



ตัวเร่งปฏิกิริยาน้ำส้มควันไม้และเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์
สำหรับการผลิตไบโอดีเซล

**Wood Vinegar and Ferric Sulfate on Activated Carbon as Catalyst
for Biodiesel Production**

มณีชนก สุวรรณวงศ์

Maneechanok Suwanwong

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

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

2552

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์	ตัวเร่งปฏิกิริยาน้ำส้มควันไม้และเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ สำหรับการผลิตไบโอดีเซล
ผู้เขียน	นางสาว มณีชนก สุวรรณวงศ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2552

บทคัดย่อ

ส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันปาล์มดิบ ได้มีการนำไปใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย เช่น ใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมผลิตสบู่ อุตสาหกรรมโอสดีโอเคมีคอล ผลิตภัณฑ์วิตามินอี รวมถึงอุตสาหกรรมผลิตไบโอดีเซล สำหรับงานวิจัยนี้ ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มซึ่งเป็นวัตถุดิบที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระสูงประมาณร้อยละ 94.5 โดยน้ำหนัก ด้วยปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน ในงานวิจัยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 กระบวนการคือ กระบวนการผลิตแบบแบทช์ เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน คือ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์ม เปรอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาบนผงถ่านกัมมันต์ อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา จากผลการศึกษาค่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาน้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้มีประสิทธิภาพในการผลิตเมทิลเอสเตอริ์ต่ำ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์ม 1:2.5 กรัม อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:12 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชม. และผลการศึกษาค่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ พบสถานะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาแบบแบทช์ ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส คือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์ม 1:2.5 ใช้ 20 wt% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:12 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 6 ชม. จะให้ผลผลิตของเมทิลเอสเตอริ์ร้อยละ 98.20% ต่อจากนั้นกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องจึงถูกศึกษาโดยตั้งปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งภายใต้สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองแบบแบทช์โดยทำการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 70 องศาเซลเซียส เพื่อลดอัตราการระเหยของเมทานอล ผลการทดลองพบว่าให้ผลผลิตของเมทิลเอสเตอริ์ร้อยละ 90.74% เมื่อศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการนำกลับมาใช้ซ้ำที่สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองแบบแบทช์ พบว่าประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงเมื่อจำนวนการใช้

ซ้ำเพิ่มขึ้นและเริ่มคงที่เมื่อใช้ซ้ำครั้งที่ 8 และการศึกษาคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้จากส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์ม พบว่ามีความสอดคล้องกับมาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงาน

Thesis Title	Wood Vinegar and Ferric Sulfate on Activated Carbon as Catalyst for Biodiesel Production
Author	Miss Maneechanok Suwanwong
Major Program	Chemical Engineering
Academic Year	2009

ABSTRACT

Palm Fatty Acid Distillate (PFAD) is a by-product from refining crude palm oil (CPO). PFAD is used in soap industries, oleo chemical industries, vitamin E extracted and as raw materials for biodiesel production. In this work, PFAD having high free fatty acid (FFA) about 94.5% was used. Firstly, The esterification experiments were carried out in a batch reactor. The four parameters were investigated as amount of catalyst to PFAD, different percent by weight of catalyst loaded on activated carbon, molar ratio of PFAD to methanol, and reaction time. The result showed that wood vinegar loaded on activated carbon as solid catalyst had low activity to catalyze the esterification at 60°C, when amount of catalyst at 1:2.5 was added to the reaction system containing PFAD to methanol in 1:12 (mole ratio) for 1 h. The optimum condition for ferric sulfate [Fe₂(SO₄)₃] loaded on activated carbon as solid catalys was observed at temperature of 95°C, 20 wt% of ferric sulfate loaded on activated carbon with amount of catalyst to PFAD at 1:2.5 , molar ratio of PFAD to methanol at 1:12 and reaction time 6 h. It provide 98.20 wt% Methyl Ester (ME). Then, continuous esterification of PFAD was operated in Fixed bed reactor with temperature at 70°C under it own pressure. It provide 90.74 wt% ME. The recycling experiment results showed it had a long catalyst lifetime and could maintain activity even after being reuse for 8 cycles. The final FAME product met with the Thai biodiesel quality standard.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุกฤทธิรา รัตนวิไล ประธานกรรมการ
ที่ปรึกษาที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ รวมทั้งให้กำลังใจและวิธีการแก้ปัญหาในการทำ
วิทยานิพนธ์ ตลอดจนช่วยตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างถูกต้องสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ดร.พิมพรรณ มายเออร์ กรรมการที่ปรึกษาร่วม รอง
ศาสตราจารย์ ดร.ชาคริต ทองอุไร ดร.ธีระยุทธ หลีวิจิตร กรรมการผู้แทนคณะวิศวกรรมศาสตร์
และรองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญจิตร์ ศรีนพคุณ กรรมการผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ที่กรุณาให้คำแนะนำ
และตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย ที่จัดสรรเงินทุนในการวิจัย คณะอุตสาหกรรม
เกษตร และศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่ที่ให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์
ขอขอบคุณ พี่ ๆ น้อง ๆ เพื่อน ๆ และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
ตลอดจนทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวไว้ ณ ที่นี้ ที่มีส่วนให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำในการทำ
วิทยานิพนธ์ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

มณีชนก สุวรรณวงศ์

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
รายการตาราง	(9)
รายการภาพประกอบ	(10)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำต้นเรื่อง	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	3
บทที่ 2 ตรวจสอบเอกสาร	4
2.1 ปาล์มน้ำมัน	4
2.2 ไบโอดีเซล	11
2.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา	22
2.4 การหาค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลง (%conversion)	29
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	29
บทที่ 3 วิธีการทดลอง	32
3.1 วัสดุ	32
3.2 อุปกรณ์	32
3.3 วิธีการวิจัย	36
บทที่ 4 ผลทดลองและวิจารณ์	42
4.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา	42
4.2 การผลิตเมทิลเอสเทอร์จากส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์ม	53
4.3 การทดสอบสมบัติทางเชื้อเพลิงของไบโอดีเซล	79
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	81
ข้อเสนอแนะ	83
เอกสารอ้างอิง	84
ภาคผนวก	90
ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์	91
ภาคผนวก ข กระบวนการทดลอง	113
ภาคผนวก ค ข้อมูลการวิเคราะห์	116

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
ภาคผนวก ง ข้อมูลการเผยแพร่ผลงานวิจัยของวิทยานิพนธ์ ประวัติผู้แต่ง	132 139

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงสูตรโครงสร้าง ชื่อทางวิทยาศาสตร์ของกรดไขมันทั่วไป	9
2.2 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันพืช ร้อยละโดยน้ำหนักของกรดไขมัน	10
2.3 แสดงองค์ประกอบของกรดไขมันในส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์ม	10
2.4 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของไบโอดีเซลกับน้ำมันดีเซล	18
2.5 กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ ของกรดไขมัน พ.ศ. 2550 ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน	20
2.6 สารประกอบในน้ำส้มควันไม้ที่ผลิตจากเตาผลิตถ่าน	26
3.1 ศึกษาปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม	38
3.2 ศึกษาเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสม	38
3.3 ศึกษาอัตราส่วนเชิงโมลส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอลที่เหมาะสม	39
3.4 ศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม	39
3.5 แสดงสภาวะที่เหมาะสม	40
3.6 วิเคราะห์สมบัติทางเชื้อเพลิงของเมทิลเอสเทอร์	41
4.1 แสดงช่วงสัญญาณ FT-IR ของผงถ่านกัมมันต์ 100% และ 300% น้ำส้มควันไม้ บนผงถ่านกัมมันต์	46
4.2 แสดงค่าพื้นที่ผิวของผงถ่านกัมมันต์ และเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์	52
4.3 องค์ประกอบของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TLC-FID	54
4.4 แสดงสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลอง	65
4.5 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของเมทิลเอสเทอร์ด้วย การไตเตรทกับการวิเคราะห์ด้วย TLC-FID	68
4.6 ผลการวิเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ของไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากการทดลอง	75
4.7 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระ (FFA) ด้วยการไตเตรทกับการวิเคราะห์ด้วย TLC-FID	75
4.8 ผลการทดสอบสมบัติทางเชื้อเพลิงของไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์ม	80

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบที่	หน้า
2.1 ปาล์มน้ำมัน	4
2.2 ประโยชน์จากปาล์มน้ำมัน	8
2.3 ปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน	13
2.4 ปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันเมื่อแอลกอฮอล์ที่ใช้เป็นเมทานอล	14
2.5 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน	14
2.6 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันเมื่อแอลกอฮอล์ที่ใช้เป็นเมทานอล	15
2.7 แสดงปฏิกิริยาสปอนนิฟิเคชัน	15
2.8 โครงสร้างโมเลกุลของเฟอร์ริกซัลเฟต	27
2.9 ลักษณะของเฟอร์ริกซัลเฟต	27
3.1 แสดงชุดการทดลองในการผลิตเมทิลเอสเทอร์แบบเบทซ์	34
3.2 แสดงชุดการทดลองในการผลิตเมทิลเอสเทอร์แบบต่อเนื่อง	35
3.3 การบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาภายในถังปฏิกรณ์	35
4.1 ลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาน้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์ : (a) ผงถ่านกัมมันต์; (b) 100% น้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์; (c) 300% น้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์	43
4.2 ลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ : (a) ผงถ่านกัมมันต์; (b) 10 wt% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์; (c) 20 wt% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่าน กัมมันต์; (d) 30 wt% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์	43
4.3 แสดงผลการทดสอบ XRD : (a) ผงถ่านกัมมันต์; (b) 100% น้ำส้มควันไม้บน ผงถ่านกัมมันต์	44
4.4 แสดงผลการทดสอบ XRD : (a) ผงถ่านกัมมันต์; (b) 10 wt% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่าน กัมมันต์; (c) 20 wt% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์; (d) 30 wt% เฟอร์ริกซัลเฟตบน ผงถ่านกัมมันต์; (e) เฟอร์ริกซัลเฟต	45
4.5 แสดงผลการทดสอบหมู่ฟังก์ชันโดยใช้เทคนิค FT-IR Spectroscopy : (a) ผงถ่าน กัมมันต์; (b) 100% น้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์; (c) 300% น้ำส้มควันไม้บน ผงถ่านกัมมันต์	47

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
4.6 แสดงผลการทดสอบหมู่ฟังก์ชัน โดยใช้เทคนิค FT-IR spectroscopy : (a) ผงถ่านกัมมันต์; (b) 10 wt% เพอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์; (c) 20 wt% เพอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์; (d) 30 wt% เพอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์; (e) เพอร์ริกซัลเฟต	48
4.7 แสดงลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 1500 เท่า : (a) ผงถ่านกัมมันต์; (b) 100% น้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์; (c) 300% น้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์	50
4.8 แสดงลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เทคนิค SEM กำลังขยาย 1500 เท่า : (a) ผงถ่านกัมมันต์; (b) 10 wt% เพอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์; (c) 20 wt% เพอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์; (d) 30 wt% เพอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์; (e) เพอร์ริกซัลเฟต	51
4.9 แสดงลักษณะทางกายภาพของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์ม	53
4.10 แสดงผลการศึกษาปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สภาวะ : 100% น้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์ อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:12 เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชม. และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส	55
4.11 แสดงผลการศึกษาปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สภาวะ : 300% น้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์ อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:12 เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชม. และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส	55
4.12 แสดงผลการเปรียบเทียบชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาน้ำส้มควันไม้ ผงถ่านกัมมันต์ น้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์ และกรดอะซิติก ที่สภาวะ : ตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 10 กรัม อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:12 เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชม. และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส	56
4.13 แสดงผลการศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเพอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ ที่สภาวะ : ตัวเร่งปฏิกิริยา 20% เพอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ปริมาณ 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 กรัม อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:12 เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชม. และอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส	58

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
4.14 แสดงผลการศึกษาเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ที่สภาวะ : ตัวเร่งปฏิกิริยา 10, 20 และ 30% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ปริมาณ 10 กรัม อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:12 เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชม. และอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส	60
4.15 แสดงผลการศึกษาอัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอลที่สภาวะ: ตัวเร่งปฏิกิริยา 20% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ปริมาณ 10 กรัม อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล ที่ 1:1, 1:4, 1:8, 1:12 และ 1:14 เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชม. และอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส	62
4.16 แสดงผลการศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยาที่สภาวะ : ตัวเร่งปฏิกิริยา 20% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ปริมาณ 10 กรัม อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:12 เวลาในการทำปฏิกิริยา 0.5-10 ชม. และอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส	64
4.17 แสดงผลการศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา; ผงถ่านกัมมันต์, 20% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์, 20% ซัลฟิวริกบนผงถ่านกัมมันต์ และ 100% เฟอร์ริกซัลเฟตที่สภาวะ : ตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 10 กรัม อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:12 เวลาในการทำปฏิกิริยา 6 ชม. และอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส	66
4.18 แสดงลักษณะของน้ำมันไบโอดีเซล : (a) น้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตจากกรดซัลฟิวริกบนผงถ่านกัมมันต์; (b) น้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตจากเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์	67
4.19 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการนำกลับมาใช้ซ้ำที่สภาวะ : ตัวเร่งปฏิกิริยา 20% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ปริมาณ 10 กรัม อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:12 เวลาในการทำปฏิกิริยา 6 ชม. และอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส	70
4.20 แสดงลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเมื่อนำกลับมาใช้ซ้ำโดยใช้เทคนิค SEM กำลังขยาย 1500 เท่า : (a) ตัวเร่งปฏิกิริยาใหม่; (b) ตัวเร่งปฏิกิริยาใช้ซ้ำครั้งที่ 5; (c) ตัวเร่งปฏิกิริยาใช้ซ้ำครั้งที่ 10	71

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
4.21 แสดงหมู่ฟังก์ชันโดยใช้เทคนิค FT-IR Spectroscopy ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการใช้ซ้ำ : (a) ตัวเร่งปฏิกิริยาใช้ซ้ำครั้งที่ 5; (b) ตัวเร่งปฏิกิริยาใช้ซ้ำครั้งที่ 10; (c) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน; (d) เฟอริกซัลเฟต	72
4.22 เปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส และ 95 องศาเซลเซียส ที่สภาวะ : ตัวเร่งปฏิกิริยา 20% เฟอริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ปริมาณ 10 กรัม อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:12 และเวลา 6 ชม.	73
4.23 ไดอะแกรมการผลิตเมทิลเอสเทอร์แบบต่อเนื่อง	75
4.24 แสดงลักษณะของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง	78

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำต้นเรื่อง

ปัจจุบันประเทศไทยต้องพึ่งแหล่งน้ำมันปิโตรเลียมจากต่างประเทศสูงกว่า 80% ของพลังงานที่ต้องการ โดยเฉพาะการใช้ น้ำมันเบนซินและน้ำมันดีเซลกับยานพาหนะ ทำให้ประเทศไทยต้องเสียเปรียบดุลการค้าและขาดเสถียรภาพในการจัดหาพลังงาน (มูทิตา ยันบูรพา และคณะ, 2545) เมื่อเกิดวิกฤติการณ์พลังงานขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดความพยายามค้นหาพลังงานอย่างอื่นมาทดแทนเพื่อเป็นทางเลือกใหม่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาวะปัจจุบันมีแนวโน้มว่าในอนาคตอันใกล้ น้ำมันคงเหลือไม่เพียงพอที่จะเป็นเชื้อเพลิงให้คนทั้งโลก รวมไปถึงราคาน้ำมันเบนซินและน้ำมันดีเซลก็พุ่งสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ไม่มีแนวโน้มว่าจะลดต่ำลง จึงเป็นความจำเป็นที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ที่จะต้องหาพลังงานทดแทนน้ำมัน ซึ่งเป็นพลังงานหลักของโลกใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องจักรและเครื่องยนต์ พลังงานชนิดใหม่ที่ได้เริ่มนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ได้แก่ การนำพลังงานแสงอาทิตย์ ลม น้ำ และแก๊สชีวภาพมาใช้ การใช้แก๊สโซฮอล์และแก๊สเอ็นจีวีกับเครื่องยนต์เบนซิน ส่วนพลังงานทดแทนอีกชนิดหนึ่งที่ผู้คนกล่าวถึงกันมากคือ ไบโอดีเซล (biodiesel) ซึ่งใช้ได้กับเครื่องยนต์ดีเซล

น้ำมันไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกนอกเหนือจากดีเซลที่ผลิตจากปิโตรเลียม ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงทดแทนประเภทดีเซลจากธรรมชาติ โดยการนำเอาน้ำมันพืชหรือน้ำมันจากไขมันสัตว์ ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ประเภทไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride: TG) มาแปรรูปด้วยกระบวนการทางเคมีเพื่อเปลี่ยนให้มีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล กระบวนการที่กล่าวถึงคือ ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน (transesterification) ของไตรกลีเซอไรด์ที่มีอยู่ในน้ำมันพืชหรือน้ำมันจากไขมันสัตว์กับแอลกอฮอล์ (ethanol หรือ methanol) โดยมีกรดหรือเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างของไตรกลีเซอไรด์ จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นเอสเตอ์ (ester) และมีผลิตภัณฑ์ผลพลอยได้เป็นกลีเซอรอล (glycerol) และปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน (esterification) เป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดไขมันกับแอลกอฮอล์ โดยมีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาผลผลิตที่ได้คือเอสเตอ์กับน้ำ

วัตถุดิบที่มีศักยภาพในการผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทย ได้แก่ น้ำมันพืช น้ำมันปาล์ม น้ำมันงา น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันถั่วลิสง น้ำมันละหุ่ง น้ำมันเมล็ดทานตะวัน น้ำมันมะพร้าว น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยวัตถุดิบที่ใช้จะมีผลต่อคุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ ดังนั้นวัตถุดิบหลักในประเทศที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล คือ น้ำมันปาล์ม

วิธีการผลิตไบโอดีเซลที่ใช้ศึกษาในโครงการวิจัยนี้คือ กระบวนการผลิตเมทิลเอสเตอร์โดยใช้ปฏิกิริยาเอสเตอร์ฟิเคชัน โครงการวิจัยนี้ เป็นการศึกษาวิธีการผลิตไบโอดีเซลเพื่อเพิ่มศักยภาพในการแข่งขันทางด้านราคากับดีเซลที่มีอยู่ในปัจจุบัน ด้วยกระบวนการผลิตเมทิลเอสเตอร์แบบเอสเตอร์ฟิเคชัน โดยเลือกใช้ส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์ม (palm fatty acid distillate : PFAD) เป็นสารตั้งต้นที่มีกรดไขมันอิสระสูง (free fatty acid : FFA) และเป็นวัตถุดิบที่มีราคาถูก และทำการประยุกต์ใช้น้ำส้มควันไม้ที่สามารถหาได้ในท้องถิ่นซึ่งมีราคาถูก โหลดบนผงถ่านกัมมันต์ และเฟอร์ริกซัลเฟต [$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$] โหลดบนผงถ่านกัมมันต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาเอสเตอร์ฟิเคชัน พร้อมทั้งหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการและตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่น่าจะเป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถเพิ่มผลิตภัณ์สำหรับการผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์ม

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เตรียมและศึกษาคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ประยุกต์ใช้น้ำส้มควันไม้และเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์
2. ศึกษาสถานะที่เหมาะสมของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนเชิง โมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล และเวลาในการทำปฏิกิริยาในการทดลองแบบแบทช์ และเปรียบเทียบกับการใช้กรดซัลฟิวริกบนผงถ่านกัมมันต์ พร้อมศึกษาสถานะที่เหมาะสมสำหรับถังปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง
3. ศึกษาคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้ตามมาตรฐานกรมธุรกิจพลังงาน

1.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. ทราบศักยภาพการใช้น้ำส้มควันไม้และเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการเมทิลเอสเทอร์จากส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์ม เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้กรดซัลฟิวริกบนผงถ่านกัมมันต์
2. ทราบสถานะที่เหมาะสมของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนเชิง โมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล และเวลาในการทำปฏิกิริยา สำหรับการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มให้มีเปอร์เซนต์เมทิลเอสเทอร์มากกว่า 96.5 wt%
3. ทราบคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตจากส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์ม

บทที่ 2

ตรวจเอกสาร

2.1 ปาล์มน้ำมัน

ปาล์มน้ำมันมีต้นกำเนิดอยู่ทางตะวันตกและตอนกลางของทวีปอเมริกา ต่อมาได้แพร่เข้าไปในทวีปอเมริกาใต้โดยสันนิษฐานว่าเกิดขึ้นในยุคล่าอาณานิคม ปาล์มน้ำมันจัดอยู่ในตระกูล *Palme* หรือ *Palmaceae* เป็นตระกูลย่อยเดียวกันกับมะพร้าว คือ *Eliaes* ปาล์มน้ำมันแบ่งออกเป็น 3 สายพันธุ์ คือ *Eliaes guineensis*, *Eliaes oleifera* และ *Eliaes odora* สำหรับสองสายพันธุ์หลังไม่นิยมปลูกเนื่องจากเติบโตช้าและให้ผลเล็ก พันธุ์ที่นิยมปลูกเชิงเศรษฐกิจในปัจจุบัน คือ *Eliaes guineensis* (กิตติภูมิ ศุภลักษณ์ปัญญา, 2548) อย่างไรก็ตามมีการค้นพบปาล์มป่าอีก 2 ชนิดอยู่ในเขตลุ่มน้ำอะเมซอน ทวีปอเมริกาใต้ ซึ่งเชื่อกันว่าเป็นพันธุ์พื้นเมืองในแถบนั้น คือ *Eliaes oleifera* และ *Eliaes odora*



ภาพประกอบที่ 2.1 ปาล์มน้ำมัน

ที่มา : <http://www.nec.psd.ku.ac.th>

Eliaes guineensis เป็นลูกผสมระหว่างสายพันธุ์ *dura* ซึ่งมีกะลาหนา เนื้อในเมล็ดใหญ่ มีส่วนของเปลือก (mesocarp) 30-50% ของน้ำหนัก และมีปริมาณน้ำมัน 17-18% กับสายพันธุ์ *tenera* ซึ่งเป็นสายพันธุ์ที่กะลาหนานปานกลาง มีเยื่อรอยกะลา มีส่วนของเปลือก 60-90% ของน้ำหนัก และมีปริมาณน้ำมัน 22-24% เนื้อในเมล็ดปานกลาง

ปาล์มน้ำมันออกผลเป็นทะลาย ส่วนของผลมีเปลือกชั้นนอก (exocarp) และชั้นกลาง (mesocarp) ที่ประกอบด้วยเนื้อเยื่อไขมันซึ่งเมื่อคั้นออกมาได้ผลผลิตเรียกว่า น้ำมันปาล์มดิบ (crude palm oil : CPO) โดยมีไขมันรวมประมาณ 73.2% ของน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ

สำหรับชั้นในของผล (endocarp) จะหุ้มด้วยกะลา (shell) ภายในประกอบด้วยน้ำมัน ซึ่งคุณสมบัติแตกต่างจากที่ได้จากเปลือกนอก เมื่อคั้นออกมาเรียกผลผลิตส่วนนี้ว่าน้ำมันเมล็ดใน (kernel oil) (จารูวรรณ ฅ นคร, 2548)

2.1.1 ความสำคัญทางเศรษฐกิจของปาล์มน้ำมัน

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชที่มีศักยภาพในการแข่งขันสูงกว่าพืชน้ำมันชนิดอื่น ๆ ทั้งด้านการผลิตและการตลาด ส่วนแบ่งการผลิตน้ำมันปาล์มต่อน้ำมันพืชของโลก มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว จากร้อยละ 11.7 ในช่วงปี 2519-2543 เพิ่มเป็นร้อยละ 27.5 ในช่วงปี 2544-2548 และคาดว่าจะเพิ่มสูงขึ้นเป็นร้อยละ 31.2 ในช่วงปี 2559-2563 โดยมีประเทศผู้ผลิตที่สำคัญคือ มาเลเซีย และอินโดนีเซีย จากข้อมูลสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร เมื่อเดือนธันวาคม 2547 ระบุว่า พื้นที่เพาะปลูกปาล์มน้ำมันในประเทศไทยมีประมาณ 2.2 ล้านไร่ ในจำนวนนี้เป็นพื้นที่ในจังหวัดกระบี่มากที่สุดคือ 6.56 แสนไร่ รองลงมาคือ สุราษฎร์ธานี 5.96 แสนไร่ สตูล 1.01 แสนไร่ และในจังหวัดอื่น ๆ รวม 3.85 แสนไร่ จะเห็นได้ว่ารวมพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมัน 3 จังหวัด คือ กระบี่ สุราษฎร์ธานี และชุมพร มีพื้นที่รวม 83% ของพื้นที่เพาะปลูกทั้งประเทศ การปลูกปาล์มน้ำมันเป็นการค้าในประเทศไทย มีอัตราการขยายเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ อย่างต่อเนื่อง (พรธณีย์ วิชาชู, 2548)

จากเป้าหมายของกระทรวงพลังงานต้องการให้มีการใช้ไบโอดีเซลผสมร่วมกับน้ำมันดีเซลทั่วประเทศไม่ต่ำกว่า 10% ภายในปี 2555 ซึ่งจะต้องมีการผลิตไม่ต่ำกว่า 8.5 ล้านลิตรต่อวัน จึงต้องขยายพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันเพิ่มจำนวนถึง 10 ล้านไร่ เพื่อรองรับการผลิตนี้ ภายใต้การดูแลของกรมวิชาการเกษตร อันเป็นแนวทางสำคัญเพื่อตอบสนองต่อเป้าหมายด้านการใช้พลังงานทดแทนที่สำคัญของประเทศดังกล่าว ทำให้เกิดการใช้วัตถุดิบที่มีในชุมชน สามารถผลิตพลังงานใช้ได้เอง ช่วยกระตุ้นเศรษฐกิจและลดการพึ่งพาจากภายนอก (ประสพโชค ต้นไทย, 2551)

2.1.2 กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม

กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มในประเทศไทยมี 3 วิธี คือ กระบวนการผลิตแบบใช้ไอน้ำซึ่งเป็นวิธีมาตรฐาน กระบวนการผลิตแบบอย่างผลปาล์มหรือหีบน้ำมันผสม และกระบวนการผลิตแบบทอดผลปาล์ม ซึ่งจะได้น้ำมันปาล์ม 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ ถ้าได้จากเนื้อปาล์มในเมล็ดในปาล์ม (palm kernel) เรียกว่าน้ำมันเมล็ดปาล์ม (palm kernel oil) และส่วนที่ได้จาก mesocarp เรียกว่าน้ำมันปาล์ม (palm oil) เมื่อนำน้ำมันปาล์มไปแยกส่วนและทำให้บริสุทธิ์จะได้ส่วนของเหลวที่เรียกว่าน้ำมันปาล์มโอเลอิน (palm olein) ซึ่งเป็นน้ำมันที่ใช้กันทั่วไปและได้ส่วนของแข็งที่เรียกว่า ปาล์มสเตียรีน (palm stearin) (ณะเรศร์ ขอไพบูลย์, 2551)

2.1.3 การใช้ประโยชน์จากน้ำมันปาล์ม

น้ำมันปาล์มและน้ำมันเมล็ดในปาล์ม สามารถนำมาแปรรูปได้โดยการกลั่นให้บริสุทธิ์ การทำให้กรดไขมันหรือกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวเปลี่ยนเป็นไขมันหรือกรดไขมันอิ่มตัว และการแยกองค์ประกอบของกรดไขมัน เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมน้ำมันสำหรับการบริโภคและอุปโภคมากมาย ดังนี้

2.1.3.1 ด้านการบริโภค

- **น้ำมันปรุงอาหาร** น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิห้องจะมีการแยกออกเป็น 2 ส่วน คือ น้ำมันส่วนใส หรือ โอเลอิน ซึ่งมีอยู่ร้อยละ 65-70 และน้ำมันส่วนที่ข้น หรือสเตียรีน มีอยู่ร้อยละ 30-35 น้ำมันปรุงอาหารได้จากการนำเอาน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์มาแยกส่วน เอาเฉพาะน้ำมันส่วนใสออกมา โดยกระบวนการแยกส่วนซึ่งมีอยู่หลายวิธี

- **มาการีนหรือเนยเทียม** ในเชิงอุตสาหกรรมมักใช้น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ร้อยละ 60 น้ำมันเมล็ดในร้อยละ 30 และน้ำมันสเตียรีนอีกร้อยละ 10

- **เนยขาว** น้ำมันปาล์มที่ฟอกบริสุทธิ์สามารถแปรรูปให้เป็นเนยขาวได้ โดยทำให้เย็นอย่างฉับพลันที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

- **นมข้นหวาน** น้ำมันปาล์มถูกให้เป็นส่วนผสมของนมข้นหวานเนื่องจากมีคุณสมบัติเหมาะสมหลายอย่าง เช่น ไม่มีกลิ่น

- **ไอศกรีม** ในการผลิตไอศกรีมใช้น้ำมันปาล์มผสมกับน้ำมันมะพร้าวอย่างละครึ่ง

- **ครีมเทียม หรือเนยเทียม** ใช้น้ำมันปาล์มสเตียรีนเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิต

2.1.3.2 ด้านอุปโภค

- **สบู่** ใช้น้ำมันปาล์มสเตียรีนร้อยละ 40 น้ำมันปาล์มร้อยละ 40 และน้ำมันเมล็ดในปาล์มหรือน้ำมันมะพร้าวร้อยละ 10

- **อุตสาหกรรมโอเลโอเคมีคอล** เป็นอุตสาหกรรมที่ใช้เทคโนโลยีขั้นสูง โดยนำ ส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์ม (palm fatty acid distillate : PFAD) ไปแยกส่วนเป็นกรดต่าง ๆ ออกมาได้ จะสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมหลายชนิดเพื่อป้อนโรงงานอุตสาหกรรม ผลิตภัณฑ์ที่สำคัญ ได้แก่ กรดสเตียริก กรดโอเลอิก กรดลอริก กรดไมริสติก กรดไขมัน อัลโคเรซิน กรดลิโนเลนิก เป็นต้น

2.1.3.3 อาหารสัตว์

ในการผลิตอาหารสัตว์ซึ่งต้องการไขมันและวิตามินเป็นส่วนผสม มักใช้สเตียรีนผสมกับอาหารสัตว์ (กมลพ ลิขิตขจรภูวัฒน์, 2546)

เนื่องจากแหล่งพลังงานโดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำมันดิบที่ได้จากฟอสซิลซึ่งเป็นแหล่งทรัพยากรธรรมชาติของโลกที่มีปริมาณจำกัด จึงมีการค้นหาแหล่งพลังงานอื่นมาทดแทน ในกรณีนี้ ปาล์มน้ำมันนับว่ามีศักยภาพสูงที่จะนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตพลังงานทดแทน โดยการผลิตไบโอดีเซลสามารถใช้น้ำมันทุกส่วนที่ได้จากปาล์มน้ำมันมาเป็นวัตถุดิบ เช่น น้ำมันปาล์มดิบ น้ำมันปาล์มโอดีน ไชปาล์มสเตียรีน ส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์ม และน้ำมันเมล็ดในปาล์ม (www.tistr.or.th)

2.1.4 ส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์ม

การกลั่นน้ำมันปาล์มให้เป็นน้ำมันบริสุทธิ์ด้วยกระบวนการแยกขางเหนียว ลดกรด ฟอกสี และคลุกกลั่น จะได้เป็นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์และมีส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันปาล์มดิบ โดยมีปริมาณ 5% ของน้ำมันปาล์มดิบ (Bahurmiz และคณะ, 2007) คุณสมบัติทางกายภาพที่ปรากฏคือ

- มีสีเหลืองอ่อน เป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง
- มีกลิ่นหอมอ่อน ๆ
- เมื่อทำให้ละลายจะมีสีส้ม และคืนสภาพเป็นของแข็งอย่างรวดเร็ว
- ไม่เป็นตะกอน
- ไม่ละลายน้ำ

องค์ประกอบของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์ม คือ

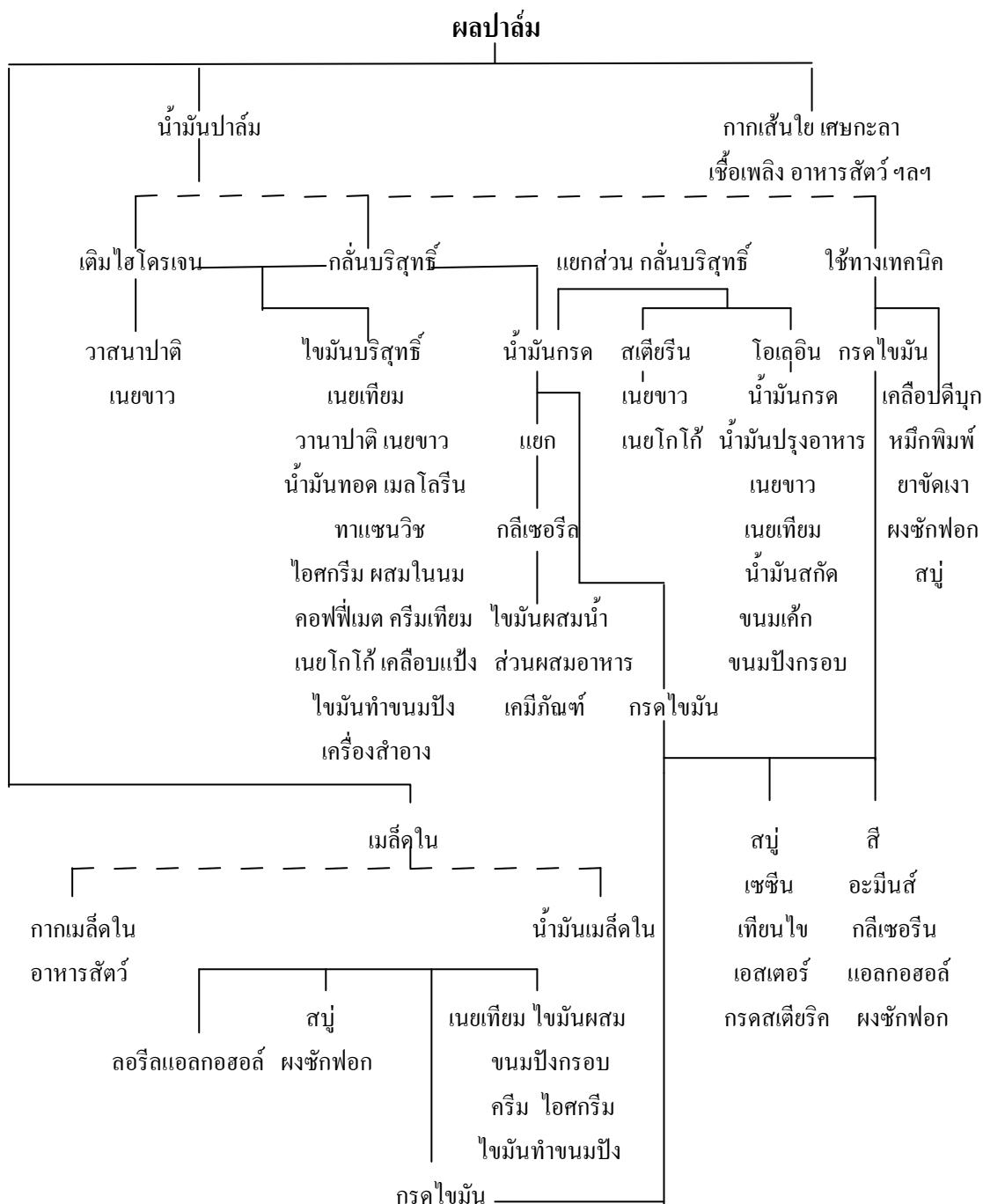
- กรดไขมันอิสระ $\geq 70\%$
- ความชื้นและสิ่งเจือปน $\geq 1.0\%$

องค์ประกอบของกรดไขมันในส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์ม คือ

- กรดไขมันไม่อิ่มตัวพันธะคู่ (poly unsaturated fatty acid) โดยประมาณ 9%

- กรดไขมันไม่อิ่มตัวพันธะเดี่ยว (mono unsaturated fatty acid) โดยประมาณ 37%
- กรดไขมันอิ่มตัว (saturated fatty acid) โดยประมาณ 49%

(สินินาฏ จงคง, 2549)



ภาพประกอบที่ 2.2 ประโยชน์จากปาล์มน้ำมัน

ที่มา : พรรณนีย์ วิชาชู (2548)

กรดไขมันเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีคาร์บอนอะตอมที่เกาะกันเป็นเส้นตรง กรดไขมันมี 2 ประเภทคือ กรดไขมันชนิดอิ่มตัวและชนิดไม่อิ่มตัว กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวจะมีพันธะคู่ระหว่างคาร์บอน 1 แห่ง หรือ 2 แห่ง (เฉลิมพร ณ พัทลุง, 2549) โดยตารางที่ 2.1 แสดงสูตรโครงสร้าง ชื่อทางวิทยาศาสตร์ของกรดไขมันทั่วไป ตารางที่ 2.2 แสดงส่วนประกอบทางเคมีของน้ำมันพืช ซึ่งแสดงผลเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของกรดไขมัน และตารางที่ 2.3 แสดงองค์ประกอบของกรดไขมันในส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์ม

ตารางที่ 2.1 แสดงสูตร โครงสร้าง ชื่อทางวิทยาศาสตร์ของกรดไขมันทั่วไป

Fatty acid	Systematic name	Structure ^a	Formula
Lauric	Dodecanoic	12:0	$C_{12}H_{24}O_2$
Myristic	Tetradecanoic	14:0	$C_{14}H_{28}O_2$
Palmitic	Hexadecanoic	16:0	$C_{16}H_{32}O_2$
Stearic	Octadecanoic	18:0	$C_{18}H_{36}O_2$
Arachidic	Eicosanoic	20:0	$C_{20}H_{40}O_2$
Behenic	Docosanoic	22:0	$C_{22}H_{44}O_2$
Lignoceric	Tetracosanoic	24:0	$C_{24}H_{48}O_2$
Oleic	cis-9-Octadecanoic	18:1	$C_{18}H_{34}O_2$
Linoleic	cis-9,cis-12-Octadecadienoic	18:2	$C_{18}H_{32}O_2$
Linolenic	cis-9,cis-12,cis-15-Octadecatrienoic	18:3	$C_{18}H_{30}O_2$
Erucic	cis-13-docosenoic	22:1	$C_{22}H_{42}O_2$

^a x:y x แทนด้วยจำนวนคาร์บอนในกรดไขมัน

y แทนด้วยจำนวนพันธะคู่ในกรดไขมัน

ที่มา : Barnwal และ Sharma (2005)

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันพืช ร้อยละโดยน้ำหนักของกรดไขมัน

ชนิดกรดไขมัน น้ำมันพืช	ร้อยละโดยน้ำหนักของกรดไขมัน									
	14:0	16:0	18:0	20:0	22:0	24:0	18:1	22:1	18:2	18:3
น้ำมันปาล์ม	0.2	45	4.5	0	0	0	40.2	0	10.1	0
น้ำมันข้าวโพด	0	12	2	0	0	0	45	0	41	0
น้ำมันเมล็ดฝ้าย	0	28	1	0	0	0	13	0	58	0
น้ำมันลินซีด	0	5	2	0	0	0	20	0	18	55
น้ำมันถั่วลิสง	0	11	2	1	2	1	48	0	32	1
น้ำมันเมล็ดเรพ	0	3	1	0	0	0	64	0	22	8
น้ำมันเมล็ดทานตะวัน	0	6	3	0	0	0	17	0	74	0
น้ำมันงา	0	9	2	0	0	0	53	0	39	0
น้ำมันถั่วเหลือง	0	12	3	0	0	0	23	0	55	6

ที่มา : Barnwal และ Sharma (2005)

ตารางที่ 2.3 แสดงองค์ประกอบของกรดไขมันในส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์ม

ชนิดกรดไขมันอิสระ	ร้อยละโดยน้ำหนักของกรดไขมัน
Palmitic	45.6
Oleic	33.3
Linoleic	7.7
Stearic	3.8
Myristic	1
Tetracosanoic	0.6
Linolenic	0.3
Eicosanoic	0.3
Ecosenoic	0.2
Palmitoleic	0.2

ที่มา : สินีนาฏ จงคง (2549)

สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มซึ่งเป็นผลผลิตพลอยได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันปาล์มดิบมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเมทิลเอสเทอร์ เนื่องจากมีราคาถูกกว่าน้ำมันชนิดอื่น เป็นผลให้ต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซลลดลงอีกด้วย

2.2 ไบโอดีเซล

ไบโอดีเซล (biodiesel) หรือเมทิลเอสเทอร์ คือผลผลิตที่ได้จากการทำปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์กับแอลกอฮอล์ เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างของน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ให้มีลักษณะโครงสร้างของน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์คล้ายกับโครงสร้างของน้ำมันดีเซลที่ผลิตได้จากปิโตรเลียม (กิตติศักดิ์ ทวีสิน โสภา, 2549)

2.2.1 วิธีการนำน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์มาใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิง

2.2.1.1 การใช้โดยตรง

ไบโอดีเซลชนิดนี้คือ การนำเอาน้ำมันพืช เช่น น้ำมันปาล์ม น้ำมันมะพร้าว น้ำมันถั่วเหลืองหรือน้ำมันจากไขมันสัตว์ มาใช้โดยตรงกับเครื่องยนต์ดีเซลโดยไม่ต้องผสม ซึ่งน้ำมันไบโอดีเซลชนิดนี้ใช้ได้เฉพาะเครื่องยนต์ความเร็วรอบต่ำ แม้จะมีราคาถูกแต่ก็ยังไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากมีปัญหาในเรื่องของคุณสมบัติที่แตกต่างจากน้ำมันดีเซลอยู่มาก ทำให้เครื่องยนต์สันดาปไม่สมบูรณ์ ส่งผลต่อลูกสูบและวาล์ว เกิดตะกรันขาวในถังน้ำมัน ทำให้เครื่องยนต์มีความหนืดเมื่ออุณหภูมิต่ำลง มีผลต่อการสตาร์ทเครื่องทำให้เครื่องติดยากหรือไม่ติดเลย

2.2.1.2 การเจือจางหรือการผสมตามสัดส่วน

การเจือจางหรือการผสมตามสัดส่วนของน้ำมันพืชจะประสบความสำเร็จ และสามารถนำมาละลายเข้ากันได้อย่างสมบูรณ์ เมื่อตัวทำละลายเป็นน้ำมันเชื้อเพลิง หรือตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนเท่านั้น มีการรายงานการค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับการเจือจางน้ำมันดอกทานตะวันโดยใช้ น้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลเป็นตัวทำละลายในอัตราส่วน 1 ต่อ 3 โดยปริมาตร พบว่ามีค่าความหนืดอยู่ในเกณฑ์ผ่านการทดสอบเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล แต่ยังคงสูงกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลปิโตรเลียมเล็กน้อย อย่างไรก็ตามผลการวิจัยระยะยาวพบว่าสารผสมชนิดนี้ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงดีเซลในระยะยาว เพราะเกิดปัญหาเกี่ยวกับการเกิดโค้ก (coking) ที่ปลายหัวฉีด ปัญหาน้ำมันเชื้อเพลิงร่วมกับน้ำมันหล่อลื่นเป็นยางเหนียว และตะกรันของคาร์บอน และปัญหาปนเปื้อนของระบบน้ำมัน เครื่องหล่อลื่น

การใช้น้ำมันพืชทดแทนน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล ทั้งโดยการใช้้ำมันพืชโดยตรงและการผสมตามสัดส่วนเมื่อพิจารณาโดยรวมแล้วนอกจากให้ผลการทดสอบที่ไม่พึงพอใจแล้ว ยังไม่เหมาะสมสำหรับการใช้เป็นเชื้อเพลิงกับเครื่องยนต์ดีเซล เนื่องจากมีคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงที่ไม่เหมาะสม ยกตัวอย่างเช่น ความหนืดสูง มีองค์ประกอบของอนุภาคที่เป็นกรด ในขณะที่เดียวกันเกิดปัญหาการสะสมของยางเหนียวจากกระบวนการโพลีเมอร์ไรเซชัน ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดคราบแข็งและตะกรันคาร์บอน (ฉัฐมณฑน์ ลีจินดา, 2549)

2.2.1.3 กระบวนการผลิตแบบไมโครอิมัลชัน

เพื่อแก้ไขปัญหาเกี่ยวกับความหนืดของน้ำมันที่มีค่าสูงเกินไป การให้ความสนใจศึกษาค้นคว้าวิจัยเพื่อเตรียมของเหลวไมโครอิมัลชัน (microemulsion) สำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลจึงเริ่มขึ้น โดยทั่วไปแล้วของเหลวไมโครอิมัลชันที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงส่วนใหญ่จะใช้เป็นส่วนผสมของน้ำมันพืชกับตัวทำละลายแอลกอฮอล์ที่มีสายโซ่คาร์บอนสั้น เช่น เมทานอล เอทานอล โดยของเหลวอิมัลชันจะมีการแพร่กระจายที่สมดุลในลักษณะคอลลอยด์ และต้องมีอนุภาคในช่วง 1 ถึง 50 นาโนเมตร จากการผสมของเหลวสองชนิดที่ไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกันในสภาวะปกติ

ของเหลวไมโครอิมัลชันมีสมบัติเป็น isotropic โดยดัชนีหักเห ความหนาแน่น และการนำไฟฟ้า เหมือนกันทุกทิศทาง ในส่วนประกอบของสารอาจมีลักษณะขุ่นหรือใส ซึ่งอาจเตรียมได้จากการผสมน้ำมันพืชกับเอสเทอร์ โดยมีการใช้ตัวทำละลายร่วม หรือน้ำมันพืชกับแอลกอฮอล์โดยมีสารลดแรงตึงผิวในสัดส่วนที่เหมาะสม ซึ่งทำให้ระบบมีเสถียรภาพ อาจผสมหรือไม่ผสมน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลปิโตรเลียมลงไปในระบบก็ได้ ปริมาณแอลกอฮอล์ที่ผสมในของเหลวไมโครอิมัลชันทำให้ค่าความร้อนจำเพาะในของเหลวมีค่าน้อยกว่าน้ำมันดีเซลปิโตรเลียม แต่เนื่องจากแอลกอฮอล์มีค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอสูงจึงทำให้การเผาไหม้ของเครื่องยนต์มีอุณหภูมิต่ำลง และช่วยลดการเกิดโค้กที่ปลายระบบหัวฉีดด้วย ทำให้การฉีดเชื้อเพลิงของระบบหัวฉีดดีขึ้น

การทดสอบโดยใช้ของเหลวไมโครอิมัลชันของเมทานอลกับน้ำมันพืชเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซล พบว่าเชื้อเพลิงชนิดนี้สามารถทำให้คุณสมบัติใช้งานของเครื่องยนต์ดีเซลใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลปิโตรเลียม (ฉัฐมณฑน์ ลีจินดา, 2549)

2.2.1.4 กระบวนการผลิตแบบแตกตัวด้วยความร้อน

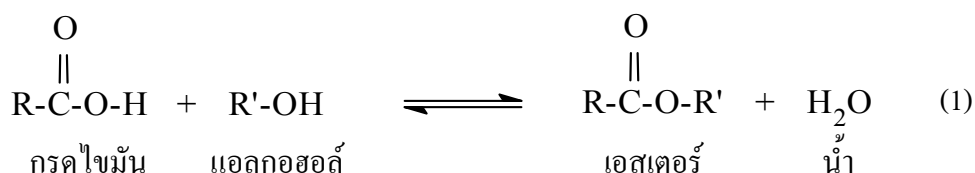
กระบวนการผลิตแบบแตกตัวด้วยความร้อน (thermal cracking) คือกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารตั้งต้นด้วยความร้อนเพื่อให้ได้โมเลกุลของผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็กลง หรือได้โมเลกุลใหม่ จากการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของโมเลกุล การให้ความร้อนเข้าไปใน

ระบบโดยทั่วไปมีการฉีดพ่นไนโตรเจนเข้าไปด้วย เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมกับการใช้งานในเครื่องยนต์ดีเซลนั้น ตัวเร่งปฏิกิริยาส่วนใหญ่เป็นเกลือของโลหะหนัก เพื่อให้ได้เชื้อเพลิงเหลวเป็นส่วนผสมของพาราฟิน และ โอเลฟิน ซึ่งมีคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงเทียบเท่าน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลปิโตรเลียม

เมื่อพิจารณาความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์สำหรับกระบวนการแตกตัวด้วยความร้อนพบว่าระบบปฏิบัติการตลอดจนเครื่องมือทั้งหมดต้องมีความทันสมัยและทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อม โดยเฉพาะการใช้งานที่อุณหภูมิสูง จึงค่อนข้างมีราคาแพงมาก ทั้งยังต้องเสียค่าใช้จ่ายสำหรับการบำรุงซ่อมแซมเชิงป้องกันสูงมากอีกด้วย ทำให้ค่าการผลิตต่อหน่วยของผลิตภัณฑ์สูง อีกทั้งพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะ โครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลคล้ายคลึงกับน้ำมันปิโตรเลียมสำเร็จรูป และนอกจากนี้พบว่าผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่จะมีปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซินในสัดส่วนที่มากกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่มีความต้องการสูงในปัจจุบัน (ฉัฐมณฑน์ ลีจินดา, 2549)

2.2.1.5 กระบวนการผลิตแบบแลกเปลี่ยนหมู่เอสเทอร์

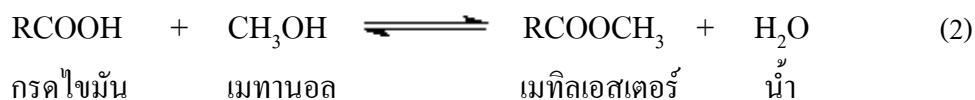
1. กระบวนการเอสเตอริฟิเคชัน (esterification) เอสเตอริฟิเคชันเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดไขมันกับแอลกอฮอล์ โดยมีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ผลผลิตที่ได้คือเอสเทอร์กับน้ำ ในขั้นตอนนี้จะลดค่าของกรดไขมันอิสระให้น้อยกว่า 1% (กิตติศักดิ์ ทวีสิน โสภากา, 2549)



ภาพประกอบที่ 2.3 ปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน

ที่มา : สุภาวดี เฟื่องคง (2550)

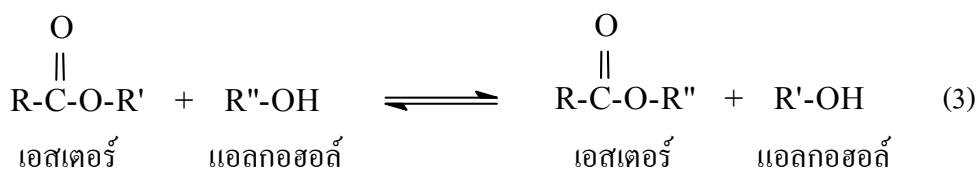
ถ้าแอลกอฮอล์ที่ใช้จะเป็นเมทานอล



ภาพประกอบที่ 2.4 ปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันเมื่อแอลกอฮอล์ที่ใช้เป็นเมทานอล

ที่มา : สุภาวดี เฟื่องคง (2550)

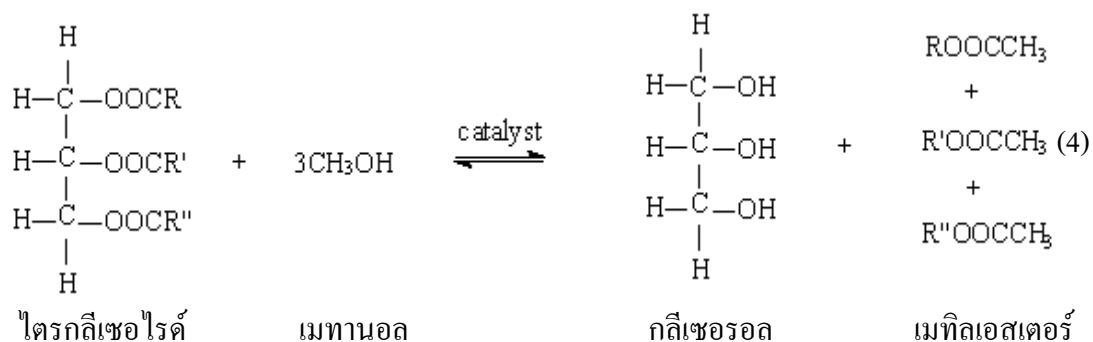
2. กระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน (transesterification) ทรานส์เอสเตอริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่ใช้ต่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซล (สมการที่ 3) ซึ่งนิยมใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และจะมีปฏิกิริยา saponification เกิดขึ้นด้วย ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสบู่ ดังสมการที่ 5



ภาพประกอบที่ 2.5 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน

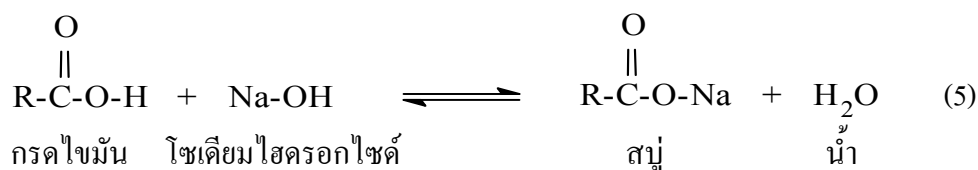
ที่มา : สุภาวดี เฟื่องคง (2550)

การผลิตไบโอดีเซลปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันที่เกิดขึ้นจะเกิดจากไตรกลีเซอไรด์ทำปฏิกิริยากับเมทานอลโดยใช้สารเร่งปฏิกิริยาจะได้กลีเซอรอลกับเมทิลเอสเทอร์ ดังสมการที่ 4



ภาพประกอบที่ 2.6 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันเมื่อแอลกอฮอล์ที่ใช้เป็นเมทานอล
ที่มา : สุภาวดี เฟื่องคง (2550)

สมการที่ 5 แสดงปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน (saponification)



ภาพประกอบที่ 2.7 แสดงปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน
ที่มา : สุภาวดี เฟื่องคง (2550)

2.2.2 ตัวแปรที่มีผลต่อปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันและทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน

2.2.2.1 ความชื้นและกรดไขมันอิสระ

คุณสมบัติของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลไม่ควรมีน้ำเจือปน เนื่องจากน้ำจะส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันและปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน สำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน วัตถุดิบเริ่มต้นใช้ไตรกลีเซอไรด์ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันซึ่งมีค่าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ต้องมีปริมาณกรดไขมันอิสระต่ำกว่า 1% หากปริมาณกรดไขมันอิสระมากกว่า 1% จะต้องใช้เบสมากขึ้น เพราะต้องใช้ในการทำปฏิกิริยาและสะเทินกรดไขมันอิสระ ดังนั้นน้ำและเบสเป็นสาเหตุทำให้เกิดสบู่ สบู่ที่เกิดทำให้น้ำมันมีความหนืดสูงขึ้น เกิดเป็นเจลและทำให้การแยกชั้นของกลีเซอรอลยากขึ้น

Ma และ Hanna (1999) ศึกษาอิทธิพลของกรดไขมันอิสระและความชื้นที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันของ Beef tallow ด้วยเมทานอล ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการ

มีน้ำเป็นองค์ประกอบใน Beef tallow ต่ำกว่า 0.06 %w/w และมีกรดไขมันอิสระเป็นองค์ประกอบใน Beef tallow ต่ำกว่า 0.5 %w/w จะเกิดปฏิกิริยาที่ดีที่สุด การมีน้ำเป็นองค์ประกอบในวัตถุดิบจะส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันมากกว่าการมีกรดไขมันอิสระเป็นองค์ประกอบในวัตถุดิบ ซึ่งยืนยันได้จากผลการทดลองของ Bradshaw and Meuly (1944) และ Feuge and Grose (1949)

2.2.2.2 สัดส่วนเชิงโมลของน้ำมันต่อเมทานอล

สัดส่วนเชิงโมลของน้ำมันต่อเมทานอล (molar ratio) เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์ ซึ่งโดยทั่วไปจะนิยมใช้แอลกอฮอล์ที่มีสายโซ่สั้น ๆ ในการทำปฏิกิริยา เช่น เมทานอล เอทานอล โพรพานอล และ บิวทานอล อย่างไรก็ตามจะนิยมใช้เมทานอลมากกว่าเนื่องจากราคาถูกกว่า ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันจะเป็นไปตามปริมาณสัมพันธ์ ซึ่งต้องการแอลกอฮอล์ 3 โมล และไตรกลีเซอไรด์ 1 โมล เพื่อให้เกิดผลิตภัณฑ์เอสเทอร์ของกรดไขมัน 3 โมล และกลีเซอรอล 1 โมล เพื่อให้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันเข้าสู่สมดุลต้องใช้แอลกอฮอล์มากเกินไปเพื่อผลักดันให้เกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้า ซึ่งการใช้อัตราส่วนเชิงโมลสูงกว่า 3 โมลของแอลกอฮอล์จะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์มากขึ้น หากใช้สัดส่วนเชิงโมลของน้ำมันต่อเมทานอลที่สูงเกินไปจะมีผลต่อการแยกชั้น เนื่องจากปริมาณแอลกอฮอล์มากทำให้มีน้ำอยู่ในปฏิกิริยามากตามไปด้วย ไม่ว่าจะเป็นน้ำที่มีอยู่ในแอลกอฮอล์อยู่แล้วหรือน้ำที่เกิดจากการทำปฏิกิริยา ซึ่งน้ำจะทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับไตรกลีเซอไรด์ กรดไขมันอิสระ หรือผลิตภัณฑ์เอสเทอร์ และเกิดปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชันตามมา ทำให้ได้เกลือของกรดไขมันหรือสบู่ขึ้น ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เอสเทอร์ลดลงและเกิดการแยกชั้นยากขึ้นด้วย (เฉลิมพร ณ พัทลุง, 2549)

2.2.2.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) สามารถใช้ได้ทั้ง กรด เบส และเอนไซม์ ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันที่มีเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะเกิดปฏิกิริยาได้เร็วกว่าใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เบสที่ใช้กันโดยทั่วไปคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมเมทอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ แต่ถ้าน้ำมันมีกรดไขมันอิสระสูงควรใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ กรดซัลฟิวริก กรดฟอสฟอริก กรดไฮโดรคลอริก กรดซัลโฟนิกของสารอินทรีย์

Freedman และคณะ (1984) จัดตัวเร่งปฏิกิริยาออกเป็น 3 กลุ่ม คือ กรด เบส และเอนไซม์ โดยปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันเมื่อใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่าการใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แต่ถ้าในน้ำมันมีกรดไขมันอิสระและน้ำเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง ควรใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะเหมาะสมกว่า (Sprules and Price, 1950; Freedman et al., 1984) ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทกรด เช่น กรดซัลฟิวริก กรดฟอสฟอริก กรดไฮโดรคลอริก กรด

ซัลโฟนิกของสารอินทรีย์ ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทเบส เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมเมทอกไซด์ โปแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โปแทสเซียมเมทอกไซด์ โซเดียมเอไมด์ โซเดียมไฮไดรด์ โปแทสเซียมเอไมด์ โปแทสเซียมไฮไดรด์

2.2.2.4 เวลาการทำปฏิกิริยา

อัตราการเปลี่ยนเป็นเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป เช่น ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันของน้ำมันเมล็ดถั่วลิสง เมล็ดฝ้าย เมล็ดดอกทานตะวัน และเมล็ดถั่วเหลือง โดยใช้สัดส่วนเชิงโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:6 ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณ 1% ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พบว่า น้ำมันถั่วเหลืองและน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวันให้ %yield เท่ากับ 80 หลังจากใช้เวลา 1 นาที และหลังจากเวลาผ่านไป 1 ชม. การเปลี่ยนแปลงของน้ำมันทั้ง 4 ชนิดเหมือนกันคือ มีค่า %yield เท่ากับ 93-98 (Ma and Hanna, 1999; Freedman et al., 1984)

2.2.2.5 อุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยา

สำหรับผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (reaction temperature) โดยทั่วไปมักจะใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา

Ma และ Hanna (1999) ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันของน้ำมันถั่วเหลืองบริสุทธิ์ด้วยเมทานอล ในสัดส่วนเชิงโมลของน้ำมันถั่วเหลืองต่อเมทานอล 1:6 ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 1% ที่อุณหภูมิ 32, 45 และ 60 องศาเซลเซียส ได้ %yield เท่ากับ 64, 87 และ 94 ตามลำดับ

2.2.3 คุณสมบัติของเมทิลเอสเทอร์

ไบโอดีเซลเป็นผลผลิตที่ได้จากน้ำมันพืชที่ผ่านกระบวนการทางเคมี ให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล อย่างไรก็ตามเนื่องจากน้ำมันดีเซลและไบโอดีเซล มีองค์ประกอบและมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน ทำให้ไบโอดีเซลยังคงมีคุณสมบัติที่แตกต่างจากน้ำมันดีเซล ซึ่งบางคุณสมบัติเป็นข้อได้เปรียบและบางคุณสมบัติเป็นข้อเสียเปรียบ สามารถเปรียบเทียบคุณสมบัติของไบโอดีเซลกับน้ำมันดีเซลได้ดังแสดงในตารางที่ 4

ไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันพืชต่างชนิดกัน จะมีคุณสมบัติแตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากน้ำมันพืชเป็นสารประกอบไตรกลีเซอไรด์ที่มีกรดไขมันอยู่ในโครงสร้างของไตรกลีเซอไรด์ถึงร้อยละ 94-96% ของน้ำหนักโมเลกุล ทำให้คุณสมบัติของน้ำมันมีคุณสมบัติทั้งทางเคมีและ

กายภาพเป็นไปตามกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบอยู่ ดังนั้นเมื่อนำน้ำมันพืชชนิดนั้น ๆ มาเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล ไบโอดีเซลที่ผลิตได้จะมีคุณสมบัติตามกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบนั้น ๆ ด้วย

ตารางที่ 2.4 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของไบโอดีเซลกับน้ำมันดีเซล

คุณสมบัติของไบโอดีเซล	คุณสมบัติของน้ำมันดีเซล
1. ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงสะอาด ไม่มีกำมะถัน เป็นองค์ประกอบ ไอเสียที่ปล่อยออกจากเครื่องยนต์จึงไม่ก่อให้เกิดภาวะฝนกรด	1. น้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ เมื่อถูกเผาไหม้ กำมะถันจะเปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และกรดซัลฟิวริก หรือกรดกำมะถัน เมื่อฝนตกจะถูกชะล้างเกิดเป็นฝนกรดได้
2. ไบโอดีเซลมีออกซิเจนอยู่ในโครงสร้าง โมเลกุลร้อยละ 10-12 และไม่มีสารประกอบ aromatic เป็นองค์ประกอบ ไอเสียที่เกิดขึ้นมีฝุ่นละอองขนาดเล็กและมีควันดำต่ำ	2. น้ำมันดีเซล ไม่มีออกซิเจนอยู่ในโครงสร้าง โมเลกุล และมีสารประกอบ aromatic เป็นองค์ประกอบร้อยละ 20-40 ไอเสียที่เกิดขึ้นมีฝุ่นละอองขนาดเล็กและมีควันดำสูง
3. ไบโอดีเซล มีจุดวาบไฟสูงจึงมีค่าการจุดระเบิดในเครื่องยนต์ต่ำกว่า	3. น้ำมันดีเซลมีจุดวาบไฟต่ำ มีความเสี่ยงต่อการจุดระเบิดหรือการติดไฟมากกว่า
4. ไบโอดีเซลมีพันธะคู่ในน้ำมันพืช จึงทำให้ไม่เสถียร เกิดออกซิเดชันได้เร็ว และเก็บรักษาได้สั้นกว่าน้ำมันดีเซล	4. น้ำมันดีเซลไม่มีพันธะคู่ในโครงสร้างโมเลกุล จึงเสถียร และเก็บรักษาได้นานกว่าน้ำมันไบโอดีเซล
5. ไบโอดีเซลมีคุณสมบัติในการหล่อลื่นดีกว่า น้ำมันดีเซล ทำให้ช่วยลดการสึกหรอของเครื่องยนต์ได้ดี	

การผลิตเมทิลเอสเทอร์เพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทนย่อมต้องมีการทดสอบคุณสมบัติบางประการของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้ เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล และเทียบกับข้อกำหนดที่เป็นค่ามาตรฐานทางคุณภาพของเชื้อเพลิง ทั้งนี้เพื่อประเมินคุณสมบัติในการใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนในเครื่องยนต์ดีเซล ซึ่งคุณสมบัติที่ใช้ในการตรวจสอบประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงมีดังนี้

1. ปริมาณเมทิลเอสเทอร์

ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (methyl ester) แสดงถึงความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลและการเกิดปฏิกิริยาการผลิต ไบโอดีเซลที่สมบูรณ์ มาตรฐานกำหนดให้มีปริมาณมากกว่าร้อยละ 96.5 โดยน้ำหนัก เมื่อปริมาณเอสเทอร์น้อยกว่าที่กำหนด จะบอกว่ายังมีโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ หรือไตรกลีเซอไรด์ อยู่ในไบโอดีเซลในปริมาณสูงกว่าที่กำหนด ส่งผลให้ความหนืดของไบโอดีเซลมีค่าสูง และเกี่ยวเนื่องกับการอุดตันในหัวฉีดหรือกระบอกสูบของเครื่องยนต์

2. ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส

ความหนาแน่น (density) เป็นตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบระบบหัวฉีดจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล ค่าความหนาแน่นเป็นตัวบ่งบอกถึงปริมาณของพลังงานเชื้อเพลิง เมื่อค่าความหนาแน่นมีค่ามากก็จะให้พลังงานความร้อนมากขึ้นตามไปด้วยเมื่อเทียบกับปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงในปริมาณเดียวกัน ความหนาแน่นของไบโอดีเซลจากวัตถุดิบน้ำมันพืชแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกัน นอกจากนี้ปริมาณเมทานอลที่ตกค้างในไบโอดีเซลยังเป็นสาเหตุให้ความหนาแน่นมีค่าต่ำอีกด้วย

3. ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

ความหนืด (viscosity) เกี่ยวข้องกับการไหล การฉีดเป็นฝอยของหัวฉีดในห้องเผาไหม้ การฉีดเป็นฝอยขนาดเล็ก จะทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ ความหนืดของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันพืชที่เป็นวัตถุดิบ ความหนืดยังเป็นดัชนีแสดงการเสื่อมสภาพของไบโอดีเซลเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันอีกทางหนึ่ง

4. จุดวาบไฟ

จุดวาบไฟ (flash point) เป็นค่าอุณหภูมิต่ำสุดเมื่อเปลวไฟผ่านเหนือไอของน้ำมันแล้วทำให้น้ำมันติดไฟ มาตรฐานกำหนดให้มีค่าจุดวาบไฟมากกว่า 120 องศาเซลเซียส ปริมาณของเมทานอลที่หลงเหลือในไบโอดีเซลทำให้จุดวาบไฟ มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานได้ จุดวาบไฟมีผลต่อการขนส่งเคลื่อนย้ายและการจัดเก็บ ปริมาณเมทานอลที่ยังคงเหลืออยู่ในไบโอดีเซลในปริมาณมากกว่า 0.2% ส่งผลให้จุดวาบไฟมีค่าต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส

5. จุดมัวหรือจุดหมอก

จุดมัวหรือจุดหมอก (cloud point) หมายถึง อุณหภูมิที่เริ่มปรากฏให้เห็นกลุ่มหมอกจากการตกผลึกของแว็กซ์ (wax) ในน้ำมันเชื้อเพลิง โดยการทำให้อุณหภูมิเย็นลงภายใต้การควบคุมอุณหภูมิ

6. จุดไหลเท

จุดไหลเท (pour point) หมายถึง อุณหภูมิต่ำสุดที่น้ำมันเป็นของเหลวพอที่จะไหลได้เมื่อได้รับความเย็น ในเครื่องมือการหาจุดไหลเท โดยการนำน้ำมันใส่หลอดแก้วแช่เย็น สามารถสังเกตเห็นว่าของเหลวไม่ไหลเมื่อถือหลอดแก้วตามแนวนอน 5 นาที จุดขุ่นมัวจะแสดงค่าอุณหภูมิสูงสุด และจุดไหลเทจะแสดงค่าอุณหภูมิต่ำสุดของสมบัติการไหลในสภาวะอุณหภูมิแวดล้อมที่ต่ำๆ ของน้ำมันเชื้อเพลิง

น้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนในเครื่องยนต์ดีเซลจะต้องมีการตรวจสอบคุณภาพเป็นไปตามข้อกำหนดทางคุณภาพของสถาบันทางมาตรฐานวิทยา สำหรับประเทศไทยใช้ตามมาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงาน ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 2.5 กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2550 ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน

ข้อที่	ข้อกำหนด		อัตราสูงสุด		วิธีทดสอบ
1	เมทิลเอสเทอร์	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่ต่ำกว่า	96.5	EN 14103
2	ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15°C	กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	860 900	ASTM D 1298
3	ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40°C	เซนติสโตกส์	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	3.5 5.0	ASTM D 445
4	จุดวาบไฟ	องศาเซลเซียส	ไม่ต่ำกว่า	120	ASTM D 93
5	กำมะถัน	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.0010	ASTM D 2622

ตารางที่ 2.5 กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน
พ.ศ. 2550 ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน (ต่อ)

ข้อที่	ข้อกำหนด		อัตราสูงสุด		วิธีทดสอบ
6	กากถ่าน (ร้อยละ 10 ของกากที่เหลือจากการกลั่น)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.30	ASTM D 4530
7	จำนวนซีเทน		ไม่ต่ำกว่า	51	ASTM D 613
8	เถ้าซัลเฟต	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.02	ASTM D 874
9	น้ำ	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.050	EN ISO 12937
10	สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.0024	EN 12662
11	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง		ไม่สูงกว่า	หมายเลข 1	ASTM D 130
12	เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110°C	ชั่วโมง	ไม่ต่ำกว่า	6	EN 14112
13	ค่าของกรด	มิลลิลิตร KOH/กรัม น้ำมัน	ไม่สูงกว่า	0.50	ASTM D 664
14	ค่าไอโอดีน	กรัม ไอโอดีน/100 กรัม	ไม่สูงกว่า	120	EN 14111
15	กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	12.0	EN 14103
16	เมทานอล	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14110
17	โมนอกลิเซอไรด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.80	EN14105
18	ไดกลิเซอไรด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14105
19	ไตรกลิเซอไรด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14105
20	กลีเซอรินอิสระ	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.02	EN 14105
21	กลีเซอรินทั้งหมด	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.25	EN 14105

ตารางที่ 2.5 กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2550 ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน (ต่อ)

ข้อที่	ข้อกำหนด		อัตราสูงสุด		วิธีทดสอบ
22	โลหะกลุ่ม1 (โซเดียมและโพแทสเซียม)	มิลลิกรัม/กิโลกรัม	ไม่สูงกว่า	5.0	EN 14108 และ EN 14109
	โลหะกลุ่ม2 (แคลเซียมและแมกนีเซียม)	มิลลิกรัม/กิโลกรัม	ไม่สูงกว่า	5.0	prEN 14538
23	ฟอสฟอรัส	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.0010	ASTM D 4951
24	สารเติมแต่ง (ถ้ามี)	ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบจากอธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน			

ที่มา : <http://www.tistr.or.th>

2.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา

2.3.1 ความหมายของตัวเร่งปฏิกิริยา

คะตะไลซิส (catalysis) มาจากภาษากรีกสองคำ ได้แก่ คะตะ (cata) หมายถึง หัก และไลซิน (lyscin) ซึ่งหมายถึงแยกหรือหัก ดังนั้นคะตะไลซิสจึงหมายความว่า เป็นตัวทำให้เกิดการแตกหักของแรงที่เกิดขึ้นบนโมเลกุล อย่างไรก็ตาม ความหมายที่ยอมรับโดยทั่วไปของตัวเร่งปฏิกิริยา คือ สารที่เพิ่มอัตราการวิ่งเข้าหาจุดสมดุลของระบบปฏิกิริยาเคมี โดยที่ตัวมันเองไม่ถูกใช้ไปในกระบวนการ (สุภาวดี เฟื่องคง, 2550)

2.3.2 ประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยา

การแบ่งประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยานิยมทำโดยพิจารณาว่าตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่สถานะเดียวกับสารตั้งต้นหรือไม่ สามารถแบ่งตัวเร่งปฏิกิริยาออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ

1. ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอกพันธ์ (homogeneous catalyst) คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในสถานะเดียวกับสารที่ทำปฏิกิริยา ซึ่งอาจมีสถานะของเหลวหรือแก๊สก็ได้

ปฏิกิริยาเอกพันธ์ได้รับความสนใจมาก เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาส่วนใหญ่มีความสามารถในการเลือกทำปฏิกิริยาสูง และไวต่อปฏิกิริยา โดยเฉพาะปฏิกิริยาที่คายความร้อน เนื่องจากสามารถกำจัดความร้อนที่เกิดขึ้นได้ง่าย แต่มีข้อเสียคือการแยกสารผลิตภัณฑ์และตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากกันทำได้ยาก

2. ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์ (heterogeneous catalyst) คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในสถานะที่แตกต่างกับสารที่ทำปฏิกิริยา เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นของแข็ง สารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สหรือของเหลว

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมคือตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ ซึ่งโดยทั่วไปมีสถานะเป็นของแข็ง ใช้เร่งปฏิกิริยาที่มีสารตั้งต้นเป็นของเหลวหรือแก๊ส เพราะตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็งนั้นมีความแข็งแรงเชิงกล ทนทานต่อความดันและอุณหภูมิสูง สามารถแยกออกจากสารผลิตภัณฑ์และสารตั้งต้นได้ง่ายกว่าระบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์

2.1 องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์

ตัวเร่งปฏิกิริยาส่วนใหญ่ประกอบด้วย 2 องค์ประกอบหลัก คือ องค์ประกอบที่ว่องไวเพื่อช่วยให้ทำปฏิกิริยา (active component) และตัวรองรับ (support) หรือตัวพา (carrier) มักเป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวสูง เพื่อให้ง่ายต่อการกระจายตัวของสารว่องไวในการทำปฏิกิริยามากขึ้น แต่บางตัวเร่งปฏิกิริยาอาจมีเพียงสารว่องไวเพียงอย่างเดียว ตัวเร่งปฏิกิริยาบางตัวอาจมีองค์ประกอบที่ช่วยส่งเสริมการเร่งปฏิกิริยาให้ดีขึ้นเรียกว่า โพรโมเตอร์ (promoter) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสารที่ใส่ลงไป ในปริมาณน้อย ๆ เพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีหรือกายภาพของสารว่องไวหรือตัวรองรับ ซึ่งอาจเพิ่มกัมมันตภาพ (activity) สัดส่วนการเลือกทำปฏิกิริยา (selectivity) และเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

2.2 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์

การเกิดปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์สามารถแบ่งออกได้เป็น 7 ขั้นตอน

1. การแพร่ของสารตั้งต้นจากของไหลผ่านชั้นฟิล์มมายังพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา
2. การแพร่ของสารตั้งต้นจากพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาลงไปตามรูพรุน
3. การดูดซับของสารตั้งต้นบนตำแหน่งที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยา (active site)
4. การเกิดปฏิกิริยาบนตำแหน่งที่ว่องไว
5. การหลุดของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากตำแหน่งที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยา
6. การแพร่ของผลิตภัณฑ์จากภายในรูพรุนออกมายังผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา

ปฏิกิริยา

7. การแพร่ของผลิตภัณฑ์จากพื้นผิวค้ำนอนอกของตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านชั้นฟิล์มกลับไปยังของไหลที่ไหลผ่าน (จตุพร วิทยาคุณ และนุรักษ์ กฤษดานุรักษ์, 2547)

2.3.3 ลักษณะทั่วไปของตัวเร่งปฏิกิริยา

1. ตัวเร่งปฏิกิริยาจะเร่งปฏิกิริยา โดยเดินในเส้นทางที่มีค่าพลังงานกระตุ้นของแต่ละขั้นตอนของตัวเร่งปฏิกิริยาน้อยกว่าปฏิกิริยาที่ไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยา

2. สมดุลของปฏิกิริยาจะไม่เปลี่ยนแปลงเพียงแต่เร่งปฏิกิริยาไปข้างหน้าให้เร็วขึ้นสำหรับปฏิกิริยาที่มีการผันกลับ

3. ตัวเร่งปฏิกิริยาจำนวนเล็กน้อยเพียงพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว

4. ตัวเร่งปฏิกิริยาจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีเมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดแต่อาจมีการเปลี่ยนแปลงทางฟิสิกส์ได้บ้าง

5. อุณหภูมิจะมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาน้อยมากเมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ด้วยในปฏิกิริยา

6. ตัวเร่งปฏิกิริยามีความจำเพาะเจาะจงในการทำปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นอยู่กับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ (สุภาวดี เฟื่องคง, 2550)

ซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้จะทำการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาน้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์และเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มวิวิธพันธุ์มาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเสถียร โดยมีข้อดีในการลดปัญหาสบู่ที่เกิดขึ้นและสะดวกในการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้วออกได้ง่ายเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก

2.3.4 ตัวเร่งปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน

สำหรับน้ำมันที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเมทิลเอสเตอริฟิเคชันที่มีกรดไขมันอิสระสูงกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก สามารถใช้ปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันเพื่อลดกรดไขมันอิสระให้ต่ำกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสมบัติเป็นกรดหรือเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันในงานวิจัยฉบับนี้ใช้น้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์และเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน

2.3.4.1 น้ำส้มควันไม้

น้ำส้มควันไม้ (wood vinegar) หรือน้ำส้มไม้ หรือกรดไพโรลิกเนียส เป็นของเหลวสีน้ำตาลใส มีกลิ่นควันไฟที่ได้มาจากการควบแน่นควันที่ได้จากการผลิตถ่านไม้ในสภาพอับอากาศซึ่งอุณหภูมิในเตาอยู่ระหว่าง 300-400 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่ปากปล่องควันอยู่ระหว่าง 80-150 องศาเซลเซียส การกักเก็บน้ำส้มโดยสังเกตจากสีของควัน ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ช่วงเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการเก็บน้ำส้มควันไม้ก็คือควันต้องเป็นสีเหลือง อุณหภูมิที่ปากปล่องเตาประมาณ 82-120 องศาเซลเซียส น้ำส้มควันไม้สามารถเก็บได้โดยอาศัยเครื่องมือง่าย ๆ โดยอาศัยการถ่ายเทความร้อนจากปล่องดักควันที่มีอุณหภูมิสูง สู่อากาศรอบปล่องดักควันที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าความชื้นในควันก็จะควบแน่นเป็นหยดน้ำนำมารวบรวมและทำให้บริสุทธิ์ขึ้นก็สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ (จิระพงษ์ คูหากาญจน์, 2548)

1. คุณสมบัติของน้ำส้มควันไม้

น้ำส้มควันไม้มีสารประกอบต่าง ๆ มากกว่า 200 ชนิด ซึ่งได้จากการสลายตัวของไม้ด้วยความร้อนเกิดเป็นสารประกอบใหม่หลายชนิด สารประกอบที่สำคัญได้แก่ น้ำประมาณ 85% กรดอินทรีย์ประมาณ 3% และสารอินทรีย์อื่น ๆ อีกประมาณ 12% มีค่าความเป็นกรด (pH) ประมาณ 3 ความถ่วงจำเพาะประมาณ 1.012-1.024 ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามชนิดของไม้ (พุดินันท์ พึ่งวงศ์ญาติ, 2544)

2. การนำน้ำส้มควันไม้มาใช้ประโยชน์

น้ำส้มควันไม้มีสารประกอบต่าง ๆ มากมายเมื่อนำไปใช้ประโยชน์ทางการเกษตร จะมีคุณสมบัติ เช่น เป็นสารปรับปรุงดิน สารป้องกันกำจัดศัตรูพืช และสารเร่งการเติบโตของพืช นอกจากนี้ มีการนำน้ำส้มควันไม้ไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม เช่น ใช้ผลิตสารดับกลิ่นตัว ผลิตสารปรับผิวนุ่ม ใช้ผลิตยารักษาโรคผิวหนัง เป็นต้น สารประกอบต่าง ๆ ในน้ำส้มควันไม้ที่ผลิตจากเตาผลิตถ่านแสดงดังตารางที่ 2.6

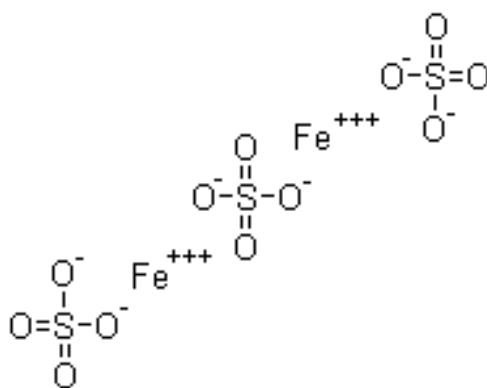
ตารางที่ 2.6 สารประกอบในน้ำส้มควันไม้ที่ผลิตจากเตาผลิตถ่าน

สารประกอบ	องค์ประกอบ (%)	ตัวอย่าง
Acetic acid	2.70	ตัวอย่าง : น้ำส้มควันไม้ ผู้วิเคราะห์ : FFPRI, Japan น้ำ : 84.2% อินทรีย์วัตถุ : 15.8%
Propionic acid	0.12	
Methanol	0.13	
Furfural	0.11	
Acetone	0.01	
Cycloten	0.15	
2-Cyclopinternon	0.03	
Fulfuryl alcohol	0.02	
Gulalcohol	0.04	
Tetrahydro Fulfuryl alcohol	0.06	
Para-Cresol & Meta-Cresol	0.09	
2-Methoxy-4-Cresol	0.08	
Ortho-Cresol	0.08	
Nonan-1, 4-Oldd	0.04	
Ethyl-Gulalcohol	0.01	

ที่มา : พุฒินันท์ พึ่งวงศ์ญาติ (2544)

2.3.4.2 เฟอร์ริกซัลเฟต

เฟอร์ริกซัลเฟต $[\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3]$ เป็นสารประกอบของไอออนและซัลเฟต (ประกอบด้วยอะตอมของซัลเฟอร์และออกซิเจน) ลักษณะโดยทั่วไปมีสีเหลือง มีโครงสร้างเป็นผลึกและสามารถละลายในน้ำได้ที่อุณหภูมิห้อง ใช้สำหรับบำบัดน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอุตสาหกรรมสิ่งทอ ทางการแพทย์ใช้เป็นยาสมานแผลและใช้ห้ามเลือด เฟอร์ริกซัลเฟตผลิตจากกรดซัลฟิวริก และเฟอร์รัสซัลเฟต โดยใช้ออกซิไดซิงเอเจนท์ (เช่น กรดไนตริก ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์) (<http://en.wikipedia.org>.)



ภาพประกอบที่ 2.8 โครงสร้างโมเลกุลของเฟอร์ริกซัลเฟต

ที่มา : <http://www.chemblink.com>



ภาพประกอบที่ 2.9 ลักษณะของเฟอร์ริกซัลเฟต

ที่มา : <http://www.achilles-online.com>

2.3.4.3 ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) เป็นของแข็งชนิดหนึ่งประกอบด้วคาร์บอนเป็นหลัก มีความพรุน และพื้นที่ผิวสูง สามารถผลิตได้จากชีวมวล เช่น กะลามะพร้าว ไม้ไผ่ เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีโครงสร้างเป็นรูพรุนและมีพื้นที่ผิวในการดูดซับจำนวนมากซึ่งตามผิวขรุขระเหล่านี้จะมีอิเล็กตรอนอิสระที่พร้อมจะแลกเปลี่ยนประจุและยึดเหนี่ยวโมเลกุลของสารต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี และสามารถดูดซับสารทั้งที่อยู่ในสภาพของเหลวและแก๊สได้ สมบัติโดยทั่วไปของถ่านกัมมันต์ได้แก่พื้นที่ผิว 300-1,200 ตารางเมตรต่อกรัม และเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุน 10-60 อังสตรอม ถ่านกัมมันต์เป็นที่นิยมใช้เนื่องจากหาง่ายและราคาถูก มักนำมาใช้ในการกำจัดกลิ่นและสีที่ไม่ต้องการออก รวมถึงการกำจัดโลหะหนักและสารอินทรีย์ที่ระเหยได้ง่าย และมีการใช้ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาอยู่บ้าง

ถ่านกัมมันต์เตรียมได้จากการให้ความร้อนวัสดุที่ประกอบด้วยคาร์บอน เช่น ถ่านหิน ลิกไนต์ ไม้ ในบรรยากาศที่ไม่มีออกซิเจน เพื่อกำจัดน้ำและสารที่ระเหยได้ให้หลุดออกไป นอกจากนี้ยังอาจทำให้เกิดการสลายตัวของโมเลกุลอินทรีย์ ผลที่ได้วัสดุที่มีองค์ประกอบคาร์บอนเป็นหลัก แต่ยังมีหมู่ฟังก์ชันต่างๆ อยู่ หลังจากนั้นจึงนำมากัมมันต์ (activated) ซึ่งทำได้ 2 วิธี คือ

1. การใช้สารเคมี คือการใช้สารที่มีสมบัติเป็นตัวดึงน้ำที่ดี (strong dehydrating agent) เช่น กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) หรือ ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) ผสมกับวัสดุตั้งต้นแล้วให้ความร้อนในช่วงประมาณ 500-800 องศาเซลเซียส

2. การออกซิไดส์โดยใช้ไอน้ำหรือคาร์บอนไดออกไซด์ (กัมมันต์ทางกายภาพ) เพื่อเปิดรูพรุนที่มีอยู่และเพิ่มพื้นที่ผิว โดยใช้อุณหภูมิที่สูงกว่าคือ ประมาณ 800-1,000 องศาเซลเซียส

ถ่านกัมมันต์อาจจะประกอบด้วยออกซิเจนประมาณ 10% โดยมวล ซึ่งอาจจะจับอยู่ที่ผิวหน้าในรูปของคีโตน ไฮดรอกซิล หรือกรดคาร์บอกซิลิก ซึ่งสมบัติเหล่านี้จะแตกต่างไปจากถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการให้ความร้อนในบรรยากาศของแก๊สเฉื่อยในสภาวะของการรีดิวซ์ พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์อาจมีค่าสูงถึง 1,200 ตารางเมตรต่อกรัม

การใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวรองรับ จะใช้กับปฏิกิริยาที่ถ่านกัมมันต์ไม่มีผลกระทบจากสภาวะของการทดลอง ถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมกับการใช้เป็นตัวรองรับจะต้องอยู่ในรูปของคาร์บอนที่ไม่มีโลหะเจือปนและมีพื้นที่ผิวสูง ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่มีคุณสมบัติดังกล่าวจะมีราคาสูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับเพื่อกำจัดสิ่งเจือปนหลายเท่า (ศิษฏาภรณ์ เครือสุวรรณ, 2550)

2.4 การหาค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลง (%Conversion)

ในทางปฏิบัติหรือในทางอุตสาหกรรมที่เกี่ยวกับปฏิกิริยาเคมี จะพบว่าปฏิกิริยาไม่ได้ถูกดำเนินไปจนกระทั่งสารตั้งต้นที่เข้าทำปฏิกิริยาได้ถูกใช้ไปอย่างสมบูรณ์ดังนั้นจึงมีเกณฑ์กำหนดว่าปฏิกิริยานั้น ๆ มีการเปลี่ยนแปลงเท่าใด โดยการใช้ร้อยละการเปลี่ยนแปลง หรือ %conversion เป็นตัวกำหนด ในงานวิจัยนี้จะใช้ %conversion ของ free fatty acid (FFA) เป็นตัวกำหนด ซึ่งคำนวณได้จาก

$$\%conversion \text{ ของ free fatty acid (FFA)} = \frac{\text{จำนวนโมลของ FFA ที่ทำปฏิกิริยา}}{\text{จำนวนโมลของ FFA ที่ป้อนเข้า}} \times 100$$

หรือ

$$\%conversion \text{ ของ free fatty acid (FFA)} = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \times 100$$

เมื่อ n_1 คือจำนวนโมลของ FFA ที่เข้าระบบ

เมื่อ n_2 คือจำนวนโมลของ FFA ที่ออกจากระบบ

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Chongkhong และคณะ (2007) ศึกษาการผลิตเมทิลเอสเทอร์ด้วยกระบวนการเอสเตอริฟิเคชันของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มซึ่งมีองค์ประกอบของกรดไขมันอิสระสูงประมาณ 93 wt% งานวิจัยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 กระบวนการ คือ กระบวนการผลิตแบบกะ เพื่อศึกษาปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันที่อุณหภูมิ 70-100 องศาเซลเซียส อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:0.4-1:12 ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยากรดซัลฟิวริก 0-5.502 wt% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 15-240 นาที จากนั้นกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องจึงถูกศึกษาโดยถ่วงผสมอย่างต่อเนื่อง ผลการทดลองพบสภาวะที่เหมาะสมคือ อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:8 ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยากรดซัลฟิวริก 1.834 wt% อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ให้ผลผลิตเมทิลเอสเทอร์ 96.7% กระบวนการเอสเตอริฟิเคชันทั้งแบบกะและแบบต่อเนื่องสามารถลดกรดไขมันอิสระให้เหลือน้อยกว่าร้อยละ 2

Wang และคณะ (2006) ศึกษาการเตรียมไบโอดีเซลจากมันไข่แล้วด้วยกระบวนการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอน วัตถุดิบที่ใช้คือน้ำมันพีชไข่แล้ว (WCO) มีค่าความเป็นกรด (acid value) 75.92 ± 0.036 mgKOH/g เป็นสารตั้งต้นที่มีกรดไขมันอิสระสูง ขั้นตอนที่ 1 เข้าสู่กระบวนการ methanolysis โดยใช้ $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ปริมาณ 2 wt% เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชม. ด้วยอัตราส่วนเชิงโมลของไตรกลีเซอไรด์ต่อเมทานอล 1:10 กรดไขมันอิสระถูกแปรสภาพไป 97.22% ขั้นตอนที่ 2 ไตรกลีเซอไรด์ที่เหลือผ่านเข้าสู่กระบวนการทรานส์-เอสเตอริฟิเคชัน โดยใช้ 1 wt% KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชม. ด้วยอัตราส่วนเชิงโมลของไตรกลีเซอไรด์ต่อเมทานอล 1:6 ในขั้นตอนนี้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นไบโอดีเซล 97.02% ข้อดีของกระบวนการนี้คือไม่มีน้ำเสียที่เป็นกรด มีประสิทธิภาพสูง อุปกรณ์ที่ใช้ราคาถูกและง่ายต่อการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่

Marchetti และคณะ (2007) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันของน้ำมันที่มีกรดไขมันอิสระสูง โดยใช้ basic resin เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อใช้ dowex monosphere 550 resin เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้ %conversion และอัตราการเกิดปฏิกิริยาคีขึ้น การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ %conversion เพิ่มขึ้น ในขณะที่การเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาและปริมาณของกรดไขมันอิสระ conversion จะไม่แตกต่างกันมาก สถานะการดำเนินงานที่เหมาะสมคืออัตราส่วนเชิงโมลของเอทานอลต่อน้ำมัน 6.128:1 ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 2.267 wt% ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ปริมาณกรดไขมันอิสระเริ่มต้น 10.684 % (w/w) จะให้ conversion สูงกว่า 80%

Veljkovic และคณะ (2006) ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดใบยาสูบที่ประกอบด้วยกรดไขมันอิสระในปริมาณสูง ใช้กระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์แบบ 2 ขั้นตอน โดยใช้ acid-catalyzed esterification ตามด้วย base-catalyzed methanolysis ในขั้นตอนที่ 1 ใช้กรดซัลฟิวริกปริมาณ 1-2 wt% เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถลดกรดไขมันอิสระให้เหลือน้อยกว่า 2% ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 25 นาที ด้วยอัตราส่วนเชิงโมลของกรดไขมันอิสระต่อเมทานอลเป็น 1:18 และในขั้นตอนที่ 2 ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ปริมาณ 1 wt% เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราส่วนเชิงโมลของไตรกลีเซอไรด์ต่อเมทานอล 1:6 จะเปลี่ยนผลิตภัณฑ์จากขั้นตอนแรกไปเป็น FAME และกลีเซอรอล ได้ yield ของ FAME 91% ภายในเวลา 30 นาที ดังนั้นเมล็ดของใบยาสูบที่เป็นของเหลือใช้จากการเกษตรสามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลได้ดี

Zullaikah และคณะ (2005) ศึกษากระบวนการผลิต 2 ขั้นตอนโดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันรำข้าว ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ ความชื้น และระยะเวลาในการผสมของกรดไขมันอิสระในน้ำมันรำข้าว ในขั้นตอนแรกใช้กรดซัลฟิวริกปริมาณ 2 wt% เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยา methanolysis กรดไขมันอิสระเปลี่ยนเป็น fatty acid methyl ester (FAME) ในขั้นตอนแรกทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชม. ด้วยอัตราส่วนเชิงโมลของกรดไขมันอิสระต่อเมทานอล 1:5 ได้เมทิลเอสเทอร์เป็นองค์ประกอบ 55-90% หลังจากนั้นชั้นของ organic ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนแรกถูกนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในขั้นตอนที่ 2 โดยใช้ 2 wt% กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยา methanolysis ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชม. ได้เมทิลเอสเทอร์เป็นองค์ประกอบ 98%

Furuta และคณะ (2004) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็งที่มีฤทธิ์เป็นกรดสูงในถังปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา tungstated zirconia-alumina (WZA), sulfated tin oxide (STO) และ sulfated zirconia-alumina (SZA) สำหรับปฏิกิริยาทรานเอสเตอริฟิเคชันของน้ำมันถั่วเหลืองกับเมทานอลที่อุณหภูมิ 200-300 องศาเซลเซียส และปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันของ n-octanoic acid กับเมทานอล ที่อุณหภูมิ 175-200 องศาเซลเซียส พบว่า WZA มีประสิทธิภาพต่อปฏิกิริยาทรานเอสเตอริฟิเคชัน ส่วน STO จะมีประสิทธิภาพต่อปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน เนื่องจาก STO จะมีสภาพความเป็นกรดสูงกว่า SZA และ WZA ตามลำดับ

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการ

3.1 วัสดุ

3.1.1 วัสดุดิบ คือ ส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์ม จากบริษัทชุมชนพรอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม โดยลักษณะภายนอกที่ปรากฏคือ มีสีเหลืองอ่อน เป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง และมีกลิ่นหอม

3.1.2 สารเคมี

1. น้ำส้มควันไม้ไฟกลั่นจาก เคียงมูลพลังงานยั่งยืน จังหวัดอุบลราชธานี
2. ผงถ่านกัมมันต์ commercial grade
3. กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) H_2SO_4 A.R., code no. 1.00731, Merck.
4. เฟอริกซัลเฟต $Fe_2(SO_4)_3$ A.R., B/no.AF612361, Unilab.
5. โซเดียมไฮดรอกไซด์ NaOH A.R., Lab-Scan.
6. เมทานอล CH_3OH commercial grade
7. เอทานอล C_2H_5OH commercial grade

3.2 อุปกรณ์

3.2.1 เครื่องมือวิเคราะห์

1. เครื่องมือวิเคราะห์ X-Ray Diffraction (XRD) PW 3710 mpd control wide angle goniometer, Ni-filtered Cu K radiation at 30 kV and 25 MA, Philips, Amello, Netherland. เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้รังสีเอกซ์ที่ทราบความยาวคลื่นไปกระทบอนุภาค หรือวัตถุที่มุมต่าง ๆ กัน โดยมี Detector เป็นตัวรับข้อมูล ซึ่งสารที่ต่างชนิดกันทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีต่างกันที่มุมองศาต่างกัน ทำให้ทราบรูปแบบโครงสร้างของผลึก

2. เครื่องมือวิเคราะห์ Fourier-transformed infrared spectrophotometer (FT-IR) Pellet (KBr), EQUINOX55, Bruker, Germany. เป็นเครื่องมือวิเคราะห์หามุมฟังก์ชันของสารประกอบรังสีอินฟราเรดเป็นช่วงหนึ่งของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นในช่วง 0.78-1,000 μm หรือ

wavenumber ในช่วง $12,800-10\text{ cm}^{-1}$ โดยรังสีอินฟราเรดจะมีพลังงานต่ำกว่ารังสี UV เมื่อโมเลกุลของสารดูดซับรังสีอินฟราเรดจะทำให้โมเลกุลเกิดการสั่นและการหมุนของพันธะ โมเลกุลจะดูดซับรังสีอินฟราเรดที่ความถี่เดียวกันกับความถี่ในการสั่นของโมเลกุลของสารนั้น ดังนั้นสารอินทรีย์แต่ละชนิดจะมีค่าความถี่ในการสั่นจำเพาะที่แตกต่างกันไปทำให้สามารถนำเทคนิคนี้มาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างและชนิดของสารอินทรีย์แต่ละชนิดได้ คุณสมบัตินี้เรียกว่า finger print (<http://las.perkinelmer.com>)

3. เครื่องมือวิเคราะห์ Scanning Electron Microscope (SEM) JEOL JSM-5800LV, Highvacuum mode เป็นกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ใช้ในการศึกษาลักษณะโครงสร้างหรือองค์ประกอบของพื้นผิวโดยอาศัยการกวาดของลำอิเล็กตรอนไปบนผิววัสดุแทนการใช้แสงธรรมดา ซึ่งจะทำให้มีกำลังขยายสูงกว่ากล้องจุลทรรศน์ธรรมดา โดยสามารถขยายภาพได้มากกว่า 1,000 เท่าจนถึงระดับ 100,000 เท่าขึ้นไป

4. เครื่องมือวิเคราะห์ BET surface area การวัดพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และการศึกษารูปร่างของรูพรุน เป็นขั้นตอนหนึ่งของการศึกษาการเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากพื้นที่ผิวจะเป็นบริเวณที่ใช้วางองค์ประกอบกัมมันต์ที่จะใช้ในการช่วยเกิดปฏิกิริยา การวัดพื้นที่ผิวภายในของวัสดุที่มีความพรุนทำได้โดยการศึกษาการดูดซับของแก๊สไนโตรเจนหรือแก๊สอื่นที่มีขนาดเล็ก เช่น อาร์กอน โดยใช้ประโยชน์จากไอโซเทอรั่มการของการดูดซับทางกายภาพ

5. เครื่องมือวิเคราะห์ Thin Layer Chromatography/Hydrogen Flame Ionization Detection (TLC-FID), Iatroscan Model MK-6s เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้สำหรับแยกองค์ประกอบของสารเนื้อเดียวที่มีองค์ประกอบของสารตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ละลายในของเหลวเดียวกัน โดยอาศัยหลักการสารแต่ละชนิดมีความสามารถในการละลายต่างกัน และมีสมบัติในการซึมผ่านตัวดูดซับบางชนิดต่างกัน เครื่องมือวิเคราะห์ TLC-FID จึงประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ ตัวดูดซับและตัวทำละลาย การใช้ TLC-FID แยกสารเนื้อเดียวชนิดเดียวกัน แต่ใช้ตัวดูดซับหรือตัวทำละลายต่างกัน อาจทำให้ผลที่ได้ต่างไปด้วย ซึ่งสารที่ถูกดูดซับได้น้อยจะเคลื่อนที่ไปได้ไกล สารที่ถูกดูดซับได้มากจะเคลื่อนที่ไปได้ใกล้

3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

3.2.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาแบบแบทช์

ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาประกอบด้วย ขวดสามคอขนาด 500 มิลลิลิตร ต่อเข้ากับชุดการทดลอง มีการให้ความร้อนและมีการกวนตลอดการทดลอง ดังภาพประกอบที่ 3.1



ภาพประกอบที่ 3.1 แสดงชุดการทดลองในการผลิตเมทิลเอสเทอร์แบบเบทซ์

3.2.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาแบบต่อเนื่อง

ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเป็นอุปกรณ์ที่ประยุกต์ขึ้นมา ซึ่งประกอบด้วย

1. อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ ใช้สำหรับควบคุมอุณหภูมิในถังปฏิกรณ์
2. thermocouple ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิในถังปฏิกรณ์
3. ถังปฏิกรณ์ขนาด 3 ลิตร ใช้สำหรับผสมสารก่อนเข้าทำปฏิกิริยา ซึ่งเป็นถังปฏิกรณ์ถังที่ 1
4. ถังปฏิกรณ์ขนาด 2.5 ลิตร มีแผ่นให้ความร้อน ใช้สำหรับบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเป็นถังปฏิกรณ์ถังที่ 2
5. magnetic bar ใช้สำหรับคนให้สารผสมกันได้ดี
6. reflux condenser ใช้สำหรับควบแน่นเมทานอลกลับไปยังถังปฏิกรณ์
7. ขาดังใช้สำหรับยึด reflux condenser
8. ปั๊ม (peristaltic pump, masterflex)
9. อุปกรณ์ทำความเย็น ใช้สำหรับน้ำหล่อเย็นใน condenser
10. สายยางซิลิโคน
11. hot plate stirrer



ภาพประกอบที่ 3.2 แสดงชุดการทดลองในการผลิตเมทิลเอสเทอร์แบบต่อเนื่อง



ภาพประกอบที่ 3.3 การบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาภายในถังปฏิกรณ์

3.2.2.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียม catalyst

1. บิวเรต
2. โถดูดความชื้น (desiccator)
3. หลอดหยด
4. ขวดปรับปริมาตร (volumetric flask)
5. บีกเกอร์
6. จานเพาะเชื้อ
7. ตัวยับยั้ง และขาตั้ง
8. ซ้อนตักสาร
9. แท่งแก้วคน

3.3 วิธีการวิจัย

3.3.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

ทำการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา 3 ชนิด คือ

1. น้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์
2. เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์
3. กรดซัลฟิวริกบนผงถ่านกัมมันต์ (เพื่อใช้เปรียบเทียบที่สภาวะที่เหมาะสมจาก

การทดลอง)

โดยมีวิธีการเตรียมดังนี้

1. อบผงถ่านกัมมันต์ และเฟอร์ริกซัลเฟตที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชม. แล้วนำมาเก็บในโถดูดความชื้น
2. นำผงถ่านกัมมันต์ไปหา wetness point โดยทำการทดลองตัวอย่างละ 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย
3. กำหนดหาปริมาณของสารละลายที่ต้องใช้ต่อสารทั้งหมดที่เปอร์เซ็นต์ต่าง ๆ โดยเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่เปอร์เซ็นต์ต่าง ๆ ดังนี้ คือ 10, 20 และ 30 wt% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ และ 100, 300% โดยน้ำหนักของน้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์ (ตามจุด wetness point)
4. นำตัวเร่งปฏิกิริยาไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชม.
5. เก็บตัวอย่างในโถดูดความชื้น

6. นำสารตัวอย่างไปทดสอบคุณสมบัติโดยใช้เทคนิค FT-IR, SEM, XRD และ BET surface area

หมายเหตุ : วิธีการหาจุด wetness point ของผงถ่านกัมมันต์ ด้วยการทำให้ผงถ่านกัมมันต์อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยเตรียมผงถ่านกัมมันต์ 3 กรัม หยดด้วยน้ำจนกระทั่งผงถ่านกัมมันต์อิ่มตัว จากการทดลองได้จุด wetness point ประมาณ 0.6 มิลลิลิตรต่อกรัม ดังนั้นเมื่อเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา 20 กรัม จะมีจุด wetness point ประมาณ 12 มิลลิลิตรต่อผงถ่านกัมมันต์ 20 กรัม

3.3.2 ศึกษาคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมจะถูกทดสอบคุณสมบัติโดยเทคนิคต่าง ๆ ดังนี้

- เครื่องมือวิเคราะห์ X-ray diffraction (XRD)
- เครื่องมือวิเคราะห์ Fourier-Transformed Infrared Spectrophotometer (FT-IR)
- เครื่องมือวิเคราะห์ Scanning Electron Microscope (SEM)
- เครื่องมือวิเคราะห์ BET surface area

3.3.3 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไบโอดีเซล

1. ศึกษาองค์ประกอบของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มที่ใช้ในการผลิตเมทิลเอสเตออร์โดยใช้เทคนิค Thin Layer Chromatography (TLC)
2. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตเมทิลเอสเตออร์ เมื่อใช้ส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มเป็นวัตถุดิบตั้งต้น ทำปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันกับเมทานอล โดยใช้น้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์ และเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากสถานะที่เหมาะสมจากการทดลองจะทำการเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาผงถ่านกัมมันต์ และกรดซัลฟิวริกบนผงถ่านกัมมันต์

3.3.4 ศึกษาสถานะที่ใช้ในการทดลองแบบเบทซ์

ทำการศึกษาสถานะที่ใช้ในการทดลองแบบเบทซ์ โดยการนำส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์ม 25 กรัม ใส่ในขวดสามคอขนาด 500 มิลลิลิตร เติมตัวเร่งปฏิกิริยาและเมทานอลที่จะทำการศึกษา นำขวดสามคอต่อเข้ากับชุดการทดลอง มีการให้ความร้อนและมีการกวนตลอดการทดลองดังภาพประกอบที่ 3.1 เมื่อเสร็จสิ้นการทดลองนำตัวอย่างผ่านกระบวนการล้างน้ำและขจัดน้ำออก แล้วจึงวิเคราะห์กรดไขมันโดยวิธีการไทเตรท

ในการทดลองเริ่มต้นจากการทำการทดลองเพื่อหาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม โดยกำหนดให้เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาบนผงถ่านกัมมันต์ อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล เวลาในการทำปฏิกิริยาและอุณหภูมิ มีค่าคงที่ และทำการเปลี่ยนน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อได้ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมแล้วจะทำการศึกษาผลของเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาบนผงถ่านกัมมันต์ โดยกำหนดให้เงื่อนไขอื่น ๆ คงที่ และเลือกใช้ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมจากการทดลองที่ผ่านมา จากนั้นทำการศึกษาอัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอลที่เหมาะสม และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม ตามลำดับ ซึ่งตัวอย่างกระบวนการทดลองสำหรับเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ได้แสดงดังตารางที่ 3.1-3.5

ตารางที่ 3.1 ศึกษาปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม

อุณหภูมิ (°C)	เวลาในการทำปฏิกิริยา(ชม.)	อัตราส่วนเชิงโมล (PFAD /CH ₃ OH)	เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ (%)	ตัวเร่งปฏิกิริยา (g/25g PFAD)
60	1	1:12	20	2
60	1	1:12	20	4
60	1	1:12	20	6
60	1	1:12	20	8
60	1	1:12	20	10

X_1 = ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา (g) ที่เหมาะสม

ตารางที่ 3.2 ศึกษาเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสม

อุณหภูมิ (°C)	เวลาในการทำปฏิกิริยา(ชม.)	อัตราส่วนเชิงโมล (PFAD /CH ₃ OH)	เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ (%)	ตัวเร่งปฏิกิริยา (g/25g PFAD)
60	1	1:12	10	X_1
60	1	1:12	20	X_1
60	1	1:12	30	X_1

X_2 = เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ (%) ที่เหมาะสม

ตารางที่ 3.3 ศึกษาอัตราส่วนเชิงโมลส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอลที่เหมาะสม

อุณหภูมิ (°C)	เวลาในการทำปฏิกิริยา(ชม.)	อัตราส่วนเชิงโมล (PFAD /CH ₃ OH)	เฟอร์ริกซัลเฟตบนผง ถ่านกัมมันต์ (%)	ตัวเร่งปฏิกิริยา (g/25g PFAD)
60	1	1:1	X ₂	X ₁
60	1	1:4	X ₂	X ₁
60	1	1:8	X ₂	X ₁
60	1	1:12	X ₂	X ₁
60	1	1:14	X ₂	X ₁

X₃= อัตราส่วนเชิงโมลส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอลที่เหมาะสม

ตารางที่ 3.4 ศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม

อุณหภูมิ (°C)	เวลาในการทำปฏิกิริยา(ชม.)	อัตราส่วนเชิงโมล (PFAD /CH ₃ OH)	เฟอร์ริกซัลเฟตบนผง ถ่านกัมมันต์ (%)	ตัวเร่งปฏิกิริยา (g/25g PFAD)
60	0.5	X ₃	X ₂	X ₁
60	1	X ₃	X ₂	X ₁
60	2	X ₃	X ₂	X ₁
60	3	X ₃	X ₂	X ₁
60	4	X ₃	X ₂	X ₁
60	5	X ₃	X ₂	X ₁
60	6	X ₃	X ₂	X ₁
60	7	X ₃	X ₂	X ₁
60	8	X ₃	X ₂	X ₁
60	9	X ₃	X ₂	X ₁
60	10	X ₃	X ₂	X ₁

X₄= ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง) ที่เหมาะสม

ตารางที่ 3.5 แสดงสภาวะที่เหมาะสม

ตัวเร่งปฏิกิริยา (g/25g PFAD)	เฟอร์ริกซัลเฟตบน ผงถ่านกัมมันต์ (%)	อัตราส่วนเชิงโมล (PFAD /CH ₃ OH)	เวลาในการทำ ปฏิกิริยา(ชม.)	อุณหภูมิ (°C)
X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	60

หมายเหตุ : สำหรับกรณีของตัวเร่งปฏิกิริยาน้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์ได้ออกแบบสภาวะการทดลองเช่นเดียวกัน

เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองจึงนำไปศึกษาต่อในกระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์แบบต่อเนื่อง

3.3.5 ศึกษาการผลิตเมทิลเอสเทอร์แบบต่อเนื่อง

1. ให้ความร้อนแก่ส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มประมาณ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อกำจัดน้ำออกจากวัตถุดิบ
2. นำตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 500 กรัม บรรจุในถังปฏิกรณ์ตัวที่ 2 ซึ่งต่อกับชุดควบคุมอุณหภูมิ และชุด reflux condenser
3. นำน้ำมันจากข้อ 1 ปริมาณ 1,250 กรัม เติมลงในถังปฏิกรณ์ตัวที่ 1 ให้ความร้อนจนกระทั่งอุณหภูมิของน้ำมันอยู่ที่ 70 องศาเซลเซียส แล้วนำสารละลายเมทานอลเติมลงในถังปฏิกรณ์ตัวที่ 1 ที่มีเครื่องกวนผสม ใช้ปั๊มดูดสารผสมจากถังปฏิกรณ์ตัวที่ 1 ไปยังถังปฏิกรณ์ตัวที่ 2 (อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส) และจับเวลา (ที่อัตราการไหล 14 มิลลิลิตรต่อนาที สารจะใช้เวลาอยู่ในถังปฏิกรณ์ตัวที่ 2 โดยประมาณ 2 ชม.) อุปกรณ์การทดลองแสดงดังภาพประกอบที่ 3.2
4. วนซ้ำอีก 2 รอบ นำน้ำมันที่ได้ไปล้างด้วยน้ำอุ่นจนกระทั่งน้ำที่ล้างเป็นกลาง และวิเคราะห์องค์ประกอบของเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้ด้วยวิธีการไทเตรท และ TLC-FID

3.3.6 ศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการนำกลับมาใช้ซ้ำ

นำตัวเร่งปฏิกิริยามาศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการนำกลับมาใช้ซ้ำที่สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลอง

3.3.7 การวิเคราะห์สมบัติทางเชื้อเพลิงไบโอดีเซล

การวิเคราะห์สมบัติทางเชื้อเพลิงของเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้ โดยเลือกสภาวะที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลอง ทำการทดสอบคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงเพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงาน (พ.ศ.2550) ซึ่งสมบัติที่ทำการทดสอบแสดงดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 วิเคราะห์สมบัติทางเชื้อเพลิงของเมทิลเอสเทอร์

ลำดับ	คุณสมบัติ	อุปกรณ์	วิธีการ	หน่วย
1	ความหนาแน่น	ชุดอุปกรณ์วัดความหนาแน่น	ASTM D 1298	kg/m ³
2	ความหนืด	เครื่องวัดความหนืด	ASTM D 445	centistokes
3	จุดขุ่น	ชุดอุปกรณ์วัดจุดขุ่น	ASTM D 2500	°C
4	จุดไหลเท	ชุดอุปกรณ์วัดจุดไหลเท	ASTM D 97	°C
5	จุดวาบไฟ	ชุดอุปกรณ์วัดจุดวาบไฟ	ASTM D 93	°C
6	การกร่อนของแผ่นทองแดง	ชุดอุปกรณ์วัดการสึกกร่อนของแผ่นทองแดง	ASTM D 130	number
7	ปริมาณน้ำ	เครื่องมือ karl fisher	ASTM D6304	%wt
8	จุดกลั่น 90%	ชุดอุปกรณ์วัดจุดกลั่น	ASTM D86	°C
9	ค่าของกรด	ชุดอุปกรณ์ไตเตรท	ASTM D664	mg KOH/g
10	เมทิลเอสเทอร์	เครื่องมือวิเคราะห์ TLC-FID	-	%wt
11	โมนอกลิเซอไรด์	เครื่องมือวิเคราะห์ TLC-FID	-	%wt
12	ไดกลิเซอไรด์	เครื่องมือวิเคราะห์ TLC-FID	-	%wt
13	ไตรกลิเซอไรด์	เครื่องมือวิเคราะห์ TLC-FID	-	%wt

บทที่ 4

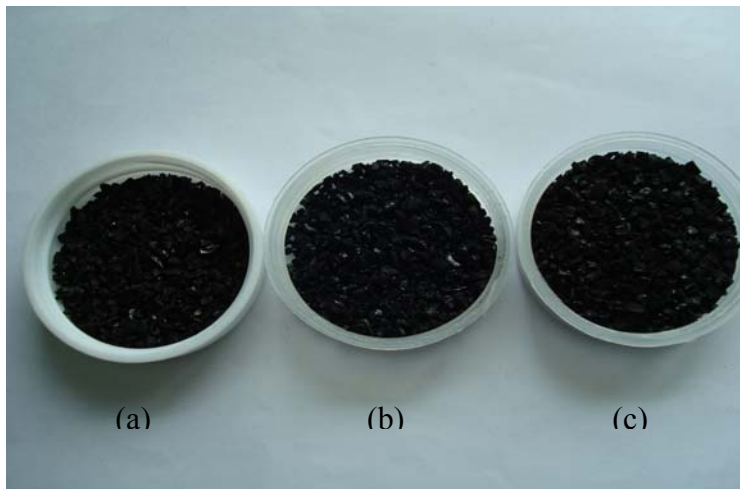
ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

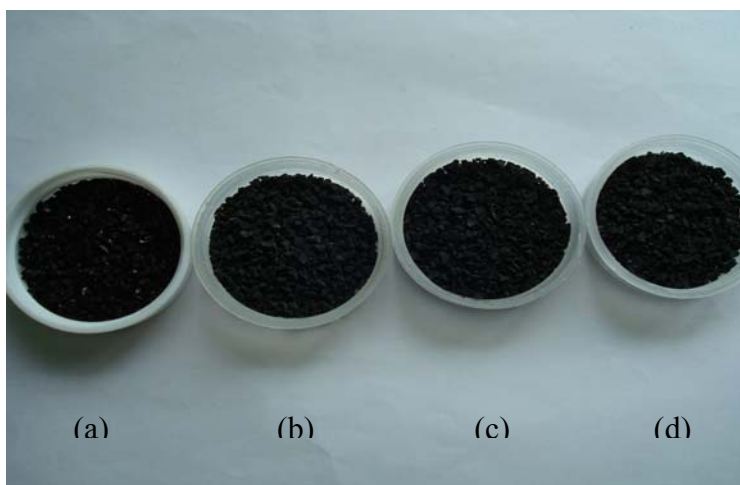
งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มด้วยปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน โดยใช้น้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์ และเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองจะทำการ impregnation น้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์ และ impregnation เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ ซึ่งกำหนดเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์ที่ปริมาณต่าง ๆ ดังนี้ คือ 100 และ 300% น้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์ (ตามจุด wetness point) และเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ที่ 10, 20 และ 30 wt% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมจะถูกทดสอบด้วยเทคนิคต่าง ๆ คือ XRD, FT-IR, SEM และ BET surface area เพื่อยืนยันความถูกต้องของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียม

4.1.1 ลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียม

จากภาพประกอบที่ 4.1 และ 4.2 พบว่าลักษณะภายนอกของผงถ่านกัมมันต์มีลักษณะเป็นเกร็ดสีดำ ขนาดเล็ก เมื่อทำการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาน้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์พบว่าลักษณะยังคงเหมือนเดิม และการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์พบว่าเมื่อมีการเพิ่มเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเฟอร์ริกซัลเฟต จะเห็นได้ว่าลักษณะสีของผงถ่านกัมมันต์เปลี่ยนไปเป็นสีเทา



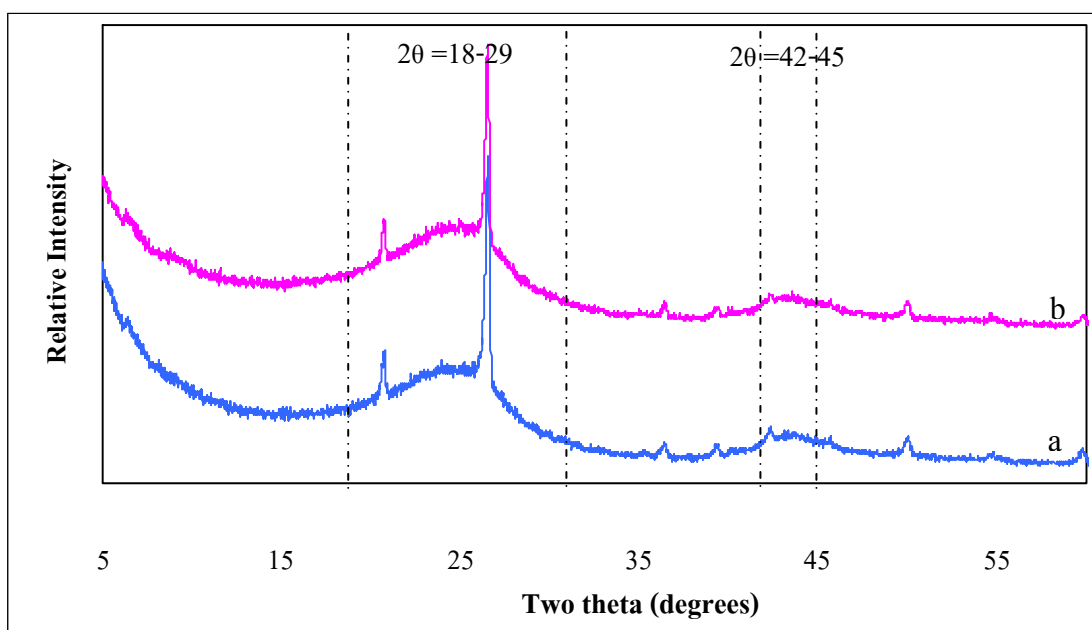
ภาพประกอบที่ 4.1 ลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาน้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์ : (a) ผงถ่านกัมมันต์; (b) 100% น้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์; (c) 300% น้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์



ภาพประกอบที่ 4.2 ลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ : (a) ผงถ่านกัมมันต์; (b) 10 wt% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์; (c) 20 wt% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์; (d) 30 wt% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์

4.1.2 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา

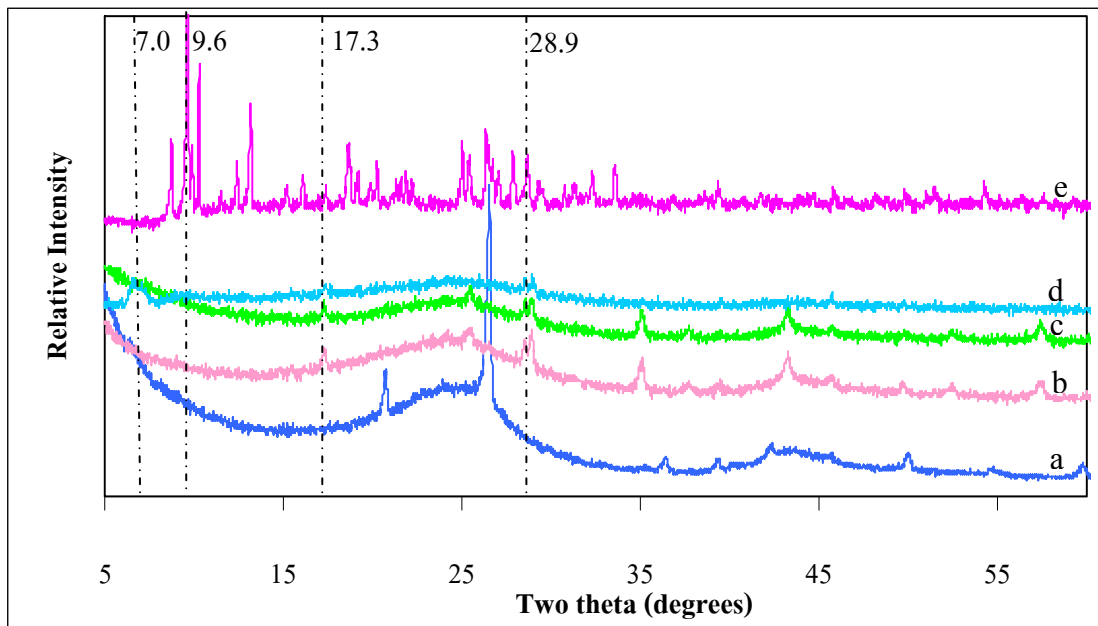
เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction; XRD) เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างผลึกที่ไม่ทำลายชิ้นงานตัวอย่าง เครื่องมือชนิดนี้อาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เมื่อลำรังสีตกกระทบวัตถุหรืออนุภาค จะเกิดการหักเหของลำรังสี สะท้อนออกมาทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบ XRD diffraction method เป็นวิธีการทั่วไปที่ใช้ระบุ crystal identification การยืนยันชนิดของสาร โดยใช้ diffraction pattern แสดงความสัมพันธ์ของสาร ในรูปของ 2θ intensity โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์จำเป็นต้องทำการยืนยันชนิดของสาร เพื่อความถูกต้องตามวัตถุประสงค์ ซึ่งผลการวิเคราะห์โดยใช้ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาผงถ่านกัมมันต์ น้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์ และเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ แสดงดังภาพประกอบที่ 4.3 และ 4.4



ภาพประกอบที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบ XRD : (a) ผงถ่านกัมมันต์; (b) 100% น้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์

จากภาพประกอบที่ 4.3 พบว่า fingerprint ของผงถ่านกัมมันต์จะปรากฏในช่วงตำแหน่ง $2\theta = 18-29$ และ $42-45$ โดยที่ตำแหน่ง $2\theta = 18-29$ และ $42-45$ สามารถยืนยันได้ว่าเป็นลักษณะโครงสร้างของ amorphous ซึ่งปรากฏ fingerprint ที่ตำแหน่ง 2θ ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Holtz และคณะ (2008) ซึ่งศึกษาการเตรียมผงถ่านกัมมันต์จากเมล็ดเชอร์รี่ พบว่า ผลการทดสอบ

XRD ของผงถ่านกัมมันต์จะปรากฏ fingerprint ที่ตำแหน่ง $2\theta = 15-30$ และ $40-50$ ซึ่งแสดงคุณลักษณะโครงสร้างของ amorphous สำหรับ XRD ของน้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์ มีลักษณะ fingerprint ปรากฏที่ตำแหน่ง 2θ เดียวกับ fingerprint ของผงถ่านกัมมันต์ เนื่องจากน้ำส้มควันไม้ไม่มีลักษณะโครงสร้างของผลึกจึงไม่สามารถทำการตรวจวัดได้โดยเทคนิคนี้



ภาพประกอบที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบ XRD : (a) ผงถ่านกัมมันต์; (b) 10 wt% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์; (c) 20 wt% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์; (d) 30 wt% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์; (e) เฟอร์ริกซัลเฟต

จากภาพประกอบที่ 4.4 พบว่า ลักษณะ fingerprint ของเฟอร์ริกซัลเฟตปรากฏที่ตำแหน่ง (2θ) 8.8, 9.6, 10.3, 13.2, 17.6, 19.2, 21.7, 25.4 และ 28.7 เมื่อทำการ impregnation เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ที่เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่าง ๆ จะปรากฏ fingerprint ที่ตำแหน่ง $2\theta = 17.3$ และ 28.9 แต่ไม่ปรากฏ fingerprint ที่ตำแหน่ง $2\theta = 9.6$ เนื่องจากผลการ impregnation เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์จะเกิดการเลื่อนของ fingerprint เล็กน้อยจากตำแหน่ง $2\theta = 9.6$ เป็น $2\theta = 7.0$ ที่ 30 wt% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ สำหรับที่ 10 wt% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ และ 20 wt% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์จะไม่ปรากฏ fingerprint ที่ตำแหน่ง $2\theta = 9.6$ เนื่องจากปริมาณของเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์มีปริมาณน้อย จึงไม่ปรากฏ fingerprint ที่ตำแหน่งนี้ อย่างไรก็ตามหากมีการเพิ่มปริมาณของเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์

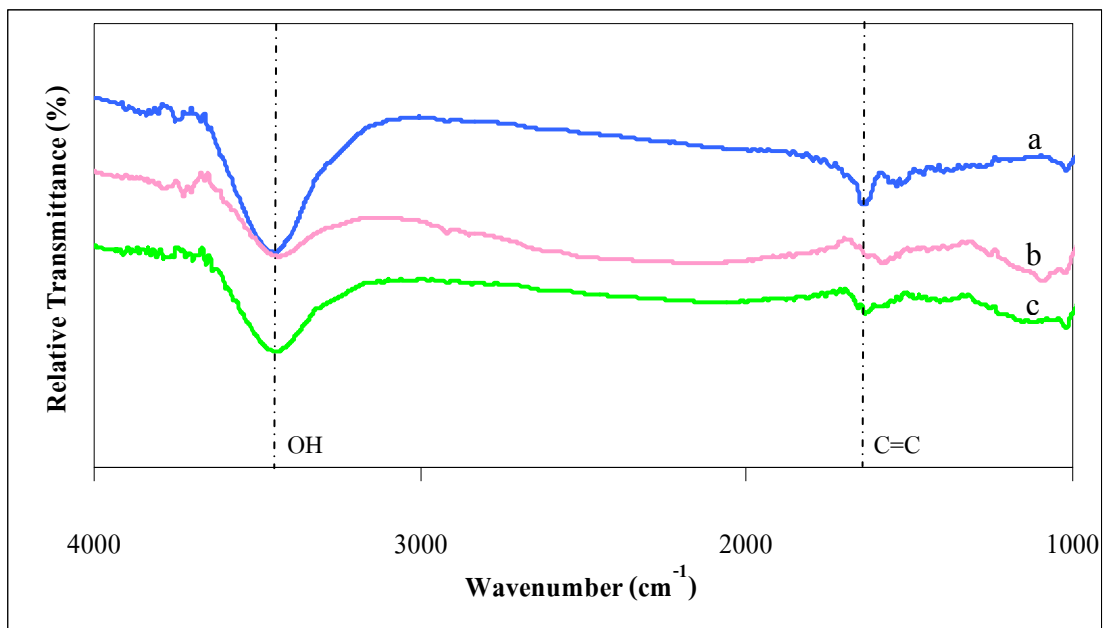
มากกว่า 30 wt% เฟอริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์คาดว่าจะปรากฏ fingerprint ของเฟอริกซัลเฟตชัดเจนขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของปาริชาติ คำรงพงษ์ (2547) ได้ทำการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดสารประกอบไฮดรอนซัลเฟต (FeSO_4) บนตัวรองรับเคลย์ (clay) ผลการทดสอบ XRD พบว่า เกิดการเลื่อนของ fingerprint จากตำแหน่ง $2\theta = 7.5$ เป็น $2\theta = 6.5$ เนื่องจากเกิดจากการแทรกสอดของเหล็กไปยังโครงสร้างของเคลย์ เช่นเดียวกับงานวิจัยนี้คืออาจจะเกิดการแทรกสอดของเหล็กไปยังโครงสร้างของผงถ่านกัมมันต์จึงส่งผลให้เกิดการเลื่อนตำแหน่งของ fingerprint

4.1.3 หมู่ฟังก์ชันของตัวเร่งปฏิกิริยา

Fourier-Transformed Infrared Spectroscopy เป็นเทคนิคการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบ โดยทำการศึกษาในช่วงความถี่ $400\text{-}4,000\text{ cm}^{-1}$ แสดงหมู่ฟังก์ชันของตัวเร่งปฏิกิริยาผลการวิเคราะห์แสดงดังภาพประกอบที่ 4.5 และ 4.6 ซึ่งแสดงแถบการยืดและการงอของพันธะต่าง ๆ โดยโครงสร้างของผงถ่านกัมมันต์ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชัน OH, CH_2 และ CH_3 พันธะ C-O เป็นองค์ประกอบ (Olivares-Marín et al., 2006)

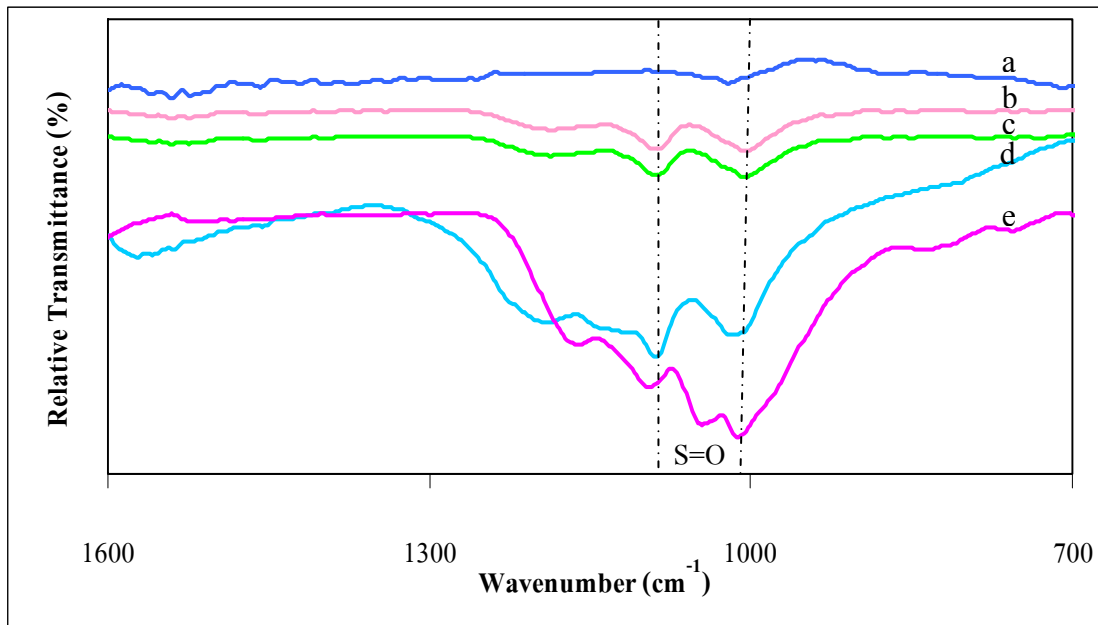
ตารางที่ 4.1 แสดงช่วงสัญญาณ FT-IR ของผงถ่านกัมมันต์ 100% และ 300% นำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์ (ตามจุด wetness point)

Wave number (cm^{-1})	Assignment	References
3,448	O-H stretching	Olivares-Marín และคณะ 2006
1,632	C=C skeletal	Olivares-Marín และคณะ 2006
1,021	-C-O- asymmetric stretching	Erlin และคณะ 2005
859	C-H bending (out of plane)	Olivares-Marín และคณะ 2006
692	C-H bending (out of plane)	Olivares-Marín และคณะ 2006



ภาพประกอบที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบหมู่ฟังก์ชัน โดยใช้เทคนิค FT-IR Spectroscopy : (a) ผงถ่านกัมมันต์; (b) 100% น้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์; (c) 300% น้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์

จากภาพประกอบที่ 4.5 พบว่า FT-IR ของผงถ่านกัมมันต์ 100% และ 300% ของน้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์ (ตามจุด wetness point) จะปรากฏพิกที่ตำแหน่งเดียวกัน แต่ไม่พบพิกใหญ่ของหมู่คาร์บอนิลที่ความยาวคลื่น $1,820-1,660 \text{ cm}^{-1}$ แสดงว่าไม่มีสารประเภทกรดบนผงถ่านกัมมันต์ (พิมพ์จิต ดามพวรรณ และวัชรินทร์ รุกขไชยศิริกุล, 2542)

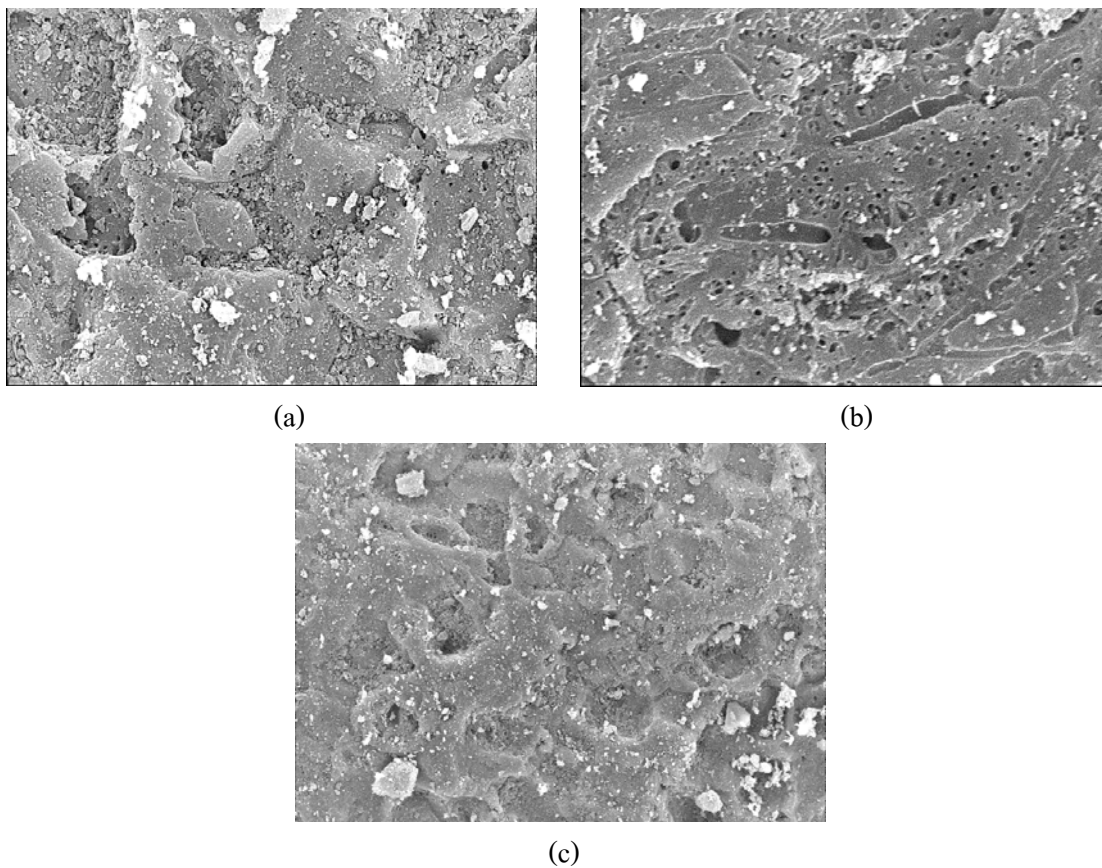


ภาพประกอบที่ 4.6 แสดงผลการทดสอบหมู่ฟังก์ชัน โดยใช้เทคนิค FT-IR Spectroscopy : (a) ผง ถ่านกัมมันต์; (b) 10 wt% เฟอริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์; (c) 20 wt% เฟอริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์; (d) 30 wt% เฟอริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์; (e) เฟอริกซัลเฟต

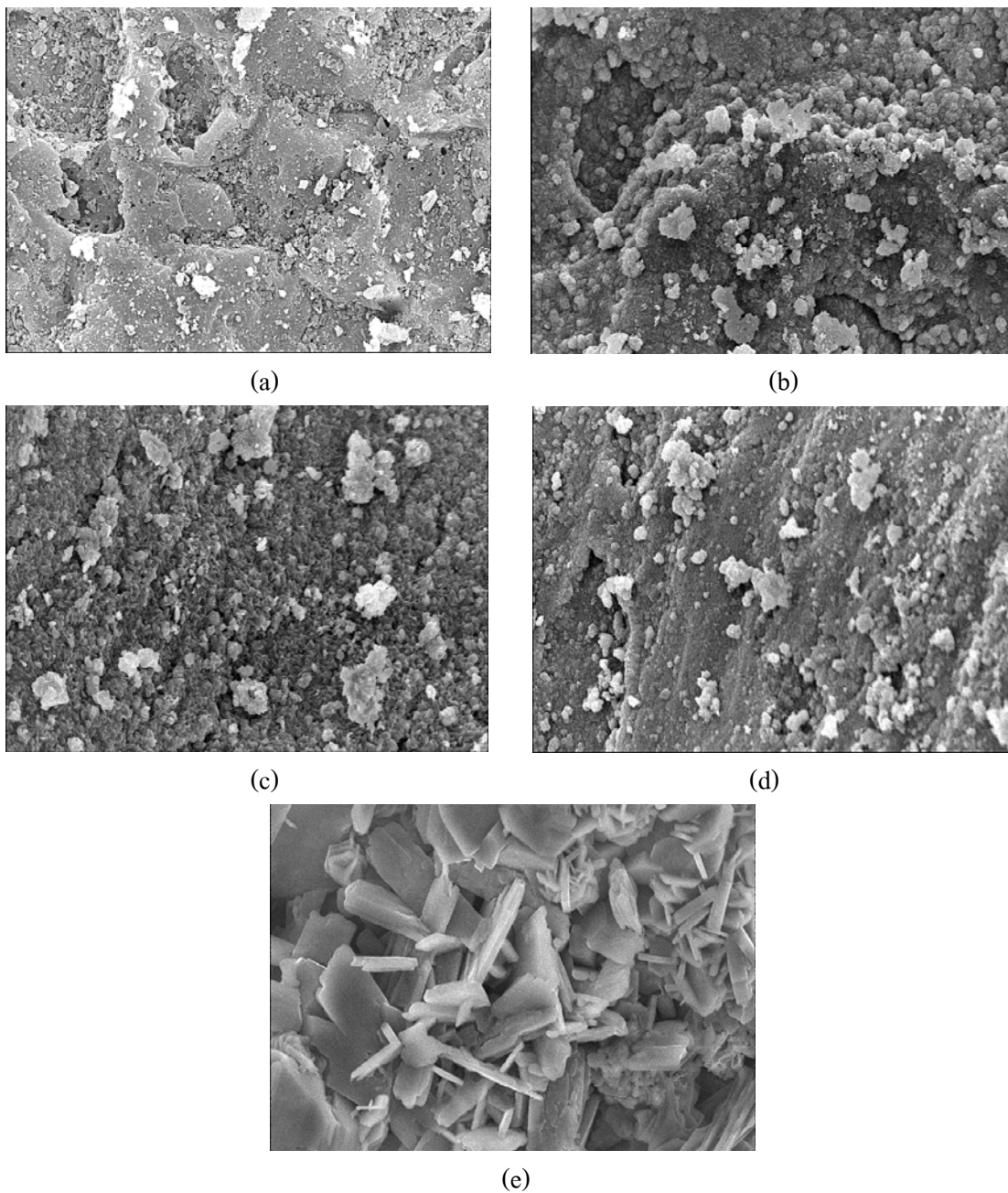
จากภาพประกอบที่ 4.6 แสดงแถบการยืดและการงอของพันธะต่าง ๆ จากผลการทดลองเฟอริกซัลเฟตปรากฏพีกที่ย่านความถี่ $1,012 \text{ cm}^{-1}$ และ $1,094 \text{ cm}^{-1}$ แสดงถึงการยืดของพันธะ S=O จากผลการวิเคราะห์พบว่าพีกที่ปรากฏของเฟอริกซัลเฟตมีความสอดคล้องกับทฤษฎีการแปลความหมาย IR สเปกตรัมของพิมพ์จิต ดามพวรรณ และวัชรินทร์ รุกขไชยศิริกุล (2542) เมื่อทำการ impregnation เฟอริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ที่เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่าง ๆ จะปรากฏพีกที่ย่านความถี่เดียวกัน และเมื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเฟอริกซัลเฟตมีผลให้พีกปรากฏชัดเจนมากยิ่งขึ้น ดังนั้นการทดสอบด้วยเทคนิควิเคราะห์ FT-IR สามารถยืนยันการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเฟอริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ได้

4.1.4 ลักษณะพื้นผิวและการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา

Scanning Electron Microscope (SEM) เป็นกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ใช้ในการศึกษาลักษณะโครงสร้างหรือองค์ประกอบของพื้นผิว จากภาพประกอบที่ 4.7 แสดงลักษณะพื้นผิวของผงถ่านกัมมันต์, 100% น้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์ และ 300% น้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์ (ตามจุด wetness point) ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า พบว่า การ impregnation น้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์ไม่พบอนุภาคใด ๆ มาเกาะบนผงถ่านกัมมันต์ จากภาพประกอบที่ 4.8 แสดงลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาผงถ่านกัมมันต์, 10 wt% เพอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์, 20 wt% เพอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์, 30 wt% เพอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ และเพอร์ริกซัลเฟต ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า พบว่า มีอนุภาคนาขนาดเล็กมาเกาะบนพื้นผิวของผงถ่านกัมมันต์อย่างชัดเจน การเพิ่มเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเพอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ทำให้มีอนุภาคนาขนาดเล็กมาเกาะที่พื้นผิวของผงถ่านกัมมันต์เพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Castro และคณะ (2009) ทำการเตรียมไอรอนออกไซด์ (iron oxide) บนผงถ่านกัมมันต์ และทำการทดสอบคุณลักษณะทางกายภาพของสารประกอบด้วยการถ่ายภาพ SEM พบว่า ที่องค์ประกอบของไอรอนออกไซด์บนผงถ่านกัมมันต์เป็น 1/1 จะพบอนุภาคของไอรอนออกไซด์กระจายได้ดีครอบคลุมพื้นผิวของผงถ่านกัมมันต์ และที่องค์ประกอบของไอรอนออกไซด์บนผงถ่านกัมมันต์เป็น 1/5 พบการกระจายของไอรอนออกไซด์น้อยกว่า



ภาพประกอบที่ 4.7 แสดงลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า : (a) ผงถ่านกัมมันต์; (b) 100% น้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์; (c) 300% น้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์



ภาพประกอบที่ 4.8 แสดงลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เทคนิค SEM กำลังขยาย 1,500 เท่า : (a) ผงถ่านกัมมันต์; (b) 10 wt% เฟอรริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์; (c) 20 wt% เฟอรริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์; (d) 30 wt% เฟอรริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์; (e) เฟอรริกซัลเฟต

4.1.5 พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

BET surface area เป็นการวัดพื้นที่ผิวของอนุภาคในหน่วยของพื้นที่ต่อน้ำหนัก (m^2/g) เทคนิคที่ใช้ทดสอบสำหรับงานวิจัยนี้คือ การดูดซับด้วยก๊าซ ค่าที่ได้จากการทดสอบด้วยเทคนิค BET surface area แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าพื้นที่ผิวของผงถ่านกัมมันต์ และเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	พื้นที่ผิว (m^2/g)
ผงถ่านกัมมันต์	1,184
10 wt% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์	1,062
20 wt% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์	795
30 wt% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์	511

จากข้อมูลที่ได้จากการทดลองหาพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ BET surface area พบว่า การเพิ่มปริมาณของเฟอร์ริกซัลเฟตทำให้มีแนวโน้มการลดลงของพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียม ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Castro และคณะ (2009) ได้ทำการเตรียมไอรอนออกไซด์บนผงถ่านกัมมันต์ พบว่าการ impregnation ด้วยไอรอนออกไซด์ จะลดพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการตกตะกอนไปยังรูพรุนของผงถ่านกัมมันต์ การเพิ่มปริมาณของไอรอนออกไซด์จะส่งผลให้พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง

4.1.6 สรุปผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

จากการศึกษาคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียม พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาน้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์ไม่สามารถยืนยันได้จากการตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพ และเทคนิคการวิเคราะห์ด้วย FT-IR แต่สามารถยืนยันการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ได้จากลักษณะภายนอกคือ มีสีเทาเมื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ จากการตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพและจากการทดสอบด้วยเทคนิคการวิเคราะห์โดยเฉพาะ FT-IR โดยตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิดจะถูกนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันเพื่อผลิตเมทิลเอสเตอร์จากส่วนกลิ่นกรดไขมันปาล์มต่อไป

4.2 การผลิตเมทิลเอสเทอร์จากส่วนกลิ่นกรดไขมันปาล์ม

4.2.1 การศึกษาองค์ประกอบของส่วนกลิ่นกรดไขมันปาล์มที่ใช้ในการผลิตเมทิลเอสเทอร์

ส่วนกลิ่นกรดไขมันปาล์มที่ใช้ในการทดลองนำมาจากบริษัทชุมชนพรอุตสาหกรรม น้ำมันปาล์ม ลักษณะภายนอกที่ปรากฏคือ มีสีเหลืองอ่อน เป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง และมีกลิ่นหอม ลักษณะภายนอกของส่วนกลิ่นกรดไขมันปาล์มแสดงคังภาพประกอบที่ 4.9



ภาพประกอบที่ 4.9 แสดงลักษณะทางกายภาพของส่วนกลิ่นกรดไขมันปาล์ม

ทำการศึกษาองค์ประกอบของส่วนกลิ่นกรดไขมันปาล์มที่ใช้ในการผลิตเมทิลเอสเทอร์โดยใช้เทคนิค TLC-FID ผลการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบของส่วนกลิ่นกรดไขมันปาล์มแสดงคังตารางที่ 4.3 พบว่า องค์ประกอบหลักของส่วนกลิ่นกรดไขมันปาล์ม คือ กรดไขมันอิสระ ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของสินินากู จงคง (2549)

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TLC-FID

องค์ประกอบของส่วน กลั่นกรดไขมันปาล์ม	ร้อยละโดยน้ำหนัก (งานวิจัยนี้)	ร้อยละโดยน้ำหนัก สินิณากู จงกง (2549)
กรดไขมันอิสระ	94.5	93.4
โมนอกลิเซอไรด์	5.5	0.9
ไดกลิเซอไรด์	na	3
ไตรกลิเซอไรด์	na	2.7

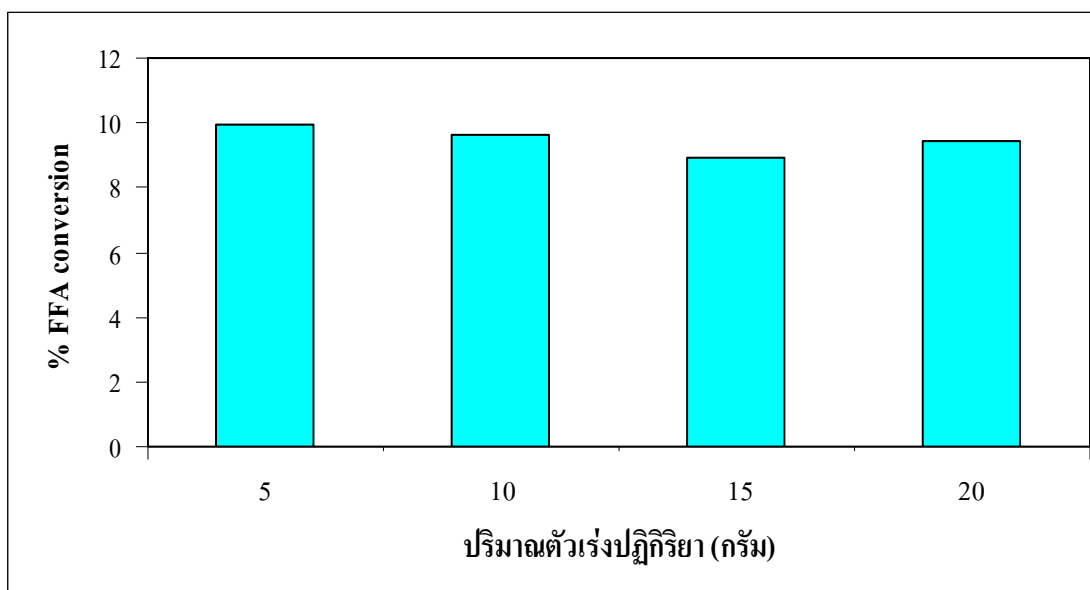
na = not available

4.2.2 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มด้วยวิธีการทดลองแบบแบทช์

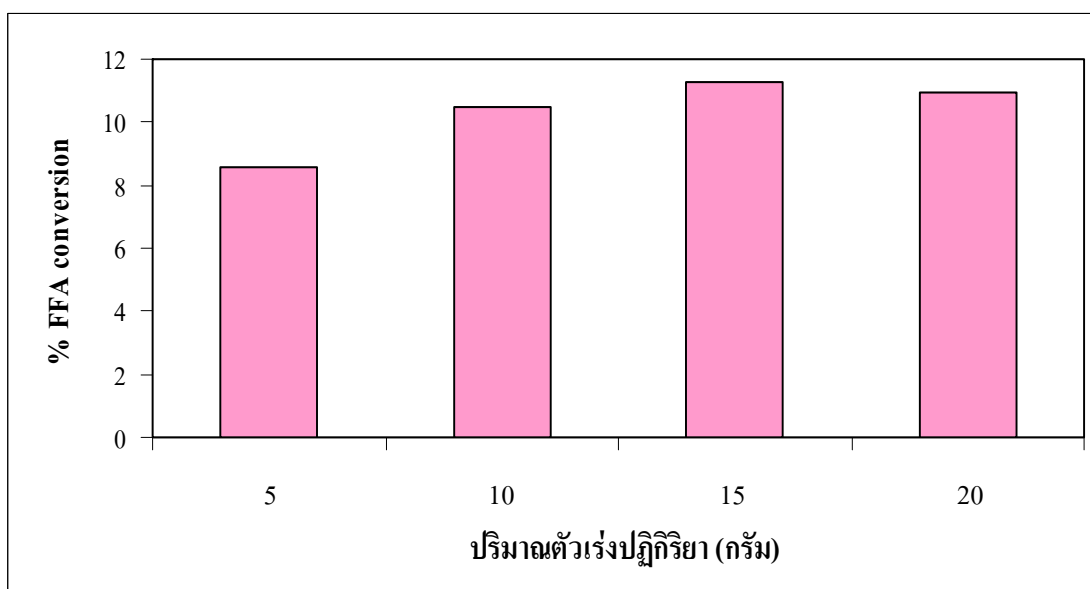
การทดสอบปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน โดยศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์ได้แก่ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา บนผงถ่านกัมมันต์ อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล และเวลาในการทำปฏิกิริยา การทดลองจะทำการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาความเข้มข้นของสารเมื่อสิ้นสุดการทำปฏิกิริยาโดยวิเคราะห์กรดไขมันอิสระด้วยการไตเตรท และเลือกสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระด้วยการไตเตรทกับการวิเคราะห์ด้วย TLC-FID และทำการเปรียบเทียบผลการทดลองกับการใช้กรดซัลฟิวริกบนผงถ่านกัมมันต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สภาวะเดียวกัน

4.2.2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาน้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์

การทดลองเบื้องต้นเพื่อออกแบบการทดลอง ซึ่งสนใจศึกษาในส่วนของน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาและเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์ ทำการทดลองที่สภาวะตัวเร่งปฏิกิริยาน้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์ปริมาณ 5, 10, 15 และ 20 กรัม เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่าง ๆ คือ 100% และ 300% น้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์ (ตามจุด wetness point) อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:12 ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชม. และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงดังภาพประกอบที่ 4.10 และ 4.11

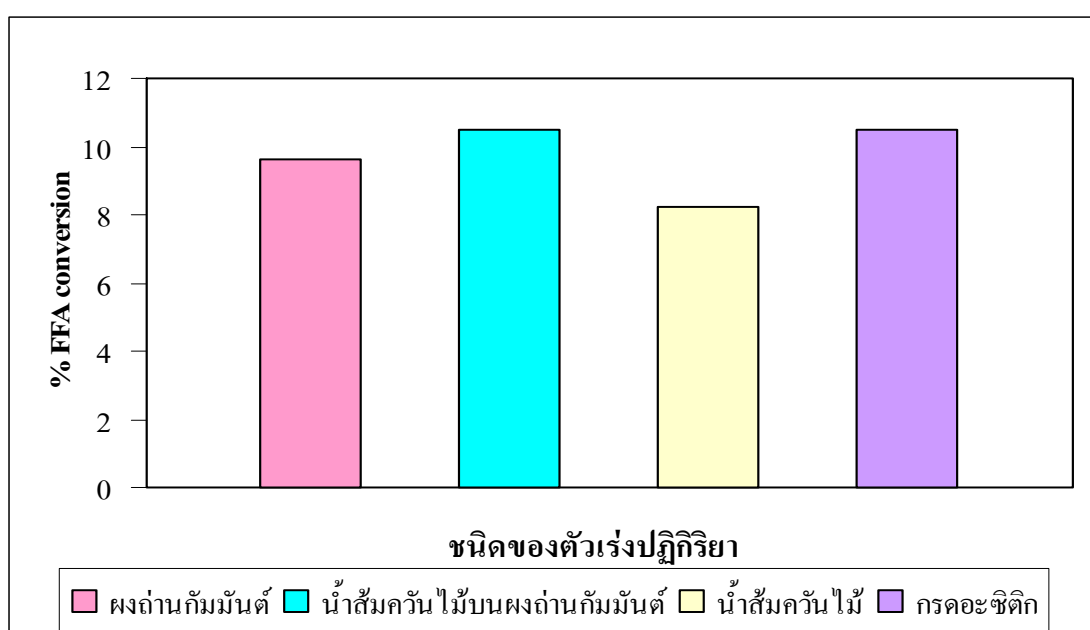


ภาพประกอบที่ 4.10 แสดงผลการศึกษาปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สถานะ : 100% น้ำส้มควันไม้
บนผงถ่านกัมมันต์ อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:12 เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชม. และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส



ภาพประกอบที่ 4.11 แสดงผลการศึกษาปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สถานะ : 300% น้ำส้มควันไม้
บนผงถ่านกัมมันต์ อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:12 เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชม. และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

จากผลการทดลองดังภาพประกอบที่ 4.10 และ 4.11 พบว่า การเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาและเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์ส่งผลให้กรดไขมันอิสระลดลงเล็กน้อย ซึ่งดูได้จาก %conversion ของกรดไขมันอิสระเฉลี่ย ดังนั้นการเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาและเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์จึงไม่ส่งผลให้กรดไขมันอิสระลดลง และเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาน้ำส้มควันไม้ ผงถ่านกัมมันต์ 300% น้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์ และกรดอะซิติก (CH_3COOH) ที่สภาวะการทดลองเดียวกัน โดยเลือกใช้ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 10 กรัม ผลการทดลองแสดงดังภาพประกอบที่ 4.12



ภาพประกอบที่ 4.12 แสดงผลการเปรียบเทียบชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาน้ำส้มควันไม้ ผงถ่านกัมมันต์ น้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์ และกรดอะซิติกที่สภาวะ : ตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณ 10 กรัม อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลับกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:12 เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชม. และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

จากผลการทดลอง พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาน้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์จะส่งผลให้ปริมาณของกรดไขมันอิสระลดลงได้เพียงเล็กน้อยเช่นเดียวกับ น้ำส้มควันไม้ ผงถ่านกัมมันต์ และกรดอะซิติก เนื่องจากน้ำส้มควันไม้มีกรดอะซิติกเป็นองค์ประกอบเพียงร้อยละ 2.7 ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นกรดอ่อน (พูตินันท์ พึ่งวงศ์ญาติ, 2544) เมื่อทำการ impregnation น้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์ จึงทำให้มีปริมาณกรดอะซิติกเหลือเพียงเล็กน้อยบนผงถ่านกัมมันต์ ซึ่งยืนยันผลการ

ทดลองได้จากการตรวจสอบคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคต่าง ๆ คือ XRD, FT-IR และ SEM ไม่พบสัญญาณที่แสดงให้เห็นว่ามีองค์ประกอบของน้ำส้มควันไม้บนผิวด้านกัมมันต์

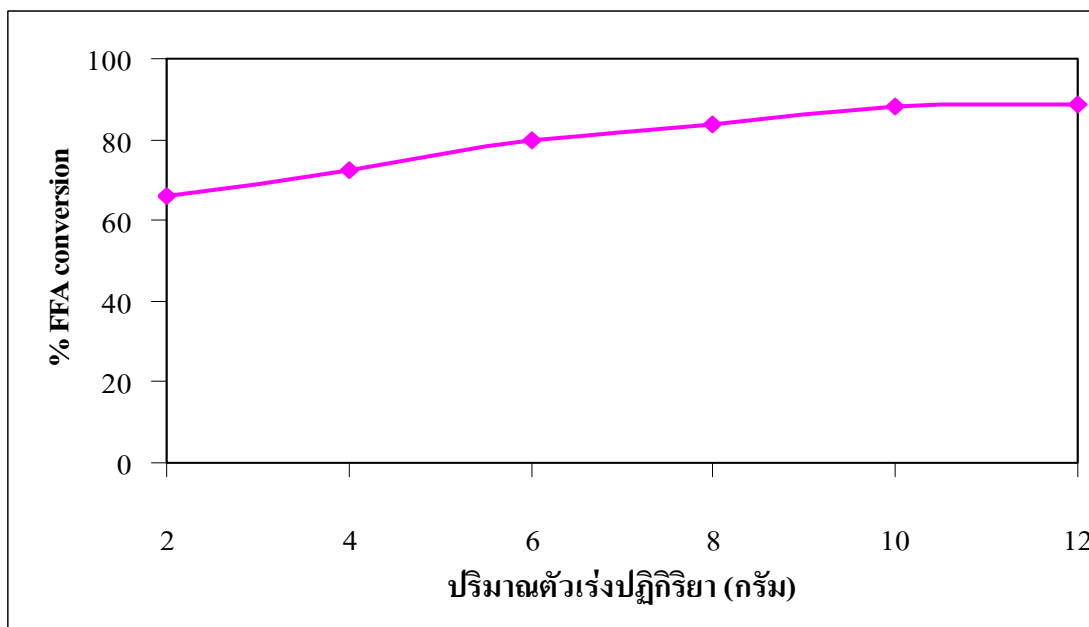
4.2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์ริกซัลเฟตบนผิวด้านกัมมันต์

การทดลองเบื้องต้นเพื่อออกแบบการทดลอง ซึ่งสนใจศึกษาในส่วนของน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทำการทดลองที่สภาวะตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์ริกซัลเฟตบนผิวด้านกัมมันต์ ปริมาณ 2, 4, 6, 8 และ 10 กรัม ใช้ 20 wt% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผิวด้านกัมมันต์ อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:12 เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชม. และทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงดังภาพประกอบที่ ค.1 (ภาคผนวก ค) ผลการศึกษาเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาและอัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอลที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส แสดงดังภาพประกอบที่ ค.2 และ ค.3 ซึ่งที่สภาวะดังกล่าวจะให้ %conversion ของกรดไขมันอิสระเพียง 78.41% จึงได้ทำการปรับเปลี่ยนสภาวะที่ใช้ในการทดลองดังแสดงในตารางที่ ข.1-ข.5 (ภาคผนวก ข) ซึ่งผลการทดลองแสดงดังนี้

1. การศึกษาผลของปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์ริกซัลเฟตบนผิวด้านกัมมันต์

การทดลองหาอิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์ริกซัลเฟตบนผิวด้านกัมมันต์ ทำการทดลองที่สภาวะปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 กรัม โดยใช้ 20 wt% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผิวด้านกัมมันต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:12 เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชม. และอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงดังภาพประกอบที่ 4.13 จากผลการทดลอง พบว่า ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเมทิลเอสเทอร์ โดยการเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ %conversion ของกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้น จากผลการทดลองเมื่อเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาในช่วง 2-10 กรัม พบว่า %conversion ของกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้นจาก 67.14% เป็น 88.21% และจากผลการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 12 กรัม พบว่า จะให้ %conversion ไม่แตกต่างจากผลการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 10 กรัม ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 10 กรัม สามารถลดปริมาณกรดไขมันอิสระได้สูงสุด ซึ่งดูได้จาก %conversion ของกรดไขมันอิสระเฉลี่ย ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Canakci และ Van Gerpen (1999) ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันโดยใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และสอดคล้องกับการทดลองของ Wang และคณะ (2007) ศึกษาการ

ผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้วด้วยกระบวนการผลิตแบบ 2 ขั้นตอน พบว่า การเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาจะส่งผลให้เกิดเอสเทอร์เพิ่มขึ้น

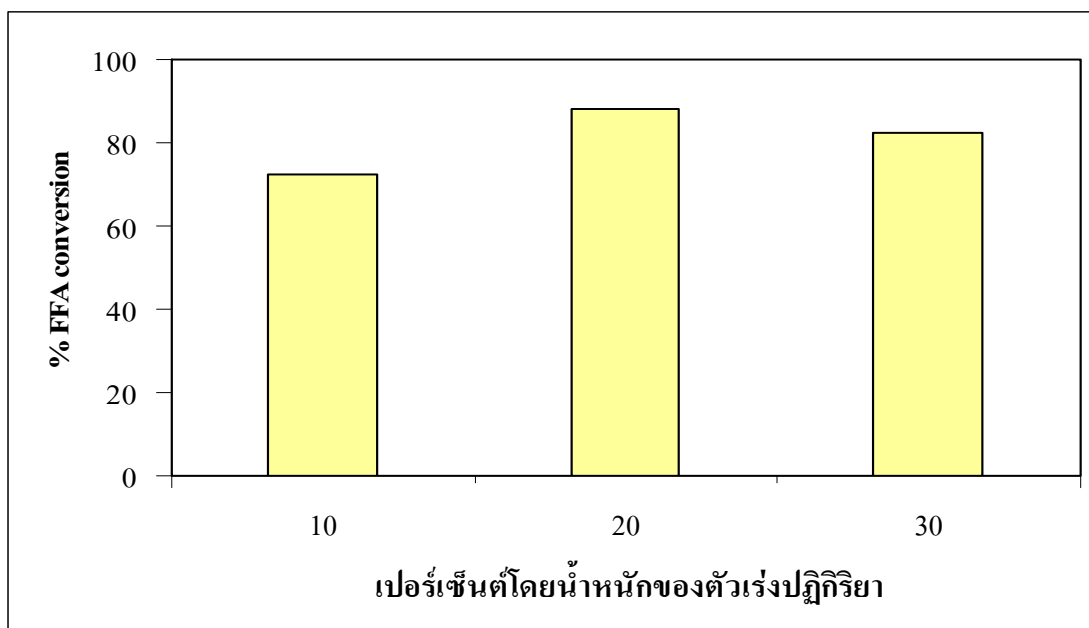


ภาพประกอบที่ 4.13 แสดงผลการศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ที่สภาวะ : ตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ปริมาณ 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 กรัม อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:12 เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชม. และอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส

ดังนั้นในการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มโดยใช้เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจึงเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 10 กรัมในการทดลองลำดับถัดไปเนื่องจากได้ %conversion ของกรดไขมันอิสระเฉลี่ยสูงที่สุด

2. การศึกษาผลของเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์

จากการศึกษาเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ ได้ทำการศึกษาที่สภาวะเดียวกันกับการหาปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำการศึกษาที่สภาวะ เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ที่เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่าง ๆ คือ 10, 20 และ 30 wt% อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:12 เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชม. และอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส โดยเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 10 กรัม จากการทดลองที่ผ่านมา ผลการทดลองแสดงดังภาพประกอบที่ 4.14 พบว่า เมื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ %conversion ของกรดไขมันอิสระจะเพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์จาก 10% เป็น 20% จะส่งผลให้ %conversion ของกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้นจาก 72.24% เป็น 88.21% ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของสุภาวดี เฟ็งคง (2550) ได้ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันสำหรับไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาฟอสโฟทังสเตนแอซิด (HPW) พบว่า เมื่อเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ HPW/Al_2O_3 เพิ่มขึ้น %conversion ของกรดไขมันอิสระก็เพิ่มขึ้นด้วย โดยที่ 30 wt% HPW/Al_2O_3 มีแนวโน้มของ %conversion ของกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้นและได้ %conversion สูงสุดในช่วง 60 นาที และจากผลการทดลอง พบว่า %conversion ของกรดไขมันอิสระลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อใช้ 30 wt% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเป็นผลจากการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา การกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาบนผงถ่านกัมมันต์ ซึ่งที่เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ในปริมาณสูง จะส่งผลให้เกิดการรวมตัวกันของผลึกเป็นผลึกที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งส่งผลให้เกิดการสูญเสียของพื้นที่ผิวกัมมันต์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีขนาดอนุภาคที่เหมาะสมเพื่อให้ได้การกระจายตัวสูงและเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวกัมมันต์



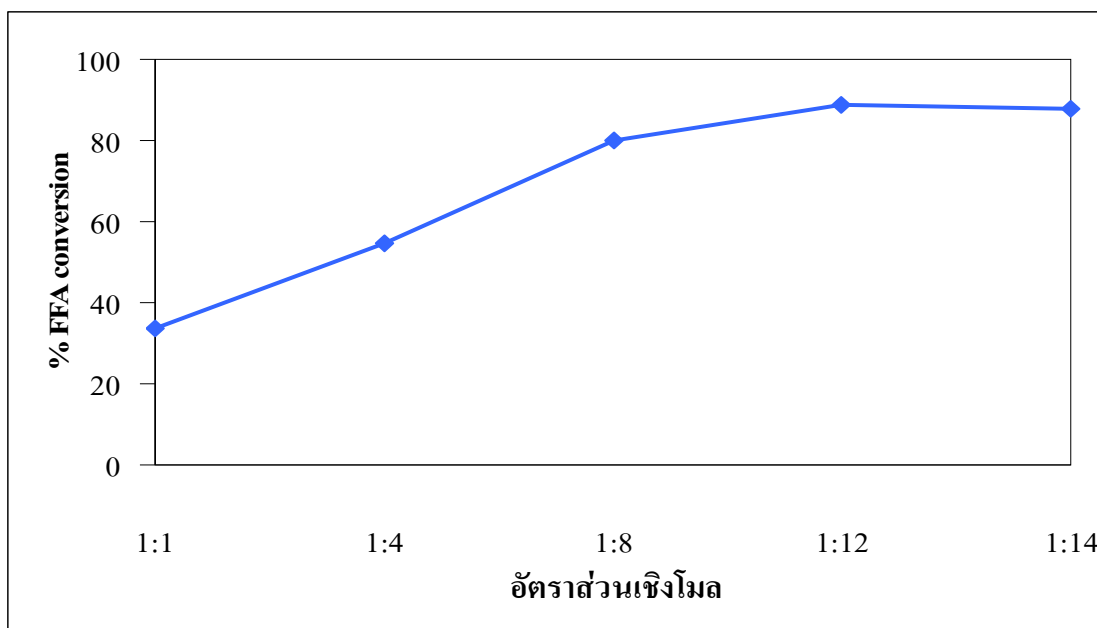
ภาพประกอบที่ 4.14 แสดงผลการศึกษาเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ที่สภาวะ : ตัวเร่งปฏิกิริยา 10, 20 และ 30% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ปริมาณ 10 กรัม อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:12 เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชม. และอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส

ดังนั้นในงานวิจัยนี้สำหรับการศึกษารุ่นต่อไปจึงเลือกใช้ 20 wt% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับทดลองในเงื่อนไขอื่นๆ เพื่อศึกษาสภาวะอื่นๆต่อไป

3. การศึกษาผลของอัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล

การทดลองเพื่อหาอิทธิพลของอัตราส่วนเชิงโมลของเมทานอลที่เหมาะสม ได้ทำการทดลองที่สภาวะอัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอลที่ 1:1, 1:4, 1:8, 1:12 และ 1:14 เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชม. และอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส โดยเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ปริมาณ 10 กรัม ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.15 พบว่า ที่อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:12 ได้ %conversion ของกรดไขมันอิสระเฉลี่ยสูงสุดเป็น 88.21% เมื่อเพิ่มอัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:14 พบว่า ให้ %conversion ใกล้เคียงกับการใช้อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:12 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Chongkhong และคณะ (2007) ได้ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันจากส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์ม ที่สภาวะตัวเร่งปฏิกิริยากรดซัลฟิว 1.834 wt% เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 ชม. อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และที่อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอลต่าง ๆ ดังนี้คือ 0.4:1-12:1 พบว่า ที่อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอลเป็น 1:4.3 เหมาะสมต่อปฏิกิริยา และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มมากกว่า 1:4.3 จะไม่ส่งผลต่อการเกิดเมทิลเอสเตอร์เพิ่มขึ้น

จากทฤษฎีปริมาณสัมพันธ์ของปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน ต้องการแอลกอฮอล์ 1 โมล ทำปฏิกิริยากับกรดไขมัน 1 โมล โดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้ได้เอสเตอร์ของกรดไขมัน 1 โมล กับน้ำ 1 โมล แต่ในทางปฏิบัติพบว่า ปฏิกิริยาเคลื่อนย้ายหมู่เอสเตอร์สามารถผันกลับได้ ดังนั้นเพื่อให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้าจึงต้องใช้แอลกอฮอล์มากเกินไปเพื่อผลักดันให้ปฏิกิริยาไปข้างหน้า ซึ่งการใช้อัตราส่วนเชิงโมลสูงกว่า 1 โมลของแอลกอฮอล์จะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์มากขึ้น (Yujaroen et al., 2009)

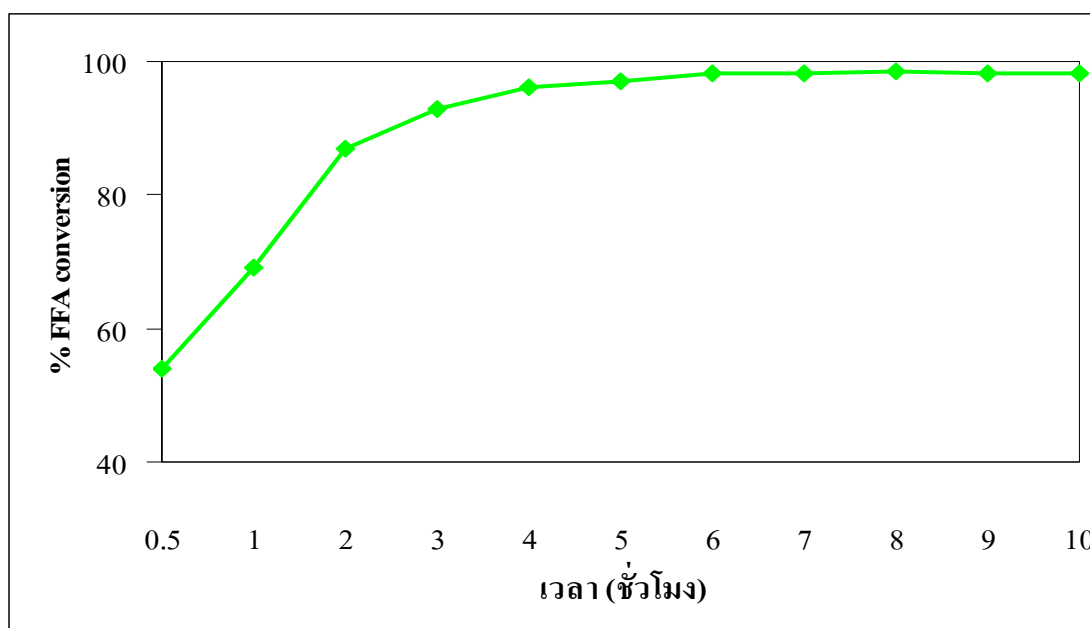


ภาพประกอบที่ 4.15 แสดงผลการศึกษาอัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอลที่สภาวะ : ตัวเร่งปฏิกิริยา 20% เฟอริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ ปริมาณ 10 กรัม อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอลที่ 1:1, 1:4, 1:8, 1:12 และ 1:14 เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชม. และอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส

ดังนั้นในการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มโดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:12 จึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากเป็นอัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอลที่ทำให้ %conversion ของกรดไขมันอิสระสูงสุดเป็น 88.21% ดังนั้นที่อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:12 จึงถูกนำไปใช้ในการทดลองขั้นตอนต่อไป

4. การศึกษาผลของเวลาในการทำปฏิกิริยา

การศึกษาอิทธิพลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต่อการเกิดเมทิลเอสเทอร์โดยดูจากการเปลี่ยนแปลง %conversion ของกรดไขมันอิสระ พบว่า การเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาทำให้แนวโน้ม %conversion ของกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้น เมื่อทำการทดลองที่สภาวะตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt% เฟอริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ปริมาณ 10 กรัม อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:12 อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาที่ต่าง ๆ กัน คือ 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 ชม. ผลการทดลองแสดงดังภาพประกอบที่ 4.16 พบว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาจาก 0.5-6 ชม. %conversion ของกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้นจาก 54% เป็น 98.20% และที่เวลาในการทำปฏิกิริยามากกว่า 6 ชม. พบว่า แนวโน้มของ %conversion ของกรดไขมันอิสระเริ่มคงที่ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Canakci และ Van Gerpen (1999) ได้ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยทำการศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 48 และ 96 ชม. พบว่าการเปลี่ยนแปลงเอสเทอร์จะเพิ่มขึ้นจาก 87.8% เป็น 95.1% เมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาจาก 48 ชม. เป็น 96 ชม. เช่นเดียวการทดลองของ Wang และคณะ (2007) ซึ่งศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้วด้วยกระบวนการผลิตแบบ 2 ขั้นตอน ซึ่งในขั้นตอนแรกใช้เฟอริกซัลเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อลดปริมาณกรดไขมันอิสระในวัตถุดิบ โดยทำการศึกษาผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาในช่วง 0-4 ชม. พบว่า 85% ของกรดไขมันอิสระเปลี่ยนไปเป็นเมทิลเอสเทอร์ภายในเวลา 30 นาที และที่เวลา 0.5-2 ชม. พบว่า %conversion ของกรดไขมันอิสระเปลี่ยนเป็น 95% และเริ่มคงที่หลังจากใช้เวลาในการทำปฏิกิริยามากกว่า 2 ชม. และจากผลการทดลองของ Chongkhong และคณะ (2007) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มซึ่งเป็นวัตถุดิบที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระสูง 93 wt% โดยใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส พบว่า เปอร์เซ็นต์การเกิดเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการทดลอง อย่างไรก็ตาม Chongkhong และคณะ (2007) พบว่าเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามากกว่า 90 นาที ทำให้การเกิดเมทิลเอสเทอร์มีแนวโน้มคงที่



ภาพประกอบที่ 4.16 แสดงผลการศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยาที่สภาวะ : ตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ปริมาณ 10 กรัม อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:12 เวลาในการทำปฏิกิริยา 0.5-10 ชม. และอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 6 ชม. จึงเหมาะสมที่สุดเนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่ทำให้ %conversion ของกรดไขมันอิสระสูงสุดเท่ากับ 98.20%

5. สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองแบบเบทซ์

จากผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยใช้เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบเบทซ์ แสดงดังตารางที่ 4.4 ซึ่งเป็นสภาวะที่ทำให้ %conversion ของกรดไขมันอิสระสูงสุดเท่ากับ 98.20% ซึ่งจะนำสภาวะดังกล่าวไปศึกษาต่อในการทดลองขั้นตอนต่อไปคือ การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์กับกรดซัลฟิวริกบนผงถ่านกัมมันต์ที่สภาวะเดียวกัน การศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการนำกลับมาใช้ซ้ำ การผลิตเมทิลเอสเทอร์ด้วยกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง และการทดสอบคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้ตามมาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงานต่อไป

ตารางที่ 4.4 แสดงสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลอง

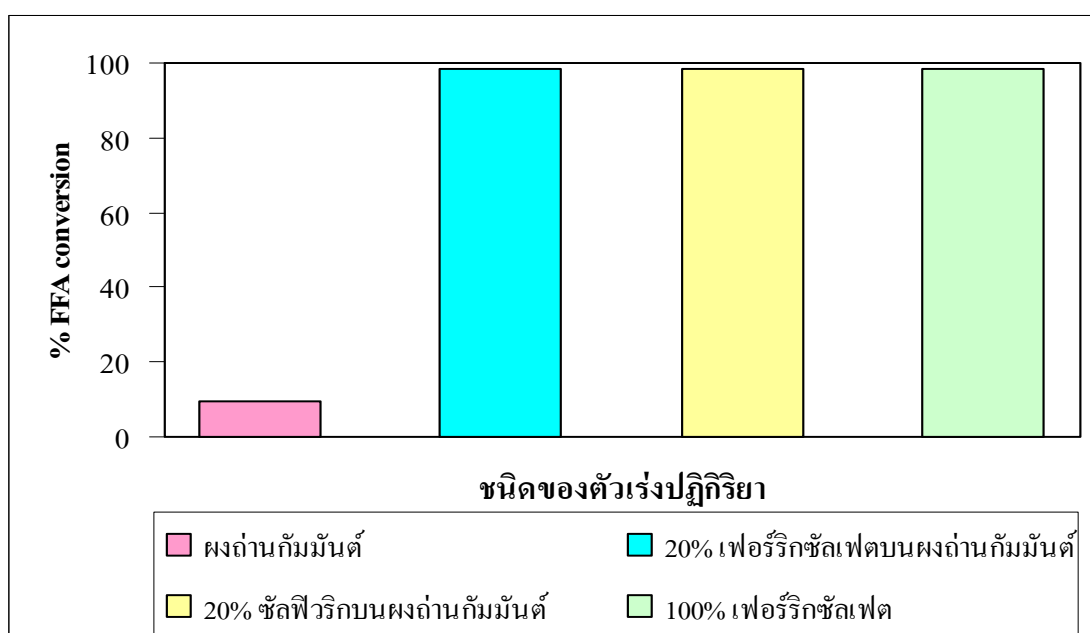
ตัวเร่งปฏิกิริยา (g/25g PFAD)	เฟอร์ริกซัลเฟตบนผง ถ่านกัมมันต์ (wt%)	อัตราส่วนเชิงโมล (PFAD /CH ₃ OH)	เวลาในการทำ ปฏิกิริยา(ชม.)	อุณหภูมิ (°C)
10	20	1:12	6	95

6. ผลการศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิผลของตัวเร่งปฏิกิริยา

การผลิตเมทิลเอสเทอร์ด้วยปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน โดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนใหญ่นิยมใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากมีราคาถูก สามารถเกิดปฏิกิริยาได้เร็ว ได้ผลิตภัณฑ์ที่ให้ %yield สูง แต่ข้อเสียของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้คือ การกัดกร่อนของอุปกรณ์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้ต้องผ่านกระบวนการล้างด้วยน้ำเพื่อให้มีฤทธิ์เป็นกลาง ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาน้ำเสียตามมา ในปัจจุบันประเทศพัฒนาแล้วหลายประเทศทั่วโลกกำลังทำการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็งขึ้นเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาในการแยกผลิตภัณฑ์ และยังสามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดของแข็งโดยใช้เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ และทำการเปรียบเทียบประสิทธิผลกับกรดซัลฟิวริกบนผงถ่านกัมมันต์ที่สภาวะเดียวกัน

การศึกษากการเปรียบเทียบประสิทธิผลของตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์และกรดซัลฟิวริกบนผงถ่านกัมมันต์ ที่สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองแบบแบทช์คือ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 10 กรัม อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:12 เวลาในการทำปฏิกิริยา 6 ชม. และอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงดังภาพประกอบที่ 4.17 จากการเปรียบเทียบประสิทธิผลของตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า เมื่อใช้ผงถ่านกัมมันต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะให้ %conversion ของกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์จะให้ %conversion ของกรดไขมันอิสระเฉลี่ยเป็น 98.20% เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt% กรดซัลฟิวริกบนผงถ่านกัมมันต์จะให้ %conversion ของกรดไขมันอิสระเฉลี่ยเป็น 98.30% และเมื่อใช้ 100 wt% เฟอร์ริกซัลเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะให้ %conversion ของกรดไขมันอิสระเฉลี่ยเป็น 98.30% ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าที่สภาวะปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 10 กรัม อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:12 เวลาในการทำปฏิกิริยา 6 ชม. และอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ ตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt% ซัลฟิวริกบนผงถ่านกัมมันต์ และ 100 wt% เฟอร์ริกซัลเฟต สามารถให้ผลผลิตของเมทิลเอสเทอร์ได้เท่ากัน ดังนั้นการเลือกใช้ตัวเร่ง

ปฏิกิริยา 20 wt% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์เป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งมีข้อดีหลายอย่าง คือ ตัวเร่งปฏิกิริยามีราคาถูก ไม่กัดกร่อนอุปกรณ์ สามารถแยกออกจากปฏิกิริยาได้ง่าย ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เป็นต้น



ภาพประกอบที่ 4.17 แสดงผลการศึกษการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา ; ผงถ่านกัมมันต์, 20 wt% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์, 20 wt% ซัลฟิวริกบนผงถ่านกัมมันต์ และ 100 wt% เฟอร์ริกซัลเฟต ที่สภาวะ : ตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 10 กรัม อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:12 เวลาในการทำปฏิกิริยา 6 ชม. และอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส

ลักษณะของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มที่สภาวะตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 10 กรัม อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:12 เวลาในการทำปฏิกิริยา 6 ชม. และอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลอง เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรดซัลฟิวริกบนผงถ่านกัมมันต์ พบว่า มีลักษณะสีส้มค่อนข้างคล้ำ แสดงถึงภาพประกอบที่ 4.18 ซึ่งแตกต่างจากไบโอดีเซลที่ผลิตด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์จะมีสีส้ม ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับการทดลองของสินินาฏ จงคง (2549) พบว่าการผลิตไบโอดีเซลจากส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มโดยใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงจะให้สีของผลิตภัณฑ์ค่อนข้างคล้ำ และการทดลองของสุภามิต ชุกกลิ่น (2547) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดคางพาราโดยใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่ามีลักษณะสีดำคล้ำเช่นเดียวกัน



ภาพประกอบที่ 4.18 แสดงลักษณะของน้ำมันไบโอดีเซล : (a) น้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตจากกรดซัลฟิวริกบนผงถ่านกัมมันต์; (b) น้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตจากเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์

4.2.3 การวิเคราะห์หองค์ประกอบของเมทิลเอสเทอร์ด้วย TLC-FID

การวิเคราะห์หองค์ประกอบของเมทิลเอสเทอร์ที่เตรียมได้จากสภาวะการทดลองแบบแบทช์ คือ ตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt% เฟอริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ปริมาณ 10 กรัม อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:12 เวลาในการทำปฏิกิริยา 6 ชม. และอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองด้วย TLC-FID ผลการวิเคราะห์หองค์ประกอบเมทิลเอสเทอร์ของไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์หองค์ประกอบของเมทิลเอสเทอร์ด้วยการไตเตรทกับการวิเคราะห์ด้วย TLC-FID

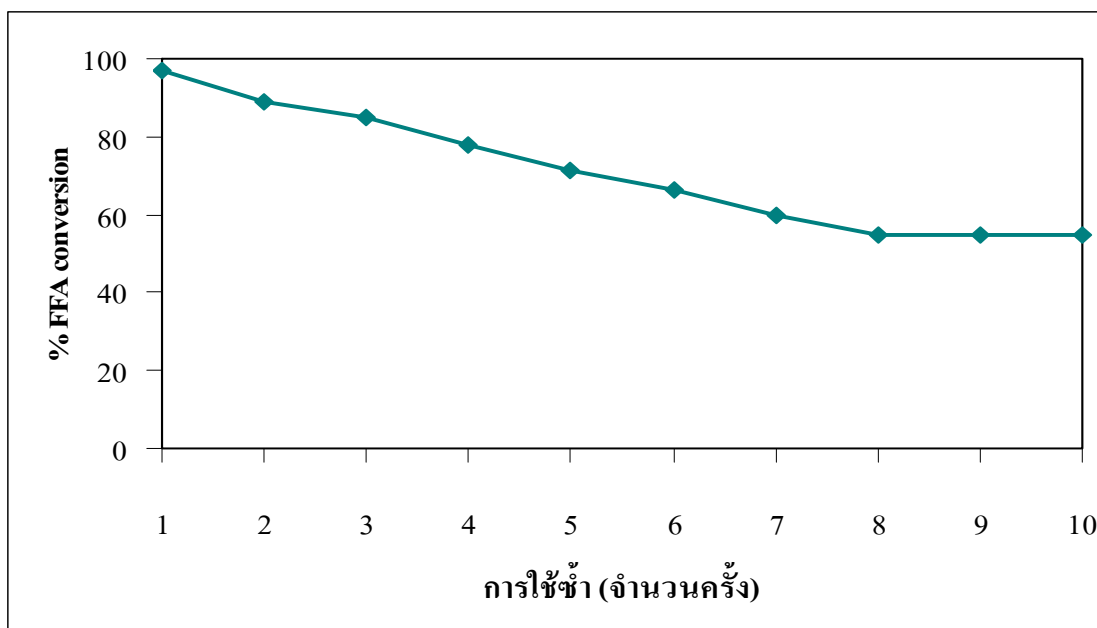
องค์ประกอบของเมทิลเอสเทอร์	ร้อยละโดยน้ำหนัก	
	TLC	การไตเตรท
กรดไขมันอิสระ	1.04	1.64
โมนอกลิเซอไรด์	na	na
ไดกลีเซอไรด์	1.07	na
ไตรกลีเซอไรด์	na	na
% FFA Conversion (FAME)	97.89	98.20

na = not available

จากการวิเคราะห์หองค์ประกอบของเมทิลเอสเทอร์โดยการวิเคราะห์ด้วย TLC-FID พบว่า %conversion ของกรดไขมันอิสระเฉลี่ยมีค่าใกล้เคียงกับการไตเตรท และจากผลการวิเคราะห์หองค์ประกอบของเมทิลเอสเทอร์ด้วย TLC-FID พบว่า มีไดกลีเซอไรด์เป็นองค์ประกอบ 1.07% แต่ผลการวิเคราะห์ด้วย TLC-FID ของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มไม่พบไดกลีเซอไรด์เป็นองค์ประกอบ แต่พบว่ามีโมนอกลิเซอไรด์เป็นองค์ประกอบ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการสุ่มตัวอย่างไปทดสอบโดยส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มอาจจะไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกันจึงส่งผลให้ตรวจพบไดกลีเซอไรด์ในเมทิลเอสเทอร์แต่ไม่พบในส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์ม

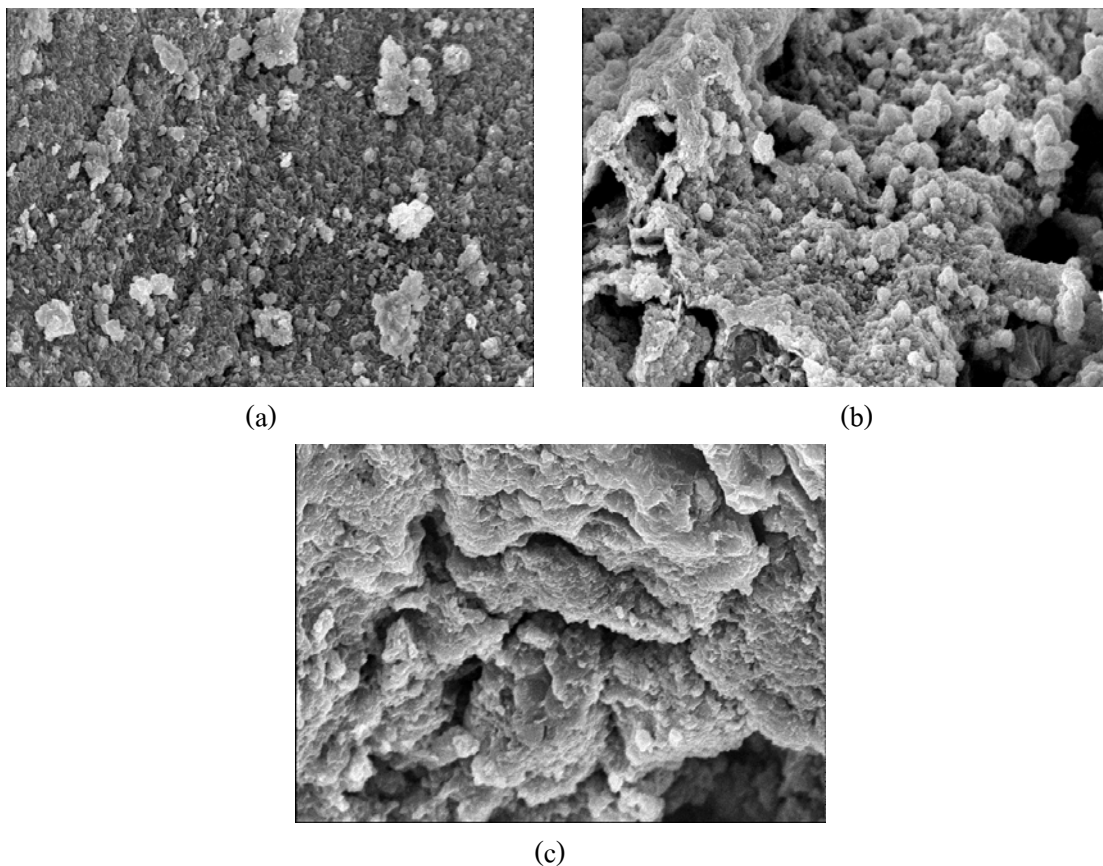
4.2.4 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการนำกลับมาใช้ซ้ำ

การศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการนำกลับมาใช้ซ้ำภายใต้สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองแบบแบทช์ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.19 ได้ทำการทดลองที่สภาวะตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ปริมาณ 10 กรัม อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:12 เวลาในการทำปฏิกิริยา 6 ชม. และอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ซ้ำประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาจะลดลงตามจำนวนครั้งของการใช้ซ้ำ โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำในครั้งที่ 1-3 จะให้ %conversion ของกรดไขมันอิสระเฉลี่ยเป็น 96.91%, 88.79% และ 85.48% ตามลำดับ แต่การนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ซ้ำครั้งที่ 4 และ 5 ผลผลิตที่ได้จะมีส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มบางส่วนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาตกตะกอนเป็นของแข็ง และการนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ซ้ำในครั้งที่ 6-10 ลักษณะของผลิตภัณฑ์จะเป็นของแข็งแต่ %conversion ของกรดไขมันอิสระเฉลี่ยลดลง และ %conversion ของกรดไขมันอิสระเฉลี่ยเริ่มคงที่ เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ซ้ำครั้งที่ 8 ให้ %conversion ของกรดไขมันอิสระเฉลี่ย 54.77% จากทฤษฎีได้กล่าวไว้ว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาเมื่อทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาแล้วจะยังคงสภาพเดิมโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลง และพร้อมที่จะทำปฏิกิริยาได้ต่อไปเรื่อย ๆ แต่ในความเป็นจริงแล้วตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ได้คงสภาพเช่นนั้นตลอด โดยความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาจะลดลงตามเวลา ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของตัวเร่งปฏิกิริยานี้เกิดจากสภาวะสิ่งแวดล้อมของระบบ จึงต้องมีการเปลี่ยนถ่ายตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นระยะ (จตุพร วิทยาคูณ และนุรักษ์ กฤษดานุรักษ์, 2547) ซึ่งจากผลการทดลองมีความสอดคล้องการทดลองของ Marchatti และคณะ (2007) ได้ศึกษาการใช้ซ้ำของเรซินเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันของน้ำมันใช้แล้ว ซึ่งจำลองโดยการผสมน้ำมันเมล็ดทานตะวัน 90% กับกรดโอเลอิก 10% ศึกษาที่สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลอง พบว่า เมื่อนำเรซินมาใช้ซ้ำครั้งที่ 2, 3 และ 4 จะให้ %conversion ลดลงต่ำกว่า 25%



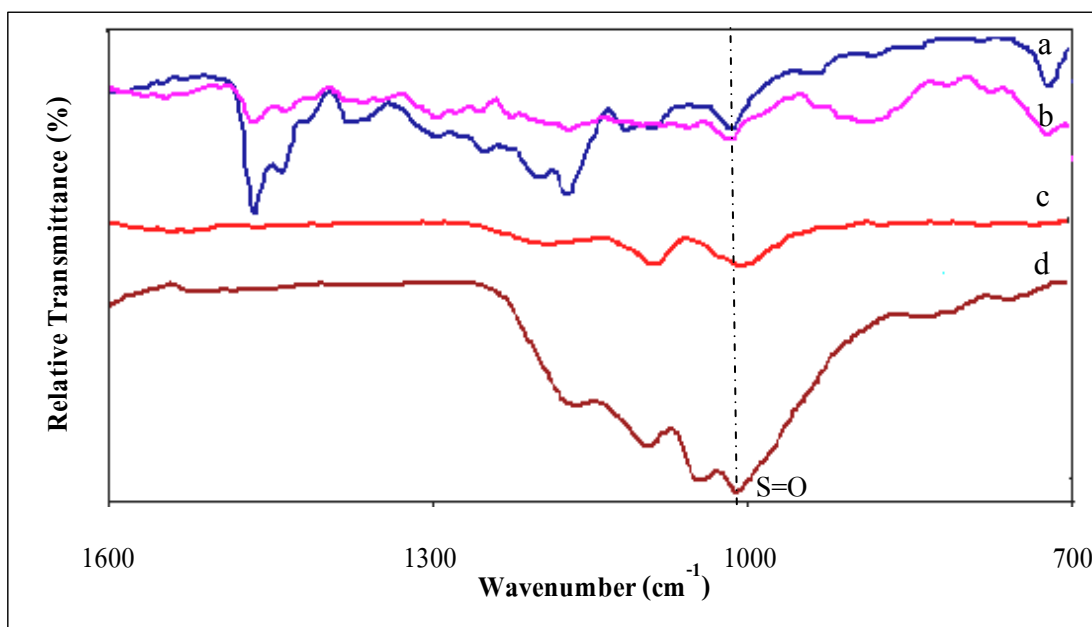
ภาพประกอบที่ 4.19 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการนำกลับมาใช้ซ้ำ ที่สถานะ : ตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ปริมาณ 10 กรัม อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:12 เวลาในการทำปฏิกิริยา 6 ชม. และอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส

เมื่อทำการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาหลังจากการนำกลับมาใช้ซ้ำโดยการถ่ายภาพ SEM ที่กำลังขยายเดียวกัน ซึ่งได้ทำการสุ่มตัวอย่างตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการใช้ซ้ำครั้งที่ 5 และ 10 มาตรวจสอบ ผลการทดสอบแสดงดังภาพประกอบที่ 4.20 พบว่า การนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ซ้ำในครั้งที่ 5 และ 10 อนุภาคขนาดเล็กที่เกาะบนผงถ่านกัมมันต์จะมีปริมาณลดลงตามลำดับ และคาดว่าจะมีส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มบางส่วนมาเคลือบที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อทำการเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน ซึ่งสังเกตได้ว่ามีอนุภาคขนาดเล็กมาเกาะได้อย่างชัดเจน ด้วยเหตุนี้จากการทดสอบด้วยการถ่ายภาพ SEM จึงแสดงให้เห็นได้ชัดเจนว่าตัวเร่งปฏิกิริยาบางส่วนมีการหลุดไปกับผลิตภัณฑ์ในขณะที่ทำปฏิกิริยาและบางส่วนถูกเคลือบด้วยส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์ม ดังนั้นเมื่อจำนวนครั้งของการใช้ซ้ำเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงตามลำดับ



ภาพประกอบที่ 4.20 แสดงลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเมื่อนำกลับมาใช้ซ้ำโดยใช้เทคนิค SEM กำลังขยาย 1500 เท่า : (a) ตัวเร่งปฏิกิริยาใหม่; (b) ตัวเร่งปฏิกิริยาใช้ซ้ำครั้งที่ 5; (c) ตัวเร่งปฏิกิริยาใช้ซ้ำครั้งที่ 10

เมื่อทำการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการใช้ซ้ำด้วย FT-IR ผลการทดลองแสดงดังภาพประกอบที่ 4.21 พบหมู่ฟังก์ชัน S=O ที่ย่านความถี่ $1,015\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งปรากฏพิกลขนาดเล็ก เมื่อเปรียบเทียบกับพีคของเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ (กราฟ c) และเฟอร์ริกซัลเฟต (กราฟ d) ซึ่งปรากฏที่ย่านความถี่ $1,012\text{ cm}^{-1}$ จากการตรวจสอบด้วย FT-IR สามารถยืนยันการลดลงของเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ได้ จึงมีความเป็นไปได้ว่ามีเฟอร์ริกซัลเฟตบางส่วนหลุดไปในระหว่างทำปฏิกิริยา



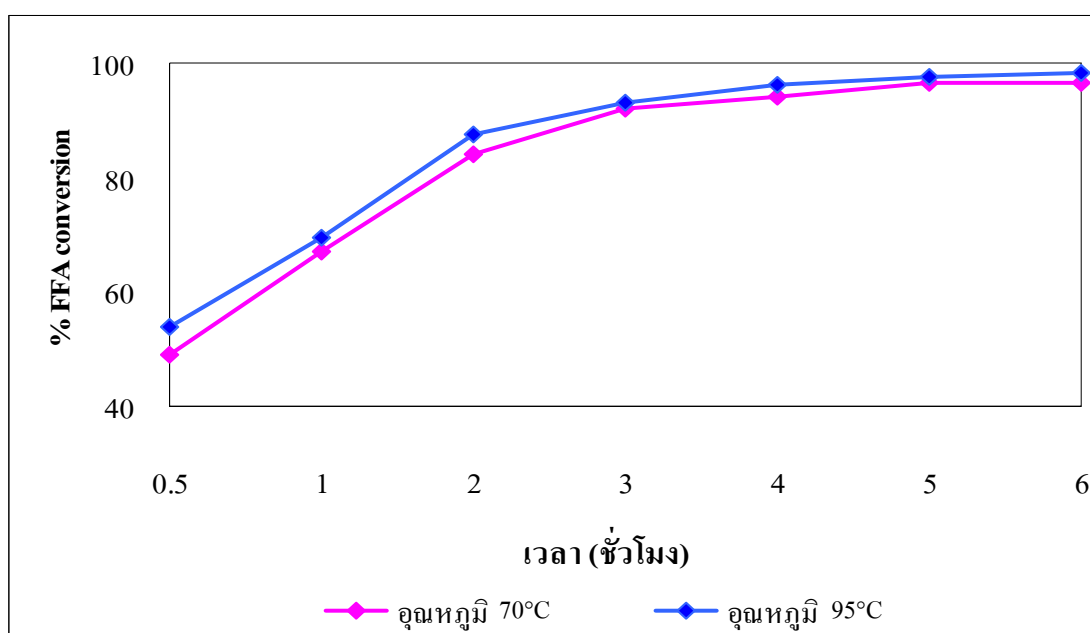
ภาพประกอบที่ 4.21 แสดงหมู่ฟังก์ชัน โดยใช้เทคนิค FT-IR Spectroscopy ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการใช้ซ้ำ : (a) ตัวเร่งปฏิกิริยาใช้ซ้ำครั้งที่ 5; (b) ตัวเร่งปฏิกิริยาใช้ซ้ำครั้งที่ 10; (c) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน; (d) เฟอร์ริกซัลเฟต

4.2.5 การศึกษาการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มด้วยกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง

4.2.5.1 การศึกษาสถานะที่จะนำไปใช้ในกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง

การศึกษาสถานะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มในชุดการทดลองแบบแบทช์ ได้สถานะที่เหมาะสมจากการทดลอง คือ ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ปริมาณ 10 กรัม อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:12 เวลาในการทำปฏิกิริยา 6 ชม. และอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มด้วยกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง จึงนำสถานะที่ศึกษาได้จากชุดการทดลองแบบแบทช์มาประยุกต์ใช้กับกระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์แบบต่อเนื่องด้วยถังปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง แต่จากการทดลองเบื้องต้นที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 95 องศาเซลเซียส พบว่าให้ %conversion ของกรดไขมันอิสระเฉลี่ยต่ำ จึงไม่สามารถดำเนินการได้เนื่องจากความไม่เหมาะสมของอุปกรณ์ เพราะที่อุณหภูมิสูงจะทำให้มีการระเหยของเมทานอลมากขึ้น ปฏิกิริยาจึงเกิดไม่สมบูรณ์ ด้วยข้อคำนึงถึงอัตราการระเหยของเมทานอล ดังนั้นจึงได้ทำการปรับลดอุณหภูมิในการทดลองเป็น 70 องศาเซลเซียส เพื่อ

ลดอัตราการระเหยเมทานอลออกจากระบบ จึงได้ทำการเปรียบเทียบอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และ 95 องศาเซลเซียส ในชุดอุปกรณ์การทดลองแบบเบทซ์ ซึ่งผลการทดลองแสดงดังภาพประกอบที่ 4.22



ภาพประกอบที่ 4.22 เปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์ที่สภาวะ : ตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ปริมาณ 10 กรัม อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:12 เวลาในการทำปฏิกิริยา 6 ชม. อุณหภูมิ 70 และ 95 องศาเซลเซียส

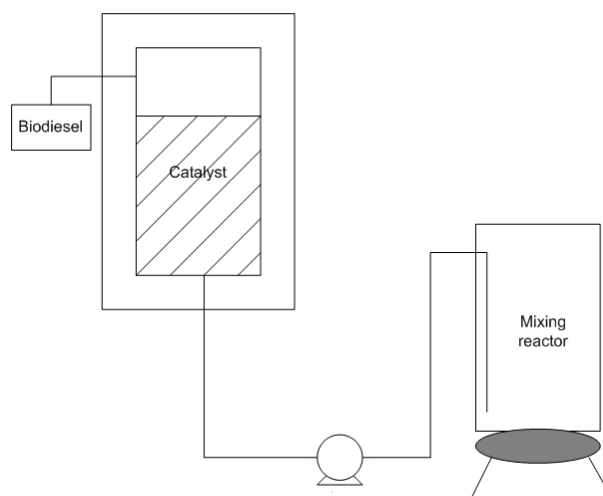
จากผลการทดลองที่แสดงดังภาพประกอบที่ 4.22 พบว่า การผลิตเมทิลเอสเทอร์ที่อุณหภูมิ 70 และ 95 องศาเซลเซียส ที่สภาวะเดียวกัน จะให้ผลการทดลองที่มีแนวโน้มไปทิศทางเดียวกัน โดย %conversion ของกรดไขมันอิสระเฉลี่ยที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส มีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ จากผลการทดลองที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 6 ชม. จะให้ %conversion ของกรดไขมันอิสระเฉลี่ย 96.70% ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส และจากการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์พบว่ามีความสอดคล้องกับการทดลองของ Canakci และ Van Gerpe (1999) ได้ทำการศึกษาการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มที่มีกรดไขมันสูงในระดับโรงงานนาร่อง โดยทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชันด้วยกรดซัลฟิวริกเป็น

ตัวเร่งปฏิกิริยา ทำการทดลองที่อุณหภูมิต่าง ๆ กันคือ 25, 40 และ 60 องศาเซลเซียส พบว่า การเกิดเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับการทดลองของ Crabbe และคณะ (2001) ได้ทำการศึกษาการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มดิบ โดยพิจารณาอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่ 70, 80 และ 95 องศาเซลเซียส อัตราส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 40:1 ใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา 5 wt% พบว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส จะให้ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์สูงสุด 99.7% เมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 9 ชม. และการทดลองของสินินาญ จงคง (2549) ศึกษาการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มในกระบวนการผลิตแบบกะ โดยศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์ซึ่งจะพิจารณาที่อุณหภูมิ 70, 80, 90 และ 100 องศาเซลเซียส ที่สภาวะอัตราส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์ม 3.8:1, 4.7:1 และ 5.9:1 ใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 1 wt% เป็นเวลา 2 ชม. พบว่า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะส่งผลให้เมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นโดยที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จะให้ผลผลิตของเมทิลเอสเทอร์สูงที่สุด

อย่างไรก็ตาม การทดลองที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ไม่สามารถดำเนินการได้เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ เพื่อลดอัตราการระเหยของเมทานอลจึงเลือกทำการทดลองที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ในกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องด้วยถังปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง

4.2.5.2 ผลการศึกษาการผลิตเมทิลเอสเทอร์ด้วยกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง

การผลิตเมทิลเอสเทอร์จากส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มด้วยกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องในถังปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง อุปกรณ์การทดลองแสดงดังภาพประกอบที่ 4.23 สภาวะที่ทำการศึกษาคือ ตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ปริมาณ 500 กรัมบรรจุในถังปฏิกรณ์ซึ่งแสดงดังภาพประกอบที่ 3.2 และ 3.3 อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:12 เวลาในการทำปฏิกิริยา 6 ชม. และอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.6 และ 4.7



ภาพประกอบที่ 4.23 ไคอะแกรมการผลิตเมทิลเอสเทอร์แบบต่อเนื่อง

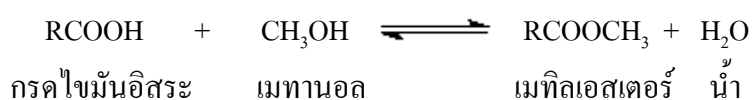
ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ของไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากการทดลอง

วนรอบที่ (2 ชม./รอบ)	เมทิลเอสเทอร์ (%) โดย TLC
1	56.6
2	81.70
3	90.74

ตารางที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระ (FFA) ด้วยการไตเตรทกับการวิเคราะห์ด้วย TLC

วนรอบที่ (2 ชม./รอบ)	FFA (%)	
	TLC	การไตเตรท
1	18.02	19.45
2	11.02	10.00
3	6.24	7.54

จากวิธีการทดลองมีการให้ความร้อนแก่ส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อกำจัดน้ำออกจากวัตถุดิบ และนำกลั่นกรดไขมันปาล์มที่ผ่านการกำจัดน้ำออกปริมาณ 1,250 กรัม เติมลงในถังปฏิกรณ์ตัวที่ 1 ให้ความร้อนจนกระทั่งอุณหภูมิของน้ำมันอยู่ที่ 70 องศาเซลเซียส แล้วนำเมทานอลเติมลงในถังปฏิกรณ์ตัวที่ 1 จากนั้นป้อนสูตรผสมจากถังปฏิกรณ์ตัวที่ 1 ไปยังถังปฏิกรณ์ตัวที่ 2 ที่มีการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 500 กรัม เอาไว้ด้วยอัตราการใช้ 14 มิลลิลิตรต่อนาที สารจะใช้เวลาอยู่ในถังปฏิกรณ์ตัวที่ 2 ซึ่งบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาเอาไว้เป็นเวลาประมาณ 2 ชม. ดังนั้นในการวน 1 รอบสารจะใช้เวลาอยู่ในถังปฏิกรณ์ 2 ชม. จึงต้องทำการวนสาร 3 รอบ ดังนั้นในการวนสารครบ 3 รอบ สารจะใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 6 ชม. ซึ่งเป็นไปตามสถานะจากการทดลองแบบเบทซ์ จากผลการทดลองเมื่อตรวจสอบหาร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ด้วยการไทเตรทและเทคนิค TLC-FID จะเห็นได้ว่าร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการสัมผัสของสารกับตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับตารางที่ 4.7 คือ หลังจากเกิดปฏิกิริยาจะส่งผลให้ FFA เปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์มากขึ้น จึงส่งผลให้ FFA มีค่าลดลง ดังสมการ



จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ในการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มด้วยกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง โดยการนำสถานะที่ได้ศึกษาจากชุดการทดลองแบบเบทซ์มาประยุกต์ใช้กับกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องด้วยถังปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง แต่มีประสิทธิภาพต่ำกว่าการทดลองแบบเบทซ์ คือ จะให้ %conversion ของกรดไขมันอิสระเฉลี่ย 90.74% ต่ำกว่า %conversion ของกรดไขมันอิสระเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองแบบเบทซ์ประมาณ 7.5% ซึ่งเป็นผลมาจากข้อจำกัดของการทดลอง เช่น การควบคุมอัตราการระเหยของเมทานอลด้วยอุปกรณ์การทดลองแบบเบทซ์ทำได้ดีกว่าอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตเมทิลเอสเทอร์ด้วยถังปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาด้วยอุปกรณ์การทดลองแบบเบทซ์สูงกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตเมทิลเอสเทอร์ด้วยถังปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง เป็นต้น ดังนั้นหากมีการปรับปรุงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองให้ดีขึ้นก็อาจส่งผลให้การผลิตเมทิลเอสเทอร์มีประสิทธิภาพทัดเทียมกับการทดลองแบบเบทซ์ได้ ซึ่งการทดลองสอดคล้องกับการทดลองของสินินาญ จงคง (2549) ศึกษาการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์ม โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 กระบวนการ คือ กระบวนการผลิตแบบกะ เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการทำปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน ได้แก่ อุณหภูมิ

ในช่วง 70-100 องศาเซลเซียส อัตราส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มในช่วง 0.5:1-13.2:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยากรดซัลฟิวริก 0-3 wt% และเวลาในการทำปฏิกิริยาในช่วง 15-240 นาที พบว่า สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองแบบกะคือ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:4.7 กรดซัลฟิวริก 1 wt% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที ให้ผลผลิตเมทิลเอสเทอร์ 97.5% จากนั้นกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องจึงถูกศึกษาโดยถึงปฏิกรณ์แบบกวนผสมอย่างต่อเนื่อง ผลการทดลองพบสภาวะที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:8.8 กรดซัลฟิวริก 1 wt% และเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ให้ผลผลิตเมทิลเอสเทอร์ 96.7% เนื่องจากถึงปฏิกรณ์มีการกวนผสมอย่างต่อเนื่องจึงส่งผลให้สารผสมกันทั่วถึง ปฏิกิริยาจึงเกิดได้ดีขึ้น ดังนั้นประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตแบบกะและแบบต่อเนื่องจึงมีประสิทธิภาพทัดเทียมกัน ซึ่งให้ผลผลิตของเมทิลเอสเทอร์ที่มีความบริสุทธิ์ใกล้เคียงกัน



(a)

(b)

(c)

ภาพประกอบที่ 4.24 แสดงลักษณะของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากกระบวนการผลิต
แบบต่อเนื่อง : (a) วนรอบที่ 1; (b) วนรอบที่ 2; (c) วนรอบที่ 3

4.3 การทดสอบสมบัติทางเชื้อเพลิงของไบโอดีเซล

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของเมทิลเอสเทอร์จากส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มซึ่งผลิตจากกระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากชุดการทดลองแบบเบทซ์ที่สภาวะตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ปริมาณ 10 กรัม อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:12 เวลาในการทำปฏิกิริยา 6 ชม. และอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส โดยทำการเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ASTM และมาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงาน ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.8 และอธิบายได้ดังนี้

จากผลการทดสอบคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้จากส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มด้วยกระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากชุดการทดลองแบบเบทซ์ ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าค่าที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D 6751-02 และมาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงาน ยกเว้น จุดขุ่น และจุดไหลเท มีค่ามากกว่าค่ามาตรฐาน ASTM D 6751-02 ความหนืด และไดกลีเซอไรด์ มีค่าเกินค่ามาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงาน และค่าของกรด มีค่าเกินค่ามาตรฐาน ASTM D 6751-02 และมาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงาน สาเหตุที่คุณสมบัติเหล่านี้มีค่าเกินจากค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ เนื่องจากส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มประกอบด้วย กรดไขมันอิ่มตัวมากกว่า 49% คุณสมบัตินี้จึงส่งผลให้ค่าจุดขุ่น และจุดไหลเท ของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตจากส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐาน ASTM D 6751-02 อย่างไรก็ตามการผสมน้ำมันดีเซลกับน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มจะช่วยให้คุณสมบัติของ จุดขุ่น จุดไหลเท และความหนืด เป็นไปตามค่ามาตรฐาน ASTM D 6751-02 และมาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงาน ได้ (สินินาฏ จงคง, 2549) สำหรับค่าของกรดและไดกลีเซอไรด์ที่เกินจากค่ามาตรฐาน จากการศึกษาของสินินาฏ จงคง (2549) ได้ทำการ neutralization ผลผลิตเมทิลเอสเทอร์จากกระบวนการเอสเตอริฟิเคชันทั้งแบบกะและแบบต่อเนื่องที่สภาวะ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เวลา 15-20 นาที โดยใช้ 3M NaOH ปริมาณ 9.13% (ปริมาตร โดยน้ำหนัก) พบว่า ผลผลิตของเมทิลเอสเทอร์ที่ผ่านกระบวนการนี้มีความบริสุทธิ์ขึ้น โดยสอดคล้องกับมาตรฐาน ASTM D 6751-02 และมาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงาน ดังนั้นในการทดลองนี้เพื่อให้ได้ผลผลิตของเมทิลเอสเทอร์ที่มีความบริสุทธิ์ขึ้นสามารถทำได้โดยการนำกระบวนการ neutralization มาประยุกต์ใช้งาน จากผลการวิเคราะห์จุดวาบไฟของเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้จากส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มมีค่าสูง ดังนั้นการผสมน้ำมันดีเซลกับน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้ จะช่วยให้จุดวาบไฟมีค่าสูงขึ้น จึงทำให้เมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้สามารถ

ขนถ่ายและเก็บได้อย่างปลอดภัยกว่าน้ำมันดีเซล เนื่องจากมีจุดวาบไฟสูงขึ้นจึงมีความเสี่ยงต่อการระเบิดหรือติดไฟน้อยกว่าน้ำมันดีเซล (กิตติภูมิ ศุภลักษณ์ปัญญา, 2548)

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์ม

คุณสมบัติ	หน่วย	งานวิจัยนี้	PFAD ลิโนเลอิก (2549)	เมล็ด ยางพารา สุกยัด (2547)	คุณสมบัติของ ไบโอดีเซล	
					ASTM D6751-02	กรมธุรกิจ พลังงาน
ความหนาแน่น	kg/m ³	892	879.8	-	870-900	860-900
ความหนืด	mm ² /s	5.55	4.87	7.32	1.9-6.0	3.5-5.0
จุดขุ่น	°C	14	15	2	-3 to 12	-
จุดไหลเท	°C	12	14	0	-15 to 10	-
จุดวาบไฟ	°C	190	181	185	130 min	120 min
การกัดกร่อนของ แผ่นทองแดง	Number	1	1	-	3 max	1 max
น้ำ	%wt	0.03	0.03	-	0.03 max	0.05 max
จุดกลั่น 90%	°C	332	335	344	360 max	-
ค่าของกรด	mg KOH/g	3.28	0.33	-	0.80 max	0.50 max
เมทิลเอสเทอร์	%wt	97.89	99.48	91.5	-	96.5 min
โมนอกลิเซอไรด์	%wt	na	0.462	-	-	0.8 max
ไดกลิเซอไรด์	%wt	1.07	0.058	-	-	0.2 max
ไตรกลิเซอไรด์	%wt	na	0.000	-	-	0.2 max

na = not available

หมายเหตุ : สำหรับการทดสอบเมทิลเอสเทอร์ โมนอกลิเซอไรด์ ไดกลิเซอไรด์ และไตรกลิเซอไรด์ ได้ทำการทดสอบโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ด้วย TLC-FID แทนการวิเคราะห์ด้วย GC ตามวิธีการทดสอบที่กรมธุรกิจพลังงานกำหนด ซึ่งเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในการส่งวิเคราะห์

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มด้วยปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทกรดชนิดของแข็ง คือ น้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์ และเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ จึงสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1 การเตรียมและศึกษาคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในงานวิจัยมี 2 ชนิด คือ น้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์ และเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ ซึ่งทำการเตรียมโดยวิธีการ impregnation ตามจุด wetness point ของผงถ่านกัมมันต์ และทดสอบคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมด้วยเทคนิคต่าง ๆ คือ BET surface area, XRD, SEM และ FT-IR พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาน้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์ไม่พบการเปลี่ยนแปลงสัญญาณใด ๆ เกิดขึ้นหลังจากการขึ้นชั้นด้วยลักษณะทางกายภาพ และเทคนิค XRD และ FT-IR แต่การเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์สามารถขึ้นชั้นจากลักษณะทางกายภาพ และใช้เทคนิค FT-IR และ SEM

5.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการผลิตเมทิลเอสเทอร์ด้วยวิธีการทดลองแบบแบทช์

การผลิตเมทิลเอสเทอร์จากส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มได้ทำการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์ ได้แก่ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล และเวลาในการทำปฏิกิริยา เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองจะทำการเปรียบเทียบกับการใช้กรดซัลฟิวริกบนผงถ่านกัมมันต์ และศึกษาประสิทธิภาพการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า

1. น้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์ไม่เหมาะสมกับการใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการผลิตเมทิลเอสเทอร์
2. การใช้เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า สภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์ คือ ตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์

ปริมาณ 10 กรัม อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:12 เวลาในการทำปฏิกิริยา 6 ชม. และอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส จะให้ %conversion ของกรดไขมันอิสระเฉลี่ย 98.20%

3. การใช้เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า มีประสิทธิภาพใกล้เคียงการใช้กรดซัลฟิวริกบนผงถ่านกัมมันต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สภาวะเดียวกัน

4. การศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการนำกลับมาใช้ซ้ำ พบว่า ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาจะลดลงตามจำนวนครั้งของการใช้ซ้ำ และการใช้ซ้ำครั้งที่ 8 จะให้ %conversion ของกรดไขมันอิสระเริ่มคงที่

5.3 การศึกษาการผลิตเมทิลเอสเทอร์ด้วยถังปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง

การศึกษาค้นคว้าผลของการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มด้วยกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องด้วยถังปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ทำการทดลองที่สภาวะ 20 wt% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ปริมาณ 10 กรัม อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:12 เวลาในการทำปฏิกิริยา 6 ชม. และอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จะให้ผลผลิตของเมทิลเอสเทอร์ที่มีความบริสุทธิ์ 90.74% เมื่อตรวจสอบด้วยเทคนิค TLC-FID

5.4 การศึกษาคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของเมทิลเอสเทอร์

การทดสอบคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้จากส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มด้วยกระบวนการทดลองแบบเบทซ์ พบว่า คุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้ส่วนใหญ่เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D 6751-02 และมาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงาน ยกเว้น จุดชุ่น จุดไหลเท ค่าความเป็นกรด และโคกลีเซอไรด์ ซึ่งเกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ อย่างไรก็ตามการ neutralization และผสมน้ำมันดีเซลกับน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตจากส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มจะช่วยให้คุณสมบัติเหล่านี้เป็นไปตามค่ามาตรฐาน ASTM D 6751-02 และมาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงาน

ข้อเสนอแนะ

การผลิตไบโอดีเซลด้วยชุดการทดลองแบบเบทซ์ พบตะกอนของผงถ่านกัมมันต์แขวนลอยอยู่ อาจกำจัดโดยวิธีการวางให้ตกตะกอนตามแรงโน้มถ่วงหรือแยกออกโดยวิธีการหมุนเหวี่ยง

การศึกษาผลของการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์ม โดยใช้เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในชุดการทดลองแบบเบทซ์ แล้วนำสถานะดังกล่าวมาศึกษาต่อในกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องด้วยถังปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง จะพบปัญหาเกี่ยวกับการระเหยของเมทานอลเมื่อใช้อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ทำให้ปฏิกิริยาเกิดไม่สมบูรณ์ รวมถึงการให้ความร้อนในถังปฏิกรณ์ไม่สามารถให้ความร้อนได้ถึง 95 องศาเซลเซียส เนื่องจากเกินอุณหภูมิจุดเดือดของเมทานอล ดังนั้นจึงปรับเปลี่ยนโดยลดอุณหภูมิเป็น 70 องศาเซลเซียส ในการทดลอง จากผลการทดลองจึงให้ผลผลิตของเมทิลเอสเทอร์ร้อยละ 90.74 เมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 6 ชม. อย่างไรก็ตามผลผลิตของเมทิลเอสเทอร์จากกระบวนการแบบต่อเนื่องจะให้ผลผลิตของเมทิลเอสเทอร์น้อยกว่าการผลิตในชุดการทดลองแบบเบทซ์ ซึ่งอาจจะปรับปรุงการทดลองโดยการเพิ่มอุปกรณ์เพื่อควบแน่นเมทานอลที่ระเหยกลับสู่ระบบอีกครั้ง และเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาให้ยาวนานขึ้น

บรรณานุกรม

- กณพ ลิขิตขจรนุวัฒน์. 2546. การศึกษาพันธุกรรมของปาล์มน้ำมันโดยใช้เทคนิคไมโครแซทเทลไลท์, RAPD และ EPIC. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- กิตติภูมิ สุกฤษณ์ปัญญา. 2548. การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบโดยกรรมวิธีโอโซเนชั่นเชิงเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาซัลโฟเนตวานาเดียม-ไททานเนียม และแอมเบอร์ลิสต์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- กิตติศักดิ์ ทวีสิน โสภากา. 2549. การผลิตเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มหีบรวมโดยใช้กระบวนการผลิตแบบ Esterification และ Transesterification. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- จตุพร วิทยาคุณ และนุรักษ์ กฤษดานุรักษ์. 2547. การเร่งปฏิกิริยา: พื้นฐานและการประยุกต์. พิมพ์ครั้งที่ 1. โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- จารุวรรณ ณ นคร. 2548. คุณลักษณะของน้ำมันปาล์มดิบที่ผลิตจากจังหวัดสตูลและสตูลอินที่แยกโดยวิธีปั่นเหวี่ยงด้วยตัวกลางทำละลายต่างๆ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- จิระพงษ์ คูหากาญจน์. 2548. เทคนิคการเผาถ่าน. เกษตรกรรมธรรมชาติ ฉบับที่ 6 : 21-34.
- เฉลิมพร ณ พัทลุง. 2549. ไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดยางพาราและการประยุกต์ใช้งาน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง.

ณะเรศรี์ ขอไพบูลย์. 2551. การทำบริสุทธิ์เมทิลเอสเทอร์น้ำมันปาล์มด้วยการกลั่นลำดับส่วน.

วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี.

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ณัฐมณทนา์ ลีจินดา. 2549. การผลิตไบโอดีเซลจากปาล์มสเตียร์นโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธ

พันธุ์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี.

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ประสพโชค ต้นไทย. 2551. ไบโอดีเซลจากน้ำมันดิบหีบรวม. กสิกร ฉบับที่ 3 : 14-22.

ปาริชาติ ดำรงพงษ์. 2547. ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดสารประกอบเหล็กบนตัวรองรับเคลย์สำหรับ

ออกซิเดชันของไซโคลออกเทน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

พิมพ์จิต ดามพวรรณ และวัชรินทร์ รุกขไชยศิริกุล. 2542. สเปกโทรสโกปีของสารอินทรีย์. พิมพ์

ครั้งที่ 3. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

พุดินันท์ พึ่งวงศ์ญาติ. 2544. ถ่านไม้และน้ำส้มควันไม้. โครงการส่งเสริมการปลูกป่าภาค

ตะวันออกเฉียงเหนือระยะที่ 2 โดยกรมป่าไม้และองค์กรความร่วมมือระหว่างประเทศ

แห่งญี่ปุ่น(JACA). 48น.

พรธณินัย วิชาชู. 2548. ปาล์มน้ำมันจากน้ำมันพืชถึงไบโอดีเซล. กสิกร ฉบับที่ 78. 3 : 69-83.

มุกิตา ยันบูรพา, ลักษณะศักดิ์ พอดิงาม และกัญจนา บุญเกียรติ. 2545. ไบโอดีเซล(Biodiesel)จาก

น้ำมันพืช 3 ชนิด. วารสารวิทยาศาสตร์.78-84.

ศิษฏาภรณ์ เครือสุวรรณ. 2550. สภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตถ่านกัมมันต์จากชี้เลี้ยงไม่ยงพารา.

วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี.

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

- สินินาฏ จงกง. 2549. การผลิตเมทิลเอสเทอร์ด้วยกระบวนการเอสเตอริฟิเคชันของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์ม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- สุภาวดี เฟื่องคง. 2550. จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันสำหรับไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาฟอสโฟทังสเตนออกไซด์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- สุภาษิต ชุกกลิ่น. 2547. การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดขางพารา. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- Bahurmiz, O.M. and Ng, W.K. 2007. Effects of dietary palm oil source on growth, tissue fatty acid composition and nutrient digestibility of red hybrid tilapia, *Oreochromis sp.*, raised from stocking to marketable size. *Aquaculture*; 262: 382–392.
- Barnwal, B.K. and Sharma, M.P. 2005. Prospects of biodiesel production from vegetable oils in India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; 9: 363-378.
- Bradshaw, G.B. and Meuly, W.C. 1944. Preparation of detergents. US Patent; 2(360):844.
- Canaki, M. and Van Gerpen, J. 1999. Biodiesel production via acid catalysis. *American Society of Agricultural Engineer*; 42: 1203-1210.
- Castro, C.S., Castro, M.C., Goncalves, M., Oliveira, L.C.A. and Anastasio, A.S. 2009. Activated carbon/iron oxide composites for the removal of atrazine from aqueous medium. *Journal of Hazardous Materials*; 164 : 609-614.
- Chongkhong, S., Tongurai, C., Chetpattananondh, P. and Bunyakan, C. 2007. Biodiesel production by esterification of palm fatty acid distillate. *Biomass and Bioenergy*; 31: 563-568.

- Ercin, D., Eken, M., Aktas, Z., Cetinkaya, S., Sakintuna, B. And Yurum, Y. 2005. Effect of γ -irradiation on the structure of activated carbons produced from turkish elbistan lignite. *Radiation Physics and Chemistry*; 73 : 263-271.
- Feuge, R.O. and Grose, T., 1949. Modication of vegetable oils. VII. alkali catalyzed interesterication of peanut oil with ethanol. *JAACS*; 26: 97-102.
- Freedman, B., Pryde, E.H. and Mounts, T.L. 1984. Variables affecting the yields of fatty esters from transesterified vegetable oils. *JAACS*; 61: 1638–1643.
- Holtz, R.D., Oliveira, S.B., Fraga, M.A. and Rangel, M.C. 2008. Synthesis and characterization of polymeric activated carbon-supported vanadium and magnesium catalysts for ethylbenzene dehydrogenation. *Applied Catalysis A : General*; 350: 79-85.
- Marchetti, J.M., Miguel, V.U. and Errazu, A.F. 2007. Heterogeneous esterification of oil with high amount of free fatty acid. *Journal of Fuel*; 86 : 906-910.
- Ma, F. and Hanna M.A. 1999. Biodiesel production : a review. *Bioresource Technology*; 70 : 1-15.
- Olivares-Marin, M., Macias-Garcia, A., Gomez-Serrano, V. and Fernandez-Gonzalez, C. 2006. Preparation of activated carbons from cherry stones by activation with potassium hydroxide. *Applied Surface Science*; 252: 5980-5983.
- Sprules, F.J. and Price, D., 1950. Production of fatty esters. *US Patent*; 2: 366-494.
- Ting, W., Huang, C.M., Giridhar, N. and Tenf, W. 2008. An enzymatic/acid-catalyzed hybrid process for biodiesel production from soybean oil. *Journal of the Chinese Institute of Chemical Engineers*; 39 : 203-120.

- Veljkovic, V.B., Lakicevic, S.H., Stamenkovic, O.S., Todorovic, Z.B. and Lazic, M.L. 2006. Biodiesel production from tobacco (*Nicotianatabacum* L.) seed oil with a high content of free fatty acids. *Fuel*; 85: 2671-2675.
- Wang, Y., Ou, S., Liu, P., Xue, F. and Tang, S. 2006. Comparison of two different processes to synthesize biodiesel by waste cooking oil. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*; 252: 107–112.
- Wang, Y., Ou, S., Liu, P. and Zhang, Z. 2007. Preparation of biodiesel from waste cooking oil via two-step catalyzed process. *Journal of Energy Conversion of Management*; 48: 184-188.
- Yujaroen, D., Goto, M., Sasaki, M. And Shotipruk, A. 2009. Esterification of palm fatty acid distillate (PFAD) in supercritical methanol :effect of hydrolysis on reaction reactivity. *Fuel*; 88 : 2011-2016.
- Zullaikah, S., Lai, C.C., Vali, S.R. and Ju, Y.H. 2005. A two-step acid-catalyzed process for the production of biodiesel from rice bran oil. *Bioresource Technology*; 96: 1889-1896.
- “โครงสร้างโมเลกุลของเฟอรัริกซัลเฟต”. Available online : <http://www.chemblink.com>. Mar.11, 2007.
- “เฟอรัริกซัลเฟต” .Available online : <http://en.wikipedia.org>. Mar.15, 2007.
- “ปาล์มน้ำมัน”. Available online : <http://www.nec.psd.ku.ac.th>. Feb.12, 2008.
- “ลักษณะของเฟอรัริกซัลเฟต”. Available online : <http://www.achilles-online.com>. Mar.11, 2007.
- “มาตรฐานของไบโอดีเซล” .Available online : <http://www.tistr.or.th>. Feb.15, 2009.

“Fourier-transformed infrared spectrophotometer”. Available online : <http://las.perkinelmer.com>.
Feb.12, 2008.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

วิธีการวิเคราะห์

1. การวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระ

1.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. เอทิลแอลกอฮอล์ 95 เปอร์เซ็นต์
2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 0.1 นอร์มอล เตรียมโดยชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาณ 4 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปรับปริมาตรให้ได้ 1 ลิตร ในขวดวัดปริมาตร และเก็บสารละลายต่างในขวดแก้ว
3. ฟีนอล์ฟทาลีน เข้มข้นร้อยละ 1 (ละลายในแอลกอฮอล์)
4. สารละลายแอลกอฮอล์ ที่ปรับสภาพให้เป็นกลาง โดยเติมฟีนอล์ฟทาลีน 5 หยด ลงในแอลกอฮอล์ 95% จำนวน 200 มิลลิลิตร แล้วหยดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 นอร์มอล ทีละหยดพร้อมทั้งเขย่าจนได้สีชมพูถาวร

1.2 วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งตัวอย่างน้ำมันให้ได้น้ำหนักที่แน่นอน 1-10 กรัม ทศนิยมอย่างน้อย 2 ตำแหน่ง ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. เติมสารละลายแอลกอฮอล์ที่มีสภาพเป็นกลาง จำนวน 50 มิลลิลิตร ลงในตัวอย่าง เขย่าอย่างแรงให้ตัวอย่างน้ำมันละลายในสารละลายแอลกอฮอล์
3. เติมฟีนอล์ฟทาลีนประมาณ 5 หยด แล้วไทเทรตสารละลายตัวอย่างด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 นอร์มอล จนกระทั่งได้สีชมพูถาวร
4. คำนวณปริมาณกรดไขมันอิสระจากสูตร

$$\%FFA = \frac{\text{ปริมาณค่าที่ใช้ (ml) X ความเข้มข้นค่า (นอร์มอล) X 25.6}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง (g)}}$$

2. ความหนาแน่น (Density)

เป็นคุณสมบัติที่สำคัญมากของน้ำมัน โดยเฉพาะในด้านการซื้อขาย เพราะส่วนใหญ่ทำการซื้อขายกันตามปริมาตรที่อุณหภูมิมาตรฐาน ในด้านคุณภาพของน้ำมัน ค่า gravity เมื่อใช้ร่วมกับคุณสมบัติอื่น ๆ อาจบอกถึงองค์ประกอบของน้ำมันและความเหมาะสมในการใช้งานด้วย

2.1 หลักการ

ปรับอุณหภูมิตัวอย่างให้ได้ตามที่ต้องการ และเทใส่ลงในกระบอกตวงที่มีอุณหภูมิเดียวกับตัวอย่าง จุ่ม hydrometer ลงในตัวอย่าง อ่านสเกลจาก hydrometer และบันทึกอุณหภูมิขณะนั้นด้วย แล้วนำไปปรับค่าเป็นความหนาแน่นที่ 50 องศาเซลเซียส โดยใช้ตารางมาตรฐาน

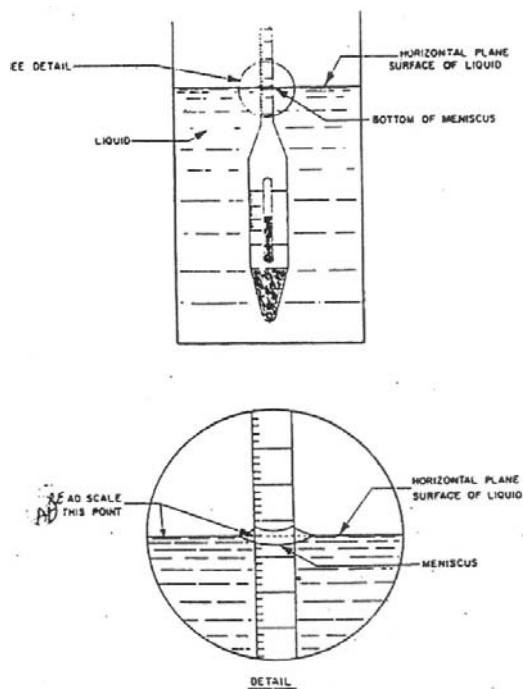
2.2 อุปกรณ์

1. Hydrometer ต้องได้มาตรฐานตาม ASTM
2. เทอร์โมมิเตอร์ ต้องได้มาตรฐานตาม ASTM
3. กระบอกตวง เส้นผ่าศูนย์กลางภายในอย่างน้อย 25 มม. ต้องใหญ่กว่าเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของ hydrometer ที่ใช้ และมีความสูงพอเหมาะให้ hydrometer ลอยในตัวอย่าง โดยมีระยะห่างระหว่างกันของ hydrometer และกระบอกตวงอย่างน้อย 25 มม.
4. อ่างควบคุมอุณหภูมิ

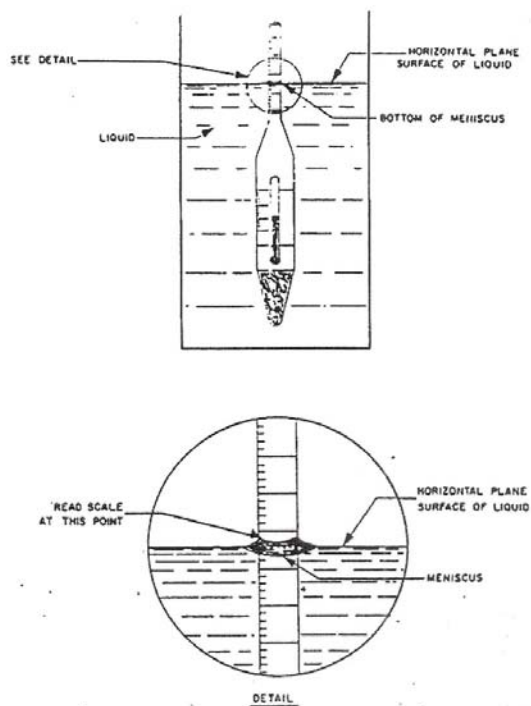
2.3 วิธีการทดสอบ (ASTM D-1298)

1. ปรับอุณหภูมิของตัวอย่าง กระบอกตวง และเทอร์โมมิเตอร์ ให้มีอุณหภูมิเท่ากัน
2. เทตัวอย่างลงในกระบอกตวงที่สะอาดและแห้งสนิท ถ้ามีฟองที่ผิวให้ใช้กระดาษกรองและที่ผิวให้ฟองอากาศหมดไป
3. วางกระบอกตวงในแนวตั้ง ต้องไม่มีกระแสลมและไม่สัมผัสเทียน อุณหภูมิต้องไม่เปลี่ยนแปลงตลอดการทดลอง
4. ค่อยๆ วาง hydrometer ลงในตัวอย่าง พร้อมกับคนตัวอย่างด้วยเทอร์โมมิเตอร์ บันทึกอุณหภูมิ แล้วเอาเทอร์โมมิเตอร์ออก
6. กด hydrometer ลงในตัวอย่างประมาณสองสเกล แล้วปล่อยให้มันที่ ก้านของ hydrometer ที่อยู่เหนือของเหลวจะต้องแห้ง และ hydrometer จะต้องนิ่ง และลอยอย่างอิสระ ไม่สัมผัสกับกระบอกตวง

7. อ่านค่าความหนาแน่นจาก hydrometer



ภาพประกอบที่ ก.1 การอ่านค่าความหนาแน่นจาก hydrometer สำหรับตัวอย่างที่มีความโปร่งใส



ภาพประกอบที่ ก.2 การอ่านค่าความหนาแน่นจาก hydrometer สำหรับตัวอย่างที่ทึบแสง

3. จุดไหลเท (Pour Point)

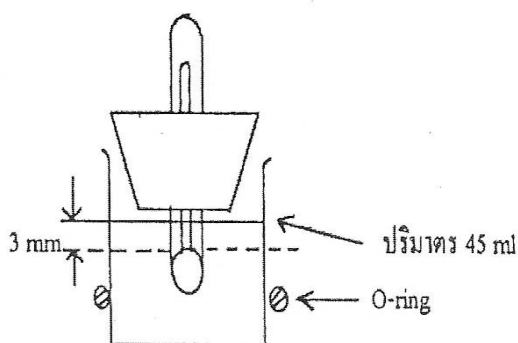
คือ อุณหภูมิต่ำสุดที่น้ำมันยังเป็นของเหลวพอที่จะไหลได้

3.1 หลักการ

ทดสอบโดยนำน้ำมันใส่หลอดแก้ว แล้วแช่ให้เย็นลงเรื่อยๆ ในอ่างทำความเย็น (ใช้แอลกอฮอล์ผสมกับน้ำแข็งแห้ง) และคอยเอาน้ำมันมาตรวจดู จนถึงจุดที่น้ำมันจะเริ่มแข็งตัวและไม่ไหล เมื่อถือหลอดตามแนวนอนเป็นเวลา 5 นาที จุดไหลเทจะเป็นอุณหภูมิที่สูงกว่าจุดนี้ 3 องศาเซลเซียส จุดไหลเทมีประโยชน์ ทำให้ทราบว่าใช้น้ำมันในที่ที่มีอุณหภูมิต่ำขนาดนั้นไม่ได้ เพราะน้ำมันจะไม่ไหล ไขที่มีอยู่ในน้ำมันจะแยกตัวออกมาอุดตันทางเดินและหม้อกรอง ทำให้อุปกรณ์ทำงานไม่ได้ จุดไหลเทจะสูงหรือต่ำขึ้นอยู่กับปริมาณและคุณลักษณะของไขที่มีอยู่ในน้ำมัน น้ำมันที่มีปริมาณไขสูงก็จะมีจุดไหลเทสูง

3.2 การวิเคราะห์จุดไหลเท (Pour Point ; ASTM-D97)

1. เขย่าตัวอย่างและเทใส่หลอดแก้วทดสอบเท่าขีดบอกระดับ (45 มล.) เสียบเทอร์โมมิเตอร์ 5C ดังรูป



2. อุณหภูมิให้ได้อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส และย้ายตัวอย่างสู่อ่างน้ำ 24 องศาเซลเซียส (ตั้งไว้ ณ อุณหภูมิห้อง)

3. ให้ควบคุมการลดลงของอุณหภูมิตัวอย่างดังนี้

เมื่ออุณหภูมิตัวอย่างได้	ย้ายหลอดแก้วลงตู้อ่างแอลกอฮอล์
27°C	0°C
9°C	-18°C
-6°C	-33°C
-24°C	-51°C
-42°C	-69°C

หมายเหตุ : การปรับอุณหภูมิอ่างแอลกอฮอล์ ใช้น้ำแข็งแห้งใส่ทางฝาเปิดอ่างเปิดมอเตอร์ขับใบกวนให้ระดับอุณหภูมิในอ่างสม่ำเสมอ

4. เมื่ออุณหภูมิตัวอย่างได้ 9 องศาเซลเซียส เหนือจุดไหลเท (ภาคการณ) ให้ยกหลอดแก้วขึ้นจากอ่างทดสอบ เอียงหลอดแก้ว ถ้าตัวอย่างยังไหลได้ให้คืนหลอดแก้วลงตู้อ่างเหมือนเดิม (ขั้นตอนนี้ไม่เกิน 3 วินาที)

5. กระทำซ้ำเหมือนข้อ 4 ทุก ๆ อุณหภูมิตัวอย่างที่ลดลง 3 องศาเซลเซียส จนกระทั่งพบว่าตัวอย่างเป็นไขแข็งตัว (100%) ให้เอียงหลอดแก้วในแนวระนาบต่อเนื่อง 5 วินาที ถ้าตัวอย่างไม่มีการไหลตัวให้หยุดการทดสอบ

6. รายงานผลจุดไหลเท = อุณหภูมิสุดท้ายที่ตัวอย่างเป็นไขแข็งตัว +3 องศาเซลเซียส

4. จุดขุ่น (Cloud Point)

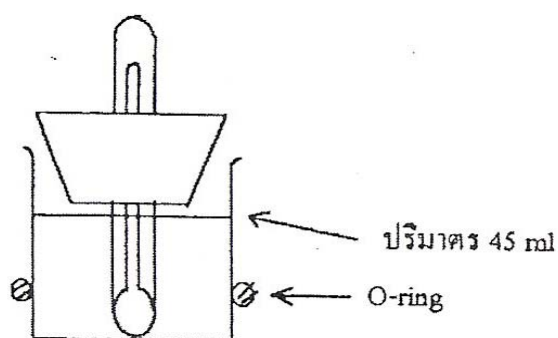
คือ อุณหภูมิที่ไขเริ่มตกผลึกเห็นเป็นฝ้า จุดขุ่นมักจะสูงกว่าจุดไหลเทเล็กน้อยหรืออาจจะเท่ากันก็ได้ จุดขุ่นมีความสำคัญเป็นพิเศษสำหรับน้ำมันดีเซล เพราะการที่ไขเริ่มตกผลึกออกมานั้น อาจทำให้หม้อกรองตันได้อย่างรวดเร็ว ทำให้สูบน้ำมันไม่ได้ แม้ว่าตัวน้ำมันเองยังไหลได้อยู่ก็ตาม

4.1 หลักการทดสอบ

นำน้ำมันใส่หลอดแก้ว แล้วแช่ให้เย็นลงเรื่อยๆ ในอ่างทำความเย็น (แอลกอฮอล์ผสมกับน้ำแข็งแห้ง) และคอยเอน้ำมันมาตรวจดูที่ก้นหลอด จนกระทั่งพบว่ามีฝ้าเกิดขึ้นเต็มก้นหลอด อุณหภูมิที่จุดนั้นคือ จุดขุ่น

4.2 การวิเคราะห์หาจุดขุ่น (Cloud Point ; ASTM-D 2500)

1. เขย่าตัวอย่าง และเทใส่หลอดแก้วทดสอบเท่าขีดบอกระดับ (45 มล.) เสิบเทอร์โมมิเตอร์ 5C ดังรูป



2. นำหลอดแก้วไปอุ่นในอ่างความร้อน จนกระทั่งอุณหภูมิตัวอย่างสูงกว่าจุดขุ่น (ภาคการณ 14 องศาเซลเซียส)

3. ให้ควบคุมการลดลงของอุณหภูมิตัวอย่าง ดังนี้

เมื่ออุณหภูมิตัวอย่างได้	ย้ายหลอดแก้วลงสู่อ่างแอลกอฮอล์
27°C	0°C
9°C	-18°C
-6°C	-33°C
-24°C	-51°C
-42°C	-69°C

หมายเหตุ : การปรับอุณหภูมิอ่างแอลกอฮอล์ ใช้น้ำแข็งแห้งใส่ทางฝาเปิดอ่างเปิดมอเตอร์จับใบกวนให้ระดับอุณหภูมิในอ่างสม่ำเสมอ

4. ทุก ๆ อุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียส ที่ลดลง ให้ยกหลอดแก้วขึ้นจากอ่างทดสอบในแนวตั้ง สังเกตความขุ่น (การก่อตัวของไข) จากด้านบนของหลอดแก้ว ถ้ายังไม่เต็มพื้นที่ก้นหลอด ให้คืนหลอดแก้วลงอ่างเหมือนเดิม (ขั้นตอนนี้ไม่เกิน 3 วินาที)

5. ถ้าพบว่าจุดขุ่นเต็มพื้นที่ก้นหลอดแก้วแล้ว ให้บันทึกอุณหภูมินั้นไว้และรายงานผลเป็นจุดขุ่น

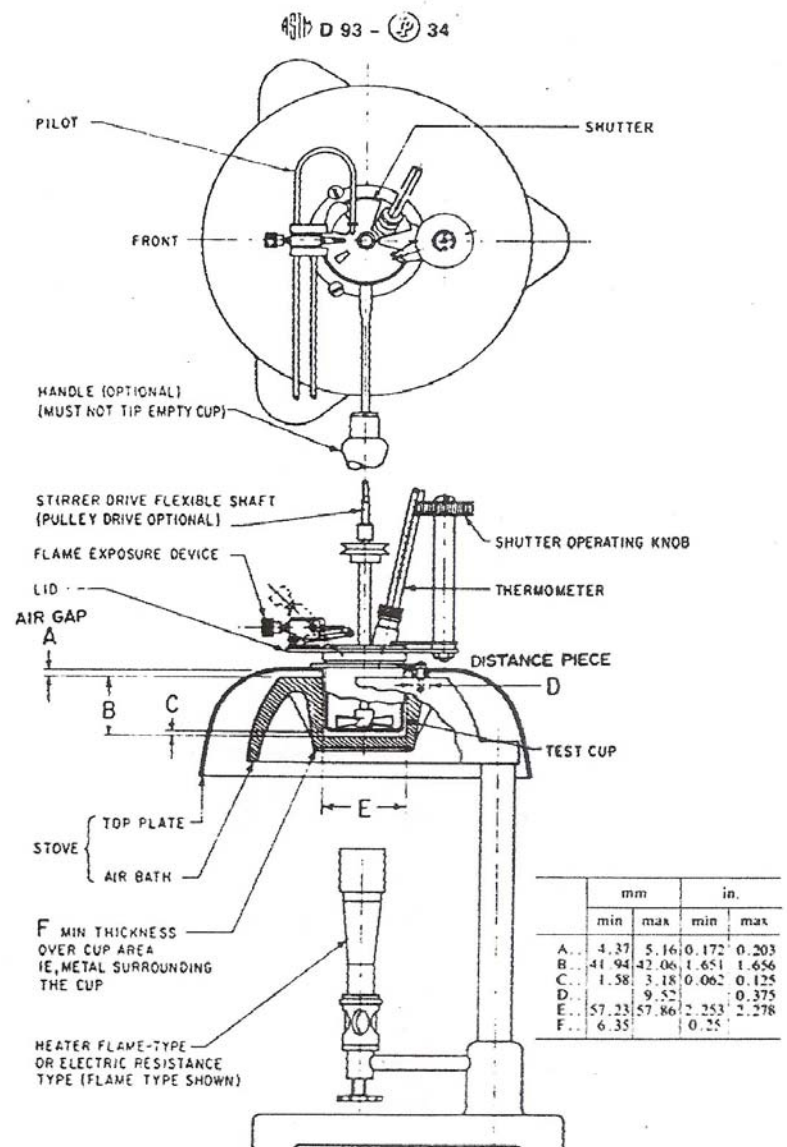
5. จุดวาบไฟ (Flash Point)

คือ อุณหภูมิต่ำสุดของน้ำมันที่ทำให้เกิดไอน้ำมันเป็นปริมาณมากพอ และเมื่อสัมผัสเปลวไฟก็จะลุกไหม้ทันที การหาจุดวาบไฟใช้วิธี ASTM D-93 ซึ่งเป็นเครื่องมือพิเศษเรียกว่า pensky martens closed cup ดังแสดงภาพประกอบที่ ก.3 และ ก.4

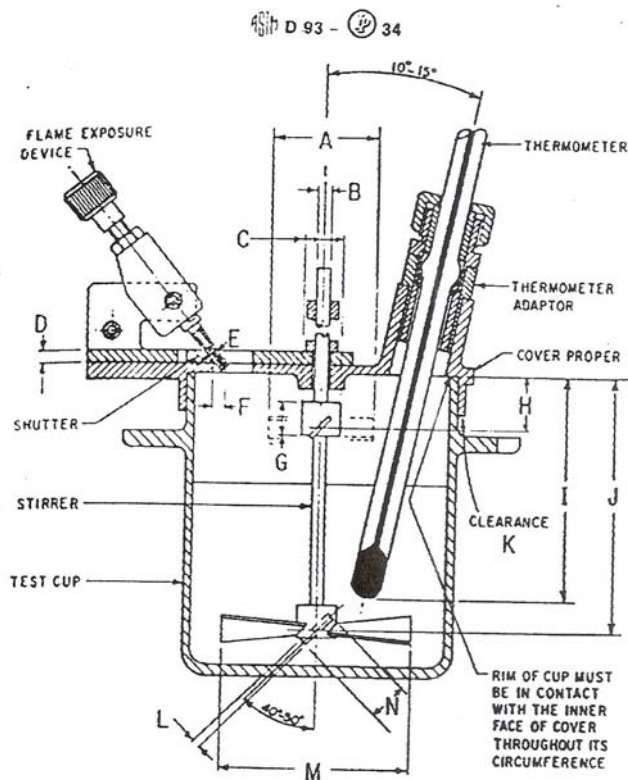
5.1 วิธีหาจุดวาบไฟแบบปิด (Flash Point by Pensky Martens Closed Cup ;

ASTM-D 93)

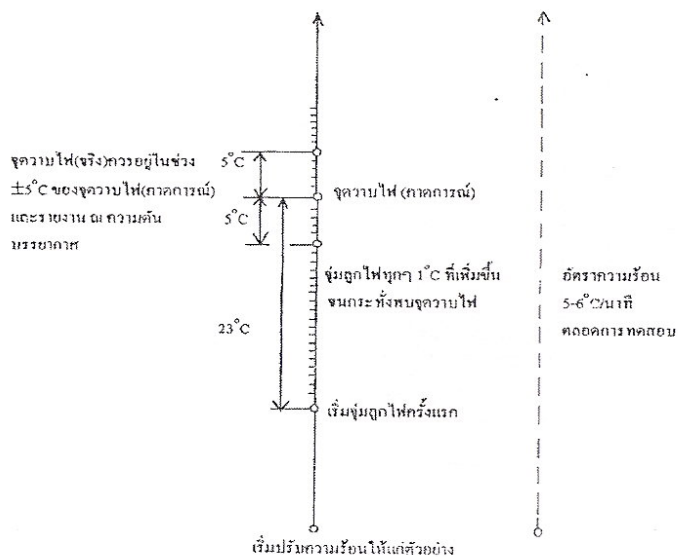
1. เทตัวอย่างลงในถ้วยโลหะทดสอบ ปริมาตรเท่าขีดบอกระดับภายในถ้วย
2. วางถ้วยลงในเตาทดสอบ (ตรงตามร่องบากทั้งสาม) ประกอบฝาครอบถ้วย (ให้ร่องบากตรงกับด้ามจับ) เสียบ thermometer 9C และสายกวนตัวอย่างเข้ากับฝาครอบถ้วย
3. เปิดแก๊สเข้าระบบ และปรับลูกไฟ ignitor ให้ได้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 มม.
4. Switch on สายกวนตัวอย่าง และหมุนปรับ heater (การปรับจะกระทำอย่างต่อเนื่อง เพื่อควบคุมอัตราการให้ความร้อนแก่ตัวอย่าง 5-6 องศาเซลเซียสต่อนาที ตลอดการทดสอบ)
5. เริ่มจุ่มลูกไฟ (สายกวนจะหยุดตัวเองอัตโนมัติ ขณะจุ่มลูกไฟ) เมื่ออุณหภูมิตัวอย่างได้ 23 องศาเซลเซียส ก่อนถึงจุดวาบไฟ (คาดการณ์) ควบคุมเวลาในการจุ่มให้ได้ 1 วินาทีต่อครั้ง
6. จุ่มลูกไฟต่อเนื่องทุก ๆ อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศาเซลเซียส กระทั่งพบจุดวาบไฟ ถ้าจุดวาบไฟ (จริง) อยู่ในช่วง ± 5 องศาเซลเซียส ของจุดวาบไฟ (คาดการณ์) ให้ทำการทดสอบใหม่ โดยเลือกจุดวาบไฟ (คาดการณ์) ใหม่ให้ใกล้เคียงกับจุดวาบไฟ (จริง) และรายงานผลจุดวาบไฟ ณ ความดันบรรยากาศ (760 มม.ปรอท)



ภาพประกอบที่ ก. 3 เครื่องหาจุดวบไฟ



ภาพประกอบที่ ก. 4 ถ้วยใส่ตัวอย่างพร้อมฝา



ภาพประกอบที่ ก.5 กราฟแสดงขั้นตอนการทดสอบหาจุดวาบไฟแบบปิด (ASTM-D 93)

6. ความหนืด (Viscosity)

หมายถึง แรงเสียดทานหรือแรงต้านทานการไหล ความหนืดเป็นสมบัติอย่างหนึ่งของไหล ความหนืดของน้ำมันมีความสำคัญมากในการใช้งาน เพราะเป็นเครื่องบอกถึงความต้านทานการไหลตัวของน้ำมันและบอกถึงคุณสมบัติในการหล่อลื่นพื้นผิว ดังนั้น ข้อกำหนดคุณภาพของน้ำมันเครื่องบินไอพ่น น้ำมันดีเซลรอบสูงและรอบต่ำ น้ำมันเตาและน้ำมันหล่อลื่น จึงต้องมีข้อกำหนดความหนืดที่เหมาะสมบังคับไว้ โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์สองอย่างหลัง ค่าความหนืดจะเป็นการแบ่ง grade ของน้ำมันด้วย

การหาความหนืดของของเหลวทำได้โดยการวัดอัตราการไหลของของเหลวที่ผ่านหลอดเล็ก ๆ (capillary tube) สำหรับของเหลวที่ไหลผ่านหลอดเล็ก ๆ ซึ่งมีรัศมี r ในช่วงเวลา t โดยมีความแตกต่างของความดันที่ทำให้เกิดการไหลที่ปลายหลอดทั้งสองข้างเท่ากับ $P_1 - P_2$ โดยที่ปริมาตรของของเหลวที่ไหลผ่านหลอดเล็ก ๆ หาได้จากสมการของมีวเซอแล (Poiseuille's Equation) คือ

$$V = \frac{\pi r^4 t (P_1 - P_2)}{8 \eta L} \quad (1)$$

เมื่อ

L คือ ความยาวของหลอดเล็ก ๆ

เครื่องมือวัดความหนืด (viscometer) ของของเหลวที่นิยมใช้ทั่วไปคือ ออสวอลด์ วิสโคซิมิเตอร์ โดยวัดเวลา (t) ที่ปริมาตรของของเหลวจำนวนหนึ่งไหลผ่านหลอดเล็ก ๆ ซึ่งอยู่ในแนวตั้ง จากสมการ (1) ต้องรู้ค่ารัศมี (r) ความยาวของหลอด (L) และความแตกต่างของความดัน ($P_1 - P_2$) ซึ่งสามารถหาได้โดยวัดอัตราการไหลของของเหลวที่ทราบค่าความหนืดแล้ว (คือ เป็นของเหลวเปรียบเทียบ) โดยใช้เครื่องมืออันเดียวกัน จากนั้นก็จะหาค่าสัมประสิทธิ์ของความหนืดของของเหลวที่ต้องการจากสมการต่อไปนี้

$$\eta = \frac{\eta_r t \Delta P}{t_r \Delta P_r} = \frac{\eta_r t \rho}{t_r \rho_r} \quad (2)$$

$$\Delta P = \rho g L$$

เมื่อ

ρ คือ ความหนาแน่นของของเหลว (g/cm^3)

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (cm/s^2)

L คือ ความยาวของหลอดเล็ก ๆ (cm)

และ

ρ_r , t_r และ η_r คือ ความหนาแน่น เวลาของการไหล และความหนืดของของเหลวที่เป็นตัวเปรียบเทียบ (reference)

สำหรับอิทธิพลของอุณหภูมิต่อค่าความหนืดจะแตกต่างกันสำหรับของเหลวและก๊าซ โดยความหนืดของของเหลวจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ตามสมการ

$$\eta = A e^{E_a/RT} \quad (3)$$

เมื่อ

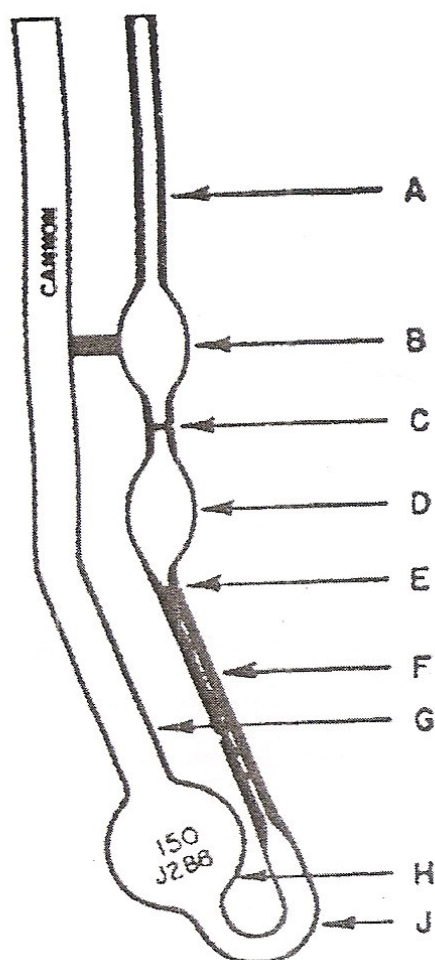
E_a คือ พลังงานกระตุ้นของการไหล (J/g.mol.K) ของเหลวต้องมีพลังงานสูงกว่าจึงจะไหลได้

A คือ ค่าคงที่

R คือ Ideal Gas Constant (J/g.mol.K)

T คือ อุณหภูมิ (K)

สำหรับก๊าซ ค่าความหนืดจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งตรงข้ามกับของเหลว เนื่องจากค่าความหนืดจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิตลอดเวลา จึงต้องมีการควบคุมอุณหภูมิที่เครื่องวัดอย่างดี และการรายงานต้องบอกอุณหภูมิของการวัดด้วย



ภาพประกอบที่ ก.6 รูป Cannon Fenske Routine Viscometer for Transparent Liquids

ตารางที่ ก.1 การเลือกใช้วิสคอมิเตอร์ ต้องเลือกให้เหมาะสมกับตัวอย่างที่จะทดสอบ

Size	mm^2/s^2 , (cSt/s)	Kinematic Viscosity Range mm^2/s , (cSt)
25	0.002	0.5 to 2
50	0.004	0. to 4
75	0.008	1.6 to 8
100	0.015	3 to 15
150	0.035	7 to 35
200	0.1	20 to 100
300	0.25	50 to 250
350	0.5	100 to 500
400	1.2	240 to 1200
450	2.5	500 to 2500
500	8	1600 to 8000
600	20	4000 to 20000
650	45	9000 to 45000
700	100	20000 to 100000

6.1 วิธีทดสอบ

- ล้างวิสคอมิเตอร์ด้วยตัวทำละลายที่เหมาะสม แล้วทำให้แห้งโดยเป่าด้วยลมที่แห้งและสะอาด ถ้ามีสารอินทรีย์ติดอยู่ในหลอดให้กำจัดด้วยของเหลวผสมระหว่างกรดโครมิกกับกรดซัลฟิวริก
- ถ้ามีผงฝุ่นหรือของแข็งอยู่ในตัวอย่างที่จะทดสอบ ให้กรองตัวอย่างผ่าน sintered glass หรือตะแกรงละเอียด
- บรรจุตัวอย่างที่จะทดสอบเข้าในวิสคอมิเตอร์ โดยคว่ำหลอดวิสคอมิเตอร์ และใช้แรงดูดที่ปลายด้าน G จุ่มปลายด้าน A ลงในตัวอย่างที่จะทดสอบ ให้ตัวอย่างไหลเข้าไปจนถึงระดับ E เช็ดปลายด้าน A ให้สะอาด แล้วกลับหลอดวิสคอมิเตอร์ให้อยู่ในแนวตั้ง

4. จับวิสคอมิเตอร์ด้วย Holder แล้วจุ่มวิสคอมิเตอร์ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ให้วิสคอมิเตอร์อยู่ในแนวดิ่ง
5. ทิ้งไว้ประมาณ 10 นาที ในกรณีที่จะหาความหนืดที่ 40 องศาเซลเซียส (เพื่อให้ตัวอย่างมีอุณหภูมิเท่ากับอ่าง) และ 15 นาที ในกรณีที่จะหาความหนืดที่ 100 องศาเซลเซียส
6. ใช้ลูกยางดูดตัวอย่างของเหลวที่ปลายด้าน A จนผิวของของเหลวที่ดูดขึ้นมาอยู่เหนือขีด C
7. จากนั้นปล่อยของเหลวให้ไหลลงไปโดยดึงลูกยางออก เริ่มจับเวลาตั้งแต่ของเหลวผ่านขีด C จนกระทั่งถึงขีด E (เวลาที่ใช้ต้องมากกว่า 200 วินาที หากเวลาน้อยกว่า 200 วินาที แสดงว่าเลือกขนาดของวิสคอมิเตอร์ไม่เหมาะสมกับตัวอย่าง ให้เปลี่ยนวิสคอมิเตอร์อันใหม่)
8. ทดสอบซ้ำ โดยทำซ้ำตามข้อ 6 และข้อ 7
9. ค่า kinematic viscosity ในหน่วย mm^2/s (cSt) เท่ากับ เวลาในหน่วยวินาที คูณด้วย viscometer constant

7. การวิเคราะห์หาค่าการสึกกร่อนของแผ่นทองแดง (Copper Corrosion ; ASTM-D 130)

7.1 หลักการ

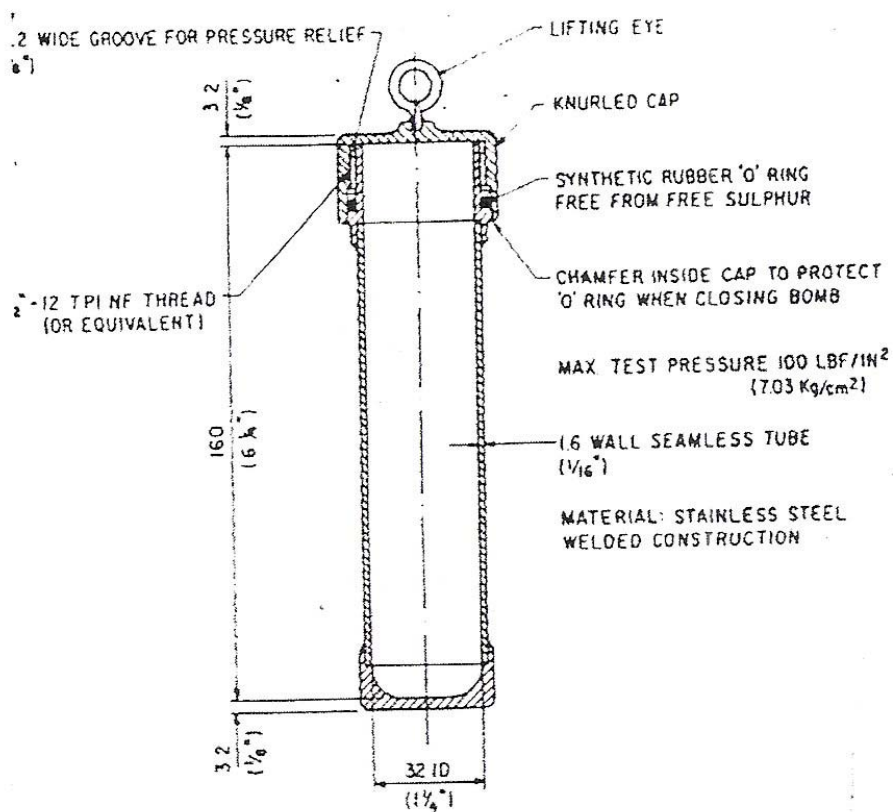
น้ำมันที่ดีจะต้องไม่กัดกร่อนชิ้นส่วนโลหะต่างๆ ในเครื่องยนต์ เนื่องจากสารประกอบกำมะถันบางชนิดจะมีปฏิกิริยาทางเคมีกับทองแดงหรือโลหะผสมของทองแดง การทดสอบทำได้โดยนำแผ่นทองแดงที่ถูกเตรียมพื้นผิวด้วยการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ละเอียด แล้วนำไปแช่ในน้ำมันตัวอย่าง และให้ความร้อนจนได้เวลาตามที่กำหนดในวิธี เสร็จแล้วนำแผ่นทองแดงออกมาล้าง และเปรียบเทียบกับสีมาตรฐาน (ASTM Copper Strip Corrosion Standard)

7.2 การเตรียมตัวอย่างและอุปกรณ์

1. Switch on อ่างควบคุมอุณหภูมิ และมอเตอร์กวนของเหลวในอ่าง
2. ปรับอุณหภูมิอ่างทดสอบ ตรงตามตารางกำหนดของแต่ละตัวอย่าง
3. ขัดแผ่นทองแดงทุกด้าน (ครบ 6 ด้าน) ด้วยกระดาษทรายละเอียด ล้างแผ่นทองแดงด้วยตัวทำละลายที่เหมาะสม (ขจัดคราบไขมัน) และปล่อยให้แห้ง

7.3 ขั้นตอนการทดสอบ

1. เทตัวอย่างลงในหลอดทดสอบปริมาตร 30 มล. และแช่แผ่นทองแดงลงในตัวอย่าง ดังนี้
 - 1.1 สำหรับตัวอย่างที่ระเหยยาก ให้ใช้จุกคอร์กหรือแผ่นอลูมิเนียมปิดหลอดแก้วไว้ และใช้อุปกรณ์ช่วยในการแช่หลอดแก้ว (แบบปิด) ลงในอ่าง
 - 1.2 สำหรับตัวอย่างที่ระเหยง่าย ให้บรรจุหลอดแก้วเข้าไปใน bomb และปิดฝา bomb ให้แน่นก่อนแช่ bomb ลงในอ่าง



ภาพประกอบที่ ก. 7 Copper Strip Corrosion Test Bomb

2. เริ่มนับเวลาในการแช่ตัวอย่าง ตรงตามตารางกำหนดดังนี้

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (ชั่วโมง ± นาที)
Jet	100 ± 1	2 ± 5
Kerosine	100 ± 1	3 ± 5
NGL (Natural Gasoline)	40	3 ± 5
Gasoline	50 ± 1	3 ± 5
Diesel	50 ± 1	3 ± 5
Gasoline	50 ± 1	3 ± 5
Lube	≥ 100	Vary

3. หลังจากครบเวลาเซ้ ให้นำแผ่นทองแดงออก ล้างด้วยตัวทำละลายที่เหมาะสม และปล่อยให้แห้ง

4. สอดแผ่นทองแดงเข้าไปในหลอดแก้วแบนเพื่อเทียบกับแผ่นมาตรฐานการสีกร่อนของแผ่นทองแดง และรายงานผลเท่ากับหรือเข้มกว่าเบอร์ของแผ่นมาตรฐานที่เทียบได้

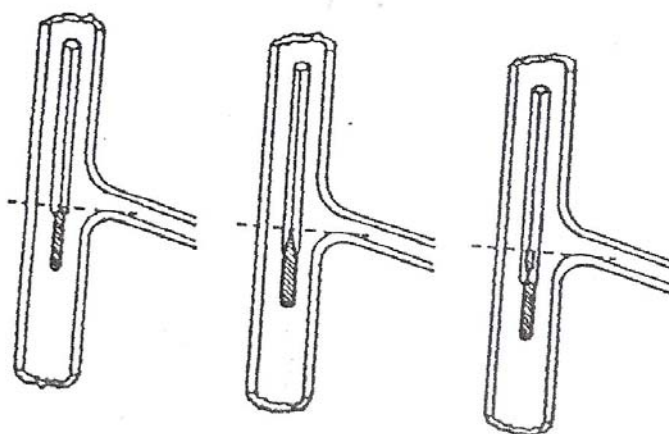
8. การวิเคราะห์หาจุดกลั่น (Distillation ; ASTM-D 86)

8.1 หลักการ

กลั่นตัวอย่าง 100 มล. ด้วยชุดกลั่นที่ได้มาตรฐานตาม ASTM ตั้งเขตและบันทึกอุณหภูมิที่อ่านได้จากเทอร์โมมิเตอร์ขณะรองรับของเหลวที่กลั่นได้ในทรงกระบอก ในปริมาตรที่กำหนด แต่ถ้าไม่มีข้อกำหนดส่วนใหญ่จะวัดที่ initial boiling point, end point, 5% และ 95% และทุก ๆ 10% ระหว่างจุด 10% ถึง 90%

8.2 วิธีการ

1. ก่อนกลั่นต้องทำความสะอาด condenser ให้สะอาดและแห้ง โดยใช้ผ้าผูกติดกับหลอดลากทะเลว condenser
2. ตวงตัวอย่าง 100 มล. ลงในขวดกลั่นขนาด 125 มล. ควรใส่เม็ดแก้วเพื่อป้องกันการเดือดอย่างรุนแรง
3. เสียบเทอร์โมมิเตอร์ที่ได้มาตรฐานตาม ASTM ตามรูป
 - 3.1 Gasoline ใช้เทอร์โมมิเตอร์ 7C
 - 3.2 Diesel ใช้เทอร์โมมิเตอร์ 8C



รองรับ

4. ประกอบขวดกลั่นให้แบนสนิทกับ condenser และก้นขวดกลั่นสนิทกับแผ่น

4.1 Gasoline ใช้แผ่นรองรับที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 38 มม.

4.2 Diesel ใช้แผ่นรองรับที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 มม.

5. ประกอบท่อนำแก๊สเข้ากับ condenser

6. ปรับอุณหภูมิของ condenser bath

6.1 Gasoline ประมาณ 0-4°C

6.2 Diesel ประมาณ 50°C (ใช้น้ำอุ่น)

7. เปิดสวิตซ์ให้ความร้อนแก่ตัวอย่าง และควบคุมสภาวะการกลั่นดังนี้

หยุดแรก (IBP)	ใช้เวลาประมาณ 5-10 นาที (สำหรับ Diesel) หรือ 5-10 วินาที (สำหรับ Gasoline)
5%	ใช้เวลาประมาณ 60-75 วินาที (เฉพาะ Gasoline)
10% หยุดกลั่น	ควบคุมให้ได้ประมาณ 4-5 มล./นาที
20% หยุดกลั่น	ควบคุมให้ได้ประมาณ 4-5 มล./นาที
30% หยุดกลั่น	ควบคุมให้ได้ประมาณ 4-5 มล./นาที
40% หยุดกลั่น	ควบคุมให้ได้ประมาณ 4-5 มล./นาที
50% หยุดกลั่น	ควบคุมให้ได้ประมาณ 4-5 มล./นาที
60% หยุดกลั่น	ควบคุมให้ได้ประมาณ 4-5 มล./นาที
70% หยุดกลั่น	ควบคุมให้ได้ประมาณ 4-5 มล./นาที
80% หยุดกลั่น	ควบคุมให้ได้ประมาณ 4-5 มล./นาที
90% หยุดกลั่น	ควบคุมให้ได้ประมาณ 4-5 มล./นาที
93% หยุดกลั่น	หยุดปรับความร้อน (ค้างไว้จนถึงอุณหภูมิสุดท้าย เฉพาะ Gasoline)
94% หยุดกลั่น	หยุดปรับความร้อน (ค้างไว้จนถึงอุณหภูมิสุดท้าย เฉพาะ Diesel)
95% หยุดกลั่น	ปล่อยอุณหภูมิขึ้นอย่างอิสระ
อุณหภูมิสุดท้าย (FBT,EP)	ไม่เกิน 5 นาที (นับจาก 94% เฉพาะ Diesel) หรือ ไม่เกิน 3-5 นาที (นับจาก 93% เฉพาะ Gasoline)

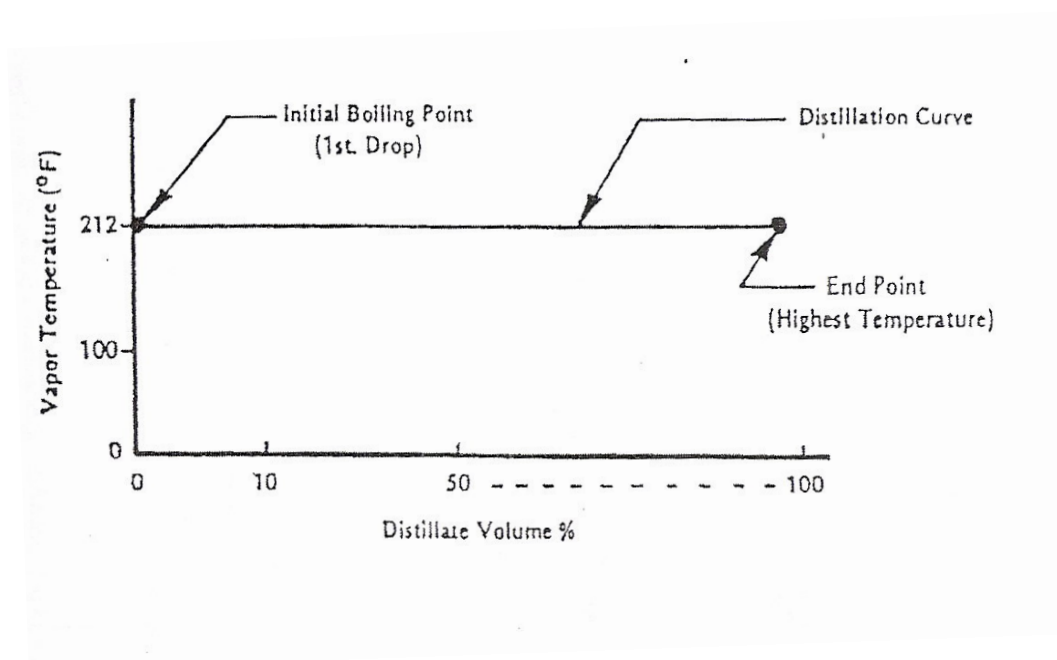
8. เมื่อหยดแรกตกลง ให้อ่านอุณหภูมิทันที และอ่านอุณหภูมิทุก ๆ จุดตามข้อ 7 (ยกเว้น 93% และ 94%) จนกระทั่งอุณหภูมิสุดท้าย (ถ้าไม่ต้องการอุณหภูมิสุดท้ายให้ปิดสวิทช์ เครื่องทันที ณ 91% หยดกลับ

หมายเหตุ : Gasoline ก่อนและหลังกลั่น อุณหภูมิควรใกล้เคียงกันประมาณ 13-18 องศาเซลเซียส Diesel ก่อนและหลังกลั่น อุณหภูมิควรใกล้เคียงกันประมาณอุณหภูมิห้อง

9. ถ้าต้องการทราบการสูญเสีย (loss) ให้กลั่นจนกระทั่งอุณหภูมิสุดท้าย (FBP) วัด ตัวอย่างที่เหลือที่ก้นขวดกลั่น (residue) และปริมาณหยดกลับสะสม (recovery)

$$\% \text{ loss} = 100 - (\text{recovery} + \text{residue})$$

ปกติสารบริสุทธิ์จะมีจุดเดือดคงที่ตลอดเวลาการกลั่น ตามรูป แต่ถ้ามีสารปนเปื้อน จะทำให้มีการเบี่ยงเบนหรือเปลี่ยนไปของอุณหภูมิ

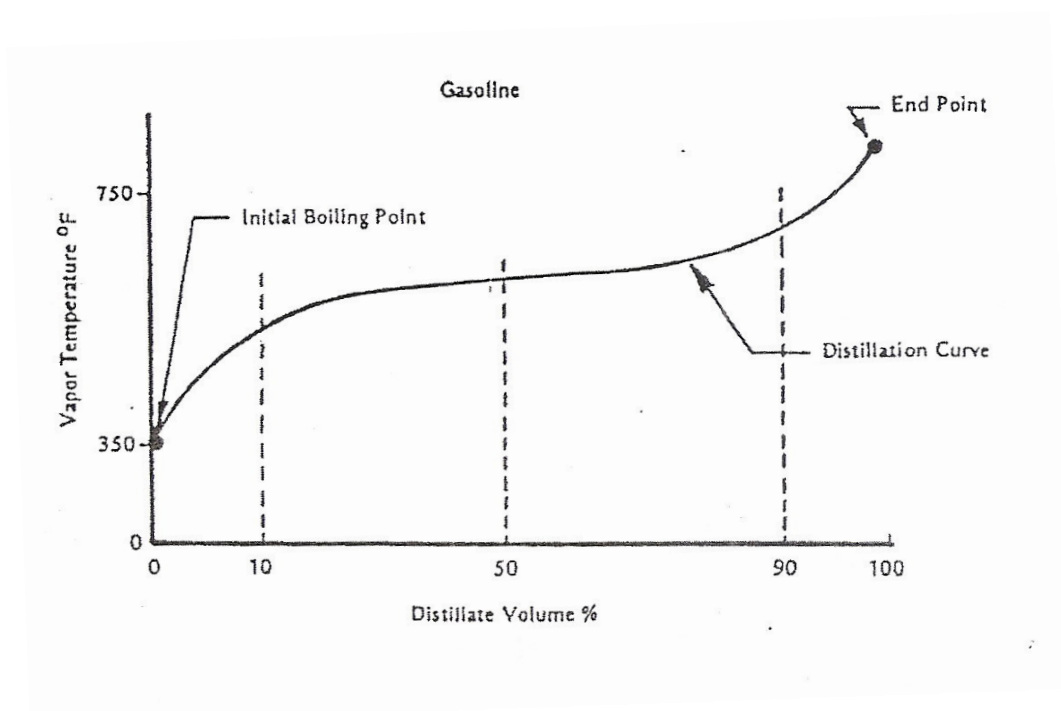


การกลั่นน้ำมันตามมาตรฐาน ASTM ที่ 10, 50 และ 90% จะบอกให้ทราบถึงคุณสมบัติของน้ำมัน ดังนี้

ที่ปริมาตร 10% จะบอกถึงการสตาร์ทเครื่องยนต์

ที่ปริมาตร 50% จะบอกถึงการเดินเครื่องยนต์ และอัตราเร่ง

ที่ปริมาตร 90% จะบอกถึงการไอเสียของเครื่องยนต์ ดังแสดงในรูป



ภาคผนวก ข

กระบวนการทดลอง

ตารางที่ ข.1 ศึกษาปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม

อุณหภูมิ (°C)	เวลาในการทำ ปฏิกิริยา(ชม.)	อัตราส่วนเชิง โมล (PFAD /MeOH)	เฟอร์ริกซัลเฟตบนผง ถ่านกัมมันต์ (wt%)	ตัวเร่งปฏิกิริยา (g/25g PFAD)
95	2	1:12	20	2
95	2	1:12	20	4
95	2	1:12	20	6
95	2	1:12	20	8
95	2	1:12	20	10
95	2	1:12	20	12

X_1 = ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา (g) ที่เหมาะสม

ตารางที่ ข.2 ศึกษาเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสม

อุณหภูมิ (°C)	เวลาในการทำ ปฏิกิริยา(ชม.)	อัตราส่วนเชิง โมล (PFAD /MeOH)	เฟอร์ริกซัลเฟตบนผง ถ่านกัมมันต์ (wt%)	ตัวเร่งปฏิกิริยา (g/25g PFAD)
95	2	1:12	10	X_1
95	2	1:12	20	X_1
95	2	1:12	30	X_1

X_2 = เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสม

ตารางที่ ข.3 ศึกษาอัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอลที่เหมาะสม

อุณหภูมิ (°C)	เวลาในการทำ ปฏิกิริยา(ชม.)	อัตราส่วนเชิงโมล (PFAD /MeOH)	เฟอร์ริกซัลเฟตบนผง ถ่านกัมมันต์ (wt%)	ตัวเร่งปฏิกิริยา (g/25g PFAD)
95	2	1:1	X ₂	X ₁
95	2	1:4	X ₂	X ₁
95	2	1:8	X ₂	X ₁
95	2	1:12	X ₂	X ₁
95	2	1:14	X ₂	X ₁

X₃= อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอลที่เหมาะสม

ตารางที่ ข.4 ศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม

อุณหภูมิ (°C)	เวลาในการทำ ปฏิกิริยา(ชม.)	อัตราส่วนเชิงโมล (PFAD /MeOH)	เฟอร์ริกซัลเฟตบนผง ถ่านกัมมันต์ (wt%)	ตัวเร่งปฏิกิริยา (g/25g PFAD)
95	0.5	X ₃	X ₂	X ₁
95	1	X ₃	X ₂	X ₁
95	2	X ₃	X ₂	X ₁
95	3	X ₃	X ₂	X ₁
95	4	X ₃	X ₂	X ₁
95	5	X ₃	X ₂	X ₁
95	6	X ₃	X ₂	X ₁
95	7	X ₃	X ₂	X ₁
95	8	X ₃	X ₂	X ₁
95	9	X ₃	X ₂	X ₁
95	10	X ₃	X ₂	X ₁

X₄= เวลาในการทำปฏิกิริยา(ชั่วโมง)ที่เหมาะสม

ตารางที่ ข.5 แสดงสถานะที่เหมาะสม

ตัวเร่งปฏิกิริยา (g/25g PFAD)	เฟอร์ริกซัลเฟตบนผง ถ่านกัมมันต์ (wt%)	อัตราส่วนเชิงโมล (PFAD /MeOH)	เวลาในการทำ ปฏิกิริยา(ชม.)	อุณหภูมิ (°C)
X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	95

ภาคผนวก ค

ข้อมูลการวิเคราะห์

1. ผลการวิเคราะห์ % conversion ของกรดไขมันอิสระด้วยการไตเตรทที่สถานะต่าง ๆ

1.1 การศึกษาสถานะของตัวเร่งปฏิกิริยาน้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์

1. ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาน้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์

ตารางที่ ค.1 ผลการศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 100% น้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์

สถานะ : ตัวเร่งปฏิกิริยา 100% และ 300% น้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์ (ตามจุด wetness point) ปริมาณ 5, 10, 15 และ 20 กรัม อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลิ่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:12 เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชม. และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา (g/25g PFAD)	Run ครั้งที่ 1	Run ครั้งที่ 2	Run ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย FFA	% FFA conversion
5	85.87	85.01	84.51	85.13	9.92
10	84.12	85.02	87.23	85.46	9.60
15	85.29	86.94	86.06	86.10	8.90
20	85.22	85.50	86.02	85.60	9.42

ตารางที่ ค.2 ผลการศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 300% น้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์

ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา (g/25g PFAD)	Run ครั้งที่ 1	Run ครั้งที่ 2	Run ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย FFA	% FFA conversion
5	87.54	86.30	85.40	86.41	8.60
10	84.90	84.88	84.02	84.60	10.48
15	82.19	84.51	84.80	83.83	11.30
20	85.78	84.60	84.75	85.04	10.96

2. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ ค.3 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาน้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์กับตัวเร่งปฏิกิริยาอื่น ๆ

สถานะ : ตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 10 กรัม อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:12 เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชม. และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 10 กรัม (g/25g PFAD)	Run ครั้งที่ 1	Run ครั้งที่ 2	Run ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย FFA	% FFA conversion
ผงถ่านกัมมันต์	84.53	86.42	85.31	85.42	9.55
กรดอะซิติก	83.35	85.82	84.55	84.57	10.50
น้ำส้มควันไม้	85.49	88.52	86.22	86.74	8.21
น้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์	84.90	84.88	84.02	84.60	10.48

หมายเหตุ : ใช้ 300% น้ำส้มควันไม้บนผงถ่านกัมมันต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

1.2 การศึกษาสถานะของตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์

1.2.1 การศึกษาสถานะของตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ที่

อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

1. ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ ค.4 ผลการศึกษาปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์

สถานะ : ตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ปริมาณ 2, 4, 6, 8 และ 10 กรัม อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:12 เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชม. และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา (g/25g PFAD)	Run ครั้งที่ 1	Run ครั้งที่ 2	Run ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย FFA	% FFA conversion
2	36.59	35.06	-	35.83	62.00
4	27.99	28.72	-	28.36	69.64
6	25.28	24.87	-	25.08	73.46
8	24.06	24.46	-	24.27	74.31
10	22.61	22.93	-	22.77	75.91

2. ผลของเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ ค.5 ผลการศึกษาเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่าน-กัมมันต์

สภาวะ : ตัวเร่งปฏิกิริยา 10, 20 และ 30 wt% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ปริมาณ 6 กรัม อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:12 เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชม. และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

เฟอร์ริกซัลเฟตบน ผงถ่านกัมมันต์ (wt%)	Run ครั้งที่ 1	Run ครั้งที่ 2	Run ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย FFA	% FFA conversion
10	30.13	36.66	-	33.4	64.65
20	25.28	24.87	-	25.08	73.46
30	23.90	24.58	-	24.24	74.34

3. ผลของอัตราส่วนเชิงโมล

ตารางที่ ค.6 ผลการศึกษาอัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล

สภาวะ : ตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ปริมาณ 6 กรัม อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:1-1:16 เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชม. และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนเชิงโมล (PFAD /MeOH)	Run ครั้งที่ 1	Run ครั้งที่ 2	Run ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย FFA	% FFA conversion
1:1	83.33	82.29	-	82.80	17.14
1:4	44.16	46.92	-	45.54	51.81
1:8	28.28	28.20	-	28.24	70.11
1:12	25.28	24.87	-	25.08	73.46
1:14	20.52	20.25	-	20.40	78.41
1:16	20.76	21.25	-	21.00	77.77

1.2.2 การศึกษาสถานะของตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส

1. ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ ค.7 ผลการศึกษาปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์

สถานะ : ตัวเร่งปฏิกิริยา 20% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ปริมาณ 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 กรัม อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:12 เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชม. และอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส

ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา (g/25g PFAD)	Run ครั้งที่ 1	Run ครั้งที่ 2	Run ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย FFA	% FFA conversion
2	30.57	31.53	-	31.05	67.14
4	21.74	21.28	-	21.51	72.24
6	17.00	18.70	-	17.85	81.11
8	14.84	15.60	15.64	15.36	83.75
10	11.34	10.94	-	11.14	88.21
12	10.34	11.20	-	10.77	88.60

2. ผลของเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ ค.8 ผลการศึกษาเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์

สถานะ : ตัวเร่งปฏิกิริยา 10, 20 และ 30 wt% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ปริมาณ 10 กรัม อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:12 เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชม. และอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส

เฟอร์ริกซัลเฟตบน ผงถ่านกัมมันต์ (wt%)	Run ครั้งที่ 1	Run ครั้งที่ 2	Run ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย FFA	% FFA conversion
10	26.17	26.90	-	26.23	72.24
20	11.34	10.94	-	11.14	88.21
30	16.48	17.12	-	16.80	82.22

3. ผลของอัตราส่วนเชิงโมล

ตารางที่ ค.9 ผลการศึกษาอัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล

สถานะ : ตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt% เฟอริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ปริมาณ 10 กรัม อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:1-1:14 เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชม. และ อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนเชิงโมล (PFAD /MeOH)	Run ครั้งที่ 1	Run ครั้งที่ 2	Run ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย FFA	% FFA conversion
1:1	61.86	63.89	-	62.88	33.45
1:4	42.17	43.67	43.32	43.05	54.44
1:8	19.38	18.32	-	18.85	80.10
1:12	11.34	10.94	-	11.14	88.21
1:14	11.00	11.89	-	11.45	87.88

4. ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยา

ตารางที่ ค.10 ผลการศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยา

สถานะ : ตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ปริมาณ 10 กรัม อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:12 อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 0.5-10 ชม.

เวลาในการทำปฏิกิริยา(ชม.)	Run ครั้งที่ 1	Run ครั้งที่ 2	Run ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย FFA	% FFA Conversion
0.5	41.18	45.74	-	43.46	54.00
1	27.09	30.32	-	28.71	69.62
2	12.56	11.30	-	11.93	87.38
3	7.10	6.59	-	6.85	92.75
4	3.75	3.54	-	3.65	96.14
5	2.34	2.48	-	2.41	97.45
6	1.63	1.80	-	1.72	98.20
7	1.51	1.57	-	1.54	98.37
8	1.47	1.50	-	1.50	98.41
9	1.75	1.75	-	1.75	98.15
10	1.76	1.75	-	1.76	98.13

1.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ ค.11 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สถานะที่เหมาะสมจากการทดลอง

สถานะ : ตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 10 กรัม อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:12 เวลาในการทำปฏิกิริยา 6 ชม. และอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	Run ครั้งที่ 1	Run ครั้งที่ 2	Run ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย FFA	% FFA Conversion
ผงถ่านกัมมันต์	84.53	86.42	85.31	85.42	9.60
20 wt% เฟอร์ริกซัลเฟตบน ผงถ่านกัมมันต์	1.63	1.80	-	1.72	98.20
20 wt% กรดซัลฟิวริกบน ผงถ่านกัมมันต์	1.65	1.55	-	1.60	98.30
100 wt% เฟอร์ริกซัลเฟต	1.71	1.54	-	1.63	98.30

1.4 การศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการนำกลับมาใช้ซ้ำ

ตารางที่ ค.12 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการนำกลับมาใช้ซ้ำ

สถานะ : ตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ปริมาณ 10 กรัม อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:12 เวลาในการทำปฏิกิริยา 6 ชม. และอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส

การใช้ซ้ำ (ครั้งที่)	Run ครั้งที่ 1	Run ครั้งที่ 2	Run ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย FFA	% FFA Conversion
1	2.86	2.97	-	2.92	96.91
2	10.83	10.34	-	10.59	88.79
3	14.24	13.20	-	13.72	85.48
4	21.36	20.54	-	20.95	77.83
5	26.48	27.52	-	27.00	71.43
6	31.51	31.86	-	31.69	66.47
7	37.68	38.36	-	38.02	59.77
8	42.00	43.47	-	42.74	54.77
9	42.39	43.00	-	42.70	54.81
10	41.95	43.59	-	42.77	54.74

1.5 การเปรียบเทียบการผลิตเมทิลเอสเทอร์ที่อุณหภูมิ 70 และ 95 องศาเซลเซียส

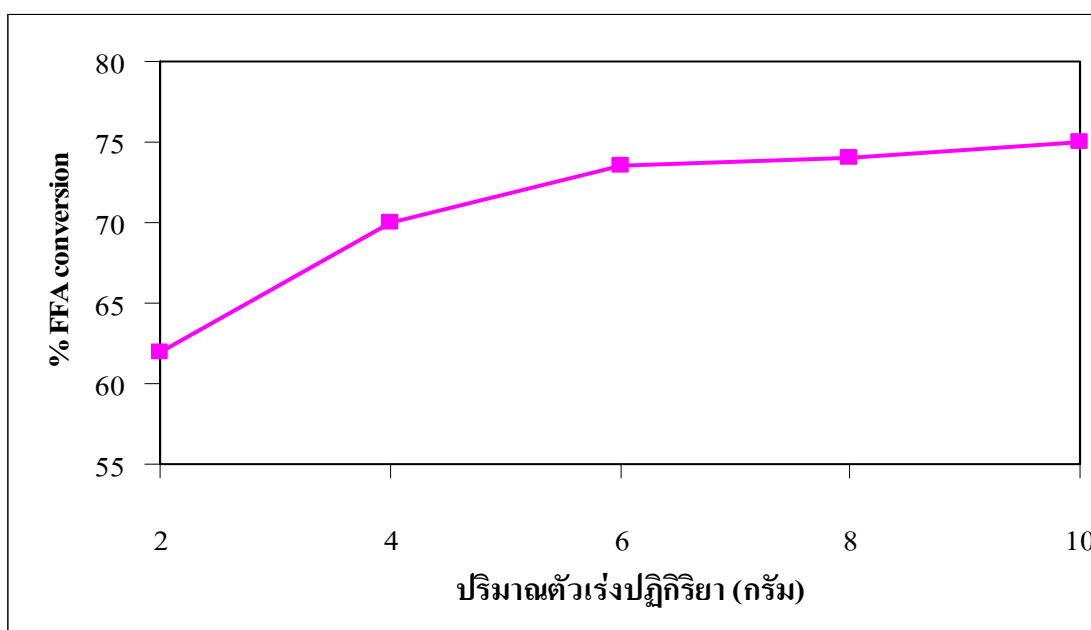
ตารางที่ ค.13 ผลการศึกษาการผลิตเมทิลเอสเทอร์ที่อุณหภูมิ 70 และ 95 องศาเซลเซียส ด้วยการทดลองแบบแบทช์

สถานะ : ตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ปริมาณ 10 กรัม อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:12 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 6 ชม.

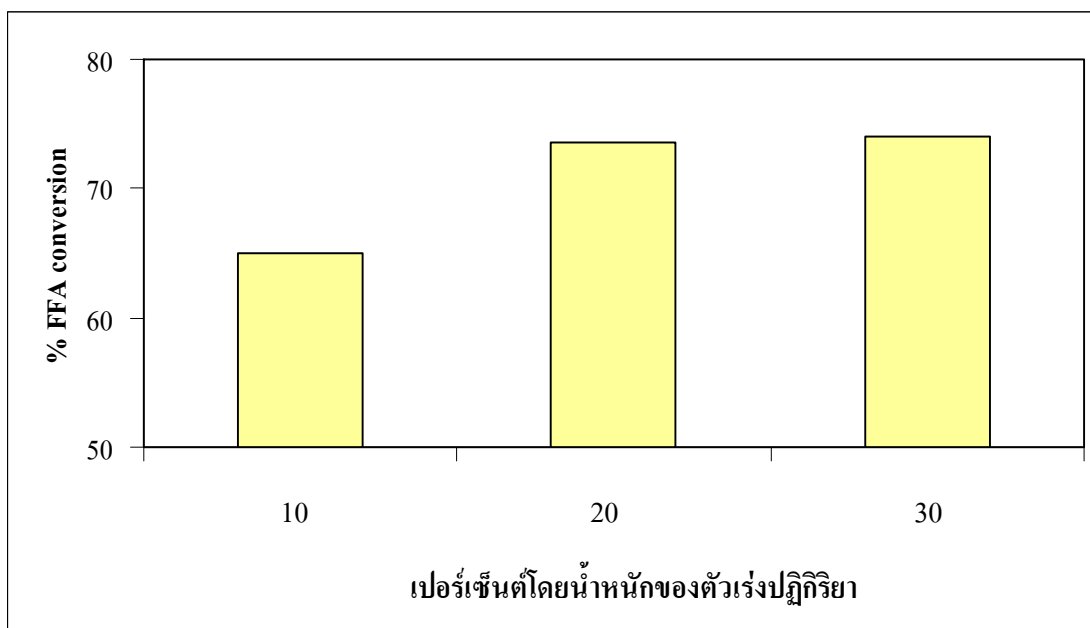
เวลา (ชม.)	อุณหภูมิ 70°C				อุณหภูมิ 95°C			
	Run ครั้งที่ 1	Run ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	% FFA conversion	Run ครั้งที่ 1	Run ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	% FFA conversion
0.5	46.60	49.30	48.00	49.20	2.86	2.97	43.46	54.00
1	29.00	32.00	30.50	67.70	10.83	10.34	28.71	69.62
2	15.10	15.20	15.15	84.00	14.24	13.20	11.93	87.38
3	7.43	7.10	7.30	92.30	21.36	20.54	6.85	92.75
4	5.02	5.40	5.21	94.50	26.48	27.52	3.65	96.14
5	3.30	3.45	3.40	96.40	31.51	31.86	2.41	97.45
6	2.70	3.50	3.10	96.70	2.86	2.97	1.72	98.20

2. ผลการศึกษาสภาวะของตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

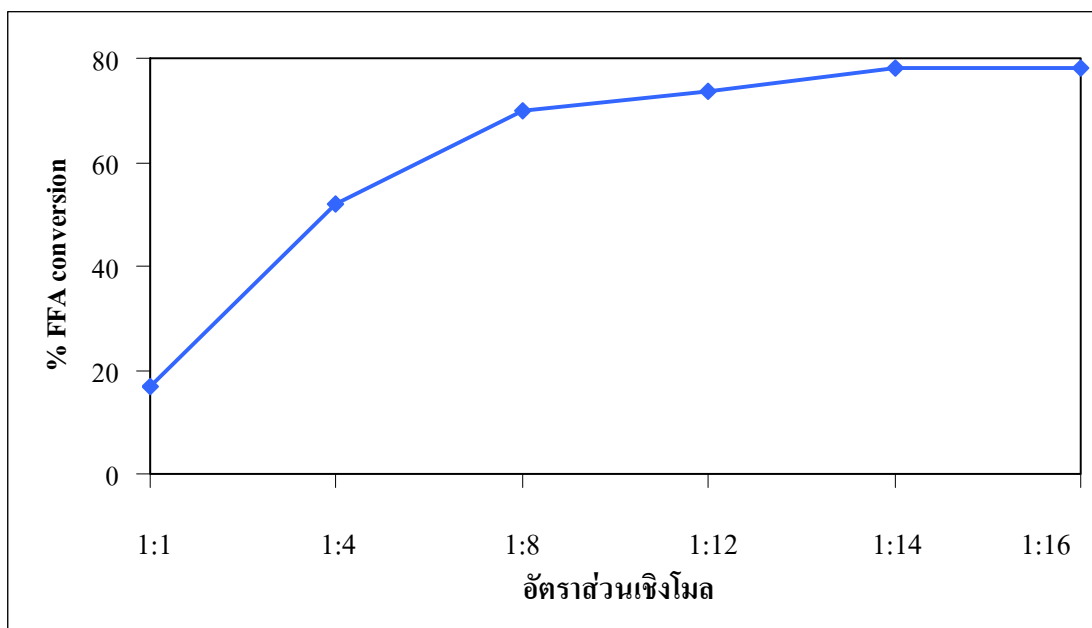
การทดลองเบื้องต้นเพื่อศึกษาปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ ได้ทำการทดลองที่สภาวะอัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:12 ใช้ 20 wt% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปริมาณต่าง ๆ คือ 2, 4, 6, 8, และ 10 กรัม ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชม. และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงดังภาพประกอบที่ ค.1 จากนั้นจึงทำการศึกษาเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งผลการทดลองแสดงดังภาพประกอบที่ ค.2 และการศึกษาอัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอลผลการทดลองแสดงดังภาพประกอบที่ ค.3



ภาพประกอบที่ ค.1 ผลการศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ที่สภาวะ: ตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 2, 4, 6, 8 และ 10 กรัม อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:12 เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชม. และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส



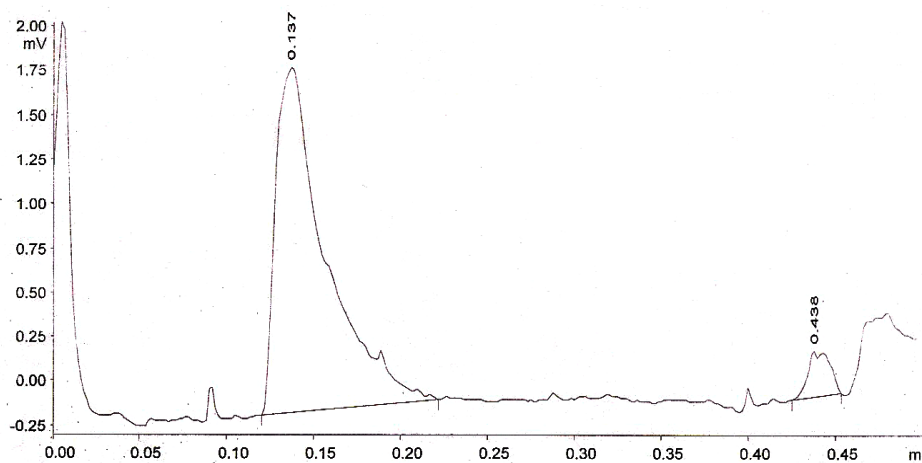
ภาพประกอบที่ ค.2 ผลการศึกษาเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ที่สภาวะ : ตัวเร่งปฏิกิริยา 10, 20 และ 30 wt% เฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ปริมาณ 6 กรัม อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:12 เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชม. และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส



ภาพประกอบที่ ค.3 ผลการศึกษาอัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอลที่สถานะ : 20 wt% เฟอริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์ปริมาณ 6 กรัม อัตราส่วนเชิงโมลของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:1-1:16 เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชม. และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

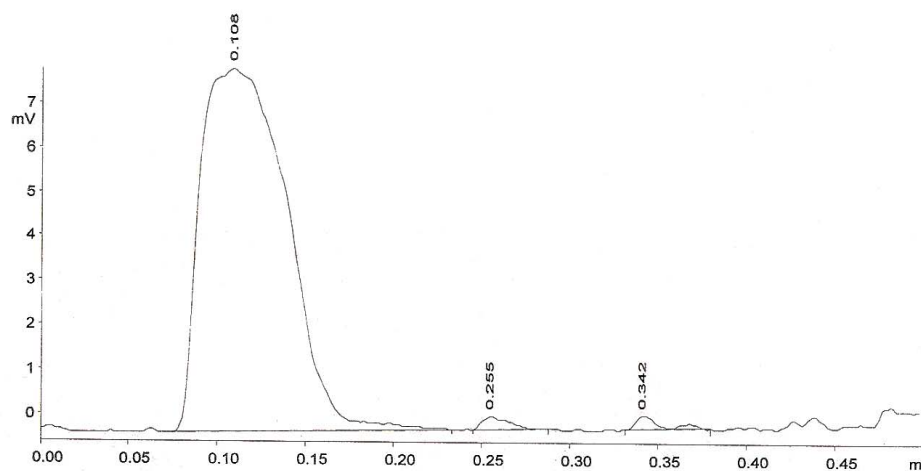
3. ผลการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค TLC-FID

3.1. การศึกษาองค์ประกอบของส่วนกลิ่นกรดไขมันปาล์ม



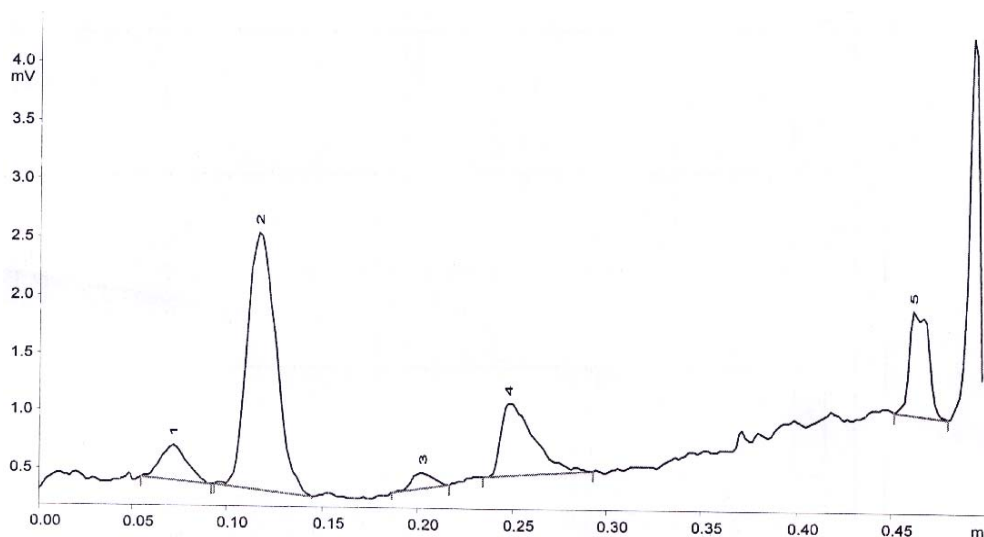
ภาพประกอบที่ ค.4 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของส่วนกลิ่นกรดไขมันปาล์มด้วย TLC- FID

3.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของเมทิลเอสเทอร์



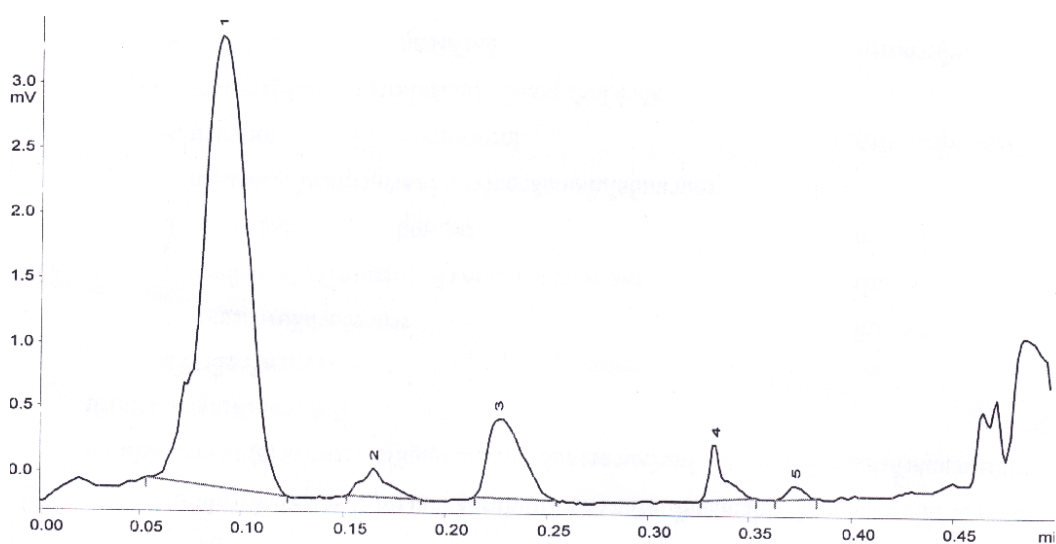
ภาพประกอบที่ ค.5 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของเมทิลเอสเทอร์ด้วย TLC-FID

3.3 ผลการวิเคราะห์เมทิลเอสเทอร์จากกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง (รอบที่ 1)



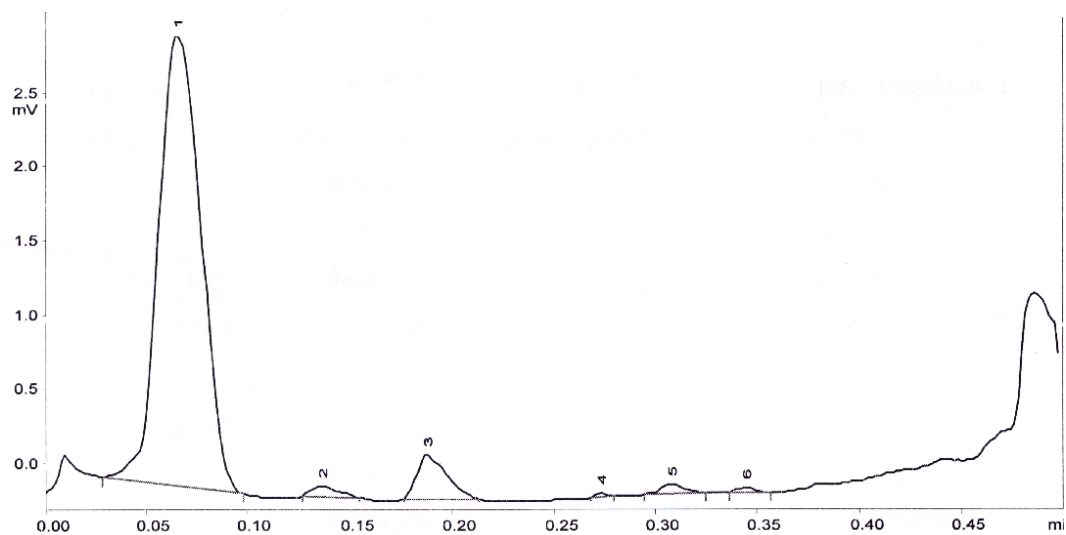
ภาพประกอบที่ ค.6 แสดงผลการวิเคราะห์เมทิลเอสเทอร์จากการวนรอบที่ 1

3.4 ผลการวิเคราะห์เมทิลเอสเทอร์จากกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง (รอบที่ 2)



ภาพประกอบที่ ค.7 แสดงผลการวิเคราะห์เมทิลเอสเทอร์จากการวนรอบที่ 2

3.5 ผลการวิเคราะห์เมทิลเอสเทอร์จากกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง (รอบที่ 3)



ภาพประกอบที่ ค.8 แสดงผลการวิเคราะห์เมทิลเอสเทอร์จากการวนรอบที่ 3

ภาคผนวก ง

ข้อมูลการเผยแพร่ผลงานวิจัยของวิทยานิพนธ์

Organized by:



In cooperation with:



Co-sponsored by:





PROCEEDINGS

15th REGIONAL SYMPOSIUM ON CHEMICAL ENGINEERING (RSCE)

in conjunction with the

22nd SYMPOSIUM OF MALAYSIAN CHEMICAL ENGINEERS (SOMChE)

2-3 December 2008

"INNOVATIONS FOR SUSTAINABLE FUTURE"

- FRONT PAGE
- SCIENTIFIC COMMITTEE
- ORGANISING COMMITTEE
- EDITORIAL BOARD
- VOL. I - CONTENT
- VOL. II - CONTENT
- HELP
-  Install Acrobat Reader 8.0
- EXIT



PROCEEDINGS

APPLICATION OF FERRIC SULFATE LOADED ON ACTIVATED CARBON AS SOLID CATALYST FOR BIODIESEL PRODUCTION

M. Suwanwong*, S. B. Ratanawilai, P. Meyer
Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering,
Prince of Songkla University, Hatyai, Songkhla 90112, Thailand
*Email: maneechanok@hotmail.com

Keywords: PFAD; Ferric Sulfate; Activated Carbon; Biodiesel Production

ABSTRACT

The production of fatty acid methyl ester (FAME) from palm fatty acid distillate (PFAD) having high free fatty acid (FFA) by using esterification reaction was investigated. The esterification experiments were carried out in a batch reactor with temperature at 95°C. The four parameters were varying as follows; molar ratio of PFAD to methanol from 1:1 to 1:14, reaction time 0.5 to 10 h, an activated carbon loaded with 10, 20 and 30 wt% of ferric sulfate as a solid acid catalyst and quantity of catalyst from 8 to 48 %(wt/wt of PFAD). The optimum condition for this process was observed at 1:12 molar ratio of PFAD to methanol, reaction time 6 h, activated carbon loaded with 20 wt% of ferric sulfate at 40 %(wt/wt of PFAD). The conversion of FFA average was 98.22%. The final FAME product met with the ASTM D6751-02

INTRODUCTION

Due to the increase in the price of the petroleum and the environmental concerns about pollution coming from the car gases, biodiesel is becoming a developing area of high concern (Marchetti, et al. 2007). Thus, looking for an alternative way to develop a substitute of diesel is an imperious task for humans. The main advantages of using this alternative fuel are its renewability, better quality of exhaust gas emissions, its biodegradability and, given that all the organic carbon present is photosynthetic in origin, it does not contribute to a net rise in the level of carbon dioxide in the atmosphere if all of the energy inputs for the biodiesel production are non-fossil-based, and consequently to the greenhouse effect (Wang et al. 2006, Barnwal & Sharma, M.P. 2005.). Biodiesel fuel can be produced from oils/fats through transesterification of triglycerides (TG) with methanol. At present, most of the methods in transesterification use alkali catalysts (Freedman et al. 1984). In the alkali-catalyzed method, however, free fatty acids (FFA) react with a catalyst producing undesirable saponified products. Therefore, this process needs sophisticated purification steps for

removal of the saponified products as well as catalyst, thus resulting in the lower yield in FAME (Minami & Saka 2006). To avoid this problem. For feedstocks having the high FFA content. The acid-catalyzed esterification of the oil is an alternative has been studied. In this work, the direct esterification reaction of the FFA present in acid oil with methanol and acid catalyst has been studied. The acid catalyst is activated carbon loaded with ferric sulfate. The palm fatty acid distillate (PFAD) is a by-product from the physical refining of Crude palm oil (CPO) and contains mainly free fatty acids (Bahurmiz & Ng 2007). It consists of 94.49 wt% FFA to be used as feedstock for production of biodiesel was studied.

METHOD

Materials

PFAD was obtained from Chumporn Palm Oil Industry public company Limited. It consists of 94.49 wt% FFA. All chemicals including 99% methanol (MeOH), 98% sulfuric acid (H_2SO_4), AR.ferric sulfate and The Activated carbon used as a support had a surface area 1,184.24 m^2/g .

Catalyst Preparation

Prepare 10, 20 and 30 %wt ferric sulfate were loaded onto activated carbon by an wetness point (wetness point of activated carbon is 0.55 ml/g) followed by drying in oven at 70°C for 24 h. Then, The sample were then placed inside sealed containers in a dessicator.

Esterification

Esterification reaction were in a three-necked batch reactor (total volume 500 ml) equipped with a reflux condenser to avoid alcohol vaporization. The three-necked reactor was immersed in a constant temperature oil bath equipped with a temperature controller. A plate type magnetic stirrer was used to control the rate of the reaction mixture (Ozbay et al. 2008). Esterification reaction were carried out in the temperature 95°C. The acid catalyzed process include 3 level of activated carbon loaded with ferric sulfate as solid acid catalyst, 10, 20, 30 wt%; 6 level of amount catalyst, 8, 16, 24, 32, 40, 48 %(wt/wt of PFAD); 5 level of methanol to PFAD in mole ratio, 1:1, 1:4, 1:8, 1:12, 1:14 ; 11 level of reaction time, 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9,10 h, respective. Each 25 g sample mixed with methanol and catalyst was heat at 95°C. The reaction mixture was stirred at 1000 rpm to increase the dispersion of the reactants. In our esterification experiment, after each sampling of the reaction mixture. The new FFA concentration value were analyzed by standard titration method (Ozbay et al. 2008). % Methyl ester were determine by TLC. The fuel properties were determine by ASTM D6751-02

RESULTS AND DISCUSSION

Effect of %loaded of catalyst

FFA conversion may also be increased by the use of higher concentration of the catalyst. To explore this possibility, the effects of the concentration of catalyst on FFA conversion were investigated at 95°C, and the results are shown in Fig.1. A feedstock to methanol molar ratio of 1:12 was used. Three different %loaded of catalyst (activated carbon loaded with 10, 20 and 30 wt% ferric sulfate as a solid acid catalyst). Amount of catalyst is 24 %(wt/wt of PFAD) and reaction time of 2 h were also used in the investigation. As shown in Fig.1. The conversion of biodiesel increased from 64.66 to 81.12 % when the catalyst loaded was increased from 10 to 20% within 2 h of reaction. Therefore 20% of ferric sulfate loaded on activated carbon was assume to be optimal condition and was used in further investigation.

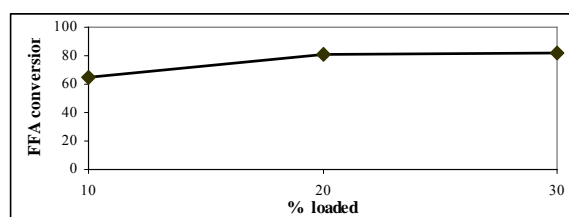


FIGURE1 Effects of %loaded of catalyst on FFA conversion.

Effects of amount of catalyst on FFA conversion

Fig.2. shows the effect of the amount of activated carbon loaded with ferric sulfate on FFA conversion. The operating parameter is temperature 95°C, molar ratio of PFAD to methanol 1:12, reaction time 2 h and activated carbon loaded with 20%wt ferric sulfate as solid acid catalyst. When 40 %(wt/wt of PFAD) of catalyst was add, 88.55% of FFA was converted into FAME in 2 h. However, when the amount of catalyst exceeded 40 wt% the rate of reaction increased very lightly.

Effect of mole ratio of PFAD to methanol on FFA conversion

An excess of methanol is necessary for the esterification of FFA with methanol because it can increase the rate of methanolysis [8]. In this study, varying molar ratio (1:1-1:14) of PFAD and methanol were reacted in the precence of activated carbon loaded with 20 wt% of ferric sulfate at 40 %(wt/wt of PFAD) at 95°C for 2 h and the result are shown in Fig.3. The percentage conversion of FFA increase from 1:1 to 1:12. The more was the excess of methanol added, the higher was the conversion of FFA to FAME in the same reaction time. However, when the ratio was over 1:12, the increment of conversion was relatively slow.

Effect of reaction time on FFA conversion

As far as the effect of the reaction time on FFA conversion was concerned, the effect of reaction time on FFA conversion is shown in Fig.4. Ferric sulfate loaded on activated carbon can catalyze methanolysis of FFA, so the acid value can be calculated for the conversion of FFA. Ferric sulfate loaded on activated carbon was used to catalyze the esterification of short chain organic acid with alcohol and showed good activity as a solid Lewis acid (Wang et al. 2007, Peng et al. 1999, Wen et al. 2001). The results show that the methanolysis of FFA in PFAD. The reaction rate was increased during 0.5 to 6 h of reaction, over 98.22% of FFA was converted into FAME within 6 h, so the excess of boiling methanol was easy to react with FFA. The reaction of methanolysis approached equilibrium after 6 h, and prolonging the reaction time did not increase the conversion of FFA significantly.

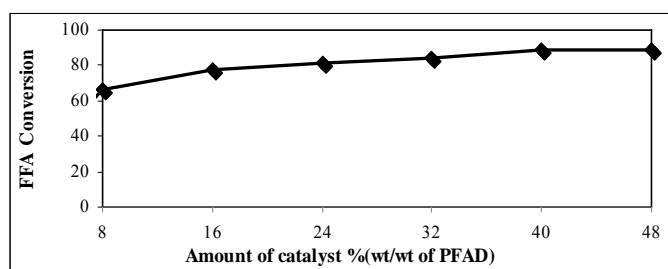


FIGURE 2 Effects of amount of catalyst on FFA conversion.

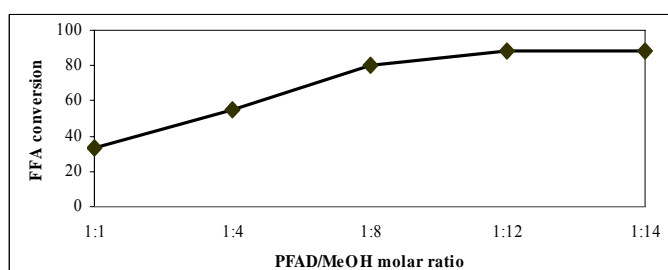


FIGURE 3 Effect of mole ratio of PFAD to methanol on FFA conversion.

Optimal parameter of FFA conversion

The optimal parameters of ferric sulfate loaded on activated carbon catalysis of PFAD obtained by range analysis are the following: reaction temperature 95°C, molar ratio of PFAD to methanol 1:12, reaction time 6 h, activated carbon loaded with 20 wt% of ferric sulfate at 40 % (wt/wt of PFAD). The conversion of FFA was 98.22% when the reaction was performed under these conditions. %Methyl ester were determine by TLC. It consists of 98 wt%FAME.

In this study, a comparative study on preparation of biodiesel from PFAD by different catalyst was investigated. One process was traditional acid catalyzed, in which the synthesis of biodiesel was catalyzed by sulfur acid. When 20 wt% of H_2SO_4 loaded on activated carbon as solid acid catalyst was added, 98.33% of FFA was converted into FAME in the same condition.

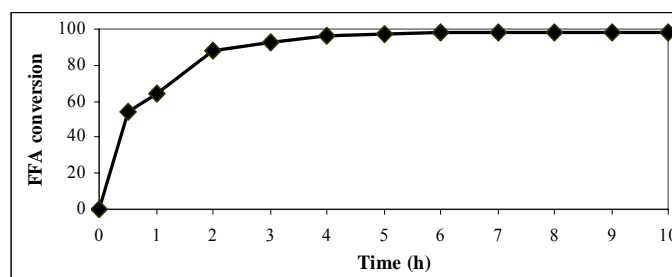


FIGURE 4 Effect of reaction time on FFA conversion.

Fuel properties of PFAD biodiesel

The fuel properties of biodiesel obtained in this work are summarized in Table 1. It can be seen that most of its properties are in the range of fuel properties prescribed in the latest American standards for biodiesel, except Cloud point and pour point. PFAD mainly consists of saturated FFA (>49 wt%) which results in high values of pour point of PFAD biodiesel. However, a blend of diesel and PFAD biodiesel is possible in practice (Chongkhong et al. 2007).

TABLE 1 Fuel properties of PFAD biodiesel

Properties	Unit	Test method	PFAD biodiesel in this work	Biodiesel standards ASTM D6751-02
Density at 15 °C	kg/m ³	ASTM D4052	-	870–900
Viscosity at 40 °C	mm ² /s	ASTM D445	5.55	1.9–6.0
Flash point	°C	ASTM D93	190	130 min
Cloud point	°C	ASTM D2500	14	–3 to 12
Pour point	°C	ASTM D97	12	–15 to 10
Copper corrosion	Number	ASTM D130	1	3 max

CONCLUSION

Activated carbon loaded with ferric sulfate acting as heterogeneous acid solid catalyst shows good activity to catalyze the methanolysis of FFA in PFAD. Compared with sulfuric acid, this catalyst is environmental friendly, easy to separate from the system, more efficient, reusable and does not demand high cost equipment for anti-corrosion. The conversion of FFA in the PFAD reached 98.22% when the parameters are as follows: reaction temperature 95°C, molar

ratio of PFAD to methanol 1:12, reaction time 6 h, activated carbon loaded with 20 wt% of ferric sulfate at 40 % (wt/wt of PFAD). The fuel properties of biodiesel obtained in this work are in the range of fuel properties (ASTM D6751-02), except Cloud point. and pour point. However, a blend of diesel and PFAD biodiesel is possible in practice.

ACKNOWLEDGMENT

The author gratefully acknowledges the financial support from the Graduate School of Prince of Songkla University.

REFERENCE

- Bahurmiz, O.M. & Ng, W.-K. 2007. Effects of dietary palm oil source on growth, tissue fatty acid composition and nutrient digestibility of red hybrid tilapia, *Oreochromis sp.*, raised from stocking to marketable size, *Aquaculture*, 262:382–392.
- Barnwal, B.K. & Sharma, M.P. 2005. *Sust. Energy Rev*, 9:363.
- Chongkhong, S., Tongurai, P., Chetpattananondh, C. & Bunyakan, C..2007. Biodiesel production by esterification of palm fatty acid distillate, *Biomass and Bioenergy*, 31:365-368.
- Freedman, B., Pryde, E.H. & Mounts, T.L.1984.Variables affecting the yields of fatty esters from transesterified vegetable oils, *JAOCS*, 61:1638–1643.
- Marchetti, J.M., Miguel, V.U. & Errazu, A.F. 2007.Possible methods for biodiesel production, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,11:1300–1311.
- Minami, E. & Saka, S..2006.Kinetics of hydrolysis and methyl esterification for biodiesel production in two-step supercritical methanol process, *Fuel*, 85: 2479–2483.
- Ozbay, N., Oktar, N. & Tapan, N.A. 2008.Esterification of free fatty acids in waste cooking oils (WCO): Role of ion-exchange resins, *Fuel*, 87:1789–1798.
- Peng, X.C., Peng, Q.J. & Ouyang, Y.Z. 1999.Synthesis of ethyl caproate catalyzed by ferric sulfate hydrate (in Chinese), *Huagong Xiandai/Mod Chem Ind*, 19(1):26–7.
- Wang, Y., Ou, S., Liu, P. & Zhang, Z. 2007.Preparation of biodiesel from waste cooking oil via two-step catalyzed process, *Energy Conversion & Management*, 48:184–188.
- Wang, Y., Ou, S., Liu, P., Xue, F. & Tang, S. 2006. Comparison of two different processes to synthesize biodiesel by waste cooking oil, *J. Molecular Catalysis A: Chemical*, 252:107–112.
- Wen, R, Long, L, Ding, L. & Yu, S.2001.*Study on synthesis of dibutyl maleate (in Chinese)*, *Jishou Daxue Xuebao/J Jishou Univ*, 22(1):78–80.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นางสาวมณีนก สุวรรณวงศ์	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	4910120032	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมี)	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	2546

การตีพิมพ์และเผยแพร่ผลงาน

M. Suwanwong, S.B. Ratanawilai, P. Meyer. 2008. Application of Ferric Sulfate Loaded on Activated Carbon as Solid Catalyst for Biodiesel Production. Proceeding of 15th Regional Symposium on Chemical Engineering (RSCE), Universiti Kebangsaan Malaysia, Malaysia, Dec 2-3, 2008, 531-536.