



การผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพด้วยกระบวนการคลีนอัลตราโซนิคร่วมกับ
คลื่นรังสีไมโครเวฟ

โดย

นายอุกฤษณ์ สัมผัสमान

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
พ.ศ. 2552

การผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพด้วยกระบวนการคลีนอัลตราโซนิคร่วมกับ
คลื่นรังสีไมโครเวฟ

โดย

นายอุกฤษณ์ สมัครสมาน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

พ.ศ. 2552

Biodiesel Production by Using Ultrasonic Wave Combined with
Microwave Irradiation

By

Mr. Ukrit Samaksaman

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in
Energy and Environmental Technology Management
Department of Chemical Engineering
Faculty of Engineering
Thammasat University
2009

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

วิทยานิพนธ์

ของ

นายอุกฤษณ์ สัมผัสมาน

เรื่อง

การผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพด้วยกระบวนการกลั่นอัลตราโซนิกร่วมกับคลื่นรังสีไมโครเวฟ

ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

เมื่อ วันที่ 30 เมษายน พ.ศ. 2552

ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันวิสาข์ สกลภาพ)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.นุรักษ์ กฤษดานุรักษ์)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์ ดร.ศิริวิทย์ บัวเจริญ)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(อาจารย์ ดร.อาทิตย์ เนรมิตตกพงศ์)

คณบดี

(รองศาสตราจารย์ ดร.อุรยา วิสกุล)

บทคัดย่อ

การผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ โดยผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันพืช กับเมทานอล ภายใต้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ (โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์) ซึ่งกระบวนการนี้จะถูกเร่งปฏิกิริยาด้วยคลื่นอัลตราโซนิกพร้อมกับคลื่นรังสีไมโครเวฟ สภาวะที่ศึกษา ได้แก่ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันพืชต่อเมทานอล อัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิ กำลัง และเวลา ซึ่งการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ (ความหนาแน่น ความหนืด จุดวาบไฟ จุดเทไหล่ ปริมาณกรดไขมันอิสระ กลีเซอรินทั้งหมด และความถ่วงจำเพาะ) ของน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ผลิตได้นั้น เป็นไปตามวิธีการทดสอบมาตรฐาน ASTM และกรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน และพบว่าสภาวะที่เหมาะสมของการผลิตที่ได้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตสูงสุด และน้ำมันดีเซลชีวภาพมีคุณสมบัติอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน คือ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันพืชต่อเมทานอล 1/6 อัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1% ของน้ำหนักน้ำมัน ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และกำลังอัลตราโซนิก 200 วัตต์ เวลา 10 นาที ร่วมกับกำลังไมโครเวฟ 198 วัตต์ เวลา 3 นาที ซึ่งการใช้คลื่นอัลตราโซนิกพร้อมกับคลื่นรังสีไมโครเวฟเป็นเทคนิคที่คาดหวังได้ว่า สามารถผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพได้ปริมาณ 1 กิโลกรัม โดยมีค่าการใช้พลังงาน เท่ากับ 254.33 วัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัม ซึ่งน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ผลิตได้จากน้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันทอดใช้แล้ว มีเปอร์เซ็นต์ผลผลิตสูงสุด เท่ากับ 99.41 97.35 และ 93.15% ตามลำดับ และการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันที่สามารถระเหยได้ ด้วยเทคนิคไดนามิคเฮดสเปซก๊าซโครมาโทกราฟีและแมสสเปกโตรมิเตอร์ พบว่า เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันที่สามารถระเหยได้ มีค่าเท่ากับ 99.43 99.14 และ 99.07% ตามลำดับ

Abstract

Biodiesel production was investigated via the transesterification of vegetable oil (both fresh and used one), methanol (MeOH) under homogeneous catalyst (KOH). The reaction was accelerated by using ultrasonic combined with microwave irradiation. Oil/MeOH molar ratio, catalyst amount, temperature, power and reaction time were being as studied parameters. Properties (density, kinematic viscosity, flash point, pour point, acid value, total glycerin, and specific gravity) of synthesized biodiesel were analyzed based on ASTM methods and Thai-regulations. The optimal condition for the highest conversion and standard regulated properties was at 1/6 oil/MeOH molar ratio, 1% wt of catalyst, 50°C, and a combination of ultrasonic of 200 W for 10 min with microwave of 198 W for 3 min. The combination of ultrasonic and microwave is quite promising technique, consuming energy 254.33 Wh/kg/1kg biodiesel production. Based on this condition, 99.4, 97.3, 93.1% conversion were obtained from palm oil, soybean oil, and used fry oil, respectively. The percentages of volatile methyl ester content were detected of 99.43, 99.14, and 99.07%, respectively, analyzed by DHS-GC-MS technique.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติ ด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย เครือข่ายมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัย อุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.นุรักษ์ กฤษดานุรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา ให้โอกาสและแนะนำความรู้ที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัย รวมไปถึงอำนวยความสะดวกให้งานวิจัยนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.ศิริวิทย์ บัวเจริญ อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้คำปรึกษาและชี้แนะความรู้ อีกทั้งอนุเคราะห์เครื่องมือในการทดสอบคุณสมบัติน้ำมัน และขอขอบคุณ คุณสุเทพ เกตษา เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการเคมี ที่ให้ความช่วยเหลือด้านการทดสอบคุณสมบัติน้ำมัน

ขอขอบคุณ แผนกห้องปฏิบัติการเคมี บริษัท เบลตันอินดัสเตรียล (ประเทศไทย) จำกัด ที่อนุเคราะห์เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ (DHS-GC-MS และ FT-IR) และขอขอบคุณ ฝ่ายวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมและเชื้อเพลิงทางเลือก สถาบันวิจัยและเทคโนโลยี ปตท. ที่อนุเคราะห์สารมาตรฐานและแนะนำวิธีการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำมัน

ขอขอบคุณพี่ๆ น้องๆ และเพื่อนๆ ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ รวมไปถึงกำลังใจที่ดีเสมอมา และสุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และญาติพี่น้อง ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจด้วยดีเสมอมา และได้มอบโอกาสทางการศึกษาให้แก่ข้าพเจ้าจนสำเร็จการศึกษา

อุกฤษฏ์ สมัครสมาน
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
พ.ศ. 2552

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(1)
กิตติกรรมประกาศ.....	(3)
สารบัญตาราง.....	(7)
สารบัญภาพประกอบ.....	(8)
 บทที่	
1. บทนำ.....	1-4
1.1 หลักการและเหตุผล	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2. การทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง	5-29
2.1 น้ำมันดีเซล	5
2.1.1 การแบ่งประเภทน้ำมันดีเซลของประเทศไทย	5
2.1.2 มาตรฐานยูโร 4.....	5
2.1.3 คุณสมบัติพื้นฐานที่สำคัญของน้ำมันดีเซล.....	6
2.2 น้ำมันดีเซลทางเลือก	8
2.2.1 น้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์.....	8
2.2.2 สมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันพืช.....	9
2.2.3 การพัฒนาคุณสมบัติของน้ำมันพืชเพื่อใช้ทดแทนน้ำดีเซล.....	10
2.2.4 น้ำมันดีเซลชีวภาพ.....	13

สารบัญ(ต่อ)

2.2.5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน.....	16
2.2.6 กระบวนการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ.....	18
2.2.7 คุณสมบัติและการกำหนดมาตรฐานของน้ำมันดีเซลชีวภาพ.....	19
2.2.8 คุณสมบัติบางประการที่มีผลกระทบต่อเครื่องยนต์.....	20
2.2.9 การเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ.....	21
2.3 เทคโนโลยีของคลื่นอัลตราโซนิกและคลื่นรังสีไมโครเวฟ.....	22
2.3.1 คลื่นอัลตราโซนิก	22
2.3.2 คลื่นรังสีไมโครเวฟ	25
3. วิธีการวิจัย.....	30-38
3.1 การทดลอง.....	30
3.1.1 สารเคมีและวัตถุดิบ	30
3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	31
3.1.3 เครื่องมือวิเคราะห์.....	31
3.2 วิธีการทดลอง.....	33
3.2.1 การคำนวณอัตราส่วนอย่างต่ำของสารตั้งต้น.....	33
3.2.2 การศึกษาสภาวะของกระบวนการคลื่นอัลตราโซนิกร่วมกับคลื่นรังสีไมโครเวฟ	33
3.2.2.1 การศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มต่อเมทานอลและอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์.....	33
3.2.2.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการร่วม.	35
3.2.2.3 การศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมของกระบวนการคลื่นอัลตราโซนิกร่วมกับคลื่นรังสีไมโครเวฟ	36
3.2.2.4 การศึกษาเปรียบเทียบกระบวนการผลิตแบบการกวนเชิงกลแบบแยกส่วน (อัลตราโซนิกและไมโครเวฟ) และแบบกระบวนการร่วม	37
3.2.3 การผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพจากวัตถุดิบน้ำมันชนิดต่างๆ.....	37

สารบัญ(ต่อ)

3.2.3.1 การเตรียมวัตถุดิบน้ำมันทอดใช้แล้ว.....	37
3.2.3.2 การผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ.....	38
4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล.....	39-53
4.1 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการร่วม	39
4.1.1 ผลการศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล และ อัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์.....	40
4.1.2 ผลการศึกษาสภาวะของกำลังและเวลาที่เหมาะสม ของกระบวนการ คลีนอัลตราโซนิคร่วมกับคลื่นรังสีไมโครเวฟ.....	42
4.1.3 ผลการศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมของกระบวนการคลีนอัลตราโซนิก ร่วมกับคลื่นรังสีไมโครเวฟ.....	45
4.1.4 ผลการศึกษาเปรียบเทียบกระบวนการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ ด้วย กระบวนการกวนเชิงกล กระบวนการแยกส่วน (อัลตราโซนิกและไมโครเวฟ) และ กระบวนการร่วม	46
4.1.5 ผลการศึกษาการใช้พลังงานของการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ ด้วย กระบวนการกวนเชิงกล กระบวนการแยกส่วน (อัลตราโซนิกและไมโครเวฟ) และ กระบวนการร่วม	47
4.2 ผลการศึกษาเปรียบเทียบวัตถุดิบน้ำมันแต่ละชนิด.....	49
4.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของน้ำมันดีเซลชีวภาพ	51
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	54-55
บรรณานุกรม	56-59
ภาคผนวก.....	60-82
ประวัติการศึกษา.....	83

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 มาตรฐานคุณภาพน้ำมันดีเซล ASTM D975 และน้ำมันดีเซลชีวภาพ ASTM D6751	7
2.2 มาตรฐานน้ำมันเชื้อเพลิง และมาตรฐานการปล่อยมลพิษของสหภาพยุโรป	7
2.3 สมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันพืชชนิดต่างๆ	9
2.4 เนื้อที่ให้ผล ผลผลิต ผลผลิตต่อไร่ และราคาผลผลิตปาล์มน้ำมัน ช่วงปี พ.ศ. 2545-2549	14
2.5 สมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันดีเซลชีวภาพของน้ำมันชนิดต่างๆ	20
3.1 การออกแบบการทดลองในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการร่วม	36
4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติน้ำมันดีเซลชีวภาพ	41
4.2 ศึกษาเปรียบเทียบการใช้พลังงานของกระบวนการผลิตแต่ละประเภท	48
4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติน้ำมันดีเซลชีวภาพจากวัตถุดิบน้ำมันแต่ละชนิด	50

สารบัญภาพประกอบ

ภาพที่	หน้า
2.1 ปฏิกริยารวมตัวระหว่างกลีเซอรินและกรดไขมัน.....	8
2.2 กระบวนการแตกตัวด้วยความร้อนของไตรกลีเซอไรด์	11
2.3 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์กับเมทานอล.....	13
2.4 ขั้นตอนการเกิดปฏิกริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน	16
2.5 กลไกการเกิดปฏิกริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันที่มีต่างเป็นตัวเร่งปฏิกริยา.....	17
2.6 ปรากฏการณ์ควิเตชันของคลื่นอัลตราโซนิก.....	23
2.7 การเกิดปฏิกริยาภายในของคลื่นรังสีไมโครเวฟกับวัสดุต่างชนิดกัน.....	25
2.8 ผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีต่อพฤติกรรมของชีวไฟฟ้า	26
2.9 ลักษณะการใช้งานตามความถี่ของคลื่นชนิดต่างๆ.....	27
2.10 แนวคิดการใช้ประโยชน์ร่วมของกระบวนการคลื่นอัลตราโซนิกและคลื่นรังสีไมโครเวฟ	29
3.1 การผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพด้วยกระบวนการคลื่นอัลตราโซนิกร่วมกับคลื่นรังสีไมโครเวฟ	34
3.2 การไตเตรตหาปริมาณกรดไขมันอิสระตามมาตรฐาน ASTM D 664	38
4.1 ผลการศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล.....	39
4.2 ผลการศึกษาอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์.....	40
4.3 ผลของกำลังและเวลาที่มีผลต่อกระบวนการร่วมในหน่วยอัลตราโซนิก.....	43
4.4 ผลของกำลังและเวลาที่มีผลต่อกระบวนการร่วมในหน่วยไมโครเวฟ.....	44
4.5 ผลของอุณหภูมิที่เหมาะสมของกระบวนการร่วม.....	46
4.6 ปริมาณเปอร์เซ็นต์ผลผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพของแต่ละกระบวนการ.....	47
4.7 สมดุลมวลของการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ ด้วยกระบวนการคลื่นอัลตราโซนิกร่วมกับคลื่นรังสีไมโครเวฟ.....	48
4.8 ปริมาณเปอร์เซ็นต์ผลผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ได้จากวัตถุดิบชนิดต่างๆ.....	49
4.9 ลักษณะสีของน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ได้จากวัตถุดิบชนิดต่างๆ.....	50
4.10 IR spectrum ของน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ได้จากน้ำมันปาล์ม.....	52
4.11 โคโรมาโทแกรม และแมสสเปกตรัมของน้ำมันดีเซลชีวภาพ.....	53

บทที่ 1

บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผล

นับตั้งแต่การปฏิวัติอุตสาหกรรมมาจนถึงปัจจุบัน ถ่านหินและน้ำมัน รวมถึงก๊าซธรรมชาติ นับว่าเป็นแหล่งพลังงานหลักของมนุษย์ เนื่องจากภาคอุตสาหกรรม (รวมภาคการผลิตไฟฟ้า) และภาคคมนาคมขนส่ง ซึ่งเป็นภาคส่วนที่มีการใช้พลังงานมากที่สุดในระบบเศรษฐกิจของโลกยุคปัจจุบัน ล้วนแล้วแต่ใช้ถ่านหิน น้ำมันและก๊าซธรรมชาติเป็นแหล่งพลังงาน นอกจากนี้การขยายตัวของอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ไปทั่วโลก ยิ่งทำให้มนุษย์ต้องพึ่งพาน้ำมันอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ การนำเชื้อเพลิงจากฟอสซิลมาเผาเพื่อผลิตพลังงานความร้อนและแปรรูปพลังงานความร้อนเป็นพลังงานรูปแบบอื่นๆ ในกระบวนการแปรรูปพลังงานจะเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และสะสมอยู่ในชั้นบรรยากาศ ซึ่งจะเพิ่มปริมาณการสะสมมากขึ้นตามปริมาณการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สะสมอยู่ในชั้นบรรยากาศเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดสภาวะเรือนกระจก (Greenhouse effect) และส่งผลให้เกิดสภาวะโลกร้อน (Global warming) ที่เป็นต้นเหตุของปรากฏการณ์แปรปรวนของภูมิอากาศโลก (Climate change) (วีรชัย สุนทรรังสรรค์, 2551)

ปัจจุบันประเทศไทยมีความต้องการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นตลอดเวลา ซึ่งพลังงานเป็นปัจจัยหลักในการผลิต ในปี พ.ศ. 2549 ทั้งประเทศใช้พลังงานคิดเป็นมูลค่าสูงถึง 15.6% ของมูลค่าผลิตภัณฑ์มวลรวมในประเทศ (Gross Domestic Product; GDP) ซึ่งประเทศไทยมีแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงในปริมาณจำกัด ไม่เพียงพอต่อความต้องการในการบริโภค ทำให้ต้องพึ่งพานำเข้าพลังงานกว่า 90% ของการใช้พลังงานทั้งหมด จากการที่ประเทศไทยพึ่งพาพลังงานนำเข้า โดยเฉพาะพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล ส่งผลต่อความมั่นคงด้านพลังงาน เนื่องจากปัญหาาราคาพลังงานที่ผันผวนและสูงขึ้นอย่างไม่หยุดยั้ง และการเพิ่มขึ้นของปัญหาสภาพแวดล้อมโลก จึงได้มีความพยายามที่จะหาแหล่งพลังงานอื่นๆ ที่ไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม มาใช้แทนพลังงานดั้งเดิมที่ได้จากเชื้อเพลิงฟอสซิล แหล่งพลังงานดังกล่าวได้แก่ พลังงานทดแทน (Alternative energy) และพลังงานหมุนเวียน (Renewable energy) (ธเนศ อุทิศธรรม และพิศมัย เจนวนิชปัญญกุล, 2551)

การเลือกใช้พลังงานจากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ทดแทนพลังงานจากน้ำมันปิโตรเลียมที่ได้จากเชื้อเพลิงฟอสซิล เป็นทางเลือกหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นพลังงานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและเป็นแหล่งพลังงานที่สามารถสร้างทดแทนขึ้นมาใหม่ได้ (Renewable resource) แต่ปัญหาของการใช้น้ำมันพืชทดแทนน้ำมันดีเซลคือ น้ำมันพืชมีความหนืดค่อนข้างสูง เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของไตรกลีเซอไรด์ เมื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลเป็นระยะเวลานาน อาจเกิดปัญหาการอุดตันของหัวฉีด จึงทำให้มีการค้นคว้าอนุพันธ์อื่นๆ ของไตรกลีเซอไรด์ เพื่อให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลและเหมาะสมกับการใช้งาน

น้ำมันดีเซลชีวภาพ (Biodiesel) เป็นอนุพันธ์ของไตรกลีเซอไรด์หรือเอสเทอร์ของกรดไขมัน (Ester of fatty acid) ที่ได้จากกระบวนการทางเคมี เรียกว่า ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification reaction) ระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์ เช่น เมทานอล หรือเอทานอล โดยมีกรดหรือด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะได้กลีเซอรินเป็นผลพลอยได้ วัตถุประสงค์สำคัญในการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ คือ น้ำมันพืช ประเทศไทยสามารถผลิตน้ำมันพืชได้เอง เช่น น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันมะพร้าว น้ำมันงา น้ำมันละหุ่ง เป็นต้น ส่วนน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ที่ผ่านการทอดแล้วนั้น สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบได้ และเป็นการลดการใช้น้ำมันทอดซ้ำ

ในปัจจุบันการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพนิยมใช้กระบวนการผลิตแบบกะหรือแบบดั้งเดิม โดยอาศัยความร้อน การกวนเชิงกล และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งเป็นกระบวนการผลิตที่มีหลายขั้นตอน ใช้ระยะเวลาในการผลิตค่อนข้างยาวนาน และพลังงานที่ถูกใช้ไปกับการผลิตก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย จึงได้มีการค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับเทคโนโลยีการผลิตอื่นๆ ได้แก่ กระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง (Continuous process), แบบสองขั้น (Two-stage catalysts), แบบสภาวะวิกฤต (Supercritical process) เป็นต้น เพื่อตอบสนองการผลิตในเชิงพาณิชย์ที่ต้องการผลิตภัณณ์น้ำมันดีเซลชีวภาพคุณภาพดีสม่ำเสมอและปริมาณเปอร์เซ็นต์ผลผลิตที่ได้สูง จากกระบวนการผลิตแบบดั้งเดิมยังมีข้อด้อยในด้านระยะเวลาของการผลิตและปริมาณเปอร์เซ็นต์ผลผลิตที่ได้ รวมไปถึงการสูญเสียพลังงานจากการผลิต จึงเป็นจุดเริ่มต้นให้เกิดความสนใจถึงปัจจัยของการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน โดยอาศัยพลังงานจากคลื่นความถี่สูงเหนือเสียงและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (คลื่นอัลตราโซนิกและคลื่นรังสีไมโครเวฟ) เพื่อลดระยะเวลาในการผลิต และเพิ่มปริมาณเปอร์เซ็นต์ผลผลิต จากงานวิจัยที่ผ่านมาในกลุ่มงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิกเป็นเครื่องมือในการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพแทนการผลิตแบบดั้งเดิม กลไกที่เกิดจากการใช้คลื่นเสียงต่อระบบทางเคมีเป็นผลให้ของเหลวเกิดปรากฏการณ์ช่องว่างของเสียง (Cavitations) ทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีอย่างสมบูรณ์ภายในระยะเวลา 10 - 40 นาที แต่ในกระบวนการแยกชั้น

ระหว่างน้ำมันดีเซลชีวภาพกับกลีเซอรินยังคงใช้ระยะเวลาานพอสมควร และได้ศึกษากระบวนการที่ทำให้เกิดการแยกชั้นระหว่างน้ำมันดีเซลชีวภาพกับกลีเซอริน เป็นงานวิจัยที่เกี่ยวกับการใช้พลังงานความร้อนจากคลื่นรังสีไมโครเวฟในการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ สามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาและช่วยให้การแยกชั้นเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ภายในระยะเวลา 2 - 3 นาที แต่จะเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง คือ เกิดสบู่และเจล สำหรับการประยุกต์ใช้กระบวนการของคลื่นทั้งสองชนิดในการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพในงานวิจัยนี้ จะมุ่งเน้นในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน โดยมีต่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และศึกษาความสามารถในการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการร่วม เพื่อเพิ่มทางเลือกของกระบวนการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพให้เหมาะสมกับการผลิตในเชิงพาณิชย์ และเพื่อประโยชน์ต่องานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับน้ำมันดีเซลชีวภาพต่อไปในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน โดยมีต่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ (Homogeneous catalyst) ด้วยเทคนิคของกระบวนการคลื่นอัลตราโซนิกร่วมกับคลื่นรังสีไมโครเวฟ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงตัวแปรต่างๆ ที่คาดว่าจะส่งผลต่อกระบวนการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ โดยในที่นี้จะพิจารณาถึงตัวแปรที่สนใจในการศึกษา ดังนี้

1. ประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตและคุณภาพของน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ได้
2. อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล และอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)
3. กระบวนการคลื่นอัลตราโซนิก ศึกษาผลของกำลังอัลตราโซนิก 100 150 และ 200 วัตต์ และเวลา 5 8 10 20 และ 30 นาที
4. กระบวนการคลื่นรังสีไมโครเวฟ ศึกษาผลของกำลังไมโครเวฟ 102 198 และ 330 วัตต์ และเวลา 1 2 3 4 และ 5 นาที
5. อุณหภูมิของกระบวนการร่วม ศึกษาผลของอุณหภูมิที่อุณหภูมิห้อง 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส

6. เปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต ได้แก่ กระบวนการแบบการกวนเชิงกล กระบวนการอัลตราโซนิก กระบวนการไมโครเวฟ และกระบวนการร่วม

7. ผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพจากวัตถุดิบต่างๆ ได้แก่ น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันทอดใช้แล้ว

จากนั้นทำการตรวจวัดคุณสมบัติต่างๆ ของน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ผลิตได้ ได้แก่ ปริมาณเปอร์เซ็นต์ผลผลิตที่ได้ (% Yield) ความหนาแน่น (Density; ASTM D1298) ความหนืด (Kinematic viscosity; ASTM D445) จุดวาบไฟ (Flash point; ASTM D93) จุดเทไหล (Pour point; ASTM D97) ปริมาณกรดไขมันอิสระ (Acid value; ATSM D664) กลีเซอรินทั้งหมด (Total glycerin; GC-FID เพียงเคียง ASTM D6584) ความถ่วงจำเพาะ (Hydrometer) และวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี ได้แก่ การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันนัลของสารประกอบด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดเปกโตรสโกปี (FT-IR) และการวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบของเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันที่สามารถระเหยได้ เมื่อเทียบกับสารประกอบทั้งหมดที่สามารถระเหยได้ ด้วยเทคนิคไดนามิกเฮดสเปซก๊าซโครมาโทกราฟีและแมสสเปกโตรมิเตอร์ (DHS-GC-MS) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลต่อไป

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

งานวิจัยนี้ก่อให้เกิดประโยชน์ในด้านเทคโนโลยีการผลิต ด้านการใช้พลังงานและด้านการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม เนื่องจากขอบเขตงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเทคโนโลยีของการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ จากคลื่นอัลตราโซนิกและคลื่นรังสีไมโครเวฟในการเร่งปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันที่รวดเร็วและมีประสิทธิภาพสูง เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตแบบดั้งเดิม เพื่อนำไปสู่การพัฒนากระบวนการผลิตในระดับอุตสาหกรรม สามารถลดระยะเวลาของการผลิต ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพที่ดีสม่ำเสมอ รวมไปถึงสามารถลดการใช้พลังงานจากการผลิต อีกทั้งการใช้น้ำมันดีเซลชีวภาพช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการใช้น้ำมันปิโตรเลียมได้อีกทางหนึ่ง

บทที่ 2

การทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำมันดีเซล

น้ำมันดีเซล คือ น้ำมันปิโตรเลียมที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ดีเซล น้ำมันดีเซลเป็นผลิตภัณฑ์ที่ประกอบไปด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำพวกพาราฟิน แนฟทีน และอะโรมาติก น้ำมันดีเซลมีจำนวนคาร์บอนอะตอมตั้งแต่ 10 ถึง 20 อะตอม ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบที่ความดันบรรยากาศ ในช่วงอุณหภูมิ 220 - 370 องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) และได้จากกระบวนการเปลี่ยนสภาพโมเลกุล ได้แก่ หน่วยแตกโมเลกุลด้วยความร้อน (Thermal cracking) หน่วยแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic cracking) และกระบวนการไฮโดรแครกกิง (Hydro cracking) ซึ่งน้ำมันที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันหนักเหล่านี้จะมีกำมะถันปนอยู่มาก จำเป็นต้องผ่านการกำจัดกำมะถันก่อน แล้วจึงนำมาผสมกับน้ำมันดีเซลที่ได้จากการกลั่นในสัดส่วนที่เหมาะสม เพื่อให้ได้น้ำมันดีเซลที่มีคุณภาพตามต้องการ การทดสอบคุณภาพของน้ำมันดีเซลเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D975 (ASTM; American Society for Testing and Materials) ซึ่งเป็นมาตรฐานของประเทศสหรัฐอเมริกา แสดงดังตารางที่ 2.1 ซึ่งข้อกำหนดในแต่ละประเทศขึ้นอยู่กับภูมิประเทศและสภาพอากาศที่ใช้งาน (นันทมนตรี จันทรศิริสกุล, 2546)

2.1.1 การแบ่งประเภทน้ำมันดีเซลของประเทศไทย แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. น้ำมันดีเซลสำหรับเครื่องยนต์รอบเร็ว (Automotive diesel oil) หรือน้ำมันโซล่า เหมาะสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลของยานยนต์ และเครื่องจักรทุกชนิดที่มีความเร็วรอบสูงกว่า 1,000 รอบต่อวินาที หรือเครื่องยนต์ที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบ เช่น รถยนต์ รถบรรทุก รถไฟ เป็นต้น

2. น้ำมันดีเซลสำหรับเครื่องยนต์รอบช้า (Industrial diesel oil) หรือน้ำมันซีโล่ เป็นน้ำมันผสมระหว่างน้ำมันดีเซลหมุนเร็วกับน้ำมันเตา ใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลที่มีความเร็วรอบปานกลางหรือรอบต่ำประมาณ 500 - 1,000 รอบต่อวินาที เหมาะสำหรับการใช้งานหนักหรือความเร็วรอบคงที่ เช่น เครื่องยนต์ของเรือเดินสมุทร สถานีผลิตไฟฟ้า สถานีสูบน้ำ เป็นต้น

2.1.2 มาตรฐานยูโร 4 (European emission standards; EURO IV)

มาตรฐานยูโร 4 คือ มาตรฐานที่ใช้ควบคุมการปล่อยมลพิษของรถยนต์ใหม่ที่กำหนดในประเภกลุ่มสหภาพยุโรป โดยมีการควบคุมระดับมลพิษที่เกิดจากสารคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) สารไฮโดรคาร์บอน (HC) สารไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM) และฝุ่นควัน

การควบคุมการปล่อยมลพิษตามมาตรฐานยูโรนั้น มีองค์ประกอบหลักสำคัญ 2 ส่วน คือ คุณภาพน้ำมันเชื้อเพลิง และประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2546 ประเทศไทยได้บังคับใช้มาตรฐานคุณภาพน้ำมันเชื้อเพลิงระดับมาตรฐานยูโร 3 และเป็นประเทศแรกในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ที่บังคับใช้มาตรฐานนี้ ในส่วนของมาตรฐานยูโร 4 คณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ ได้มีมติเมื่อวันที่ 4 ธันวาคม พ.ศ. 2549 ให้ยกระดับมาตรฐานข้อกำหนดคุณภาพน้ำมันเชื้อเพลิงในประเทศไทย เป็นมาตรฐานยูโร 4 ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2555 เป็นต้นไป โดยลักษณะเด่นของน้ำมันเชื้อเพลิง คือ ปริมาณกำมะถันลดลง 7 เท่า เพิ่มค่าซีเทน และลดสารพอลิอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (PAH) มาตรฐานน้ำมันและการปล่อยมลพิษของสหภาพยุโรปแสดงดังตารางที่ 2.2 (ไทยออยล์, 2551)

2.1.3 คุณสมบัติพื้นฐานที่สำคัญของน้ำมันดีเซล แบ่งออกเป็น 4 ประการ ดังนี้

1. คุณสมบัติด้านการจุดระเบิดหรือติดไฟ (Ignition quality) คือ เลขซีเทน (Cetane number) เป็นค่าที่ได้จากการวัดคุณสมบัติการจุดติดไฟของน้ำมันดีเซล น้ำมันดีเซลที่มีเลขซีเทนสูง เมื่อถูกฉีดเข้าไปในเครื่องยนต์จะติดได้ง่าย ทำให้เกิดไอเสียน้อย หรืออีกค่าหนึ่งที่ใช้ในการเทียบเคียงเลขซีเทน คือ ดัชนีซีเทน (Cetane index) เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณจากความหนาแน่นและการระเหยของน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดนั้นๆ ซึ่งให้ค่าที่ค่อนข้างใกล้เคียงกับเลขซีเทน

2. คุณสมบัติการไหล ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติต่างๆ ของน้ำมันดังนี้

- 2.1 ค่าความหนืด เป็นค่าที่บ่งบอกความต้านทานการไหลของน้ำมัน ซึ่งน้ำมันที่มีค่าความหนืดน้อยจะไหลได้ดี ค่าความหนืดมีผลต่อระบบการฉีดจ่ายน้ำมัน และการหล่อลื่นปั๊มเชื้อเพลิงแรงดันสูง

- 2.2 จุดเทไหล เป็นค่าแสดงอุณหภูมิของน้ำมันที่ยังคงสามารถเทไหลได้ ที่สภาวะอุณหภูมิต่ำ

2.3 จุดหมอก เป็นค่าแสดงอุณหภูมิของน้ำมันที่เริ่มเป็นไข ที่สภาวะอุณหภูมิต่ำ

3. คุณสมบัติการระเหย (Volatility) คือ ค่าความสามารถในการระเหยตัวของน้ำมัน ซึ่งสามารถกำหนดได้จาก ค่าอุณหภูมิการกลั่นและจุดวาบไฟ

4. ความสะอาด (Cleanliness) ต้องมีการควบคุมปริมาณสารปนเปื้อนที่มีอยู่ในน้ำมัน ทั้งก่อนและหลังการเผาไหม้ เพื่อป้องกันผลกระทบที่อาจจะเกิดขึ้นทั้งเครื่องยนต์และสิ่งแวดล้อม เช่น ปริมาณน้ำและตะกอน (Water and sediment) กากถ่าน (Carbon residue) อนุภาคของแข็ง (Particulate matter) ปริมาณกำมะถัน (Sulfur) และเถ้า (Ash) (นันทมนตรี จันทศิริสกุล, 2546 และ อนวัช ดุรงค์ภินันท์, 2547)

ตารางที่ 2.1

มาตรฐานคุณภาพน้ำมันดีเซล ASTM D975 และน้ำมันดีเซลชีวภาพ ASTM D6751

คุณสมบัติ	น้ำมันดีเซล (ASTM D975)	น้ำมันดีเซลชีวภาพ (ASTM D6751)
ความจุความร้อนต่ำสุด (Btu/gal)	~129,050	~118,170
ความหนืด ที่ 40 °C	1.3 ถึง 4.1	4.0 ถึง 6.0
ความถ่วงจำเพาะ ที่ 60 °F (kg/l)	0.85	0.88
ความหนาแน่น ที่ 15 °C (lb/gal)	7.079	7.328
น้ำและตะกอน (%ปริมาตร)	สูงสุด 0.05	สูงสุด 0.05
ปริมาณคาร์บอน (%น้ำหนัก)	87	77
ปริมาณไฮโดรเจน (%น้ำหนัก)	13	12
ปริมาณออกซิเจน (%น้ำหนัก)	0	11
ปริมาณซัลเฟอร์ (%น้ำหนัก)	สูงสุด 0.05	0.0 ถึง 0.0024
จุดเดือด (°C)	180 ถึง 340	315 ถึง 350
จุดวาบไฟ (°C)	60 ถึง 80	100 ถึง 170
จุดเกิดหมอก (°C)	-15 ถึง 5	-3 ถึง 12
จุดเทไหล (°C)	-35 ถึง -15	-15 ถึง 10
เลขซีเทน	40 ถึง 55	48 ถึง 65
ค่าการหล่อลื่น SLBOCLE (กรัม)	2,000 ถึง 5,000	มากกว่า 7,000
ค่าการหล่อลื่น HFRR (ไมครอน)	300 ถึง 600	น้อยกว่า 300

ที่มา : ไบโอดีเซล (Biodiesel), (อาภาณี เหลืองนฤมิตชัย, 2549)

ตารางที่ 2.2

มาตรฐานน้ำมันเชื้อเพลิง และมาตรฐานการปล่อยมลพิษของสหภาพยุโรป

มาตรฐาน	มาตรฐานน้ำมันเชื้อเพลิง					มาตรฐานการปล่อยมลพิษ				
	ความหนาแน่น (kg/m ³)	กำมะถัน (ppm)	พอลิอะโรมาติก (%)	อุณหภูมิ กลั่นตัว 95% (°C)	เลขซีเทน	CO (g/kWh)	HC (g/kWh)	NO _x (g/kWh)	PM (g/kWh)	ฝุ่น ควัน (m ⁻¹)
ยูโร 1	-	-	-	-	-	4.5	1.10	8.0	0.36	-
ยูโร 2	820/860	500	-	370	49	4.0	1.10	7.0	0.15	-
ยูโร 3	820/845	350	11	360	51	2.1	0.66	5.0	0.10	0.8
ยูโร 4	820/845	50	11	360	51	1.5	0.46	3.5	0.02	0.5
ยูโร 5	820/845	10	8	360	51	1.5	0.46	2.0	0.02	0.5

ที่มา : คำถาม-คำตอบเกี่ยวกับน้ำมันดีเซลมาตรฐาน EURO IV (ไทยออยล์, 2551).

2.2 น้ำมันดีเซลทางเลือก

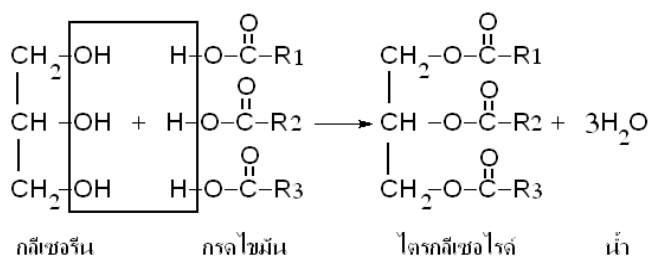
จากผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการขาดแคลนน้ำมันปิโตรเลียม และปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการใช้น้ำมันปิโตรเลียม ทำให้เกิดการตื่นตัวในด้านการใช้พลังงานหมุนเวียน เพื่อทดแทนการใช้พลังงานจากน้ำมันดีเซล เช่น การนำน้ำมันหรือไขมันจากพืชหรือสัตว์มาใช้ทดแทนน้ำมันดีเซล ซึ่งการใช้พลังงานหมุนเวียนชนิดนี้มีข้อดีหลายอย่าง คือ เป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มีอยู่ตามธรรมชาติ มีปริมาณกักเก็บต่อน้ำมันดีเซลอย่างมาก ช่วยลดการสะสมของก๊าซเรือนกระจก และเป็นที่ทราบโดยทั่วกันว่าพืชเจริญเติบโตและสังเคราะห์แสงโดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มีก๊าซออกซิเจนเป็นผลพลอยได้ อีกทั้งการใช้น้ำมันที่ได้จากพืชเป็นการช่วยเพิ่มมูลค่าผลผลิตทางการเกษตร

2.2.1 น้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ (Oil & Fat)

องค์ประกอบหลักของน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ คือ กรดไขมัน ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ กรดไขมันอิ่มตัว (Saturated fatty acid) และกรดไขมันไม่อิ่มตัว (Unsaturated fatty acid) ในน้ำมันแต่ละชนิดปริมาณสัดส่วนของกรดทั้งสองแตกต่างกัน ทำให้คุณสมบัติของน้ำมันแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน กรดไขมันที่พบในน้ำมันพืชส่วนใหญ่เป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัว โดยทั่วไปกรดไขมันจะมีจำนวนคาร์บอนเป็นเลขคู่เสมอ มีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่ 12 - 26 อะตอม ส่วนมากพบว่ามีจำนวนคาร์บอนเท่ากับ 16 และ 18 อะตอม ในธรรมชาติจะพบกรดไขมันที่อยู่ในรูปกรดไขมันอิสระปริมาณเล็กน้อย ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปเอซิลกลีเซอรอล (Acylglycerol) หรือ ไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) เกิดจากการรวมตัวของกรดไขมันกับกลีเซอริน แสดงดังภาพที่ 2.1 ถ้ามีกรดไขมันหนึ่งโมเลกุลทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของกลีเซอริน เรียก โมโนกลีเซอไรด์ (Monoglyceride) ถ้ากรดไขมันสองโมเลกุลทำปฏิกิริยา เรียก ไดกลีเซอไรด์ (Diglyceride) และถ้ากรดไขมันสามโมเลกุลทำปฏิกิริยา เรียก ไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) (ศิริวรรณ ตันอายุวรรณ, 2550)

ภาพที่ 2.1

ปฏิกิริยารวมตัวของระหว่างกลีเซอรินและกรดไขมัน



2.2.2 สมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันพืช

โดยทั่วไปน้ำมันพืชสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลได้โดยตรง เนื่องจากมีค่าความร้อนสูงอยู่ในช่วง 39 – 40 เมกะจูลต่อกิโลกรัม (MJ/kg) ซึ่งต่ำกว่าน้ำมันดีเซล (45 เมกะจูลต่อกิโลกรัม) เล็กน้อย แต่มีข้อจำกัดในด้านกายภาพบางประการ เช่น มีความหนืดคิเนเมติกสูง อยู่ในช่วง 30 – 40 เซนติสโตรค์ (cSt) ที่อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าน้ำมันดีเซลประมาณ 10 เท่า ความหนืดที่มีค่าสูงนี้เกิดจากขนาดโมเลกุลและลักษณะของโครงสร้างของไตรกลีเซอไรด์ที่มีขนาดใหญ่ โดยมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 600 – 900 ความหนืดสูงทำให้การฉีดน้ำมันเป็นฝอยได้ไม่ดี การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ และเกิดเขม่าที่หัวฉีดและคราบเขม่าทั่วไปในห้องเครื่อง นอกจากนี้ อาจเกิดการปนเปื้อนของน้ำมันเชื้อเพลิงเข้ากับน้ำมันเครื่องเกิดเป็นสลาฟอิลเมอร์ ทำให้ต้องเปลี่ยนน้ำมันหล่อลื่นอยู่บ่อยๆ (Schwab และคณะ, 1987 และ Meher และคณะ, 2004) ซึ่งคุณสมบัติในการใช้เป็นเชื้อเพลิงของน้ำมันพืชแต่ละชนิด แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3
สมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันพืชชนิดต่างๆ

น้ำมันพืช	ความ หนืด ที่ 38 °C	เลข ซีเทน	ค่า ความ ร้อน	จุด หมอก	จุด เท ไหล	จุด วาบ ไฟ	ความ หนาแน่น	Carbon residue	เถ้า	กำมะถัน
	mm ² /s	-	MJ/kg	°C	°C	°C	kg/L	%wt	%wt	%wt
ข้าวโพด	34.9	37.6	39.5	-1.1	-40.0	277	0.9095	0.24	0.010	0.01
เมล็ดฝ้าย	33.5	41.8	39.5	1.7	-15.0	234	0.9148	0.24	0.010	0.01
เมล็ดक्रमเบ	53.6	44.6	40.5	10.0	-12.2	274	0.9044	0.23	0.050	0.01
ถั่วลิสง	39.6	41.8	39.8	12.8	-6.7	271	0.9262	0.24	0.005	0.01
เมล็ดแรฟ	37.0	37.6	39.7	-3.9	-31.7	246	0.9115	0.30	0.054	0.01
ดอกคำฝอย	31.3	41.3	39.5	18.3	-6.7	260	0.9144	0.25	0.006	0.01
น้ำมันงา	35.5	40.2	39.3	-3.9	-9.4	260	0.9133	0.25	<0.010	0.01
ถั่วเหลือง	32.6	37.9	39.6	-3.9	-12.2	254	0.9138	0.27	<0.010	0.01
ทานตะวัน	33.9	37.1	39.6	7.2	-15.0	274	0.9161	0.23	<0.010	0.01
ปาล์ม	39.6	42.0	-	31.0	-	267	0.9180	-	-	-

ที่มา : การสังเคราะห์น้ำมันดีเซลชีวภาพในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ (อนวัช ดุรงค์ภินนท์, 2547)

การที่น้ำมันพืชมีความหนืดสูงกว่าน้ำมันดีเซล ทำให้หัวฉีดน้ำมันฉีดน้ำมันให้เป็นฝอยได้ยาก เกิดเป็นอุปสรรคต่อการป้อนน้ำมันเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ และเกิดการสันดาปไม่สมบูรณ์ นอกจากนี้แล้ว น้ำมันพืชมีคุณสมบัติที่ระเหยตัวกลายเป็นไอได้ช้าและน้อยมาก (slow/low volatility) ยิ่งทำให้เกิดการจุดระเบิดได้ยาก เครื่องยนต์ติดยาก และหลงเหลือคราบเขม่าเกาะที่หัวฉีด ผนังลูกสูบ แหวนและวาล์ว จากคุณสมบัติที่น้ำมันพืชมีความหนืดสูงและระเหยตัวได้ต่ำกว่าน้ำมันดีเซลนี้ ทำให้เกิดความยุ่งยากเมื่อใช้น้ำมันพืชโดยตรงในเครื่องยนต์ (อาภาณี เหลืองนฤมิตชัย, 2549)

2.2.3 การพัฒนาคุณสมบัติของน้ำมันพืชเพื่อใช้ทดแทนน้ำมันดีเซล

ในปี ค.ศ.1898 รูดอล์ฟ ดีเซล (Rudolf C. Diesel : 1858 - 1913) วิศวกรชาวเยอรมัน ผู้ประดิษฐ์เครื่องยนต์ดีเซล ได้ใช้น้ำมันถั่วลิสงเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซล ซึ่งจัดแสดงในงานวิสต์ดแฟร์ ณ กรุงปารีส ประเทศฝรั่งเศส ทั้งนี้เขาเชื่อว่าน้ำมันที่ได้จากพืชผักนั้นจะเป็นน้ำมันที่เหมาะสมกับเครื่องยนต์มากที่สุดในอนาคต เชื้อเพลิงที่ได้จากพืชนั้นมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้แทนน้ำมันดีเซล ในความเป็นจริงการทดสอบในระยะสั้นให้ผลเป็นที่น่าพอใจ แต่ผลในระยะยาวพบว่าเกิดปัญหาอย่างรุนแรงกับเครื่องยนต์ มีความพยายามในการประยุกต์ใช้เทคนิคต่างๆ เพื่อพัฒนาคุณสมบัติน้ำมันพืชให้ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลมากที่สุด โดยนักวิจัยส่วนใหญ่จะให้ความสนใจในการลดค่าความหนืด ค่าความเป็นไอที่ต่ำ และลดโครงสร้างที่ไม่อึดตัวของไตรกลีเซอไรด์ ที่ผ่านมากกระบวนการที่นิยมใช้ในการพัฒนาคุณสมบัติของน้ำมันพืชมี 4 กระบวนการ คือ

1. การแตกตัวด้วยความร้อน (Pyrolysis) ในสมัยสงครามโลกครั้งที่ 1 มีความพยายามใช้น้ำมันพืชทดแทนน้ำมันดีเซล โดยวิธีการทำให้โมเลกุลของน้ำมันพืชแตกตัวให้มีขนาดเล็กลง ด้วยพลังงานความร้อน (อุณหภูมิ 450 - 850 องศาเซลเซียส) ภายใต้สภาวะปราศจากอากาศหรือออกซิเจนหรือภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน ผู้ค้นคว้าหลายท่านได้ศึกษากระบวนการแตกตัวด้วยความร้อนของไตรกลีเซอไรด์ ทั้งในส่วนของการศึกษาผลทางอุณหภูมิกับชนิดของผลิตภัณฑ์ การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา รวมไปถึงการเติมพาราฟินและโอเลฟิน เพื่อให้มีคุณสมบัติคล้ายน้ำมันดีเซล

การแตกตัวด้วยความร้อนจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบอัลเคน อัลคีน อัลคอะไดอิน อะโรมาติก และกรดคาร์บอกซิลิก ซึ่งกลไกการเกิดปฏิกิริยานั้นค่อนข้างซับซ้อน เนื่องจากมีโครงสร้างและปฏิกิริยาที่เป็นไปได้มากมาย โดยทั่วไปการแตกตัวด้วยความร้อน โครงสร้างมักเกิดผ่านกลไกของอนุมูลอิสระและคาร์โบเนียมไอออน ผลของกระบวนการแตกตัวด้วยความร้อนของน้ำมันพืชมีสัดส่วนของของเหลวใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล น้ำมันถั่วเหลืองที่ผ่านการแตกตัวด้วยความร้อนประกอบด้วยคาร์บอน 79% และไฮโดรเจน 11.88% (Schwab, 1988) และที่อุณหภูมิ 38 องศา

25 องศาเซลเซียส ค่าความหนืดลดลงเหลือ 11.2 เซนติสโตกส์ (Bagby, 1987) และผลการทดสอบกับเครื่องยนต์พบว่ามีการสะสมของเขม่าคาร์บอนบริเวณรอบๆ หัวฉีด และมีตะกอนเกิดขึ้นบริเวณวาล์วไอดี

3. การทำให้เจือจาง (Dilution) คือ การทำให้น้ำมันพืชเจือจาง โดยผสมกับน้ำมันดีเซล ตัวทำละลายหรือเอทานอล จากการเจือจางน้ำมันเมล็ดทานตะวันกับน้ำมันดีเซลในอัตราส่วน 1 ต่อ 3 โดยปริมาตร แล้วทำการทดสอบในเครื่องยนต์ ค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 40.8 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 4.88 เซนติสโตกส์ และพบว่า การเจือจางน้ำมันพืชไม่เป็นผลดีในระยะยาวกับเครื่องยนต์ดีเซลระบบ Direct injection เพราะทำให้เกิดการอุดตันที่หัวฉีดจากตะกอนถ่านและคราบเหนียว จากการเปรียบเทียบระหว่างน้ำมันดอกคำฝอยพบว่าการทดสอบเป็นที่น่าพอใจ แต่จะไม่เป็นผลดีในระยะยาว เพราะจะทำให้เกิดยางเหนียวในน้ำมันหล่อลื่น และการทดสอบเจือจางน้ำมันถั่วเหลืองกับ Stoddard solvent (Paraffins 48% และ Naphthenes 52%) พบว่าค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 5.12 เซนติสโตกส์ ซึ่งทดสอบกับเครื่องยนต์พบว่าเกิดตะกอนเขม่าคาร์บอนที่วาล์วไอดีและส่วนบนของแหวนลูกสูบ (Ziejewski และคณะ, 1983)

4. ทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน (Transesterification) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ปฏิริยาแอลกอฮอล์ไลซิส (Alcoholysis) ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาการแทนที่แอลกอฮอล์ของเอสเทอร์ ด้วยแอลกอฮอล์อีกตัวหนึ่ง ดูคล้ายกับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส โดยเฉพาะการใช้แอลกอฮอล์แทนการใช้น้ำ ซึ่งกระบวนการนี้เป็นที่รู้จักอย่างแพร่หลายในการลดค่าความหนืดของไตรกลีเซอไรด์ (Srivastava และ Prasad, 2000) ดังแสดงในสมการที่ 2.1



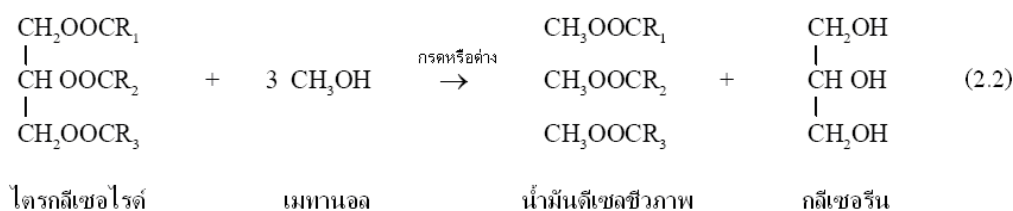
ถ้าใช้เมทานอลในการทำปฏิกิริยา จะเรียกว่า เมทานอลไลซิส (Methanolysis) ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเรียก เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (Fatty acid methyl esters; FAMES) หรือถ้าใช้เอทานอล จะเรียกว่า เอทานอลไลซิส (Ethanolysis) ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเรียก เอทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (Fatty acid ethyl ester; FAEEs) หรือเป็นที่รู้จักโดยทั่วไปคือ น้ำมันดีเซลชีวภาพหรือไบโอดีเซล (Biodiesel) ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

2.2.4 น้ำมันดีเซลชีวภาพ

น้ำมันดีเซลชีวภาพ คือ เชื้อเพลิงที่สังเคราะห์ได้จากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ โดยผ่านกระบวนการทางเคมีกับแอลกอฮอล์ชนิดปฐมภูมิหรือทุติยภูมิที่มีหมู่ไฮดรอกซิลเพียงหมู่เดียวและมีคาร์บอนตั้งแต่ 1 ถึง 8 อะตอม เช่น เมทานอล เอทานอล โพรพานอล บิวทานอล และเอมิลแอลกอฮอล์ โดยมีกรดหรือด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีของไตรกลีเซอไรด์ให้มีขนาดเล็กลง จะเรียกกระบวนการนี้ว่า ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ซึ่งแสดงดังภาพที่ 2.3 (ประกอบ กิจไชยา, 2550)

ภาพที่ 2.3

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์กับเมทานอล



แอลกอฮอล์ที่นิยมใช้มากที่สุด คือ เมทานอลและเอทานอล โดยเฉพาะเมทานอล เพราะมีราคาถูกและหาได้ง่าย อีกทั้งมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา โดยเมทานอลเป็นแอลกอฮอล์ที่มีสายโซ่สั้นที่สุดและโมเลกุลมีความเป็นขั้วสูง จึงมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาที่รวดเร็ว เมื่อใช้ด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในส่วนของเอทานอลเป็นแอลกอฮอล์ที่สามารถผลิตได้จากพืช เช่น อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด เป็นต้น ถือว่าเป็นวัตถุดิบที่สามารถหมุนเวียนได้ น้ำมันดีเซลชีวภาพที่ได้จากแอลกอฮอล์แต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน เว้นแต่มีสมบัติบางประการที่แตกต่างกัน เช่น ความหนืด จุดเกิดหมอก และจุดเทไหล เป็นต้น

ประเทศไทยมีการปลูกพืชน้ำมันหลายชนิด พืชที่มีปริมาณผลผลิตสูงและมีศักยภาพที่จะใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ ได้แก่ ปาล์มน้ำมัน ซึ่งมีผลผลิตต่อไร่สูงกว่าน้ำมันชนิดอื่นๆ ประมาณ 10 เท่า พื้นที่ที่เหมาะสมในการปลูกปาล์มน้ำมัน คือ ภาคใต้ของประเทศไทย จังหวัดที่มีการปลูกมากที่สุด ได้แก่ กระบี่ สุราษฎร์ธานี ชุมพร สตูล และตรัง ตามลำดับ ในปี พ.ศ. 2549 พบว่าประเทศไทยมีผลผลิตปาล์มน้ำมันประมาณ 6.24 ล้านตัน ซึ่งเพิ่มสูงขึ้นจากปี พ.ศ. 2548 ประมาณ 24% (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยและอื่นๆ, 2551) รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4

เนื้อที่ให้ผล ผลผลิต ผลผลิตต่อไร่ และราคาผลผลิตปาล์มน้ำมัน ช่วงปี พ.ศ. 2545 – 2549

ปี	เนื้อที่ให้ผล (1,000 ไร่)	ผลผลิต (1,000 ตัน)	ผลผลิตต่อไร่ (กก.)	ราคาที่เป็นนครกรขายได้ (บาท/กก.)
2545	1,644	4,001	2,434	2.30
2546	1,799	4,903	2,725	2.34
2547	1,932	5,182	2,682	3.11
2548	2,026	5,003	2,469	2.76
2549	2,347	6,241	2,629	2.39

ที่มา : การศึกษาเปรียบเทียบเทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซลของสหรัฐอเมริกาและไทย (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยและอื่นๆ, 2551)

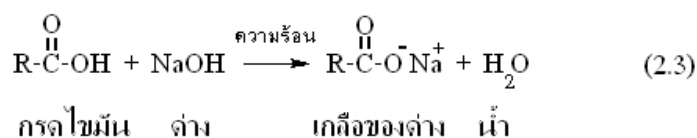
ปาล์มน้ำมันส่วนใหญ่จะถูกส่งเข้าโรงงานกลั่นน้ำมันเพื่อผลิตเป็นน้ำมันสำหรับการบริโภคประมาณ 65% และส่วนที่เหลือจะใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมสบู่ เครื่องสำอางและยา ฟอกหนัง อาหารสัตว์ เป็นต้น ราคาของน้ำมันปาล์มจะขึ้นลงตามฤดูกาล และความต้องการของตลาด (พนิดา เทพขุน และคณะ, 2551)

นอกจากปาล์มน้ำมันแล้วพืชน้ำมันชนิดอื่นที่ปลูกภายในประเทศ ได้แก่ มะพร้าว ถั่วเหลือง ทานตะวัน เป็นต้น ซึ่งพบว่าผลผลิตที่ได้จากพืชน้ำมันเหล่านี้จะถูกใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและผลิตสำหรับการบริโภค อีกทั้งราคาต่อหน่วยของน้ำมันเหล่านี้สูง เนื่องจากมีความต้องการบริโภคสูง ปริมาณไม่เพียงพอ นอกเหนือจากพืชน้ำมันที่มีการผลิตเพื่อการบริโภคแล้ว การปลูกพืชน้ำมันที่ไม่ใช่อาหารก็เป็นแนวคิดหนึ่งในการลดปัญหาการแย่งชิงวัตถุดิบ พืชดังกล่าว ได้แก่ สบู่ดำ เนื่องจากผลผลิตต่อไร่และต้นทุนในการเพาะปลูกและเก็บเกี่ยวยังมีราคาสูง ประกอบกับยังไม่มีมีการปลูกอย่างจริงจังในเชิงเศรษฐกิจ จึงทำให้ราคาสบู่ดำสูงมากในปัจจุบัน หากได้รับการพัฒนาสายพันธุ์ เทคนิคการปลูก การเก็บเกี่ยว เพื่อให้ปริมาณผลผลิตต่อไร่สูงเพียงพอ เกิดความคุ้มค่าและมีราคาที่เหมาะสม สบู่ดำก็จะเป็นวัตถุดิบอีกชนิดหนึ่งที่น่าจับตามองในอนาคตอันใกล้ (พนิดา เทพขุน และคณะ, 2551) จากที่กล่าวมาข้างต้น การผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพส่วนใหญ่ประสบปัญหาเรื่องของราคาวัตถุดิบที่สูงขึ้น ส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายเพิ่มสูงขึ้น การนำน้ำมันที่ผ่านการทอดใช้แล้วมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพนั้นเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่มีความสนใจและเป็นการนำน้ำมันที่ไม่ใช้แล้วกลับมาใช้เป็นเชื้อเพลิง ลดอัตราการใช้น้ำมันทอดซ้ำ แต่เนื่องจากน้ำมันที่ผ่านการใช้งานแล้ว มีคุณสมบัติและลักษณะแตกต่างกันออกไป โดยเฉพาะสิ่ง

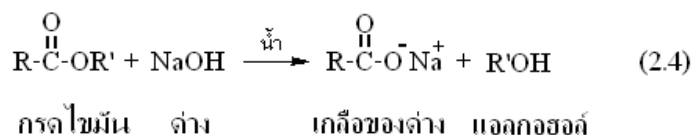
ปนเปื้อนต่างๆ เช่น มีค่ากรดไขมันอิสระสูง (มากกว่า 1.0%) ปริมาณน้ำและตะกอนปนเปื้อนสูง เป็นต้น การแก้ปัญหานอกจากจะต้องเตรียมวัตถุดิบให้ดีแล้ว การใช้กระบวนการผลิตแบบสองขั้นสามารถนำมาใช้ในกระบวนการผลิต เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตและเพิ่มทางเลือกให้กับวัตถุดิบน้ำมันที่มีความบริสุทธิ์ต่ำได้

จากปฏิกิริยาข้างต้น (ภาพที่ 2.3) มวลสารสัมพันธ์ของการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันอย่างสมบูรณ์ คือ อัตราส่วนโดยโมลของไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์ 1 ต่อ 3 แต่ในทางปฏิบัติต้องใช้อัตราส่วนของแอลกอฮอล์ที่สูงกว่านี้ เพื่อให้สมดุลเคมีของปฏิกิริยามีทิศทางที่จะได้ผลผลิตเอสเทอร์มากที่สุด ซึ่งในงานวิจัยส่วนใหญ่ใช้อัตราส่วนโดยโมลของไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์เท่ากับ 1 ต่อ 6 ตัวเร่งปฏิกิริยานอกจากต่างที่นิยมใช้แล้ว กรดและเอนไซม์สามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้เช่นกัน โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นด่าง ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) คาร์บอเนตและพวกโซเดียมหรือแคลเซียมอัลคอกไซด์ เช่น โซเดียมเมทอกไซด์ โซเดียมเอทอกไซด์ เป็นต้น ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด ได้แก่ กรดซัลฟูริก กรดซัลฟินิก กรดฟอสฟอริกและกรดไฮโดรคลอริก ตัวเร่งปฏิกิริยาทางชีวภาพนั้น จะใช้เอนไซม์ไลเปส (Lipases) ซึ่งการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันโดยมีด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาได้รวดเร็วกว่าการใช้กรดหรือเอนไซม์และใช้มากที่สุดในการค้า (Ma และ Hanna, 1999)

ในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นด่าง สารตั้งต้นทุกตัวควรปราศจากน้ำ (Anhydrous) และไตรกลีเซอไรด์ (ไขมันหรือน้ำมันที่ได้จากพืชและสัตว์) ควรจะมีค่ากรดไขมันอิสระน้อยกว่า 1.0% ถ้ามีกรดไขมันอิสระมากกว่า 1.0% จะต้องทำปฏิกิริยาสะเทินด้วยด่างก่อนนำไตรกลีเซอไรด์มาทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน เนื่องจากอาจเกิดปฏิกิริยาสะปอนิฟิเคชัน (Saponification) จากกรดไขมันอิสระทำให้เกิดสบู่ แสดงดังสมการที่ 2.3



เนื่องจากน้ำเป็นสาเหตุของการเกิดสบู่และทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาถูกใช้ไป แสดงดังสมการที่ 2.4



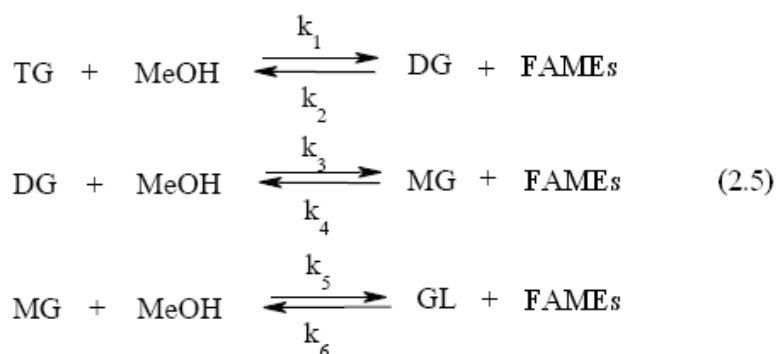
ทำให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง การเกิดสบู่เป็นสาเหตุที่ทำให้น้ำมันมีความหนืดเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดเจลและการแยกกลีเซอรินจะแยกออกได้ยากขึ้น (ประกอบ กิจไชยา, 2550)

2.2.5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน เกิดจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอนุกรมกัน และเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ ขั้นตอนแรกไตรกลีเซอไรด์ (TG) ทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์แล้วเปลี่ยนไปเป็นไดกลีเซอไรด์ (DG) และน้ำมันดีเซลชีวภาพ (FAMES) ขั้นสอง ไดกลีเซอไรด์ (DG) ทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ แล้วเปลี่ยนไปเป็นโมโนกลีเซอไรด์ (MG) และน้ำมันดีเซลชีวภาพ (FAMES) ขั้นสุดท้าย โมโนกลีเซอไรด์ (MG) ทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์อีกครั้ง แล้วเปลี่ยนไปเป็นกลีเซอริน (GL) และน้ำมันดีเซลชีวภาพ (FAMES) ในที่สุด สมดุลเคมีจะมีทิศทางที่จะได้ผลผลิตเอสเทอร์ของกรดไขมันและกลีเซอริน (ประกอบ กิจไชยา, 2550) แสดงดังภาพที่ 2.4

ภาพที่ 2.4

ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

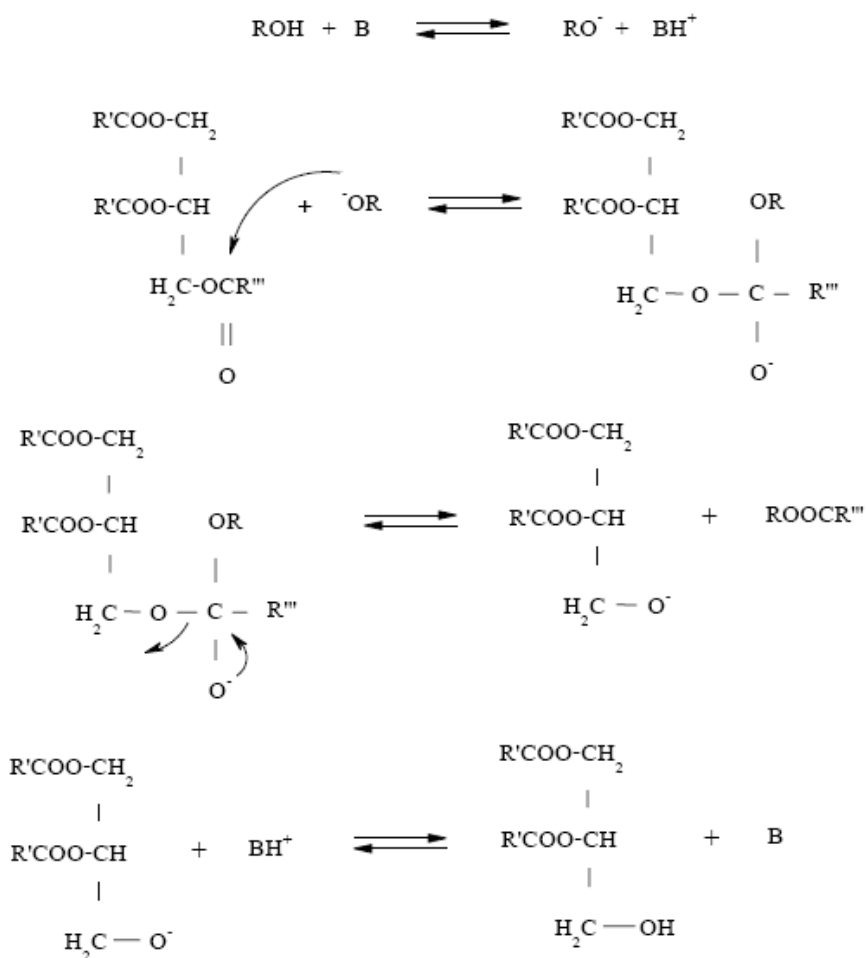


การเกิดปฏิกิริยาสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นด่าง สามารถอธิบายได้ดังนี้ เมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นด่าง (B) เช่น NaOH, KOH, K₂CO₃ ผสมกับแอลกอฮอล์ จะได้สารละลายที่เป็นหมู่แอลคอกไซด์ (-OR) ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่แท้จริง (Sridharan และ Mathai, 1974) หลังจากนั้น

เกิดปฏิกิริยาเป็น 3 ขั้นตอน (Eckey, 1956) ขั้นแรก คือ อัลคอกไซด์จะเข้าชนหมู่คาร์บอนิล (C=O) ของไตรกลีเซอไรด์ เพื่อจัดรูปเป็นอินเทอร์มีเดียท (Intermediate) ที่มีโครงสร้างเป็นทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral) ขั้นสอง สารที่ไม่เสถียรนี้จะแตกตัว ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นเอสเทอร์ของกรดไขมันหรือน้ำมันดีเซลชีวภาพ (ROOCR'') และไดกลีเซอไรด์แอนไอออน (DG⁻) ขั้นสาม ไดกลีเซอไรด์แอนไอออนได้รับโปรตอนจากต่าง ได้เป็นสารประกอบไดกลีเซอไรด์ และตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นด่างพร้อมจะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่นของแอลกอฮอล์ เพื่อเริ่มวัฏจักรการเร่งปฏิกิริยาต่อไป กลไกการเกิดปฏิกิริยาทั้งสามขั้นตอนจะได้เอสเทอร์ของกรดไขมันและกลีเซอรินในท้ายที่สุด แสดงดังภาพที่ 2.4 และ 2.5

ภาพที่ 2.5

กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันที่มีต่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Eckey, 1956)



2.2.6 กระบวนการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพได้เกิดขึ้นอย่างกว้างขวาง ทั้งในสหภาพยุโรป สหรัฐอเมริกา ออสเตรเลีย เป็นต้น ซึ่งประเทศที่ถือว่าเป็นผู้นำการผลิตรถยนต์อย่างเช่นประเทศเยอรมนี เป็นประเทศที่มีการส่งเสริมการผลิตและการใช้น้ำมันดีเซลชีวภาพมากเป็นอันดับหนึ่งของโลก ซึ่งน้ำมันสูตรที่ใช้คือ B100 ใช้แทนน้ำมันดีเซลและใช้เป็นเชื้อเพลิงให้ความอบอุ่นแก่ที่พักอาศัยและอาคารต่างๆ สำหรับประเทศไทยพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว ทรงมีพระราชดำริให้ศึกษาแนวทางการนำน้ำมันปาล์มมาใช้งานแทนน้ำมันดีเซล เริ่มตั้งแต่ พ.ศ. 2528 และผลสำเร็จปรากฏชัดเจนว่าการใช้น้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์กับเครื่องยนต์ดีเซล ไม่มีผลกระทบใดๆ ในทางลบ ได้ทรงยื่นจดสิทธิบัตรผลสำเร็จครั้งนั้น ในวันที่ 9 เมษายน พ.ศ. 2544 ชื่อที่แสดงถึงการประดิษฐ์ คือ การใช้น้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงเครื่องยนต์ดีเซล (ศิระพงศ์ เพ็ชรสงค์, 2550)

เทคโนโลยีการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพในปัจจุบันนั้น ส่วนใหญ่ได้รับการพัฒนาต่อยอดมาจากพื้นฐานของอุตสาหกรรมการผลิตน้ำมันเพื่อการบริโภคทั้งสิ้น โดยพิจารณาความเหมาะสมด้านวัตถุดิบเป็นหลัก ซึ่งยังคงใช้กระบวนการทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชันในการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันพืชกับแอลกอฮอล์ ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นด่าง จะแตกต่างกันรายละเอียดย่อยของเทคโนโลยีของแต่ละแห่งเท่านั้น ส่วนมากจะให้ความสำคัญในเรื่องการเตรียมวัตถุดิบให้เหมาะสมก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิต เพื่อให้การควบคุมสภาวะของกระบวนการผลิตเป็นได้โดยง่ายและมีประสิทธิภาพสูง เช่น การกำจัดกรดไขมันอิสระ การกำจัดฟอสฟอรัสออกจากน้ำมันพืช เป็นต้น ซึ่งเทคโนโลยีของการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพในเชิงพาณิชย์ แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่

1. กระบวนการผลิตแบบกะ (Batch process) เป็นกระบวนการพื้นฐานของการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ สารตั้งต้นทั้งหมดจะถูกป้อนเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์พร้อมกันก่อนทำปฏิกิริยา เมื่อปฏิกิริยาเสร็จสมบูรณ์แล้ว นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกจากเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งมีข้อดี คือ มีราคาถูกและการดูแลรักษาง่าย แต่มีกำลังการผลิตในแต่ละครั้งไม่มาก คุณภาพของผลิตภัณฑ์อาจจะไม่สม่ำเสมอและยังใช้พื้นที่ในการติดตั้งมาก โดยทั่วไปถึงปฏิกรณ์ที่นิยมใช้ในการผลิตแบบกะ คือ ถึงปฏิกรณ์แบบถังกวนผสม

2. กระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง (Continuous process) เป็นกระบวนการผลิตที่พัฒนาให้มีประสิทธิภาพ โดยการป้อนสารตั้งต้นเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์อย่างต่อเนื่อง โดยทั่วไปการผลิตในอุตสาหกรรมที่ต้องการกำลังการผลิตจำนวนมาก มักจะนิยมใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบไหลต่อเนื่อง เนื่องจากปฏิกิริยาเกิดขึ้นอยู่ในสถานะคงตัว ทำให้ควบคุมได้ง่าย ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพสม่ำเสมอ

นอกจากนี้กระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง ยังช่วยลดขั้นตอนการถ่ายเทสารเข้าออกถังปฏิกรณ์ ลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์ไหลแบบต่อเนื่องมี 2 ลักษณะคือ แบบถังกวนผสมต่อเนื่อง (Continuous stirred-tank reactor) และแบบท่อไหลต่อเนื่อง (Continuous tubular reactor) (อนวัช คุรงค์กนิษฐ์, 2547)

2.2.7 คุณสมบัติและการกำหนดมาตรฐานของน้ำมันดีเซลชีวภาพ

กระบวนการทรานเอสเอสเทอริฟิเคชัน เป็นกระบวนการทางเคมีที่เปลี่ยนโครงสร้างไตรกลีเซอไรด์ให้เป็นเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน โดยขนาดโมเลกุลของเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันจะลดลงเหลือ 1 ใน 3 ของไตรกลีเซอไรด์ตั้งต้น ความหนืดลดลงประมาณ 8 เท่า ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล โดยเอสเทอร์จำพวกนี้มีอะตอมของออกซิเจนเป็นองค์ประกอบในโครงสร้าง ซึ่งจะช่วยในการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น เนื่องจากน้ำมันดีเซลและน้ำมันดีเซลชีวภาพมีองค์ประกอบและโครงสร้างที่แตกต่างกัน ทำให้มีคุณสมบัติแตกต่างกัน ซึ่งในบางคุณสมบัติเป็นข้อได้เปรียบและบางคุณสมบัติเป็นข้อเสียเปรียบ ทัวไปแล้วสามารถเปรียบเทียบคุณสมบัติได้ดังนี้

1. น้ำมันดีเซลชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงสะอาด ไม่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ ทำให้ไอเสียที่ปล่อยออกมาจากเครื่องยนต์ไม่ก่อให้เกิดมลพิษและภาวะฝนกรด

2. น้ำมันดีเซลมีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทอะโรมาติกเป็นองค์ประกอบประมาณ 20 – 40% ส่วนน้ำมันดีเซลชีวภาพไม่มีสารจำพวกนี้ แต่มีออกซิเจนอยู่ในโครงสร้างโมเลกุล 10 – 12% เมื่อใช้เป็นเชื้อเพลิง ไอเสียที่เกิดขึ้นจะมีปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กและมีควันดำในปริมาณที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล

3. น้ำมันดีเซลชีวภาพมีจุดวาบไฟสูงกว่าน้ำมันดีเซล จึงมีค่าการจุดระเบิดในเครื่องยนต์ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล แต่มีความปลอดภัยในการจัดเก็บและขนส่งมากกว่า

4. น้ำมันดีเซลชีวภาพมีคุณสมบัติในการหล่อลื่นเครื่องยนต์ดีกว่าน้ำมันดีเซล ทำให้ช่วยลดการสึกหรอของเครื่องยนต์ได้ดี

น้ำมันดีเซลชีวภาพที่ผลิตได้จากน้ำมันพืชต่างชนิดกันจะมีคุณสมบัติที่ต่างกันออกไป เนื่องจากน้ำมันพืชเป็นสารประกอบไตรกลีเซอไรด์ที่มีกรดไขมันอยู่ในโครงสร้างสูงถึง 94 – 96% ของน้ำหนักโมเลกุล ทำให้คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพเป็นไปตามชนิดของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบอยู่ ดังนั้นเมื่อนำน้ำมันพืชชนิดใดมาเป็นวัตถุดิบในการผลิต จะได้น้ำมันดีเซลชีวภาพที่มีคุณสมบัติตามชนิดของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบชนิดนั้นด้วย ซึ่งแสดงดังตารางที่ 2.5

การทดสอบคุณภาพของน้ำมันดีเซลชีวภาพเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D6751 (แสดงดังตารางที่ 2.1) ในส่วนของประเทศไทยมีการกำหนดมาตรฐานน้ำมันดีเซลและน้ำมันดีเซลชีวภาพ

ตามประกาศของกรมธุรกิจพลังงาน ว่าด้วย การกำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล น้ำมันดีเซลชีวภาพประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันและน้ำมันดีเซลชีวภาพสำหรับเครื่องยนต์ การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน) โดยรายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก

ตารางที่ 2.5
สมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันดีเซลชีวภาพของน้ำมันชนิดต่างๆ

น้ำมันพืช	ความหนืด	เลขซีเทน	ค่าความร้อน	จุดหมอก	จุดวาบไฟ	ความหนาแน่น	กำมะถัน
	mm ² /s	-	MJ/kg	°C	°C	kg/L	%wt
ถั่วลิสง	4.9 (37.8 °C)	54	33.6	5	176	0.883	-
ถั่วเหลือง	4.5 (37.8 °C)	45	33.5	1	178	0.885	-
ปาล์ม	5.7 (37.8 °C)	62	33.5	13	164	0.88	-
ทานตะวัน	4.6 (37.8 °C)	49	33.5	1	183	0.86	-
ไขมัน	-	-	-	12	96	-	-
เมล็ดกาแฟ	4.2 (40 °C)	51-59.7	32.8	-	-	0.882	-
น้ำมันเมล็ดกาแฟที่ใช้แล้ว	9.48 (30 °C)	53	36.7	-	192	0.895	0.002
น้ำมันข้าวโพดที่ใช้แล้ว	6.23(30 °C)	63.9	42.3	-	166	0.884	0.0013

ที่มา : การสังเคราะห์น้ำมันดีเซลชีวภาพในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ (อนวัช ดุรงค์ภินันท์, 2547)

2.2.8 คุณสมบัติบางประการที่มีผลกระทบต่อเครื่องยนต์ (พนิดา เทพขุน และคณะ, 2547)

การควบคุมคุณภาพน้ำมันดีเซลชีวภาพ ให้มีมาตรฐานตามที่กรมธุรกิจพลังงานกำหนด เพื่อป้องกันผลกระทบที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องยนต์เมื่อนำไปใช้งาน ซึ่งคุณสมบัติบางประการของน้ำมันดีเซลชีวภาพที่แตกต่างจากน้ำมันดีเซล และอาจจะส่งผลต่อเครื่องยนต์ มีดังนี้

1. ค่าความเป็นกรด แสดงถึงการเสื่อมสภาพของน้ำมันดีเซลชีวภาพ ซึ่งจะส่งผลต่อการกัดกร่อนชิ้นส่วนภายในของเครื่องยนต์
2. ปริมาณเมทานอล มีผลต่อความปลอดภัยในด้านการเก็บรักษาและการขนส่ง ยังมีผลทำให้เกิดการกัดกร่อนหรือการบวมของชิ้นส่วนต่างๆ ภายในเครื่องยนต์
3. เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ผลของปฏิกิริยาจะทำให้เกิดเป็นพอลิเมอร์ และของแข็งที่ไม่ละลายในน้ำมันดีเซลชีวภาพ ทำให้เกิดการอุดตันบริเวณหัวฉีด กระบอกสูบหรือวาล์ว

4. ปริมาณกลีเซอไรด์ ประกอบด้วยโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ เป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่สมบูรณ์ ทำให้เกิดการอุดตันบริเวณหัวฉีด กระบอกสูบ หรือวาล์ว ส่งผลให้เกิดไอเสียที่มีมลพิษมากกว่าเดิม

5. ปริมาณน้ำ เป็นสาเหตุของการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลติกกับน้ำมันดีเซลชีวภาพ เกิดเป็นกรดไขมันอิสระ ส่งผลให้มีค่าความเป็นกรดสูง จนทำให้เกิดการกัดกร่อนชิ้นส่วนภายในเครื่องยนต์ และทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์

6. ปริมาณโลหะและฟอสฟอรัส ทำให้ระบบควบคุมไอเสียหลังการเผาไหม้เสื่อมสภาพลง

7. ค่าจุลชนํ้า ทำให้เกิดปัญหาในการสตาร์ทเครื่องยนต์ที่อุณหภูมิต่ำ

คุณสมบัติบางประการที่กล่าวมาเป็นเพียงบางส่วนซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อเครื่องยนต์ได้ เมื่อนำไปใช้งานในระยะยาว ดังนั้นควรคำนึงถึงคุณภาพของน้ำมันดีเซลชีวภาพ และต้องมีการตรวจสอบหรือวิเคราะห์คุณภาพให้เป็นไปตามมาตรฐานก่อนการนำไปใช้งาน เพื่อให้การใช้งานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

2.2.9 การเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ (ชาคริต ทองอุไร, 2551)

การใช้น้ำมันดีเซลชีวภาพอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ส่งผลให้เกิดการพัฒนาเทคนิคต่างๆ ของกระบวนการผลิต เพื่อให้เหมาะกับการผลิตในระดับอุตสาหกรรมที่มีปริมาณการผลิตจำนวนมาก และเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต ซึ่งการพัฒนากระบวนการผลิตมีหลากหลายวิธีด้วยกันและที่สำคัญ ได้แก่

1. กระบวนการแบบดั้งเดิม (Conventional process)
2. กระบวนการแบบสองขั้นตอน (Two-stage acid and base catalyst process)
3. กระบวนการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous catalyst process)
4. เทคโนโลยีเอนไซม์ไลเปส (Lipase technology)
5. กระบวนการสภาวะวิกฤตยิ่งยวด (Supercritical process)
6. เทคโนโลยีคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic technology)
7. เทคโนโลยีคลื่นรังสีไมโครเวฟ (Microwave irradiation technology)

กระบวนการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพส่วนใหญ่เป็นการผลิตแบบดั้งเดิม โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบถังกวนผสมและแบบถังกวนผสมต่อเนื่อง อาศัยการกวนเชิงกลที่ต้องใช้พลังงานสูงและใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยานาน ซึ่งอาจจะทำให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มสูงขึ้นจากการใช้พลังงานและไม่คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ จึงเป็นมูลเหตุจูงใจในการเลือกใช้กระบวนการผลิตที่ถือว่าเป็น

เทคโนโลยีใหม่ สำหรับกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ด้วยพลังงานที่ได้จากแหล่งกำเนิดคลื่น 2 ชนิด คือ พลังงานจากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่สูงเหนือเสียงหรือคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic wave) และพลังงานจากการแผ่รังสีของคลื่นไมโครเวฟ (Microwave irradiation) การศึกษาข้อดีของคลื่นทั้งสองชนิด นำไปสู่การประยุกต์ใช้ในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันร่วมกัน โดยการศึกษาสถานะที่เหมาะสมที่สุด และใช้ลักษณะเด่นของกระบวนการทั้งสองทดแทนข้อด้อยในการผลิตแบบดั้งเดิม การใช้กระบวนการคลื่นอัลตราโซนิกแทนการกวนเชิงกลในถังปฏิกรณ์แบบกวนผสมและแบบกวนผสมต่อเนื่อง โดยอาศัยการเกิดโพรงเสียงผ่านของเหลวหรือปรากฏการณ์คาวิเทชัน (Cavitations) ของคลื่นอัลตราโซนิก และใช้การแผ่รังสีของคลื่นไมโครเวฟ ในการช่วยเร่งปฏิกิริยาและเร่งการก่อตัวของตะกอนกลีเซอริน ด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic field) ที่เหนี่ยวนำให้เกิดพันธะทางเคมีได้รวดเร็วยิ่งขึ้น โดยจะอธิบายเทคนิคทั้งสองในหัวข้อต่อไป

2.3 เทคโนโลยีของคลื่นอัลตราโซนิกและคลื่นรังสีไมโครเวฟ

การประยุกต์ใช้เทคนิคคลื่นความถี่สูงจากแหล่งกำเนิดคลื่นต่างๆ ในระดับอุตสาหกรรมมีการใช้งานอย่างแพร่หลายและมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เช่น การใช้คลื่นอัลตราโซนิกในการผสมสารละลายให้เป็นเนื้อเดียวกัน การกระจายตัวและการลดการเกาะกลุ่มของอนุภาค การแตกโครงสร้างของเซลล์ การเร่งปฏิกิริยาเคมี เป็นต้น รวมไปถึงการใช้คลื่นรังสีไมโครเวฟในระดับอุตสาหกรรม ตัวอย่างเช่น การเผา การอบแห้ง การลดค่าความชื้น และลดปริมาณไขมันในผลิตภัณฑ์อาหาร อีกทั้งยังใช้ในการแยกตัวทำละลาย การกำจัดซัลเฟอร์และมลพิษอื่นๆ ออกจากถ่านหิน เป็นต้น ในเบื้องต้นจะอธิบายหลักการของเทคนิคทั้งสองดังนี้

2.3.1 คลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic wave)

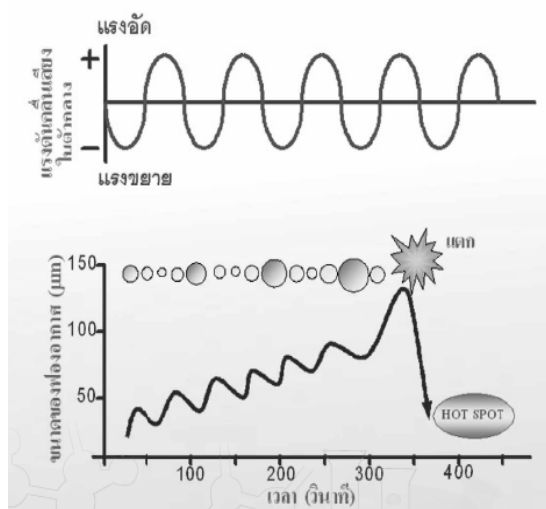
คลื่นอัลตราโซนิก หมายถึง พลังงานของคลื่นเสียงที่มีการสั่นของคลื่นหรือความถี่มากกว่า 20,000 รอบต่อวินาที หรือเทียบเท่ากับการสั่นของตัวกลางเท่ากับ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ (kHz) ซึ่งความถี่นี้จะอยู่เหนือขอบเขตการได้ยินของมนุษย์ โดยทั่วไปนิยมใช้คลื่นอัลตราโซนิกในช่วงความถี่ตั้งแต่ 20 - 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งลักษณะพิเศษของคลื่นอัลตราโซนิก คือ คลื่นอัลตราโซนิกสามารถเคลื่อนที่ในทิศทางที่แน่นอน เนื่องจากคุณสมบัติของคลื่นถ้าคลื่นมีความถี่สูงการเลี้ยวเบนยิ่งต่ำ ดังนั้นเราสามารถนำคลื่นในระดับอัลตราโซนิกส่งไปยังเป้าหมายที่เจาะจงได้

ปัจจัยที่เกิดจากคลื่นอัลตราโซนิก คือ ความร้อน (Heating) การถ่ายเทมวล (Mass-transfer) และปรากฏการณ์คาวิเทชัน ซึ่งปรากฏการณ์คาวิเทชันเป็นกระบวนการที่สำคัญที่เกิดขึ้น

ในตัวกลางหรือสารละลายเมื่อได้รับคลื่นอัลตราโซนิก ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพ การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเป็นผลเนื่องจากฟองอากาศ (Bubbles) ที่เกิดขึ้น ซึ่งการที่ฟองอากาศเกิดขึ้นได้นั้น เนื่องจากโครงสร้างของของเหลวที่ได้รับคลื่นอัลตราโซนิกจะถูกบีบอัด (Compress) และคลายตัว (Stretch) ซ้ำไปซ้ำมาเป็นจำนวนหลายพันรอบ ทำให้เกิดฟองอากาศขึ้นและฟองอากาศที่เกิดขึ้นภายในของเหลวนี้จะสัมผัสกับแรงสั่นที่เกิดจากคลื่นอัลตราโซนิกต่อเนื่องเป็นระยะๆ เกิดการแลกเปลี่ยนแก๊สระหว่างกันหรือชนกัน เป็นผลทำให้ฟองอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งแตกออกในที่สุด (พิทักษ์ เหล่ารัตนกุล, 2550) ดังแสดงในภาพที่ 2.6

ภาพที่ 2.6

ปรากฏการณ์ควิเตชันของคลื่นอัลตราโซนิก (พิทักษ์ เหล่ารัตนกุล, 2550)



คลื่นอัลตราโซนิกความถี่ต่ำเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์ ในการทำให้เกิดการผสมกันของของเหลวที่ผสมกันไม่ได้ ซึ่งการแตกตัวของฟองอากาศจากปรากฏการณ์ควิเตชันนั้น เป็นการทำลายชั้นเฟส (Phase boundary) และทำให้เกิดการผสมกัน (Emulsification) โดยการพุ่งชนด้วยคลื่นอัลตราโซนิกความเร็วสูง ซึ่งเป็นการกระแทกชนกันจากของเหลวหนึ่งไปยังของเหลวหนึ่ง และทำให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว (Mason, 1991) เพราะว่ำน้ำมันพืชและแอลกอฮอล์ไม่สามารถผสมเข้ากันได้ การผสมเป็นเหตุผลหลักสำคัญที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของน้ำมันดีเซลชีวภาพในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Kusdiana และ Saka, 2001) ซึ่งการใช้คลื่นอัลตราโซนิกความถี่ต่ำในการผสมของเหลว มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย (Mason, 1999)

Jianbing และคณะ (2006) นำเสนอกระบวนการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ ด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ความถี่ 19.7 กิโลเฮิร์ต โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันถั่วเหลืองกับเมทานอลเท่ากับ 1/6 และอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.0% ของน้ำหนักน้ำมัน ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส กำลังอัลตราโซนิก 150 วัตต์ โดยเปรียบเทียบกระบวนการผลิตแบบพลังงานคลื่นอัลตราโซนิก (Power ultrasonic; PU) แบบไฮโดรไดนามิกคาวิตชัน (Hydrodynamic cavitation; HC) และแบบการกวนเชิงกล (Mechanical stirring; MS) พบว่ากระบวนการแบบ PU ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 – 20 นาที ปริมาณเปอร์เซ็นต์ผลผลิตที่ได้อยู่ในช่วง 98 – 99% ในส่วนของกระบวนการแบบ HC ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 – 40 นาที ปริมาณเปอร์เซ็นต์ผลผลิตที่ได้อยู่ในช่วง 97 – 99% และกระบวนการแบบ MS ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ปริมาณเปอร์เซ็นต์ผลผลิตที่ได้อยู่ในช่วง 90 – 95% และเมื่อพิจารณาในด้านการใช้พลังงานของการผลิต โดยเทียบกับน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ผลิตได้ 1 กิโลกรัม พบว่าปริมาณการใช้พลังงานของกระบวนการ HC PU และ MS มีค่าเท่ากับ 183 250 และ 500 วัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัม (Wh/kg) ตามลำดับ และพบว่าการใช้คลื่นอัลตราโซนิกแบบต่อเนื่อง (Continuous ultrasonic, pulse frequency=1) จะเหนี่ยวนำให้เกิดการผสมกันระหว่างน้ำมันและเมทานอลในระยะเวลานานขึ้น และสำหรับการใช้คลื่นอัลตราโซนิกแบบจังหวะ (Pulse frequency <1) จะมีประสิทธิภาพในการอนุรักษ์พลังงานและเพิ่มการถ่ายเทมวลได้ดีกว่า

Stavarache และคณะ, (2004) นำเสนอกระบวนการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (ความถี่ 28 และ 40 กิโลเฮิร์ตซ์) ที่อุณหภูมิห้องและกำลังอัลตราโซนิก 60% โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันพืชต่อแอลกอฮอล์ 1/6 และอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา (NaOH และ KOH) 0.5 1.0 และ 1.5% โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตแบบดั้งเดิม พบว่าการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาเพียง 10 - 40 นาที ซึ่งน้อยกว่ากระบวนการผลิตแบบดั้งเดิม และพบว่าแอลกอฮอล์ชนิดสายโซ่สั้นทั่วไปเกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว ขณะเดียวกันแอลกอฮอล์ชนิดทุติยภูมิและตติยภูมิ (Second and tertiary alcohols) ปฏิกิริยาอาจจะไม่เกิดขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปมากกว่า 60 นาที เมื่อพิจารณาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าถ้าต้องการเปอร์เซ็นต์ผลผลิตที่สูงใกล้เคียงกัน จะต้องใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณที่มากกว่า และถ้าใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เกินกว่า 1.5% ของน้ำหนักน้ำมัน ปริมาณเปอร์เซ็นต์ผลผลิตจะลดลง เนื่องจากการเกิดสบู่และเจล และพบว่าคลื่นอัลตราโซนิกที่มีความถี่ต่ำ (28 กิโลเฮิร์ตซ์) เหมาะสมกับการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน และได้ปริมาณเปอร์เซ็นต์ผลผลิตสูงสุดประมาณ 98-99% แต่จะใช้ระยะเวลาในการผลิตมากกว่า

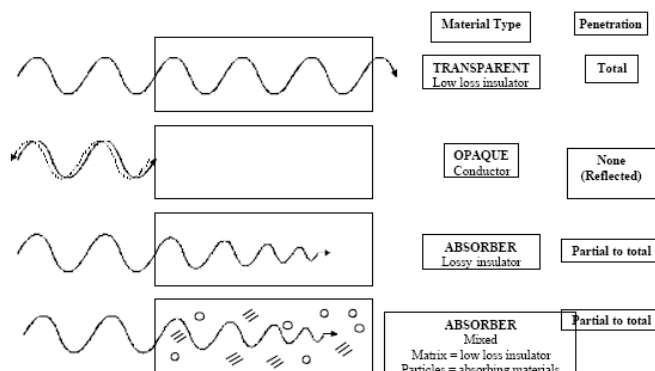
Hoang และคณะ, (2007) นำเสนอกระบวนการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ ด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ความถี่ 40 กิโลเฮิร์ต กับวัตถุดิบที่มีความบริสุทธิ์สูง โดยใช้สารไตรโอเลอิน (Triolein) แทนการใช้น้ำมันพืช เพื่อยืนยันประสิทธิภาพของกระบวนการและเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของไตรโอเลอินกับแอลกอฮอล์ เท่ากับ 1/6 และอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.0% ของน้ำหนักไตรโอเลอิน ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้อง พบว่าปริมาณเปอร์เซ็นต์เอสเทอร์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและมีค่าสูงที่สุด เมื่อผ่านกระบวนการอัลตราโซนิกเป็นเวลา 15 นาที โดยปริมาณเปอร์เซ็นต์เอสเทอร์ที่ได้จากเมทานอลและเอทานอลมีค่าสูงสุด ประมาณ 95 - 98% ในส่วนของแอลกอฮอล์ปฐมภูมิชนิดอื่น (1-โพรพานอล 1-บิวทานอล 1-เฮกซานอล 1-ออกทานอล และ 1-เดคานอล) จะได้ปริมาณเปอร์เซ็นต์เอสเทอร์ที่ต่ำกว่า โดยจะลดลงตามจำนวนคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นในสายโซ่ของแอลกอฮอล์แต่ละชนิด และพบว่าแอลกอฮอล์ชนิดทุติยภูมิ (2-โพรพานอล 2-บิวทานอล 2-เฮกซานอล และ 2-ออกทานอล) จะได้ปริมาณเปอร์เซ็นต์เอสเทอร์ที่น้อยมาก คือ ประมาณ 3%

2.3.2 คลื่นรังสีไมโครเวฟ (Microwave irradiation)

คลื่นรังสีไมโครเวฟ หมายถึง คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave) ที่มีความถี่อยู่ในช่วง 0.3 - 300 กิกะเฮิร์ตซ์ (GHz) และความยาวคลื่น 1 เมตร ถึง 1 มิลลิเมตร คลื่นรังสีไมโครเวฟมีคุณสมบัติของความเป็นกลุ่ม (coherent) และมีความเป็นแม่เหล็กไฟฟ้า (Polarised) ในทางตรงข้ามกับคลื่นแสง (ส่วนหนึ่งของแสงเลเซอร์) คลื่นรังสีไมโครเวฟจะประพาดตัวอยู่ในกฎของแสงและสามารถเคลื่อนที่ (Transmitted) ดูดซับ (Absorbed) หรือสะท้อนกลับ (Reflected) ภายใต้อารมณ์ของวัสดุต่างๆ แสดงดังภาพที่ 2.7

ภาพที่ 2.7

การเกิดปฏิกิริยาภายในของคลื่นรังสีไมโครเวฟกับวัสดุต่างชนิดกัน (Hill, 2000)



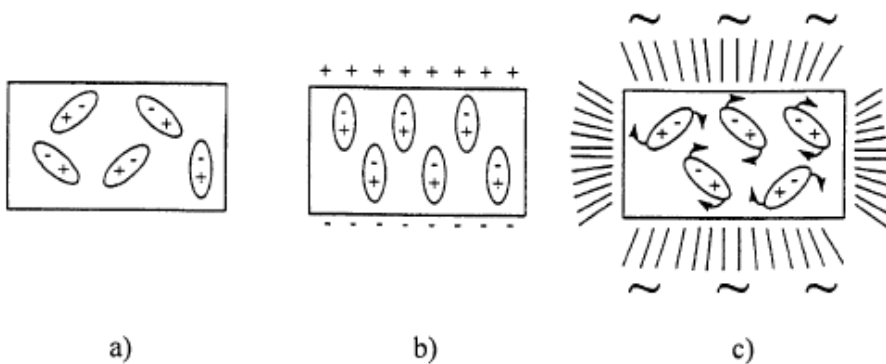
เป็นที่ทราบโดยทั่วกันว่า เตาอบไมโครเวฟมีความแตกต่างจากเตาอบธรรมดาเพียงประการเดียว คือ กระบวนการให้ความร้อนที่แตกต่างกัน โดยหลักการให้ความร้อนของเตาอบแบบธรรมดาความร้อนจะเกิดจากแหล่งกำเนิดความร้อนภายนอก ซึ่งตรงข้ามกับเตาอบไมโครเวฟจะเกิดความร้อนขึ้นจากภายในวัสดุ โดยพบว่ามีกลไกการถ่ายเทอุณหภูมิและการไหลเวียนความร้อนแบบย้อนกลับ (Reverse) ภายในวัสดุ และมีความเป็นไปได้ที่คลื่นรังสีไมโครเวฟ จะมีรูปแบบของการให้ความร้อนแก่วัสดุทั้งที่มีขนาดเล็กและใหญ่อย่างรวดเร็วและมีรูปแบบเดียวกัน ดังนั้นการดูดซับพลังงานจากคลื่นรังสีไมโครเวฟจะเปลี่ยนแปลงตามองค์ประกอบและโครงสร้าง รวมไปถึงการเลือกรับความร้อน (Selective heating) ของวัสดุแต่ละชนิด (Hill, 2000)

ผลของอุณหภูมิ (Dielectric heating) สามารถบ่งบอกได้จากสมบัติของขั้วไฟฟ้าในการนำไฟฟ้า ดังนั้นผลที่เกิดจากปฏิกิริยาภายใน (Dipole-dipole interactions) ระหว่างขั้วของโมเลกุลและสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้เกิดการกระจายตัวของพลังงานนำไปสู่พลังงานความร้อน ดังนั้นสิ่งที่เกิดขึ้นจากการก่อตัวและการชนกันภายในของโมเลกุล เมื่อได้รับการเปลี่ยนแปลงไดโพล (Dipole) ที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง (Alternating electric field with high frequency) ประมาณ 2.45 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งจะแสดงดังภาพที่ 2.8 และสำหรับผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวหรือสารละลาย มีเพียงโมเลกุลที่มีขั้วเท่านั้นที่สามารถดูดซับคลื่นรังสีไมโครเวฟ ส่วนโมเลกุลที่ไม่มีขั้วจะเฉื่อยต่อคลื่นรังสีไมโครเวฟ ทำให้เป็นฉนวน (Perreux และ Loupy, 2001)

ภาพที่ 2.8

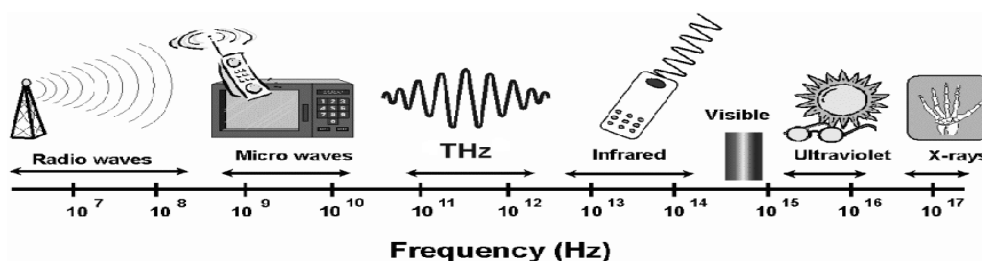
ผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีต่อพฤติกรรมของขั้วไฟฟ้า (Perreux และ Loupy, 2001)

- (a) ไม่มีสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (b) ได้รับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง
(c) ได้รับสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง



การใช้ประโยชน์จากคลื่นรังสีไมโครเวฟ นอกเหนือจากการใช้งานในด้านโทรคมนาคมแล้ว ยังสามารถประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวัน เช่น ใช้ในเตาอบไมโครเวฟ ซึ่งโดยทั่วไปเตาอบไมโครเวฟครัวเรือนใช้คลื่นรังสีไมโครเวฟความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ และให้พลังงาน 500 - 1100 วัตต์ โดยมีแหล่งกำเนิดคลื่นเรียกว่า แมกนีตรอน (Magnetron) คลื่นรังสีไมโครเวฟจะถูกพัดลมพัดคลื่นให้กระจายทั่วเตา ขณะเดียวกันอาหารที่มีน้ำ ไขมัน และน้ำตาลเป็นองค์ประกอบ จะดูดซับคลื่นและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ในช่วงคลื่นความถี่นี้ แก้ว เซรามิก และพลาสติก จะไม่สามารถดูดซับคลื่นได้ ในขณะที่แผ่นโลหะจะสะท้อนคลื่นทั้งหมด (ฟิสิกส์ราชชมงคล, 2550)

ภาพที่ 2.9
ลักษณะการใช้งานตามความถี่ของคลื่นชนิดต่างๆ



คลื่นรังสีไมโครเวฟ เป็นรูปแบบของพลังงานที่มีค่าพลังงานค่อนข้างต่ำที่อยู่ในช่วงของแถบแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic spectrum) มีความถี่สูงกว่าคลื่นวิทยุ แต่มีความถี่ต่ำกว่าคลื่นรังสีเอกซ์เรย์ คลื่นอัลตราไวโอเล็ตและคลื่นอื่นๆ ที่มีพลังงานมากพอที่จะทำให้พันธะเคมีแตกตัว ขณะที่พลังงานของคลื่นรังสีไมโครเวฟจะไม่ทำให้พันธะเคมีแตกตัว แต่จะเกิดการสั่นภายในโมเลกุลจนทำให้เกิดความร้อนขึ้น ซึ่งความร้อนจะทำหน้าที่ในการเร่งการเกิดปฏิกิริยาและทำให้พันธะเคมีแตกตัว ทำให้ปฏิกิริยาเสร็จสมบูรณ์ภายในระยะเวลาอันสั้น แทนที่การทำปฏิกิริยาเป็นชั่วโมงหรือเป็นวันของการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม จากเหตุผลดังกล่าว คลื่นรังสีไมโครเวฟได้รับการยอมรับและถูกนำไปใช้ในการทดลองทางวิทยาศาสตร์ (Barnard และคณะ, 2007)

Saifuddin และ Chua, (2004) นำเสนอกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันพืชใช้แล้วกับเอทานอล ด้วยกระบวนการคลื่นรังสีไมโครเวฟ ความถี่ 2.5 กิกะเฮิรตซ์ กำลัง 750 วัตต์ ใช้อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเอทานอลเท่ากับ 1/6 อัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาไฮเดรียมไฮดรอกไซด์ 0.5% ของน้ำหนักน้ำมัน ปริมาณเปอร์เซ็นต์ผลผลิตที่ได้ คือ 87% และพบว่าการใช้คลื่นรังสีไมโครเวฟช่วยเร่งกระบวนการแยกชั้น ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์และรวดเร็วหลังจากผ่าน

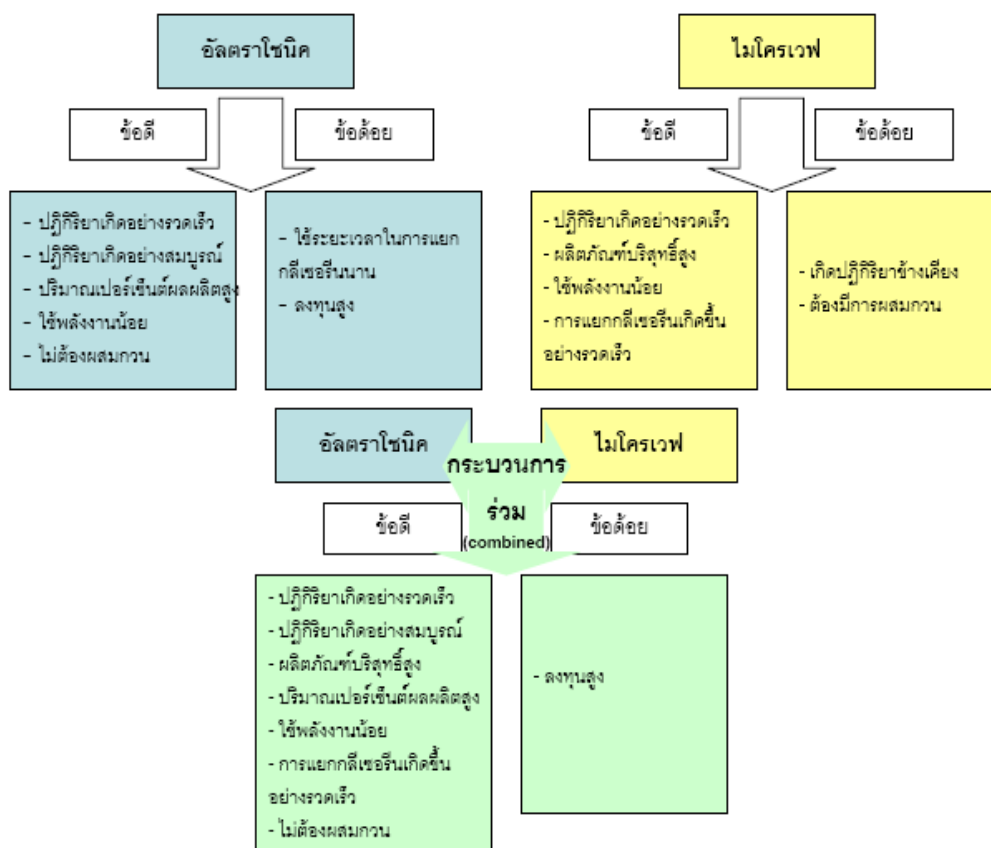
กระบวนการประมาณ 2 - 3 นาที ที่อุณหภูมิห้อง และสามารถลดระยะเวลาในการผลิตได้อย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตแบบดั้งเดิมที่ใช้เวลา 75 นาที

Mazzocchia และคณะ, (2004) นำเสนอการสังเคราะห์น้ำมันดีเซลชีวภาพด้วยคลื่นรังสีไมโครเวฟ ความถี่ 2.45 กิโลเฮิร์ตซ์ กำลัง 1,000 วัตต์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์อัตราส่วน 10% ของน้ำหนักรังน้ำมัน (Zeolite 3 A, montmorillonites.K10 & KSF) ใช้อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันเมล็ดแฟลตต่อเมทานอล 1/9 พบว่าผลของตัวเร่งปฏิกิริยา montmorillonites.KSF ได้ปริมาณเปอร์เซ็นต์ผลผลิตประมาณ 51 % โดยใช้ระยะเวลา 1 ชั่วโมง แต่ในทางกลับกัน Nezihe และ Aysegul, (2008) นำเสนอการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นด่าง ซึ่งเปรียบเทียบระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์กับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันเมล็ดแฟลตต่อเมทานอลเท่ากับ 1/6 พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิด คือ 1.0% ของน้ำหนักรังน้ำมัน และสภาวะที่เหมาะสมที่มีโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และใช้เวลา 5 นาที ปริมาณเปอร์เซ็นต์ผลผลิตและความบริสุทธิ์ที่ได้ คือ 93.7% และ 97.8% ตามลำดับ ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และใช้เวลา 3 นาที ปริมาณเปอร์เซ็นต์ผลผลิตและความบริสุทธิ์ที่ได้ คือ 92.7% และ 97.8% ตามลำดับ และรายงานว่าการลดลงของปริมาณเปอร์เซ็นต์ผลผลิตที่ได้น้อย เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงของปฏิกิริยาสะปอนิฟิเคชัน หรือ neutralization ของกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในปริมาณที่สูง

Hernando, (2006) นำเสนอกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ด้วยกระบวนการคลื่นรังสีไมโครเวฟ ความถี่ 2.45 กิโลเฮิร์ตซ์ กำลัง 300 วัตต์ ศึกษากระบวนการผลิตแบบไหลของน้ำมันถั่วเหลือง โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันถั่วเหลืองกับเมทานอลเท่ากับ 1/12 อัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.3% ของน้ำหนักรังน้ำมัน และใช้ตัวทำละลายร่วม (Methyl tertiary-butyl ether; MTBE ต่อ น้ำมัน, 1:1.2) เวลาทำปฏิกิริยา 1 นาที พบว่าปริมาณเปอร์เซ็นต์ผลผลิตที่ได้มีค่าสูงสุดประมาณ 96 - 97%

ภาพที่ 2.10

แนวคิดการใช้ประโยชน์ร่วมของกระบวนการคลื่นอัลตราโซนิกและคลื่นรังสีไมโครเวฟ



จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ ด้วยเทคนิคคลื่นอัลตราโซนิกและคลื่นรังสีไมโครเวฟในอดีตพบว่า เป็นการศึกษากระบวนการผลิตเพียงด้านเดียว ซึ่งแต่ละกระบวนการมีข้อดีและข้อด้อยแตกต่างกัน สามารถสรุปได้ดังภาพที่ 2.10

นำไปสู่แนวความคิดในการใช้กระบวนการทั้งสองร่วมกัน เนื่องจากกระบวนการทั้งสองมีลักษณะคล้ายกันในด้านการใช้พลังงานจากคลื่นในการทำปฏิกิริยา ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จะมุ่งเน้นการประยุกต์กระบวนการทั้งสองร่วมกัน เพื่อแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้น และเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต ลดการสูญเสียพลังงานจากการผลิต รวมทั้งผลิตภัณฑ์น้ำมันดีเซลชีวภาพที่ได้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานกำหนด และในการนี้ผู้วิจัยได้รวบรวมผลการศึกษาให้เป็นไปในรูปแบบของการทดลองที่สามารถเข้าใจได้ง่าย และได้นำเสนอรายงานการวิจัยในบทต่อไป

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

3.1 การทดลอง

ในเบื้องต้น แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่หนึ่ง ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของสารตั้งต้น ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการรวม และศึกษาเปรียบเทียบกระบวนการผลิตแบบการกวนเชิงกล แบบแยกส่วน และแบบกระบวนการรวม ส่วนที่สอง ศึกษากระบวนการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพจากวัตถุดิบน้ำมันชนิดต่างๆ มีรายละเอียดดังนี้

3.1.1 สารเคมีและวัตถุดิบ

1. ไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane, HPLC grade 99.999%) จากบริษัท Merck Co., Ltd, ประเทศเยอรมันนี
2. น้ำมันถั่วเหลือง ตราอรุณ จากบริษัทน้ำมันพืชไทย จำกัด (มหาชน) ประเทศไทย
3. น้ำมันทอดใช้แล้ว จากตลาดบางซัน จ.ปทุมธานี
4. น้ำมันปาล์ม ตรามรกต จากบริษัทมรกต อินดัสตรีส์ จำกัด (มหาชน) ประเทศไทย
5. ไพรีดีน (Pyridine, 99.7%) จากบริษัท Carlo erba reagenti Co., Ltd. ประเทศอิตาลี
6. โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH, 86%) จากบริษัท Akzo Nobel Co., Ltd ประเทศสวีเดน
7. เมทานอล (Methanol, commercial grade) จากบริษัท Italmar Co., Ltd ประเทศไทย
8. สารละลายฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์ (Phenolphthalein indicator)
9. สารมาตรฐาน ASTM D6584 Standard solution 2 (Glycerol, 1-Monooleyl-rac-glycerol, 1,3-Diolein, Triolein), จากบริษัท Supelco Co., Ltd ประเทศสหรัฐอเมริกา
10. สารมาตรฐาน n-Hexadecane จากบริษัท Supelco Co., Ltd ประเทศสหรัฐอเมริกา
11. สารมาตรฐาน Tricaprin ($\geq 99\%$, GC), จากบริษัท Sigma Aldrich Co., Ltd ประเทศสหรัฐอเมริกา
12. เฮปเทน (Heptane, analytical grade 99.7%) จากบริษัท Merck Co., Ltd, ประเทศเยอรมันนี
13. N-Methyl-N-(trimethylsilyl)-trifluoroacetamide; MSTFA (97%) จากบริษัท Acros organics Co., Ltd. ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. ขวดปฏิกรณ์
2. ชุดกลั่นควบแน่น
3. เทอร์โมมิเตอร์
4. ไฮโดรมิเตอร์
5. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง
6. เครื่องกลั่นแบบหมุน ยี่ห้อ Buchi rotavapor รุ่น R-400 ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
7. เครื่องทำความร้อนและควบคุมอุณหภูมิ ยี่ห้อ Shinks รุ่น JCS ประเทศญี่ปุ่น
8. เครื่องกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิก ยี่ห้อ Sonics vibra-cell รุ่น V505 (micro tip) ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ กำลังอัลตราโซนิกสูงสุด 500 วัตต์ ประเทศสหรัฐอเมริกา
9. เตาอบไมโครเวฟ ยี่ห้อ Daewoo รุ่น KOR-4125 ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ กำลังไมโครเวฟสูงสุด 600 วัตต์ ประเทศเกาหลีใต้
10. Hotplate และ stirrer & magnetic bar ยี่ห้อ Eylea รุ่น RCH-3 ประเทศญี่ปุ่น

3.1.3 เครื่องมือวิเคราะห์

1. เครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี (GC-FID) ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น GC-14A ประเทศญี่ปุ่น
สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์

Column: Capillary column (Restex; Xti-5, 30m x 250um x 0.25um)

Carrier gas: Helium gas 99.995%, Fuel gas: Hydrogen 99.95%, Air pump

Column flow: 3ml/min, Vent flow: 2.02ml/min, Split mode: 2.09/1

Injection temp: 250 °C, Detector temp: 380 °C

Oven Initial temp: 50 °C

Ramps: 50 °C (hold 1min) ---> 180 °C (15 °C /min)

180 °C ---> 230 °C (7 °C /min)

230 °C ---> 330 °C (10 °C /min) (hold 10min)

Sample injection: 1 µL

2. เครื่องไดนามิกสเปกโตรเมทรีแก๊สโครมาโทกราฟีและแมสสเปกโตรมิเตอร์ (DHS-GC-MS) ยี่ห้อและรุ่น Perkinelmer (ATD-400) – Agilent technologies (GC6890-MS5975) ประเทศสหรัฐอเมริกา

สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์

Auto Thermal Desorption (ATD-400):

Carrier gas: Helium (Research grade 99.999%)	Desorb: 380 °C/10min
Outlet split flow: 25 +0.5ml/min	ATD trap: Carbotrap C packing
Inlet split flow: 25+0.5ml/min	ATD trap: Straight bore
ATD pressure: 16.2 +0.1psi	Trap conditions: 380°C /10min
Desorb flow: 50 +0.5ml/min	ATD valve: 260°C

Gas Chromatograph/ Mass Spectrometer (GC/MS)

Mass spectrometer: Sample mass 33 to 550

MS source: 230 °C MS quad: 150 °C

Oven Initial temp: 50 °C

Ramps: 50 °C (hold 1min) ---> 180 °C (15 °C /min)
 180 °C ---> 230 °C (7 °C /min)
 230 °C ---> 280 °C (30 °C /min) (hold 10min)

Back inlet (Volatiles inlet; VI)

Thermal aux

Mode: Split

Use: MSD transfer line heater

Initial temp: 240 °C

Initial temp: 280 °C

Pressure: 7.64 psi

Split ratio: 15:1

Split flow: 15.0 mL/min

Total flow: 18.8 mL/min

Column: Capillary column (Restek Rxi-5, 30m x 250um x 0.25um)

Mode: Constant flow

Outlet: MSD

Initial flow: 1.0 mL/min

Outlet pressure: Vacuum

Sample injection: 1 µL

Chemstation data analysis: Integrator; Chemstation integrator

3. เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดเปกโทรสโกปี (FT-IR) ยี่ห้อ Perkinelmer รุ่น

Spectrum one ประเทศสหรัฐอเมริกา

4. เครื่องวิเคราะห์ค่าความหนืด (Kinematic viscometer) ยี่ห้อ Petrotest® Instruments รุ่น TV4000 ประเทศเยอรมันนี มีค่า Viscometer constant ที่ 40 องศาเซลเซียส เท่ากับ 0.2628, 0.2672 และ 0.4986 เซนติสโตกส์ต่อวินาที

5. เครื่องวิเคราะห์จุดวาบไฟ (Flash point meter) ยี่ห้อ Petrotest® Instruments รุ่น CL1 ประเทศเยอรมันนี

6. เครื่องวิเคราะห์จุดเทไหล (Pour point meter) ยี่ห้อ Petrotest® Instruments ประเทศเยอรมันนี

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 การคำนวณอัตราส่วนอย่างต่ำของสารตั้งต้น ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันระหว่างน้ำมันพืชกับเมทานอล (Bowman และคณะ, 2006)

	ไตรกลีเซอไรด์	+	เมทานอล	----->	น้ำมันดีเซลชีวภาพ	+	กลีเซอริน
n =	1 โมล		3 โมล		3 โมล		1 โมล
m = n x MW	885.5		3 x 32.04		3 x 296.5		92.1
=	885.50 กรัม		96.12 กรัม		889.50 กรัม		92.1 กรัม

โดยการคำนวณปริมาณเปอร์เซ็นต์ผลผลิต แสดงในภาคผนวก ข (ข้อ 1.)

3.2.2 การศึกษาสภาวะของกระบวนการคลีนอัลตราโซนิคร่วมกับคลื่นรังสีไมโครเวฟ

3.2.2.1 การศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล และอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. กำหนดสภาวะสูงสุดของกระบวนการคลีนอัลตราโซนิคร่วมกับคลื่นรังสีไมโครเวฟ ดังนี้

กำหนดสภาวะสูงสุดของกระบวนการรวม	
หน่วยอัลตราโซนิก	หน่วยไมโครเวฟ
กำลังอัลตราโซนิก 200 วัตต์	กำลังไมโครเวฟ 330 วัตต์
เวลา 30 นาที	เวลา 5 นาที
อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส	-

2. ศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล ได้แก่ $1/3$, $1/6$, $1/9$ และ $1/12$ และศึกษาอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ได้แก่ 0.1, 0.3, 0.5, 0.75 และ 1.0% ของน้ำหนักน้ำมัน ทำการทดลองตามสภาวะที่กำหนดในข้อ 1.

3. การทดลองมีขั้นตอนดังต่อไปนี้ ตวงน้ำมันปาล์มปริมาตร 200 มิลลิลิตร (น้ำหนักประมาณ 172 กรัม) ใส่ลงในขวดปฏิกิริยาขนาด 500 มิลลิลิตร

4. ชั่งสารโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.72 กรัม ($1.0\%w/w$, $1/6$) จากนั้นเติมเมทานอล ปริมาตร 50 มิลลิลิตร (น้ำหนักประมาณ 38 กรัม) เขย่าให้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ละลาย แล้วค่อยๆ เทสารละลายต่าง ลงไปในขวดปฏิกิริยา แล้วปิดผนึกด้วยพลาสติกแร็ป

5. ติดตั้งขวดปฏิกิริยาเข้ากับชุดทดลองที่หน่วยอัลตราโซนิก ควบคุมอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส แล้วทำปฏิกิริยาด้วยคลื่นอัลตราโซนิก จะได้สารละลายน้ำมันสีเหลืองขุ่น แสดงดังภาพที่ 3.1 (1) และ (2) จากนั้นทำการวัดอุณหภูมิหลังการเกิดปฏิกิริยาด้วยเทอร์โมมิเตอร์

ภาพที่ 3.1

การผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพด้วยกระบวนการคลื่นอัลตราโซนิกร่วมกับคลื่นรังสีไมโครเวฟ

(1) และ (2) ชุดทดลองที่หน่วยอัลตราโซนิกและผลิตภัณฑ์ที่ได้

(3) และ (4) ชุดทดลองที่หน่วยไมโครเวฟและผลิตภัณฑ์ที่ได้

(1)



(2)



(3)



(4)



6. นำสารละลายที่ได้จากหน่วยอัลตราโซนิก เทลงในขวดก้นกลมขนาด 500 มิลลิลิตร แล้วติดตั้งเข้ากับชุดควบคุมที่หน่วยไมโครเวฟ ทำปฏิกิริยาด้วยคลื่นรังสีไมโครเวฟ จะสังเกตเห็นการแยกชั้นของตะกอนกลีเซอริน และสารละลายสีเหลืองใสของเมทิลเอสเทอร์อย่างชัดเจน แสดงดังภาพที่ 3.1 (3) และ (4) เสร็จแล้วเทสารละลายลงในกรวยแยกทันที ทำการวัดอุณหภูมิหลังการเกิดปฏิกิริยาด้วยเทอร์โมมิเตอร์ และทิ้งไว้ให้อุ่นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นแยกกลีเซอรินออก เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนการล้างต่อไป

7. ขั้นตอนการล้างเมทิลเอสเทอร์ ควรล้างด้วยน้ำอุ่นปริมาตร 50 มิลลิลิตร จำนวน 2 - 3 ครั้ง ซึ่งในการล้างแต่ละครั้งควรทำให้น้ำมีการกระจายตัวมากที่สุด ทิ้งไว้ให้น้ำแยกชั้นประมาณ 10 นาที แล้วแยกน้ำออก นำเมทิลเอสเทอร์ที่ได้ไปต้มเพื่อกำจัดน้ำ ประมาณ 10 นาที จนน้ำมันมีสีเหลืองใส ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

8. จากนั้นนำเมทิลเอสเทอร์ที่ได้ ไประเหยเมทานอลส่วนเกินออก ด้วยเครื่องระเหยแบบหมุน ที่อุณหภูมิ 65 ± 1 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที เวลา 20 นาที เพื่อนำเมทานอลส่วนเกินที่เหลืออยู่ในเมทิลเอสเทอร์กลับมาใช้ใหม่ เสร็จแล้วทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จะสังเกตเห็นสีของเมทิลเอสเทอร์หรือน้ำมันดีเซลชีวภาพมีลักษณะเป็นสารละลายสีเหลืองใส แล้วนำไปชั่งเพื่อคำนวณปริมาณเปอร์เซ็นต์ผลผลิตที่ได้ และทำการทดลองซ้ำ จำนวน 2 - 3 ซ้ำ เพื่อเปรียบเทียบปริมาณเปอร์เซ็นต์ผลผลิตที่ได้ต่อไป

9. ทำการทดลองซ้ำกับอัตราส่วนต่างๆ ตามการทดลองข้อ 2. จากนั้นนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์น้ำมันดีเซลชีวภาพ ได้แก่ จุดวาบไฟ จุดเทโหล ความหนืด และกลีเซอรินทั้งหมด

3.2.2.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการร่วม โดยใช้อัตราส่วนที่เหมาะสม จากการทดลองข้อ 3.2.2.1 คือ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล เท่ากับ 1/6 และอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1.0% ของน้ำหนักน้ำมัน

1. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ ด้วยกระบวนการคลื่อนอัลตราโซนิกร่วมกับคลื่นรังสีไมโครเวฟ โดยศึกษาผลของกำลัง (อัลตราโซนิกและไมโครเวฟ) และเวลาในการทำปฏิกิริยา โดยมีรายละเอียดดังนี้

สภาวะที่ใช้ในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการร่วม	
อัตราส่วนโดยโมล 1/6	อัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา 1.0%
หน่วยอัลตราโซนิก กำลังอัลตราโซนิก 100 150 200 วัตต์ เวลา 5 8 10 20 30 นาที	หน่วยไมโครเวฟ กำลังไมโครเวฟ 102 198 330 วัตต์ เวลา 1 2 3 4 5 นาที

2. ทำการทดลองตามสภาวะที่กำหนดในข้อ 1. ซึ่งจากการออกแบบการทดลอง พบว่ามีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องหลายพารามิเตอร์ด้วยกัน เพื่อให้เกิดความเข้าใจที่ง่ายยิ่งขึ้น กล่าวคือ เมื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่สนใจ สภาวะที่เหลือจะถูกกำหนดให้เป็นสภาวะสูงสุด ดังตารางที่ 3.1 และทำการทดลองตามข้อ 3.2.2.1 (ข้อ 3 - 8)

3. จากนั้นนำผลิตภัณฑ์น้ำมันดีเซลชีวภาพที่ได้ คำนวณเปรียบเทียบปริมาณเปอร์เซ็นต์ผลผลิต

ตารางที่ 3.1

การออกแบบการทดลองในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการร่วม

หน่วย	พารามิเตอร์ที่สนใจ	สภาวะที่ศึกษา	สภาวะที่กำหนดของหน่วยอัลตราโซนิก		สภาวะที่กำหนดของหน่วยไมโครเวฟ	
อัลตราโซนิก	กำลังอัลตราโซนิก (วัตต์)	100 150 200	-	เวลา 30 นาที	กำลัง 330 วัตต์	เวลา 5 นาที
	เวลา (นาที)	5 8 10 20 30	กำลัง 200 วัตต์	-	กำลัง 330 วัตต์	เวลา 5 นาที
ไมโครเวฟ	กำลังไมโครเวฟ (วัตต์)	102 198 330	กำลัง 200 วัตต์	เวลา 30 นาที	-	เวลา 5 นาที
	เวลา (นาที)	1 2 3 4 5	กำลัง 200 วัตต์	เวลา 30 นาที	กำลัง 330 วัตต์	-

3.2.2.3 การศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสม ของกระบวนการคลื่นอัลตราโซนิกร่วมกับคลื่นรังสีไมโครเวฟ โดยใช้อัตราส่วนและสภาวะที่เหมาะสม จากการทดลองข้อ 3.2.2.1 และ 3.2.2.2

1. การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อกระบวนการร่วม มีรายละเอียดดังนี้

สภาวะที่ใช้ในการศึกษาผลของอุณหภูมิ	
อัตราส่วนโดยโมล 1/6	อัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา 1.0%
หน่วยอัลตราโซนิก กำลังอัลตราโซนิก 200 วัตต์ เวลา 10 นาที	หน่วยไมโครเวฟ กำลังไมโครเวฟ 198 วัตต์ เวลา 3 นาที
อุณหภูมิ อุณหภูมิห้อง 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส	-

2. ทำการทดลองตามข้อ 3.2.2.1 (ข้อ 3 - 8) โดยเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของระบบตามสภาวะที่กำหนดในข้อ 1.

3. จากนั้นนำผลิตภัณฑ์น้ำมันดีเซลชีวภาพที่ได้ คำนวณเปรียบเทียบปริมาณเปอร์เซ็นต์ผลผลิต

3.2.2.4 การศึกษาเปรียบเทียบกระบวนการผลิตแบบการกวนเชิงกล แบบแยกส่วน (อัลตราโซนิกและไมโครเวฟ) และแบบกระบวนการรวม

1. การศึกษาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต มีรายละเอียดดังนี้

สภาวะที่ศึกษา	การกวนเชิงกล	อัลตราโซนิก	ไมโครเวฟ	กระบวนการรวม	
				อัลตราโซนิก	ไมโครเวฟ
อัตราส่วนโดยโมล	1/6	1/6	1/6	1/6	
อัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา (%)	1.0	1.0	1.0	1.0	
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	50	50	-	50	-
เวลา (นาที)	45	10	3	10	3
ความเร็วปั่นกวน (รอบต่อนาที)	800	-	800	-	-
กำลัง (วัตต์)	-	200	198	200	198

2. จากนั้นทำการทดลองด้วยกระบวนการต่างๆ โดยใช้สภาวะที่กำหนดในข้อ 1. นำผลิตภัณฑ์น้ำมันดีเซลชีวภาพที่ได้ คำนวณเปรียบเทียบปริมาณเปอร์เซ็นต์ผลผลิต

3.2.3 การผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพจากวัตถุดิบน้ำมันชนิดต่างๆ ด้วยกระบวนการคลื่นอัลตราโซนิกร่วมกับคลื่นรังสีไมโครเวฟ

3.2.3.1 เตรียมวัตถุดิบน้ำมันทอดใช้แล้ว (ที่เก็บไว้เป็นเวลา 4 – 6 เดือน)

เนื่องจากน้ำมันทอดใช้แล้ว มีปริมาณน้ำและตะกอนปนเปื้อนอยู่มาก จำเป็นต้องมีการเตรียมวัตถุดิบให้เหมาะสม และหาค่าปริมาณกรดไขมันอิสระทั้งก่อนและหลังการทำปฏิกิริยา

1. เตรียมวัตถุดิบน้ำมันให้เหมาะสม โดยการกรองน้ำมันทอดใช้แล้วด้วยตะแกรงที่มีรูตะแกรงขนาดเล็ก และนำไปต้มเพื่อกำจัดน้ำ ที่อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

2. ทำการไตเตรตหาปริมาณกรดไขมันอิสระ มีขั้นตอน ดังนี้

2.1 ชั่งตัวอย่างน้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันทอดใช้แล้วจากข้อ 1 ประมาณ 5 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำละลาย (Isopropyl alcohol กับ Toluene, 50:50) ปริมาตร 20 มิลลิลิตร หยดอินดิเคเตอร์ฟีนอล์ฟทาลีน 3 หยด เขย่าให้เข้ากัน

2.2 ไตเตรตกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.05 นอร์มอล (N) สังเกตการเปลี่ยนสีของสารละลายเป็นสีชมพู บันทึกปริมาตร แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณกรดไขมันอิสระ โดยตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข (ข้อ 2)

ภาพที่ 3.2

การไตเตรตหาปริมาณกรดไขมันอิสระตามมาตรฐาน ASTM D 664

(ก่อน)



(หลัง)



3.2.3.2 การผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ

1. นำน้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันทอดใช้แล้ว มาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิต โดยเลือกใช้สภาวะที่เหมาะสมที่สุดตามข้อ 3.2.2.2 และ 3.2.2.3 ทำการทดลองตามข้อ 3.2.2.1 (ข้อ 3 – 8)

2. จากนั้นนำผลิตภัณฑ์น้ำมันดีเซลชีวภาพที่ได้มาทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความหนาแน่น ความหนืด จุดวาบไฟ จุดเทไหล ปริมาณกรดไขมันอิสระ กลีเซอรินทั้งหมด ความถ่วงจำเพาะและวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี ได้แก่ การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันนัลของสารประกอบด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดเพกโทรสโกปี และการวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันที่ระเหยได้ ด้วยเทคนิคไดนามิคเฮดสเปซก๊าซโครมาโทกราฟีและแมสสเปกโทรมิเตอร์ต่อไป

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

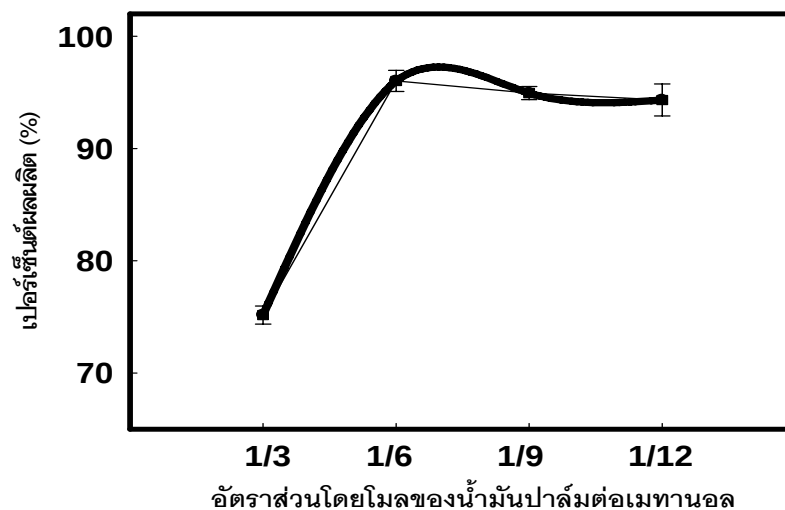
4.1 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการร่วม

4.1.1 ผลการศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล และอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

การศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล และอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ในการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ ด้วยกระบวนการกลั่นอัลตราโซนิกร่วมกับคลื่นรังสีไมโครเวฟ โดยเลือกใช้สภาวะสูงสุด คือ ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส กระตุ้นด้วยหน่วยอัลตราโซนิก กำลังอัลตราโซนิก 200 วัตต์ เป็นเวลา 30 นาที และหน่วยไมโครเวฟ กำลังไมโครเวฟ 330 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที

ภาพที่ 4.1

ผลการศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล



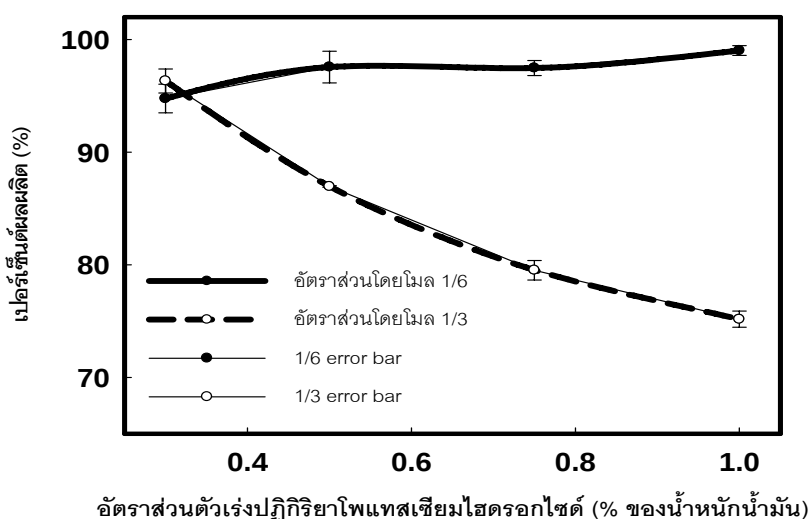
จากภาพที่ 4.1 กำหนดอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.0% ของน้ำหนักน้ำมัน และศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล พบว่า อัตราส่วนโดยโมลที่ได้ปริมาณเปอร์เซ็นต์ผลผลิตมากที่สุด คือ อัตราส่วน 1/6 ซึ่งการใช้ปริมาณเมทานอลที่มาก

เกินพอ (1/6 1/9 และ 1/12) ทำให้ปฏิกิริยาทรานสเอสเทอร์ฟิเคชันมีทิศทางที่จะได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นเมทิลเอสเทอร์เพิ่มมากขึ้น โดยสังเกตจากค่ากลีเซอรินทั้งหมดที่ลดลง และพบว่าจุดวับไฟ จุดเทไหล และค่าความหนืดที่ 40 องศาเซลเซียส มีค่าใกล้เคียงกัน อยู่ในช่วงที่มาตรฐานกำหนด (ASTM D6751) และในส่วนของอัตราส่วนโดยโมล 1/3 พบว่าปริมาณเปอร์เซ็นต์ผลผลิตน้อยได้ที่สุด เนื่องจากปริมาณเมทานอลอาจจะไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งการทดสอบคุณสมบัติของน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ผลิตได้จากน้ำมันปาล์มที่อัตราส่วนโดยโมลต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.1

จากภาพที่ 4.2 การศึกษาอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โดยเปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล 1/3 และ 1/6 ซึ่งจากการทดลองพบว่า ที่อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล 1/6 และอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.0% ของน้ำหนักน้ำมัน พบว่าปริมาณเปอร์เซ็นต์ผลผลิตที่ได้สูงสุด คือ 99.02% และในกรณีของอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล 1/3 พบว่าปริมาณเปอร์เซ็นต์ผลผลิตจะมีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งตรงข้ามกับอัตราส่วนโดยโมล 1/6 เป็นผลมาจากปริมาณเมทานอลที่ไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยา ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เกิดปฏิกิริยาข้างเคียง คือ ปฏิกิริยาสaponification ซึ่งจะเกิดสบู่ในขั้นตอนการล้างผลิตภัณฑ์ด้วยน้ำ และเกิดตะกอนเจลเมื่อเก็บผลิตภัณฑ์ไว้ที่อุณหภูมิห้อง

ภาพที่ 4.2

ผลการศึกษาอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์



ที่อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล เท่ากับ 1/6 เมื่อลดอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ให้ต่ำกว่า 0.75% ของน้ำหนักน้ำมัน (0.5 0.3 และ 0.1 % ของน้ำหนักน้ำมัน) น้ำมันดีเซลชีวภาพจะมีค่าจุดเทโหลเพิ่มสูงขึ้น เป็นผลมาจากปริมาณตะกอนเจลที่หลงเหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ ทำให้น้ำมันดีเซลชีวภาพแข็งตัวได้เร็วขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำลง ซึ่งจะส่งผลต่อระบบหัวฉีด วาล์วหรือกระบอกสูบของเครื่องยนต์ เมื่อใช้งานในที่ที่มีสภาพอากาศหนาวเย็น และในส่วนของค่ากลีเซอรินทั้งหมดจะเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณตะกอนเจลที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์น้ำมันดีเซลชีวภาพ ส่วนจุดวาบไฟและค่าความหนืด ที่ 40 องศาเซลเซียส มีค่าใกล้เคียงกัน อยู่ในช่วงที่มาตรฐานกำหนด และการทดสอบคุณสมบัติของน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ผลิตได้จากน้ำมันปาล์ม ด้วยอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1

ผลการทดสอบคุณสมบัติน้ำมันดีเซลชีวภาพ

อัตราส่วน โดยโมล	อัตราส่วนตัว เร่งปฏิกิริยา	การทดสอบคุณสมบัติ					
		จุดวาบไฟ (°C)	จุดเทโหล (°C)	ความหนืด ที่ 40 °C (cSt)	กลีเซอริน ทั้งหมด (%)	เปอร์เซ็นต์ ผลผลิต (%)	ลักษณะ น้ำมัน
น้ำมันปาล์ม		>300	1.5	37.48	-	-	เหลืองเข้ม
มาตรฐานน้ำมันดีเซลชีวภาพ		100<x<170 (ASTM D6751)	-15<x<10 (ASTM D6751)	4.0 – 6.0 (ASTM D6751)	<1.5 (สำหรับ เครื่องยนต์ การเกษตร)	-	-
1/3	1.0	178	7.0	7.65	2.17	75.17	มีตะกอนเจล
1/6	1.0	170	3.75	4.66	0.65	99.02	เหลืองใส
1/9	1.0	176	3.5	4.64	0.74	94.94	เหลืองใส
1/12	1.0	174	4.0	4.42	0.32	94.32	เหลืองใส
1/6	0.1	168	15.75	5.87	2.52	94.98	มีตะกอนเจล
1/6	0.3	174	7.25	5.87	1.61	96.32	มีตะกอนเจล
1/6	0.5	176	4.0	5.32	0.87	97.56	มีตะกอนเจล
1/6	0.75	172	3.0	4.75	0.94	97.47	เหลืองใส
1/6	1.0	170	3.75	4.66	0.65	99.02	เหลืองใส

ซึ่งอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดของการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพด้วยกระบวนการร่วมนี้ คือ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล 1/6 และอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียม

ไฮดรอกไซด์ 1.0% ของน้ำหนักน้ำมัน โดยผลิตภัณฑ์น้ำมันดีเซลชีวภาพที่ผลิตได้มีจุดวาบไฟ จุดเทไหล และค่าความหนืด ที่ 40 องศาเซลเซียส เท่ากับ 170 องศาเซลเซียส 3.75 องศาเซลเซียส และ 4.66 เซนติสโตกส์ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันปาล์มตั้งต้น ที่มีค่า >300 องศาเซลเซียส 1.5 องศาเซลเซียส และ 37.48 เซนติสโตกส์ ตามลำดับ โดยน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ผลิตได้จากน้ำมันปาล์มมีค่าความหนืดลดลงประมาณ 8 เท่า ของน้ำมันปาล์มตั้งต้น จุดวาบไฟ จุดเทไหล และค่าความหนืด ที่ 40 องศาเซลเซียส ของน้ำมันดีเซลชีวภาพอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้และค่ากลีเซอรินทั้งหมด เท่ากับ 0.65% อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของประกาศกรมธุรกิจพลังงาน ที่ว่าด้วยน้ำมันดีเซลชีวภาพสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (ไม่สูงกว่า 1.5%)

4.1.2 ผลการศึกษาสภาวะของกำลังและเวลาที่เหมาะสม ของกระบวนการคลีนอัลตราโซนิกร่วมกับคลื่นรังสีไมโครเวฟ

การศึกษานี้ปัจจัยในด้านกำลัง (อัลตราโซนิกและไมโครเวฟ) และเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่มีผลต่อกระบวนการร่วม โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล และอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1/6 และ 1.0% ของน้ำหนักน้ำมัน ตามลำดับ และกำหนดอุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาที่ 60 องศาเซลเซียส พบว่าสภาวะในด้านกำลังและเวลาที่เหมาะสมที่สุดของการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ ด้วยกระบวนการคลีนอัลตราโซนิกร่วมกับคลื่นรังสีไมโครเวฟ คือ กระตุ้นด้วยหน่วยอัลตราโซนิก กำลังอัลตราโซนิก 200 วัตต์ เวลา 10 นาที และหน่วยไมโครเวฟ กำลังไมโครเวฟ 198 วัตต์ เวลา 3 นาที ซึ่งปริมาณเปอร์เซ็นต์ผลผลิตที่ได้อยู่ในช่วง 90 – 99%

จากภาพที่ 4.3 (1) พบว่าปริมาณเปอร์เซ็นต์ผลผลิตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามกำลังอัลตราโซนิกที่ให้แก่ระบบ เนื่องจากผลของการผสมเข้ากันได้ดีขึ้นทำให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตที่ได้สูงขึ้น และจากภาพที่ 4.3 (2) พบว่าการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วภายในระยะเวลา 5 – 10 นาที และเมื่อเวลาผ่านไปอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะช้าลง ซึ่งสอดคล้องกับ (Stavarache, 2006) ที่พบว่าการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน ด้วยเทคนิคคลีนอัลตราโซนิกทำให้จำนวนไตรกลีเซอไรด์ลดลงอย่างรวดเร็ว จาก 3 นาทีแรก ลดลง 95% เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 3 นาที จำนวนไตรกลีเซอไรด์จะลดลง 99%

ภาพที่ 4.3

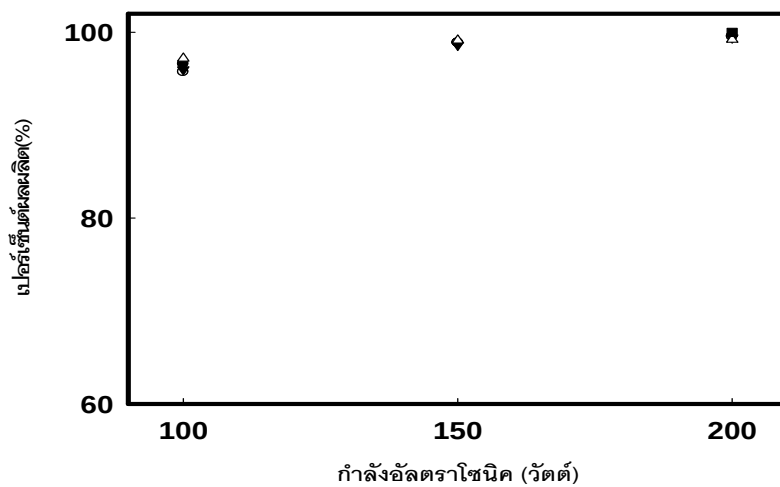
ผลของกำลังและเวลาที่มีผลต่อกระบวนการร่วมในหน่วยอัลตราโซนิก

(1)

ผลของกำลังในหน่วยอัลตราโซนิก

(U-unit: เวลา 30 นาที / M-unit: กำลัง 330 วัตต์ เวลา 5 นาที)

ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

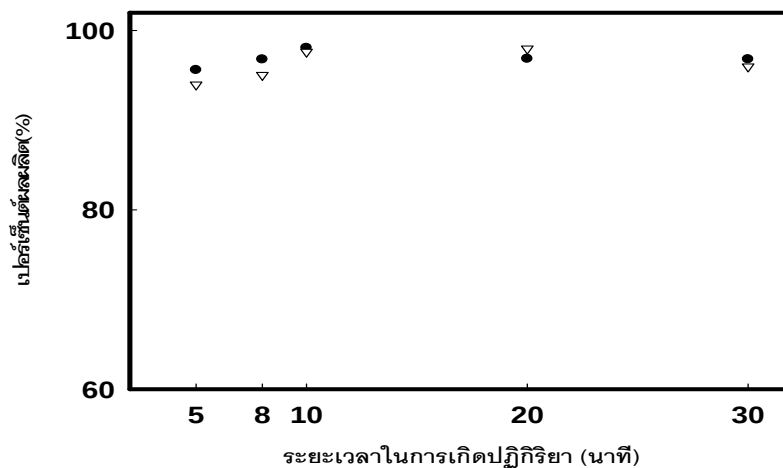


(2)

ผลของเวลาในหน่วยอัลตราโซนิก

(U-unit: กำลัง 200 วัตต์ / M-unit: กำลัง 330 วัตต์ เวลา 5 นาที)

ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4.4

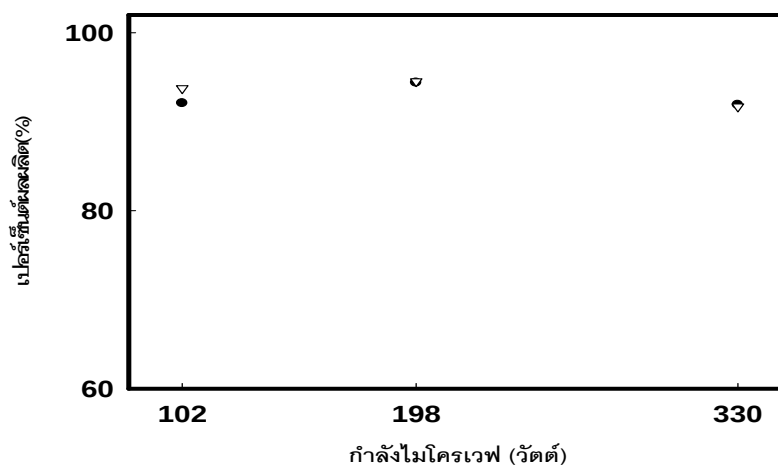
ผลของกำลังและเวลาที่มีผลต่อกระบวนการรวมในหน่วยไมโครเวฟ

(1)

ผลของกำลังในหน่วยไมโครเวฟ

(U-unit: กำลัง 200 วัตต์ เวลา 30 นาที / M-unit: เวลา 5 นาที)

ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

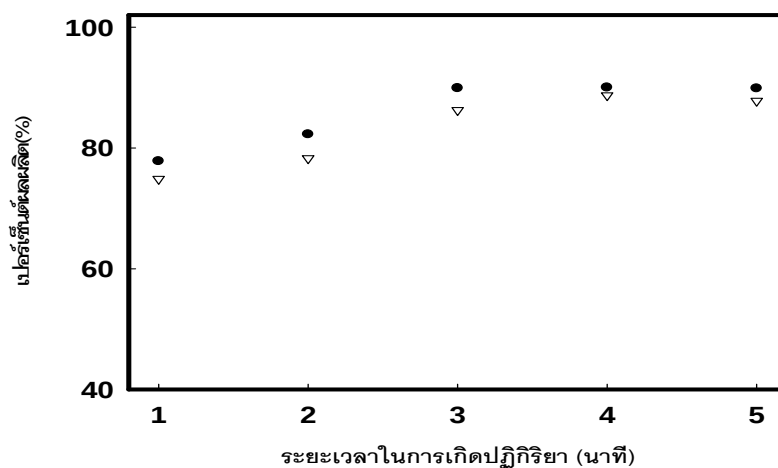


(2)

ผลของเวลาในหน่วยไมโครเวฟ

(U-unit: กำลัง 200 วัตต์ เวลา 30 นาที / M-unit: กำลัง 330 วัตต์)

ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส



จากภาพที่ 4.4 (1) พบว่ากำลังไมโครเวฟที่ 198 วัตต์ หรือระดับการละลายน้ำแข็ง (Defrost) จะเกิดการแยกชั้นระหว่างกลีเซอรินและเมทิลเอสเทอร์ได้อย่างรวดเร็วมากกว่าที่กำลังไมโครเวฟ 102 วัตต์ และในส่วนของกำลังไมโครเวฟ 330 วัตต์ ผลิตภัณฑ์กลีเซอรินที่แยกชั้นอยู่แล้วนั้น จะเกิดความร้อนอย่างมากและอาจจะเปิดออกจากถังปฏิกรณ์ทำให้เกิดอันตรายได้ และจากภาพที่ 4.4 (2) พบว่าระยะเวลาในการแยกชั้นระหว่างกลีเซอรินและเมทิลเอสเทอร์ จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว อยู่ในช่วงเวลา 3 – 5 นาที ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Nezihe และ Aysegul, 2008) และพบว่าเมื่อเวลาผ่านไปอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะช้าลง และนอกจากการแยกชั้นที่รวดเร็วแล้ว ในกระบวนการไมโครเวฟนี้ จะทำให้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นประมาณ 30 ± 2 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาภายในของสารประกอบโมเลกุลที่มีขั้ว เช่น เมทานอล และกลีเซอริน

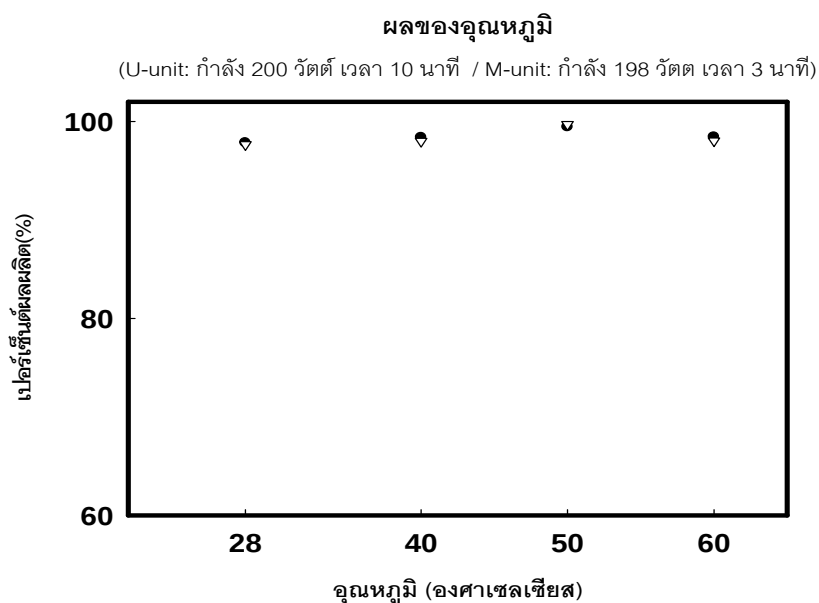
4.1.3 ผลการศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมของกระบวนการคลีนอัลตราโซนิกร่วมกับคลื่นรังสีไมโครเวฟ

การศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด ของกระบวนการคลีนอัลตราโซนิกร่วมกับคลื่นรังสีไมโครเวฟ โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล เท่ากับ 1/6 และอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.0% ของน้ำหนักน้ำมัน กระตุ้นด้วยหน่วยอัลตราโซนิก กำลังอัลตราโซนิก 200 วัตต์ เป็นเวลา 10 นาที และหน่วยไมโครเวฟ กำลังไมโครเวฟ 198 วัตต์ เป็นเวลา 3 นาที พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด คือ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส โดยปริมาณเปอร์เซ็นต์ผลผลิตที่ได้ คือ 99.45%

จากภาพที่ 4.5 พบว่ากระบวนการร่วมนี้ สามารถผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพได้ในทุกช่วงของอุณหภูมิ อีกทั้งสามารถผลิตได้ในช่วงอุณหภูมิห้อง (28 องศาเซลเซียส) เป็นผลมาจากความร้อนจากแหล่งกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิกในขณะทำปฏิกิริยา ที่ทำให้อุณหภูมิสารละลายน้ำมันเพิ่มขึ้นประมาณ 4.5 ± 1 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากกระบวนการคลีนไมโครเวฟที่ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ 30 ± 2 องศาเซลเซียส และเมื่อกระบวนการร่วมนี้เสร็จสมบูรณ์ อุณหภูมิของสารละลายน้ำมันจะมีอุณหภูมิประมาณ 80 – 82 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นมีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน และเป็นคุณลักษณะที่โดดเด่นของกระบวนการร่วมนี้ คือ ใช้กระบวนการของคลื่นช่วยในการทำปฏิกิริยา โดยไม่จำเป็นต้องมีการผสมกวนในถังปฏิกรณ์แต่อย่างใด

ภาพที่ 4.5

ผลของอุณหภูมิที่เหมาะสมของกระบวนการร่วม

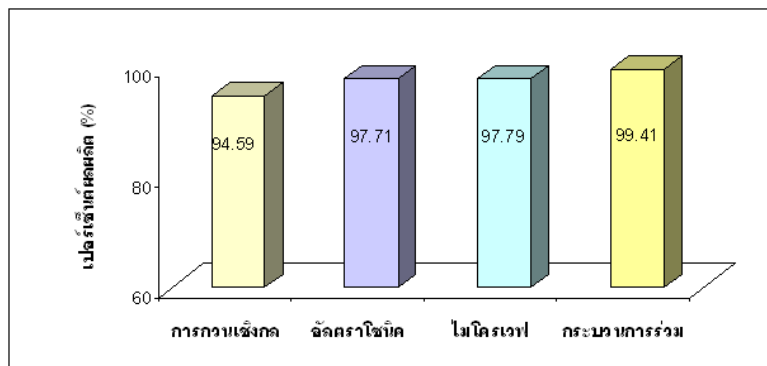


4.1.4 ผลการศึกษาเปรียบเทียบการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพด้วยกระบวนการกวนเชิงกล กระบวนการแยกส่วน (อัลตราโซนิกและไม่โครเวฟ) และกระบวนการร่วม

การศึกษาเปรียบเทียบกระบวนการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของ น้ำมันปาล์มต่อเมทานอล เท่ากับ 1/6 และอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.0% ของน้ำหนักน้ำมัน พบว่า การผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพด้วยกระบวนการกวนเชิงกล ได้ปริมาณ เปอร์เซ็นต์ผลผลิตน้อยที่สุด คือ 94.59% เมื่อแยกส่วนกระบวนการคลื่นอัลตราโซนิกออกจาก กระบวนการคลื่นรังสีไมโครเวฟ พบว่า กระบวนการอัลตราโซนิก ได้ปริมาณเปอร์เซ็นต์ผลผลิต คือ 97.71% และกระบวนการไมโครเวฟ ได้ปริมาณเปอร์เซ็นต์ผลผลิต คือ 97.79% ในขณะที่การผลิต ด้วยกระบวนการร่วม ได้ปริมาณเปอร์เซ็นต์ผลผลิตสูงสุด คือ 99.41% แสดงดังภาพที่ 4.6

ภาพที่ 4.6

ปริมาณเปอร์เซ็นต์ผลผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพของแต่ละกระบวนการ



4.1.5 ผลการศึกษาการใช้พลังงานของการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ ด้วยกระบวนการกวนเชิงกล กระบวนการแยกส่วน (อัลตราโซนิกและไมโครเวฟ) และกระบวนการรวม

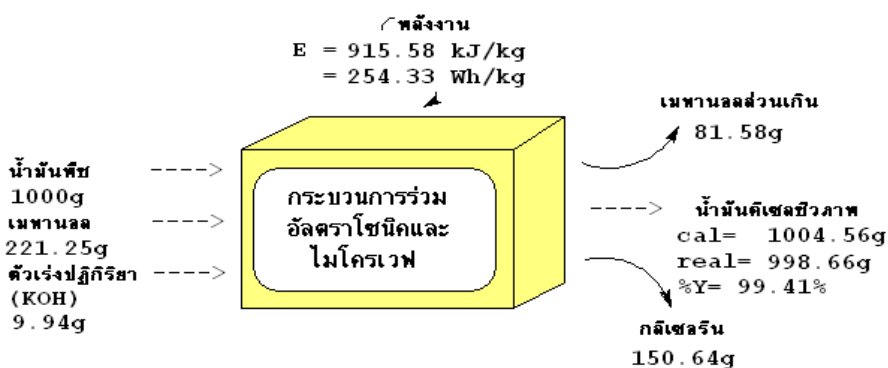
จากการคำนวณค่าการใช้พลังงานในการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ 1 กิโลกรัม ด้วยกระบวนการคลื่นอัลตราโซนิกร่วมกับคลื่นรังสีไมโครเวฟ มีค่าเท่ากับ 254.33 วัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัม (Wh/kg) โดยวิธีการคำนวณค่าการใช้พลังงานแสดงในภาคผนวก ค และการคำนวณจะพิจารณาภายใต้สมดุลมวลของกระบวนการรวม ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.7 พบว่ากระบวนการรวมนี้มีค่าการใช้พลังงานใกล้เคียงกับกระบวนการไฮโดรไดนามิคคาวิตีชัน และกระบวนการอัลตราโซนิก มีค่าเท่ากับ 183 และ 250 วัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ที่นำเสนอโดย (Jianbing และคณะ, 2006) สำหรับการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพด้วยกระบวนการกวนเชิงกล มีค่าการใช้พลังงานเท่ากับ 592.52 วัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัม เปรียบเทียบกับค่าที่นำเสนอโดย (Jianbing และคณะ, 2006) ที่มีค่าเท่ากับ 500 วัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัม จะเห็นได้ว่ากระบวนการรวม มีค่าการใช้พลังงานน้อยกว่ากระบวนการกวนเชิงกล และได้ปริมาณเปอร์เซ็นต์ผลผลิตที่สูงกว่า

การพิจารณาค่าการใช้พลังงานของกระบวนการอัลตราโซนิกและไมโครเวฟ พบว่า มีค่าการใช้พลังงาน เท่ากับ 196.09 และ 97.74 วัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัม จะเห็นได้ว่ากระบวนการรวม มีค่าการใช้พลังงานที่สูงกว่าทั้งสองกระบวนการ แต่จากการศึกษากระบวนการรวมเปรียบเทียบกับกระบวนการอัลตราโซนิก พบว่ากระบวนการอัลตราโซนิก จำเป็นต้องใช้ระยะเวลาในการแยกชั้นระหว่างกลีเซอรินและเมทิลเอสเทอร์ ประมาณ 60 – 120 นาที และการศึกษากระบวนการรวมเปรียบเทียบกับกระบวนการไมโครเวฟ พบว่ากระบวนการไมโครเวฟ จำเป็นต้องใช้การกวนเชิงกลด้วยใบพัดขณะทำปฏิกิริยา เพราะน้ำมันพืชและเมทานอลจะไม่สามารถผสมเข้ากันได้โดยง่าย ซึ่งการกวนเชิงกลด้วยใบพัดนั้น จะส่งผลกระทบต่อคลื่นรังสีไมโครเวฟโดยตรง ทำให้ประสิทธิภาพ

ของกระบวนการลดลง และเมื่อพิจารณาในด้านปริมาณเปอร์เซ็นต์ผลผลิต พบว่า กระบวนการร่วม ได้ปริมาณเปอร์เซ็นต์ผลผลิตสูงสุด คือ 99.41% ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.2

ภาพที่ 4.7

สมดุลมวลของการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ ด้วยกระบวนการคลื่นอัลตราโซนิก
ร่วมกับคลื่นรังสีไมโครเวฟ



ตารางที่ 4.2

ศึกษาเปรียบเทียบการใช้พลังงานของกระบวนการผลิตแต่ละประเภท

ที่มา	กระบวนการ	อัตราส่วน โดยโมล	อัตราส่วนตัวเร่ง ปฏิกิริยา	เวลาใน การเกิด ปฏิกิริยา (นาท)	เวลาใน การ แยกชั้น (นาท)	การใช้ พลังงาน (Wh/kg)	น้ำมัน ดีเซลชีวภาพ ได้จาก	เปอร์เซ็นต์ ผลผลิต (%)
อ้างอิงจาก (Jianbing, 2006)	การกวนเชิงกล	1/6	1.0% NaOH	45	*	500	น้ำมันถั่วเหลือง	92.0
	ไฮโดรไดนามิคคาเวิตชัน	1/6	1.0% NaOH	30	*	183	น้ำมันถั่วเหลือง	99.0
	อัลตราโซนิก	1/6	1.0% NaOH	15	*	250	น้ำมันถั่วเหลือง	99.0
จากการ ทดลอง	การกวนเชิงกล	1/6	1.0% KOH	45	60	592.52	น้ำมันปาล์ม	94.59
	อัลตราโซนิก	1/6	1.0% KOH	10	60	196.09	น้ำมันปาล์ม	97.71
	ไมโครเวฟ	1/6	1.0% KOH	3	5-8	97.74	น้ำมันปาล์ม	97.79
	กระบวนการร่วม	1/6	1.0% KOH	13	3-5	254.33	น้ำมันปาล์ม	99.41

หมายเหตุ * ไม่มีการระบุเวลาในขั้นตอนการแยกชั้นระหว่างกลีเซอรินและเมทิลเอสเทอร์

อนึ่ง ข้อดีของกระบวนการร่วมสามารถกล่าวได้ดังนี้ กระบวนการคลื่นอัลตราโซนิก มีส่วนช่วยให้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ในระยะเวลาอันสั้น โดยไม่จำเป็นต้อง

มีการกวว้างกลในระบบ และในส่วนของกระบวนการเคลื่อนรังสีไมโครเวฟ มีส่วนช่วยในการเร่งการก่อตัวของตะกอนกลีเซอริน และสามารถลดระยะเวลาในการแยกชั้นระหว่างกลีเซอรินและเมทิลเอสเทอร์ได้เป็นอย่างมาก

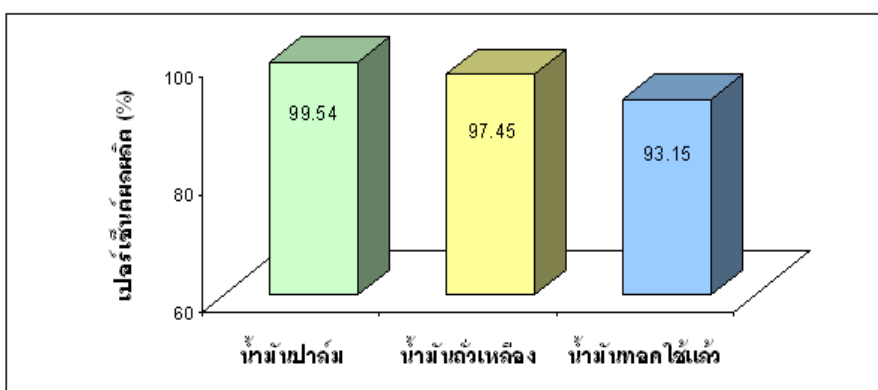
สามารถสรุปผลการศึกษสภาวะที่เหมาะสมที่สุด ของการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ ด้วยกระบวนการเคลื่อนอัลตราโซนิกร่วมกับคลื่นรังสีไมโครเวฟ คือ ใช้อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล เท่ากับ 1/6 และอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.0% ของน้ำหนักน้ำมัน ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส กระตุ้นด้วยหน่วยอัลตราโซนิก กำลังอัลตราโซนิก 200 วัตต์ เวลา 10 นาที และหน่วยไมโครเวฟ กำลังไมโครเวฟ 198 วัตต์ เวลา 3 นาที

4.2 ผลการศึกษาเปรียบเทียบวัตถุดิบน้ำมันแต่ละชนิด

การวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระก่อนการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน ของน้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันทอดใช้แล้ว พบว่ามีปริมาณกรดไขมันอิสระ เท่ากับ 0.39 0.51 และ 2.75 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม ตามลำดับ และใช้น้ำมันเหล่านี้เป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ ด้วยกระบวนการเคลื่อนอัลตราโซนิกร่วมกับคลื่นรังสีไมโครเวฟ โดยเลือกใช้สภาวะที่เหมาะสมที่สุด พบว่าปริมาณเปอร์เซ็นต์ผลผลิตที่ได้ คือ 99.54 97.35 และ 93.15% ตามลำดับ และเนื่องจากน้ำมันทอดใช้แล้วมีปริมาณกรดไขมันอิสระสูง (มากกว่า 1.0) ทำให้ได้ปริมาณเปอร์เซ็นต์ผลผลิตน้อยที่สุด แสดงดังภาพที่ 4.8

ภาพที่ 4.8

ปริมาณเปอร์เซ็นต์ผลผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ได้จากวัตถุดิบชนิดต่างๆ



การทดสอบคุณสมบัติน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ได้จากน้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันทอดใช้แล้ว โดยการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ ความหนาแน่น ความหนืด จุดวาบไฟ จุดเทไหล ปริมาณกรดไขมันอิสระ ปริมาณกลีเซอรินทั้งหมด ความถ่วงจำเพาะ และลักษณะสีของน้ำมันดีเซลชีวภาพ พบว่า ค่าการทดสอบคุณสมบัติอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานกำหนด ซึ่งคุณสมบัติของน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ได้จากวัตถุดิบน้ำมันทั้งสามชนิด แสดงดังตารางที่ 4.3

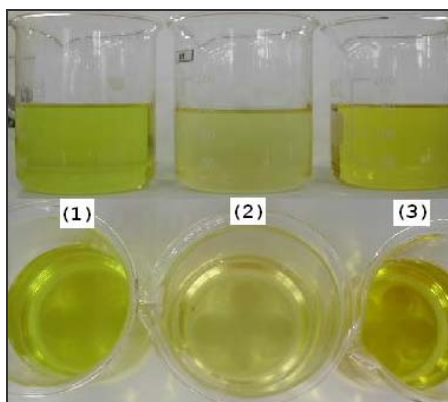
ตารางที่ 4.3

ผลการทดสอบคุณสมบัติน้ำมันดีเซลชีวภาพจากวัตถุดิบน้ำมันแต่ละชนิด

การทดสอบ	น้ำมันดีเซลชีวภาพ			ค่ามาตรฐาน	มาตรฐาน
	น้ำมัน	น้ำมัน	น้ำมันทอด		
	ปาล์ม	ถั่วเหลือง	ใช้แล้ว		
ความหนาแน่น ที่ 15 °C (kg/m ³)	858.4	864.2	859.6	860>x>900	ASTM D1298
ความหนืด ที่ 40 °C (cSt)	4.75	4.41	4.48	1.9>x>8.0	ASTM D445
จุดวาบไฟ (°C)	174	180	171	>120	ASTM D93
จุดเทไหล (°C)	3.5	-3.0	4.75	3<x<6	ASTM D97
ปริมาณกรดไขมันอิสระ (mg KOH/g)	0.16	0.22	0.20	<0.80	ASTM D664
กลีเซอรินทั้งหมด (%)	0.44	0.48	0.51	<1.5	GC-FID เทียบ
					ASTM D6584
ความถ่วงจำเพาะ	0.860	0.865	0.857	<0.88	ไฮโดรมิเตอร์
ลักษณะสี	เหลือง	เหลืองอ่อน	เหลืองเข้ม	-	-

ภาพที่ 4.9

ลักษณะสีของน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ได้จากวัตถุดิบชนิดต่างๆ
(1) น้ำมันปาล์ม (2) น้ำมันถั่วเหลือง และ (3) น้ำมันใช้ทอดแล้ว

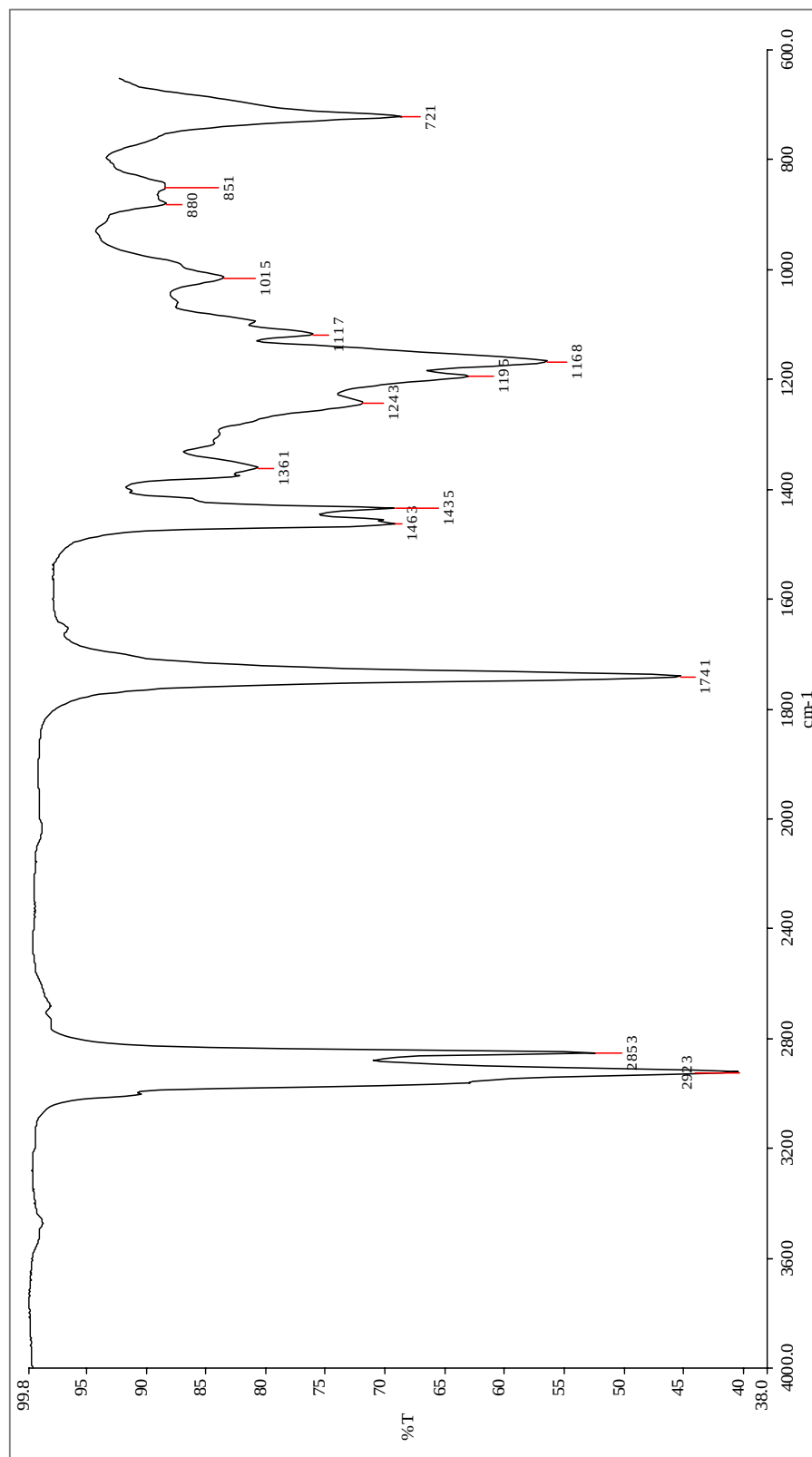


4.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของน้ำมันดีเซลชีวภาพ

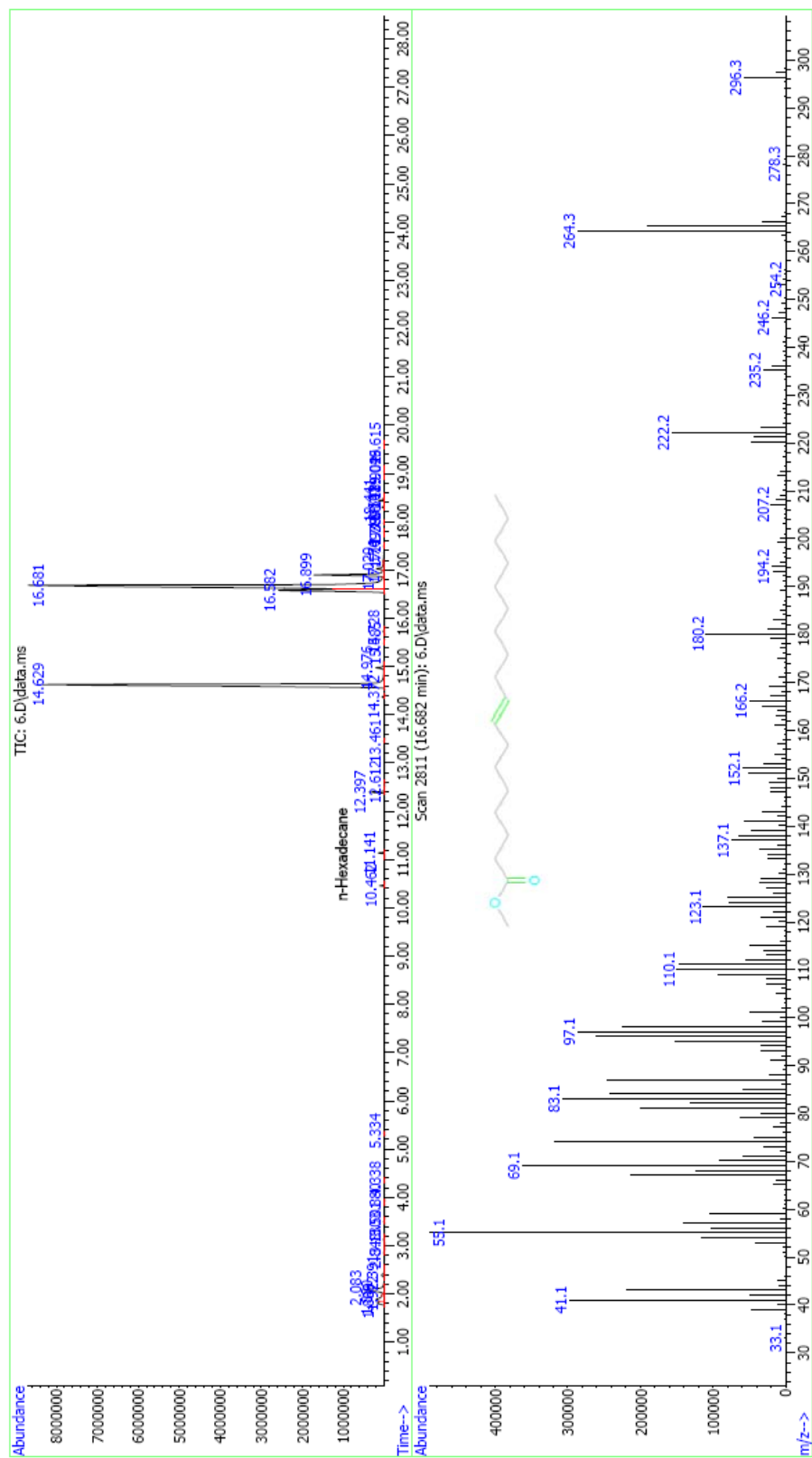
การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันนัลของสารประกอบ ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี และการวิเคราะห์องค์ประกอบของเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันที่สามารถระเหยได้ด้วยเทคนิคไดนามิคเฮดสเปซก๊าซโครมาโทกราฟีและแมสสเปกโตรมิเตอร์ ผลการทดลองมีดังนี้

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ผลิตได้ ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี จาก IR spectrum ของสารตัวอย่าง (ภาพที่ 4.10) พบว่าสารตัวอย่างมีการดูดกลืนแสงอินฟราเรด (IR) ที่ wave number ในช่วง $2853-2923\text{ cm}^{-1}$ (C-H stretch), 1741 cm^{-1} (C=O stretch) และ $1168-1195\text{ cm}^{-1}$ (C-O stretch) แสดงว่าเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่หมู่ฟังก์ชันนัลของเอสเทอร์เป็นองค์ประกอบหลัก และสเปกตรัมที่ชัดเจนที่สุดคือ 1741 cm^{-1} (C=O stretch) และที่ $1168-1195\text{ cm}^{-1}$ (C-O stretch) ซึ่งจะเห็นได้ว่า นอกจากสายโซ่ที่ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนและไฮโดรเจนแล้ว ยังมีอะตอมของออกซิเจนอยู่ภายในโครงสร้างของโมเลกุลของเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน ซึ่งอะตอมของออกซิเจนเหล่านี้จะช่วยให้เกิดการสันดาปที่สมบูรณ์ภายในเครื่องยนต์ดีเซลได้ดียิ่งขึ้น และเมื่อนำสเปกตรัมมาเปรียบเทียบกับ IR spectrum ของน้ำมันดีเซล จะไม่พบว่ามีสเปกตรัมที่ wave number 1741 cm^{-1} (C=O stretch) และในช่วง $1168-1195\text{ cm}^{-1}$ (C-O stretch) แต่อย่างใด ซึ่งแสดงในภาคผนวก ข (ข้อ 5)

การวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบของเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันที่สามารถระเหยได้ ด้วยเทคนิคไดนามิคเฮดสเปซก๊าซโครมาโทกราฟีและแมสสเปกโตรมิเตอร์ จากการวิเคราะห์โครมาโทแกรมและแมสสเปกตรัมของสารตัวอย่างน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ผลิตได้ พบว่า องค์ประกอบส่วนใหญ่ เป็นสารประกอบอินทรีย์ชนิดเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (FAMES) ตัวอย่างเช่น ที่พีคเวลา (Retention time; t_R) 14.629 นาที สารประกอบมีมวลโมเลกุลเท่ากับ 270.3 สูตรโครงสร้างโมเลกุล คือ $C_{17}H_{34}O_2$ และเมื่อนำมาแยกแฟรกเมนเตชันของแมสสเปกตรัมและอ้างอิงกับแมสสเปกตรัมมาตรฐานของ W8N05ST และ Nist98 พบว่า เป็นสาร Hexadecanoic acid, methyl ester และที่พีคเวลา 16.682 นาที สารประกอบมีมวลโมเลกุลเท่ากับ 296.3 สูตรโครงสร้างโมเลกุล คือ $C_{19}H_{36}O_2$ และเมื่อนำมาแยกแฟรกเมนเตชันของแมสสเปกตรัมและอ้างอิงกับแมสสเปกตรัมมาตรฐานของ W8N05ST และ Nist98 พบว่า เป็นสาร 9-Octadecenoic acid, methyl ester เป็นต้น ซึ่งสารประกอบทั้งสองชนิดพบมากในน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ได้จากน้ำมันปาล์ม แสดงดังภาพที่ 4.11 และพบว่าตัวอย่างน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ได้จากน้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันทอดใช้แล้ว มีเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันที่สามารถระเหยได้ เท่ากับ 99.43 99.14 และ 99.07% ตามลำดับ



ภาพที่ 4.10 IR spectrum ของน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ได้จากน้ำมันปาล์ม



ภาพที่ 4.11 โครมาโทแกรม และแมสสเปกตรัมของน้ำมันดีเซลชีวภาพ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

สภาวะที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการกลั่นอัลตราโซนิกร่วมกับคลื่นรังสีไมโครเวฟ ในการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ โดยอาศัยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน คือ ใช้อัตราส่วนโดยโมล ของน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล เท่ากับ $1/6$ และอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.0% ของน้ำหนักน้ำมัน ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส กระตุ้นด้วยหน่วยอัลตราโซนิก กำลังอัลตราโซนิก 200 วัตต์ เป็นเวลา 10 นาที และหน่วยไมโครเวฟ กำลังไมโครเวฟ 198 วัตต์ เป็นเวลา 3 นาที ซึ่งกระบวนการรวมนี้ สามารถลดระยะเวลาในการผลิตได้ถึง 6 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแบบการกวนเชิงกล อีกทั้งกระบวนการรวมยังสามารถแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดจากกระบวนการแบบแยกส่วน (อัลตราโซนิกและไมโครเวฟ) ซึ่งจากการคำนวณค่าการใช้พลังงานในการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ 1 กิโลกรัม พบว่ากระบวนการรวมมีค่าการใช้พลังงาน เท่ากับ 254.33 วัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัม และสามารถผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ได้จากน้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันทอดใช้แล้ว มีปริมาณเปอร์เซ็นต์ผลผลิตสูงสุด คือ 99.41 97.35 และ 93.15% ตามลำดับ และการทดสอบคุณสมบัติของน้ำมันดีเซลชีวภาพ ได้แก่ ความหนาแน่น ความหนืด จุดวาบไฟ จุดเทไหล ปริมาณกรดไขมันอิสระ ปริมาณกลีเซอรินทั้งหมด และความ ถ่วงจำเพาะ พบว่าคุณสมบัติของน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ผลิตได้จากวัตถุดิบแต่ละชนิด มีค่าอยู่ใน เกณฑ์มาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงานกำหนด การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่าง น้ำมันดีเซลชีวภาพที่ได้จากวัตถุดิบต่างๆ ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี พบว่า เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่หมู่ฟังก์ชันหลักของเอสเทอร์เป็นองค์ประกอบหลัก และการวิเคราะห์ องค์ประกอบของเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันที่สามารถระเหยได้ ของน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ได้จาก วัตถุดิบน้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันทอดใช้แล้ว มีค่าเท่ากับ 99.43 99.14 และ 99.07% ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ ด้วยกระบวนการกลั่นอัลตราโซนิกร่วมกับคลื่นรังสีไมโครเวฟ ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะเพิ่มเติมดังนี้

1. การทดลองเป็นการผลิตแบบกะ (Batch process) ทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องและอาจจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพที่แท้จริงของระบบ
2. เนื่องจากกระบวนการร่วมนี เป็นกระบวนการที่ไม่มีการใช้ใบพัดกวนเชิงกลในระบบ ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในกระบวนการผลิตแบบไหลต่อเนื่อง (Flow continuous process)
3. เกิดการสูญเสียผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนการล้างผลิตภัณฑ์ด้วยน้ำ ดังนั้นควรระมัดระวังในขั้นตอนนี้ หรือศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับกระบวนการล้างผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีการอื่นๆ
4. ควรมีการศึกษานำเมทานอลส่วนเกินกลับมาใช้ใหม่ (Methanol recovered)

บรรณานุกรม

บทความ

- จุฑาเกศ เทียนเมธางกูร และมานพ เจริญไชยตระกูล. (2551). การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันที่ผ่านการใช้ทอดแล้วโดยกระบวนการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน. การประชุมวิชาการเทคโนโลยีและนวัตกรรมสำหรับการพัฒนาอย่างยั่งยืน : มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี.
- ทรงพล พร้อมมูล และพิภพ พัทธศักดิ์เสรี. (2550). การผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชันโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์,
คณะวิศวกรรมศาสตร์, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี.
- ธเนศ อุทิศธรรม และพิศมัย เจนวนิชปัญญกุล. (2551). สถานการณ์และแผนยุทธศาสตร์พลังงานของประเทศไทย. เราไม่ถือน้ำมัน. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. ปทุมธานี : สำนักพิมพ์ฐานบุ๊คส์. (น.34-46)
- พนิดา เทพขุน และคณะ. (2551). เทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซล. เราไม่ถือน้ำมัน. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. ปทุมธานี : สำนักพิมพ์ฐานบุ๊คส์. (น.98 -129)
- เพียงพิศ วงศ์มณีนิล กฤษดา แก้วยก และอรพรรณ อยู่แท้กุล. (2549). ศึกษากระบวนการสังเคราะห์น้ำมันดีเซลชีวภาพจากน้ำมันทอดใช้แล้ว. สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน,
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.
- วีรชัย สุนทรรังสรรค์. (2551). สถานการณ์พลังงานของโลก. เราไม่ถือน้ำมัน. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. ปทุมธานี : สำนักพิมพ์ฐานบุ๊คส์. (น.12-31)

หนังสือ

- ประกอบ กิจไชยา. (2550). การสังเคราะห์น้ำมันดีเซลชีวภาพในแง่มุมมองทางวิศวกรรมปฏิกิริยาเคมี. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, คณะวิศวกรรมศาสตร์,
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี. กรุงเทพฯ: ผู้แต่ง.
- สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. (2551). เราไม่ถือน้ำมัน. ปทุมธานี: ฐานการพิมพ์.

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ
กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และกระทรวงพลังงาน. (2551). การศึกษา
เปรียบเทียบเทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซลของสหรัฐอเมริกาและไทย. ปทุมธานี : ผู้แต่ง.
ศิวะพงศ์ เพ็ชรสงค์. (2550). ไบโอดีเซลพลังงานทางเลือก. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มิตรภาพการ
พิมพ์และสตีวดีโอ.

วิทยานิพนธ์

นันทมนตร์ จันทรศิริสกุล. (2546). การปรับปรุงคุณสมบัติของน้ำมันดีเซลชีวภาพจากไขปาล์ม
สเตียรินโดยการผสม. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สาขาวิชาวิศวกรรมปิโตรเคมี.
ศิริวรรณ ตันอายุวรรณะ. (2550). การศึกษาการเสื่อมสภาพของน้ำมันพืชใช้แล้ว น้ำมันสนดำ และ
ผลที่มีต่อประสิทธิภาพในการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต,
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี.
อนวัช ดุรงค์มินนท์. (2547). การสังเคราะห์น้ำมันดีเซลชีวภาพในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ.
วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สาขาวิชาวิศวกรรมปิโตรเคมี.

Articles

Barnard M. and Leadbeater N. E. (2007). Microwave technology and continuous-flow
production. *Energy and Fuel*, 21, 1,777-1,781.
Bowman M., Hilligoss D., Rasmussem S. and Thomas R. (2006). Biodiesel : a renewable
and biodegradable fuel. *Hydrocarbon Processing*, Feb. 2006, 103-106.
Coen D. (2008). Analysis of free and total glycerine in B-100 biodiesel methyl ester by
gas chromatography. *Varian Inc*, application note SI-0420.
Hoang D. H., Nguyen T. D., Starvarache C., Okitsu K., Maeda Y. and Nishimura R.
(2008). Methanolysis of triolein by low frequency ultrasonic irradiation. *Energy
Conversion and Management*, 49, 276-280.

- Jianbing J, Jianli W., Yongchao L., Yunliang Y. and Zhichao X.. (2006). Preparation of biodiesel with help of ultrasonic and hydrodynamic cavitation. *Ultrasonics*, 44, e411 - e414.
- Mazzocchia C., Modica G., Kaddouri A. and Nannicini R. (2004). Fatty acid methyl esters synthesis from triglycerides over heterogeneous catalysts in the presence of microwaves. *C. R. Chimie*, 7, 601–605.
- Perreux L. and Loupy A. (2001). A tentative rationalization of microwave effects in organic synthesis according to the reaction medium and mechanistic considerations. *Tetrahedron*, 57, 9199-9223.
- Saifuddin, N. and K.H. Chua. (2004). Production of ethyl ester (biodiesel) from used frying oil: Optimization of transesterification process using microwave irradiation. *Malaysian Journal of Chemistry*, 6, 077 – 082.
- Srivastava A. and Prasad R. (2000). Triglycerides-based diesel fuels, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4, 111-133.
- 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.

Electronic Sources

- ชาคริต ทองอุไร. (2551). ระบบและกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบต่างๆ. สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจากน้ำมันปาล์มและพืชน้ำมัน. สืบค้นเมื่อวันที่ 10 สิงหาคม 2551.
<http://www.biodiesel.eng.psu.ac.th>
- ไทยออยล์. (2551). คำถาม-คำตอบเกี่ยวกับน้ำมันดีเซลมาตรฐาน EURO IV. สืบค้นเมื่อวันที่ 2 มีนาคม 2552.
<http://www.thaioil.co.th/cms/data/fckimages/File/Q&%20A%20EURO%20IV.pdf>
- พิทักษ์ เหล่ารัตนกุล. (2550). อัลตราโซนิก ตัวช่วยในกระบวนการผลิตอาหาร. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ. สืบค้นเมื่อวันที่ 21 พฤศจิกายน 2551.
http://www.nstda.or.th/nac2007/images/stories/exhibit/food-agro/agro_6.1.pdf

ฟิสิกส์ราชมงคล. (2550). Microwave คืออะไร. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล, คณะ
วิทยาศาสตร์, ภาควิชาฟิสิกส์. สืบค้นเมื่อวันที่ 21 พฤศจิกายน 2551

<http://www.rmutphysics.com/CHARUD/specialnews/6/microwave1/index.htm>

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. (2550). การผลิตและการตรวจสอบ
มาตรฐานไบโอดีเซลเบื้องต้น. สืบค้นเมื่อวันที่ 10 สิงหาคม 2551.

<http://www.tistr.or.th/tistr2006/source/techno/bio200712.pdf>

อาภาณี เหลืองนฤมิตชัย. (2549). ไบโอดีเซล (Biodiesel). สืบค้นเมื่อวันที่ 8 กันยายน 2551.

<http://www.vcharkarn.com/varticle/409/>

Hill M. (2000). The Microwave Palaeointensity Technique and its Application to Lava.

Chapter 3. Microwave Theory and Background. สืบค้นเมื่อวันที่ 1 มีนาคม 2552.

<http://www.liv.ac.uk/~mimi/Chapter3.pdf>

Shaine Tyson K. (Technical Monitor). (2004). Biodiesel Analytical Methods, August

2002–January 2004. Prepared under Subcontract No. ACO-2-31056-01, National

Renewable Energy Laboratory. สืบค้นเมื่อวันที่ 18 ธันวาคม 2551.

<http://www.nrel.gov/docs/fy04osti/36240.pdf>

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

มาตรฐานของน้ำมันดีเซลและน้ำมันดีเซลชีวภาพของประเทศไทย

ตารางที่ ก.1

รายละเอียดแนบท้ายประกาศกรมธุรกิจพลังงาน

เรื่อง การกำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล (ฉบับที่ 2)

ข้อกำหนด	อัตราสูงสุด	น้ำมันดีเซล			วิธีทดสอบ ¹
		หมุนเร็ว		หมุนช้า	
		ธรรมดา	ปี 5		
1. ความถ่วงจำเพาะ ณ อุณหภูมิ 15.6 องศาเซลเซียส	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	0.81 0.87	0.81 0.87	- 0.92	ASTM D 1298
2. จำนวนซีเทน หรือ ดัชนีซีเทน ก่อนวันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2555 ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2555 เป็นต้นไป	ไม่ต่ำกว่า ไม่ต่ำกว่า	47 50	47 50	45 45	ASTM D 613 หรือ ASTM D 976
3. ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (เซนติสโตกส์)	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	1.8 4.1	1.8 4.1	- 8.0	ASTM D 445
4. จุดเทไหล (องศาเซลเซียส)	ไม่สูงกว่า	10	10	16	ASTM D 97
5. กำมะถัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก) ก่อนวันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2555 ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2555 เป็นต้นไป	ไม่สูงกว่า ไม่สูงกว่า	0.035 0.035	0.035 0.035	1.5 1.5	ASTM D 4294
6.การกัดกร่อนแผ่นทองแดง	ไม่สูงกว่า	หมายเลข 1	หมายเลข 1	-	ASTM D 130
7. เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (กรัม/ลูกบาศก์เมตร)	ไม่สูงกว่า	-	25	-	ASTM D 2274
8. กากถ่าน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า	0.05	0.05	-	ASTM D 189
9. น้ำและตะกอน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า	0.05	0.05	0.3	ASTM D 2709
10. เถ้า (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า	0.01	0.01	0.02	ASTM D 482
11. จุดวาบไฟ (องศาเซลเซียส)	ไม่ต่ำกว่า	52	52	52	ASTM D 93
12. การกลั่น (องศาเซลเซียส) อุณหภูมิของส่วนที่กลั่นได้โดยปริมาตรใน อัตราร้อยละ 90	ไม่สูงกว่า	357	357	-	ASTM D 86
13. โพลีไซคลิก อะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน (ร้อยละโดยน้ำหนัก) ก่อนวันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2555	-	-	-	-	ASTM D 2425

ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2555 เป็นต้นไป	ไม่สูงกว่า	11	11	-	
14. สี					(1) เปรียบเทียบสีและปริมาณเนื้อสีกับน้ำมัน
14.1 ชนิดของสี		-	น้ำเงิน ²	-	มาตรฐานที่เตรียมขึ้นใหม่โดยใช้สีละลายในน้ำมัน
14.2 เนื้อสี (มิลลิกรัม/ลิตร)	ไม่ต่ำกว่า	-	7.0	-	ก่อนการย้อมสีให้มีปริมาณเท่ากับที่กำหนดแล้วนำมาบรรจุแยกกันในภาชนะที่ใช้ในการวัดสีตามวิธีทดสอบ ASTM D 1500 แล้วตรวจพินิจด้วยสายตาหรือ (2)
14.3 ความเข้มของสี	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	- 4.0	- -	4.5 7.5	ASTM D 2392 ASTM 1500
15. ไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	1.5 2	4 5	- -	EN 14078
16. คุณสมบัติการหล่อลื่น (ไมโครเมตร)	ไม่สูงกว่า	460	460	-	CEC F-06-A-96
17. สารเติมแต่ง (ถ้ามี)	ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบจากอธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน				

ที่มา ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล (ฉบับที่ 2)

พ.ศ. 2550

ตารางที่ ก.2

รายละเอียดแนบท้ายประกาศกรมธุรกิจพลังงาน

เรื่อง การกำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซลชีวภาพ ประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรด
ไขมันและสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน)

ข้อกำหนด	อัตราสูงต่ำ	น้ำมันดีเซลชีวภาพ		วิธีทดสอบ ¹
		ประเภทเมทิล เอสเทอร์ของ กรดไขมัน	สำหรับ เครื่องยนต์ การเกษตร	
1. เมทิลเอสเทอร์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่ต่ำกว่า	96.5	-	EN 14103
2. ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)	ไม่ต่ำกว่า และไม่สูงกว่า	860 900	860 900	ASTM D 1298
3. ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (เซนติสโตกส์)	ไม่ต่ำกว่า และไม่สูงกว่า	3.5 5.0	1.9 8.0	ASTM D 445
4. จุดวาบไฟ (องศาเซลเซียส)	ไม่ต่ำกว่า	120	120	ASTM D 93
5. กำมะถัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า	0.0010	0.0015	ASTM D 2622
6. กากถ่าน (ร้อยละโดยน้ำหนัก) (ร้อยละ 10 ของกากที่เหลือจากการกลั่น)	ไม่สูงกว่า	0.30	-	ASTM D 4530
7. จำนวนซีเทน	ไม่ต่ำกว่า	51	47	ASTM D 613
8. แก๊ซเฟต (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า	0.02	0.02	ASTM D 874
9. น้ำ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า	0.050	-	EN ISO 12937
10. น้ำและตะกอน (ร้อยละโดยปริมาตร)	ไม่สูงกว่า	-	0.2	ASTM D2709
11. สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า	0.0024	-	EN 12662
12. การกัดกร่อนแผ่นทองแดง	ไม่สูงกว่า	หมายเลข 1	หมายเลข 3	ASTM D 130
13. เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส (ชั่วโมง)	ไม่ต่ำกว่า	6	-	EN 14112
14. ค่าความเป็นกรด (มิลลิกรัมปอตัสเซียม ไฮดรอกไซด์/กรัม)	ไม่สูงกว่า	0.50	0.80	ASTM D 664
15. ค่าไอโอดีน (กรัมไอโอดีน/ 100 กรัม)	ไม่สูงกว่า	120	-	EN 14111
16. กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์ (ร้อยละโดย น้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า	12.0	-	EN 14103
17. เมทานอล (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า	0.20	-	EN 14110
18. โมโนกลีเซอไรด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า	0.80	-	EN 14105
19. ไดกลีเซอไรด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า	0.20	-	EN 14105
20. ไตรกลีเซอไรด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า	0.20	-	EN 14105
21. กลีเซอรินอิสระ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า	0.02	0.02	EN 14105
22. กลีเซอรินทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า	0.25	1.5	EN 14105

23. โลหะกลุ่ม 1 (โซเดียมและโปแตสเซียม) (มิลลิกรัม/กิโลกรัม) และโลหะกลุ่ม 2 (แคลเซียมและแมกนีเซียม) (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)	ไม่สูงกว่า	5.0	-	EN 14108 EN 14109 pr EN 14538
24. ฟอสฟอรัส (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า	0.0010	-	ASTM D 4951
25. สี	-	-	ม่วง ²	ตรวจพินิจด้วยสายตา
26. สารเติมแต่ง (ถ้ามี)	ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบจากอธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน			
หมายเหตุ 1/ วิธีทดสอบอาจใช้วิธีอื่นที่เทียบเท่าก็ได้ แต่ในกรณีที่มีข้อโต้แย้งให้ใช้วิธีที่กำหนดในรายละเอียดแนบท้ายนี้ 2/ ใช้สารประกอบประเภท 1,4-dialkylamino anthraquinone และ alkyl derivatives of azobenzene-4-azo-2-naphthol				

ที่มา ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลสำหรับ
เครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน) พ.ศ. 2549 และ เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพ
ของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอรืของกรดไขมัน พ.ศ. 2550

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของน้ำมันดีเซลชีวภาพ

1. การคำนวณปริมาณเปอร์เซ็นต์ผลผลิต (%Yield)

สมการการคำนวณ

$$\%Yield = \frac{\text{ผลผลิตที่ได้จากการทดลอง}}{\text{ผลผลิตที่ได้จากการคำนวณ}} \times 100$$

ตัวอย่างการคำนวณ

จากการคำนวณอัตราส่วนอย่างต่ำของสารตั้งต้นและจากการทดลอง พบว่า ไตรกลีเซอไรด์เป็นสารกำหนดปริมาณ (Limiting reagent) โดยใช้ไตรกลีเซอไรด์น้ำหนัก 885.5 กรัม จะได้ น้ำมันดีเซลชีวภาพน้ำหนัก 889.50 กรัม ซึ่งจากการทดลองใช้น้ำมันปาล์มหนัก 172.288 กรัม สามารถคำนวณผลผลิตได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ผลผลิตที่ได้จากการคำนวณ} &= \frac{172.288 \times 889.5}{885.5} \\ &= 173.066 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

และจากการทดลองสามารถผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพได้น้ำหนัก 172.053 กรัม

$$\begin{aligned} \%Yield &= \frac{172.053}{173.066} \times 100 \\ &= 99.41\% \end{aligned}$$

ดังนั้น ปริมาณเปอร์เซ็นต์ผลผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ได้จากน้ำมันปาล์ม เท่ากับ 99.41%

2. การหาปริมาณกรดไขมันอิสระ (Acid value; ASTM D664, <0.8 mg KOH/g)

สมการการคำนวณ

$$AV = \frac{(A-B) \times N \times MW}{Wt}$$

เมื่อ AV คือ ปริมาณกรดไขมันอิสระ (มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม, mg KOH/g)

A คือ ปริมาณสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไตเตรตตัวอย่าง (มิลลิลิตร, mL)

B คือ ปริมาณสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไตเตรต blank (มิลลิลิตร, mL)

N คือ ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (นอร์มอล, N หรือ mg KOH/mL)

MW คือ มวลโมเลกุลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH, MW = 56.1)

Wt คือ น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)

ตัวอย่างการคำนวณ

จากการไตเตรตหาปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันทอดใช้แล้ว โดยใช้น้ำมันหนัก 5.042 กรัม ไตเตรตกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.05 นอร์มอล ใช้ปริมาณสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 5.05 มิลลิลิตร และไตเตรตเทียบกับ blank ใช้ปริมาณสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.1 มิลลิลิตร จะได้

$$\begin{aligned} AV &= \frac{(5.05 - 0.1(\text{mL})) \times 0.05 (\text{mg KOH/mL}) \times 56.1}{5.042 (\text{g})} \\ &= 2.75 \text{ mg KOH/g} \end{aligned}$$

ถ้าเป็นน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ได้จากน้ำมันทอดใช้แล้ว ไตเตรตโดยใช้น้ำมันดีเซลชีวภาพหนัก 6.737 กรัม ไตเตรตกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.05 นอร์มอล ใช้ปริมาณสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.57 มิลลิลิตร จะได้

$$\begin{aligned} AV &= \frac{(0.57 - 0.1 (\text{mL})) \times 0.05 (\text{mg KOH/mL}) \times 56.1}{6.737 (\text{g})} \\ &= 0.20 \text{ mg KOH/g} \end{aligned}$$

ดังนั้น น้ำมันทอดใช้แล้วและน้ำมันดีเซลชีวภาพจากน้ำมันทอดใช้แล้ว มีปริมาณกรดไขมันอิสระ เท่ากับ 2.75 และ 0.20 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม ตามลำดับ

3. การวิเคราะห์ค่าความหนืด ที่ 40 องศาเซลเซียส (Kinematic viscosity; ASTM D445, $4.0 < x < 6.0$)

สมการการคำนวณ

$$\begin{array}{lcl} \text{Kinematic viscosity} & = & \text{Viscometer constant} \times \text{Efflux time} \\ \text{(เซนติสโตกส์)} & & \text{(เซนติสโตกส์ต่อวินาที)} \times \text{(วินาที)} \end{array}$$

การทดลองใช้ชุดทดลองที่มีค่า Viscometer constant เท่ากับ 0.2628, 0.2672 และ 0.4986 เซนติสโตกส์ต่อวินาที

ตัวอย่างการคำนวณ

ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส น้ำมันมันปาล์มใช้เวลาในการไหลเท่ากับ 75.17 วินาที (sec) ทดลองกับชุดทดลองที่มีค่า Viscometer constant เท่ากับ 0.4986 เซนติสโตกส์ต่อวินาที (cSt/sec) จะได้

$$\begin{aligned} \text{Kinematic viscosity} &= 0.4986 \text{ (cSt/sec)} \times 75.17 \text{ (sec)} \\ &= 37.48 \text{ cSt} \end{aligned}$$

และที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส น้ำมันดีเซลชีวภาพที่ได้จากน้ำมันมันปาล์มใช้เวลาในการไหลเท่ากับ 17.31 วินาที (sec) ทดลองกับชุดทดลองที่มีค่า Viscometer constant เท่ากับ 0.2672 เซนติสโตกส์ต่อวินาที (cSt/sec) จะได้

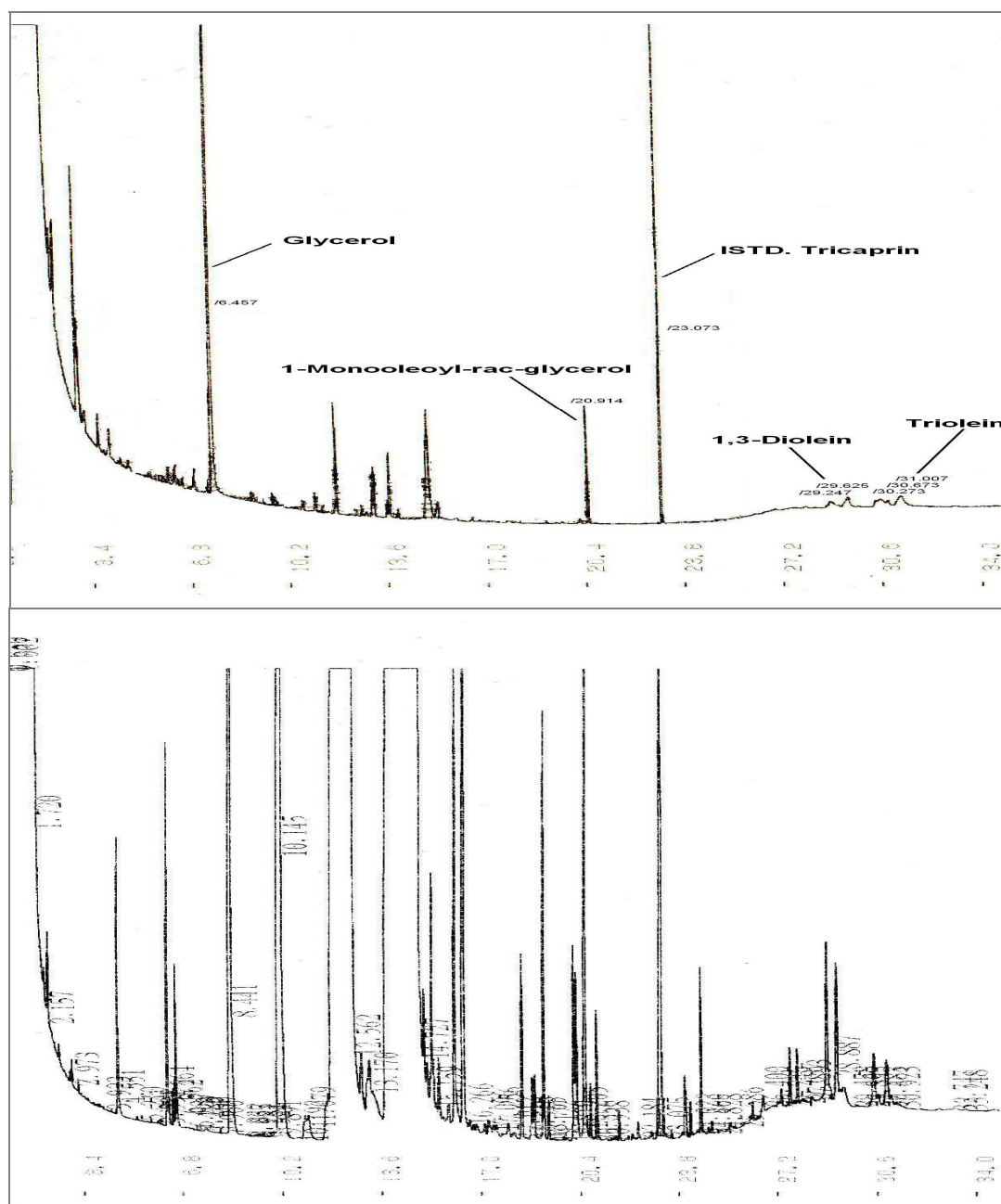
$$\begin{aligned} \text{Kinematic viscosity} &= 0.2672 \text{ (cSt/sec)} \times 17.31 \text{ (sec)} \\ &= 4.62 \text{ cSt} \end{aligned}$$

ดังนั้น น้ำมันปาล์มและน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ได้จากน้ำมันปาล์ม มีค่าความหนืดที่ 40 องศาเซลเซียส เท่ากับ 37.48 และ 4.62 เซนติสโตกส์ ตามลำดับ

4. ผลการวิเคราะห์ปริมาณกลีเซอรินทั้งหมด (Total glycerin; GC-FID เพียงเคียง ASTM D6584, <1.5%)

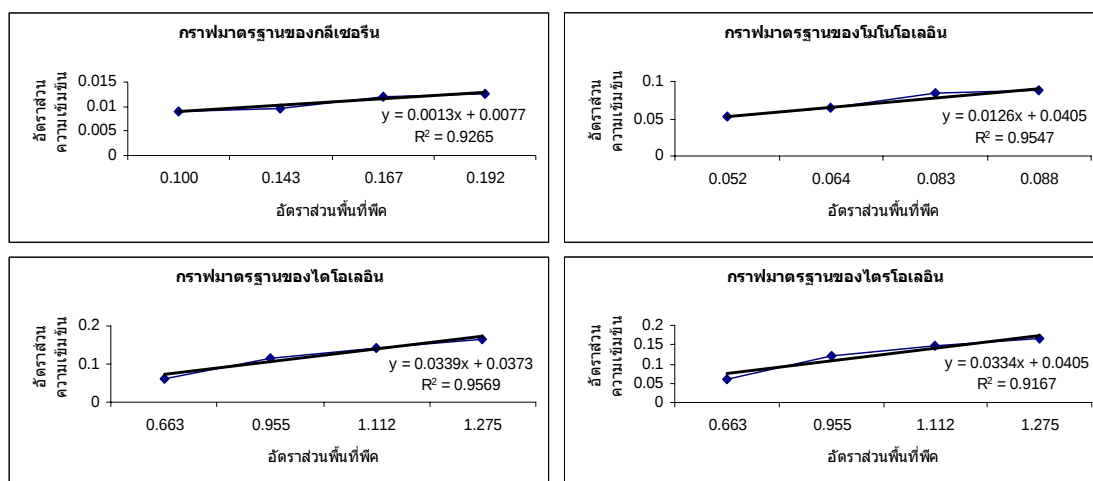
ภาพที่ ข 1.

โครมาโทแกรมของสารมาตรฐานและตัวอย่างน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ได้จากน้ำมันปาล์ม
เทียบกับ Tricaprin (Internal standard)



ภาพที่ ๒.

กราฟมาตรฐานที่ใช้ในการคำนวณปริมาณกลีเซอรินทั้งหมด



การคำนวณปริมาณกลีเซอรินทั้งหมด

จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี (Gas chromatography) พื้นที่พีคของสารตัวอย่างที่สนใจ แสดงดังตาราง

รีเทนชันไทม์ (t_R) (นาที)	พื้นที่พีค (Area)	ความสูงพีค (Height)	ชื่อสาร
6.229	3857	1433	Glycerin
20.464	9168	1772	Monoglyceride
20.843	993	238	
25.44	17690	2521	Tricaprin (ISTD.)
27.767	8659	222	Diglyceride
28.736	3225	375	
29.054	6838	409	
30.281	3097	198	Triglyceride
30.705	2259	194	
31.121	2937	90	

สมการการคำนวณ

$$G (\%w/w) = (a_g \times A_g/A_{is} + b_g) \times W_{is} \times 100/W$$

เมื่อ G คือ ร้อยละโดยน้ำหนักของกลีเซอรินอิสระในสารตัวอย่าง

A_g คือ พื้นที่พีคของกลีเซอริน

A_{is} คือ พื้นที่พีคของ internal standard

W_{is} คือ น้ำหนักของ internal standard ในหน่วยมิลลิกรัม

W คือ น้ำหนักของสารตัวอย่างในหน่วยมิลลิกรัม

a_g คือ ความชัน และ b_g คือ จุดตัดแกน y ซึ่งได้มาจากการทำ Calibration curve

ตัวอย่างการคำนวณ

ในการวิเคราะห์ใช้ตัวอย่างน้ำมันหนัก 101.6 มิลลิกรัม และความเข้มข้นของ Tricaprin (Internal standard) เท่ากับ 7.99 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร (mg/mL) (ใช้ 100 ไมโครลิตร คิดเป็น 0.799 มิลลิกรัม)

$$\begin{aligned} \text{กลีเซอริน } G (\%w/w) &= [(0.0013 \times (3857/17690)) + 0.0077] \times (0.799 \times (100/101.6)) \\ &= 0.0628\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{โมนอกลิเซอไรด์ } G (\%w/w) &= 0.2591 \times [(0.0106 \times (10161/17690)) + 0.0405] \times \\ &\quad (0.799 \times (100/101.6)) \\ &= 0.2591 \times 0.33754 \\ &= 0.09727\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ไดกลีเซอไรด์ } G (\%w/w) &= 0.1488 \times [(0.0339 \times (18722/17690)) + 0.0373] \times (0.799 \\ &\quad \times (100/101.6)) \\ &= 0.1488 \times 0.5755 \\ &= 0.05632\% \end{aligned}$$

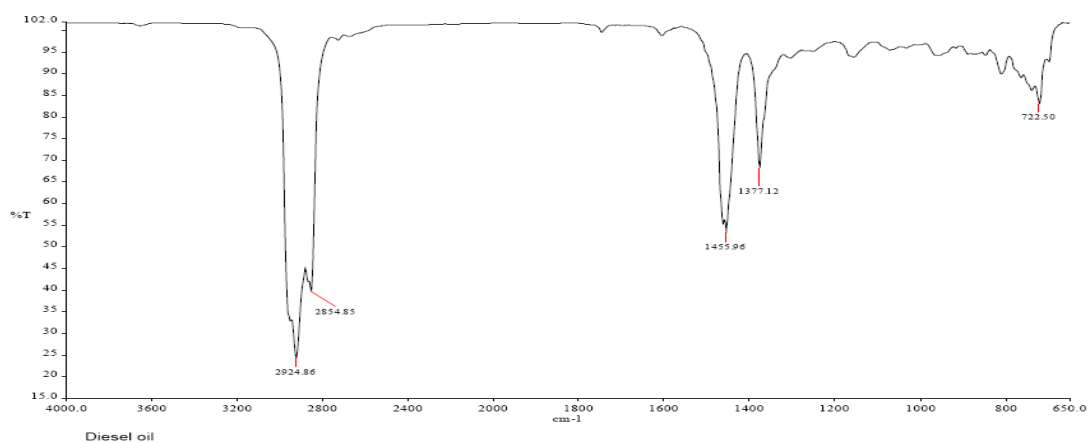
$$\begin{aligned}
 \text{ไตรกลีเซอไรด์ G (\%w/w)} &= 0.1044 \times [(0.0334 \times (8293/17690)) + 0.0405] \times (0.799 \times \\
 &\quad (100/101.6)) \\
 &= 0.1044 \times 0.4416 \\
 &= 0.04611\%
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{กลีเซอรินทั้งหมด (\%w/w)} &= 0.0628 + 0.09727 + 0.05632 + 0.04611 \\
 &= 0.29\%
 \end{aligned}$$

ดังนั้น ปริมาณกลีเซอรินทั้งหมดที่มีอยู่ในน้ำมันดีเซลชีวภาพ เท่ากับ 0.29%

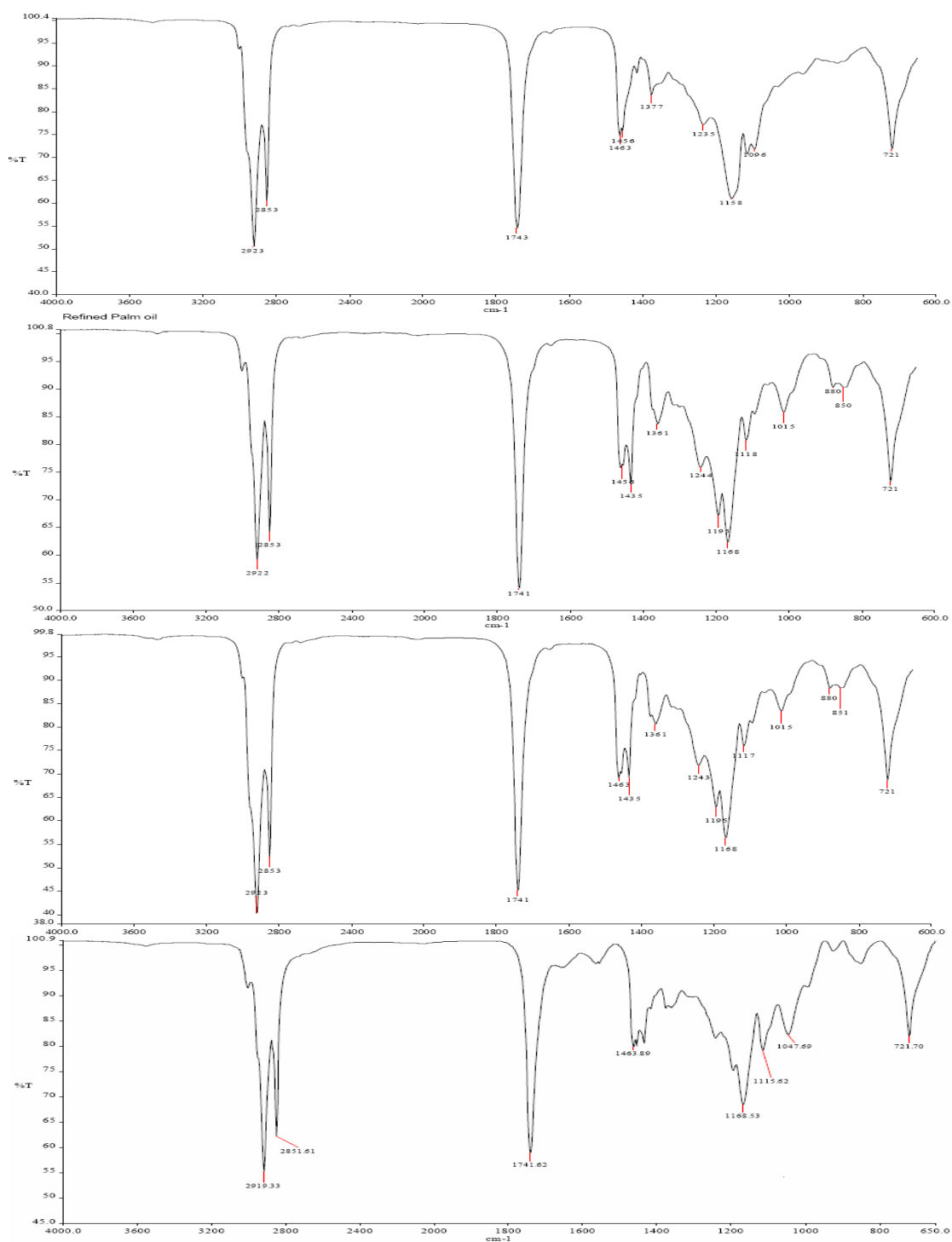
5. การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบ ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด เปกโทสโกปี (FT-IR)

ภาพที่ ๓.
IR spectrum ของน้ำมันดีเซล



ภาพที่ ๗ 4.

IR spectrum ของน้ำมันปาล์ม และน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ได้จากน้ำมันปาล์ม
น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันทอดใช้แล้ว

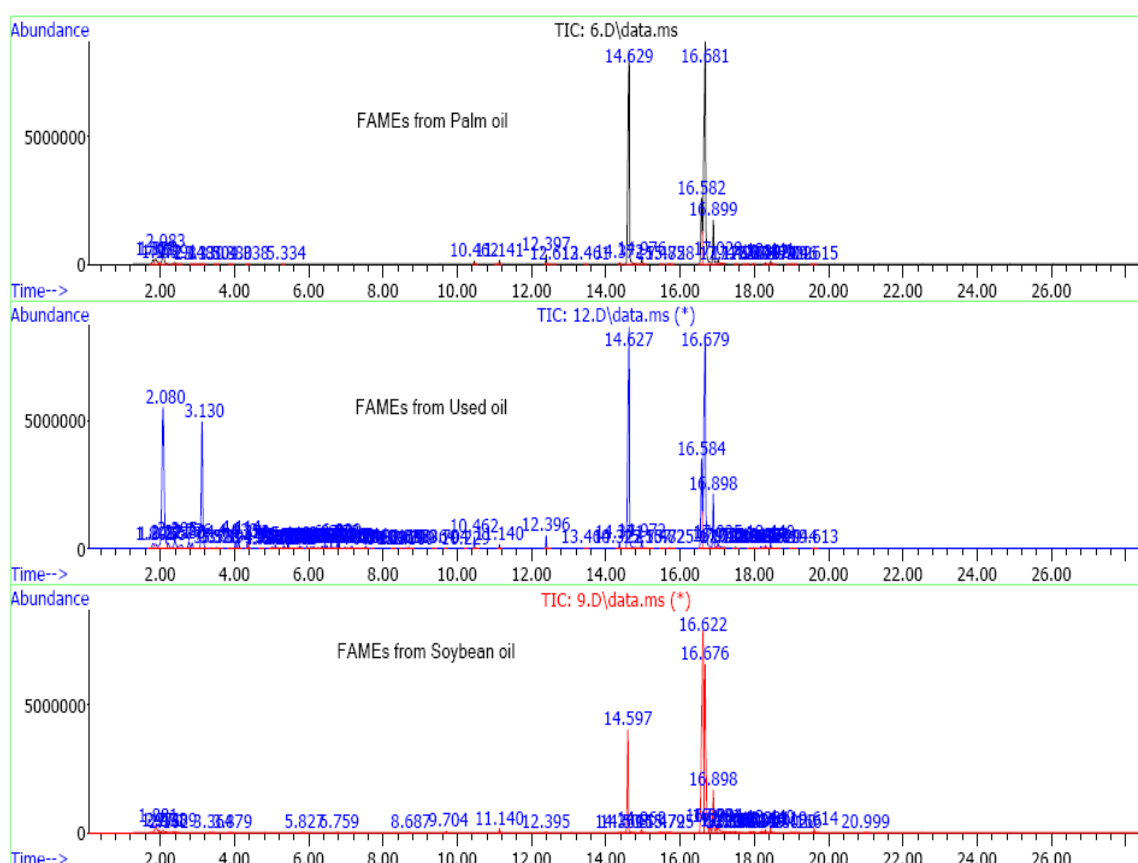


6. การวิเคราะห์องค์ประกอบเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันที่สามารถระเหยได้ ด้วยเทคนิคไดนามิคเฮดสเปซแก๊สโครมาโทกราฟีและแมสสเปกโตรมิเตอร์ (DHS-GC-MS)

วิเคราะห์สารตัวอย่างเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน n-Hexadecane ความเข้มข้น 20 นาโนกรัมต่อไมโครลิตร (ng/ μ L หรือ ppm) เพื่อวิเคราะห์ด้านคุณภาพและปริมาณวิเคราะห์ของตัวอย่างน้ำมันดีเซลชีวภาพ โดยการแปล (Interpret) พีคและแมสสเปกตรัมของสารตัวอย่าง และนำผลที่ได้มาคำนวณความเข้มข้นของสารตัวอย่าง

ภาพที่ ข 5.

โครมาโทแกรมของสารตัวอย่างน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ได้จากน้ำมันปาล์ม
น้ำมันทอดใช้แล้ว และน้ำมันถั่วเหลือง



ภาพที่ 6.

ตัวอย่างการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันที่สามารถระเหยได้
ในตัวอย่างน้ำมันดีเซลชีวภาพ

Search Libraries: C:\Database\W8N05ST.L Minimum Quality: 50
C:\Database\Nist98.L Minimum Quality: 0

Total number of Peaks: 48
TIC: 701,564,527
Peak area for 20ng of Hexadecane: 1,753,911
Number of samples used (default = 1): 1.000

Pk#	RT	Area	Qty (ng)	MS	Keyword	Library/ID	Qty	Blank
10	3.88	210,469	2		un	BENZENE, CHLORO- \$ CHLOROBENZENE \$ 2	91	
11	4.34	210,469	2		arhc	BENZENE, ETHENYL- \$ ETHENYLBENZENE 1	91	
12	5.11	70,156	1		ald	Benzaldehyde \$ Artificial Almond O 2	90	
13	5.24	70,156	1		phed	PHENOL \$ SODIUM PHENOXIDE \$ ACIDE 1	90	
14	5.34	140,313	2		si	CYCLOTETRAILOXANE, OCTAMETHYL- \$ 4	83	
15	5.44	70,156	1		hc	DECANE \$ AI3-24107 \$ BRN 1696981 \$	86	
16	6.76	70,156	1		un	Methyl (3s,4s)-3,4-dimethyl-5-oxo-	9	
17	6.82	70,156	1		arhc	BENZENE, 2-ETHYL-1,4-DIMETHYL- \$ 2 2	90	
18	7.11	70,156	1		ba	BENZOIC ACID \$ BENZOATE \$ SODIUM B 1	83	
19	7.54	70,156	1		nap	NAPHTHALENE \$ AI3-00278 \$ ALBOCARB 2	90	
20	8.7	70,156	1		es	DECAANOIC ACID, METHYL ESTER \$ CAPR 1	72	
21	10.46	1,332,973	15		es	DODECAANOIC ACID, METHYL ESTER \$ LA 1	97	
22	11.14	1,753,911	20		std	Hexadecane \$ n-Cetane \$ n-Hexadeca	98	wrong keyword
23	12.4	5,472,203	62		es	TETRADECAANOIC ACID, METHYL ESTER \$ 1	98	
24	12.61	70,156	1		un	Piperazine adipate	17	
25	13.46	210,469	2		es	PENTADECAANOIC ACID, METHYL ESTER \$ 1	81	
26	14.32	70,156	1		un	7-Hexadecenoic acid, methyl ester,	49	
27	14.37	912,034	10		es	9-Hexadecenoic acid, methyl ester,	99	
28	14.63	236,146,620	2,693		es	HEXADECAANOIC ACID, METHYL ESTER \$ 1	99	
29	14.98	4,910,952	56		es	HEXADECAANOIC ACID \$ HEXADECANOATE	99	
30	15.11	350,782	4		oa	PALMITIC ACID \$ PALMITINSAEURE	53	
31	15.48	210,469	2		un	9-Hexadecenoic acid, methyl ester, 1	43	
32	15.73	561,252	6		es	Hexadecanoic acid, 15-methyl-, met 1	98	
33	16.58	64,543,936	736		es	8,11-OCTADECADIENOIC ACID, METHYL	99	
34	16.68	299,918,835	3,420		es	9-Octadecenoic acid, methyl ester,	99	
35	16.9	34,236,349	390		es	OCTADECANOIC ACID, METHYL ESTER \$ 1	99	
36	17.03	5,542,360	63		es	9-OCTADECENOIC ACID (Z)- \$ OCTADEC	99	
37	17.18	631,408	7		un	9-Octadecenoic acid (Z)-, methyl e	41	
38	17.22	491,095	6		un	15-Octadecenoic acid, methyl ester	49	
39	17.5	140,313	2		es	9,12-Octadecadienoic acid (Z,Z)-,	83	
40	17.79	140,313	2		un	Cyclooctaneacetic acid, 2-oxo-	35	
41	17.97	280,626	3		un	Palmitoyl chloride	35	
42	18.18	70,156	1		un	5-(Prop-2-enoyloxy)pentadecane	12	
43	18.3	912,034	10		es	11-Eicosenoic acid, methyl ester \$	99	
44	18.44	1,824,068	21		es	EICOSANOIC ACID, METHYL ESTER \$ AR 1	99	
45	18.48	561,252	6		es	NONADECANOIC ACID, 10-METHYL-, MET 1	55	
46	18.9	140,313	2		hc	5-(Prop-2-enoyloxy)pentadecane	17	
47	19.04	140,313	2		un	9-Octadecenoic acid (Z)-, 2-hydrox	38	
48	19.62	140,313	2		un	Docosanoic acid, methyl ester 1	38	
Total of All Compounds			7,538	Total of Blank				

สมการการคำนวณ

$$\text{ความเข้มข้นของสารตัวอย่าง} = \frac{\text{พื้นที่พีคสารตัวอย่าง} \times \text{ความเข้มข้นของสารมาตรฐาน}}{\text{พื้นที่พีคของสารมาตรฐาน}}$$

และ

$$\text{เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่สามารถระเหยได้} = \frac{\text{ผลรวมของปริมาณเมทิลเอสเทอร์} \times 100}{\text{ผลรวมของปริมาณสารทั้งหมด}}$$

ตัวอย่างการคำนวณ

สารตัวอย่างน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ผ่านการวิเคราะห์ ด้วยเทคนิคไดนามิกแก๊สโครมาโทกราฟี และแมสสเปกโตรมิเตอร์ โดยที่พีคเวลา 11.14 นาที เป็นสารมาตรฐาน n-Hexadecane ความเข้มข้น 20 นาโนกรัม มีพื้นที่พีค เท่ากับ 1,753,911 และที่พีคเวลา 14.63 นาที เป็นสาร Hexadecanoic acid, methyl ester มีพื้นที่พีค เท่ากับ 236,146,619

$$\begin{aligned} \text{ความเข้มข้นของสาร (Hexadecanoic acid, methyl ester)} &= 236,146,619 \times \frac{20}{1,753,911} \text{ (ng/}\mu\text{L)} \\ &= 2,693 \text{ ng/}\mu\text{L} \end{aligned}$$

ฉีดสารตัวอย่าง 1 ไมโครลิตร (μL) ดังนั้น ความเข้มข้นของสาร Hexadecanoic acid, methyl ester มีค่าเท่ากับ 2,693 นาโนกรัม และคำนวณความเข้มข้นของสารประกอบเมทิลเอสเทอร์ตัวอื่นๆ และพบว่าผลรวมของสารประกอบเมทิลเอสเทอร์ทั้งหมดที่สามารถระเหยได้ มีค่าเท่ากับ 7,495 นาโนกรัม และสารประกอบอินทรีย์ทั้งหมดที่สามารถระเหยได้ มีค่าเท่ากับ 7,538 นาโนกรัม

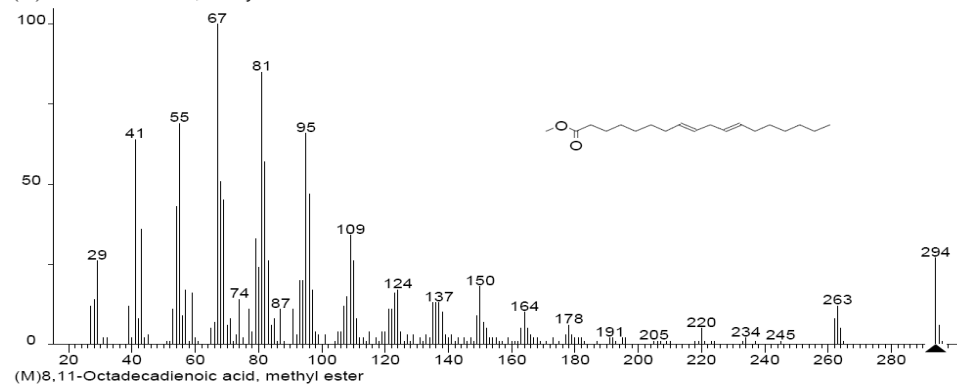
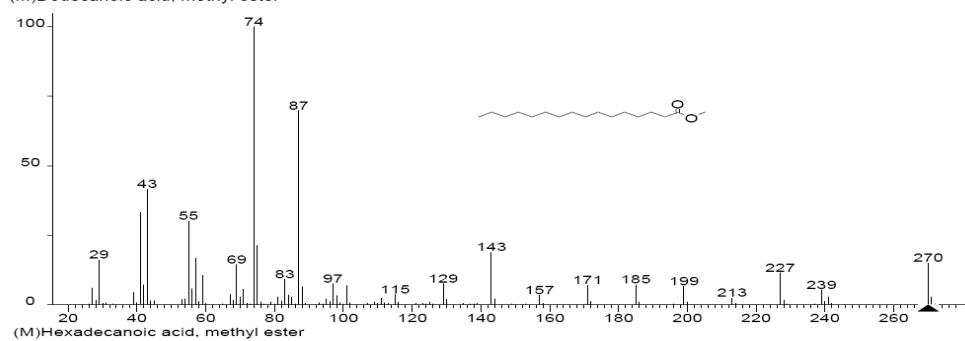
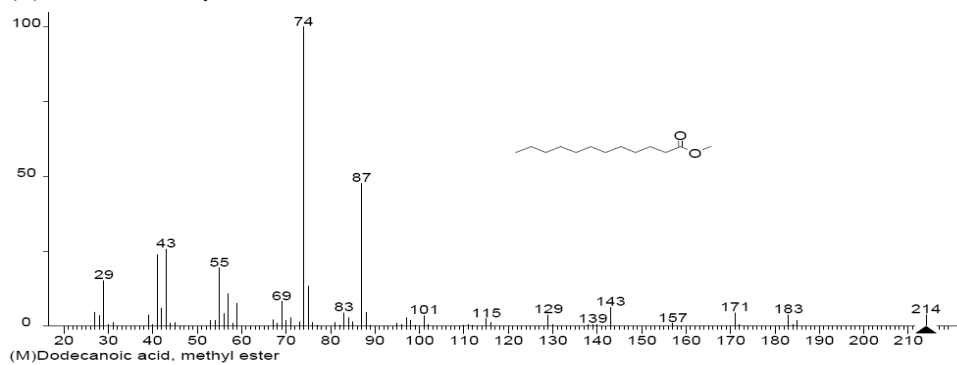
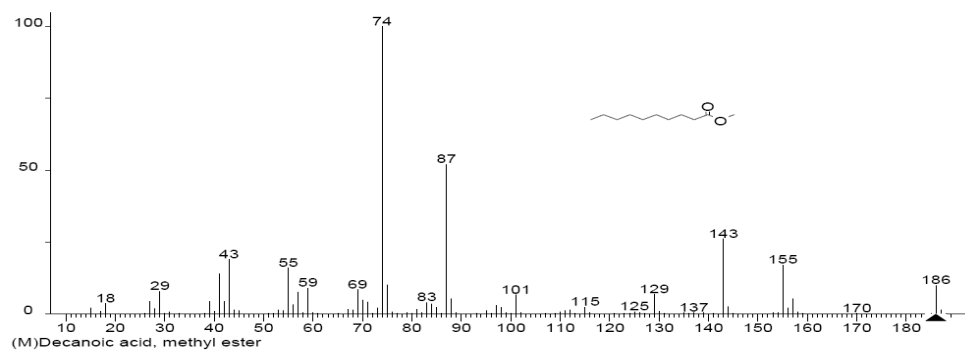
$$\begin{aligned} \text{เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่สามารถระเหยได้} &= \frac{7,495 \text{ (ng)}}{7,538 \text{ (ng)}} \times 100 \\ &= 99.43\% \end{aligned}$$

ดังนั้น สารตัวอย่างน้ำมันดีเซลชีวภาพมีเปอร์เซ็นต์ขององค์ประกอบของเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันที่สามารถระเหยได้ มีค่าเท่ากับ 99.43%

ภาพที่ ๗.

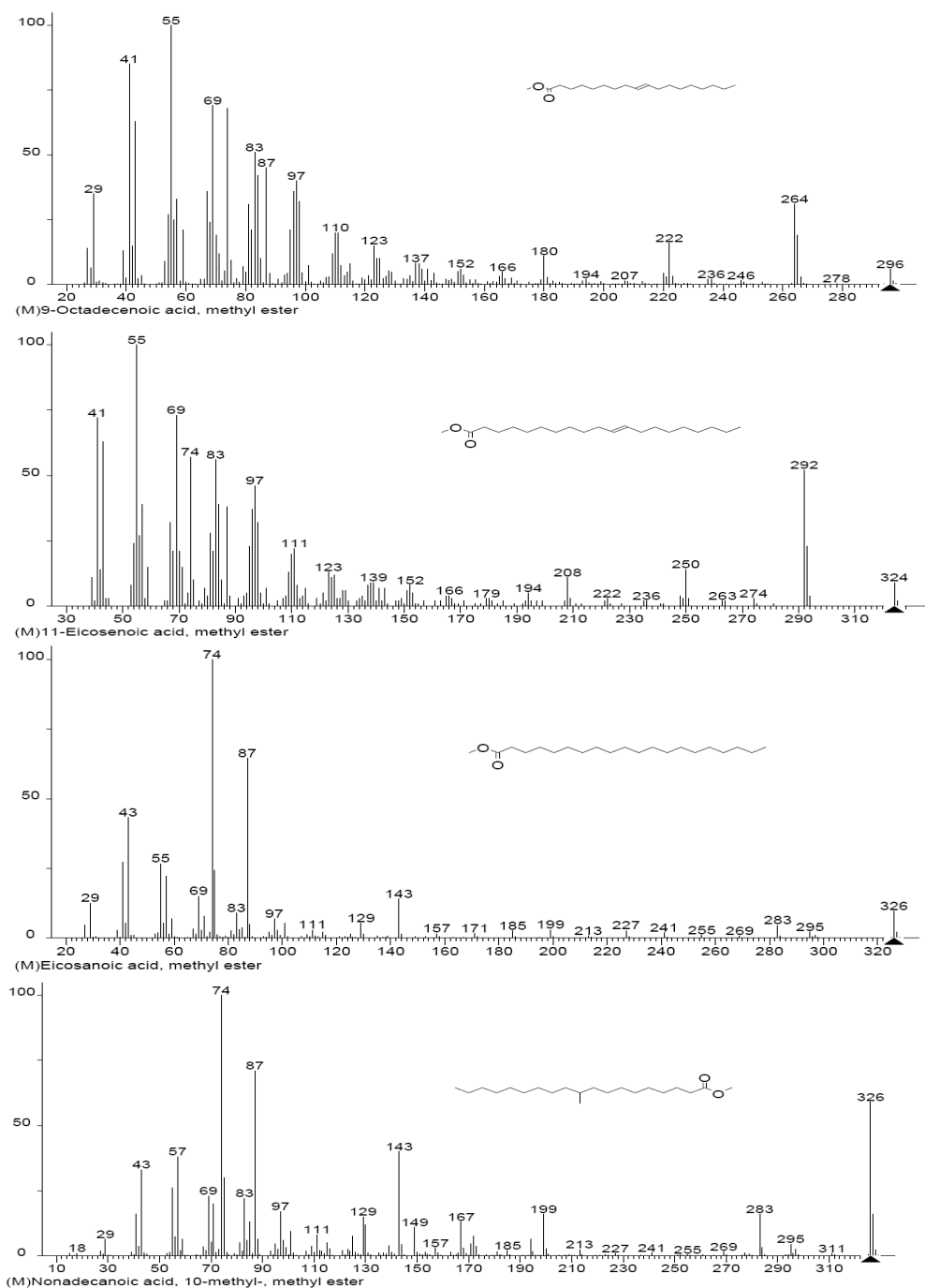
สารประกอบเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันที่สามารถระเหยได้ ที่มีอยู่ในสารตัวอย่างน้ำมัน

ดีเซลชีวภาพ ตัวอย่างเช่น



ภาพที่ 8.

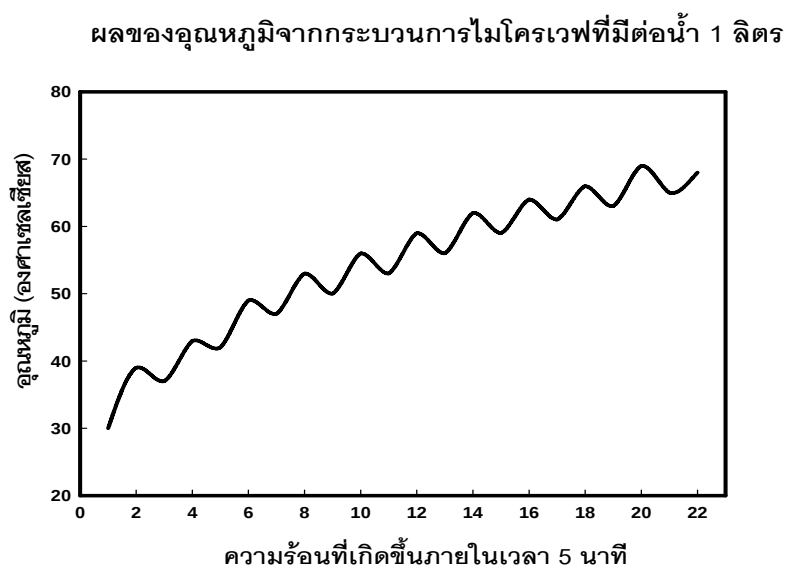
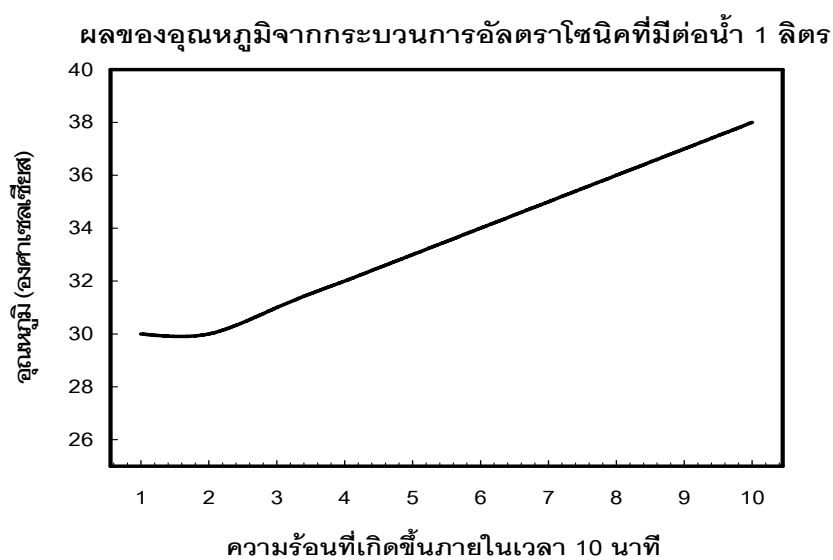
สารประกอบเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันที่สามารถระเหยได้ ที่มีอยู่ในสารตัวอย่างน้ำมัน
ดีเซลชีวภาพ (ต่อ)



ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์ค่าการใช้พลังงาน

1. แนวโน้มของการเกิดความร้อนจากกระบวนการคลื่นอัลตราโซนิกและคลื่นรังสีไมโครเวฟ



2. ตัวอย่างการคำนวณค่าการใช้พลังงาน

$$\text{สมการการคำนวณ} \quad \text{กำลังไฟฟ้า (วัตต์)} = \frac{\text{พลังงานไฟฟ้า (จูล)}}{\text{เวลา (วินาที)}}$$

2.1 การคำนวณค่าการใช้พลังงานของกระบวนการเคลื่อนอัลตราโซนิกพร้อมกับคลื่นรังสีไมโครเวฟ

ใช้เครื่องกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิก (Sonics vibra-cell, V505) ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ กำลังอัลตราโซนิกสูงสุด 500 วัตต์ และเตาอบไมโครเวฟ (Daewoo, KOR-4125) ความถี่ 2.45 กิโลเฮิร์ตซ์ กำลังไมโครเวฟสูงสุด 600 วัตต์

จากการทดลองในหน่วยอัลตราโซนิก ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิคงที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที และใช้กำลังอัลตราโซนิก 200 วัตต์ พบว่ามีการใช้พลังงานเฉลี่ย เท่ากับ 18,624 จูล

$$\begin{aligned} \text{พลังงานไฟฟ้าที่ได้รับจริง} &= 18,624 \text{ จูล} \quad (1 \text{ จูล} = 2.778 \times 10^{-7} \text{ กิโลวัตต์ชั่วโมง}) \\ &= 0.0051733 \text{ กิโลวัตต์ชั่วโมง} \end{aligned}$$

$$\text{ผลผลิตน้ำมัน 0.17 กิโลกรัม ได้รับพลังงาน} = 5.173 \text{ วัตต์ชั่วโมง}$$

$$\text{ผลผลิตน้ำมัน 1.0 กิโลกรัม ได้รับพลังงาน} = 30.43 \text{ วัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัม}$$

การคำนวณค่าการใช้พลังงานในหน่วยอัลตราโซนิก ใช้เวลา 10 นาที

$$\begin{aligned} \text{กำลังอัลตราโซนิก} &= 200 \text{ วัตต์} \\ \text{พลังงานไฟฟ้าที่ใช้} &= 200(\text{วัตต์}) \times 10(\text{นาที}) \times 60(\text{วินาที/นาที}) \\ &= 120,000 \text{ จูล} \quad (1 \text{ จูล} = 2.778 \times 10^{-7} \text{ กิโลวัตต์ชั่วโมง}) \\ &= 0.033336 \text{ กิโลวัตต์ชั่วโมง} \end{aligned}$$

$$\text{ผลผลิตน้ำมัน 0.17 กิโลกรัม ได้รับพลังงาน} = 33.336 \text{ วัตต์ชั่วโมง}$$

$$\text{ผลผลิตน้ำมัน 1.0 กิโลกรัม ได้รับพลังงาน} = 196.09 \text{ วัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัม}$$

การคำนวณค่าการใช้พลังงานในหน่วยไมโครเวฟ ใช้เวลา 3 นาที

$$\begin{aligned} \text{กำลังไมโครเวฟ} &= 198 \text{ วัตต์} \\ \text{พลังงานไฟฟ้าที่ใช้} &= 198(\text{วัตต์}) \times 3(\text{นาที}) \times 60(\text{วินาที/นาที}) \\ &= 35,640 \text{ จูล} \quad (1 \text{ จูล} = 2.778 \times 10^{-7} \text{ กิโลวัตต์ชั่วโมง}) \\ &= 0.0099001 \text{ กิโลวัตต์ชั่วโมง} \end{aligned}$$

ผลผลิตน้ำมัน 0.17 กิโลกรัม ได้รับพลังงาน = 9.9001 วัตต์ชั่วโมง

ผลผลิตน้ำมัน 1.0 กิโลกรัม ได้รับพลังงาน = 58.24 วัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัม

พลังงานรวม = 196.09 + 58.24

= 254.33 วัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัม หรือ

915.58 กิโลจูลต่อกิโลกรัม

ในการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพจำนวน 1 กิโลกรัม ด้วยกระบวนการกลั่นอัลตราโซนิคร่วมกับคลื่นรังสีไมโครเวฟใช้พลังงานไฟฟ้า เท่ากับ 254.33 วัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัม หรือ 915.58 กิโลจูลต่อกิโลกรัม

2.2 การคำนวณค่าการใช้พลังงานของกระบวนการกวนเชิงกล ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิคงที่ 50 องศาเซลเซียส เครื่องปั่นกวนมีกำลังไฟฟ้ารวม เท่ากับ 251.8 วัตต์ ความเร็วรอบสูงสุด 1500 รอบต่อนาที ในการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ ใช้ความเร็วรอบ 800 รอบต่อนาที เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 45 นาที จะได้

กระบวนการกวนเชิงกลใช้เวลา 45 นาที

กำลังการปั่นกวน = 251.8 วัตต์

พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ = 251.8(วัตต์) x 45(นาที) x 60(วินาที/นาที)
= 679,860 จูล (1 จูล = 2.778×10^{-7} กิโลวัตต์ชั่วโมง)
= 0.188865 กิโลวัตต์ชั่วโมง

ผลผลิตน้ำมัน 0.17 กิโลกรัม ได้รับพลังงาน = 188.865 วัตต์ชั่วโมง

ผลผลิตน้ำมัน 1.0 กิโลกรัม ได้รับพลังงาน = 1110.97 วัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัม

ใช้ความเร็วรอบ 800 รอบต่อนาที = $\frac{1110.97 \times 800}{1500}$

1500

= 592.52 วัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัม

ในการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพจำนวน 1 กิโลกรัม ด้วยกระบวนการกวนเชิงกล ใช้พลังงานไฟฟ้า เท่ากับ 592.52 วัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัม

2.3 การใช้พลังงานของกระบวนการแยกส่วน กระบวนการไมโครเวฟ ใช้กำลังไมโครเวฟ 198 วัตต์ โดยมีเครื่องปั่นกวน กำลังไฟฟ้ารวม เท่ากับ 251.8 วัตต์ มีความเร็วรอบสูงสุด 1500 รอบต่อนาที ในการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ ใช้ความเร็วรอบ 800 รอบต่อนาที เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 3 นาที จะได้

$$\begin{aligned}
 &\text{ปฏิกิริยาเสร็จสมบูรณ์ ใช้เวลา 3 นาที} \\
 &\text{กำลังไมโครเวฟ} = 198 \text{ วัตต์} \\
 &\text{พลังงานไฟฟ้าที่ใช้} = 198(\text{วัตต์}) \times 3(\text{นาที}) \times 60(\text{วินาที/นาที}) \\
 &= 35,640 \text{ จูล} \quad (1 \text{ จูล} = 2.778 \times 10^{-7} \text{ กิโลวัตต์ชั่วโมง}) \\
 &= 0.0099001 \text{ กิโลวัตต์ชั่วโมง} \\
 &\text{น้ำมัน 0.17 กิโลกรัม ได้รับพลังงาน} = 9.9001 \text{ วัตต์ชั่วโมง} \\
 &\text{น้ำมัน 1.0 กิโลกรัม ได้รับพลังงาน} = 58.24 \text{ วัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัม} \\
 &\text{กำลังการปั่นกวน} = 251.8 \text{ วัตต์} \\
 &\text{พลังงานไฟฟ้าที่ใช้} = 251.8(\text{วัตต์}) \times 3(\text{นาที}) \times 60(\text{วินาที/นาที}) \\
 &= 45,324 \text{ จูล} \quad (1 \text{ จูล} = 2.778 \times 10^{-7} \text{ กิโลวัตต์ชั่วโมง}) \\
 &= 0.01259 \text{ กิโลวัตต์ชั่วโมง} \\
 &\text{น้ำมัน 0.17 กิโลกรัม ได้รับพลังงาน} = 12.591 \text{ วัตต์ชั่วโมง} \\
 &\text{น้ำมัน 1.0 กิโลกรัม ได้รับพลังงาน} = 74.06 \text{ วัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัม} \\
 &\text{ใช้ความเร็วรอบ 800 รอบต่อนาที} = \frac{74.06 \times 800}{1500} \\
 &= 39.50 \text{ วัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัม} \\
 &\text{พลังงานรวม} = 58.24 + 39.50 \\
 &= 97.74 \text{ วัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัม}
 \end{aligned}$$

ในการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพจำนวน 1 กิโลกรัม ด้วยกระบวนการไมโครเวฟ ใช้พลังงานไฟฟ้า เท่ากับ 97.74 วัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัม

ภาคผนวก ง

เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำมันดีเซลชีวภาพ

	เครื่องมือวิเคราะห์ค่าความหนืด (Kinematic viscosity; ASTM D445)
	เครื่องมือวิเคราะห์จุดวาบไฟ (Flash point; ASTM D93)
	เครื่องมือวิเคราะห์จุดเทไหล (Pour point; ASTM D97)
	เครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี (GC-FID) (เทียบเคียง ASTM D6584)
	เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดเพกโทรสโกปี (FT-IR)
	เครื่องไดนามิคเฮดสเปซก๊าซโครมาโทกราฟี และแมสสเปกโตรมิเตอร์ (DHS-GC-MS)

ประวัติการศึกษา

ชื่อ	นายอุกฤษฏ์ สัมครสมาน
วันเดือนปีเกิด	วันที่ 9 มิถุนายน พ.ศ. 2526
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรี สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ พ.ศ. 2549
ตำแหน่ง	นักศึกษาปริญญาโท
ทุนการศึกษา	-
ผลงานทางวิชาการ	การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ “งานประชุมศรีนครินทรวิโรฒวิชาการครั้งที่ 3 เรื่อง กระบวนการ ผลิตไบโอดีเซลด้วยคลื่นอัลตราโซนิกร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ วันที่ 21 – 22 มกราคม พ.ศ. 2552”
ประสบการณ์ทำงาน	บริษัท เบลตันอินดัสเตเรียล (ประเทศไทย) จำกัด พ.ศ. 2549 - 2551