600
$\beta_7$	-0.00287	0.00106
$\beta_8$	-0.15600	0.02638
$\beta_9$	-0.00002	0.03314

$R^2$  เท่ากับ 0.952 และ  $R^2_{\text{adjusted}}$  เท่ากับ 0.898

ตารางที่ 5.6 เงื่อนไขที่เหมาะสม และเงื่อนไขที่แนะนำขั้นตอนที่ 2

Condition	Optimal	Recommended
Methanol (vol.%)	81.4	59.6
Sulfuric acid (vol.%)	4.2	3.1
Length of US reactor (mm)	400	400
Estimated methyl ester (wt).%	93.73	93.00
Experimented methyl ester (NMR) (wt.%)	90.91	91.32
Experimented methyl ester (GC) (wt.%)	94.22	-

5.4.3 ผลการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก ขั้นตอนที่ 3

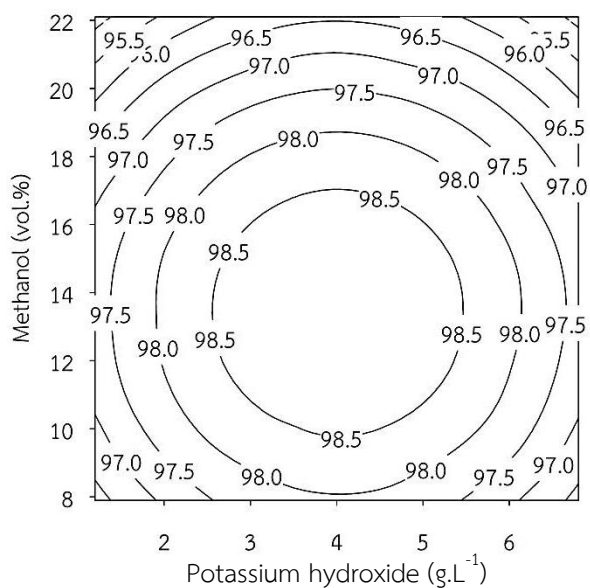
สำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD ด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิกแบบต่อเนื่อง ขั้นตอนที่ 3 ใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน เพื่อเปลี่ยนองค์ประกอบจำพวกไตรกลีเซอไรด์ของน้ำมันลดกรดไขมันอิสระจากขั้นตอนที่ 2 ให้เป็นเมทิลเอสเทอร์ โดยมีขอบเขตของการทดลอง คือ ช่วงของปริมาณเมทานอล เท่ากับ 7.9-22.1 vol.% และช่วงของปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1.2-6.8 g.L<sup>-1</sup> จากตารางที่ 5.7 พบว่า เมื่อวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ด้วยเทคนิค NMR ได้ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์อยู่ในช่วง เท่ากับ 96.56-98.91 wt.% และสามารถเขียนรูปแบบสมการทำนายความสัมพันธ์ค่าความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์กับตัวแปรอิสระ ดังสมการที่ 5.3 ซึ่งมีค่า coefficient of multiple determination, R<sup>2</sup> เท่ากับ 0.959 และ R<sup>2</sup><sub>adjusted</sub> เท่ากับ 0.925 และค่าทางสถิติ ดังแสดงในตารางที่ 5.8 โดยจากสมการที่ 5.3 สามารถทำนายเงื่อนไขที่เหมาะสม คือ ปริมาณเมทานอล เท่ากับ 13.4 vol.% และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 4.0 g.L<sup>-1</sup> โดยทำนายว่าสามารถผลิตเมทิลเอสเทอร์ได้ความบริสุทธิ์ เท่ากับ 98.94 wt.% และ contour plot ของค่าความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์กับตัวแปรอิสระ คือ ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์กับปริมาณเมทานอล ดังแสดงในรูปที่ 5.8 และเมื่อทดลองเพื่อยืนยันและวิเคราะห์ด้วยเทคนิค NMR และ เทคนิค GC พบว่า ได้ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ เท่ากับ 97.09 wt.% และ 97.11 wt.% ตามลำดับ ซึ่งผ่านมาตรฐานไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์ เท่ากับ 96.5 wt.%

$$ME = \beta_0 + \beta_1 M + \beta_2 K + \beta_3 M^2 + \beta_4 MK + \beta_5 L^2 \quad (5.3)$$

โดยที่  $ME$  คือ ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ (wt.%)  $M$  คือ ปริมาณเมทานอล (vol.%) และ  $K$  คือ ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (g.L<sup>-1</sup>)

ตารางที่ 5.7 ผลการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขปาล์มแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก ขั้นตอนที่ 3

Experiment	Methanol <i>M</i> : (vol.%)	Potassium hydroxide <i>K</i> : (g.L <sup>-1</sup> )	Methyl ester <i>ME</i> : (wt.%)
1	7.9	4.0	97.56
2	10.0	2.0	98.04
3	10.0	6.0	98.04
4	15.0	1.2	97.09
5	15.0	4.0	98.87
6	15.0	4.0	98.74
7	15.0	4.0	98.89
8	15.0	4.0	98.91
9	15.0	6.8	97.15
10	20.0	2.0	96.62
11	20.0	6.0	96.62
12	22.1	4.0	96.56



รูปที่ 5.8 แสดง contour plot ระหว่างความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์กับปริมาณเมทานอล ของขั้นตอนที่ 3

ตารางที่ 5.8 ค่าทางสถิติของสมการทำนายความสัมพันธ์ของ ขั้นตอนที่ 3

Coefficient	Value	p-value
$\beta_0$	89.70000	0.00000
$\beta_1$	0.88700	0.00056
$\beta_2$	1.64300	0.00124
$\beta_3$	-0.03310	0.00018
$\beta_4$	0.00000	1.00000
$\beta_5$	-0.20500	0.00022

$R^2$  เท่ากับ 0.959 และ  $R^2_{\text{adjusted}}$  เท่ากับ 0.925

### 5.5 การศึกษาปริมาณการใช้สารเคมี เวลาทำปฏิกิริยา และปริมาณผลได้ของการผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก แบบ 3 ขั้นตอน

#### 5.5.1 ปริมาณสารเคมี และเวลาทำปฏิกิริยา

จากตารางที่ 5.9 การศึกษาการใช้ปริมาณสารเคมีในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก แบบ 3 ขั้นตอน พบว่า มีการใช้ปริมาณเมทานอล เท่ากับ 118.7 vol.% ปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 10.1 vol.% และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 4.0 g.L<sup>-1</sup> และจากรูปที่ 5.9 พบว่า ในการผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิกแบบต่อ ขั้นตอนที่ 1 สามารถเปลี่ยนองค์ประกอบของ PFAD ซึ่งเป็นกรดไขมันอิสระสูงกว่า 90 wt.% ให้เป็นเมทิลเอสเทอร์ได้ความบริสุทธิ์ เท่ากับ 60.24 wt.% ที่เวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 10.40 s หรือความยาวของท่ออัลตราโซนิก เท่ากับ 400 mm และขั้นตอนที่ 2 สามารถผลิตเมทิลเอสเทอร์ได้ความบริสุทธิ์ เท่ากับ 91.32 wt.% ที่เวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 10.40 s หรือความยาวของท่ออัลตราโซนิก เท่ากับ 400 mm และขั้นตอนที่ 3 สามารถผลิตเมทิลเอสเทอร์ได้ความบริสุทธิ์ เท่ากับ 97.11 wt.% ที่เวลาทำปฏิกิริยา เท่ากับ 18.20 s หรือความยาวของท่ออัลตราโซนิก ประมาณ 700 mm ดังนั้นจะใช้เวลาในกระบวนการผลิตทั้ง 3 ขั้นตอน เท่ากับ 39.00 s ซึ่งลักษณะของวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ของขั้นตอนต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.10

#### 5.5.2 ปริมาณผลได้ของไบโอดีเซล

จากตารางที่ 5.10 สำหรับปริมาณผลได้ของการผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก แบบ 3 ขั้นตอน พบว่า การลดกรดไขมันอิสระของ PFAD ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันจากขั้นตอนที่ 1 พบว่า มีปริมาณผลได้ เท่ากับ 103.93 vol.% เมื่อเทียบกับ PFAD เริ่มต้น และเมื่อนำน้ำมันลดกรดไขมันอิสระจากขั้นตอนที่ 1 ไปลดกรดไขมันอิสระอีกครั้งด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันขั้นตอนที่ 2 พบว่า มีปริมาณผลได้ เท่ากับ 103.56 vol.% เมื่อเทียบกับน้ำมันลดกรดไขมันอิสระจากขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 3 เป็นการใช้อุณหภูมิที่ 60°C เพื่อเปลี่ยนองค์ประกอบจำพวกไตรกลีเซอไรด์ให้เป็นไบโอดีเซล พบว่า มี



ปริมาณผลได้ เท่ากับ 107.51 vol.% เมื่อเทียบกับน้ำมันลกรดไขมันอิสระจากขั้นตอนที่ 2 และเมื่อนำน้ำมันไบโอดีเซลดิบจากขั้นตอนที่ 3 ไปผ่านกระบวนการล้างด้วยน้ำเพื่อกำจัดสารเคมีตกค้าง และสิ่งเจือปนออก พบว่า มีปริมาณผลได้ของไบโอดีเซลบริสุทธิ์ เท่ากับ 79.23 vol.% เมื่อเทียบกับน้ำมันลกรดไขมันอิสระจากขั้นตอนที่ 3 โดยสามารถผลิตเมทิลเอสเทอร์จาก PFAD ให้มีความบริสุทธิ์ เท่ากับ 97.11 wt.% และมีปริมาณผลได้ของเมทิลเอสเทอร์ เท่ากับ 91.67 wt.% เมื่อเทียบกับ PFAD เริ่มต้น และแผนภาพสมดุลเชิงปริมาตร ดังแสดงในรูปที่ 5.11 พบว่า มีปริมาณเมทานอลตกค้างในของเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ 3 ขั้นตอน เท่ากับ 71.45 vol.% โดยแต่ละขั้นตอนมีปริมาณเมทานอลตกค้าง เท่ากับ 32.68, 38.08 และ 0.69 vol.% ตามลำดับ ซึ่งสามารถกลั่นกลับมาใช้ได้ โดยคำนวณจาก ซึ่งคำนวณจากสมการที่ 5.4 และจากตารางที่ 5.9 การใช้พลังงานในการกลั่นเมทานอลกลับคืนทั้งหมด เท่ากับ 13.52 kW

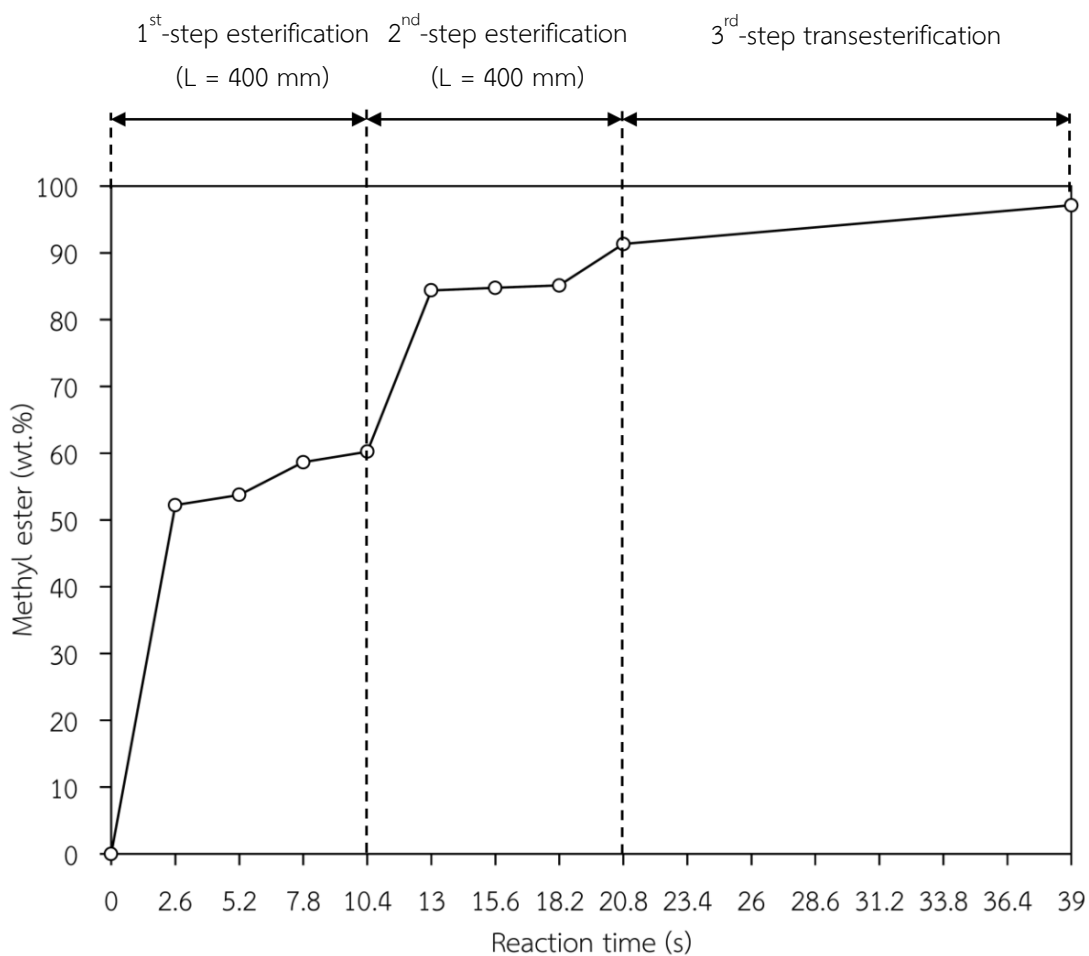
$$Q = mc_p\Delta T \quad (5.4)$$

โดยที่ Q คือ พลังงานความร้อนที่ใช้ในกระบวนการกลั่นเมทานอล (kW), m คือ อัตราการไหลเชิงมวล ( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ),  $c_p$  คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของเมทานอล ( $99.16 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{C}^\circ$ ) และ  $\Delta T$  คือ อุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลง ( $^\circ\text{C}$ )

ตารางที่ 5.9 พลังงานความร้อนที่ใช้ในกระบวนการกลั่นเมทานอล

Process	Residual methanol (vol.%)	Flow rate ( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )	Thermal energy (kW)
1 <sup>st</sup> -step esterification	32.68	0.00180	6.19
2 <sup>nd</sup> -step esterification	38.08	0.00209	7.19
3 <sup>rd</sup> -step transesterification	0.69	0.00004	0.14
Total			13.52

หมายเหตุ: จุดเดือดของเมทานอล เท่ากับ  $64.7^\circ\text{C}$



รูปที่ 5.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์กับเวลาทำปฏิกิริยาของการผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิกแบบ 3 ขั้นตอน

หมายเหตุ: 1<sup>st</sup>-step esterification ใช้ ultrasonic clamp (ที่ความยาวของท่ออัลตราโซนิก เท่ากับ 400 mm มีปริมาตร เท่ากับ 72 mL ) 2<sup>nd</sup>-step esterification ใช้ ultrasonic clamp (ที่ความยาวของท่ออัลตราโซนิก เท่ากับ 400 mm มีปริมาตรในท่อ เท่ากับ 72 mL ) และ 3<sup>rd</sup>-step transesterification ใช้ ultrasonic probe (มีปริมาตรในท่อ เท่ากับ 134 mL )

ตารางที่ 5.10 เงื่อนไขที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก แบบ 3 ขั้นตอน

Condition	Optimal	Recommended
1 <sup>st</sup> -step esterification		
Methanol (vol.%)	70.2	45.7
Sulfuric acid (vol.%)	6.2	7.0
Length of US reactor (mm)	700	400
2 <sup>nd</sup> -step esterification		
Methanol (vol.%)	81.4	59.6
Sulfuric acid (vol.%)	4.2	3.1
Length of US reactor (mm)	400	400
3 <sup>rd</sup> -step transesterification		
Methanol (vol.%)	13.4	13.4
Potassium hydroxide (g.L <sup>-1</sup> )	4.0	4.0
Total		
Methanol (vol.%)	165.0	118.7
Sulfuric acid (vol.%)	10.4	10.1
Potassium hydroxide (g.L <sup>-1</sup> )	4.0	4.0
Length of US reactor (mm)	1100	800

ตารางที่ 5.11 ปริมาณผลได้ของไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก แบบ 3 ขั้นตอน

Process	Yield (vol.%)	Yield (vol.%) <sup>(5)</sup>
1 <sup>st</sup> - step: Esterification	103.93 <sup>(1)</sup>	103.93
2 <sup>nd</sup> - step: Esterification	103.56 <sup>(2)</sup>	107.63
3 <sup>rd</sup> - step: Transesterification	107.51 <sup>(3)</sup>	115.71
Purification	79.23 <sup>(4)</sup>	91.67

หมายเหตุ: <sup>(1)</sup> ปริมาณผลได้เทียบกับ PFAD

<sup>(2)</sup> ปริมาณผลได้เทียบกับน้ำมันกรดไขมันอิสระของขั้นตอนที่ 1

<sup>(3)</sup> ปริมาณผลได้เทียบกับน้ำมันกรดไขมันอิสระของขั้นตอนที่ 2

<sup>(4)</sup> ปริมาณผลได้เทียบกับไบโอดีเซลดิบของขั้นตอนที่ 3

<sup>(5)</sup> ปริมาณผลได้เทียบกับ PFAD เริ่มต้น



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

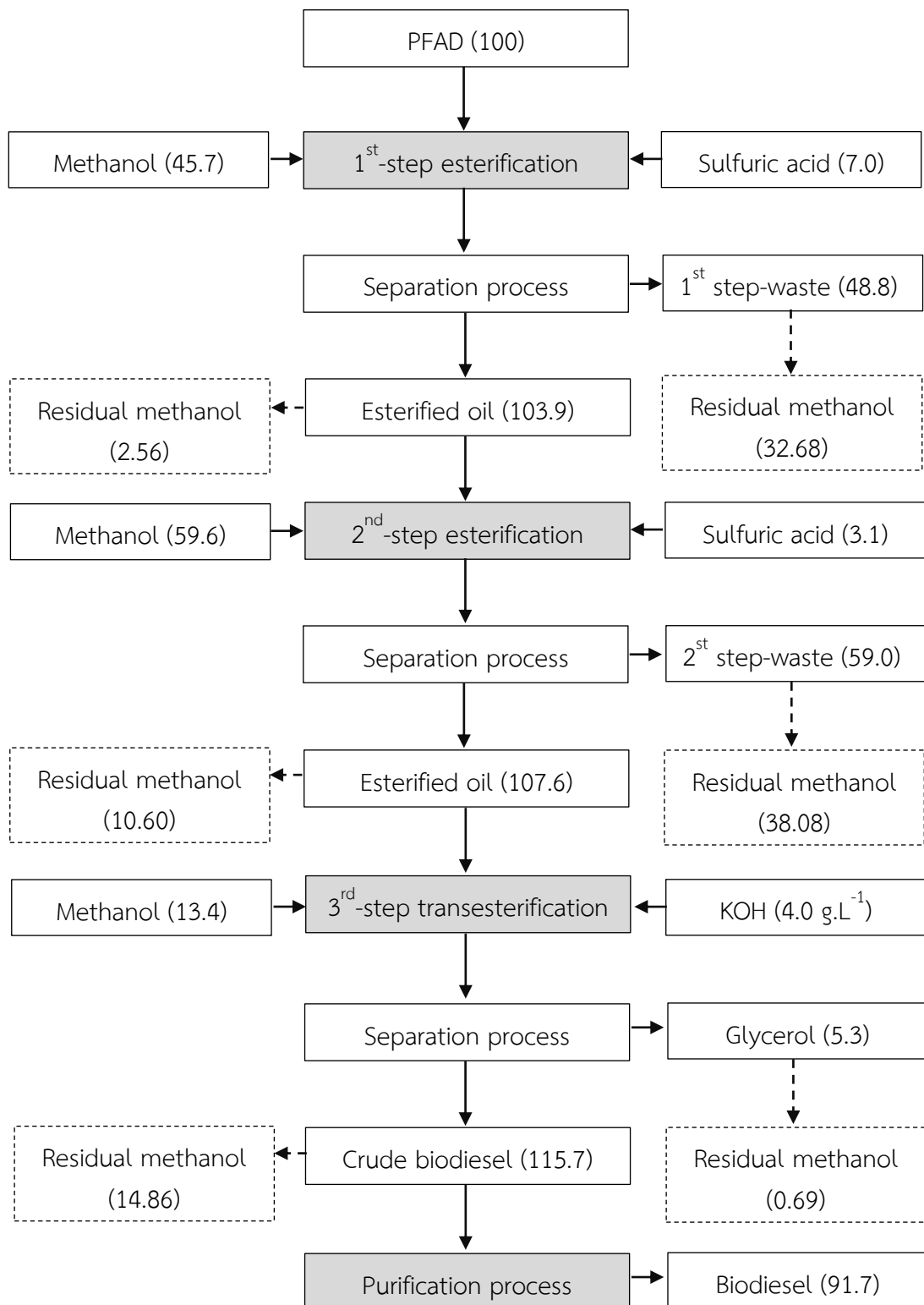


(จ)



(ฉ)

รูปที่ 5.10 วัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD แบบต่อเนื่อง  
ด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก แบบ 3 ขั้นตอน  
(ก) PFAD ที่อุณหภูมิ 30°C, (ข) PFAD ที่อุณหภูมิ 43°C, (ค) น้ำมันลดกรดไขมันอิสระจากขั้นตอนที่  
1 [ชั้นบน คือ น้ำมันลดกรดไขมันอิสระจากขั้นตอนที่ 1, ชั้นล่าง คือ น้ำ] (ง) น้ำมันลดกรดไขมันอิสระ  
จากขั้นตอนที่ 2 [ชั้นบน คือ น้ำมันลดกรดไขมันอิสระจากขั้นตอนที่ 2, ชั้นล่าง คือ น้ำ] (จ) เมทิลเอส  
เทอร์ดิบของขั้นตอนที่ 3 [ชั้นบน คือ เมทิลเอสเทอร์ดิบ, ชั้นล่าง คือ กลีเซอรอล]  
และ (ฉ) เมทิลเอสเทอร์บริสุทธิ์จาก PFAD



รูปที่ 5.11 แผนภาพสมดุลปริมาตร (vol.%) ของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก แบบ 3 ขั้นตอน

## 5.6 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของไบโอดีเซลตามมาตรฐาน

จากตารางที่ 5.12 การผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก แบบ 3 ชั้นตอน โดยมีความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ เท่ากับ 97.11 wt.% ซึ่งสูงกว่ามาตรฐานไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์ และคุณสมบัติอื่น ๆ รวมถึงผ่านมาตรฐานไบโอดีเซลชุมชน และไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์ ยกเว้นค่าเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและปริมาณกำมะถันไม่ผ่านมาตรฐาน ซึ่งสามารถแก้ปัญหาโดยการเติมสารเติมแต่งอย่างสารต้านออกซิเดชันเพื่อยับยั้งหรือชะลอการเกิดออกซิเดชัน และปริมาณกำมะถันแก้ปัญหาโดยการล้างไบโอดีเซลให้สะอาด โดยไบโอดีเซลที่ได้มีค่าความร้อน เท่ากับ  $38,100 \text{ kJ.kg}^{-1}$

## 5.7 การวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์

สำหรับต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก แบบ 3 ชั้นตอน สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ต้นทุนวัตถุดิบและสารเคมี และต้นทุนพลังงานไฟฟ้า

### 5.7.1 ต้นทุนวัตถุดิบและสารเคมี

จากตารางที่ 5.13 การศึกษาต้นทุนวัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก แบบ 3 ชั้นตอน เพื่อความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ พบว่า ต้นทุนราคาของ PFAD เท่ากับ  $19.24 \text{ THB.kg}^{-1}$  ( $16.56 \text{ THB.L}^{-1}$ ) (Simasatitkul and Arpornwichanop, 2017) โดยอัตราการไหลของ PFAD เท่ากับ  $25 \text{ L.h}^{-1}$  สามารถผลิตไบโอดีเซลได้ เท่ากับ  $22.9 \text{ L}$  หรือ 91.7% โดยต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซลที่รวมวัตถุดิบจะมีราคา เท่ากับ  $39.41 \text{ THB.kg}^{-1}$  ( $33.93 \text{ THB.L}^{-1}$ ) แต่หากคิดเฉพาะต้นทุนของสารเคมีจะมีค่า เท่ากับ  $20.17 \text{ THB.kg}^{-1}$  ( $17.37 \text{ THB.L}^{-1}$ ) และจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล พบว่า มีปริมาณเมทานอลตกค้างอยู่ในของเสียจากกระบวนการทำปฏิกิริยา เท่ากับ 71.45 vol.% ซึ่งหากมีการกลั่นเมทานอลกลับมาได้ทั้งหมดก็สามารถช่วยลดต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซลได้ เท่ากับ  $11.22 \text{ THB.kg}^{-1}$  ( $9.83 \text{ THB.L}^{-1}$ ) ดังนั้นจะมีต้นทุนของสารเคมี เท่ากับ  $8.61 \text{ THB.kg}^{-1}$  ( $7.54 \text{ THB.L}^{-1}$ )

### 5.7.2 ต้นทุนพลังงานไฟฟ้า

จากตารางที่ 5.14 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจาก PFAD แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก แบบ 3 ชั้นตอน มีกำลังการผลิต เท่ากับ  $25 \text{ L.h}^{-1}$  ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า เท่ากับ  $3.50 \text{ kWh}$  พบว่า ในช่วงของการเริ่มปฏิกิริยาของแต่ละขั้นตอนมีการใช้พลังงานไฟฟ้ามากที่สุด คือ ขั้นตอนของการอุ่นน้ำมัน ซึ่งหากคิดเฉพาะการใช้พลังงานไฟฟ้าขณะทำปฏิกิริยามีค่า เท่ากับ  $1.78 \text{ kWh}$  หรือมีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า เท่ากับ  $0.07773 \text{ kWh.L}^{-1}$  เมื่อคิดราคาค่าพลังงานไฟฟ้าในการดำเนินการผลิตไบโอดีเซลจากอัตราค่าไฟฟ้า เท่ากับ  $1.8047 \text{ THB.kWh}^{-1}$  (การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2017) มีราคา เท่ากับ  $0.16 \text{ THB.kg}^{-1}$  ( $0.14$

THB.L<sup>-1</sup>) และหากคิดราคาของการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดจะมีราคา เท่ากับ 0.31 THB.kg<sup>-1</sup> (0.27 THB.L<sup>-1</sup>)

ตารางที่ 5.12 คุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ผลิตจากส่วนกลั่นกรดไขมันแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก แบบ 3 ชั้นตอน

รายการ	มาตรฐานไบโอดีเซล		ผลการทดสอบ
	ชุมชน	พาณิชย์	
เมทิลเอสเทอร์ (wt.%)	-	> 96.5	97.11
ความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 15°C (kg.m <sup>-3</sup> )	860-900	860-900	876
ความหนืดที่อุณหภูมิ 40°C (cSt)	1.9-8	3.5-5	4.93
จุดวาบไฟ (°C)	> 120	> 120	162
กำมะถัน (wt.%)	-	< 0.001	> 0.0025
กากถ่าน (wt.%)	-	< 0.3	< 0.1
จำนวนซีเทน	> 47	> 51	68.1
เถ้าซัลเฟต (wt.%)	< 0.02	< 0.02	0.009
น้ำ (mg.kg <sup>-1</sup> )	-	< 500	110
สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด (mg.kg <sup>-1</sup> )	-	< 24	-
การกัดกร่อนแผ่นทองแดง	< No.3	< No.1	No.1a
เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 110°C (h)	-	> 10	0.96
ค่าความเป็นกรด (mgKOH.g <sup>-1</sup> )	< 0.8	< 0.5	0.35
ค่าไอโอดีน (g Iodine/100g)	-	< 120	45.9
กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์ (wt.%)	-	< 12	0.00
เมทานอล (wt.%)	-	< 0.2	< 0.01
โมนอกลิเซอไรด์ (wt.%)	-	< 0.7	0.02
ไดกลีเซอไรด์ (wt.%)	-	< 0.2	0.02
ไตรกลีเซอไรด์ (wt.%)	-	< 0.2	0.07
กลีเซอรินอิสระ (wt.%)	< 0.02	< 0.02	0.00
กลีเซอรินทั้งหมด (wt.%)	< 1.5	< 0.25	0.02
โลหะกลุ่ม 2 แคลเซียม (mg.kg <sup>-1</sup> )	-	< 5	4.33
แมกนีเซียม (mg.kg <sup>-1</sup> )	-	-	0.00
ฟอสฟอรัส (wt.%)	-	< 0.001	0.00
ค่าทางความร้อน (kJ.kg <sup>-1</sup> )	-	-	38,100

ตารางที่ 5.13 ต้นทุนสารเคมีที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก แบบ 3 ขั้นตอน

Process	Condition	Flow rate		Chemicals prices		Cost (THB.L <sup>-1</sup> )
		(L.h <sup>-1</sup> )	(kg.h <sup>-1</sup> )	(THB.kg <sup>-1</sup> )	(THB.h <sup>-1</sup> ) <sup>(ง)</sup>	
1 <sup>st</sup> -step esterification						
MeOH	45.7 (vol.%)	11.4	9.03	16.29 <sup>(น)</sup>	147.10	
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	7.0 (vol.%)	1.7	3.13	1.06 <sup>(ข)</sup>	3.32	
2 <sup>nd</sup> -step esterification						
MeOH	59.6 (vol.%)	14.9	11.80	16.29 <sup>(น)</sup>	192.22	
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	3.1 (vol.%)	0.8	1.47	1.06 <sup>(ข)</sup>	1.56	
3 <sup>rd</sup> -step transesterification						
MeOH	13.4 (vol.%)	3.4	2.69	16.29 <sup>(น)</sup>	43.82	
KOH	4.0 (g.L <sup>-1</sup> )	-	0.25	38.78 <sup>(ค)</sup>	9.70	
Total					397.72	17.37

หมายเหตุ: อัตราแลกเปลี่ยน 1 USD = 33.2389 THB และ 1 EUR = 39.9508 THB ณ วันที่ 19 กันยายน 2017 (ธนาคารแห่งประเทศไทย, 2017), <sup>(น)</sup> อ้างอิง Ngtech (2017), <sup>(ข)</sup> อ้างอิง ICIS (2017), <sup>(ค)</sup> อ้างอิง Rodrigues *et al.* (2016), <sup>(ง)</sup> เทียบกับอัตราการไหลของ PFAD เท่ากับ 25 L.h<sup>-1</sup>



ตารางที่ 5.14 ต้นทุนจากพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก แบบ 3 ขั้นตอน

รายการ	พลังงานไฟฟ้า (kWh)	
	ช่วงเริ่มต้น	ขณะทำปฏิกิริยา
<b>1<sup>st</sup>-step esterification</b>		
อุ่น PFAD 25 L จากอุณหภูมิ 30°C ถึง 50°C (ประมาณ 40 min)	1.03	-
อุ่นผสม PFAD และ MeOH อุณหภูมิ 50°C (ประมาณ 40 min)	0.45	-
ควบคุมอุณหภูมิสารผสมระหว่าง PFAD และ Alcohol ที่ 50°C	-	0.15
ปั๊มต่อเนื่อง 2 ตัว (สารผสม PFAD กับ Alcohol และ H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	-	0.04
เครื่องปฏิกรณ์อัลตราโซนิก	-	0.72
<b>รวมพลังงานไฟฟ้าขั้นตอนที่ 1</b>	<b>1.48</b>	<b>0.91</b>
<b>2<sup>nd</sup>-step esterification</b>		
อุ่นน้ำมันลดกรดไขมันอิสระขั้นตอนที่ 1 อุณหภูมิ 50°C (ประมาณ 60 min)	0.10	-
ควบคุมอุณหภูมิน้ำมันลดกรดไขมันอิสระขั้นตอนที่ 1 ที่ 50°C	-	0.10
ปั๊มต่อเนื่อง 3 ตัว (1 <sup>st</sup> esterified oil, Alcohol และ H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	-	0.03
เครื่องปฏิกรณ์อัลตราโซนิก	-	0.38
<b>รวมพลังงานไฟฟ้าขั้นตอนที่ 2</b>	<b>0.10</b>	<b>0.51</b>
<b>3<sup>rd</sup>-step transesterification</b>		
อุ่นน้ำมันลดกรดไขมันอิสระขั้นตอนที่ 1 อุณหภูมิ 60°C (ประมาณ 60 min)	0.20	-
ควบคุมอุณหภูมิน้ำมันลดกรดไขมันอิสระขั้นตอนที่ 1 ที่ 60°C	-	0.07
ปั๊มต่อเนื่อง 2 ตัว (2 <sup>nd</sup> esterified oil และ KOCH <sub>3</sub> )	-	0.02
เครื่องปฏิกรณ์อัลตราโซนิก	-	0.21
<b>รวมพลังงานไฟฟ้าขั้นตอนที่ 3</b>	<b>0.20</b>	<b>0.30</b>
<b>รวมพลังงานไฟฟ้าทั้ง 3 ขั้นตอน</b>	<b>1.78</b>	<b>1.72</b>

## บทที่ 6

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 บทสรุป

การศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขปาล์มแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก แบบ 3 ขั้นตอน สามารถสรุปผลการทดลอง ได้ดังนี้

##### 6.1.1 สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล

สำหรับสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก แบบ 3 ขั้นตอน มีกำลังการผลิต เท่ากับ  $25 \text{ L.h}^{-1}$  พบว่า การผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก ขั้นตอนที่ 1 ใช้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อลดกรดไขมันอิสระของ PFAD ภายใต้เงื่อนไขปริมาณเมทานอล เท่ากับ 45.7 vol.% ปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 7.0 vol.% และความยาวของท่ออัลตราโซนิก เท่ากับ 400 mm สามารถผลิตเมทิลเอสเทอร์ได้ความบริสุทธิ์ เท่ากับ 60.24 wt.% จากนั้นนำน้ำมันลดกรดไขมันอิสระจากขั้นตอนที่ 1 มาลดกรดไขมันอิสระด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันในขั้นตอนที่ 2 ภายใต้เงื่อนไขปริมาณเมทานอล เท่ากับ 59.6 vol.% ปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 3.1 vol.% และความยาวของท่ออัลตราโซนิก เท่ากับ 400 mm สามารถผลิตเมทิลเอสเทอร์ได้ความบริสุทธิ์ เท่ากับ 94.22 wt.% และสำหรับขั้นตอนที่ 3 ใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อเปลี่ยนองค์ประกอบจำพวกกลีเซอไรด์ให้เป็นเมทิลเอสเทอร์ ภายใต้เงื่อนไขปริมาณเมทานอล เท่ากับ 13.4 vol.% และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ  $4.0 \text{ g.L}^{-1}$  สามารถผลิตเมทิลเอสเทอร์ได้ความบริสุทธิ์ เท่ากับ 97.11 wt.%

##### 6.1.2 ปริมาณสารเคมี เวลาทำปฏิกิริยา และปริมาณผลได้

ปริมาณการใช้สารเคมีที่ใช้ในระบบผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก แบบ 3 ขั้นตอน ซึ่งสามารถผลิตเมทิลเอสเทอร์ได้ความบริสุทธิ์ เท่ากับ 97.11 wt.% พบว่า มีการใช้ปริมาณเมทานอลทั้งหมด เท่ากับ 118.7 vol.% ปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 10.1 vol.% ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ  $4.0 \text{ g.L}^{-1}$  และเวลาในการทำปฏิกิริยาทั้ง 3 ขั้นตอน เท่ากับ 40.04 s โดยมีปริมาณผลได้ของการผลิตไบโอดีเซล เท่ากับ 91.67 vol.%

### 6.1.3 คุณสมบัติของไบโอดีเซล

การผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก แบบ 3 ขั้นตอน โดยมีความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ เท่ากับ 97.11 wt.% ซึ่งสูงกว่ามาตรฐานไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์ และคุณสมบัติอื่น ๆ รวมถึงผ่านมาตรฐานไบโอดีเซลชุมชน และไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์ ยกเว้นค่าเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและปริมาณกำมะถันไม่ผ่านมาตรฐาน ซึ่งสามารถแก้ปัญหาโดยการเติมสารเติมแต่งอย่างสารต้านออกซิเดชันเพื่อยับยั้งหรือชะลอการเกิดออกซิเดชัน และปริมาณกำมะถันแก้ปัญหาโดยการล้างไบโอดีเซลให้สะอาด โดยไบโอดีเซลที่ได้มีค่าความร้อน เท่ากับ  $38,100 \text{ kJ.kg}^{-1}$

### 6.1.4 การวิเคราะห์ต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซล

ในการผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก แบบ 3 ขั้นตอน มีต้นทุนในการผลิต เช่น วัตถุดิบ สารเคมี และการใช้พลังงานไฟฟ้า ซึ่งพบว่าต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซลทั้งหมด เท่ากับ  $39.57 \text{ THB.kg}^{-1}$  ( $34.07 \text{ THB.L}^{-1}$ ) โดยสามารถแบ่งอัตราส่วนของต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซล คือ PFAD เท่ากับ 52.00% เมทานอล เท่ากับ 45.94% โพลีเอทิลีนไกลคอลเท่ากับ 1.15% กรดซัลฟิวริก เท่ากับ 0.58% และค่าไฟฟ้า เท่ากับ 0.33% ซึ่งหากมีการกลั่นเมทานอลกลับมาใช้ใหม่ จะมีต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซล เท่ากับ  $28.35 \text{ THB.kg}^{-1}$  ( $24.24 \text{ THB.L}^{-1}$ )

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

6.2.1 การผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก แบบ 3 ขั้นตอน โดยการทำให้ปฏิกิริยาของน้ำมันและสารเคมีจะมีของเสียจากกระบวนการอยู่ โดยขั้นตอนที่ 1 และ 2 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันซึ่งมีของเสียจากการทำให้ปฏิกิริยา คือ น้ำ ซึ่งในน้ำจะมีปริมาณเมทานอลตกค้าง เท่ากับ 32.68 และ 38.08 vol.% ตามลำดับ และสำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของขั้นตอนที่ 3 ของเสียจากการทำให้ปฏิกิริยา คือ กลีเซอรอล ซึ่งมีปริมาณเมทานอลตกค้าง เท่ากับ 0.69 vol.% โดยมีปริมาณเมทานอลตกค้างทั้งหมด เท่ากับ 71.45 vol.% ซึ่งหากมีการกลั่นเมทานอลกลับมาได้ก็สามารถช่วยลดต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซลเหลือ เท่ากับ  $28.35 \text{ THB.kg}^{-1}$  ( $24.24 \text{ THB.L}^{-1}$ ) และใช้ต้นทุนในการกลั่นเมทานอลกลับคืน เท่ากับ 13.52 kW แต่หากมีการใช้พลังงานความร้อนที่เหลือจากระบบก็ไม่มีต้นทุนในการกลั่นเมทานอลกลับคืน

6.2.2 สำหรับการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก 3 ขั้นตอน ใช้ PFAD เป็นวัตถุดิบซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นกรดไขมันอิสระประมาณ 90 wt.% ดังนั้นหากนำน้ำมันที่มีกรดไขมันอิสระต่ำก็สามารถทำได้โดยการปรับเปลี่ยนปริมาณสารเคมี คาดว่าสามารถทำได้ในขั้นตอนเดียว และสามารถลดต้นทุนในการผลิตได้อีกด้วย

6.2.3 สำหรับการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก 3 ขั้นตอน โดย 2 ขั้นตอนแรกจะใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของกระบวนการเอสเทอร์-ฟิเคชันส่งผลให้มีการกักกรองเครื่องปฏิกรณ์ ดังนั้นควรเลือกใช้วัสดุที่สามารถทนการกักกรองได้ดีในการสร้างเครื่องปฏิกรณ์

6.2.4 ควรใช้เครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิกกับระบบไฟฟ้าที่มีความเสถียรสูง ซึ่งหากรบบไฟฟ้าไม่เสถียรจะทำให้เกิดความเสียหายได้ และควรมีการใช้ร่วมกับเครื่องรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า (stabilizer)

## บรรณานุกรม

- Alam, A. and Kim, K.Y. 2014. Mixing performance of a planar micromixer with circular obstructions in a curved microchannel. *Chemical Engineering Research*. 92: 423-434.
- Alamsyah, R., Tambunan, A.H., Purwanto, Y.A. and D. Kusdiana. 2010. Comparison of static-mixer and blade agitator reactor in biodiesel production. *International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering*. 12: 99-106.
- Albright, L.F. 1998. Official method Cd 3a-63 for acid value. The American Oil Chemists' Society. CRC Press, New York.
- Albright, L.F. 2008. Albright's chemical engineering handbook. CRC Press, New York.
- Al Taweela, A.M., Azizib, F. and Sirijeerachaica, G. 2013. Static mixers: Effective means for intensifying mass transfer limited reactions. *Chemical Engineering and Processing*. 72: 51-62.
- Ambanmba. 2012. Static mixer flow diagram laminar (online). Available: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Static\\_mixer\\_flow\\_diagram\\_laminar.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Static_mixer_flow_diagram_laminar.png). Accessed: Nov. 22, 2017.
- Asgharzadehahmadi, S., Raman, A.A., Parthasarathy, R. and Sajjadi, B. 2016. Sonochemical reactors: Review on features, advantages and limitations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 63: 302-314.
- Ataya, F., Dubé, M.A. and Ternan, M. 2008. Variables affecting the mass transfer limitations in the biodiesel reaction. *Energy Fuels*. 22: 679-688.
- Bockelmann, H. and Barz, D.P.J. 2015. Optimised active flow control for micromixers and other fluid applications: sensitivity-vs. adjoint-based strategies. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*. 106: 93-107.
- Boffito, D.C., Mansi, S., Leveque, J.M., Pirola, C., Bianchi, C.L. and Patience, G.S. 2013. Ultrafast biodiesel production using ultrasound in batch and continuous reactors. *Sustainable Chemistry and Engineering*. 1: 1432-1439.
- Boro, J., Deka, D. and Thakur, A.J. 2012. A review on solid oxide derived from waste shells as catalyst for biodiesel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 16: 904-910.
- Canakci, M. and Van Gerpen, J. 2001. Biodiesel production from oils and fats with high free fatty acids. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*. 44: 1429-1436.
- Cao, L. and Zhang, S. 2015. Production and characterization of biodiesel derived from *Hodgsonia macrocarpa* seed oil. *Applied Energy*. 146: 135-140.

- Chamayou, A., Delmas, H. and Casamatta, G. 1996. Kinetics of liquid/liquid/solid fine chemical reaction: modelling of a continuous pilot plant reactor. *Chemical Engineering Technology*. 19: 67-74.
- Chang, A.S., Hussain Sherazi, S.T., Kandhro, A.A., Mahesar, S.A., Chang, F., Shah, S.N., Laghari, Z.H. and Panhwar, T. 2016. Characterization of palm fatty acid distillate of different oil. *Processing Industries of Pakistan. Journal of Oleo Science*. 65: 897-901.
- Cho, H.J., Kim, J.K., Cho, H.J. and Yeo, Y.K. 2013. Techno economic study of a biodiesel production from palm fatty acid distillate. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 52: 462-468.
- Choedkiatsakul, I., Ngaosuwan, K., Cravotto, G. and Assabumrungrat, S. 2014. Biodiesel production from palm oil using combined mechanical stirred and ultrasonic reactor. *Ultrasonics Sonochemistry*. 21: 1585-1591.
- Chongkhong, S. Tongurai, C. Chetpattananondh, P. and Bunyakan, C. 2007. Biodiesel production by esterification of palm fatty acid distillate. *Biomass and Bioenergy*. 31: 563-568.
- Chongkhong, S. 2007. Production of methyl ester by esterification of palm fatty acid distillate. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree of doctor of Engineering in Chemical Engineering, Prince of Songkla University.
- Chongkhong, S., Tongurai, C. and Chetpattananondh, P. 2009. Continuous esterification for biodiesel production from palm fatty acid distillate using economical process. *Renewable Energy*. 34: 1059-1063.
- Choudhury, H.A., Malani, R.S. and Moholkar, V.S. 2013 Acid catalyzed biodiesel synthesis from *Jatropha* oil: mechanistic aspects of ultrasonic intensification. *Chemical Engineering Journal*. 231: 262-272.
- Cintas, P., Mantegna, S., Gaudino, E.C. and Cravotto, G. 2010. A new pilot flow reactor for high-intensity ultrasound irradiation: Application to the synthesis of biodiesel. *Ultrasonics Sonochemistry*. 17: 985-989.
- Ciolkosz, D. 2015. What's so different about biodiesel fuel?. *Bioenergy Biomass to Biofuels*. 551-555.
- Delavari, A., Halek, F. and Amini, M. 2015. Continuous biodiesel production in a helioidal reactor using ultrasound-assisted transesterification reaction of waste cooking oil. *Clean Technology Environment Policy*. 17: 273-279.

- Deng, X., Fang, Z. and Liu, Y.H. 2010. Ultrasonic transesterification of *Jatropha curcas* L. oil to biodiesel by a two-step process. *Energy Conversion and Management*. 51: 2802-2807.
- Deshmane, V.G., Gogate, P.R. and Pandit, A.B. 2009. Ultrasound assisted synthesis of isopropyl esters from palm fatty acid distillate. *Ultrasonics Sonochemistry*. 16: 345-350.
- Duarte, R. C. de L. M., Bezerra, U.H., Tostes, M. E. de L. and Filho, G. N. da R. 2007. Alternative energy sources in the amazon: Evaluating the energy potential of palm oil for the generation of electricity in Isolated Communities, *IEEE Power and Energy Magazine*. 5: 51-57.
- Dubey, S.M., Gole, V.L. and Gogate, P.R. 2015. Cavitation assisted synthesis of fatty acid methyl esters from sustainable feedstock in presence of heterogeneous catalyst using two-step process. *Ultrasonics Sonochemistry*. 23: 165-173.
- Electrowave ultrasonics corporation. 2017. Acoustic cavitation (online). Available: <http://www.electrowave.org/Cavitation.html>. Accessed: Nov. 21, 2017.
- E.M.SH Ng-Tech. 2017. Methanol pricing (online). Available: <http://emsh-ngtech.com/methanol/methanol-pricing/>. Accessed: Sep. 19, 2017.
- Encinar, J.M., Martínez, G. and González, J.F. 2015. Biodiesel from soybean oil transesterification assisted by ultrasonic irradiation. *International Journal of Environmental Science and Development*. 6: 48-56.
- Feng, H., Yang, W. and Hielscher, T. 2013. Power ultrasound. *Food Science and Technology International*. 14: 433-436.
- Frasconi, D., Zuccaro, M., Pinelli, D. and Paglianti, A. 2008. A pilot-scale study of alkali-catalyzed sunflower oil transesterification with static mixing and with mechanical agitation. *Energy and Fuels*. 22: 1493-1501.
- Carstensen, E.L. 2004. Biological effects of acoustic cavitation. *Ultrasound in Medicine and Biology*. 12: 703-704.
- Freedman, B., Pryde, E.H. and Mounts, T.L. 1984. Variables affecting the yields of fatty esters from transesterified vegetable oils. *Journal of the American Oil Chemists' Society*. 61: 1638-1646.
- Ghanem, A., Lemenand, T., Della Vallea, D.D. and Peerhossaini, H. 2014. Static mixers: Mechanisms, applications and characterization methods-A review. *Chemical Engineering Research and Design*. 92: 205-228.
- Gogate, P.R., Sutkar, V.S. and Pandit AB. 2011. Sonochemical reactors: Important design and scale up considerations with a special emphasis on heterogeneous systems. *Chemical Engineering Journal*. 166: 1066-1082.

- Gole, V.L. and Gogate, P.R. 2014. Intensification of glycerolysis reaction of higher free fatty acid containing sustainable feedstock using microwave irradiation. *Fuel*. 118: 110-116.
- Gui, X., Chen, S. and Yun, Z. 2015. Continuous production of biodiesel from cotton seed oil and methanol using a column reactor packed with calcined sodium silicate base catalyst. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 24: 499-505.
- Hayyan, A., Hashim, M.A., Mirghani, M.E.S., Hayyan, M. and AlNashef, I.M. 2014. Treatment of industrial low grade palm oil via esterification reaction using sono-reactor. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 20: 2066-2070.
- He, B. and Gerpen, J.V. 2015. Reactors for biodiesel production (online). Available: <http://articles.extension.org:80/pages/26630/reactors-for-biodiesel-production>. Accessed: Oct. 16, 2017.
- Hingu, S.M., Gogate, P.R. and Rathod, V.K. 2010. Synthesis of biodiesel from waste cooking oil using sonochemical reactors. *Ultrasonics Sonochemistry*. 17: 827-832.
- ICIS. 2017. Price of sulfuric acid (online). Available: <https://www.icis.com/fertilizers/sulphuric-acid/>. Accessed: Sep. 19, 2017.
- International Energy Agency (IEA). 2010. CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion (online). Available: <http://www.iea.org/co2highlights/co2highlights.pdf>. Accessed: Oct. 18, 2017.
- Jain, S. and Sharma, M.P. 2010. Biodiesel production from *Jatropha curcas* oil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 14: 3140-3147.
- Jenderka, K.V. and Koch, C. 2006. Investigation of spatial distribution of sound field parameters in ultrasound cleaning baths under the influence of cavitation. *Ultrasonics*. 44: 401-406.
- Kawentara, W.A. and Budimanb, A. 2013. Synthesis of biodiesel from second-used cooking oil. *Energy Procedia*. 32: 190-199.
- Kumar, G., Kumar, D. and Johari, R. 2014. Time reducing process for biofuel production from non-edible oil assisted by ultrasonication. *Ultrasonics Sonochemistry*. 21: 1618-1623.
- Kusdiana, D. and Saka, S. 2004. Effects of water on biodiesel fuel production by supercritical methanol treatment. *Bioresource Technology*. 91: 289-295.
- Lam, M.K. and Lee, K.T. 2011. Chapter 15-Production of biodiesel using palm oil. *Alternative Feedstock and Conversion Processes*. 353-374.
- Lee, K.T. and Ofori-Boateng, C. 2013. Sustainability of Biofuel Production from Oil Palm Biomass. Springer. Singapore.



- Leung, D.Y.C., Wu, X. and Leung, M.K.H. 2010. A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. *Applied Energy*. 87: 1083-1095.
- Lokman, I.M., Goto, M., Rashid, U. and Taufiq-Yap, Y.H. 2016. Sub and supercritical esterification of palm fatty acid distillate with carbohydrate-derived solid acid catalyst. *Chemical Engineering Journal*. 284: 872-878.
- Luo, J., Fang, Z. and Smith Jr, R.L. 2014. Ultrasound-enhanced conversion of biomass to biofuels. *Progress in Energy and Combustion Science*. 41: 56-93.
- Ma, F., Clements, L.D. and Hanna, M. 1998. The effects of catalyst, free fatty acids, and water on transesterification of beef tallow. *Bioresource and Agricultural Engineering Commons*. 41: 1261-1264.
- Maddikeri, G.L., Pandit, A.B. and P.R. Gogate. 2013. Ultrasound assisted interesterification of waste cooking oil and methyl acetate for biodiesel and triacetin production. *Fuel*. 116: 241-249.
- Maghami, M., Sadrameli, S.M. and Ghobadian, B. 2015. Production of biodiesel from fishmeal plant waste oil using ultrasonic and conventional methods. *Applied Thermal Engineering*. 75: 575-579.
- Manh, D.V., Chen, Y.H., Chang, C.C., Chang, C.Y., Minh, C.V. and Hanh, H.D. 2012. Parameter evaluation of biodiesel production from unblended and blended Tung oils via ultrasound-assisted process. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 43: 368-373.
- Manickam, S., Arigela, V.N.D. and Gogate, P.R. 2014. Intensification of synthesis of biodiesel from palm oil using multiple frequency ultrasonic flow cell. *Fuel Processing Technology*. 128: 388-393.
- Marchetti, J.M., Miguel, V.U. and Errazu, A.F. 2007. Possible methods for biodiesel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 11: 1300-1311.
- Mason, T. J. 1990. *Sonochemistry: The Uses of Ultrasound in Chemistry*. JAI Press, London, U.K.
- Mason, T.J. and Lorimer, J.P. 2002. *Applied sonochemistry: uses of power ultrasound in chemistry and processing*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.
- Metre, A. and Nath, K. 2015. Palm fatty acid distillate based biodiesel: characterization and emission analysis. *Journal of Scientific and Industrial Research*. 74: 584-588.
- Mohod, A.V., Subudhi, A.S. and Gogate, P.R. 2017. Intensification of esterification of non-edible oil as sustainable feedstock using cavitation reactors. *Ultrasonics Sonochemistry*. 36: 309-318.

- Mostafaei, M., Ghobadian, B., Barzegar, M. and Banakar, A. 2015. Optimization of ultrasonic assisted continuous production of biodiesel using response surface methodology. *Ultrasonics Sonochemistry*. 27: 54-61.
- Nasir, N.F., Daud, W.R.W., Kamarudin, S.K. and Yaakob, Z. 2014. Methyl esters selectivity of transesterification reaction with homogenous alkaline catalyst to produce biodiesel in batch, plug flow, and continuous stirred tank reactors. *Hindawi Publishing Corporation International Journal.Engineering*. 1-13.
- Okitsu, K., Sadanaga, Y. and Takenaka, N. Ultrasound-assisted production of biodiesel fuel from vegetable oils in a small scale circulation process. *Bioresource Technology*. 101: 639-645.
- O'Donnella, C.P., Tiwarib, B.K., Bourkec, P. and Cullen, P.J. 2010. Effect of ultrasonic processing on food enzymes of industrial importance. *Trends in Food Science and Technology*. 21: 358-367.
- Ping, B.T.Y. and Yusof, M. 2009. Characteristics and properties of fatty acid distillates from palm oil. *Oil Palm Bull*. 59: 5-11.
- Prateepchaikul, G., Somnuk, K. and Allen, M. 2009. Design and testing of continuous acid catalyzed esterification reactor for high free fatty acid mixed crude palm oil. *Fuel Processing Technology*. 90: 784-789.
- Qiu, Z., Zhao, L. and Weatherley, L. 2010. Process intensification technologies in continuous biodiesel production. *Chemical Engineering and Processing*. 49: 323-330.
- Rahimia, M., Azimia, N. and Parviziana, F. 2013. Using microparticles to enhance micromixing in a high frequencycontinuous flow sonoreactor. *Chemical Engineering and Processing*. 70: 250-258.
- Rodrigues, C., Jackson, J. and Montross, D. 2016. A molar basis comparison of calcium hydroxide, sodium hydroxide and potassium hydroxide on the pretreatment of switchgrass and miscanthus under high solids conditions. *Industrial Crops and Product*. 92: 165-173.
- Ramadhas, A.S., Jayaraj, S. and Muraleedharan, C. 2005. Biodiesel production from high FFA rubber seed oil. *Fuel*. 84: 335-340.
- Saha, R. and Goud, V.V. 2015. Ultrasound assisted transesterification of high free fatty acids karanja oil using heterogeneous base catalysts. *Biomass Conversion Biorefuel*. 5: 195-207.
- Sala, F. J., Burgos, J., Condon, S., Lopez, P. and Raso, J. 1995. Effect of heat and ultrasound on microorganisms and enzymes. *Blackie Academic and Professional, Glasgow*. 176-204.

- Santacesaria, E., Turco, R., Tortorelli, M., Russo, V., Di Serio, M. and Tesser, R. 2012. Biodiesel process intensification by using static mixers tubular reactors. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 51: 8777-8787.
- Santana, H.S., Tortola, D.S., Silva Jr, J.S. and Taranto, O.P. 2017. Biodiesel synthesis in micromixer with static elements. *Energy Conversion and Management*. 141: 28-39.
- Santos, H.M., Lodeiro, C. and Capelo-MartRnez, J.L. 2009. *Ultrasound in chemistry: analytical applications* WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim ISBN: 978-3-527-31934-3.
- Sarve, A.N., Varma, M.N. and Sonawane, S.S. 2016. Ultrasound assisted two-stage biodiesel synthesis from non-edible *Schleichera triguga* oil using heterogeneous catalyst: Kinetics and thermodynamic analysis. *Ultrasonics Sonochemistry*. 29: 288-298.
- Sáez-Bastante, J., Pinzi, S., Arzamendi, Luque de Castro, M.D., Priego-Capote, F., and Dorado, M.P. 2014. Influence of vegetable oil fatty acid composition on ultrasound-assisted synthesis of biodiesel. *Fuel*. 125: 183-191.
- Servant, G., Laborde, J., Hita, A., Caltagirone, J. and Gerard, A. 2003. On the interaction between ultrasound waves and bubble clouds in mono-and dual-frequency sonoreactors. *Ultrasonics Sonochemistry*. 10: 347-355.
- Shahir, V.K., Jawahar, C.P. and Suresh, P.R. 2015. Comparative study of diesel and biodiesel on CI engine with emphasis to emissions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 45: 686-697.
- Shuit, S.H. and Tan, S.H. 2014. Feasibility study of various sulphonation methods for transforming carbon nanotubes into catalysts for the esterification of palm fatty acid distillate. *Energy Conversion and Management*. 88: 1283-1289.
- Simasatitkul, L. and Arpornwichanop, A. 2017. Economic evaluation of biodiesel production from palm fatty acid distillate using a reactive distillation. *Energy Procedia*. 105: 237-243.
- Somnuk, K., Smithmaitrie, P. and Prateepchaikul, G. 2013. Optimization of continuous acid-catalyzed esterification for free fatty acids reduction in mixed crude palm oil using static mixer coupled with high-intensity ultrasonic irradiation. *Energy Conversion and Management*. 68: 193-199.
- 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*. 80: 374-381.

- Somnuk, K., Wijitsopa, K. and Prateepchaikul, G. 2016. Optimization of the comparative continuous process of ethyl and methyl ester productions using a static mixer reactor: a response surface methodology approach. 1-9.
- Soysuwan, N. and Somnuk, K. 2015. Optimization of methyl ester production from palm fatty acid distillate using single-step esterification: A response surface methodology approach. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 10: 7075-7079.
- Stamenković, O.S., Lazić, M.L., Todorović, Z.B., Veljković, V.B. and Skala, D.U. 2007. The effect of agitation intensity on alkali-catalyzed methanolysis of sunflower oil. *Bioresource Technology*. 98: 2688-2699.
- Stavarache, C., Vinatoru, M., Nishimura, R. and Maeda, Y. 2005. Fatty acids methyl esters from vegetable oil by means of ultrasonic energy. *Ultrasonics Sonochemistry*. 12: 367-372.
- 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*. 116: 1-8.
- Sutkar, V.S. and Gogate, P.R. 2009. Design aspects of sonochemical reactors: techniques for understanding cavitation activity distribution and effect of operating parameters. *Chemical Engineering Journal*. 155: 26-36.
- Subhedar, P.B., Botelho, C. and Ribeiro, A. 2015. Ultrasound intensification suppresses the need of methanol excess during the biodiesel production with Lipozyme TL-IM. *Ultrasonics sonochemistry*. 27: 530-535.
- Suganya, T., Kasirajan, R. and Renganathan, S. 2014. Ultrasound enhanced rapid in situ transesterification of marine macroalgae *Enteromorpha compressa* for biodiesel production. *Bioresource technology*. 156: 283-290.
- Suslick, K.S. 1988. *Ultrasounds, its chemical, physical and biological effects*. VCH Publishers Inc., New York.
- Thakur, R.K., Vial, C., Nigam, K. D. P., Nauman, E. B. and Djelveh, G. 2003. Static mixers in the process industriessa review. *Institution of Chemical Engineers*. 81: 787-826.
- Thanh, L.T., Okitsu, K., Sadanaga, Y., Takenaka, N., Maeda, Y. and Bandow, H. 2010. A two-step continuous ultrasound assisted production of biodiesel fuel from waste cooking oils: A practical and economical approach to produce high quality biodiesel fuel. *Bioresource Technology*. 101: 5394-5401.
- Top, A.G.M. 2010. Production and utilization of palm fatty acid distillate (PFAD). *Lipid Technology*. 22: 11-13.

- Trentin, C.M., Popiolki, A.S. and Batistella, L. 2015. Enzyme-catalyzed production of biodiesel by ultrasound-assisted ethanolysis of soybean oil in solvent-free system. *Bioprocess and biosystems engineering*. 38: 437-448.
- United States Department of Agriculture (USDA). 2017. Oil palm (online). Available: [https://www.pecad.fas.usda.gov/cropexplorer/cropview/commodityView.aspx?cropid=4243000&sel\\_year=2013](https://www.pecad.fas.usda.gov/cropexplorer/cropview/commodityView.aspx?cropid=4243000&sel_year=2013). Accessed Oct. 14, 2017.
- Veljković, V.B., Avramović, J.M. and Stamenković, O.S. 2012. Biodiesel production by ultrasound-assisted transesterification: State of the art and the perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 16: 1193-1209.
- Worapun, I., Pianthong, K. and Thaiyasuit, P. 2012. Two-step biodiesel production from crude *Jatropha curcas* L. oil using ultrasonic irradiation assisted. *Journal of Oleoscience*. 61: 165-172.
- Yasin, M.H.M., Mamat, R., Najafi, G., Ali, O.M., Ahmad Fitri Yusop, A.F. and Ali, M.H. 2017. Potentials of palm oil as new feedstock oil for a global alternative fuel: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 79: 1034-1049.
- Yasui, K., Tuziuti, T. and Iida, Y. 2005. Dependence of the characteristics of bubbles on types of sonochemical reactors. *Ultrasonics Sonochemistry*. 12: 43-51.
- Yujaroen, D., Goto, M., Sasaki, M. and Shotipruk, A. 2009. Esterification of palm fatty acid distillate (PFAD) in supercritical methanol: Effect of hydrolysis on reaction reactivity. *Fuel*. 88: 2011-2016.
- Zhang, Y., Dubé, M.A., McLean, D.D. and Kates, M. 2003. Biodiesel production from waste cooking oil. Economic assessment and sensitivity analysis. *Bioresource Technology*. 90: 229-240.
- Zhao, Z., Xue, Y., Xu, G., Chen, D., Zhou, J., Liu, P., Han, S. and Lin, H. 2016. Reaction conditions of ultrasound-assisted production of biodiesel: A review. *International Journal of Energy Research*.
- การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. 2017. อัตราค่าไฟฟ้า (ออนไลน์). สืบค้นจาก: <http://www2.eppo.go.th/power/pw-Rate-PEA.html>. ค้นเมื่อ 19 กันยายน 2560.
- กระทรวงพลังงาน. 2005. ประกาศกฎกระทรวงพลังงาน เรื่อง ให้เอทานอลและไบโอดีเซลเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงตามพระราชบัญญัติการค้าน้ำมันเชื้อเพลิง พ.ศ. ๒๕๔๓. ราชกิจจานุเบกษา เล่ม 122 ตอนพิเศษ 30 ง (8 เม.ย.48) หน้า 2.
- กระทรวงพลังงาน. 2006. พระบิดาแห่งการพัฒนาพลังงานไทย. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ.
- กรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2017. รายชื่อผู้ผลิตไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (ออนไลน์). สืบค้นจาก: [http://www.doeb.go.th/index\\_e.php](http://www.doeb.go.th/index_e.php). ค้นเมื่อ 14 พฤศจิกายน 2560

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2014. สารานุกรมพลังงานทดแทน. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2015. แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558-2579.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2017. สถานการณ์พลังงาน (ออนไลน์). สืบค้นจาก: [http://www.dede.go.th/ewt\\_news.php?nid=42079](http://www.dede.go.th/ewt_news.php?nid=42079). ค้นเมื่อ 14 ตุลาคม 2560.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2017. สัดส่วนการใช้พลังงานทดแทน (ออนไลน์). สืบค้นจาก: [http://www.dede.go.th/ewt\\_news.php?nid=42079](http://www.dede.go.th/ewt_news.php?nid=42079). ค้นเมื่อ 14 ตุลาคม 2560.
- ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย. 2008. ไบโอดีเซล. บทความเทคโนโลยีและนวัตกรรม ศูนย์วิจัยเชื้อเพลิงภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ออนไลน์). สืบค้นจาก: <http://www.vcharkarn.com/varticle/37458>. ค้นเมื่อ 16 ตุลาคม 2560.
- ณัฐพล สร้อยสุวรรณ. 2017. กระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขปาล์มด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมสถิตแบบขดเกลียว. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ธนาคารแห่งประเทศไทย. 2017. อัตราการแลกเปลี่ยนประจำวัน (ออนไลน์). สืบค้นจาก: [https://www.bot.or.th/thai/financialmarkets/\\_layouts/application/exchangerate/exchangerate.aspx](https://www.bot.or.th/thai/financialmarkets/_layouts/application/exchangerate/exchangerate.aspx). ค้นเมื่อ 19 กันยายน 2017.
- บวร กิติไพศาลนนท์. 2011. “วิกฤตน้ำมันพืช” ระเบิด เวลาลูกแรก...อุตสาหกรรมอาหารไทย. บทวิเคราะห์ของสำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. 1-4.
- มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี. 2002. ประโยชน์ของการใช้ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์. บทความพลังงาน (ออนไลน์). สืบค้นจาก: <http://www.green.kmutt.ac.th/news/Question.asp?GID=94>. ค้นเมื่อ 12 พฤศจิกายน 2560.
- วรลักษณ์ อังปนานนท์. 2014. การวิเคราะห์การใช้พลังงานสำหรับโรงงานผลิตไบโอดีเซล 4 รูปแบบ วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- ศิริกานต์ สัตถวิชัยพิชญ์. 2015. เทคโนโลยีการกลั่นน้ำมันปาล์มบริโคค. บทความ. หน่วยเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีการแปรรูปน้ำมัน ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.
- ศูนย์วิจัยปาล์มน้ำมันสุราษฎร์ธานี. 2017. การผลิตไบโอดีเซล (ออนไลน์). สืบค้นจาก: <http://www.doa.go.th/palm/linkTechnical/biodiesel.html>. ค้นเมื่อ 12 พฤศจิกายน 2560.
- ศูนย์สารสนเทศการเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2017. ข้อมูลการผลิตสินค้าเกษตร (ออนไลน์). สืบค้นจาก: <http://www.oae.go.th/production.html>. ค้นเมื่อ 14 ตุลาคม 2560.

- สถานวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจากน้ำมันปาล์มและพืชน้ำมัน. 2007. ข้อดี-ข้อด้อยของไบโอดีเซล (ออนไลน์). สืบค้นจาก: [http://www.biodiesel.eng.psu.ac.th/adv\\_disadv.php](http://www.biodiesel.eng.psu.ac.th/adv_disadv.php). ค้นเมื่อ 12 พฤศจิกายน 2560.
- สุภกร บุญยยืน, สมลักษณ์ เรืองสุทธิคุณภาพ, ยูพา อำนวยภานิช และทัศนีย์ ทักกรี. 2009. ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์สำหรับไบโอดีเซลน้ำมันปาล์มและน้ำมันใช้แล้ว. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปีที่ 17 ฉบับที่ 4 ตุลาคม-ธันวาคม 2552.
- สำนักงานประสานงานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ สำนักวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2017. โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มขนาดเล็กอันเนื่องมาจากพระราชดำริ สหกรณ์นิคมอ่าวลึก จ.กระบี่ (ออนไลน์). สืบค้นจาก: <http://www.rpc.psu.ac.th/index.php/projects-board/19-rdpp06-1>. ค้นเมื่อ 21 พฤษภาคม 2560.
- สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน). 2015. วิจัยปาล์มน้ำมัน (ออนไลน์). สืบค้นจาก: <http://www.arda.or.th/easyknowledge/easy-articles-detail.php?id=534>. ค้นเมื่อ 12 พฤศจิกายน 2560.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2016. สารสนเทศเศรษฐกิจการเกษตร รายสินค้า ปี 2559. เอกสารสถิติการเกษตรเลขที่ 402.
- สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2002. ไบโอดีเซลพลังงานใหม่เพื่อคนไทย (ออนไลน์). สืบค้นจาก: <https://www.rsu.ac.th/engineer/energy/service02.php>. ค้นเมื่อ 12 พฤศจิกายน 2560.
- สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2008. เอกสารเผยแพร่เรื่องพลังงานทดแทน (ออนไลน์). สืบค้นจาก: [www.eppo.co.th](http://www.eppo.co.th). ค้นเมื่อ 14 ตุลาคม 2560.
- ห้องปฏิบัติการนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโคปี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา. 2017. การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค NMR (ออนไลน์). สืบค้นจาก: <http://science.buu.ac.th/part/nmr/index.php>. ค้นเมื่อ 22 สิงหาคม 2560.
- อรรถรัตน์ วงศ์ศรี, ศิริชัย มามีวัฒน์, ดำรง พงศ์มานะวุฒิ, เกริกชัย ธนรักษ์, สุพร ชังคมณ์, สุรจิตติ ศรีกุล, พิพัฒน์ เชียงหลิว, สุนีย์ นิเทศพัตรพงศ์, วิชณีย์ ออมทรัพย์สิน, สมาน ดิษดี, ชาย โฆรวิส และนคร สาระคุณ. 2001. การปรับปรุงพันธุ์ปาล์มน้ำมันและพันธุ์แนะนำ. บทความสัมมนาวิชาการปาล์มน้ำมันแห่งชาติครั้งที่ 2. ศูนย์วิจัยพืชสวนสุราษฎร์ธานี สถาบันวิจัยพืชสวน กรมวิชาการเกษตร.

ภาคผนวก



ภาคผนวก ก  
(ตัวอย่างการคำนวณ)

### การคำนวณค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์

จากสมการที่ ก.1 เป็นการคำนวณค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number,  $N_{Re}$ ) ของการผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก แบบ 3 ขั้นตอน โดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ เท่ากับ  $50^{\circ}\text{C}$  และการคำนวณอัตราการไหลในท่อ และพื้นที่หน้าตัดของท่อ สามารถคำนวณได้จาก สมการที่ ก.2 และ สมการที่ ก.3 ตามลำดับ โดยการคำนวณค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของการผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก แบบ 3 ขั้นตอน แสดงได้ดังตารางที่ ก.1

$$N_{Re} = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (\text{ก.1})$$

$$Q = VA \quad (\text{ก.2})$$

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 \quad (\text{ก.3})$$

โดยที่  $N_{Re}$  คือ ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์  $\rho$  คือ ความหนาแน่น ( $\text{kg.m}^{-3}$ )  $V$  คือ ความเร็วการไหล ( $\text{m.s}^{-1}$ )  $D$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (m)  $\mu$  คือ ความหนืดสมบูรณ์ (Pa.s)  $Q$  คือ อัตราการไหล ( $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ ) และ  $A$  คือ พื้นที่หน้าตัด ( $\text{m}^2$ )

ตารางที่ ก.1 การคำนวณค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของการผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขปาล์มแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก แบบ 3 ขั้นตอน

Parameter	Process		
	1 <sup>st</sup> -step	2 <sup>nd</sup> -step	3 <sup>rd</sup> -step
Condition			
Methanol (vol.%)	45.7	59.6	13.4
Sulfuric acid (vol.%)	7	3.1	
Potassium hydroxide (g.L <sup>-1</sup> )	-	-	4.0
Length of US reactor (mm)	400	400	-
Flow rate			
Oil (L.h <sup>-1</sup> )	25.0	25.0	25.0
Reactant (L.h <sup>-1</sup> )	13.1	15.7	3.3
Total (L.h <sup>-1</sup> )	38.1	40.7	28.3
Velocity (m.s <sup>-1</sup> )	0.038	0.038	-
Property			
Density (kg.m <sup>-3</sup> )	906.07	897.22	840.65
Kinematics viscosity (cSt)	3.09	2.27	2.31
Absolute viscosity (Pa.s)	0.0028	0.0020	0.0019
Reynolds number	156.17 <sup>(1)</sup>	156.17	-

หมายเหตุ: เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อผสมแบบสถิต เท่ากับ 12.7 m เส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออัลตราโซนิก เท่ากับ 15 mm และ <sup>(1)</sup> ค่า  $N_{Re}$  ของท่ออัลตราโซนิก และสำหรับขั้นตอนที่ 1 ใช้ท่อผสมแบบสถิตชนิดขดเกลียว ความยาว เท่ากับ 5 m ซึ่งมีค่า  $N_{Re}$  เท่ากับ 339.77 (ณัฐพล, 2017)

#### การคำนวณคุณสมบัติของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก

จากสมการที่ ก.4 และ สมการที่ ก.5 แสดงการคำนวณความเข้มของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก (ultrasonic intensity, UI) ความหนาแน่นของพลังงานของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก (acoustic energy density, AED) ดังแสดงในตารางที่ ก.2 และ ตารางที่ ก.3 ตามลำดับ

$$UI = \frac{P}{A} \quad (ก.4)$$

$$AED = \frac{P}{V} \quad (ก.5)$$

โดยที่ UI คือ ความเข้มของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก ( $W.cm^{-2}$ ) P คือ กำลังของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก (W) A คือ พื้นที่ผิว ( $cm^2$ ) AED คือ ความหนาแน่นของพลังงานของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก ( $W.mL^{-1}$ ) และ V คือ ปริมาตร ( $mL^{-1}$ )

ตารางที่ ก.2 การคำนวณค่าความเข้มของคลื่นเสียงอัลตราโซนิกในการผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขปาล์มแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก แบบ 3 ขั้นตอน

Parameter	Process		
	1 <sup>st</sup> -step	2 <sup>nd</sup> -step	3 <sup>rd</sup> -step
Power (W)	3200 <sup>(1)</sup>	3200 <sup>(2)</sup>	1000 <sup>(3)</sup>
A ( $cm^2$ )	235.62	235.62	6.25
Ultrasonic intensity ( $W.cm^2$ )	13.58	13.58	160

หมายเหตุ: <sup>(1)</sup> และ <sup>(2)</sup> ใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิกชนิดโพรบที่กำลังของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก เท่ากับ 400 W จำนวน 8 หัว (ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม คือ ความยาวของท่ออัลตราโซนิก เท่ากับ 400 mm) และ <sup>(3)</sup> ใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิกชนิดโพรบที่มีกำลังของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก เท่ากับ 1000 W เส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออัลตราโซนิก เท่ากับ 15 mm ความยาวของท่ออัลตราโซนิก เท่ากับ 500 mm

และเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรบอัลตราโซนิก เท่ากับ 25 mm

ตารางที่ ก.3 การคำนวณค่าความหนาแน่นของพลังงานของคลื่นเสียงอัลตราโซนิกในการผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขปาล์มแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก แบบ 3 ขั้นตอน

Parameter	Process		
	1 <sup>st</sup> -step	2 <sup>nd</sup> -step	3 <sup>rd</sup> -step
Power (W)	3200 <sup>(1)</sup>	3200 <sup>(2)</sup>	1000 <sup>(3)</sup>
Volume (mL)	72	72	134
Acoustic energy density ( $mL^{-1}$ )	44.44	44.44	7.46

หมายเหตุ: <sup>(1)</sup> และ <sup>(2)</sup> ใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิกชนิดโพรบที่กำลังของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก เท่ากับ 400 W จำนวน 8 หัว (ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม คือ ความยาวของท่ออัลตราโซนิก เท่ากับ 400 mm) และ <sup>(3)</sup> ใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิกชนิดโพรบที่มีกำลังของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก เท่ากับ 1000 W

### การคำนวณปริมาตรของถังแยกแบบต่อเนื่อง

ปริมาตรของถังแยก สามารถหาได้จาก อัตราการไหลรวมของสารทำปฏิกิริยา และ เวลาในการแยกชั้นของน้ำมันกับของเสีย โดยมีสัดส่วนเชิงปริมาตร ดังแสดงในตารางที่ ก.4 และสามารถคำนวณปริมาตรของถังแยกได้ดังสมการที่ ก.6 ดังแสดงในตารางที่ ก.5

$$V = Qt \quad (ก.6)$$

เมื่อ  $V$  คือ ปริมาตรของถังแยกแบบต่อเนื่อง (L)  $Q$  คือ อัตราการไหลรวมของสารทำปฏิกิริยา ( $L \cdot h^{-1}$ ) และ  $t$  คือ เวลาในการแยกชั้น (h)

ตารางที่ ก.4 การคำนวณและสัดส่วนเชิงปริมาตรของการผลิตไบโอดีเซล

Parameters	Amount (vol.%)	Flow rate ( $L \cdot h^{-1}$ )
1 <sup>st</sup> -step esterification		
PFAD	-	25
Methanol	45.7	11.4
Sulfuric acid	7	1.7
Total	-	38.1
2 <sup>nd</sup> -step esterification		
Esterified oil	-	25.0
Methanol	59.6	14.9
Sulfuric acid	3.1	0.8
Total	-	40.7
3 <sup>rd</sup> -step transesterification		
Esterified oil	-	25.0
Methanol	13.4	3.3
Potassium hydroxide	4.0	-
Total	-	28.3

ตารางที่ ก.5 ปริมาตรของถังแยกแบบต่อเนื่องของระบบผลิตไบโอดีเซล

Parameters	Process		
	1 <sup>st</sup> -step	2 <sup>nd</sup> -step	3 <sup>rd</sup> -step
Time of separated (h)	1.3	0.7	0.5
Total flow rate ( $L \cdot h^{-1}$ )	38.1	40.7	28.3
Volume of separated tank (L)	49.5	28.5	14.1

ภาคผนวก ข  
(การออกแบบการทดลอง)

## การออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง

การผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิก แบบ 3 ขั้นตอน สำหรับขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 2 เป็นปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน โดยมีการแปรค่าตัวแปรอิสระ 3 ตัวแปร คือ ปริมาณเมทานอล (M) ปริมาณกรดซัลฟิวริก (S) และความยาวท่ออัลตราโซนิก (L) และขั้นตอนที่ 3 ใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยแปรค่าตัวแปรอิสระ 2 ตัวแปร คือ ปริมาณเมทานอล (M) และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (K) ซึ่งทั้ง 3 ขั้นตอน มีผลตอบสนอง คือ ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ (ME) จากนั้นใช้โปรแกรม essential experimental design 2.216 กำหนดรูปแบบของการทดลองใน design an experiment รูปแบบ central composite design (CCD) ดังแสดงในรูปที่ ข.1 จากนั้นกำหนดช่วงของตัวแปรอิสระ ดังแสดงในรูปที่ ข.2 (ตัวอย่างการกำหนดตัวแปรอิสระของขั้นตอนที่ 1) ซึ่งจำนวนการทดลองทั้งหมดของขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 2 เท่ากับ 18 การทดลอง และขั้นตอนที่ 3 มีการทดลองทั้งหมด เท่ากับ 12 การทดลอง ดังแสดงในตารางที่ ข.1 ตารางที่ ข.2 และตารางที่ ข.3 ตามลำดับ

The screenshot shows the 'Design an Experiment' dialog box with the following settings:

- Input Data:** Number of Factors: 3, # of Centerpoints: 4, Number of Responses: 1. Checkboxes: All Factors are Quantitative (checked), Show Aliasing (if applicable) (checked), Randomize Worksheet (checked).
- 2 Level Screening Designs:**
  - Many Factors: Fractional Factorial Res 3 (4 Runs), Placket - Burman (12 Runs).
  - Higher Resolution: Fractional Factorial Res 4 (8 Runs), Fractional Factorial Res 5 (8 Runs), Full Factorial (8 Runs).
- Response Surface Designs:**
  - Second Order Models: Central Composite (14 Runs), Box - Behnken (12 Runs).
  - Central Composite Type: Circumscribed (Min & Max = Star Points) (checked), Inscribed (Star Points outside Min & Max) (unchecked), Face Centered (unchecked).
- Current Design (18 Runs):** Central Composite design for 3 Factors, Model is quadratic, 14 model runs and 4 centerpoints.
- Buttons:** Exit, Help, Make DOE.

รูปที่ ข.1 การกำหนดรูปแบบของการออกแบบการทดลอง

Factor Definition

Factor Name	Units	Low Value	High Value
M	vol.%	30	60
S	vol.%	2	8
L	mm	200	600

L      mm      200      600

< Back <      OK

รูปที่ ข.2 ตัวอย่างการกำหนดช่วงการแปรค่าของตัวแปรอิสระ

ตารางที่ ข.1 ผลการออกแบบการทดลองของขั้นตอนที่ 1

Experiment	Methanol M: (vol.%)	Sulfuric acid S: (vol.%)	Length of US reactor L: (mm)	Methyl ester ME: (wt.%)
1	19.8	5.0	400	
2	30.0	2.0	200	
3	30.0	2.0	600	
4	30.0	8.0	200	
5	30.0	8.0	600	
6	45.0	0.0	400	
7	45.0	5.0	100	
8	45.0	5.0	400	
9	45.0	5.0	400	
10	45.0	5.0	400	
11	45.0	5.0	400	
12	45.0	5.0	700	
13	45.0	10.0	400	
14	60.0	2.0	200	
15	60.0	2.0	600	
16	60.0	8.0	200	
17	60.0	8.0	600	
18	70.2	5.0	400	



ตารางที่ ข.2 ผลการออกแบบการทดลองของขั้นตอนที่ 2

Experiment	Methanol <i>M</i> : (vol.%)	Sulfuric acid <i>S</i> : (vol.%)	Length of US reactor <i>L</i> : (mm)	Methyl ester <i>ME</i> : (wt.%)
1	26.4	4.0	400	
2	40.0	2.0	200	
3	40.0	2.0	600	
4	40.0	6.0	200	
5	40.0	6.0	600	
6	60.0	0.6	400	
7	60.0	4.0	100	
8	60.0	4.0	400	
9	60.0	4.0	400	
10	60.0	4.0	400	
11	60.0	4.0	400	
12	60.0	4.0	700	
13	60.0	7.4	400	
14	80.0	2.0	200	
15	80.0	2.0	600	
16	80.0	6.0	200	
17	80.0	6.0	600	
18	93.6	4.0	400	

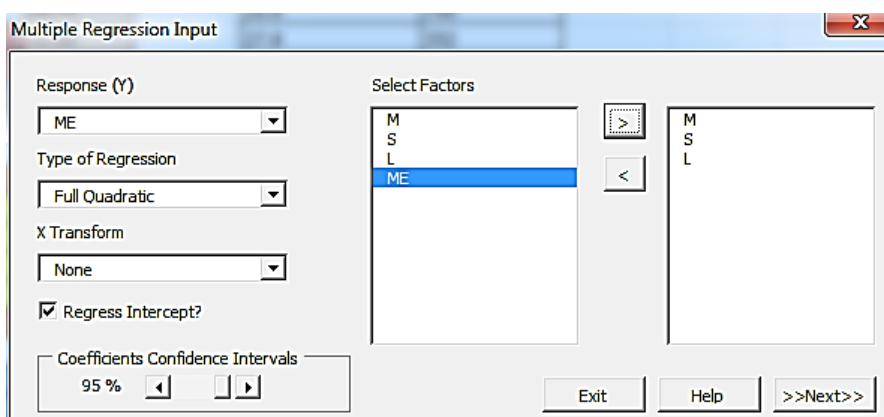
ตารางที่ ข.3 ผลการออกแบบการทดลองของขั้นตอนที่ 3

Experiment	Methanol <i>M</i> : (vol.%)	Potassium hydroxide <i>K</i> : (g.L <sup>-1</sup> )	Methyl ester <i>ME</i> : (wt.%)
1	7.9	4	
2	10	2	
3	10	6	
4	15	1.2	
5	15	4	
6	15	4	
7	15	4	
8	15	4	
9	15	6.8	
10	20	2	
11	20	6	
12	22.1	4	

ภาคผนวก ค  
การพิจารณาค่าทางสถิติของสมการทำนายความสัมพันธ์

## ขั้นตอนการพิจารณาค่าทางสถิติของรูปแบบสมการทำนายความสัมพันธ์

เมื่อนำตัวอย่างการทดลองที่ได้จากการออกแบบไปวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ด้วยเทคนิค NMR แล้วนำผลการทดลองมาวิเคราะห์เพื่อหารูปแบบสมการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองกับตัวแปรอิสระด้วยโปรแกรม essential regression 2.220 กำหนดรูปแบบการวิเคราะห์ multiple regression ดังรูปที่ ค.1 และรูปที่ ค.2 ตามลำดับ และได้สมการทำนายรูปแบบความสัมพันธ์ของขั้นตอนที่ 1 ขั้นตอนที่ 2 และขั้นตอนที่ 3 ดังสมการที่ ค.1 สมการที่ ค.2 และสมการที่ ค.3 ตามลำดับ



รูปที่ ค.1 การกำหนดรูปแบบวิเคราะห์สมการทำนายความสัมพันธ์

Term	Coefficient	Std Error	t Statistic	Significance	VIF
Constant	-18.49	35.34	-0.523	0.615	
M	0.973	1.055	0.922	0.383	50.70084
S	13.50	4.399	3.068	0.01540	35.03354
L	-0.05544	0.07475	-0.742	0.480	41.45479
M*M	0.00379	0.01017	0.372	0.719	39.19576
M*S	-0.05611	0.06450	-0.870	0.410	20.98778
M*L	-0.000220	0.000968	-0.227	0.826	21.88490
S*S	-0.821	0.258	-3.188	0.01284	13.05982
S*L	0.000971	0.00484	0.201	0.846	12.11806

รูปที่ ค.2 รูปแบบวิเคราะห์สมการทำนายความสัมพันธ์

$$ME = \beta_0 + \beta_1 M + \beta_2 S + \beta_3 L + \beta_4 ML + \beta_5 MS + \beta_6 SL + \beta_7 M^2 + \beta_8 S^2 + \beta_9 L^2 \quad (\text{ค.1})$$

$$ME = \beta_0 + \beta_1 M + \beta_2 S + \beta_3 L + \beta_4 ML + \beta_5 MS + \beta_6 SL + \beta_7 M^2 + \beta_8 S^2 + \beta_9 L^2 \quad (\text{ค.2})$$

$$ME = \beta_0 + \beta_1 M + \beta_2 K + \beta_3 M^2 + \beta_4 MK + \beta_5 L^2 \quad (\text{ค.3})$$

โดยที่  $ME$  คือ เมทิลเอสเทอร์ (wt.%)  $M$  คือ เมทานอล (vol.%)  $S$  คือ กรดซัลฟิวริก (vol.%) และ  $L$  คือ ความยาวของท่ออัลตราโซนิก (mm) และ  $K$  คือ โพลีเอทิลีนไฮดรอกไซด์ ( $\text{g.L}^{-1}$ )

ตารางที่ ค.1 ค่าทางสถิติของสมการทำนายรูปแบบความสัมพันธ์ของขั้นตอนที่ 1

Summary	
R	0.950
$R^2$	0.902
$R^2$ adjusted	0.791
Standard Error	8.210
# Points	18
PRESS	4042.25
$R^2$ for Prediction	0.264
Durbin-Watson d	1.219
First Order Autocorrelation	0.330
Collinearity	0.000
Coefficient of Variation	15.268
Precision Index	399.575

ตารางที่ ค.2 ค่าสถิติของสมการทำนายรูปแบบความสัมพันธ์ของขั้นตอนที่ 1

ANOVA						
Source	SS	SS%	MS	F	F Signif	df
Regression	4952.90	90	550.32	8.165	0.00351	9
Residual	539.17	10	67.40			8
LOF Error	539.04	10 (100)	107.81	2448.7782	0.00001	5
Pure Error	0.132	0 (0)	0.04403			3
Total	5492.1	100				17

ตารางที่ ค.3 ค่าสัมประสิทธิ์และค่าสถิติของสมการทำนายรูปแบบความสัมพันธ์ของขั้นตอนที่ 1

Term	Value	P-value	Std Error	-95%	95%	t Stat	VIF
$\beta_0$	-18.49000	0.61500	35.34000	-99.99000	63.00000	-0.5230	
$\beta_1$	0.97300	0.38300	1.05500	-1.46000	3.40600	0.9220	50.70
$\beta_2$	13.50000	0.01540	4.39900	3.35100	23.64000	3.0680	35.03
$\beta_3$	-0.05544	0.48000	0.07475	-0.22800	0.11700	-0.7420	41.45
$\beta_4$	0.00379	0.71900	0.01017	-0.01966	0.02723	0.3720	39.20
$\beta_5$	-0.05611	0.41000	0.06450	-0.20500	0.09263	-0.8700	20.99
$\beta_6$	-0.00022	0.82600	0.00097	-0.00245	0.00201	-0.2270	21.88
$\beta_7$	-0.82100	0.01284	0.25800	-1.41500	-0.22700	-3.1880	13.06
$\beta_8$	0.00097	0.84600	0.00484	-0.01018	0.01213	0.2010	12.12
$\beta_9$	0.00008	0.25700	0.00006	-0.00007	0.00024	1.2190	23.09

ตารางที่ ค.4 ค่าทางสถิติของสมการทำนายรูปแบบความสัมพันธ์ของขั้นตอนที่ 2

<i>Summary</i>	
R	0.967
R <sup>2</sup>	0.936
R <sup>2</sup> adjusted	0.901
Standard Error	0.814
# Points	18
PRESS	30.11
R <sup>2</sup> for Prediction	0.735
Durbin-Watson d	1.198
First Order Autocorrelation	0.396
Collinearity	0.000
Coefficient of Variation	0.899
Precision Index	100.692

ตารางที่ ค.5 ค่าสถิติของสมการทำนายรูปแบบความสัมพันธ์ของขั้นตอนที่ 2

ANOVA						
Source	SS	SS%	MS	F	F Signif	df
Regression	106.48	94	17.75	26.80	0.00005	6
Residual	7.284	6	0.662			11
LOF Error	7.233	6 (99)	0.904	52.2837	0.00389	8
Pure Error	0.05187	0 (1)	0.01729			3
Total	113.76	100				17

ตารางที่ ค.6 ค่าสัมประสิทธิ์และค่าสถิติของสมการทำนายรูปแบบความสัมพันธ์ของขั้นตอนที่ 2

Term	Value	P-value	Std Error	-95%	95%	t Stat	VIF
$\beta_0$	66.58000	0.00000	3.82600	57.75000	75.40000	17.4000	
$\beta_1$	0.51800	0.00021	0.08105	0.33100	0.70500	6.3940	52.75
$\beta_2$	1.64700	0.04820	0.70700	0.01663	3.27700	2.3300	40.13
$\beta_3$	0.01408	0.10400	0.00769	-0.00365	0.03180	1.8320	43.40
$\beta_4$	-0.00287	0.00106	0.00057	-0.00419	-0.00154	-4.9950	39.15
$\beta_5$	-0.00762	0.32600	0.00729	-0.02444	0.00919	-1.0460	23.19
$\beta_6$	-0.00005	0.49200	0.00007	-0.00022	0.00012	-0.7200	21.89
$\beta_7$	-0.15600	0.02638	0.05740	-0.28800	-0.02358	-2.7170	17.99
$\beta_8$	0.00076	0.32600	0.00073	-0.00091	0.00244	1.0460	14.08
$\beta_9$	-0.00002	0.03314	0.00000	-0.00003	-0.00000	-2.5700	23.13

ตารางที่ ค.7 ค่าทางสถิติของสมการทำนายรูปแบบความสัมพันธ์ของขั้นตอนที่ 3

<i>Summary</i>	
R	0.979
R <sup>2</sup>	0.959
R <sup>2</sup> adjusted	0.925
Standard Error	0.258
# Points	12
PRESS	2.78
R <sup>2</sup> for Prediction	0.718
Durbin-Watson d	2.012
First Order Autocorrelation	-0.204
Collinearity	0.000
Coefficient of Variation	0.264
Precision Index	44.613

ตารางที่ ค.8 ค่าสถิติของสมการทำนายรูปแบบความสัมพันธ์ของขั้นตอนที่ 3

ANOVA						
Source	SS	SS%	MS	F	F Signif	df
Regression	9.448	96	1.890	28.32	0.000421	5
Residual	0.400	4	0.06673			6
LOF Error	0.383	4 (96)	0.128	21.6537	0.01553	3
Pure Error	0.01768	0 (4)	0.00589			3
Total	9.849	100				11

ตารางที่ ค.9 ค่าสัมประสิทธิ์และค่าสถิติของสมการทำนายรูปแบบความสัมพันธ์ของขั้นตอนที่ 3

Term	Value	P-value	Std Error	-95%	95%	t Stat	VIF
$\beta_0$	89.70000	0.00000	1.29000	86.54000	92.86000	69.5500	
$\beta_1$	0.88700	0.00056	0.13300	0.56000	1.21300	6.6460	53.58
$\beta_2$	1.64300	0.00124	0.28800	0.93900	2.34600	5.7140	39.24
$\beta_3$	-0.03310	0.00018	0.00406	-0.04302	-0.02317	-8.1610	45.58
$\beta_4$	0.00000	1.00000	0.01292	-0.03161	0.03161	0.0000	26.85
$\beta_5$	-0.20500	0.00022	0.02593	-0.26800	-0.14100	-7.8950	21.46



ภาคผนวก ง  
(ตารางการแจกแจงแบบเอฟ)



ภาคผนวก จ  
(ลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซล)

ตารางที่ จ.1 ลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. ๒๕๕๖

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงสุด	วิธีทดสอบ <sup>๑/</sup>		
๑	เมทิลเอสเทอร์ (Methyl Ester,	ร้อยละโดยน้ำหนัก %wt.)	ไม่ต่ำกว่า	๙๖.๕	EN ๑๔๑๐๓
๒	ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ ๑๕ °ซ (Density at 15 °C	กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร kg/m <sup>3</sup> )	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	๘๖๐ ๙๐๐	ASTM D ๑๒๙๘
๓	ความหนืด ณ อุณหภูมิ ๔๐ °ซ (Viscosity at 40 °C	เซนติสโตกส์ cSt )	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	๓.๕ ๕.๐	ASTM D ๔๔๕
๔	จุดวาบไฟ (Flash Point,	องศาเซลเซียส °C)	ไม่ต่ำกว่า	๑๒๐	ASTM D ๙๓
๕	กำมะถัน (Sulphur,	ร้อยละโดยน้ำหนัก %wt.)	ไม่สูงกว่า	๐.๐๐๑๐	ASTM D ๒๖๒๒
๖	กากถ่าน จากร้อยละ ๑๐ ของส่วนที่เหลือจากการกลั่น (Carbon Residue, on 10% Distillation Residue	ร้อยละโดยน้ำหนัก %wt.)	ไม่สูงกว่า	๐.๓๐	ASTM D ๔๕๓๐
๗	จำนวนซีเทน (Cetane Number)		ไม่ต่ำกว่า	๕๑	ASTM D ๖๑๓
๘	เถ้าซัลเฟต (Sulphated Ash,	ร้อยละโดยน้ำหนัก %wt.)	ไม่สูงกว่า	๐.๐๒	ASTM D ๘๗๔
๙	น้ำ (Water	มิลลิกรัม/กิโลกรัม mg/kg)	ไม่สูงกว่า	๕๐๐	EN ISO ๑๒๙๓๗
๑๐	สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด (Total Contamination	มิลลิกรัม/กิโลกรัม mg/kg)	ไม่สูงกว่า	๒๔	EN ๑๒๖๖๒
๑๑	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (Copper Strip Corrosion)		ไม่สูงกว่า	หมายเลข ๑	ASTM D ๑๓๐
๑๒	เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ ๑๑๐ °ซ (Oxidation Stability at 110 °C	ชั่วโมง hr.)	ไม่ต่ำกว่า	๑๐	EN ๑๕๗๕๑
๑๓	ค่าความเป็นกรด (Acid Value ,	มิลลิกรัมโพตัสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัม mg KOH/g)	ไม่สูงกว่า	๐.๕๐	ASTM D ๖๖๔

ตารางที่ จ.1 (ต่อ) ลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. ๒๕๕๖

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงสุด <sup>๑/</sup>	วิธีทดสอบ <sup>๑/</sup>	
๑๔	ค่าไอโอดีน (Iodine Value ,	กรัมไอโอดีน/๑๐๐ กรัม) <i>g Iodine / 100g</i>	ไม่สูงกว่า ๑๒๐	EN ๑๔๑๑๑
๑๕	กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์ (Linolenic Acid Methyl Ester ,	ร้อยละโดยน้ำหนัก % wt. )	ไม่สูงกว่า ๑๒.๐	EN ๑๔๑๐๓
๑๖	เมทานอล (Methanol ,	ร้อยละโดยน้ำหนัก % wt. )	ไม่สูงกว่า ๐.๒๐	EN ๑๔๑๑๐
๑๗	โมนอกลิเซอไรด์ (Monoglyceride ,	ร้อยละโดยน้ำหนัก % wt. )	ไม่สูงกว่า ๐.๗๐	EN ๑๔๑๐๕
๑๘	ไดกลีเซอไรด์ (Diglyceride ,	ร้อยละโดยน้ำหนัก % wt. )	ไม่สูงกว่า ๐.๒๐	EN ๑๔๑๐๕
๑๙	ไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride ,	ร้อยละโดยน้ำหนัก % wt. )	ไม่สูงกว่า ๐.๒๐	EN ๑๔๑๐๕
๒๐	กลีเซอรินอิสระ (Free glycerin ,	ร้อยละโดยน้ำหนัก % wt. )	ไม่สูงกว่า ๐.๐๒	EN ๑๔๑๐๕
๒๑	กลีเซอรินทั้งหมด (Total glycerin ,	ร้อยละโดยน้ำหนัก % wt. )	ไม่สูงกว่า ๐.๒๕	EN ๑๔๑๐๕
๒๒	โลหะกลุ่ม ๑ (โซเดียมและโปแตสเซียม) (Group I metals ( Na +K ) ,	มิลลิกรัม/กิโลกรัม <i>mg/kg</i> )	ไม่สูงกว่า ๕.๐	EN ๑๔๕๓๘
	โลหะกลุ่ม ๒ (แคลเซียมและแมกนีเซียม) (Group II metals ( Ca + Mg ) ,	มิลลิกรัม/กิโลกรัม <i>mg/kg</i> )	ไม่สูงกว่า ๕.๐	EN ๑๔๕๓๘
๒๓	ฟอสฟอรัส (Phosphorus ,	ร้อยละโดยน้ำหนัก % wt. )	ไม่สูงกว่า ๐.๐๐๑๐	EN ๑๔๑๐๗
๒๔	จุดขุ่น (Cloud Point : CP	องศาเซลเซียส °C)	รายงาน <sup>๒/</sup>	
๒๕	จุดอุดตันการไหลที่อุณหภูมิต่ำ Cold Flow Plugging Point : CFPP	องศาเซลเซียส °C)	รายงาน <sup>๒/</sup>	
๒๖	สารเติมแต่ง (ถ้ามี) (Additives , If Any)		ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบจากอธิบดี	

หมายเหตุ: ๑/ วิธีทดสอบอาจใช้วิธีอื่นที่เทียบเท่าก็ได้ แต่ในกรณีที่มีข้อโต้แย้งให้ใช้วิธีที่กำหนดในรายละเอียดแนบท้ายนี้

๒/ ให้ผู้ค้าน้ำมันรายงานต่ออธิบดีเป็นรายไตรมาส ภายในวันที่ ๑๕ ของเดือนถัดจากเดือนสุดท้ายของไตรมาสนั้น

ตารางที่ จ.2 คุณภาพของไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน) พ.ศ. 2549

รายการ	ข้อกำหนด	ขีดสูงสุด	วิธีทดสอบ <sup>1)</sup>	
1	ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 150 °ซ กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร (Density at 15 OC, kg/m <sup>3</sup> )	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	860 900	ASTM D 1298
2	ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 °ซ เซนติสโตกซ์ (Viscosity at 40 °C, cSt)	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	1.9 8.0	ASTM D 445
3	จุดวาบไฟ (Flash Point, °C)	ไม่ต่ำกว่า	120	ASTM D 93
4	กำมะถัน (Sulphur, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.0015	ASTM D 2622
5	จำนวนซีเทน (Cetane Number)	ไม่ต่ำกว่า	47	ASTM D 613
6	เถ้าซัลเฟต (Sulphated Ash, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.02	ASTM D 874
7	น้ำและตะกอน (Water and Sediment, %vol.)	ไม่สูงกว่า	0.2	ASTM D 2709
8	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (Copper Strip Corrosion)	ไม่สูงกว่า	หมายเลข 3	ASTM D 130
9	ค่าความเป็นกรด มิลลิกรัม โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัม (Acid Number, mg KOH/g)	ไม่สูงกว่า	0.80	ASTM D 664
10	กลีเซอรินอิสระ (Free glycerin, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.02	ASTM D 6584
11	กลีเซอรินทั้งหมด (Total glycerin, %wt.)	ไม่สูงกว่า	1.5	ASTM D 6584
12	สี (Colour)		ม่วง <sup>2)</sup>	ตรวจพินิจด้วย สายตา
13	สารเติมแต่ง (ถ้ามี) (Additive)	ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบจาก อธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน		

ภาคผนวก ฉ  
(ผลการวิเคราะห์ไปโอดีเซล)



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-003 ฉบับที่ 11 บังคับใช้ 08/05/60

เลขที่รายงาน: R1515/60

หน้า: 2/2

ผลการทดสอบ:

ลำดับที่	ชื่อตัวอย่าง	% Fatty Acid Methyl Esters (FAME)
1.	RSM:19.8/5/400	18.74
2.	RSM:30/2/200	51.68
3.	RSM:30/2/600	54.35
4.	RSM:30/8/200	51.81
5.	RSM:30/8/600	53.05
6.	RSM:45/0/400	0.73
7.	RSM:45/5/100	53.62
8.	RSM:45/5/400 <sup>1</sup>	54.79
9.	RSM:45/5/400 <sup>2</sup>	55.40
10.	RSM:45/5/700	53.91
11.	RSM:45/10/400	52.49
12.	RSM:60/2/200	78.43
13.	RSM:60/2/600	75.19
14.	RSM:60/8/200	73.80
15.	RSM:60/8/600	74.07
16.	RSM:70.2/5/400	97.56

แสดงคำสั่งปกรัณที่แบบและอ้างถึงใดเรกทอรี: 1959\_60thanongsak

.....สิ้นสุดรายงานผลการทดสอบ.....

**หมายเหตุ** รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาเพียงบางส่วน  
ออกเว้นทำทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

รูปที่ ๑.1 ผลวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ของน้ำมันลดผลกรดไขมันอิสระ ด้วยเทคนิค  
NMR ของขั้นตอนที่ 1





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-003 ฉบับที่ 11 บังคับใช้ 08/05/60

รายงานผลการทดสอบ

เลขที่รายงาน:	R2062/60	หน้า:	1/1
เลขที่ใบขอใช้บริการ:	2861/60	วันที่รับตัวอย่าง:	27 มิถุนายน 2560
ชื่อและที่อยู่ลูกค้า:	นายทนงศักดิ์ ประสิทธิ์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์		
ผู้ทดสอบ:	นางสาวสุพรรณิ มณีโชติ		
วันที่ทำการทดสอบ:	27 มิถุนายน 2560		
วิธีการทดสอบ:	อ้างอิง WI-RES-NMR-001 และ REF-RES-NMR-023		
เครื่องมือทดสอบ:	Fourier Transform NMR Spectrometer 500 MHz, Unity Inova, Varian, Germany		
เทคนิคการทดสอบ:	<sup>1</sup> H observed experiment		
สภาพตัวอย่าง:	บรรจุในขวดแก้ว		
รายละเอียดตัวอย่าง:	น้ำมัน ไบโอดีเซล, ตัวอย่าง CDCI <sub>3</sub>	จำนวน:	5 ตัวอย่าง

ผลการทดสอบ:

ลำดับที่	ชื่อตัวอย่าง	% Fatty Acid Methyl Esters (FAME)
1.	S.2 45/5/100	86.21
2.	S.2 45/5/400	87.34
3.	S.2 45/5/700	87.34
4.	S.2 45/5/900	87.34
5.	S.1 45.7/7/400	60.24

แสดงดังสเปกตรัมที่แนบและอ้างอิงโคเรกทอรี: 2861\_60thanongsak

(นางรสนี ฤทธิจิตร)

หัวหน้าฝ่ายบริการเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

29 มิถุนายน 2560

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาเพียงบางส่วน  
ยกเว้นทำทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

รูปที่ ฉ.2 ผลวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ของน้ำมันลดกรดไขมันอิสระ ด้วยเทคนิค NMR  
ของขั้นตอนที่ 1 (เงื่อนไขแนะนำ)



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  
และยั่งยืนจากการให้บริการทดสอบด้วยเครื่องมือวิทยาศาสตร์

F-RES-003 ฉบับที่ 11 บังคับใช้ 08.05.60

รายงานผลการทดสอบ

เลขที่รายงาน:	R3309/60	หน้า:	1/1
เลขที่ใบขอใช้บริการฯ:	4460/60	วันที่รับตัวอย่าง:	20 ตุลาคม 2560
ชื่อและที่อยู่ลูกค้า:	นายทองศักดิ์ ประสิทธิ์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์		
ผู้ทดสอบ:	นางสาวศิริวรรณ พงศ์ทฤศญาพัฒนา		
วันที่ทำการทดสอบ:	24 ตุลาคม 2560		
วิธีการทดสอบ:	อ้างอิง WI-RES-NMR-001 และ REF-RES-NMR-023		
เครื่องมือทดสอบ:	Fourier Transform NMR Spectrometer 500 MHz, Unity Inova, Varian, Germany		
เทคนิคการทดสอบ:	<sup>1</sup> H observed experiment		
สภาพตัวอย่าง:	ของเหลวหนืด		
รายละเอียดตัวอย่าง:	น้ำมันไบโอดีเซล, ตัวละลาย CDCl <sub>3</sub>	จำนวน:	4 ตัวอย่าง

ผลการทดสอบ:

ลำดับที่	ชื่อตัวอย่าง	% Fatty Acid Methyl Esters (FAME)
1.	Select S.1 45.7/7/100	53.76
2.	Select S.1 45.7/7/200	52.22
3.	Select S.1 45.7/7/300	58.65
4.	Optimize s.1	88.89

แสดงดังสเปกตรัมที่แนบและอ้างอิงโคโรทอรี่: 4460\_60tanongsak

(นางรุสนี กุลวิจิตร)

หัวหน้าฝ่ายบริการเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

27 ตุลาคม 2560

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาเพียงบางส่วน  
ยกเว้นทำทั้งฉบับ โคโยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

รูปที่ ฉ.3 ผลวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ของน้ำมันลดกรดไขมันอิสระ ด้วยเทคนิค NMR  
ของขั้นตอนที่ 1 (เงื่อนไขแนะนำ และเงื่อนไขเหมาะสม)



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-003 ฉบับที่ 11 บังคับใช้ 08/05/60

รายงานผลการทดสอบ

เลขที่รายงาน:	R2229/60	หน้า:	1/1
เลขที่ใบขอใช้บริการฯ:	2862/60	วันที่รับตัวอย่าง:	27 มิถุนายน 2560
ชื่อและที่อยู่ลูกค้า:	นายทองศักดิ์ ประสิทธิ์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์		
ผู้ทดสอบ:	นางสาวสุจรรยา จิตรหลัง		
วันที่ทำการทดสอบ:	7-11 กรกฎาคม 2560		
วิธีการทดสอบ:	In-house method refer to WI-RES-GC-001 และ REF-RES-BSEN14110:2003		
เครื่องมือทดสอบ:	Gas Chromatograph- Flame Ionization Detector (FID) ยี่ห้อ Hewlett Packard (GC6850)		
เทคนิคการทดสอบ:	Headspace Gas Chromatography -Flame Ionization Detector		
สภาพตัวอย่าง:	บรรจุในขวดแก้ว		
รายละเอียดตัวอย่าง:	น้ำมัน ไบโอดีเซลและน้ำ	จำนวน:	2 ตัวอย่าง

ผลการทดสอบ:

ที่	ชื่อตัวอย่าง	หน่วย	เมททานอล $\pm$ SD	ช่วงการทดสอบ
1	S.1 Ester	g/100 g	1.95 $\pm$ 0.17	0.001-0.500
2	S.1 Water	g/100 g	53.04 $\pm$ 2.45	0.005-0.500

หมายเหตุ: 1) จัดเก็บข้อมูลดิบที่ Server 2\rawdata\GC\GC6850\Back up-2560\2862-60

2) SD: Standard deviation

(นางรุสนี กุลวิจิตร)

หัวหน้าฝ่ายบริการเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

12 กรกฎาคม 2560

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาเพียงบางส่วน  
ยกเว้นทำทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

รูปที่ ๔.4 ผลวิเคราะห์ปริมาณเมทานอลที่ตกค้างในน้ำมันลดผลกรดไขมันอิสระ และของเสีย  
ของขั้นตอนที่ 1



ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม อ.หาดใหญ่ อ.สงขลา 90110  
โทรศัพท์ 074-236904-7 โทรสาร 074-212813 อีเมล sec-all@group.psu.ac.th เว็บไซต์ http://www.sec.psu.ac.th

วิสัยทัศน์: เป็นองค์กรภาครัฐที่เติบโตด้วยความมุ่งมั่นสู่การเป็นองค์กรที่มีสมรรถนะสูง  
และยั่งยืนจากการให้บริการทดสอบด้วยเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

F-RES-003 ฉบับที่ 11 บังคับใช้ 08/05/60

เลขที่รายงาน: R2294/60

หน้า: 2/2

ผลการทดสอบ:

ลำดับที่	ชื่อตัวอย่าง	% Fatty Acid Methyl Esters (FAME)
1.	S2 : 26.4/400	85.11
2.	S2 : 40/2/200	87.34
3.	S2 : 40/2/600	86.96
4.	S2 : 40/6/200	87.34
5.	S2 : 40/6/600	88.11
6.	S2 : 60/0.6/400	88.50
7.	S2 : 60/4/100	90.50
8.	S2 : 60/4/400 (1)	89.29
9.	S2 : 60/4/400 (2)	92.59
10.	S2 : 60/4/700	90.91
11.	S2 : 80/2/200	93.46
12.	S2 : 80/2/600	92.17
13.	S2 : 80/6/200	92.17
14.	S2 : 80/6/600	92.17
15.	S2 : 60/7.4/400	92.59
16.	S2 : 93.6/4/400	93.02

แสดงคำสั่งปริศนาคำที่แนบและอ้างอิงโคเรกทอรี: 2294\_60thanongsak

.....สิ้นสุดรายงานผลการทดสอบ.....

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาเพียงบางส่วน  
ยกเว้นทำทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

รูปที่ ฉ.5 ผลวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ของน้ำมันลดกรดไขมันอิสระ ด้วยเทคนิค NMR  
ของขั้นตอนที่ 2



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  
และยั่งยืนจากการให้บริการทดสอบด้วยเครื่องมือวิทยาศาสตร์

F-RES-003 ฉบับที่ 11 บังคับใช้ 08/05/60

รายงานผลการทดสอบ

เลขที่รายงาน:	R2487/60	หน้า:	1/1
เลขที่ใบขอใช้บริการฯ:	3352/60	วันที่รับตัวอย่าง:	3 สิงหาคม 2560
ชื่อและที่อยู่ลูกค้า:	นายทนงศักดิ์ ประสิทธิ์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์		
ผู้ทดสอบ:	นางสาวศิริวรรณ พงศ์พฤกษาพัฒนา		
วันที่ทำการทดสอบ:	7 สิงหาคม 2560		
วิธีการทดสอบ:	อ้างอิง WI-RES-NMR-001 และ REF-RES-NMR-023		
เครื่องมือทดสอบ:	Fourier Transform NMR Spectrometer 500 MHz, Unity Inova, Varian, Germany		
เทคนิคการทดสอบ:	<sup>1</sup> H observed experiment		
สภาพตัวอย่าง:	บรรจุในขวดแก้ว		
รายละเอียดตัวอย่าง:	น้ำมัน ไบโอดีเซล, ตัวละลาย CDCl <sub>3</sub>	จำนวน:	1 ตัวอย่าง

ผลการทดสอบ:

ลำดับที่	ชื่อตัวอย่าง	% Fatty Acid Methyl Esters (FAME)
1.	Optimize S.2	88.89

แสดงดังสเปกตรัมที่แนบและอ้างอิงโคเรกทอรี: 3352\_60thanongsak

(นางรุสนี กุลวิจิตร)

หัวหน้าฝ่ายบริการเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

7 สิงหาคม 2560

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาเพียงบางส่วน  
ยกเว้นทำทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

รูปที่ ๖.6 ผลวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ของน้ำมันลดกรดไขมันอิสระ ด้วยเทคนิค NMR  
ของขั้นตอนที่ 2 (เงื่อนไขที่เหมาะสม)





ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

(๘๘)

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-003 ฉบับที่ 11 บังคับใช้ 08/05/60

## รายงานผลการทดสอบ

เลขที่รายงาน:	R2573/60	หน้า:	1/1
เลขที่ใบขอใช้บริการฯ:	3353/60	วันที่รับตัวอย่าง:	3 สิงหาคม 2560
ชื่อและที่อยู่ลูกค้า:	นายทงศักดิ์ ประสิทธิ์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์		
ผู้ทดสอบ:	นางสาวสุจรรยา จิตรหลัง		
วันที่ทำการทดสอบ:	11 สิงหาคม 2560		
วิธีการทดสอบ:	In-house method of WI-RES-GC-001 และ REF-RES-BSEN 14103:2003		
เครื่องมือทดสอบ:	Gas Chromatography-Flame Ionization Detector (GC-Agro)		
เทคนิคการทดสอบ:	Gas Chromatography		
สภาพตัวอย่าง:	บรรจุในขวดแก้ว		
รายละเอียดตัวอย่าง:	น้ำมัน ไขโอเคซี	จำนวน:	1 ตัวอย่าง

ผลการทดสอบ:

ที่	ชื่อตัวอย่าง	% Methyl Ester content $\pm$ SD	% Linolenic acid methyl ester content $\pm$ SD
1.	Optimize S.2	94.2195 $\pm$ 2.7527	0.2916 $\pm$ 0.0001

หมายเหตุ : 1) ข้อมูลดิบ rawdata\GC\GC-Agro\Backup-2560\3353-60\FAME

(นางรุสนี กุลจิตร)

หัวหน้าฝ่ายบริการเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

15 สิงหาคม 2560

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาเพียงบางส่วน  
ยกเว้นทำทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

รูปที่ ๘.7 ผลวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ของน้ำมันลดกรดไขมันอิสระ ด้วยเทคนิค GC  
ของขั้นตอนที่ 2 (เงื่อนไขที่เหมาะสม)



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 3 บังคับใช้ 02/05/59

รายงานผลการทดสอบ

เลขที่รายงาน:	R3044/60_1	หน้า:	1/1
เลขที่ใบขอใช้บริการฯ:	4038/60	วันที่รับตัวอย่าง:	20 กันยายน 2560
ชื่อและที่อยู่ลูกค้า:	นายทองศักดิ์ ประสิทธิ์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์		
ชื่อตัวอย่าง:	Ester Select S.2		
สภาพตัวอย่าง:	บรรจุในขวดแก้ว		
รายละเอียดตัวอย่าง:	น้ำมันไบโอดีเซล		
วันที่ทำการทดสอบ:	23-27 กันยายน 2560		

ผลการทดสอบ:

ลำดับที่	พารามิเตอร์	หน่วย	เครื่องมือ/วิธีการทดสอบ	ผลการทดสอบ $\pm$ SD
1.	เมทานอล	% wt.	In-house method based on EN 14110	7.7996 $\pm$ 0.0115

- ผลการทดสอบอ้างอิงใบขอใช้บริการ (F-ASO-054) เลขที่ 4038/60

- จุดล้นสุดของการวัดปริมาณ (LOQ): 0.01 % wt.

- SD: Standard deviation

(นางรุสณี กุลวิจิตร)

หัวหน้าฝ่ายบริการเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

28 กันยายน 2560

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำซ้ำหรือแก้ไขบางส่วน  
ยกเว้นทำใหม่ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

รูปที่ ๘.8 ผลวิเคราะห์ปริมาณเมทานอลที่ตกค้างในน้ำมันลดกรดไขมันอิสระ ของขั้นตอนที่ 2  
(เงื่อนไขแนะนำ)



ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

ชั้น 1 อาคารบริหารอาคารรวม 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: เป็นองค์กรภาครัฐที่เติบโตด้วยความมุ่งมั่นผู้การเป็นองค์กรที่มีสมรรถนะสูง  
และยั่งยืนจากการให้บริการทดสอบด้วยเครื่องมือวิทยาศาสตร์

F-RES-033 ฉบับที่ 3 บังคับใช้ 02/05/59

รายงานผลการทดสอบ

เลขที่รายงาน:	R3044/60_2	หน้า:	1/1
เลขที่ใบขอใช้บริการฯ:	4038/60	วันที่รับตัวอย่าง:	20 กันยายน 2560
ชื่อและที่อยู่ลูกค้า:	นายทองศักดิ์ ประสิทธิ์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์		
ชื่อตัวอย่าง:	Water Select S.2		
สภาพตัวอย่าง:	บรรจุ ในขวดแก้ว		
รายละเอียดตัวอย่าง:	น้ำมันไบโอดีเซล		
วันที่ทำการทดสอบ:	23-27 กันยายน 2560		

ผลการทดสอบ:

ลำดับที่	พารามิเตอร์	หน่วย	เครื่องมือ/วิธีการทดสอบ	ผลการทดสอบ $\pm$ SD
I.	เมทานอล	% wt.	In-house method based on EN 14110	51.1153 $\pm$ 2.1380

- ผลการทดสอบข้างอิงใบขอใช้บริการ (F-ASO-054) เลขที่ 4038/60

- ขีดต่ำสุดของการวัดปริมาณ (LOQ): 0.01 % wt.

- SD: Standard deviation

(นางรุสณี กุณวิจิตร)

หัวหน้าฝ่ายบริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์

28 กันยายน 2560

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำซ้ำจนเกินครึ่ง  
ยกเว้นที่ทิ้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

รูปที่ ฉ.9 ผลวิเคราะห์ปริมาณเมทานอลที่ตกค้างในของเสีย ของขั้นตอนที่ 2 (เงื่อนไขแนะนำ)





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  
และยังยินยอมให้บริการทดสอบด้วยเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

F-RES-003 ฉบับที่ 11 บังคับใช้ 08/05/60

รายงานผลการทดสอบ

เลขที่รายงาน:	R3104/60	หน้า:	1/1
เลขที่ใบขอใช้บริการฯ:	4158/60	วันที่รับตัวอย่าง:	28 กันยายน 2560
ชื่อและที่อยู่ลูกค้า:	นายทนงศักดิ์ ประสิทธิ์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์		
ผู้ทดสอบ:	นางสาวสุพรรณิศา มณีโชติ		
วันที่ทำการทดสอบ:	1 ตุลาคม 2560		
วิธีการทดสอบ:	อ้างอิง WI-RES-NMR-001 และ REF-RES-NMR-023		
เครื่องมือทดสอบ:	Fourier Transform NMR Spectrometer 500 MHz, Unity Inova, Varian, Germany		
เทคนิคการทดสอบ:	<sup>1</sup> H observed experiment		
สภาพตัวอย่าง:	บรรจุในขวดแก้ว		
รายละเอียดตัวอย่าง:	น้ำมันไบโอดีเซล, ตัวละลาย CDCl <sub>3</sub>	จำนวน:	6 ตัวอย่าง

ผลการทดสอบ:

ลำดับที่	ชื่อตัวอย่าง	% Fatty Acid Methyl Esters (FAME)
1.	S.3+2/10	98.04
2.	S.3+4/22.1	97.56
3.	S.3+4/15 (2)	98.04
4.	S.3+4/15 (4)	99.01
5.	S.3+4/7.9	97.56
6.	S.3+6/10	98.04

แสดงดังสเปกตรัมที่แนบและอ้างอิงโคเรกทอรี: 4158\_60tanongsak

(นางรุสนี กุลวิจิตร)

หัวหน้าฝ่ายบริการเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

4 ตุลาคม 2560

**หมายเหตุ** รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาเพียงบางส่วน  
ยกเว้นทำทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

รูปที่ ๑.10 ผลวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ ด้วยเทคนิค NMR ของขั้นตอนที่ 3



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-003 ฉบับที่ 11 บังคับใช้ 08/05/60

รายงานผลการทดสอบ

เลขที่รายงาน:	R3007/60	หน้า:	1/1
เลขที่ใบขอใช้บริการฯ:	4058/60	วันที่รับตัวอย่าง:	21 กันยายน 2560
ชื่อและที่อยู่ลูกค้า:	นายทนงศักดิ์ ประสิทธิ์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์		
ผู้ทดสอบ:	นางสาวศิริวรรณ พงศ์พัฒนา		
วันที่ทำการทดสอบ:	21 กันยายน 2560		
วิธีการทดสอบ:	อ้างอิง WI-RES-NMR-001 และ REF-RES-NMR-023		
เครื่องมือทดสอบ:	Fourier Transform NMR Spectrometer 500 MHz, Unity Inova, Varian, Germany		
เทคนิคการทดสอบ:	<sup>1</sup> H observed experiment		
สภาพตัวอย่าง:	บรรจุในขวดแก้ว		
รายละเอียดตัวอย่าง:	น้ำมัน ไข ไอคิเซล, ตัวละลาย CDCl <sub>3</sub>	จำนวน:	4 ตัวอย่าง

ผลการทดสอบ:

ลำดับที่	ชื่อตัวอย่าง	% Fatty Acid Methyl Esters (FAME)
1.	S.3 +2/20	96.62
2.	S.3 +6/20	96.62
3.	S.3 +6.8/15	96.15
4.	S.3 +1.2/15	97.09

แสดงดังสเปกตรัมที่แนบและอ้างอิงโคเรกทอรี: 4058\_60thanongsak

(นางรุตณี กุลวิจิตร)

หัวหน้าฝ่ายบริการเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

26 กันยายน 2560

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาเพียงบางส่วน  
ออกให้ทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

รูปที่ ฉ.11 ผลวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ ด้วยเทคนิค NMR ของขั้นตอนที่ 3 (ต่อ)



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-003 ฉบับที่ 11 บังคับใช้ 08/05/60

รายงานผลการทดสอบ

เลขที่รายงาน:	R3236/60	หน้า:	1/1
เลขที่ใบขอใช้บริการฯ:	4313/60	วันที่รับตัวอย่าง:	9 ตุลาคม 2560
ชื่อและที่อยู่ลูกค้า:	นายทองศักดิ์ ประสิทธิ์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์		
ผู้ทดสอบ:	นางสาวสุพรรณิ มณีโชติ		
วันที่ทำการทดสอบ:	12 ตุลาคม 2560		
วิธีการทดสอบ:	อ้างอิง WI-RES-NMR-001 และ REF-RES-NMR-023		
เครื่องมือทดสอบ:	Fourier Transform NMR Spectrometer 500 MHz, Unity Inova, Varian, Germany		
เทคนิคการทดสอบ:	<sup>1</sup> H observed experiment		
สภาพตัวอย่าง:	บรรจุในขวดแก้ว		
รายละเอียดตัวอย่าง:	น้ำมัน ไบโอดีเซล, ตัวละลาย CDCl <sub>3</sub>	จำนวน:	2 ตัวอย่าง

ผลการทดสอบ:

ลำดับที่	ชื่อตัวอย่าง	% Fatty Acid Methyl Esters (FAME)
1.	Optimize S.3 ก่อน	96.62
2.	Optimize S.3	97.09

แสดงดังสปกดรัมที่แนบและอ้างอิงโคเรกทอรี: 4313\_60tanongsak

(นางรุสนี กุลวิจิตร)

หัวหน้าฝ่ายบริการเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

16 ตุลาคม 2560

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาเพื่อบางส่วน  
ยกเว้นทำทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

รูปที่ ฉ.12 ผลวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ ด้วยเทคนิค NMR ของขั้นตอนที่ 3  
(เงื่อนไขที่เหมาะสม)



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-003 ฉบับที่ 11 บังคับใช้ 08/05/60

รายงานผลการทดสอบ

เลขที่รายงาน:	R3258/60	หน้า:	1/1
เลขที่ใบขอใช้บริการฯ:	4314/60	วันที่รับตัวอย่าง:	9 ตุลาคม 2560
ชื่อและที่อยู่ลูกค้า:	นายทองศักดิ์ ประสิทธิ์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์		
ผู้ทดสอบ:	นางสาวสุจรรยา จิตรหลัง		
วันที่ทำการทดสอบ:	16-17 ตุลาคม 2560		
วิธีการทดสอบ:	In-house method based on WI-RES-GC-002 and REF-RES-BSEN 14103:2003-001		
เครื่องมือทดสอบ:	Gas Chromatograph- Flame Ionization Detector (FID), Agilent (GC-7890)		
เทคนิคการทดสอบ:	Gas Chromatography		
สภาพตัวอย่าง:	บรรจุในขวดแก้ว		
รายละเอียดตัวอย่าง:	น้ำมัน ไบโอดีเซล	จำนวน:	1 ตัวอย่าง

ผลการทดสอบ:

No.	Sample Name	% Methyl Ester content $\pm$ SD
1	Optimize S.3	97.11 $\pm$ 0.05

หมายเหตุ: 1) Raw data file: rawdata\GC\GC7890\Backup2560\4314-60

(นางรุสณี กุลวิจิตร)

หัวหน้าฝ่ายบริการเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

19 ตุลาคม 2560

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาเพียงบางส่วน  
ยกเว้นทำทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

รูปที่ ฉ.13 ผลวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ ด้วยเทคนิค GC ของขั้นตอนที่ 3



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  
และยั่งยืนจากการให้บริการทดสอบด้วยเครื่องมือวิทยาศาสตร์

F-RES-003 ฉบับที่ 11 นิ่งับใช้ 08/05/60

รายงานผลการทดสอบ

เลขที่รายงาน:	R3422/60	หน้า:	1/1
เลขที่ใบขอใช้บริการ:	4458/60	วันที่รับตัวอย่าง:	20 ตุลาคม 2560
ชื่อและที่อยู่ลูกค้า:	นายทนงศักดิ์ ประสิทธิ์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์		
ผู้ทดสอบ:	นางสาวสุจรยา จิตรหลัง		
วันที่ทำการทดสอบ:	30 ตุลาคม - 1 พฤศจิกายน 2560		
วิธีการทดสอบ:	In-house method refer to WI-RES-GC-001 และ REF-RES-BSEN 14110:2003		
เครื่องมือทดสอบ:	Gas Chromatograph- Flame Ionization Detector (FID) ยี่ห้อ Hewlett Packard (GC6850)		
เทคนิคการทดสอบ:	Headspace-Gas Chromatography/Flame Ionization Detector (HS-GC/FID)		
สภาพตัวอย่าง:	ของเหลว		
รายละเอียดตัวอย่าง:	น้ำมัน ไบโอดีเซล	จำนวน:	2 ตัวอย่าง

ผลการทดสอบ:

ที่.	ชื่อตัวอย่าง	หน่วย	ปริมาณเมทานอล $\pm$ SD	LOQ
1.	Ester S.3	%w/w	20.17 $\pm$ 0.15	0.01
2.	Glycerol S.3	%w/w	10.37 $\pm$ 0.05	0.01

หมายเหตุ 1) จัดเก็บข้อมูลดิบที่ Server 2\rawdata\GC\GC6850\Back up-2560\4458-60

2) LOQ (Limit of quantitation): ปริมาณต่ำสุดที่สามารถหาปริมาณได้

3) SD: Standard deviation

(นางรุตน์ กุลวิจิตร)

หัวหน้าฝ่ายบริการเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

2 พฤศจิกายน 2560

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้จะไม่ถูกทำสำเนาเพื่อบางส่วน  
ยกเว้นทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

รูปที่ ฉ.14 ผลวิเคราะห์ปริมาณเมทานอลที่ตกค้างในของเสีย ของขั้นตอนที่ 3 (เงื่อนไขเหมาะสม)





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-003 ฉบับที่ 11 วันที่ 11 สิงหาคม 2560

รายงานผลการทดสอบ

เลขที่รายงาน:	R3400/60	หน้า:	1/1
เลขที่ใบขอใช้บริการฯ:	4464/60	วันที่รับตัวอย่าง:	20 ตุลาคม 2560
ชื่อและที่อยู่ลูกค้า:	นายทนงศักดิ์ ประสิทธิ์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์		
ผู้ทดสอบ:	นางเวียงชัย จงศิริวิทันกุล และนายวุฒิชัย คงกำเนิด		
วันที่ทำการทดสอบ:	1 พฤศจิกายน 2560		
วิธีการทดสอบ:	ICP-OES refer to WI-RES-ICP-OES-001		
เครื่องมือทดสอบ:	Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer, Optima 4300 DV, Perkin Elmer Instruments, USA		
เทคนิคการทดสอบ:	Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry		
สภาพตัวอย่าง:	ของเหลว		
รายละเอียดตัวอย่าง:	น้ำมัน ไบโอดีเซล	จำนวน:	1 ตัวอย่าง

ผลการทดสอบ:

ลำดับที่	ชื่อตัวอย่าง	รายการทดสอบ	เครื่องมือ/วิธี	หน่วย	ผลการทดสอบ $\pm$ SD	LOQ	LOD
1.	น้ำมัน ไบโอดีเซล	Ca	ICP-OES	mg/kg	4.33 $\pm$ 0.10	0.40	0.12
		Mg	ICP-OES	mg/kg	ไม่พบ	0.43	0.13

\* LOQ = ขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณ

\* LOD = ขีดจำกัดในการตรวจวัด

\* ข้อมูลต้น We-Lab ICP-2560 รายงานปกติ 4464-60 นายทนงศักดิ์ ประสิทธิ์ Ca Mg

\* SD = Standard Deviation

(นางรุสนี กูลวิจิตร)

หัวหน้าฝ่ายบริการเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

2 พฤศจิกายน 2560

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำซ้ำบนผลิตภัณฑ์ของส่วน  
อื่นในท่ามกลาง โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

รูปที่ ฉ.15 ผลวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอดีเซล



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: เป็นองค์กรภาครัฐที่เติบโตด้วยความมุ่งมั่นผู้การเป็นองค์กรที่มีสมรรถนะสูง  
และยั่งยืนจากการให้บริการทดสอบด้วยเครื่องมือวิทยาศาสตร์

F-RES-033 ฉบับที่ 3 มีงับใช้ 02/05/59

เลขที่รายงาน: R3407/60

หน้า: 2/2

ผลการทดสอบ:

ลำดับที่	พารามิเตอร์	หน่วย	เครื่องมือ/วิธีการทดสอบ	ผลการทดสอบ $\pm$ SD	เกณฑ์
1.	กากถ่าน	% wt.	In-house method based on ASTM D 4530	< 0.1	$\leq$ 0.30
2.	ฟอสฟอรัส (P)	% wt.	ICP-OES	ไม่พบ	$\leq$ 0.0010
3.	เถ้าซิลิเกต	% wt.	In-house method based on ASTM D 874	0.009 $\pm$ 0.001	$\leq$ 0.02
4.	ค่าไอโอดีน	g Iodine/100g	In-house method based on EN 14111	45.9 $\pm$ 1.5	$\leq$ 120
5.	กำมะถัน	% wt.	XRF	> 0.0025	$\leq$ 0.0010
6.	เมทานอล	% wt.	In-house method based on EN 14110	< 0.01	$\leq$ 0.20
7.	โมโนกลีเซอไรด์	% wt.	In-house method based on EN 14105	0.02 $\pm$ 0.00	$\leq$ 0.70
8.	ไดกลีเซอไรด์	% wt.	In-house method based on EN 14105	0.02 $\pm$ 0.00	$\leq$ 0.20
9.	ไตรกลีเซอไรด์	% wt.	In-house method based on EN 14105	0.07 $\pm$ 0.00	$\leq$ 0.20
10.	กลีเซอรินอิสระ	% wt.	In-house method based on EN 14105	0.00	$\leq$ 0.02
11.	กลีเซอรินทั้งหมด	% wt.	In-house method based on EN 14105	0.02 $\pm$ 0.00	$\leq$ 0.25
12.	เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 °C	Hours	In-house method based on EN 15751	0.96	$\geq$ 10

- ผลการทดสอบอ้างอิงใบขอใช้บริการ (F-ASO-054) เลขที่ 4461/60

- SD = Standard Deviation

- XRF = X-Ray Fluorescence Spectrometer, ICP-OES = Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometer

- จุดจำกัดของวัดปริมาณ (LOQ) กากถ่าน = 0.1 % wt.

- จุดต่ำสุดของงารวัด (LOD) P = 0.0000295 mg/kg

- จุดจำกัดของวัดปริมาณ (LOQ) เมทานอล = 0.01 % wt.

- อ้างอิงตามประกาศกรมธุรกิจพลังงาน เรื่อง กำหนดและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมัน ปี พ.ศ. 2556

สิ้นสุดรายงานผลการทดสอบ.....

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาหรือบางส่วน  
ยกเว้นทำทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

รูปที่ ฉ.16 ผลวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอดีเซล (ต่อ)



ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
 ตู๊ ปณ. 2 คลองหมี อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112 เว็บไซต์ chem.eng.psu.ac.th  
 โทรศัพท์ 074 287055 6 โทรสาร 074 558833 อีเมลล์ kunyanut.ces@psu.ac.th



### รายงานผลการทดสอบ


ใบขอรับบริการเลขที่ 4/2561  
 บันทึกงานเลขที่ Pe1/2561

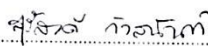
วันที่รับตัวอย่าง 20 ตุลาคม 2561  
 ชื่อผู้ขอรับบริการ นายทองศักดิ์ ประสิทธิ์  
 ที่อยู่ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์  
 ชื่อ/ชนิดของตัวอย่าง Biodiesel

#### รายงานผลการทดลอง

ชื่อตัวอย่าง	รายการทดสอบ	วิธีการทดสอบ	ค่ามาตรฐาน	ผลการทดสอบ
1.Biodiesel	จุดวาบไฟ (Flash Point)	ASTM-D93	>120°C	162°C
	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (Copper Corrosion)	ASTM 130	ไม่สูงกว่า No.1	No.1a
	ความหนืด ณ 40 องศา เซลเซียส (Viscosity at 40°C)	ASTM-D445	3.5-5 cSt	4.93 cSt
	ปริมาณน้ำ (Water Content )	Karl Fischer	ไม่สูงกว่า 0.05% wt	0.11% wt.

หมายเหตุ -

  
 (นายธนกร เกียรติขวัญบุตร)  
 นักวิทยาศาสตร์ผู้ทดสอบ  
 01 / 11 / 2560

  
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรัสวดี กังสนันทน์)  
 รองหัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมเคมีฝ่ายกิจการนักศึกษาและวิเทศสัมพันธ์  
 ปฏิบัติการแทนหัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมเคมี  
 01 / 11 / 2560

ลงวันที่ทำการทดสอบเสร็จ 31/10/60

หมายเหตุ รายงานนี้ทำ รวบรวมเฉพาะตัวอย่างที่ตรวจวิเคราะห์/ทดสอบเท่านั้น  
 - ห้ามใช้รายงานผลตรวจเพื่อเป็นบางส่วน โดยมิได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษร

รูปที่ ฉ.17 ผลวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอดีเซล (ต่อ)





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-003 ฉบับที่ 11 บังคับใช้ 08 05 60

รายงานผลการทดสอบ

เลขที่รายงาน:	R3360/60	หน้า:	1/1
เลขที่ใบขอใช้บริการ:	4462/60	วันที่รับตัวอย่าง:	20 ตุลาคม 2560
ชื่อและที่อยู่ลูกค้า:	นายทองศักดิ์ ประสิทธิ์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์		
ผู้ทดสอบ:	นางสาวสุจรรยา จิตรหลัง		
วันที่ทำการทดสอบ:	28 ตุลาคม 2560		
วิธีการทดสอบ:	In house method refer to WI-RES-Bomb-001		
เครื่องมือทดสอบ:	IKA <sup>®</sup> Calorimeter System C5000 control, Germany		
เทคนิคการทดสอบ:	Calorific method, Isoperibolic mode		
สภาพตัวอย่าง:	ของเหลวบรรจุในขวดพลาสติก		
รายละเอียดตัวอย่าง:	น้ำมันไบโอดีเซล	จำนวน:	1 ตัวอย่าง

ผลการทดสอบ:

ลำดับที่	ชื่อตัวอย่าง	หน่วย	Gross heating value $\pm$ SD
1	น้ำมันไบโอดีเซล	Joules/g	38,100 $\pm$ 185
		Calories/g	9,100 $\pm$ 44

หมายเหตุ: 1) SD หมายถึง Standard deviation

2) ข้อมูลดิบถูกจัดเก็บในโฟลเดอร์: server2\rawdata\Bomb\2560\Gross Heating Value\4462\_60

(นางรุสณี กุวิจิตร)

หัวหน้าฝ่ายบริการเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

30 ตุลาคม 2560

หมายเหตุ: รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาเพียงบางส่วน  
ยกเว้นทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

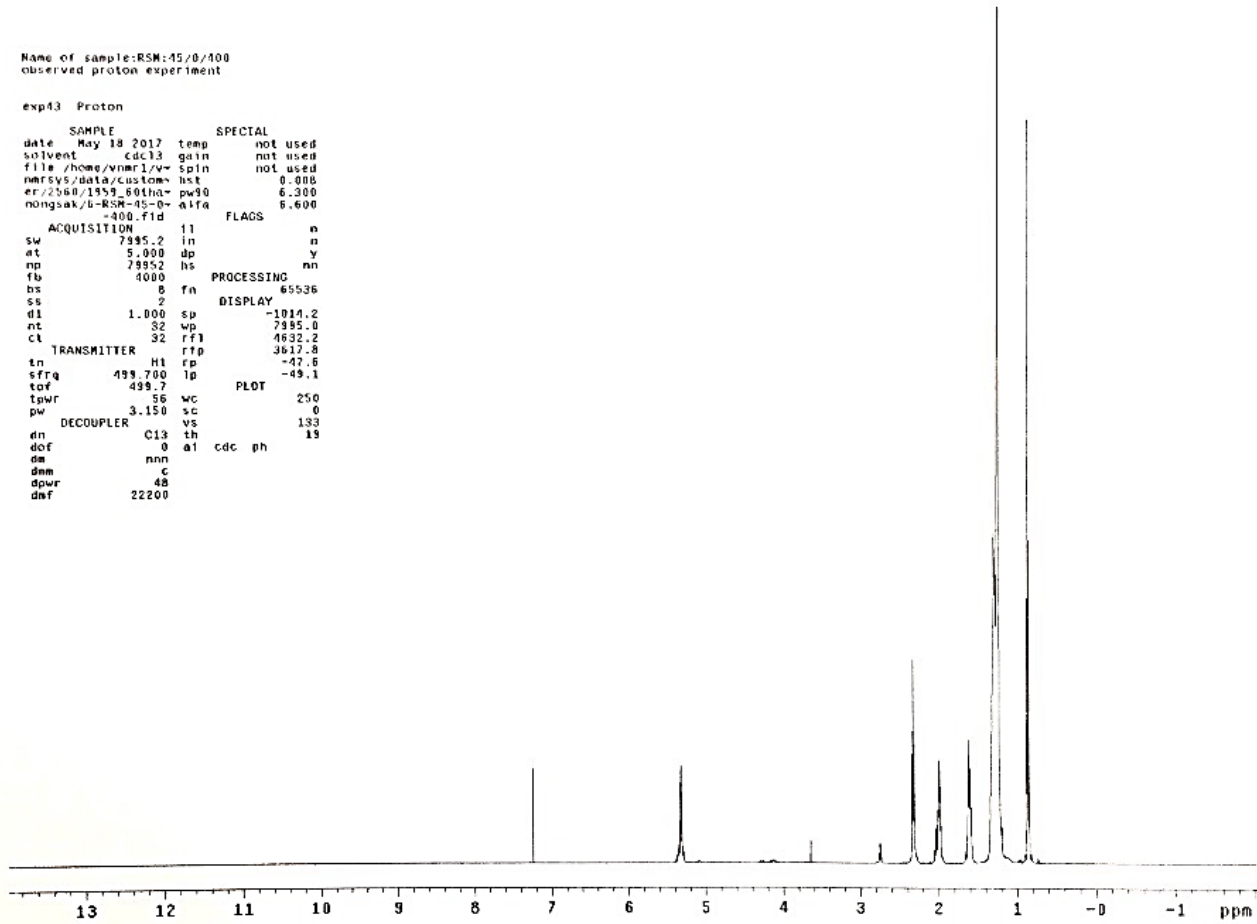
รูปที่ ฉ.18 ผลวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอดีเซล (ต่อ)

ภาคผนวก ช  
(ตัวอย่างการวิเคราะห์ด้วย เทคนิค NMR)

Name of sample:RSM-15/0/100  
observed proton experiment

exp43 Proton

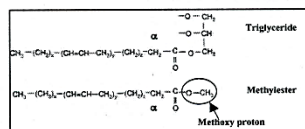
SAMPLE		SPECIAL	
date	May 18 2017	temp	not used
solvent	cdc13	gain	not used
file	/home/vnmr1/v-	spin	not used
nmr55/data/custom-	hst		0.000
er/2560/1859_60tha-	pw90		6.300
nongsak/4-RSM-15-0-	alpha		6.600
-400.fid		FLAGS	
ACQUISITION		PROCESSING	
sw	7995.2	fl	n
at	5.000	in	n
np	79952	dp	y
fb	4000	hs	nn
bs	0	fn	65536
ss	2	DISPLAY	
d1	1.000	sp	-1014.2
nt	32	wp	7995.0
ct	32	rfl	4632.2
TRANSMITTER		PLOT	
tn	H1	rp	-47.6
sfq	499.700	lp	-49.1
taf	499.7		
tpwr	56	wc	250
pw	3.150	sc	0
DECOUPLER		VS	
dn	C13	th	133
dof	0	a1	cdc ph
dm	nnn		
dmm	c		
dpwr	48		
daf	22200		



รูปที่ ข.1 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค NMR

การทดสอบร้อยละเมทิลเอสเทอร์ด้วยเครื่อง NMR (อ้างอิง REF-RES-NMR-023) ใบขอใช้บริการเลขที่ 1959/60

$$\% \text{ FAME} = \frac{100 \times [2 \times \text{integration value of } -\text{OCH}_3]}{[3 \times \text{integration value of } \alpha\text{-CH}_2]}$$



methoxy proton (-OCH<sub>3</sub>) ปรากฏสัญญาณที่ ~ 3.7 ppm

alpha-CH<sub>2</sub> ปรากฏสัญญาณที่ ~ 2.3 ppm

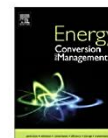
No.	Sample name	integration value of -OCH <sub>3</sub>	integration value of alpha-CH <sub>2</sub>	% FAME
1	RSM:19.8/5/400	3.00	10.67	18.74
2	RSM:30/2/200	3.00	3.87	51.68
3	RSM:30/2/600	3.00	3.68	54.35
4	RSM:30/8/200	3.00	3.86	51.81
5	RSM:30/8/600	3.00	3.77	53.05
6	RSM:45/0/400	3.00	274.10	0.73
7	RSM:45/5/100	3.00	3.73	53.62
8	RSM:45/5/400 <sup>1</sup>	3.00	3.65	54.79
9	RSM:45/5/400 <sup>2</sup>	3.00	3.61	55.40
10	RSM:45/5/700	3.00	3.71	53.91
11	RSM:45/10/400	3.00	3.81	52.49
12	RSM:60/2/200	3.00	2.55	78.43
13	RSM:60/2/600	3.00	2.66	75.19
14	RSM:60/8/200	3.00	2.71	73.80
15	RSM:60/8/600	3.00	2.70	74.07
16	RSM:70.2/5/400	3.00	2.05	97.56

รูปที่ ซ.2 ตัวอย่างการคำนวณร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ด้วยเทคนิค NMR

ภาคผนวก ซ  
(การเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ)

เอกสารเผยแพร่ผลงานทางวิชาการที่ 1  
บทความวิจัย

Somnuk, K., Prasit, T. and Prateepchaikul, G. 2017. Effects of mixing technologies on continuous methyl ester production: Comparison of using plug flow, static mixer, and ultrasound clamp. *Energy Conversion and Management*. 140: 91-97.



## Effects of mixing technologies on continuous methyl ester production: Comparison of using plug flow, static mixer, and ultrasound clamp



Krit Somnuk\*, Tanongsak Prasit, Gumpon Prateepchaikul

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

### ARTICLE INFO

Article history:  
Received 21 January 2017  
Received in revised form 21 February 2017  
Accepted 23 February 2017

Keywords:  
Plug flow  
Static mixer  
Ultrasound clamp  
Methyl ester  
Continuous process

### ABSTRACT

Four types of continuous reactors, namely plug flow reactor (PF), static mixer reactor (SM), ultrasound clamp on tubular reactor (US), and static mixer combined with ultrasound (SM/US) were compared for their purities of methyl ester in biodiesel production from refined palm oil (RPO). The reactor conditions were: KOH 4, 6, 8, 10, and 12 g L<sup>-1</sup>, methanol content 20 vol.%, and under 20 L h<sup>-1</sup> RPO flow rate at 60 °C temperature. The highest purity of methyl esters: 81.99 wt.% for PF, 95.70 wt.% for SM, 98.98 wt.% for US, and 97.67 wt.% for SM/US, were achieved with 900 mm, 900 mm, 700 mm, and 900 mm reactor lengths respectively, and 12 g L<sup>-1</sup> of KOH was used in all cases. The 16 × 400 W ultrasound clamp was operated at 20 kHz frequency, and among short length reactors the US case was more effective than PF, SM, or SM/US. Moreover, ester purity from the US reactor was slightly decreased by the lowest 4 g L<sup>-1</sup> KOH. The US reactor was clearly superior over the other types of continuous reactor, and had the potential to reduce KOH consumption by sonochemical effects on the base-catalyzed transesterification reaction.

© 2017 Elsevier Ltd. All rights reserved.

### 1. Introduction

Biodiesel as renewable energy source can be used in diesel engines without any major modification [1,2]. Moreover, the exhaust emissions from biodiesel have advantages over those from petroleum diesel, such as less smoke and airborne particles [3]. Biodiesel is preferable to petroleum diesel in terms of biodegradability and non-toxicity [4,5]. Moreover, biodiesel has lower CO<sub>2</sub> emissions and sulfuric content than petroleum fuel [6]. In the biodiesel production process, various mixing technologies increase the contact of two immiscible phases: oils and alcohol. These include using an agitator, a static mixer, a continuous stirred tank reactor (CSTR), a high shear mixer, or an ultrasonic reactor, and the choice should be made to decrease catalyst concentration, methanol content, operating costs, and maintenance costs, as well as reaction (processing) time [7]. Regarding continuous biodiesel production with static mixer in the reactor, Sungwornpatansakul et al. [8] reported on the potential of mixing to influence completed transesterification. They reported that a droplet of methanol was rapidly mixed with the oils at the beginning of the static mixer. Somnuk et al. [7] optimized a two-stage continuous process to produce methyl ester from mixed crude palm oil (MCPO), using a static mixer coupled with high-intensity ultrasound. In the static mixer, the methyl

ester concentrations 92.09 wt.% and 93.03 wt.% were detected at 1 m and 2 m length-wise locations along the static mixer at the optimal operating conditions: 18 vol.% of methanol, 8 g L<sup>-1</sup> of KOH, 30 °C of temperature, and 20 L h<sup>-1</sup> of esterified oil. Likozar et al. [9] studied the modeling of chemical equilibrium, reaction kinetics and mass transfer for continuous biodiesel production from canola oil using a tubular reactor combined with static mixer while varying the operating parameters: temperature, volumetric flow rate, phase fractions, and catalyst content. Their models can be used to apply for scale-up from 5 to 10 mm internal diameter of a tubular reactor, using the kinetic parameters in a reaction scheme of individual TG, DG, MG, glycerol and other components of the oil determined using a six flat-blade disk turbine in a batch process [10].

As application of ultrasound in the circulation and continuous biodiesel production process, Choedkiatsakul et al. [11] studied the production of biodiesel from palm oil using a combined mechanical stirrer and ultrasonic reactor. Three reactor configurations were tested: mechanical stirrer with horizontal stirring rod inside the reactor (MS reactor), ultrasound irradiation (US reactor), and combined mechanical stirring and ultrasound irradiation (MS-US reactor) on producing methyl ester. A dual frequency (20 and 50 kHz) ultrasound rectangular reactor of stainless steel (SUS316) was integrated with a horizontal mechanical stirrer to produce biodiesel. High methyl ester yield was achieved by using re-circulation with 5 min reaction time, 6:1 methanol to oil molar

\* Corresponding author.  
E-mail address: [krit.s@psu.ac.th](mailto:krit.s@psu.ac.th) (K. Somnuk).



ratio, and 1% NaOH catalyst loading at 55 mL min<sup>-1</sup> flow rate on using the MS-US reactor. They found that the number of transducers influenced the ester yield more significantly than the dual ultrasonic frequency (20 or 50 kHz). The combined MS-US reactor had improved biodiesel production over the MS and US reactors. The mechanical stirrer assisted the sonochemistry of transesterification reaction. Therefore, a static mixer will be applied to accelerate the transesterification reaction, combined with sonication by ultrasonic clamps on the tube, for continuous biodiesel production in this current study. Yin et al. [12] studied biodiesel production from soybean oil deodorizer distillate (SODD) using counter-current pulsed ultrasound. The results showed that the counter-current pulsed ultrasound emitter (CCPUE) was more effective than the static probe ultrasound emitter (SPUE). With the CCPUE, 96.1% biodiesel conversion was obtained under the optimal conditions: 25 °C temperature, 10:1 M ratio of methanol to triglyceride, 200 mL min<sup>-1</sup> flow rate, 1.8% catalyst, and 4 s on-time, 2 s off-time cycle of pulsed ultrasound at 50 min total reaction time. Mostafaei et al. [13] optimized continuous biodiesel production from waste cooking oil with response surface methodology using a central composite experimental design. The results showed that 91.12% yield and 102.4 W energy consumption were achieved under the optimal conditions: 75 mm irradiation distance, 28 mm probe diameter, 56% ultrasonic amplitude, 62% vibration pulse, and 50 mL min<sup>-1</sup> reactant flow rate. Delavari et al. [5] studied ultrasound combined with helicoidal reactor in producing biodiesel by continuous transesterification. The system consisted of a 1500 W ultrasonic homogenizer and glass helicoidal reactor with 20 m tube length. This set-up was submerged in a hot water bath. The optimal conditions were: 8.6 oil to methanol ratio and 0.5 wt.% NaOH at 1 L min<sup>-1</sup> flow rate of waste cooking oil, and 90% yield was achieved within 150 s in the continuous process. This system was more efficient than conventional batch systems using magnetic stirrer, apparently due to sonochemistry effects of cavitation. In sonochemistry ultrasonic acoustic waves affect chemistry with coupled physical and mass transfer effects, with strong effects stemming from collapsing cavitation bubbles [14]. The contact surface area of chemical reactants and oil can be increased by sonication [15]. Moreover, Martínez-Guerra and Gude (2015) reported that direct ultrasound is significantly more effective than indirect ultrasound [16,17]. As an example of indirect ultrasound, the acoustic wave from an ultrasonic transducer at the wall of an ultrasonic water bath has to travel through water in the bath and through an immersed reactor until before it reaches the reaction mixture. The above literature review of continuous biodiesel production shows that many types of reactor (plug flow, static mixer, and ultrasonic) have been studied to decrease reaction time, chemical costs, operating costs, and maintenance costs. Most studies have examined effects of alternative mixing technologies on ester conversion to produce biodiesel from various oils. However, this current study compares the effectiveness of the purities of methyl esters with short reaction times between these four continuous reactor types: plug flow reactor (PF), static mixer reactor (SM), ultrasound clamp on tubular reactor (US), and static mixer combined with ultrasound (SM/US).

## 2. Materials and methods

### 2.1. Materials

Commercial refined palm oil (RPO) was used as the raw material in continuous base-catalyzed transesterification. The composition of RPO was 0.27 wt.% free fatty acid (FFA), 97.10 wt.% triglyceride (TG), 2.29 wt.% diglyceride (DG), 0.35 wt.% monoglyceride (MG), with 783.4 g mol<sup>-1</sup> mean molecular weight,

883 kg m<sup>-3</sup> density at 60 °C, and 0.0184 Pa s viscosity at 60 °C as reported in Table 1. For determining the molecular weight of RPO, gas chromatography was used to analyze the fatty acid composition of RPO (see Table 3) reported in percentages by weight (wt.%). The composition was used to calculate the mean molecular weight of RPO. The commercial grade chemical reactants 95% potassium hydroxide (KOH) and 99% methanol (MeOH) were used in the experiments. The analytical grade chemicals were hexane, diethyl ether, formic acid, and benzene. To analyze the biodiesel composition a thin layer chromatography with flame ionization detection (TLC/FID, model: IATROSCAN MK-65; Mitsubishi Kagaku Iatron Inc., Tokyo, Japan) was used, and the weight percentages of methyl ester, TG, DG, MG, and FFA in the biodiesel and in the RPO were determined. To calibrate the TLC/FID instrument, six standard samples: Tripalmitin, Palmitic acid and Methyl Palmitate (obtained from Nacala Tesque, Inc., Kyoto, Japan.); 1,3- Distearin, DL, Palmitin (mono palmitin) (obtained from Sigma Aldrich Co, USA) and 1,2- Distearin 99%, (from Research Plus, Inc, USA) were used as standards to calibrate the peaks of the tri-, di-, and monoglycerides, free fatty acid, and ester.

### 2.2. Equipment

Fig. 1 shows a schematic of the experimental setup. The continuous reactors for methyl ester production from RPO were of four types: plug flow reactor (PF), static mixer reactor (SM), ultrasound clamp on tubular reactor (US), and the static mixer combined with ultrasound (SM/US). The PF reactor simply consisted of a tube, and it was operated without ultrasound or any mixing elements in the tube. The tube of stainless steel (SUS304) had 13 mm inside diameter, 3.5 mm wall thickness, and 1000 mm length. The Reynolds number (*Re*) was calculated to determine the flow pattern of RPO in the tube. It is defined by Eq. (1). The mixing element of the SM is the key to blending RPO with potassium methoxide, and the mixing elements were inserted into the empty tube. Each static mixing element had 180° twist with length to diameter ratio (*L/D*) 1.5. The consecutive mixing elements were 90° off at contact, known as twisted-ribbon configuration [18]. The US reactor had the ultrasound clamp on the tubular without SM, and details of the ultrasound clamp are described in the section. Finally, the SM/US reactor had the static mixer combined with ultrasound (SM/US). Table 2 summarizes how the various components were combined in the four continuous reactors.

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} \quad (1)$$

where *Re* is Reynolds number,  $\rho$  is the density of the fluid (kg m<sup>-3</sup>), *V* is the mean fluid velocity (m s<sup>-1</sup>),  $\mu$  is the dynamic viscosity (Pa s), and *D* is diameter of the tube (m).

**Table 1**  
Physical properties of RPO.

Property	RPO	Analysis method
Mean molecular weight (g mol <sup>-1</sup> )	783.4	Calculated <sup>a</sup>
Density at 60 °C (kg m <sup>-3</sup> )	883	ASTM D 1298
Viscosity at 60 °C (Pa s)	0.0184	ASTM D 445
Triglyceride (wt.%)	97.10	TLC/FID
Diglyceride (wt.%)	2.29	TLC/FID
Monoglyceride (wt.%)	0.35	TLC/FID
Free fatty acid (wt.%)	0.27	TLC/FID

<sup>a</sup> The mean molecular weight was calculated from the fatty acid composition of RPO, which was analyzed by gas chromatography.



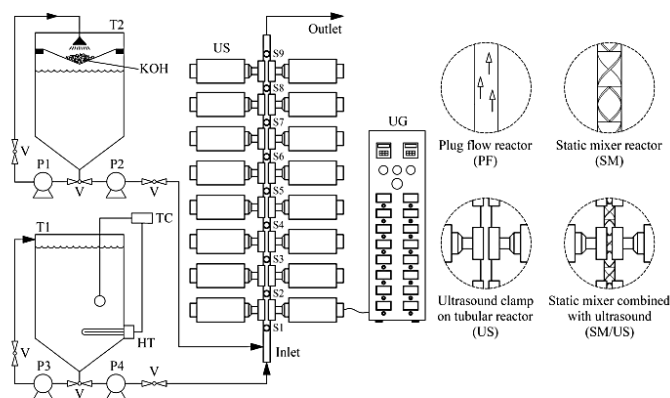


Fig. 1. Schematic diagram of the experiment setup. (T1: RPO tank, T2: potassium methoxide tank, HT: submerged heater, V: valve, P1: CH<sub>3</sub>KO circulating pump, P2: CH<sub>3</sub>KO continuous pump, P3: RPO circulating pump, P4: RPO continuous pump, TC: temperature control, US: ultrasound clamp on tubular reactor, UG: ultrasonic generator, and S1–S9: sampling port)

Table 2  
Various applications of four continuous reactors.

Application	Type of reactor			
	PF	SM	US	SM/US
Empty tube	Used	Used	Used	Used
Mixing element	–	Used	–	Used
Ultrasound clamp	–	–	Used	Used

PF: plug flow reactor, SM: static mixer reactor, US: ultrasound clamp on tubular reactor, and SM/US: static mixer integrated with ultrasound.

Table 3  
The fatty acid profile in RPO determined by gas chromatography.

Common name	Fatty acid	Content (wt.%)
Caprylic acid	C8:0	0.0098
Capric acid	C10:0	0.0143
Lauric acid	C12:0	0.1739
Myristic acid	C14:0	0.8115
Pentadecanoic acid	C15:0	0.0437
Palmitic acid	C16:0	36.3805
Palmitoleic acid	C16:1	0.2193
Heptadecanoic acid	C17:0	0.0953
Stearic acid	C18:0	4.0752
Oleic acid	C18:1	45.7495
Linoleic acid	C18:2	10.7325
Alpha linolenic acid	C18:3	0.2068
Arachidic acid	C20:0	0.3703
Paullinic acid	C20:1	0.1994
Behenic acid	C22:0	0.0760
Lignoceric acid	C24:0	0.0735

### 2.3. Ultrasound clamp on a tubular reactor

To apply power ultrasound (US) to biodiesel production from RPO, the ultrasonic tubular reactor had 16 units of ultrasound clamps attached. Each clamp was operated at fixed frequency of 20 kHz with maximally 400 W power in this study. The ultrasound clamps were fixed in sequence along the length of the reactor at locations 100 mm apart. The clamp acted as an adapter and booster increasing the ultrasonic power from the ultrasonic horn. The aluminum alloy ultrasound clamps were 65 mm in length, 20 mm in height, and 3 mm wide. The ultrasonic power was maximally

16 × 400 W as input from an ultrasonic generator to the ultrasound clamps, for a sum total of 6400 W at full power. Acoustic energy density (AED) is defined as the ultrasonic power ( $P_{US}$ ) divided by the total volume of the mixture ( $V_{total}$ ), as expressed in Eq. (2) [7]. In the US reactor, the 250 mL reaction mixture was treated with an acoustic energy density of 25.6 W mL<sup>-1</sup> at the full ultrasonic power (16 × 400 W). Thus, maintaining the AED at 25.6 W mL<sup>-1</sup> is the relevant condition for scale-up.

$$AED = \frac{P_{US}}{V_{total}} \quad (2)$$

where AED is the acoustic energy density,  $P_{US}$  is the ultrasonic power (W), and  $V_{total}$  is the total volume of the mixture (mL).

### 2.4. Procedures

In all experiments the 15 L of RPO was preheated to 60 °C by a 500 W submerged heater in the RPO tank. The RPO was concurrently circulated by the RPO circulating pump (model PMD-371 of Sanso) to maintain its thermostat controlled temperature. A digital dosing pump (model DME 48–3 of Grundfos allidos) was used to feed the RPO at 20 L h<sup>-1</sup> flow rate. From Eq. (1), the Reynolds number ( $Re$ ) is equal to 26 based on the properties of RPO at 60 °C (see Table 1) at 20 L h<sup>-1</sup> flow rate, so the flow of RPO in the tube was laminar. As experimental manipulated parameters, the base catalyst was varied from 4 to 12 g L<sup>-1</sup> with increments of 2 g L<sup>-1</sup>, and 100 to 900 mm reactor lengths were studied, to investigate the methyl ester purities for biodiesel production from RPO. The methanol content was fixed at 20 vol.% or 1:4.4 M ratio of RPO to methanol. To prepare potassium methoxide (CH<sub>3</sub>KO) as the base

catalyst, potassium hydroxide (KOH) was pre-dissolved in methanol for each experiment to obtain the required concentration of  $\text{CH}_3\text{KO}$  solution. Before preparing  $\text{CH}_3\text{KO}$  solution, the FFA in RPO was checked by titration. KOH was dissolved in distilled water to prepare the titrant solution. The titration measured the FFA content in oil for determining the amount of KOH required to neutralize the RPO. Thus, the RPO was titrated with KOH solution until the titration end point. The acidity of RPO was neutralized by the required amount of KOH per liter of oil ( $\text{g L}^{-1}$ ) obtained by titration. Subsequently, the amount of KOH to neutralize and to catalyze was mixed with methanol to prepare a solution of potassium methoxide ( $\text{CH}_3\text{OK}$ ). The solution of  $\text{CH}_3\text{KO}$  was continuously fed into the reactor by Grundfos allidos digital dosing pumps (model DMS 12–3). When an experiment began, all the digital dosing pumps were turned on so that RPO and potassium methoxide solution were continuously fed into the continuous reactor. Approximately 30 mL samples were taken at 100–900 mm along length of the reactor, at sampling ports S1–S9 shown in Fig. 1. The samples were quickly cooled with  $0^\circ\text{C}$  water to stop the reaction. All samples were then washed by warm water to remove residual impurities such as methanol and glycerol in the crude biodiesel. The contents of ester, TG, DG, MG, and FFA in the purified biodiesel were obtained using a TLC/FID analyzer.

### 3. Results and discussion

#### 3.1. Comparison of PF, SM, US, and SM/US

Preliminary comparison of the PF, SM, US, and SM/US reactors in continuous methyl ester production was carried out with 4 or  $12 \text{ g L}^{-1}$  KOH and 20 vol.% methanol, assessing the purity of methyl ester. Fig. 2 shows the purity of methyl ester versus reactor length for the various reactors. The purity of methyl ester with US reactor was similar to that with SM/US reactor, for cases with  $4 \text{ g L}^{-1}$  KOH (Fig. 2a), which its purity increased with reaction time and along the reactor length in all cases. When the amount of KOH was increased from 4 to  $12 \text{ g L}^{-1}$ , the purity of methyl ester sharply increased at 100 mm location in the reactor, and reached equilibrium after 300 mm length in SM, US, and SM/US reactors (Fig. 2b). The 100 mm location in reactor approximately equals 4.3 s residence time, based on the  $20 \text{ L h}^{-1}$  RPO flow rate. With 20 vol.% methanol and  $4 \text{ g L}^{-1}$  KOH, the maximum purity of methyl esters was 33.67 wt.%, 41.65 wt.%, 93.34 wt.%, and 90.98 wt.%, achieved at the length-wise location 900 mm for PF, 900 mm for SM, 800 mm for US, and 900 mm for SM/US, respectively. Thus, a 177% improvement in ester purity was obtained by using the US reactor instead of the PF reactor. For  $12 \text{ g L}^{-1}$  KOH, the maximum purity of methyl ester was 81.99 wt.%, 95.70 wt.%, 98.98 wt.%, and 97.67 wt.% achieved at the length-wise location 900 mm for PF, 900 mm for SM, 700 mm for US, and 900 mm for SM/US, respectively. The results in Fig. 2 show that increasing the amount of KOH impacted for the methyl ester purities with all reactor types. The PF reactor could not convert the glycerides in RPO to more than 82 wt.% content of ester, regardless of the amount of KOH. Thus, the PF reactor was less effective than the other continuous reactors in producing biodiesel with short reaction times when compared in terms of purity of methyl ester. Meanwhile, the maximum purity of esters was achieved by the US reactor, with 4 or with  $12 \text{ g L}^{-1}$  KOH. The sonication improved mass transfer between the liquid phases by emulsification, as described in the introduction [19,20]. Our experimental results with the ultrasound directly irradiated into the US reactor confirm this effect. The SM/US gave almost similar trend line of ester conversion as the US reactor. The ultrasonic irradiation from the ultrasound clamps may be scattered and absorbed by the static mixing elements in the tube. The

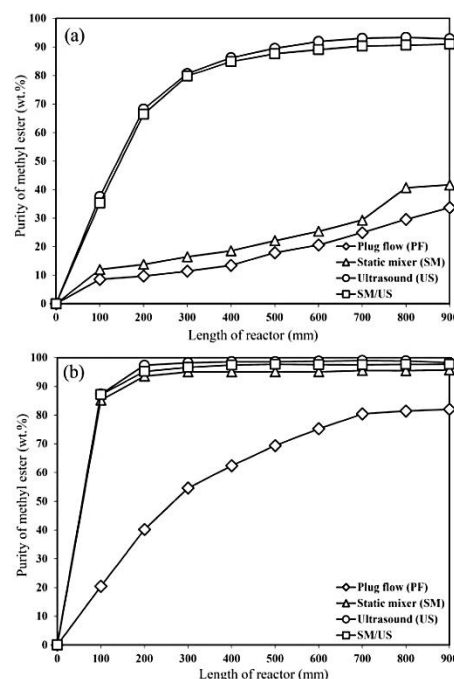


Fig. 2. Comparison of methyl ester purity of transesterification process using PF, SM, US, and SM/US under the condition: 20 vol.% of methanol with (a)  $4 \text{ g L}^{-1}$  of KOH, and (b)  $12 \text{ g L}^{-1}$  of KOH, at  $20 \text{ L h}^{-1}$  RPO flow rate, and  $60^\circ\text{C}$  temperature.

effects of KOH (4, 6, 8, 10, and  $12 \text{ g L}^{-1}$ ) with 20 vol.% methanol on the purity of methyl ester is reported and discussed in the next section

#### 3.2. Effects of various KOH loading on purity of methyl esters

The effects of base catalyst on the purity of methyl ester with 20 vol.% methanol were investigated at the KOH concentrations of 4, 6, 8, 10, and  $12 \text{ g L}^{-1}$  for PF reactor (Fig. 3), SM reactor (Fig. 4), US reactor (Fig. 5), and SM/US reactor (Fig. 6). All reactors were operated under  $20 \text{ L h}^{-1}$  RPO flow rate at  $60^\circ\text{C}$  temperature. The results for PF reactor indicate that the purity of methyl ester slowly increased during flow through 100 mm length at the beginning reaction in the reactor. As a result, the purity of methyl ester was low at 33.67 wt.% or 37.58 wt.% with 4 or  $6 \text{ g L}^{-1}$  of KOH, respectively. However, the purity of methyl ester sharply increased to 66.70, 74.34, and 81.99 wt.% when the KOH catalyst loading increased to 8, 10, and  $12 \text{ g L}^{-1}$ , at 900 mm length-wise location. Because transesterification is a stepwise process with reversible reactions, increasing the KOH loading is used to drive the reaction forward and increase the purity of methyl ester. At any tested the amount of KOH, the trend for PF reactor shows no final stable for the methyl ester purities at end of the 900 mm reactor. Therefore, the methyl ester purity could be further increased by using a longer tube reactor. The 81.99 wt.% maximum observed purity of the methyl ester was achieved with  $12 \text{ g L}^{-1}$  of KOH and 20 vol.%

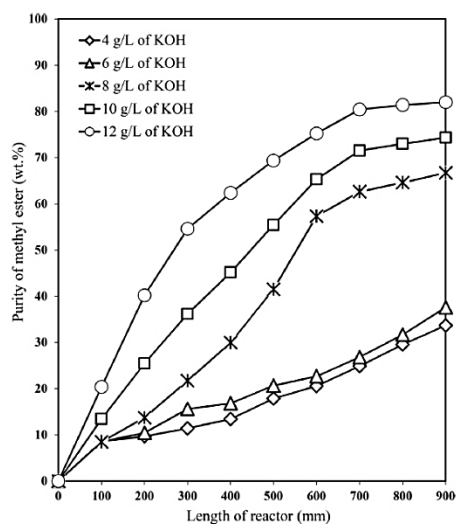


Fig. 3. Effect of the amount of KOH ( $\text{g L}^{-1}$ ) on purity of methyl ester in the presence of 20 vol.% methanol using the plug flow reactor (PF), at  $20 \text{ L h}^{-1}$  RPO flow rate, and  $60^\circ \text{C}$  temperature.

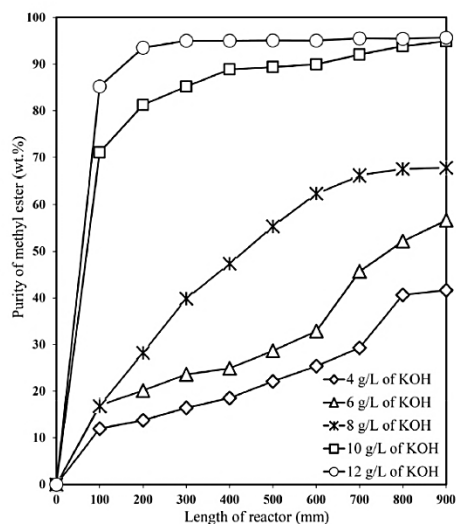


Fig. 4. Effect of the amount of KOH ( $\text{g L}^{-1}$ ) on purity of methyl ester in the presence of 20 vol.% methanol using the static mixer reactor (SM), at  $20 \text{ L h}^{-1}$  RPO flow rate, and  $60^\circ \text{C}$  temperature.

methanol. The ester purity increased by 143.5% as the KOH catalyst dose was increased from  $4 \text{ g L}^{-1}$  to  $12 \text{ g L}^{-1}$  while using the PF reactor.

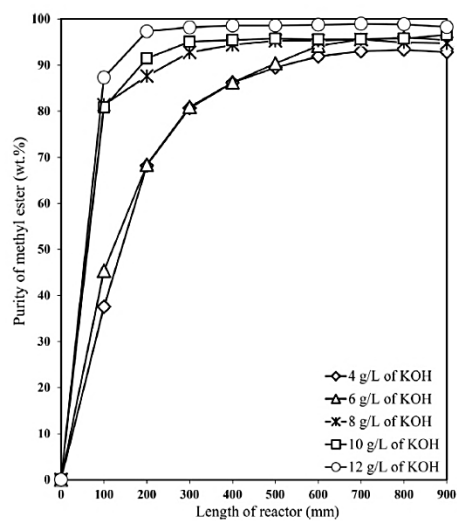


Fig. 5. Effect of the amount of KOH ( $\text{g L}^{-1}$ ) on purity of methyl ester in the presence of 20 vol.% methanol using the ultrasound clamp on tubular reactor (US), at  $20 \text{ L h}^{-1}$  RPO flow rate, and  $60^\circ \text{C}$  temperature.

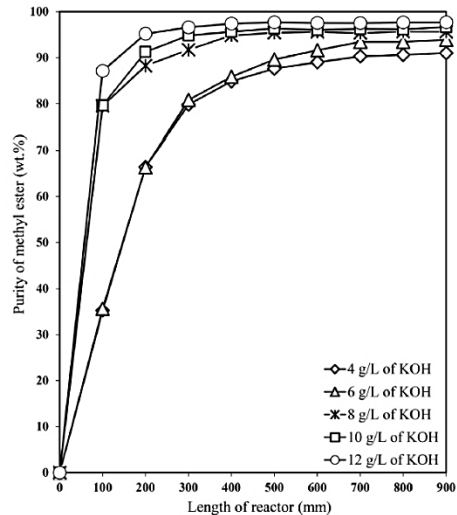


Fig. 6. Effect of the amount of KOH ( $\text{g L}^{-1}$ ) on purity of methyl ester in the presence of 20 vol.% methanol using the static mixer integrated with ultrasound reactor (SM/US), at  $20 \text{ L h}^{-1}$  RPO flow rate, and  $60^\circ \text{C}$  temperature.

Fig. 4 shows the influence of the amount of KOH on the purity of methyl ester from transesterification along the static mixer reactor (SM). Direct comparison of methyl ester profiles in the SM reactor



and the PF reactor indicates that mixing elements in the tube improved the methyl ester purity. For example, the ester purity sharply increased to over 85 wt.% at 100 mm location, and it reached equilibrium level at 300 mm with  $12 \text{ g L}^{-1}$  KOH in the SM reactor. But, the PF reactor did not convert the glycerides in RPO to over 82 wt.% purity at any operating condition. With  $12 \text{ g L}^{-1}$  of KOH, the methyl ester reached its equilibrium level after 300 mm in the SM reactor. The 300 mm location in reactor approximately equals 13 s average residence time, based on the  $20 \text{ L h}^{-1}$  RPO flow rate. The purities of methyl ester did not increase past 70 wt.% when KOH catalyst loading was less than  $8 \text{ g L}^{-1}$  in the SM reactor. The maximum purity of methyl ester was 41.65 wt.%, 56.65 wt.%, 67.75 wt.%, 94.93 wt.%, and 95.70 wt.% at KOH catalyst loading  $4 \text{ g L}^{-1}$  (at 900 mm),  $6 \text{ g L}^{-1}$  (at 900 mm),  $8 \text{ g L}^{-1}$  (at 900 mm),  $10 \text{ g L}^{-1}$  (at 900), and  $12 \text{ g L}^{-1}$  of KOH (at 900 mm), respectively. On comparing the maximum purities of methyl ester, the improvement by SM reactor over PF was 23.7%, 50.8%, 1.6%, 27.7%, and 16.7% with the catalyst loadings 4, 6, 8, 10, and  $12 \text{ g L}^{-1}$ , respectively. A higher catalyst loading can both shift the reaction equilibrium and shorten the reaction time.

Fig. 5 shows the methyl ester purity profiles when using the ultrasound clamps on tubular reactor (US reactor) and 20 vol.% methanol, and 4, 6, 8, 10, and  $12 \text{ g L}^{-1}$  KOH. The US reactor was designed to demonstrate sonochemical effects on transesterification reactions with the base catalyst. The methyl ester purity profiles in Fig. 5 clearly depend on the amount of KOH. The purity of methyl ester increased along the whole reactor as KOH loading changed from 4 to  $6 \text{ g L}^{-1}$ . The purities methyl esters were to 93.34 wt.%, 96.00 wt.%, 95.60 wt.%, 96.58 wt.%, and 98.98 wt.% with KOH loadings  $4 \text{ g L}^{-1}$  (at 800 mm),  $6 \text{ g L}^{-1}$  (at 800 mm),  $8 \text{ g L}^{-1}$  (at 700 mm),  $10 \text{ g L}^{-1}$  (at 900 mm), and  $12 \text{ g L}^{-1}$  (at 700 mm), respectively. A 6% increase in ester purity was obtained with catalyst increase from  $4 \text{ g L}^{-1}$  to  $12 \text{ g L}^{-1}$  when using the ultrasound clamps on tubular reactor. The additional increase in conversion was only slight because sonication already gave high conversion. Moreover, the improvements over PF reactor in ester purity were 177.2%, 155.5%, 43.3%, 29.9%, and 20.7% at the amount of KOH 4, 6, 8, 10, and  $12 \text{ g L}^{-1}$ , respectively. With  $12 \text{ g L}^{-1}$  KOH and 20 vol.% methanol, the conversion of glycerides in RPO gave the maximal ester purity, in which case the conversion equilibrium was approached around 300 mm reactor length. Notice that the methyl ester purity decreased after 800 mm reactor length, which may indicate reactions reverse to transesterification.

Fig. 6 shows the influence of the amount of KOH on the purity profile of methyl ester in the SM/US reactor using static mixing combined with sonication. Direct comparison of methyl ester profiles in the SM/US reactor and the US reactor indicates that static mixing did not improve the results from those with only ultrasound clamps. In Fig. 6, the purity of methyl ester sharply increased after 100 mm reactor length at the KOH of 8, 10, and  $12 \text{ g L}^{-1}$ . Subsequently, the conversion reached equilibrium around 500 mm reactor length. However, the conversion of methyl ester increased as the amount of KOH was raised further. As the ester purity was 90.98 wt.%, 93.86 wt.%, 95.64 wt.%, 96.62 wt.%, and 97.67 wt.% with KOH catalyst loadings  $4 \text{ g L}^{-1}$  (at 900 mm),  $6 \text{ g L}^{-1}$  (at 900 mm),  $8 \text{ g L}^{-1}$  (at 800 mm),  $10 \text{ g L}^{-1}$  (at 900), and  $12 \text{ g L}^{-1}$  of KOH (at 900 mm), respectively. A 7.4% increase in ester purity was obtained as the catalyst dose increased from  $4 \text{ g L}^{-1}$  to  $12 \text{ g L}^{-1}$  with the SM/US reactor. The results indicate that methyl ester production with the SM/US reactor was less effective than with the US reactor. Possibly the static mixing elements decreased the performance of ultrasonic irradiation from the clamps. The cavitation energy from ultrasonic clamps is absorbed by the liquid and the catalyst in the tube, and Fayyazi et al. [21] studied the effects of ultrasonic power, horn diameter and horn height on the amount of

energy absorbed by the liquid in reactor. Acoustic cavitation energy from ultrasound source can be absorbed by solvents and heterogeneous systems [22]. In this study, the mixture of RPO and  $\text{CH}_3\text{OK}$  solution in the tube absorbed the ultrasound energy from ultrasonic clamp. In the SM/US reactor its solid parts, the static mixing elements, may also have absorbed ultrasonic irradiation, causing methyl ester production to be less effective than in the US reactor when the cavitation energy was partially scattered and absorbed by the mixing elements. For instance, Soong et al. [23] reported that when an acoustic wave strikes the boundary between two different phases (liquid and solid), some acoustic energy will be absorbed, reflected, and transmitted through the solid part. The amplitude of the sound wave is also reduced when solids are present since the wave is partially scattered and absorbed. Thus, the amplitude of ultrasonic waves is decreased by the solid parts during ultrasonic processing [23]. The cavitation energy from piezoelectric transducers is absorbed by the immersed parts in an ultrasonic bath [24], so the basket in an ultrasonic bath should not have flat solid surfaces that absorb the sound and decrease the performance of cavitation: the basket should be made from round rods [25].

### 3.3. Discussion of mixing technologies for biodiesel production

In this study, four types of continuous reactors: plug flow reactor (PF), static mixer reactor (SM), ultrasound clamp on tubular reactor (US), and static mixer combined with ultrasound (SM/US) were tested for the purity of methyl ester in biodiesel production from refined palm oil (RPO). The results showed that the US reactor was superior over the other reactor types tested. The ester conversion sharply increased and gave the highest observed 98.98 wt.% purity ester within 700 mm reactor length (approximately 30 s residence time) when  $12 \text{ g L}^{-1}$  KOH and 20 vol.% methanol were used. Moreover, combining static mixer elements with the ultrasound clamps was less effective than sonication alone. Apparently, ultrasonic irradiation from the ultrasonic clamp is partially scattered and absorbed by static mixing elements in the tube reactor. When the amount of KOH was at its lowest tested ( $4 \text{ g L}^{-1}$ ), the US reactor reached ester purity in excess of 91 wt.% at 600 mm reactor length. The other reactor types PF, SM, and SM/US did not reach this conversion level of glycerides in RPO even with the full reactor length available. The  $16 \times 400 \text{ W}$  ultrasound clamps were operated at 20 kHz frequency, and the US type reactor was the most effective alternative with short reactor lengths. The maximum ester purities reached were 33.67 wt.% for PF, 41.65 wt.% for SM, 93.34 wt.% for US, and 90.98 wt.% for SM/US with  $4 \text{ g L}^{-1}$  KOH and 20 vol.% methanol, at 900 mm, 900 mm, 800 mm, and 900 mm reactor lengths, respectively. With the higher  $12 \text{ g L}^{-1}$  KOH base catalyst loading, the maximal ester purities were 81.99 wt.% for PF, 95.70 wt.% for SM, 98.98 wt.% for US, and 97.67 wt.% for SM/US, achieved at 900 mm, 900 mm, 700 mm, and 900 mm reactor lengths, respectively. However, increasing the base catalyst loading may cause soap formation when the product is washed by water to eliminate residual catalyst, in the biodiesel purification process. Therefore high catalyst amounts may not be environmentally acceptable, due to soap formation [26]. Moreover, serious saponification can also reduce the yield of purified biodiesel [27].

### 3.4. Energy consumption for continuous process

In the evaluation of energy consumption by the continuous conversion process, the  $16 \times 400 \text{ W}$  ultrasound clamp (US) was operated at 20 kHz frequency to produce high purity methyl ester from RPO at  $20 \text{ L h}^{-1}$  flow rate. The total electricity consumption by the

**Table 4**  
Average electricity consumption in the continuous process.

Processing stage	Electricity (kW h)
Preheating RPO	
- 15 L of RPO was preheated to 60 °C within 20 min	0.28
For PF, SM, US, and US/SM during the process	
- Maintain the temperature of RPO	0.10
- Two continuous flow pumps: RPO <sup>a</sup> , and CH <sub>3</sub> OK	0.089
For US, and US/SM during the process	
- 6400 W <sup>b</sup> at full ultrasonic power of ultrasound clamps	1.364
- 2400 W <sup>c</sup> ultrasound clamps	0.512
Total average electricity during the process	
- For PF, and SM	0.189
- For US, and US/SM (for 6400 W and 2400 W)	1.553 and 0.701

<sup>a</sup> The 20 L h<sup>-1</sup> RPO flow rate was controlled by a continuous flow pump.

<sup>b</sup> The full ultrasonic power was 16 × 400 W (6400 W) input to the ultrasound clamps.

<sup>c</sup> The ultrasonic power input 6 × 400 W (2400 W) was sufficient to reach equilibrium methyl ester purity.

process overall was measured by an electric power meter, as shown in Table 4. Approximately 15 L of RPO was preheated and maintained at 60 °C within 20 min, using an immersion heater and a circulating pump, to preheat the RPO for the reactions. After this, RPO and CH<sub>3</sub>OK were fed into the continuous reactor of 1000 mm length at predetermined ratio, by two continuous flow pumps. The PF and SM reactors had total electricity consumption 0.189 kW h. The US and SM/US reactors had total electricity consumption 1.553 kW h at full ultrasonic power (excluding the preheating of RPO). Notice in the US reactor (see Fig. 5) the ultrasonic power 6 × 400 W (2400 W) was sufficient to obtain equilibrium in methyl ester purity within 300 mm of the US reactor. Thus, the total electricity consumption in US and SM/US at 2400 W ultrasonic power was 0.701 kW h. As a result, the electricity consumption can be greatly reduced while only a low amount of KOH was used. The average energy consumption in continuous biodiesel production from 20 L h<sup>-1</sup> by the US reactor was 0.035 kW h L<sup>-1</sup> of RPO with 2400 W power input to sonication.

#### 4. Conclusions

The 16 × 400 W ultrasound clamp was operated at 20 kHz frequency, and among short length reactors the US case was more effective than PF, SM, or SM/US. The ultrasound clamp on tubular reactor (US) was clearly superior over the other types of continuous reactor. This type reactor was superior to the other types of continuous reactors (PF, SM, SM/US) and with potential to save in KOH consumption. Further studies may focus on effects of methanol content and reactor length on purity of methyl ester, to produce high purity ester with low consumption of methanol and KOH in a tubular reactor with sonication.

#### Acknowledgments

This work was supported by the Energy Policy and Planning Office of Thailand (EPPPO), by the Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, and by National Research Council of Thailand (NRCT) under Development of Alternative Energy and Its Applications in Green Communities project that provided research funding. Special thanks go to a lecturer Assoc. Prof. Seppo Karrila, Ph.D. for reviewing and correcting the English of this paper.

#### References

- [1] Boffito DC, Mansi S, Leveque J-M, Pirola C, Bianchi CL, Patience GS. Ultrafast biodiesel production using ultrasound in batch and continuous reactors. *ACS Sustain Chem Eng* 2013;1:1432–9.
- [2] Cárdenas MD, Armas O, Mata C, Soto F. Performance and pollutant emissions from transient operation of a common rail diesel engine fueled with different biodiesel fuels. *Fuel* 2016;185:743–62.
- [3] Somnuk K, Smithmaitrie P, Prateepchaikul G. Feasibility of using ultrasound-assisted biodiesel production from degummed-deacidified mixed crude palm oil using small-scale circulation. *Kasetsart J (Nat Sci)* 2012;46:662–9.
- [4] Kumar A, Shukla SK, Tierkey JV. A review of research and policy on using different biodiesel oils as fuel for C.I. engine. *Energy Procedia* 2016;90:292–304.
- [5] Delavari A, Halek F, Amini M. Continuous biodiesel production in a helicoidal reactor using ultrasound-assisted transesterification reaction of waste cooking oil. *Clean Technol Environ Policy* 2015;17:273–9.
- [6] Maulidiyah, Nurdin M, Fatma F, Natsir M, Wibowo D. Characterization of methyl ester compound of biodiesel from industrial liquid waste of crude palm oil processing. *Anal Chem Res* 2017;12:1–9.
- [7] Somnuk K, Smithmaitrie P, Prateepchaikul G. 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 Convers Manage* 2013;75:302–10.
- [8] Sungwornpatansakul P, Hiroi J, Nigahara Y, Jayasinghe TK, Yoshikawa K. Enhancement of biodiesel production reaction employing the static mixing. *Fuel Process Technol* 2013;116:1–8.
- [9] Likozar B, Pohar A, Levec J. Transesterification of oil to biodiesel in a continuous tubular reactor with static mixers: modelling reaction kinetics, mass transfer, scale-up and optimization considering fatty acid composition. *Fuel Process Technol* 2016;142:326–36.
- [10] Likozar B, Levec J. Effect of process conditions on equilibrium, reaction kinetics and mass transfer for triglyceride transesterification to biodiesel: experimental and modeling based on fatty acid composition. *Fuel Process Technol* 2014;122:30–41.
- [11] Choedkiatsakul I, Ngaosuwan K, Cravotto G, Assabumrungrat S. Biodiesel production from palm oil using combined mechanical stirred and ultrasonic reactor. *Ultrason Sonochem* 2014;21:1585–91.
- [12] Yin X, Duan X, You Q, Dai C, Tan Z, Zhu X. Biodiesel production from soybean oil deodorizer distillate using calcined duck eggshell as catalyst. *Energy Convers Manage* 2016;112:199–207.
- [13] Mostafaei M, Ghobadian B, Barzegar M, Banakar A. Optimization of ultrasonic assisted continuous production of biodiesel using response surface methodology. *Ultrason Sonochem* 2015;27:54–61.
- [14] Gole VL, Gogate PR. A review on intensification of synthesis of biodiesel from sustainable feed stock using sonochemical reactors. *Chem Eng Process* 2012;53:1–9.
- [15] He B, Gerpen JHV. Application of ultrasonication in transesterification processes for biodiesel production. *Biofuels* 2012;3:479–88.
- [16] Martínez-Guerra E, Gude VG. Continuous and pulse sonication effects on transesterification of used vegetable oil. *Energy Convers Manage* 2015;96:268–76.
- [17] Gude VG, Grant GE. Biodiesel from waste cooking oils via direct sonication. *Appl Energy* 2013;109:135–44.
- [18] Somnuk K, Wijitsopa K, Prateepchaikul G. Optimization of the comparative continuous process of ethyl and methyl ester productions using a static mixer reactor: a response surface methodology approach. *Biofuels* 2016. <http://dx.doi.org/10.1080/17597269.2016.1266237>.
- [19] Mason TJ. *Sonochemistry: the use of ultrasound in chemistry*. New York: Oxford University Press; 1999.
- [20] Worapun I, Pianthong K, Thaiyasut P. Optimization of biodiesel production from crude palm oil using ultrasonic irradiation assistance and response surface methodology. *J Chem Technol Biot* 2012;87:189–97.
- [21] Fayyazi E, Ghobadian B, Najafi G, Hosseinzadeh B, Montazeri M. Modelling and evaluation of some effective parameters on reactor design for optimized utilization of ultrasonic waves. *Elxir Mech Eng* 2012;49:9734–8.
- [22] Luo J, Fang Z, Smith Jr RL. Ultrasound-enhanced conversion of biomass to biofuels. *Prog Energy Combust* 2014;41:56–93.
- [23] Soong Y, Gamwo JK, Blackwell AG, Harke FW, Ladner EP. Ultrasonic characterizations of slurries in a bubble column reactor. *Ind Eng Chem Res* 1999;38:2137–43.
- [24] Enhance your cleaning process with ultrasonics; 2000. <<http://www.pfonline.com/articles/enhance-your-cleaning-process-with-ultrasonics/>> [accessed 15.02.17].
- [25] Ultrasonic Cleaners for a solvent-free world; 2015. <<http://www.automation.com/automation-news/article/ultrasonic-cleaners-for-a-solvent-free-world/>> [accessed 15.02.17].
- [26] Abbaszadeh A, Ghobadian B, Omidkhah MR, Najafi G. Current biodiesel production technologies: a comparative review. *Energy Convers Manage* 2012;63:138–48.
- [27] Ofoefule AU, Ibeti CN, Ugwuamoke IE. Determination of optimum catalyst concentration for biodiesel yield from coconut (*Cocos nucifera*) oil. *Int Res J Pure Appl Chem* 2013;3:357–65.

เอกสารเผยแพร่ผลงานทางวิชาการที่ 2

บทความวิจัย

ทงศักดิ์ ประสิทธิ์ และ กฤษ สมนึก. 2017. กระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากกรดไขมันปาล์มแบบ  
หมุนวนด้วยท่อผสมแบบสวิตซ์ชนิดขดเกลียว. วารสารวิจัยเทคโนโลยีนวัตกรรม. ปีที่ 1. ฉบับที่ 1  
หน้า 99-108

กระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากกรดไขมันปาล์มแบบหมุนวน  
 ด้วยท่อผสมแบบสถิตชนิดขดเกลียว

 ทนงศักดิ์ ประสิทธิ์<sup>1</sup> และ กฤษ สมนึก<sup>2</sup>

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

รับเมื่อ 8 กุมภาพันธ์ 2560 ดอรับเมื่อ 29 มิถุนายน 2560 เผยแพร่ออนไลน์ 1 กรกฎาคม 2560

© 2017 Rajamangala University of Technology Lanna. All Rights Reserved.

บทความวิจัย

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำกรดไขมันปาล์ม (Palm Fatty Acid Distillate, PFAD) ที่มีค่าความเป็นกรดสูงมาเป็นวัตถุดิบหลัก ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากกรดไขมันปาล์มแบบหมุนวนด้วยท่อผสมแบบสถิตชนิดขดเกลียวกรดไขมันปาล์มเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์จากน้ำมันปาล์มดิบซึ่งมีราคาถูกและไม่ได้ถูกนำมาใช้ผลิตอาหาร อุปกรณ์ที่สำคัญที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้คือ ท่อผสมแบบสถิตชนิดขดเกลียวเพื่อประยุกต์ใช้กับปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยากรด โดยมีตัวแปรที่ศึกษาคือ ปริมาณเมทานอล (ร้อยละ 60 wt, 80 wt และ 100 wt) ปริมาณกรดซัลฟิวริก (ร้อยละ 5 wt, 10 wt และ 15 wt) และเวลาในการทำปฏิกิริยา (10-90 min) ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60°C จากผลการทดลองพบว่า ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันสามารถลดค่าความเป็นกรดของกรดไขมันปาล์มจาก 265 mgKOH.g<sup>-1</sup> ให้มีค่าน้อยกว่า 1.97 mgKOH.g<sup>-1</sup> ด้วยท่อผสมแบบสถิตชนิดขดเกลียวที่เงื่อนไขแนะนำคือ ปริมาณเมทานอลร้อยละ 100 wt ปริมาณกรดซัลฟิวริกร้อยละ 15 wt และเวลาทำปฏิกิริยา 20 min ดังนั้นท่อผสมแบบสถิตชนิดขดเกลียวสามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อในการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันขั้นตอนเดียว

คำหลัก : ไบโอดีเซล กรดไขมันปาล์ม ท่อผสมชนิดขดเกลียว ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

\*Corresponding author : krit.s@psu.ac.th โทรศัพท์ 074 287227 โทรสาร 074 558830

1 นักศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

2 อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล



---

## Circulation Biodiesel Production Process from Palm Fatty Acid Distillate Using Helical Static Mixer

Tanongsak Prasit<sup>1</sup> and Krit Somnuk<sup>2\*</sup>

*Faculty of Engineering, Songkla University.*

Received 8 February 2017; accepted 29 June 2017; published online 1 July 2017

© 2017 Rajamangala University of Technology Lanna. All Rights Reserved.

---

Research Article

### Abstract

In this study, the high free fatty acid palm fatty acid distillate (PFAD) was used as a raw material for circulation biodiesel production process by using the helical static mixer. The PFAD is a by-product from the physical refining of crude palm oil (CPO), which is a low market value and non-edible grade. The key part of this study is a helical static mixer, which was applied in the circulation process of acid-catalyzed esterification. Three parameters: methanol (60 wt%, 80 wt%, and 100 w.%), sulfuric acid (5 wt%, 10 wt%, and 15 wt%), reaction time (10-90 min), and reaction temperature (60°C) were studied. The results showed that 265 mgKOH.g<sup>-1</sup> of acid value in PFAD can be reduced to less than 1.97 mgKOH.g<sup>-1</sup> under the recommended condition: 100 wt% methanol, 15 wt% sulfuric acid, and 20 min reaction time at 60°C. Consequently, the helical static mixer can be applied to produce the biodiesel from PFAD in the circulation process of acid-catalyzed esterification.

**Keywords :** biodiesel; palm fatty acid distillate; helical static mixer; esterification reaction

---

\*Corresponding author : krit.s@psu.ac.th Tel 074 287227 Fax 074 558830

1. Master Degree, Department of Mechanical Engineering.

2. Lecturer, Department of Mechanical Engineering.



## 1. บทนำ

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน ได้จัดทำแผนพัฒนาพลังงาน ทดแทน และพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558 - 2579 เพื่อให้ความสำคัญในการส่งเสริมการผลิตพลังงานจากวัตถุดิบพลังงานทดแทนที่มีอยู่ภายในประเทศให้ได้เต็มศักยภาพ การพัฒนาศักยภาพการผลิตพลังงานทดแทนด้วยเทคโนโลยีที่มีความเหมาะสม และการพัฒนาพลังงานทดแทนเพื่อผลประโยชน์ร่วมกันในมิติด้านสังคมและสิ่งแวดล้อมแก่ชุมชน [1] การศึกษาและวิจัยทางด้านไบโอดีเซลก็เป็นอีกหนทางเลือกที่สำคัญที่ช่วยผลักดันและพัฒนาศักยภาพด้านพลังงานทดแทนของไทย ทั้งนี้ ไบโอดีเซลยังเป็นพลังงานสะอาดที่สามารถใช้ทดแทนเชื้อเพลิงดีเซลได้โดยไม่ต้องปรับแต่งเครื่องยนต์ [2 – 3] และสามารถผลิตได้จากพลังงานทรัพยากรที่มีอยู่ในประเทศ ซึ่งผลิตจากน้ำมันพืชและไขมันสัตว์ [4]

ในปี พ.ศ. 2558 ประเทศไทยสามารถผลิตน้ำมันปาล์มได้เป็นอันดับสามของประเทศในแถบภูมิภาคอาเซียน รองจากประเทศอินโดนีเซีย และมาเลเซีย ซึ่งสามารถผลิตได้ถึง 55.7 ล้านตัน [5] โดยทั่วไปการผลิตไบโอดีเซลจะใช้น้ำมันปาล์มเป็นวัตถุดิบหลัก แต่เนื่องจากน้ำมันปาล์มเป็นน้ำมันบริโภคหากนำมาผลิตเป็นไบโอดีเซลมากเกินไปจะทำให้ตลาดน้ำมัน เกิดการขาดแคลน ดังเช่นในปี พ.ศ. 2553 - 2554 จนต้องทำให้มีการนำเข้าน้ำมันปาล์มจากประเทศมาเลเซีย [6] ทีมวิจัยจึงใช้ผลพลอยได้จากกระบวนการกลั่นบริสุทธิ์น้ำมันปาล์มคือ กรดไขมันปาล์ม (PFAD) ซึ่งไม่ได้นำมาใช้เพื่อบริโภคและมีราคาต่ำกว่าน้ำมันปาล์มดิบ โดยทั่วไป PFAD จะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมผลิตสบู่ [7] แต่เนื่องจาก PFAD มีปริมาณกรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid, FFA) สูงมากกว่าร้อยละ 90 wt หรือค่าความเป็นกรด (Acid Value, AV)

เท่ากับ  $265 \text{ mgKOH.g}^{-1}$  จึงจำเป็นต้องใช้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อลดค่าความเป็นกรด (AV) ให้มีค่าน้อยกว่า  $2 \text{ mgKOH.g}^{-1}$  ก่อนไปทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อผลิตไบโอดีเซลที่มีค่าความบริสุทธิ์สูงในขั้นตอนต่อไป [8]

อุปกรณ์ผสมที่สำคัญที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้คือ ท่อผสมแบบสถิตชนิดขดเกลียว เนื่องจากท่อผสมแบบสถิตมีประสิทธิภาพในการผสมสารตั้งต้นได้ดีกว่าวิธีโดยทั่วไป สามารถช่วยลดเวลาในการทำปฏิกิริยาลดปริมาณการใช้สารเคมี ลดขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ และได้ปริมาณผลได้ที่สูง [9 – 11] ซึ่งทีมวิจัยได้ใช้ท่อผสมแบบสถิตชนิดขดเกลียว (Helical Static Mixer) เพื่อประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากกรดไขมันปาล์มด้วยระบบหมุนวนสารเคมีและวัตถุดิบ

## 2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตไบโอดีเซลจากกรดไขมันปาล์มด้วยท่อผสมแบบสถิตชนิดขดเกลียวแบบหมุนวน

2.2 เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากกรดไขมันปาล์มด้วยท่อผสมแบบสถิตชนิดขดเกลียวแบบหมุนวน

2.3 เพื่อสามารถผลิตไบโอดีเซลจากกรดไขมันปาล์มด้วยท่อผสมแบบสถิตชนิดขดเกลียวแบบหมุนวนให้มีค่าความเป็นกรด (AV) เหลือน้อยกว่า  $2 \text{ mgKOH.g}^{-1}$

## 3. แนวคิด และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ไบโอดีเซล (Biodiesel) เป็นเชื้อเพลิงดีเซลที่ผลิตจากแหล่งทรัพยากรหมุนเวียน เช่น น้ำมันพืช ไขมันสัตว์ หรือสาหร่าย ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือก นอกเหนือจากดีเซลที่ผลิตจากปิโตรเลียม โดยมีคุณสมบัติการเผาไหม้ใกล้เคียงกับดีเซลจากปิโตรเลียม และสามารถใช้ทดแทนกันได้ คุณสมบัติสำคัญของไบโอดีเซล คือ สามารถย่อยสลายได้เองตาม

กระบวนการชีวภาพในธรรมชาติ [12] และเกิดผลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าดีเซล โดยทั่วไปการผลิตไบโอดีเซลจากวัตถุดิบที่มีค่ากรดไขมันอิสระ (FFA) น้อยกว่าร้อยละ 1 wt สามารถนำมาผลิตไบโอดีเซลขั้นตอนเดียวได้ด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน แต่สำหรับการผลิตไบโอดีเซลจากวัตถุดิบที่มีค่ากรดไขมันอิสระสูงมาก ๆ จำเป็นต้องใช้การผลิตแบบสองขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกใช้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อลดค่ากรดไขมันอิสระให้มีค่าต่ำกว่าร้อยละ 1 wt หรือค่าความเป็นกรด (AV) น้อยกว่า 2 mgKOH.g<sup>-1</sup> เนื่องจากกรดไขมันอิสระทำปฏิกิริยากับสารละลายต่างในกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเกิดสบู่และผลิตเมทิลเอสเทอร์ได้ยากและได้ปริมาณผลได้น้อย จากนั้นขั้นตอนที่สองเมื่อค่ากรดไขมันอิสระให้มีค่าต่ำกว่าร้อยละ 1 wt แล้วจึงนำไปทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อเปลี่ยนองค์ประกอบจำพวกกลีเซอไรด์ให้เป็นเอสเทอร์ [13] โดยมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้ ที่วิจัยของ Jain et al. ได้ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำด้วยกระบวนการแบบสองขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกคือใช้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 65°C และขั้นตอนที่ 2 ใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 50°C อัตราส่วนของเมทานอลต่อน้ำมันร้อยละ 3:7 ใช้กรดซัลฟิวริกและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณร้อยละ 1 wt กวนผสมด้วยความเร็วรอบ 400 rpm ได้ปริมาณผลได้ร้อยละ 21.2 และร้อยละ 90.1 ตามลำดับ [14] ที่วิจัยของ Tamariz et al. ศึกษาคุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ผลิตจากไขมันไก่ โดยใช้กระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชันและทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน พบว่า ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1 ที่ 60°C ใช้เวลาทำปฏิกิริยา 60 min อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน 6:1 ได้ปริมาณผลได้ร้อยละ

81.91 และปริมาณเอสเทอร์ร้อยละ 96.5 [16] ที่วิจัยของ Suksumrit et al. ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากกรดไขมันปาล์มด้วยกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชันร่วมกับสภาวะเมทานอลเหนือจุดวิกฤตเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทดลอง คือ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลกับกรดไขมันปาล์ม 9:1 เวลา 60 min และอุณหภูมิ 300°C ได้เมทิลเอสเทอร์ร้อยละ 97.942 สามารถลดค่าความเป็นกรดให้มีค่าเท่ากับ 2.232 mgKOH.g<sup>-1</sup> [16] ซึ่งการวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นขององค์ประกอบน้ำมันสามารถทำได้โดยวิธีการไทเทรต และนำมาคำนวณหาค่าความเป็นกรดตามสมการที่ (1)

สำหรับงานวิจัยเกี่ยวกับไบโอดีเซลสมัยใหม่ได้พัฒนารูปแบบการผสมและลดต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซลให้ดีขึ้น เช่น การนำท่อนผสมแบบสติดมาแทนเครื่องผสมแบบเดิม โดยส่วนใหญ่จะเป็นระบบแบบถึงกวนผสม ซึ่งใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานาน ใช้ปริมาณสารเคมีมาก และขนาดของเครื่องปฏิกรณ์มีขนาดใหญ่โดยมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้ ที่วิจัยของ Somnuk et al. ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลแบบสองขั้นตอนจากน้ำมันปาล์มดิบชนิดกรดไขมันอิสระสูงด้วยท่อนผสมแบบสติดหมุนวน ในขั้นตอนแรกได้ใช้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้เมทานอลร้อยละ 19.8 vol กรดซัลฟิวริกร้อยละ 2.0 vol และเวลาทำปฏิกิริยา 50 min ที่อุณหภูมิ 60°C อัตราเร็วในการป้อนน้ำมันปาล์มดิบ 40 L.h<sup>-1</sup> ผ่านท่อนผสมแบบสติดที่มีความยาว 5 m พบว่าสามารถลดค่าความเป็นกรดในน้ำมันปาล์มดิบจาก 30 mgKOH.g<sup>-1</sup> เหลือ 2 mgKOH.g<sup>-1</sup> และขั้นตอนที่ 2 ได้ใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้เมทานอลร้อยละ 23.81 vol โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 11.8 wt และเวลาที่ทำปฏิกิริยา 60 min ที่อุณหภูมิ 60°C อัตราการไหลของน้ำมัน 40 L.h<sup>-1</sup> ผ่านท่อนผสมแบบสติดที่มีความยาว 5 m พบว่าสามารถผลิตไบโอดีเซลที่มีความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์

ทองคำดี และคณะ, วารสารวิจัยเทคโนโลยีนวัตกรรม, ฉบับที่ 1 เล่มที่ 1, เลขหน้า 99 – 108, 2560.

มากกว่าร้อยละ 96.5 wt [11] ที่มีการวิจัยของ Rahmat et al. ศึกษาการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน ผลของการแยกชั้นของกลีเซอรอล คุณสมบัติของไบโอดีเซล และการวิเคราะห์สมดุลมวล เครื่องปฏิกรณ์ถูกออกแบบโดยใช้ปั๊มหมุนวนหรือเครื่องกวนและท่อผสมแบบสถิต มีวัตถุประสงค์เพื่อลดปริมาณการใช้เมทานอล และลดเวลาการทำปฏิกิริยา พบว่าสามารถลดปริมาณการใช้สารตั้งต้นลง อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกลีเซอรอลลดลงจาก 6:1 เหลือ 5:1 การผลิตไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 42.37 เป็นร้อยละ 49.34 [17]

จากการทบทวนเอกสาร ดังนั้นแนวคิดของงานวิจัยนี้จึงใช้กรดไขมันปาล์มที่มีกรดไขมันอิสระหรือค่าความเป็นกรดสูงมากมาเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตไบโอดีเซล ใช้ท่อผสมแบบสถิตมาเป็นอุปกรณ์ เพราะมีประสิทธิภาพในการผสมสูง และกระบวนการเอสเทอร์ริฟิเคชันใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากัดเพื่อลดค่ากรดไขมันอิสระหรือค่าความเป็นกรดลง ศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดโดยแปรค่าปริมาณเมทานอล ปริมาณกรดซัลฟิวริก และเวลาในการหมุนวนสารผสม เพื่อหาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์จากขั้นตอนเอสเทอร์ริฟิเคชันสามารถนำไปใช้ในขั้นตอนที่ 2 ด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันเพื่อเปลี่ยนองค์ประกอบกลีเซอไรด์ที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์จากขั้นตอน 1 เป็นไบโอดีเซลที่มีค่าความบริสุทธิ์สูง

#### 4. วิธีการวิจัย

##### 4.1 วัตถุดิบและสารเคมี

กรดไขมันปาล์ม (PFAD) เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการกลั่นบริสุทธิ์น้ำมันปาล์ม ซึ่งมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นกรดไขมันอิสระ และแสดงองค์ประกอบต่าง ๆ ได้แสดงในตารางที่ 1 ลักษณะทางกายภาพของ PFAD จะมีลักษณะเป็นไขที่อุณหภูมิประมาณ 30°C และเป็นของเหลวที่อุณหภูมิ 43°C ดังรูปที่ 1(ก) และ



(ก)

(ข)

รูปที่ 1 ลักษณะของกรดไขมันปาล์ม (ก) ที่อุณหภูมิ 30°C (ข) ที่อุณหภูมิ 43°C

##### ตารางที่ 1 องค์ประกอบของกรดไขมันปาล์ม

องค์ประกอบ	ปริมาณ (wt.%)
กรดไขมันอิสระ	90.417
โมนอกลิเซอไรด์	5.041
ไดกลีเซอไรด์	2.437
ไตรกลีเซอไรด์	1.231
เอสเทอร์	0.874

2(ข) ตามลำดับ สำหรับสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย คือ เมทานอล (เกรดเชิงการค้าความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9) และกรดซัลฟิวริก (เกรดเชิงการค้าความบริสุทธิ์ร้อยละ 98) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และสารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ ไอโซโพรพานอล โปแทสเซียม-ไฮดรอกไซด์ และฟีนอร์ฟาทาลีนอินดิเคเตอร์

##### 4.2 วิธีการทดลอง

##### 4.2.1 อุปกรณ์ในการทดลอง

การผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD ใช้ท่อผสมแบบสถิตชนิดขดเกลียว (Helical Static Mixer) ในการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยเอลิเมนต์ของท่อผสมแบบสถิตใช้แผ่นสแตนเลสหนา 1 mm และอัตราส่วนระหว่างความกว้างต่อความยาวเท่ากับ 1.5 mm บิดให้เป็นเกลียวทำมุม 180° จากนั้นนำแต่ละเอลิเมนต์มา

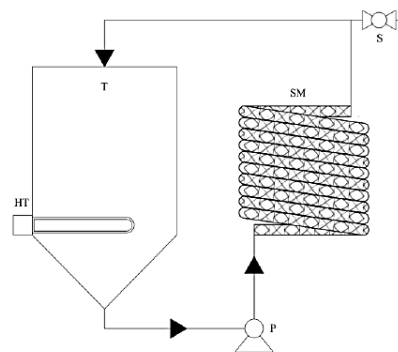
เชื่อมต่อกันทำมุม  $90^\circ$  โดยเอลิเมนต์ชนิดนี้เรียกว่า Twisted-Ribbon โดยมีความยาวเท่ากับ 15 mm เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10 mm และติดตั้งในท่อสแตนเลสความยาวเท่ากับ 5 m จากนั้นนำมาม้วนเป็นรูปขดเกลียวเพื่อลดขนาดของเครื่องปฏิกรณ์

#### 4.2.2 ขั้นตอนการทดลอง

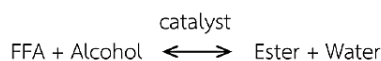
การผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมชนิดขดเกลียวแบบหมุนวน โดยได้แสดงแผนผังชุดทดลองในรูปที่ 2 โดยใช้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ซึ่งเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดไขมันอิสระกับแอลกอฮอล์ ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ผลิตภัณฑ์ คือ เอสเทอร์หรือไบโอดีเซลและน้ำ ตามรูปที่ 3 โดยได้แปรค่าปริมาณเมทานอล 60, 80 และร้อยละ 100 wt ปริมาณกรดซัลฟิวริก ร้อยละ 5, 10 และ 15 wt และเวลาในการทำปฏิกิริยา 10-90 min ควบคุมอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่  $60^\circ\text{C}$  โดยเริ่มจากการเตรียม PFAD ปริมาณ 2000 g ใส่ในถังปฏิกรณ์พร้อมเปิดฮีตเตอร์เพื่ออุ่น PFAD ให้ละลายเป็นของเหลว และเปิดปั๊มหมุนวนสารเคมีที่มีอัตราการไหลที่  $20 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$  จนกระทั่งอุณหภูมิถึง  $60^\circ\text{C}$  จึงเติมเมทานอลตามสัดส่วนทดลองหมุนวนสารผสมทั้งสองชนิดจนกระทั่งอุณหภูมิ  $50^\circ\text{C}$  จึงเติมกรดซัลฟิวริกตามสัดส่วนที่ทดลองเข้าไปในระบบ และเริ่มจับเวลาทันทีเมื่อมีการเติมกรดซัลฟิวริกลงไปเก็บตัวอย่างน้ำมันลดกรดที่เวลาทำปฏิกิริยา 10 - 90 min โดยเก็บทุกๆ 10 min จากนั้นนำน้ำมันลดกรดไปหยุดอัตราการเกิดปฏิกิริยาทันทีด้วยการนำไปแช่น้ำเย็นที่อุณหภูมิ  $0^\circ\text{C}$  จากนั้นนำน้ำมันลดกรดมาล้างเพื่อกำจัดของเสีย และส่วนของสารเคมีที่เหลือออกจากน้ำมันจนได้น้ำมันลดกรดที่มีความบริสุทธิ์ และนำน้ำมันไปวิเคราะห์หาค่าความเป็นกรดด้วยเทคนิคการไทเทรต

#### 4.2.3 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

หลังจากได้ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากกรดไขมันปาล์มแบบหมุนวนด้วยท่อ



รูปที่ 2 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากกรดไขมันปาล์มแบบหมุนวนด้วยท่อผสมแบบสถิตชนิดขดเกลียว (HT: Heater, T: Tank, P: Pump, S: Sampling Port และ SM: Static Mixer)



#### รูปที่ 3 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

ผสมแบบสถิตชนิดขดเกลียวจึงนำมาวิเคราะห์หาค่า AV ด้วยเทคนิคการไทเทรตใช้วิธีของ The American Oil Chemists' Society Official Method Cd 3a-63 for Acid Value [18] โดยเริ่มชั่งตัวอย่างน้ำมันในขวดรูปชมพู่ประมาณ 1 g หยดสารละลายไอโซโพรพานอลเพื่อลดความหนืดของน้ำมันลดกรด หลังจากนั้นหยดสารละลายฟีนอร์ฟทาซีนอินดิเคเตอร์และเขย่าให้เข้ากัน ไทเทรตสารละลายตัวอย่างด้วยสารละลายวิเคราะห์ที่บรรจุอยู่ในบิวเรตที่เตรียมจากโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ละลายอยู่ในไอโซโพรพานอล ความเข้มข้น 0.1 normal จากนั้นเขย่าจนสารละลายเริ่มเปลี่ยนเป็นสีชมพูอ่อนคงที่



ประมาณ 30 sec และนำไปคำนวณหาค่า AV ตามสมการที่ (1)

$$AV = \frac{V \times M \times 56.1}{m} \quad (1)$$

เมื่อ AV คือ ค่าความเป็นกรด, mgKOH.g<sup>-1</sup>, V คือ ปริมาณน้ำที่ใช้ mL, M คือ ความเข้มข้นของด่าง normal, m คือ น้ำหนักน้ำมันตัวอย่าง g

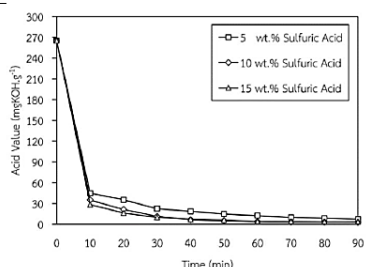
##### 5. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

สำหรับการผลิตไบโอดีเซลจากกรดไขมันปาล์มด้วยท่อผสมชนิดขดเกลียวแบบหมุนวนโดยแปรค่าปริมาณเมทานอลร้อยละ 60, 80 และ 100 wt ปริมาณกรดซัลฟิวริกร้อยละ 5, 10 และ 15 wt และเวลาในการทำปฏิกิริยา 10-90 min ควบคุมอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 60°C จากรูปที่ 4(ก) พบว่าที่ปริมาณเมทานอลร้อยละ 60 wt เมื่อใส่กรดซัลฟิวริกลงไป สารผสมถูกผสมด้วยการหมุนวน และเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันในระหว่างการผสม ภายในระยะเวลา 10 min สามารถลดค่าความเป็นกรดของกรดไขมันปาล์มจาก 265 mgKOH.g<sup>-1</sup> ในมีค่าความเป็นกรดน้อยกว่า 45, 36 และ 29 mgKOH.g<sup>-1</sup> ที่เงื่อนไขปริมาณกรดซัลฟิวริกร้อยละ 5, 10 และ 15 wt ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยา ค่าความเป็นกรดก็จะลดลงเรื่อยๆ โดยที่เวลาทำปฏิกิริยา 90 min และปริมาณกรดซัลฟิวริกร้อยละ 5 wt สามารถลดค่าความเป็นกรดเหลือ 7.15 mgKOH.g<sup>-1</sup> และเมื่อเพิ่มปริมาณกรดซัลฟิวริกเป็นร้อยละ 10 wt สามารถลดค่าความเป็นกรดเหลือ 2.74 mgKOH.g<sup>-1</sup> แต่เมื่อเพิ่มปริมาณกรดซัลฟิวริกเป็นร้อยละ 15 wt สามารถลดค่าความเป็นกรดได้เท่ากับ 4.08 mgKOH.g<sup>-1</sup> ที่เวลาทำปฏิกิริยา 60 min และเข้าสู่ภาวะสมดุลจนถึงระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 90 min จากรูปที่ 4(ข) เมื่อเพิ่มปริมาณเมทานอลเป็นร้อยละ 80 wt พบว่าที่

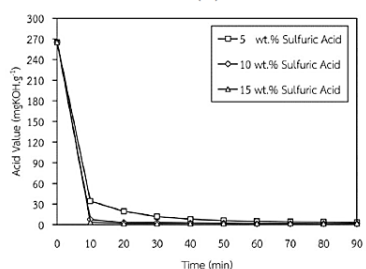
ปริมาณกรดซัลฟิวริกร้อยละ 5 wt สามารถลดค่าความเป็นกรดได้เท่ากับ 3.58 mgKOH.g<sup>-1</sup> แต่เมื่อเพิ่มปริมาณกรดซัลฟิวริกเป็นร้อยละ 10 wt สามารถลดค่าความเป็นกรดได้น้อยกว่า 2 mgKOH.g<sup>-1</sup> ตั้งแต่เวลาทำปฏิกิริยา 60 min และลดลงเหลือต่ำสุด 1.59 mgKOH.g<sup>-1</sup> ที่เวลา 90 min และเมื่อเพิ่มปริมาณกรดซัลฟิวริกเป็นร้อยละ 15 wt ก็สามารถลดค่าความเป็นกรดได้ประมาณ 2 mgKOH.g<sup>-1</sup> ตั้งแต่เวลาทำปฏิกิริยา 30 min แล้วจึงเข้าสู่ภาวะสมดุล จากรูปที่ 4(ค) ที่ปริมาณเมทานอลร้อยละ 100 wt สามารถลดค่าความเป็นกรดของ PFAD เหลือน้อยกว่า 3 mgKOH.g<sup>-1</sup> ที่ปริมาณกรดซัลฟิวริกร้อยละ 5 wt และเวลาทำปฏิกิริยา 60 min และพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกรดซัลฟิวริกเป็นร้อยละ 10 wt สามารถลดค่าความเป็นกรดเหลือน้อยกว่า 3 mgKOH.g<sup>-1</sup> ตั้งแต่เวลาทำปฏิกิริยา 40 min และสามารถลดค่าความเป็นกรดเหลือน้อยกว่า 2 mgKOH.g<sup>-1</sup> ที่เวลาทำปฏิกิริยาเท่ากับ 20 min ที่ปริมาณกรดซัลฟิวริกร้อยละ 15 wt และลดลงเหลือ 1.50 mgKOH.g<sup>-1</sup> ที่เวลา 50 min ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกรดซัลฟิวริกจะสามารถลดค่าความเป็นกรดของ PFAD ลงได้ ดังนั้นกรดซัลฟิวริกมีผลต่อการลดลงของค่าความเป็นกรดของ PFAD อย่างมีนัยสำคัญ

และเมื่อพิจารณาถึงการเพิ่มขึ้นของปริมาณเมทานอล พบว่าจากรูปที่ 4(ก) ที่ปริมาณกรดซัลฟิวริกร้อยละ 5 wt และที่ปริมาณเมทานอลร้อยละ 60 wt สามารถลดค่าความเป็นกรดของ PFAD จาก 265 mgKOH.g<sup>-1</sup> ได้เท่ากับ 7.15 mgKOH.g<sup>-1</sup> แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเมทานอลเป็นร้อยละ 80 wt สามารถลดค่าความเป็นกรดให้เหลือ 3.58 mgKOH.g<sup>-1</sup> และที่ปริมาณเมทานอลร้อยละ 100 wt สามารถลดค่าความเป็นกรดให้เหลือ 2.81 mgKOH.g<sup>-1</sup> ที่เวลา 60 min และเข้าสู่ภาวะสมดุลเมื่อเวลาทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเมื่อ

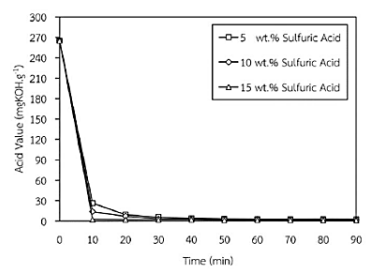
ทงศักดิ์ และคณะ, วารสารวิจัยเทคโนโลยีนวัตกรรม, ฉบับที่ 1 เล่มที่ 1, เลขหน้า 99 – 108, 2560.



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดของ PFAD ของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากกรดไขมันปาล์มแบบหมุนวนด้วยท่อผสมแบบสถิตชนิดขดเกลียวที่เงื่อนไข (ก) เมทานอลร้อยละ 60 wt (ข) เมทานอลร้อยละ 80 wt และ (ค) เมทานอลร้อยละ 100 wt

เพิ่มปริมาณกรดซัลฟิวริกเป็นร้อยละ 10 wt จาก รูปที่ 4(ข) สามารถลดค่าความเป็นกรดให้เหลือเท่ากับ

$2.74 \text{ mgKOH.g}^{-1}$  ที่ปริมาณเมทานอลเท่ากับร้อยละ 60 wt และเมื่อเพิ่มปริมาณเมทานอลเท่ากับร้อยละ 80 wt สามารถลดค่าความเป็นกรดได้เท่ากับ  $1.52 \text{ mgKOH.g}^{-1}$  ตั้งแต่เวลา 60 min และเข้าสู่ภาวะสมดุล แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเมทานอลเท่ากับร้อยละ 100 wt พบว่าไม่สามารถลดค่าความเป็นกรดให้น้อยกว่า  $2 \text{ mgKOH.g}^{-1}$  เนื่องจากปริมาณเมทานอลที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้เกิดน้ำขึ้นระหว่างกระบวนการทำปฏิกิริยาซึ่งทำให้สารเคมีถูกเจือจาง จากรูปที่ 4(ค) เมื่อเพิ่มปริมาณกรดซัลฟิวริกเป็นร้อยละ 15 wt สามารถลดค่าความเป็นกรดได้น้อยกว่า  $2 \text{ mgKOH.g}^{-1}$  ที่ปริมาณเมทานอลร้อยละ 80 wt ใช้เวลาทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 min และเข้าสู่ภาวะสมดุลเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณเมทานอลเท่ากับร้อยละ 100 wt สามารถลดค่าความเป็นกรดได้น้อยกว่า  $2 \text{ mgKOH.g}^{-1}$  ที่เวลา 10 min และเข้าสู่ภาวะสมดุลเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ดังนั้นการเพิ่มปริมาณเมทานอลมีผลต่อการลดค่าความเป็นกรดของ PFAD อย่างมีนัยสำคัญ แต่การเพิ่มปริมาณเมทานอลที่มากเกินไปจะทำให้ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันลดลงด้วยเช่นกัน

## 6. ข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากกรดไขมันปาล์มซึ่งมีค่าความเป็นกรดสูงด้วยเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบสถิตชนิดขดเกลียวแบบหมุนวน พบว่ายังมีการใช้ปริมาณสารเคมีที่สูง เนื่องจากระหว่างกระบวนการทำปฏิกิริยาได้เกิดน้ำขึ้น ส่งผลให้ความเข้มข้นของสารเคมีลดลง และประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันลดลง ซึ่งผลจากการทดลองนี้คาดว่าเครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบสถิตชนิดขดเกลียวสามารถประยุกต์ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องได้อีกกระบวนการหนึ่ง แต่ควรแยกถังสารเคมีถึงวัตถุดิบ และถังทำปฏิกิริยาออกจากกัน

## 7. สรุป

การผลิตไบโอดีเซลจากกรดไขมันปาล์มด้วยท่อผสมชนิดขดเกลียวแบบหมุนวน โดยแปรค่าปริมาณเมทานอลร้อยละ 60, 80 และ 100 wt ปริมาณกรดซัลฟิวริกร้อยละ 5, 10 และ 15 wt และเวลาในการทำปฏิกิริยา 10-90 min ควบคุมอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 60°C พบว่าที่ปริมาณเมทานอลร้อยละ 100 wt ปริมาณกรดซัลฟิวริกร้อยละ 15 wt และเวลาในการทำปฏิกิริยา 20 min สามารถลดค่าความเป็นกรดของ PFAD จาก 265 mgKOH.g<sup>-1</sup> ให้เหลือเท่ากับ 1.97 mgKOH.g<sup>-1</sup> และเข้าสู่ภาวะสมดุลเมื่อเวลาทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นและสามารถนำไปทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันเพื่อเปลี่ยนองค์ประกอบกลีเซอไรต์ให้เป็นเมทิลเอสเทอร์ที่มีความบริสุทธิ์สูงได้

## 8. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัย และขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนสถานที่ในการทำวิจัยและสนับสนุนทุนวิจัยที่ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สัญญาเลขที่ ENG570563S

## 9. เอกสารอ้างอิง

- [1] Department of Alternative Energy Development and Efficiency Ministry of Energy. Alternative Energy Development Plan : AEDP2015 [On-line]. Available : <http://www.dede.go.th/main.php?filename=index.>, 2015. (in Thai)
- [2] V. K. Shahir, C. P. Jawahar, P. R. suresh. Comparative study of diesel biodiesel on CI engine with emphasis to emission – A

- review, Renewable and Sustainable Energy Review, (45) : 686 – 697., 2015.
- [3] D. Ciolkosz, Chapter 34 – What's so different about biodiesel fuel?, Bioenergy Biomass to Biofuels : 551 – 555., 2015.
- [4] Department of Alternative Energy Development and Efficiency Ministry of Energy. Biodiesel [On-line] Available : [http://www4.dede.go.th/dede/index.php?option=com\\_content&view=article&id=898&Itemid.](http://www4.dede.go.th/dede/index.php?option=com_content&view=article&id=898&Itemid.), 2016. (in Thai)
- [5] United States Department of Agriculture. Palm Oil [On-line]. Available : <http://www.pecad.fas.usda.gov/cropexplorer/cropview/commodityView.aspx?>, 2015.
- [6] B. Kitiphaisannon. "Vegetable oil crisis" First time bomb...Thai food industry. Analysis of Industrial Economics : 1 – 4 ., 2011. (in Thai)
- [7] Ab Gapor Md Top. Production and utilization of palm fatty acid distillate (PFAD), Lipid Technology 22(1) : 11 – 13., 2010.
- [8] D. Yujaroen, M. Goto, M. Sasaki, A. Shotipruk. Esterification of palm fatty acid distillate (PFAD) in supercritical methanol : Effect of hydrolysis on reaction reactivity, Fuel 88 : 2011-2016., 2009.
- [9] P. Sungwornpatansakul, J. Hiroi, Y. Nigahara, T.K. Jayasinghe, K. Yoshikawa. Enhancement of biodiesel production reaction employing the static mixing, Fuel Processing Technology 116 : 1 – 8., 2013.
- [10] A. Ghanem, T. Lemenand, D.D. Vallea, H. Peerhossaini. Static mixers : Mechanisms,





### เอกสารเผยแพร่ผลงานวิชาการที่ 3

#### บทความประชุมวิชาการ

ทงศ์ศักดิ์ ประสิทธิ์, ณัฐพล สร้อยสุวรรณ, อาริษา โสภอาจารย์ และ กฤษ สมนึก, 2559. การศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิกช่วยในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากกรดไขมัน น้ำมันด้วยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันแบบกะ, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30, 6-8 กรกฎาคม 2559, จังหวัดสงขลา, หน้า 1240-1245.

## AEC0024

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30  
5-8 กรกฎาคม 2559 จังหวัดสงขลา



การศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิคช่วยในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจาก  
กรดไขมันปาล์มด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันแบบกะ

Feasibility of Using Ultrasound-Assisted Biodiesel Production Process from  
Palm Fatty Acid Distillate by Batch Esterification Reaction

ทนงศักดิ์ ประสิทธิ์<sup>1\*</sup>, ณัฐพล สร้อยสุวรรณ<sup>1</sup>, อาริษา โสภากจารย์<sup>2</sup> และ กฤษ สมนึก<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์  
15 ถนนกาญจนวนิชย์ ตำบลคอกหงส์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

<sup>2</sup>สาขาอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตรังษี อำเภอรัษฎัง จังหวัดสงขลา 90180

\*ติดต่อ: E-mail: tanongsak.prasit@gmail.com, เบอร์โทรศัพท์ 074-558830

**บทคัดย่อ**

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิคเพื่อช่วยในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากกรดไขมันปาล์ม (palm fatty acid distillate, PFAD) ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันแบบกะซึ่ง PFAD เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ (refined palm oil, RPO) และได้นำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลของงานวิจัยนี้ซึ่งมีองค์ประกอบส่วนใหญ่คือกรดไขมันอิสระ (free fatty acid, FFA) ประมาณ 90.417 wt.% ดังนั้น PFAD จึงไม่ได้เป็นวัตถุดิบเพื่อนำมาผลิตเป็นอาหาร ดังนั้นการใช้กรดไขมันปาล์มมาผลิตเป็นไบโอดีเซลจะช่วยลดปริมาณการใช้วัตถุดิบเพื่อนำมาผลิตเป็นอาหารเช่นน้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันเมล็ดเรพ น้ำมันมะพร้าว และน้ำมันปาล์มในการทดลองใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิคที่มีความถี่ 18 kHz กำลัง 1000 W โดยตัวแปรที่ศึกษามี 3 ตัวแปรคือกรดซัลฟิวริก (ปริมาณ 2.5 wt.%, 5.0 wt.% และ 10.0 wt.%) แอลกอฮอล์ (ปริมาณ 80 wt.%, 90 wt.%, 100 wt.%, 150 wt.% และ 200 wt.%) และประเภทของแอลกอฮอล์ (เมทานอลและเอทานอล) ด้วยการเร่งปฏิกิริยาด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิคเป็นระยะเวลา 30 วินาทีจากการทดลองพบว่าปริมาณกรดซัลฟิวริกเท่ากับ 10 wt.% และปริมาณเมทานอลเท่ากับ 200 wt.% ได้รับความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์สูงสุดเท่ากับ 97.435 wt.% และใช้กรดซัลฟิวริกเท่ากับ 10 wt.% และปริมาณเอทานอลเท่ากับ 200 wt.% ได้รับความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์สูงสุดเท่ากับ 95.903 wt.% จากการประยุกต์ใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิคชนิดโพรมบแบบกะด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันสามารถเปลี่ยนแปลงกรดไขมันอิสระซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของกรดไขมันปาล์มให้เป็นเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์

**คำหลัก:** ไบโอดีเซล; กรดไขมันปาล์ม; คลื่นเสียง; เอสเทอร์ฟิเคชัน; เอทานอล; เมทานอล

**Abstract**

In this research, the feasibility of using ultrasound-assisted biodiesel production process from palm fatty acid distillate (PFAD) was studied with batch esterification reaction. The by-product from the refining process of refined palm oil (RPO), PFAD was used as the raw material for producing biodiesel. The PFAD containing 90.570 wt.% free fatty acid (FFA), which is not used for producing the food. Therefore, the PFAD will lessen competition with food resources for biodiesel production such as soybean oil, rapeseed oil, coconut oil, and crude palm oil. The 18 kHz, 1000 W ultrasonic homogenizer was carried out to study the ester conversions of biodiesel production from PFAD. Three parameters: sulfuric acid (2.5, 5.0, and 10 wt.%), alcohol (80, 90, 100, 150, and 200 wt.% of both methanol and ethanol) under the 30 s of ultrasonic reaction time, were investigated. The results showed that the 97.435 wt.% of maximum purity of methyl ester and 95.903 wt.% of maximum purity of ethyl ester were achieved, when both methanol and ethanol were used under the conditions: 10 wt.% sulfuric acid, 200 wt.% alcohol, and 30 s of ultrasonic reaction time. Almost FFA in PFAD can be

## AEC0024

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30  
5-8 กรกฎาคม 2559 จังหวัดสงขลา



converted to methyl- and ethyl-ester by using a probe-type ultrasonic homogenizer in batch esterification reaction.

**Keywords:** biodiesel; palm fatty acid distillate; ultrasound; esterification; ethanol; methanol

### 1. บทนำ

พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลมีปริมาณลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากมีปริมาณการใช้ที่เพิ่มมากขึ้น อีกทั้งยังส่งผลให้เกิดภาวะเรือนกระจก จึงได้มีการค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับพลังงานทดแทน โดยเฉพาะพลังงานทดแทนเชื้อเพลิงดีเซล ซึ่งไบโอดีเซลเป็นทางเลือกหนึ่งซึ่งผลิตจากทรัพยากรหมุนเวียนที่มีอยู่ภายในประเทศ เช่น น้ำมันพืชและไขมันสัตว์ [1]ไบโอดีเซลมีคุณสมบัติการเผาไหม้ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล และสามารถใช้ทดแทนกันได้โดยไม่ต้องปรับแต่งเครื่องยนต์ อีกทั้งยังเป็นพลังงานทดแทนที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และลดการปล่อยก๊าซที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม[2-4]

ปริมาณการผลิตน้ำมันปาล์มของประเทศในแถบภูมิภาคอาเซียนใน พ.ศ. 2558 สามารถผลิตน้ำมันปาล์มได้ประมาณ 55.7 ล้านตัน โดยมีประเทศผู้ผลิตรายใหญ่ได้แก่ อินโดนีเซีย มาเลเซีย และไทย โดยสามารถผลิตได้ประมาณ 33, 20.5 และ 2.2 ล้านตัน ตามลำดับ [5]สำหรับประเทศไทยใช้น้ำมันปาล์มดิบเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตไบโอดีเซล แต่เนื่องจากน้ำมันปาล์มดิบเป็นน้ำมันเพื่อการบริโภค หากนำมาผลิตเป็นไบโอดีเซลมากเกินไปจะทำให้เกิดการขาดแคลน จึงได้มีการศึกษาผลพลอยได้ที่ได้จากกระบวนการกลั่นบริสุทธิ์น้ำมันปาล์มดิบ เช่น กรดไขมันปาล์ม (palm fatty acid distillate, PFAD) เพื่อนำมาเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตไบโอดีเซล โดย PFAD มีคุณภาพและมีราคาต่ำกว่าน้ำมันปาล์มดิบและไม่จัดอยู่ในประเด็นด้านการนำมาบริโภคซึ่งปัจจุบัน PFAD ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมโพลิเอสเตอร์เพื่อสกัดวิตามินอี และ อุตสาหกรรมผลิตสบู่ เป็นต้น แต่เนื่องจาก PFAD มีกรดไขมันอิสระ (free fatty acid, FFA) เป็นองค์ประกอบหลักมากกว่า 90% โดยน้ำหนักซึ่งไม่สามารถผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชันโดยทั่วไปได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องแปลงค่า FFA ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของ PFAD ให้เป็นเอสเตอร์หรือไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาเอสเตอร์ฟิเคชัน[6,7]

เทคโนโลยีที่สำคัญที่นำมาใช้กับงานวิจัยนี้คือคลื่นเสียงอัลตราโซนิกโดยจากงานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวกับการผลิตไบโอดีเซลด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกได้สรุปไปใน

แนวทางเดียวกันว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตด้วยไมกนและให้ความร้อนด้วยฮีตเตอร์การเร่งปฏิกิริยาด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกจะมีข้อดีมากกว่าคือลดระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาลดขนาดของเครื่องปฏิกรณ์และประหยัดพลังงานมากกว่าเช่น ทีมวิจัยของGude และคณะ (2013)ได้ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้วด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกโดยตรงโดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชันใช้เวลาทำปฏิกิริยา 90 วินาทีและสามารถผลิตได้ไบโอดีเซลมีความบริสุทธิ์ 80 wt.%[8] ทีมวิจัยของBastante และคณะ (2014) ได้ศึกษาอิทธิพลการใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิกในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชชนิดต่างๆด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชันในชุดทดลองแบบกะ ซึ่งคลื่นเสียงอัลตราโซนิกช่วยลดเวลาในการทำปฏิกิริยาและช่วยประหยัดพลังงานซึ่งใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิกที่ความถี่ 20 kHz สามารถผลิตเอสเตอร์ได้สูงสุดเท่ากับ 95.03% (จากน้ำมันเมล็ดเรพ), 94.66% (จากน้ำมันถั่วเหลือง), 81.37% (จากน้ำมันมะพร้าว) และ 93.08% (จากน้ำมันปาล์ม)[9]และทีมวิจัยของGuerra และคณะ (2014)ได้ศึกษาอิทธิพลของคลื่นเสียงอัลตราโซนิกแบบต่อเนื่อง(continuous mode) และแบบช่วงๆ (pulse mode)โดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชันของน้ำมันพืชใช้แล้ว (used vegetable oil, UVO) ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะใช้ความถี่ของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก 20 kHz และกำลังสูงสุด 1000 W สำหรับคลื่นเสียงอัลตราโซนิกแบบต่อเนื่องทำปฏิกิริยาที่เวลา 1-2 นาทีกำลังคลื่น 150 W สามารถผลิตไบโอดีเซลมีปริมาณผลได้ 93.5 wt.% และสำหรับคลื่นเสียงอัลตราโซนิกแบบช่วงๆได้ปริมาณผลได้ของไบโอดีเซล 98 wt.% ที่เวลาทำปฏิกิริยา 2.5 นาที[10]

วัตถุประสงค์และแนวคิดของงานวิจัยนี้ คือ ต้องการทราบถึงความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิกในการผลิตไบโอดีเซลแบบกะจากPFADที่มีค่ากรดไขมันอิสระสูงมากกว่า 90 wt.%มีตัวแปรอิสระคือปริมาณแอลกอฮอล์ (เมทานอล และเอทานอล)และปริมาณกรดซัลฟิวริก ที่ส่งผลต่อความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลจาก PFADซึ่งคลื่นเสียงอัลตราโซนิกเป็นเทคโนโลยีที่สำคัญในการช่วยเร่งปฏิกิริยาเพื่อลดเวลาในการทำ

## AEC0024

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30  
5-8 กรกฎาคม 2559 จังหวัดสงขลา



ปฏิกิริยา โดยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกจะทำให้เกิดปรากฏการณ์แควิเทชัน (cavitation) [11]

### 2. วัตถุประสงค์และวิธีการทดลอง

#### 2.1 วัตถุประสงค์และสารเคมี

กรดไขมันปาล์ม (PFAD) เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ [12, 13] โดยมีองค์ประกอบคือ กรดไขมันอิสระ โมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์ และเอสเทอร์ เท่ากับ 90.417 wt.% 5.041 wt.% 2.437 wt.% 1.231 wt.% และ 0.874 wt.% ตามลำดับซึ่งที่อุณหภูมิ 30°C จะมีลักษณะเป็นไขสีเหลืองและเป็นของเหลวที่อุณหภูมิ 43°C ดังแสดงในรูปที่ 1(ก) และ 1(ข) ตามลำดับสำหรับสารเคมีที่ใช้จะเป็นสารเคมีเกรดเชิงการค้าคือ เมทานอลความบริสุทธิ์ 99% เอทานอลความบริสุทธิ์ 99.9% และกรดซัลฟิวริกความบริสุทธิ์ 98%



รูปที่ 1 วัตถุประสงค์และผลิตภัณฑ์ จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD ด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกแบบกะ (ก) PFAD ที่อุณหภูมิ 30°C (ข) PFAD ที่อุณหภูมิ 43°C (ค) ไบโอดีเซลดิบ และ (ง) ไบโอดีเซลบริสุทธิ์

#### 2.2 วิธีการทดลอง

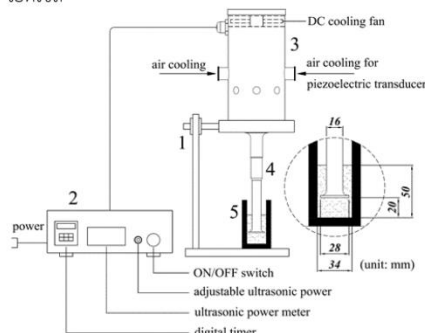
##### 2.2.1 อุปกรณ์

การผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD จะใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิกเป็นตัวช่วยในการผสมและทำปฏิกิริยา โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ ultrasonic homogenizer มีกำลัง 1000 W ที่ความถี่ 18 kHz (model: AKHGZ-50420K) โดยมีชุดทดลองดังแสดงในรูปที่ 2 [14]

##### 2.2.2 ขั้นตอนการทดลอง

ในการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากกรดไขมันปาล์ม (PFAD) ด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกโดยใช้ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน ดังแสดงสมการในรูปที่ 3 [15] เริ่มจากการเตรียม PFAD จำนวน 200 กรัม ในบีกเกอร์ขนาด 1000

มิลลิลิตร จากนั้นนำไปให้ความร้อนจนกลายเป็นของเหลวที่อุณหภูมิ 43°C พร้อมกวน PFAD ด้วยแท่งแม่เหล็กกวนสาร (magnetic bar) ซึ่งจะใช้คู่กับเครื่องกวนสาร (magnetic stirrer) เพื่อให้อุณหภูมิของ PFAD เท่ากันทั้งบีกเกอร์ หลังจากนั้นจึงเติมแอลกอฮอล์ที่เตรียมไว้ผสมกับ PFAD รอกวนอุณหภูมิเท่ากับ 50°C จึงดูดสารผสมระหว่าง PFAD กับแอลกอฮอล์ด้วยปิเปตใส่ลงในเครื่องปฏิกรณ์ขวดแก้ว (glass reactor) พร้อมกับหยดกรดซัลฟิวริกเข้าไปผสมกับสารผสม จากนั้นจึงเปิดคลื่นเสียงอัลตราโซนิก โดยควบคุมที่ระยะเวลา 30 วินาที เมื่อปฏิกิริยาเสร็จสิ้นจึงเก็บตัวอย่าง และนำไปแช่ในน้ำเย็นที่อุณหภูมิ 0°C ทันทีเพื่อหยุดอัตราการเกิดปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะแบ่งชั้นออกเป็นสองชั้นโดยชั้นบนจะเป็นไบโอดีเซลดิบและชั้นล่างจะเป็นของเสียซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือน้ำ ดังรูปที่ 1(ค) หลังจากนั้นจึงนำไปโอดีเซลดิบไปล้างด้วยน้ำร้อนเพื่อกำจัดแอลกอฮอล์ กรดซัลฟิวริก และสิ่งเจือปนต่างๆ ที่ตกค้างออก และนำไปอุ่นเพื่อระเหยน้ำที่ปะปนอยู่จากขั้นตอนการล้างเพื่อให้ได้ไบโอดีเซลบริสุทธิ์ ซึ่งมีสีใส ดังแสดงในรูปที่ 1(ง) เพื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบของไบโอดีเซล



รูปที่ 2 เครื่องปฏิกรณ์อัลตราโซนิกชนิดโพรบแบบกะ (1: support stand with ring clamp, 2: ultrasonic generator, 3: ultrasonic homogenizer, 4: ultrasonic horn และ 5: glass reactor)



##### 2.2.3 การวิเคราะห์ผลการทดลอง



## AEC0024

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30  
5-8 กรกฎาคม 2559 จังหวัดสงขลา

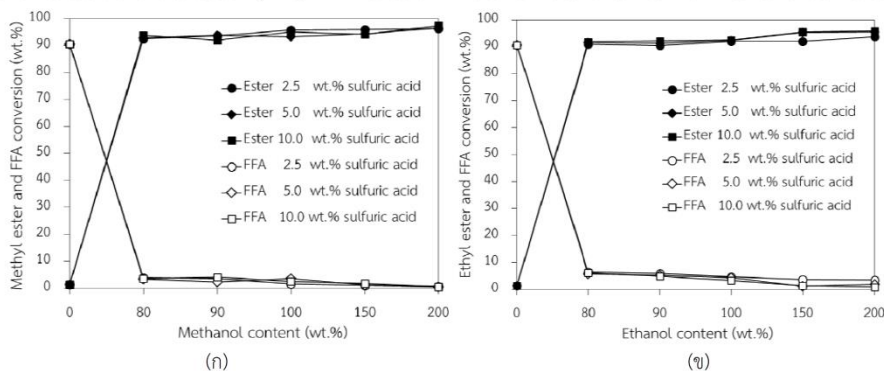


สำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันไบโอดีเซลบริสุทธิ์ คือ ปริมาณเอสเทอร์ กรดไขมันอิสระ โมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ โดยใช้เทคนิค thin layer chromatography with flame and ionization detection (TLC/FID)[16]

### 3. ผลการทดลองและการอภิปราย

สำหรับการศึกษาความเป็นไปได้เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิกเพื่อช่วยในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากกรดไขมันอิ่มตัว (PFAD) ได้ทดลองใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิกชนิดโรบที่ความถี่ 18 kHz กำลัง 1000 W และใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิกแรงปฏิกิริยาเป็นเวลา 30 วินาทีโดยตัวแปรที่ศึกษามี 3 ตัวแปรคือ ปริมาณกรดซัลฟิวริก (2.5 wt.% 5.0 wt.% และ 10.0 wt.%) ปริมาณแอลกอฮอล์ (80 wt.% 90 wt.% 100 wt.% 150 wt.% และ 200 wt.%) และประเภทของแอลกอฮอล์ (เมทานอลและเอทานอล) สำหรับกรณีใช้เมทานอลจากรูปที่ 4(ก) พบว่าที่ปริมาณเมทานอล 80 wt.% สามารถเปลี่ยนกรดไขมันอิสระ (FFA) ซึ่งเป็น

องค์ประกอบส่วนใหญ่ของ PFAD ให้เป็นเมทิลเอสเทอร์ และมีค่าอยู่ในช่วง 92-94 wt.% และเมื่อได้เพิ่มปริมาณเมทานอลเป็น 90 wt.% 100 wt.% 150 wt.% และ 200 wt.% พบว่าเมื่อใช้ปริมาณเมทานอลน้อยกว่า 150 wt.% ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้มีค่าน้อยกว่า 96 wt.% ที่ทุกเงื่อนไขของปริมาณกรดซัลฟิวริก แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเมทานอลเป็น 200 wt.% และปริมาณกรดซัลฟิวริก 2.5 wt.% 5.0 wt.% และ 10.0 wt.% สามารถผลิตเมทิลเอสเทอร์ได้เท่ากับ 96.368 wt.% 96.523 wt.% และ 97.435 wt.% ตามลำดับสำหรับผลของปริมาณกรดซัลฟิวริกที่ส่งผลต่อการเร่งปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกชนิดโรบแบบกะพบว่าค่าความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ใกล้เคียงกันเมื่อใช้เงื่อนไขปริมาณกรดซัลฟิวริก 2.5 และ 5.0 wt.% กับปริมาณเมทานอล 200 wt.% แต่เมื่อเพิ่มปริมาณกรดซัลฟิวริกเป็น 10.0 wt.% ทำให้ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นประมาณ 1 wt.% เมื่อเปรียบเทียบกับที่ปริมาณกรดซัลฟิวริก 5.0 wt.% และเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณการใช้กรดซัลฟิวริกที่เท่ากันเพื่อพิจารณาความมี



รูปที่ 4 ปริมาณเอสเทอร์และกรดไขมันอิสระจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกชนิดโรบแบบกะ (ก) เมทิลเอสเทอร์จาก PFAD (ข) เอทิลเอสเทอร์จาก PFAD

นัยสำคัญของปริมาณเมทานอลพบว่าที่เงื่อนไขกรดซัลฟิวริก 2.5 wt.% สามารถผลิตเมทิลเอสเทอร์ได้ความบริสุทธิ์เท่ากับ 92.592 wt.% 93.670 wt.% 95.766 wt.% 96.011 wt.% และ 96.368 wt.% เมื่อใช้ปริมาณเมทานอลเท่ากับ 80 wt.% 90 wt.% 100 wt.% 150 wt.% และ 200 wt.% ในการทำปฏิกิริยาตามลำดับ โดยปริมาณของเมทานอลที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิก

ชนิดโรบแบบกะมากกว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณกรดซัลฟิวริกอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นผลมาจากความหนาแน่นของกรดซัลฟิวริกที่สูงประมาณ  $1.84 \text{ kg.L}^{-1}$  [17] ทำให้ขณะเร่งปฏิกิริยาด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกต้องใช้เมทานอลในปริมาณมากเพื่อช่วยเพิ่มการถ่ายเทมวลระหว่างกรดไขมันอิ่มตัวเมทานอล และกรดซัลฟิวริก

## AEC0024

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30  
5-8 กรกฎาคม 2559 จังหวัดสงขลา



สำหรับกรณีใช้เอทานอลจากรูปที่4(ข) พบว่าที่ปริมาณเอทานอล 80 wt.% สามารถทำให้FFA เปลี่ยนไปเป็นเอทิลเอสเทอร์มีค่าความบริสุทธิ์ประมาณ 91wt.% และเมื่อทดลองเพิ่มปริมาณเอทานอลเป็น 90 wt.% 100 wt.% 150 wt.% และ 200 wt.%พบว่าที่ปริมาณเอทานอลน้อยกว่า 150 wt.% ทำให้ความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์มีค่าน้อยกว่า 95 wt.%ที่ปริมาณกรดซัลฟิวริกทุกเงื่อนไข แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเอทานอลเป็น 200 wt.% และปริมาณกรดซัลฟิวริก 2.5 wt.% 5.0 wt.% และ 10.0wt.%สามารถผลิตเอทิล-เอสเทอร์ได้เท่ากับ 93.714wt.% 95.610wt.% และ 95.903wt.% ตามลำดับและผลของปริมาณกรดซัลฟิวริกที่ใช้พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกรดซัลฟิวริกจาก 2.5 wt.% เป็น 5.0 และ 10.0 wt.% และปริมาณเอทานอล 200 wt.% ได้ค่าความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นประมาณ 1 wt.% แต่ที่ปริมาณเอทานอลน้อยกว่า 100 wt.% ความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์มีค่าใกล้เคียงกัน และการเพิ่มขึ้นของเอทานอลก็มีผลต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันด้วยคลีนเสียดราโซนิกชนิดโพรบแบบกะอย่างมีนัยสำคัญอย่างไรก็ตามการใช้เอทานอลก็ยังใช้ในปริมาณสูงเช่นเดียวกับกรณีของการใช้เมทานอล

จะเห็นได้ว่าในกรณีของการใช้เอทานอลจะได้ความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลที่ต่ำกว่ากรณีการใช้เมทานอล เช่น ที่ปริมาณกรดซัลฟิวริก 10.0 wt.%และปริมาณแอลกอฮอล์ 200 wt.%ได้ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ และเอทิลเอสเทอร์เท่ากับ 97.435 wt.%และ 95.903 wt.% ตามลำดับ อีกทั้งการใช้เอทานอลมาผลิตไบโอดีเซลก็ยังไม่เป็นที่แพร่หลายเมื่อเทียบกับเมทานอล เนื่องจากราคาของเอทานอลที่สูงกว่าเมทานอล แต่อย่างไรก็ตามการใช้แอลกอฮอล์ทั้ง 2 ชนิดก็ยังมีปริมาณการใช้ในสัดส่วนที่สูงสำหรับผลิตไบโอดีเซลจากกรดไขมันที่มีกรดไขมันอิสระมากกว่า 90 wt.% ด้วยคลีนเสียดราโซนิกชนิดโพรบแบบกะโดยการใช้เมทานอล และเอทานอล พบว่ามีการใช้แอลกอฮอล์ในปริมาณที่สูง เนื่องจากกรดซัลฟิวริกซึ่งมีความหนาแน่นสูงจึงทำให้ตกลงด้านล่างเครื่องปฏิกรณ์ขณะทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว โดยสัดส่วนของกรดซัลฟิวริกที่มากขึ้นจะ

ทำให้การผสมด้วยคลีนเสียดราโซนิกไม่สามารถทำให้กรดซัลฟิวริกแตกตัวได้หมด ดังนั้นการใช้คลีนเสียดราโซนิกชนิดโพรบแบบกะเพียงอย่างเดียวจึงไม่เหมาะสมกับปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน โดยควรจะมีการผสมสารทั้ง 3 ชนิดด้วยถังกวนผสม หรือท่อผสมแบบสลิต ก่อนสารผสมเข้าเครื่องปฏิกรณ์อัลตราโซนิกเพื่อลดปริมาณแอลกอฮอล์ในการทำปฏิกิริยา

ทำให้การผสมด้วยคลีนเสียดราโซนิกไม่สามารถทำให้กรดซัลฟิวริกแตกตัวได้หมด ดังนั้นการใช้คลีนเสียดราโซนิกชนิดโพรบแบบกะเพียงอย่างเดียวจึงไม่เหมาะสมกับปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน โดยควรจะมีการผสมสารทั้ง 3 ชนิดด้วยถังกวนผสม หรือท่อผสมแบบสลิต ก่อนสารผสมเข้าเครื่องปฏิกรณ์อัลตราโซนิกเพื่อลดปริมาณแอลกอฮอล์ในการทำปฏิกิริยา

#### 4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาเบื้องต้นของการผลิตไบโอดีเซลจากกรดไขมันน้ำมัน(PFAD) ด้วยการประยุกต์ใช้คลีนเสียดราโซนิกชนิดโพรบแบบกะ ทั้งการใช้เมทานอลและเอทานอล พบว่าที่ปริมาณกรดซัลฟิวริก 10.0wt.% ปริมาณแอลกอฮอล์ 200 wt.% และใช้คลีนเสียดราโซนิกเร่งปฏิกิริยา 30 วินาที สามารถเปลี่ยนกรดไขมันอิสระ (FFA) ให้เป็นเมทิลเอสเทอร์ และเอทิล-เอสเทอร์ที่มีค่าความบริสุทธิ์สูงที่สุดเท่ากับ 97.435 wt.%และ 95.903 wt.%ตามลำดับซึ่งจะเห็นได้ว่าการประยุกต์ใช้คลีนเสียดราโซนิกมีความเป็นไปได้ในการผลิตไบโอดีเซลจากPFAD และสามารถทำปฏิกิริยาได้ในเวลาที่รวดเร็ว

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักนโยบายและแผนพลังงานกระทรวงพลังงานที่ได้สนับสนุนทุนวิจัยและขอขอบคุณมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่สนับสนุนสถานที่ในการทำวิจัยและสนับสนุนทุนวิจัยที่ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สัญญาเลขที่ENG570563S

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Lam, M.K. and Lee, K.T. (2011). Chapter 15 production of biodiesel using palm oil, *Biofuels: Alternative Feedstocks and Conversion Processes*, pp. 353-374.
- [2] Yen Ping, B.T. and Yusof, M. (2009). Characteristics and properties of fatty acid distillates from palm oil, *Oil Palm Bulletin*, vol.59, November 2009, pp. 5-11.

## AEC0024

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30  
5-8 กรกฎาคม 2559 จังหวัดสงขลา



- [3] Ciolkosz, D. (2015). Chapter 34 - What's so different about biodiesel fuel?, *Bioenergy Biomass to Biofuels*, pp. 551 – 555.
- [4] Shahir, V.K., Jawahar, C.P. and Suresh, P.R. (2015). Comparative study of diesel and biodiesel on CI engine with emphasis to emissions - A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.45, February 2015, pp.686–697.
- [5] United States Department of Agriculture. (2015). *Palm Oil*. URL : <http://www.pecad.fas.usda.gov/cropexplorer/cropview/commodityView.aspx?>, access on 14/01/2016.
- [6] Chongkhong, S., Tongurai, C., Chetpatananondh, P. and Bunyakan, C. (2007). Biodiesel production by esterification of palm fatty acid distillate, *Renewable Energy*, vol. 31, March 2007, pp. 563–568.
- [7] Yujaroen, D., Goto, M., Sasaki, M. and Shotipruk, A. (2016). Esterification of palm fatty acid distillate ( PFAD ) in supercritical methanol : Effect of hydrolysis on reaction reactivity, *Fuel*, vol. 88, February 2009, pp. 2011–2016.
- [8] Gude, V.G. and Grant, G.E. (2013). Biodiesel from waste cooking oils via direct sonication, *Applied Energy*, vol. 109, April 2013, pp.135–144.
- [9] Sáez-Bastante, J., Pinzi, S., Arzamendi, G., Luque de Castro, M.D., Priego-Capote, F. and Dorado, M.P. (2014). Influence of vegetable oil fatty acid composition on ultrasound-assisted synthesis of biodiesel, *Fuel*, vol. 125, February 2014, pp.183–191.
- [10] Martinez-Guerra, E. and Gude, V.G. (2015). Transesterification of waste vegetable oil under pulse sonication using ethanol , methanol and ethanol – methanol mixtures, *Waste Management*, vol. 34(12), February 2015, pp. 2611–2620.
- [11] Mason T. J. (1990). *Sonochemistry: The uses of ultrasound in chemistry*, ISBN: 0-85186-293-4, The Royal Society of Chemistry, Thomas Graham House, The Science Park, Cambridge.
- [12] Gapor Md Top, A. (2010). Production and utilization of palm fatty acid distillate (PFAD), *Lipid Technology*, vol. 22(1), January 2010, pp.11–13.
- [13] Soysuwan, N. and Somnuk, K. (2015). Optimization of methyl ester production from palm fatty acid distillate using single-step esterification: A response surface methodology approach, *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 10(6), September 2015, ISSN 1819-6608.
- [14] Somnuk, K. and Prateepchaikul, G. (2014). Feasibility of using high-intensity ultrasound assisted biodiesel production from mixed crude palm oil in two-step process, *Advanced Materials Research*, vol. 875-877, February 2014, pp. 1687-1692.
- [15] Marchetti, M. and Errazu, A.F. (2009). Biodiesel production from acid oils and ethanol using a solid basic resin as catalyst, *Biomass and Bioenergy*, vol.34(3), October 2009, pp. 272–277.
- [16] ทนงศักดิ์ ประสิทธิ์, ณัฐพลณลำพูน, ณัฐพลสร้อยสุวรรณและกฤษสมนึก (2558). การผลิตไบโอดีเซลจากกรดไขมันปาล์มด้วยกระบวนการเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบกะ, *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 29*. 1-3 กรกฎาคม 2558 จังหวัดนครราชสีมา.
- [17] Somnuk, K., Smithmaitrie, P. and Prateepchaikul, G. (2013). Optimization of continuous acid-catalyzed esterification for free fatty acids reduction in mixed crude palm oil using static mixer coupled with high-intensity ultrasonic irradiation, *Energy Conversion and Management*, vol. 68, January 2013, pp. 193-199.

เอกสารเผยแพร่ผลงานวิชาการที่ 4

ทงศักดิ์ ประสิทธิ์, ดุลาวัชร พันธ์ชูไช้ และ กฤษ สมนึก, การผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วย  
คลื่นเสียงอัลตราโซนิกชนิดแคลมป์ท้อ, เข้าร่วมนำเสนอผลงานและจัดแสดงนิทรรศการ  
งานวันนักประดิษฐ์ ประจำปี 2560, 2-6 กุมภาพันธ์ 2560, ศูนย์แสดงนิทรรศการและการประชุม  
ไบเทค บางนา กรุงเทพฯ





เอกสารเผยแพร่ผลงานวิชาการที่ 5

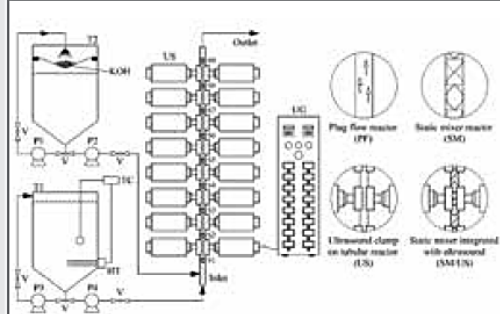
ทงศักดิ์ ประสิทธิ์, ดุลยวัชร พันธ์ชูโชชะ, กฤษ สมนึก และ กำพล ประทีปชัยกูร, การผลิตไบโอดีเซล  
แบบต่อเนื่องด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกชนิดแคลมป์ท่อ, เข้าร่วมนำเสนอผลงานและจัดแสดง  
นิทรรศการในโครงการพลังงานและเทคโนโลยีที่ยั่งยืนแห่งเอเชีย 2560 (Sustainable Energy and  
Technology Asia, SETA 2017), 8-10 มีนาคม 2560, ณ ศูนย์แสดงนิทรรศการและการประชุม  
ไบเทค บางนา กรุงเทพฯ



**การผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง  
ด้วยอัลตราโซนิกชนิดแคลมป์ท่อ**



โดยทั่วไปการผลิตไบโอดีเซลจะใช้เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง (continuous stirred tank reactor, CSTR) ซึ่งมีข้อดีหลายประการ เช่น มีขนาดใหญ่ ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานาน และใช้สารเคมีปริมาณมาก ซึ่งต่อมาได้มีการพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์ผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยท่อผสม (static mixer) ซึ่งตอบสนองปัญหาเดิมได้ในระดับหนึ่ง แต่มีเทคโนโลยีที่สำคัญที่มีประสิทธิภาพ ในการแก้ปัญหาดังกล่าวได้นั้นก็คือการประยุกต์ใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิก (ultrasound) คลื่นเสียงอัลตราโซนิกจะช่วยเร่งปฏิกิริยาให้เกิดเร็วขึ้น ลดปริมาณสารเคมี และลดต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซลได้ โดยคลื่นอัลตราโซนิกจะทำให้เกิดปรากฏการณ์แคเวชัน (cavitation) ทำให้เกิดการผสมในระดับโมเลกุลของน้ำมันกับสารเคมี งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอเครื่องปฏิกรณ์อัลตราโซนิกชนิดแคลมป์ท่อ ซึ่งติดตั้งอัลตราโซนิกรอบผนังท่อตรงขนาดความยาวประมาณ 1 เมตร เพื่อใช้เป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง



16x400W ultrasonic power, 20 kHz ultrasonic frequency  
 - ค่าไฟฟ้านี้เมื่อใช้กำลังคลื่นอัลตราโซนิกแบบเต็มกำลัง  $\approx 4.5$  บาท/ชั่วโมง  
 - ค่าสารเคมี  $\approx 2.6$  บาท/ลิตร (methanol = 10 vol.%, KOH = 6 g/L)  
 - อัตราการผลิตของน้ำมัน 20-25 ลิตร/ชั่วโมง

**แผนผังเครื่องปฏิกรณ์ผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง  
ด้วยอัลตราโซนิกชนิดแคลมป์ท่อ**

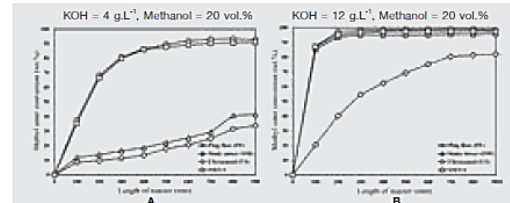
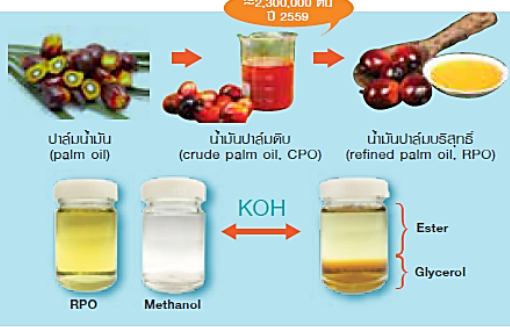
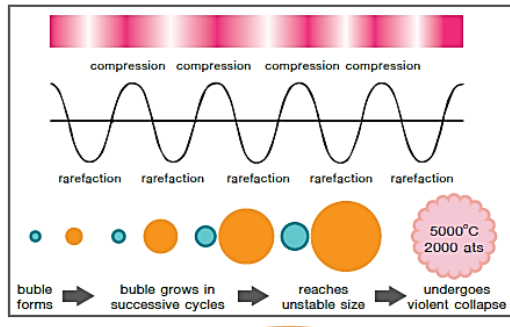
- T1 : ถัง RPO
- T2 : ถังสารละลายโพแทสเซียม-เมทอกไซด์
- HT : ฮีตเตอร์จุ่มของน้ำมัน
- V : วาล์ว
- P1 : บิมหมุนวนของสารละลายโพแทสเซียมเมทอกไซด์
- P2 : บิมต่อเนื่องของสารละลายโพแทสเซียมเมทอกไซด์
- P3 : บิมหมุนวนของ RPO
- P4 : บิมต่อเนื่องของ RPO
- TC : เทอร์โมสแตท
- US : เครื่องปฏิกรณ์อัลตราโซนิกชนิดแคลมป์ท่อ
- UG : เครื่องควบคุมอัลตราโซนิก
- S1-S9 : วาล์วเก็บตัวอย่าง



ชื่อผู้วิจัย : นายทรงศักดิ์ ประสิทธิ์, นายคุณาวุฒิ พันธุ์ยูธิ์, พศ.ดร.กฤษ สมนึก, รศ.ก่าพล ประทีปชัยกุล  
 ติดต่อ : วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์  
 www.psu.ac.th , E-mail : krit.s@psu.ac.th  
 โทร 0-7428-7227

**องค์ประกอบของน้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์และไบโอดีเซล**

องค์ประกอบ	RPO	Biodiesel from RPO
ไตรกลีเซอไรด์ (wt.%)	97.097	0.481
ไดกลีเซอไรด์ (wt.%)	2.288	0.000
โมโนกลีเซอไรด์ (wt.%)	0.347	0.000
กรดไขมันอิสระ (wt.%)	0.268	0.000
เอสเทอร์ (wt.%)	0.000	99.519



กราฟเปรียบเทียบของ PF, SM, US, และ SM/US ที่ปริมาณเมทอกไซด์ 20 vol.% และปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (A) 4 g.L<sup>-1</sup> และ (B) 12 g.L<sup>-1</sup> of KOH



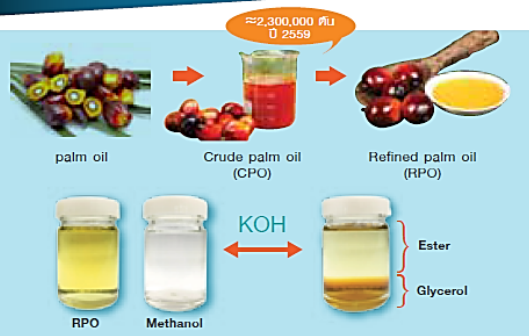
## Continuous Biodiesel Production Using Ultrasound Clamp On Tubular Reactor



Krit Somnuk, Tanongsak Prasit, Donyawat Phanyusoh, Gumpun Prateepchaikul  
 Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla, Thailand, 90112  
 www.psu.ac.th , E-mail : krit.s@psu.ac.th , Tel. 0-7428-7227

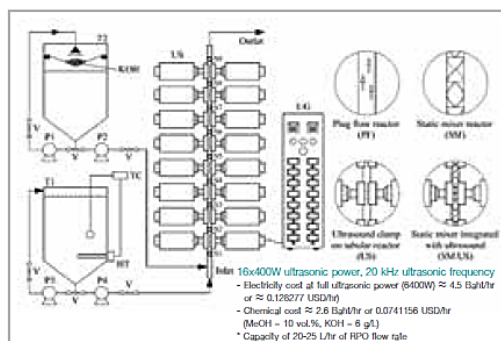
Biodiesel as renewable energy source can be used in diesel engines without any major modification. Moreover, the exhaust emissions from biodiesel have advantages over those from petroleum diesel, such as less smoke and airborne particles. Properties of biodiesel has better than that of petroleum diesel in the term of biodegradable, substantially, non-toxic. In the biodiesel production process, various mixing technologies increase the contact of two immiscible phases: oils and alcohol.

In this study, four types of continuous reactors, namely plug flow reactor (PF), static mixer reactor (SM), ultrasound clamp on tubular reactor (US), and static mixer combined with ultrasound (SM/US) were compared for their purities of methyl ester in biodiesel production from refined palm oil (RPO). The reactor conditions were: KOH 4, 6, 8, 10, and 12 g.L<sup>-1</sup>, methanol content 20 vol.%, and under 20 L.hr<sup>-1</sup> RPO flow rate at 60°C temperature. The highest purity of methyl esters: 81.987 wt.% for PF, 95.700 wt.% for SM, 98.980 wt.% for US, and 97.670 wt.% for SM/US, were achieved with 900 mm, 900 mm, 700 mm, and 900 mm reactor lengths respectively, and 12 g.L<sup>-1</sup> of KOH was used in all cases. The 16x400W ultrasound clamp was operated at 20 kHz frequency, and among short length reactors the US case was more effective than PF, SM, or SM/US.



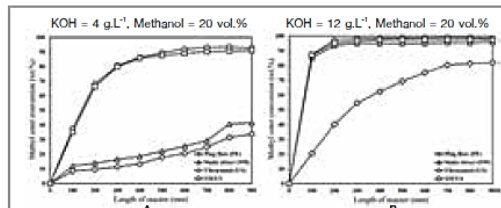
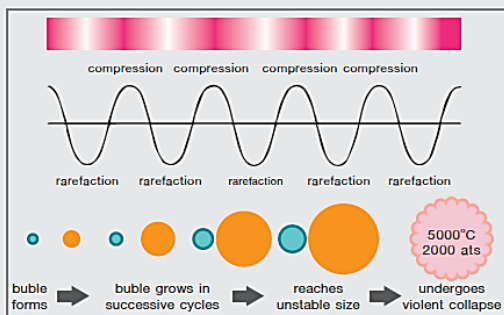
### Composition of RPO and biodiesel from RPO

Composition	RPO	Biodiesel from RPO
Triglyceride (wt.%)	97.097	0.481
Diglyceride (wt.%)	2.288	0.000
Monoglyceride (wt.%)	0.347	0.000
Free fatty acid (wt.%)	0.268	0.000
Ester (wt.%)	0.000	99.519



### Schematic diagram of the experiment setup.

- T1 : RPO tank
- T2 : potassium methoxide tank
- HT : submerged heater
- V : valve
- P1 : CH3KO circulating pump
- P2 : CH3KO continuous pump
- P3 : RPO circulating pump
- P4 : RPO continuous pump
- TC : temperature control
- US : ultrasound clamp on tubular reactor
- UG : ultrasonic generator
- S1-S9 : sampling port



Comparison of methyl ester purity of transesterification process using PF, SM, US, and SM/US under the condition: 20 vol.% of methanol with (A) 4 g.L<sup>-1</sup> of KOH, and (B) 12 g.L<sup>-1</sup> of KOH, at 20 L.hr<sup>-1</sup> RPO flow rate, and 60°C temperature.



เอกสารเผยแพร่ผลงานวิชาการที่ 6

กฤษฎ สมนึก, ทนงศักดิ์ ประสิทธิ์, ดุลยวัชร พันธ์ชูโชชะ และ กำพล ประทีปชัยกูร, เครื่องผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิกความถี่ต่ำชนิดแคลมป์ท้อ, เข้าร่วมนำเสนอผลงาน และจัดแสดงนิทรรศการในงานตลาดนัดเปิดโลกผลงานวิจัย ครั้งที่ 2, 23-24 กันยายน 2560, ณ ไปรษณีย์กลาง และศูนย์สร้างสรรค์งานออกแบบ (TCDC) บางรัก กรุงเทพฯ





เอกสารเผยแพร่ผลงานวิชาการที่ 7

กฤษ สมนึก, ทนงศักดิ์ ประสิทธิ์, ดุลยวัชร พันธ์ยูงไชยะ และ กำพล ประทีปชัยกูร, เครื่องผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิกความถี่ต่ำชนิดแคลมป์ท่อ, เข้าร่วมนำเสนอผลงานและจัดแสดงนิทรรศการในงาน การประกวดผลงานประดิษฐ์คิดค้น ประจำปี 2561, 25-26 กันยายน 2560, ณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

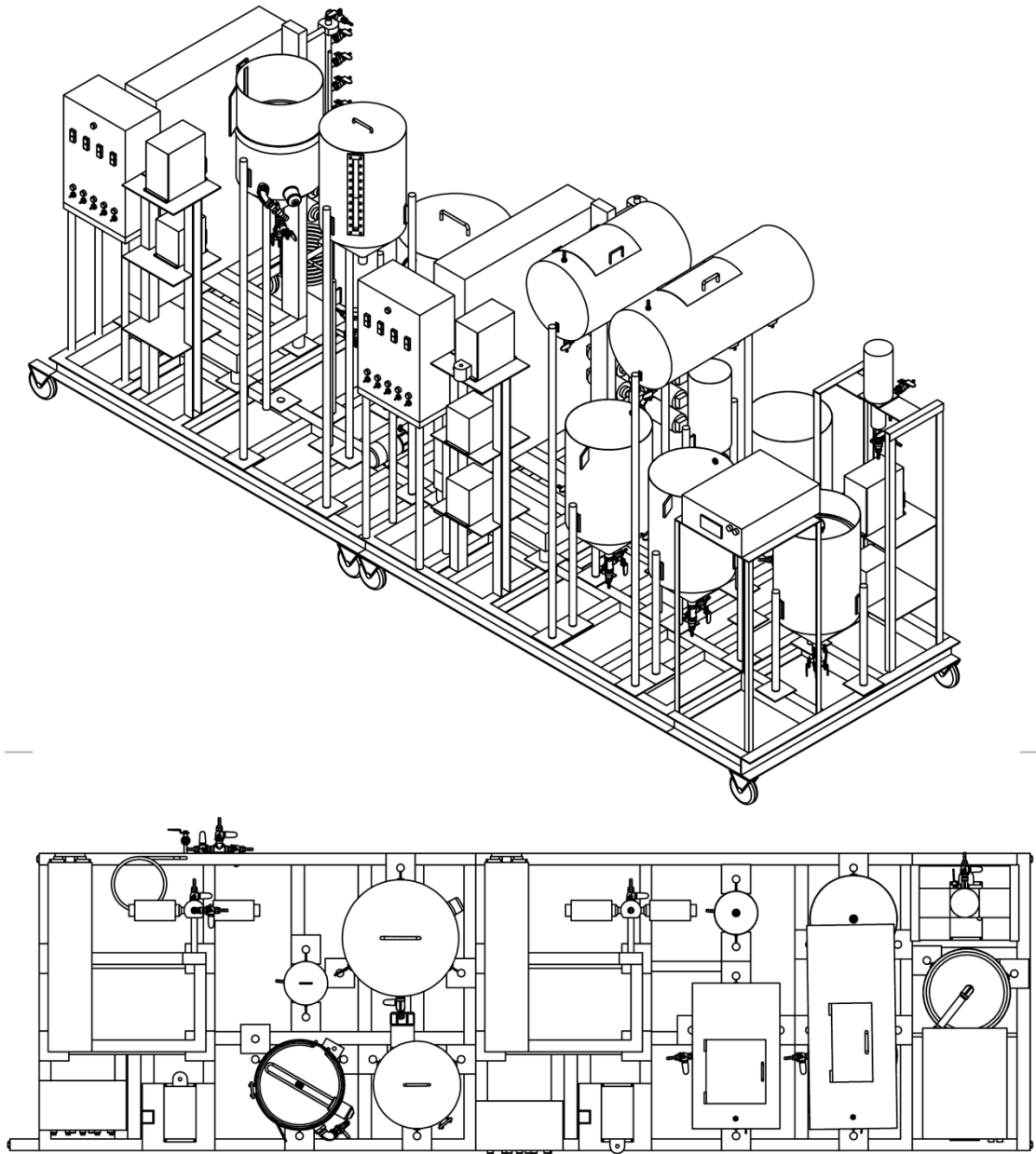




ภาคผนวก ฅ  
แบบชุดทดลอง

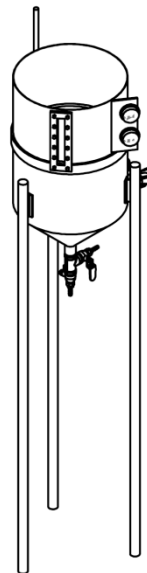
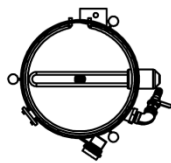
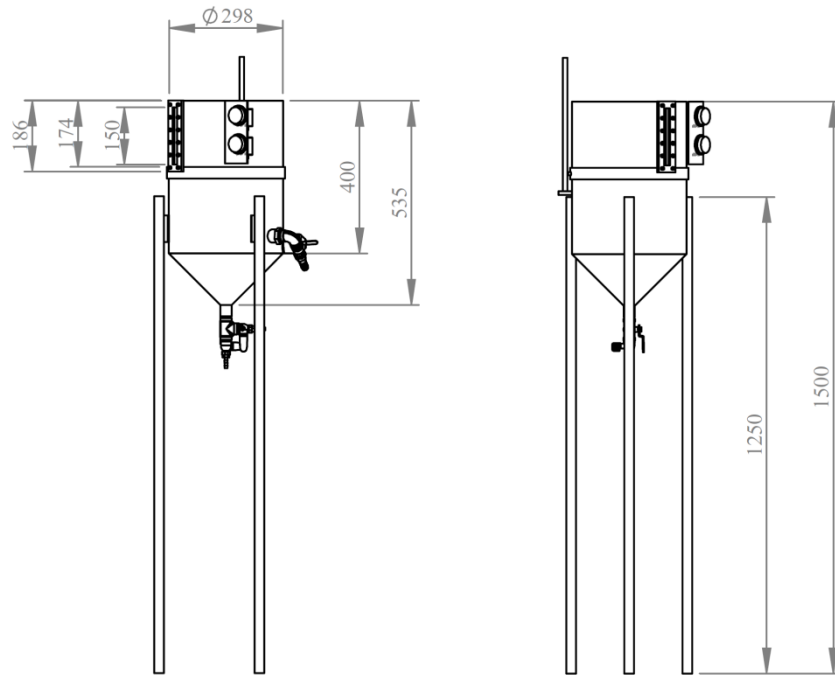
ตารางที่ ฅ.1 รายการอุปกรณ์ของเครื่องปฏิกรณ์ผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD แบบต่อเนื่องด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิก แบบ 3 ขั้นตอน

ลำดับที่	รายการ	ขนาด	จำนวน	หมายเหตุ
1	เครื่องปฏิกรณ์ผลิตไบโอดีเซล	ตามแบบ	1	รูปที่ ฅ 1
2	ถัง PFAD	ตามแบบ	1	รูปที่ ฅ 2
	ฮีตเตอร์จุ่ม	800 W	1	-
	ฮีตเตอร์รั๊ด	1000 W	1	-
	มอเตอร์	200 W, 1000 rpm	1	-
3	ถังเมทานอลของขั้นตอนที่ 1	ตามแบบ	1	รูปที่ ฅ 3
4	ถังผสม	ตามแบบ	1	รูปที่ ฅ 4
	ฮีตเตอร์จุ่ม	1800 W	1	-
	ปั๊มหมุนวน	Sanso pump PMD 371 (25-28 L.min <sup>-1</sup> )	1	-
5	ถังกรดซัลฟิวริกของขั้นตอนที่ 1 และ ขั้นตอนที่ 2	ตามแบบ	2	รูปที่ ฅ 5
6	ถังแยกชั้นของขั้นตอนที่ 1	ตามแบบ	1	รูปที่ ฅ 6
7	ถังน้ำมันลดกรดไขมันอิสระจากขั้นตอนที่ 1 และ ขั้นตอนที่ 2	ตามแบบ	2	รูปที่ ฅ 7
	ฮีตเตอร์จุ่ม	1000 W	1	-
	ปั๊มหมุนวน	Sanso pump PMD 371 (25-28 L.min <sup>-1</sup> )	1	-
8	ถังเมทานอลของขั้นตอนที่ 2	ตามแบบ	1	รูปที่ ฅ 8
9	ถังแยกชั้นของขั้นตอนที่ 2	ตามแบบ	1	รูปที่ ฅ 9
10	ถังโพแทสเซียมเมทอกไซด์	ตามแบบ	1	รูปที่ ฅ 10
	ปั๊มหมุนวน	Sanso pump PMD 371 (25-28 L.min <sup>-1</sup> )	1	-
11	เครื่องปฏิกรณ์ท่อผสมแบบสถิต	ตามแบบ	1	รูปที่ ฅ 11
12	เครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิกขั้นตอนที่ 1	ตามแบบ	1	รูปที่ ฅ 12
13	เครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิกขั้นตอนที่ 2	ตามแบบ	1	รูปที่ ฅ 13
14	เครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิกขั้นตอนที่ 3	-	1	-



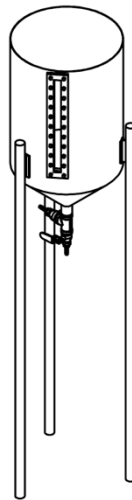
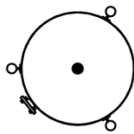
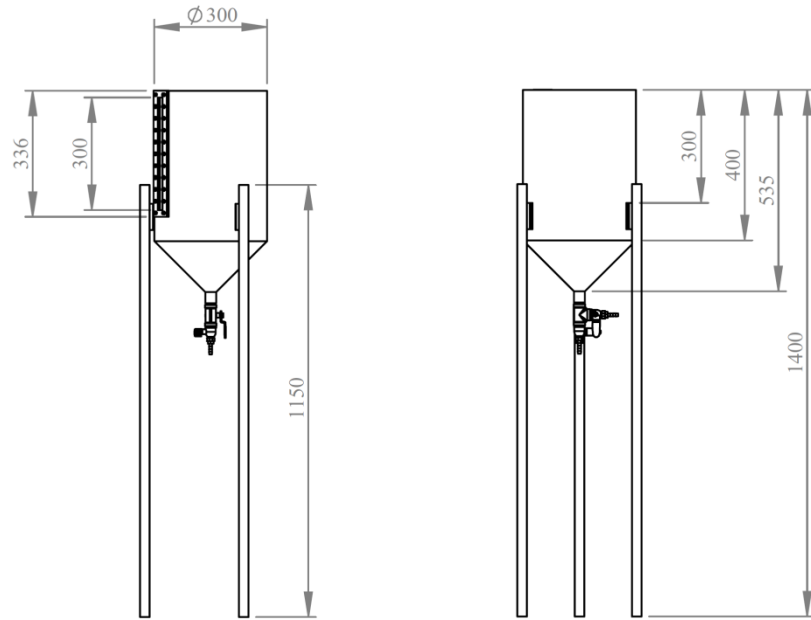
(หน่วย: มิลลิเมตร)

รูปที่ ๑ เครื่องปฏิกรณ์ผลิตไบโอดีเซลจาก PFAD แบบต่อเนื่องด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิก แบบ 3  
ขั้นตอน



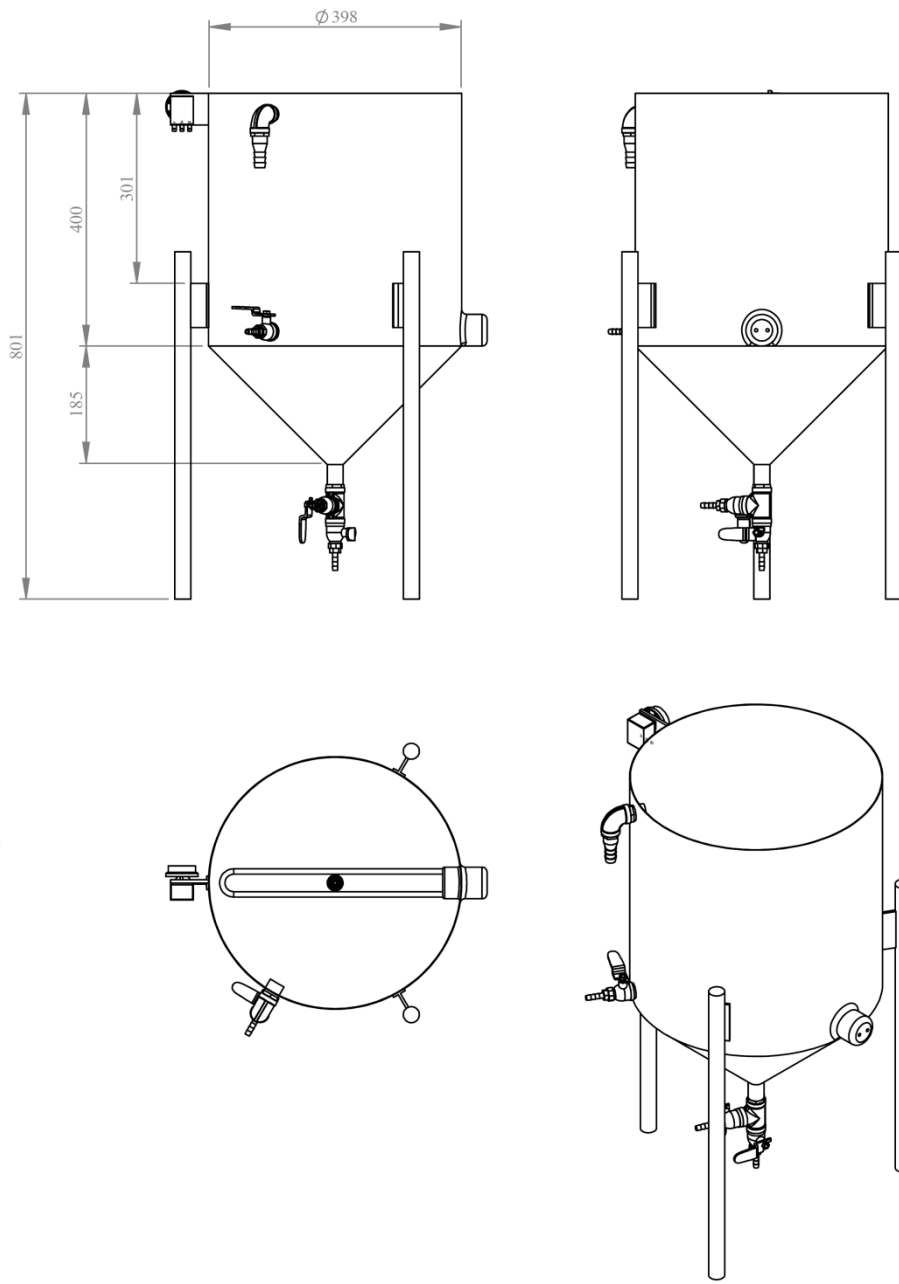
(หน่วย: มิลลิเมตร)

รูปที่ ๓ ๒ ถึง PFAD



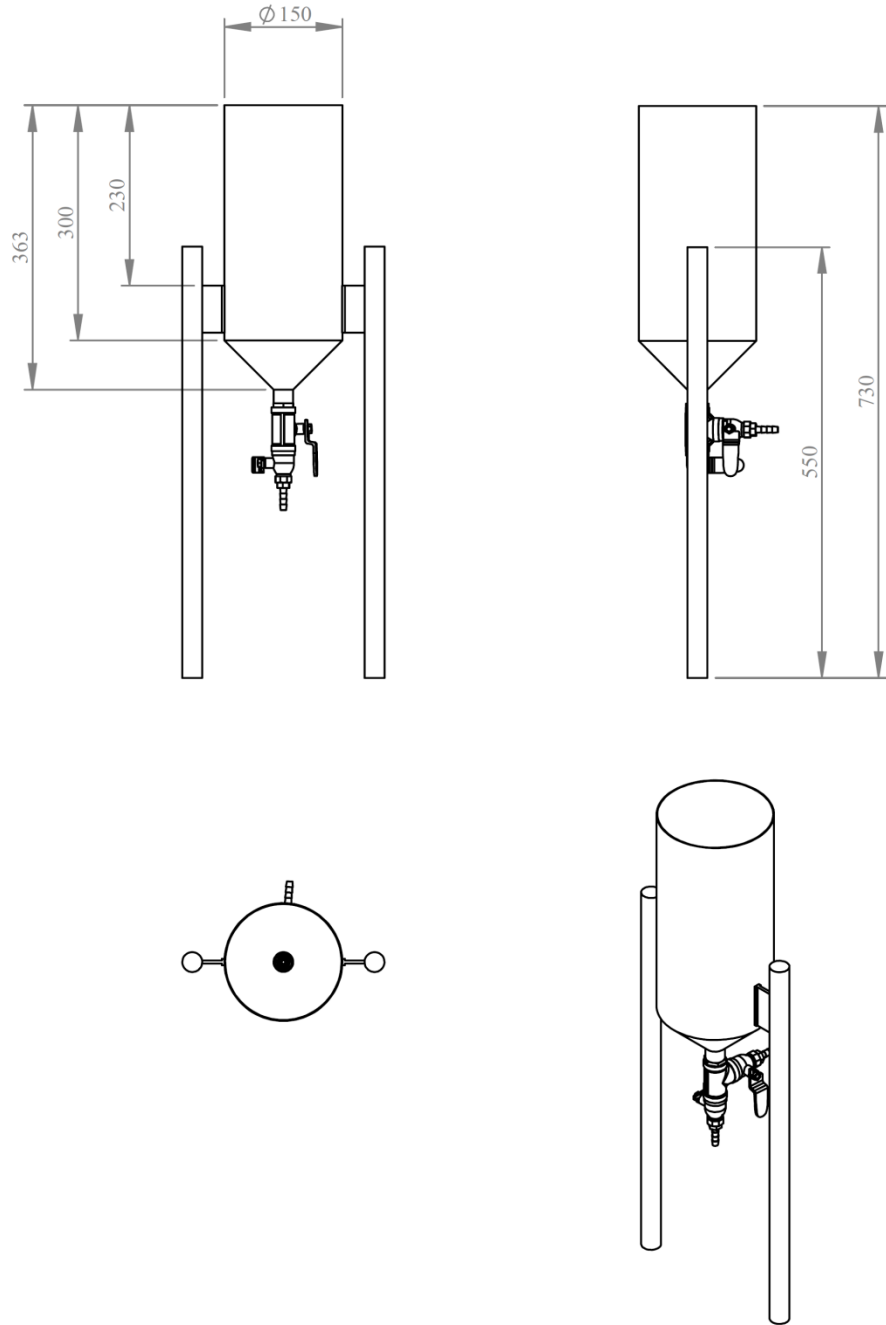
(หน่วย: มิลลิเมตร)

รูปที่ ๓ ถังเมทานอล



(หน่วย: มิลลิเมตร)

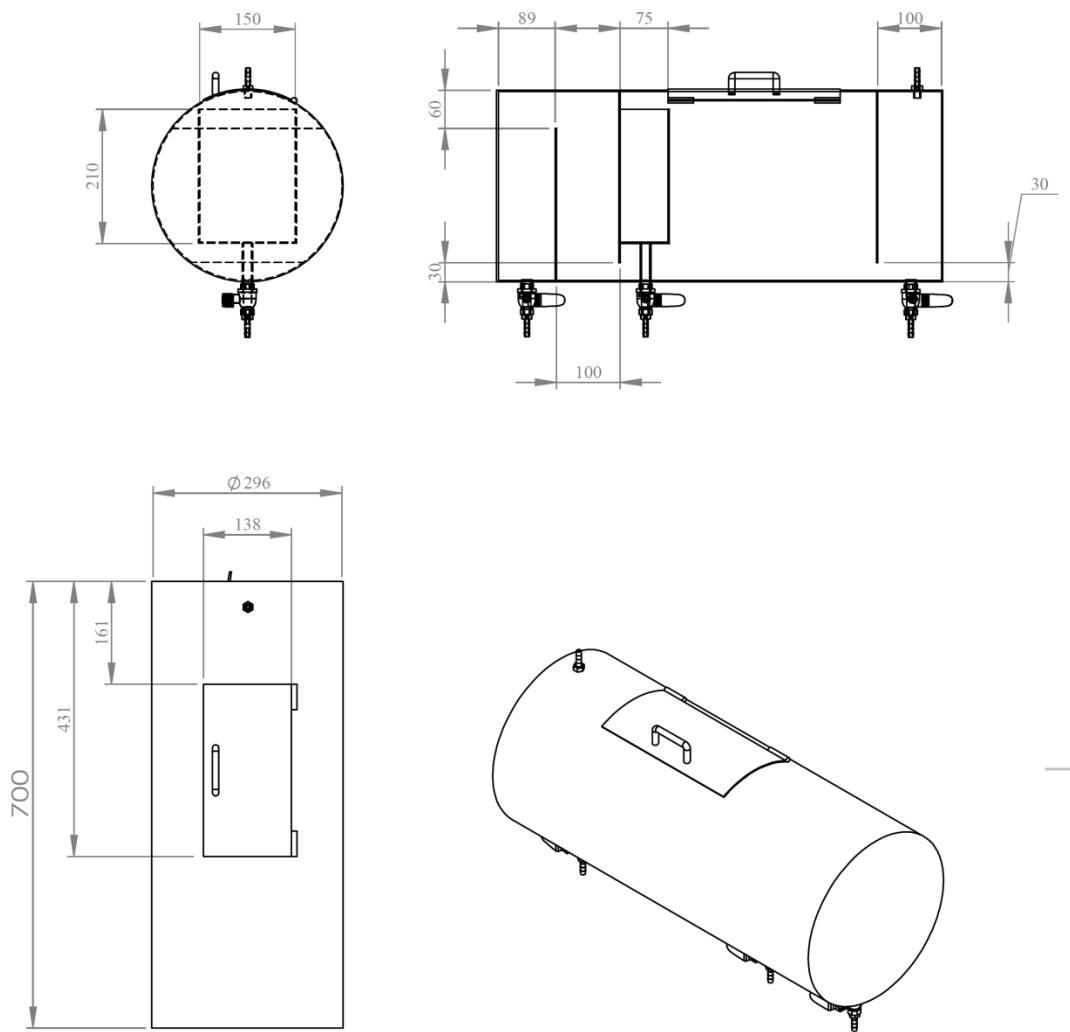
รูปที่ ๓ ๔ ถังผสม



(หน่วย:มิลลิเมตร)

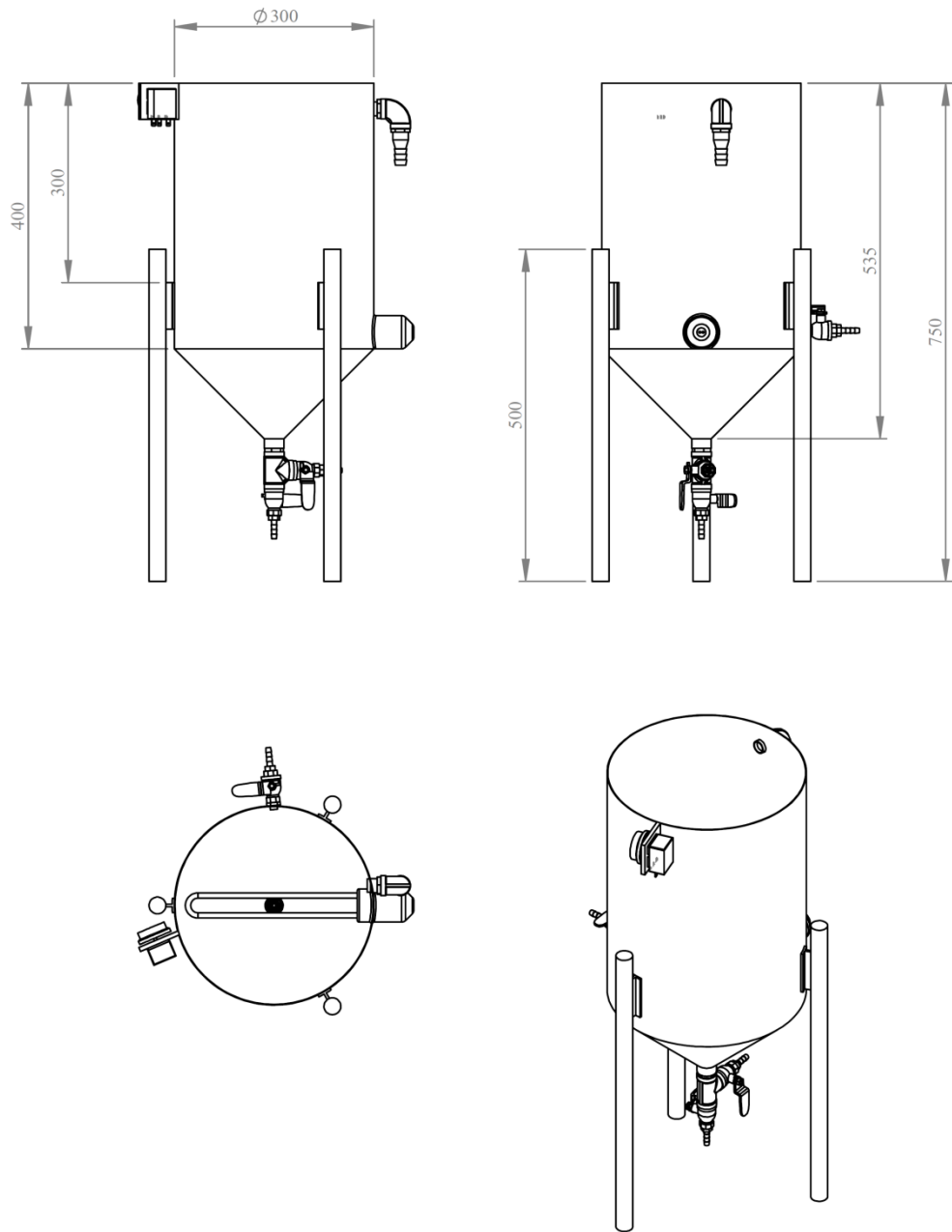
รูปที่ ๕ ถังกรดซัลฟิวริก





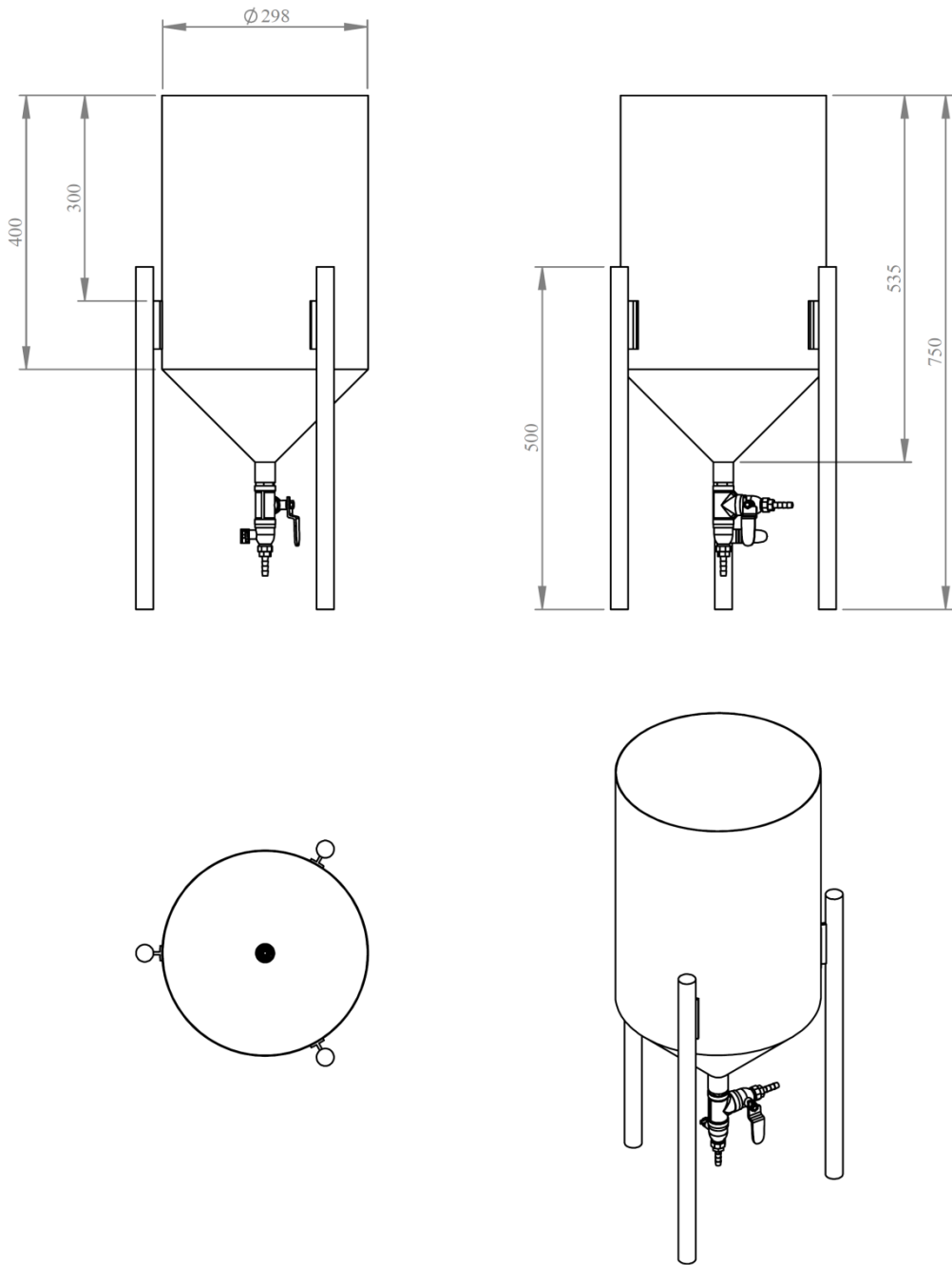
(หน่วย: มิลลิเมตร)

รูปที่ ๖ ถังแยกชั้นของชั้นตอนที่ 1



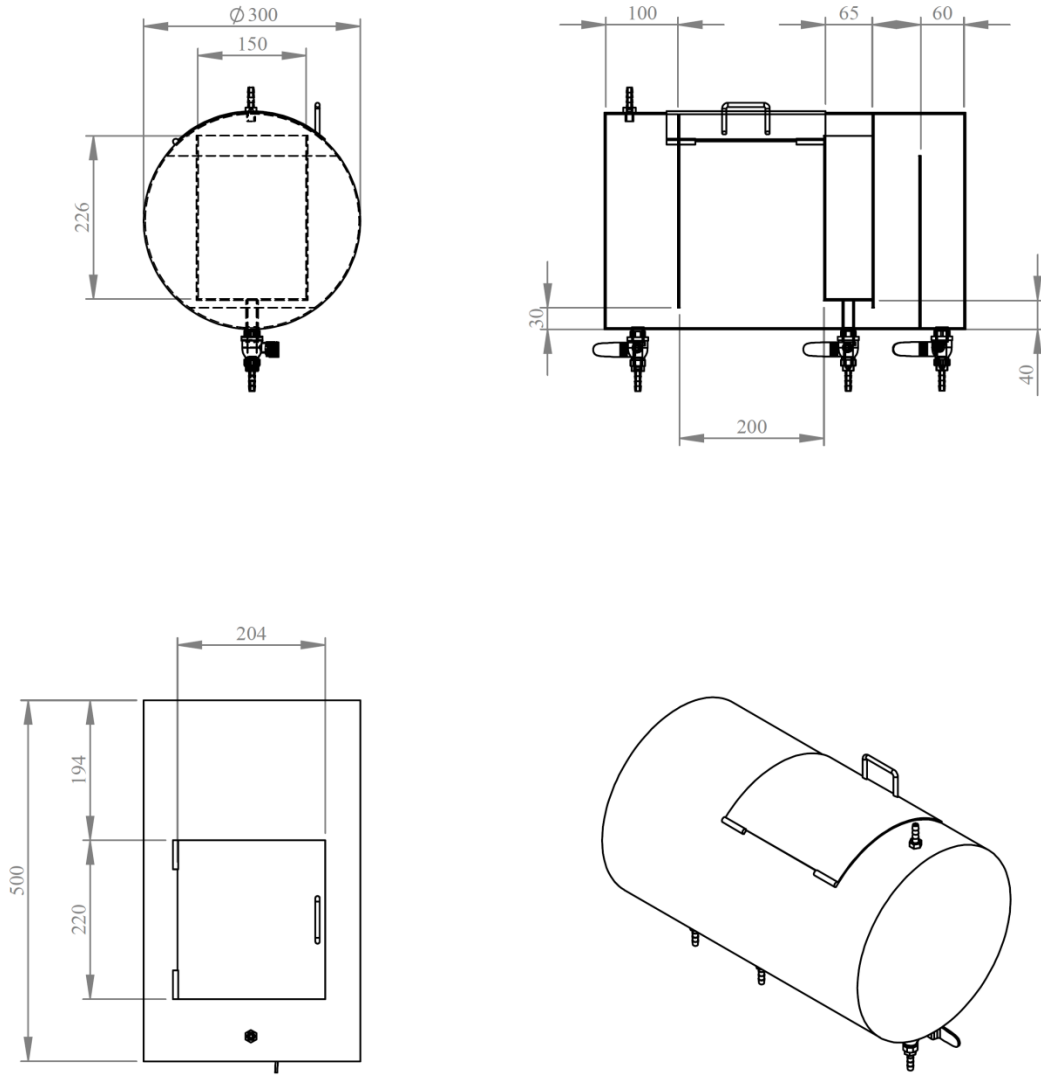
(หน่วย: มิลลิเมตร)

รูปที่ ๗ ๗ ถังน้ำมันลดกรดไขมันอิสระขั้นตอนที่ 1 และ 2



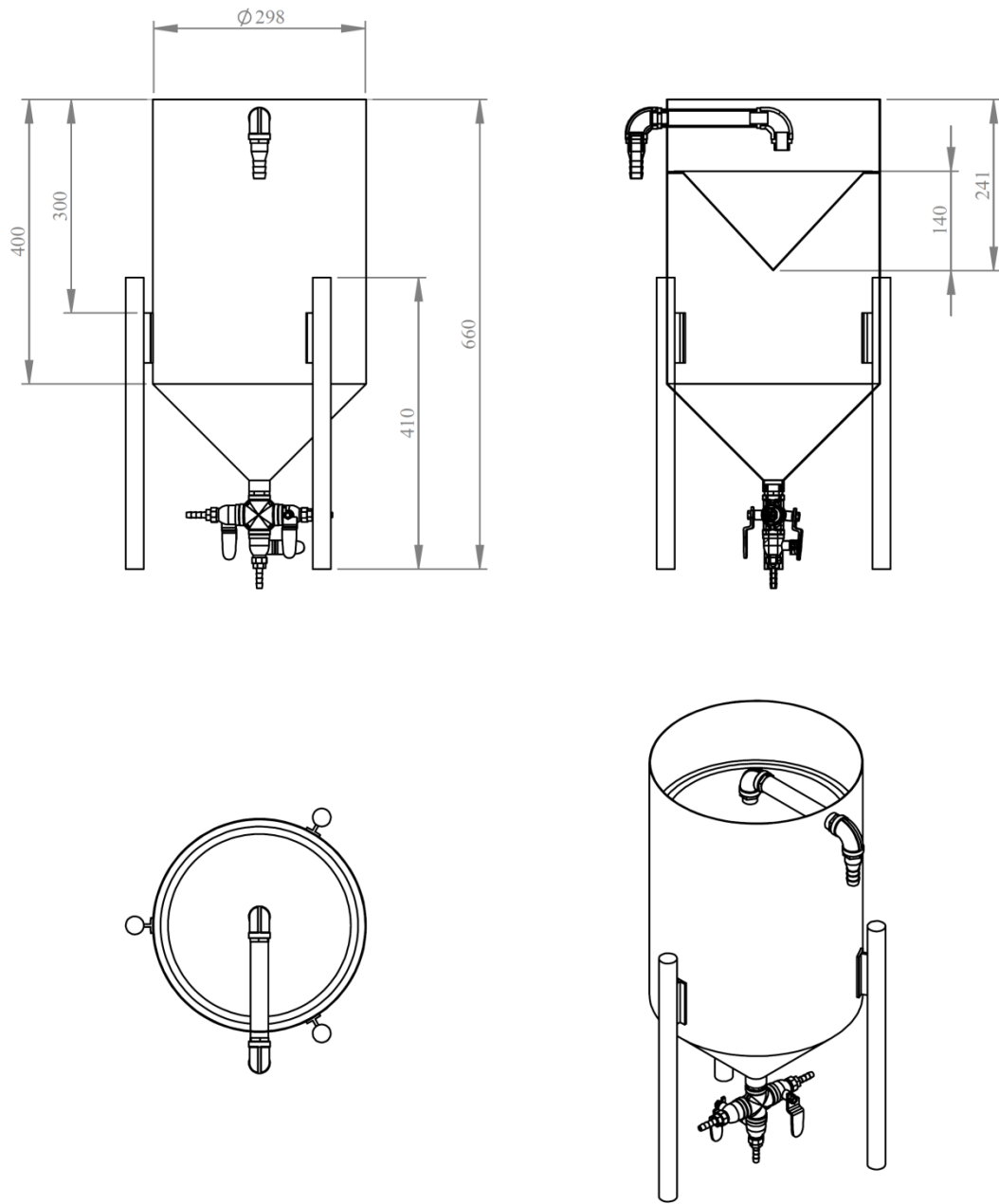
(หน่วย: มิลลิเมตร)

รูปที่ ๘ ถังเมทานอลชั้นตอนที่ ๒



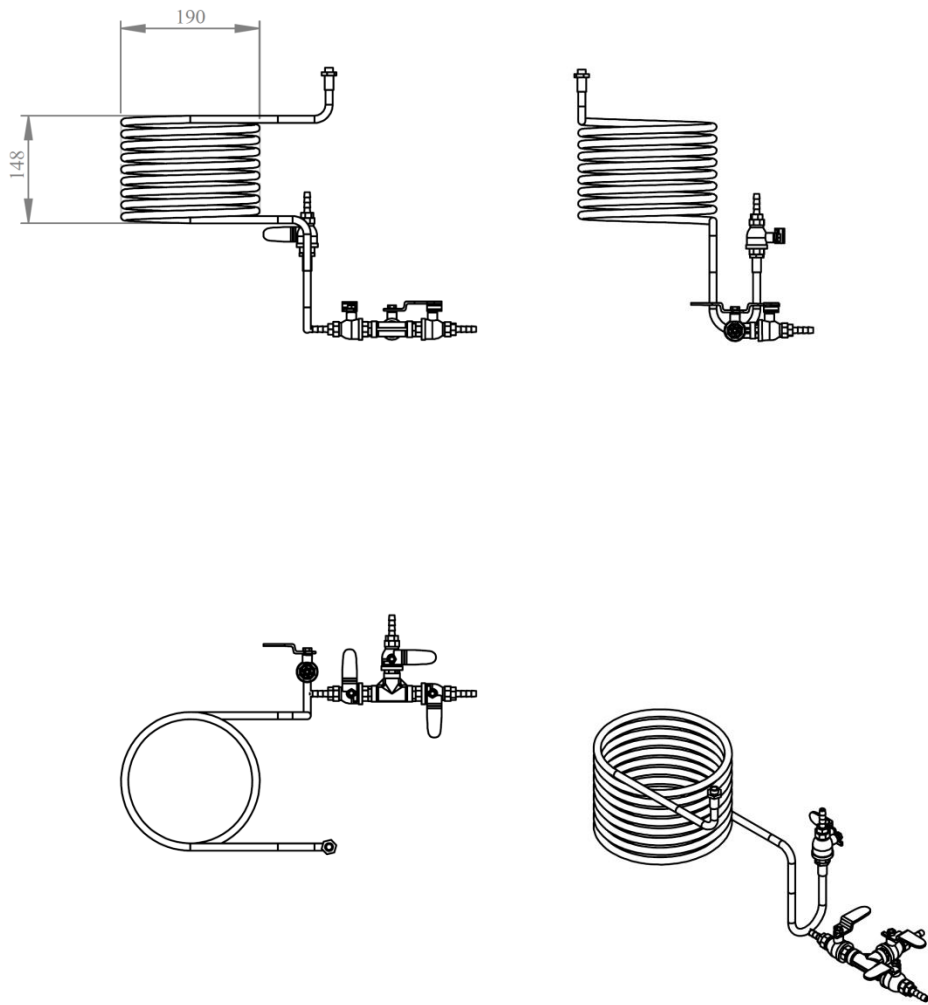
(หน่วย: มิลลิเมตร)

รูปที่ ๙ ถังแยกชั้นของชั้นตอนที่ ๒



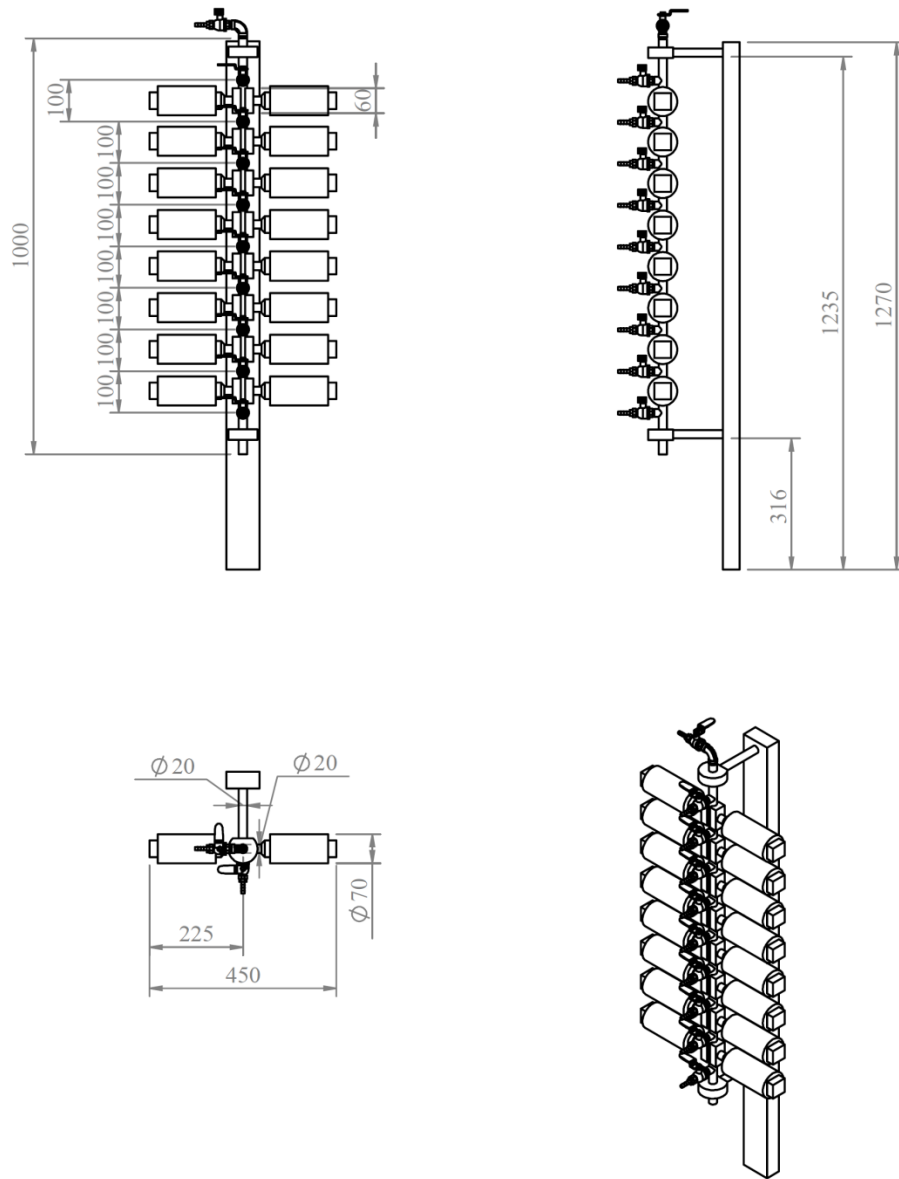
(หน่วย: มิลลิเมตร)

รูปที่ ๑๐ ถังสารละลายฟอสเฟตซีเอ็มเมทอกไซด์



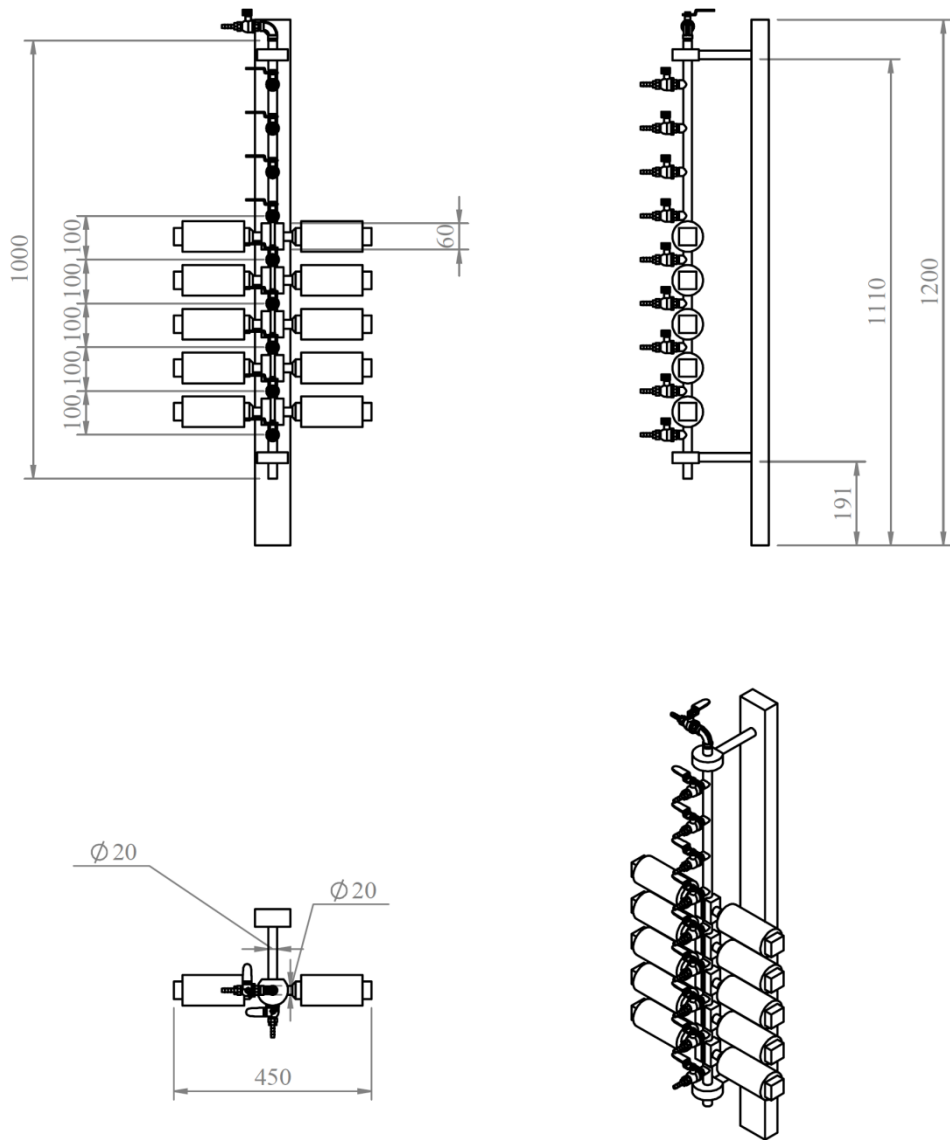
(หน่วย: มิลลิเมตร)

รูปที่ 11 ท่อผสมแบบสถิตชนิดกดเกลียว



(หน่วย: มิลลิเมตร)

รูปที่ 12 เครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิกขั้นตอนที่ 1



(หน่วย: มิลลิเมตร)

รูปที่ 13 เครื่องปฏิกรณ์คลื่นเสียงอัลตราโซนิกขั้นตอนที่ 2



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายทองศักดิ์ ประสิทธิ์  
 รหัสประจำตัวนักศึกษา 5810120021  
 วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2558

## ทุนการศึกษา

ทุนการศึกษาประเภททุนโครงการศิษย์ก้นกุฏิ ระดับปริญญาโท คณะ  
 วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

## การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

บทความวิจัย

Somnuk, K., Prasit, T. and Prateepchaikul, G. 2017. Effects of mixing technologies on continuous methyl ester production: Comparison of using plug flow, static mixer, and ultrasound clamp. Energy Conversion and Management. 140: 91-97.

ทองศักดิ์ ประสิทธิ์ และ กฤษ สมนึก. 2017. กระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากกรดไขมันปาล์มแบบหมุนวนด้วยท่อผสมแบบสถิตชนิดขดเกลียว. วารสารวิจัยเทคโนโลยีนวัตกรรม. ปีที่ 1. ฉบับที่ 1 หน้า 99-108.

การประชุมทางวิชาการ

ทองศักดิ์ ประสิทธิ์, ณัฐพล สร้อยสุวรรณ, อาริษา โสภากาจารย์ และ กฤษ สมนึก, 2559. การศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิกช่วยในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากกรดไขมันด้วยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันแบบกะ, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30, 6-8 กรกฎาคม 2559, จังหวัดสงขลา, หน้า 1240-1245.