



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การพัฒนาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันที่ใช้แล้วด้วยปฏิกิริยาที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต

Developing Biodiesel Production from Waste Cooking Oil by Supercritical Reaction

นามผู้วิจัย นางสาวสุดาพร สุขจินดา

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์วิทยา ปิ่นสุวรรณ, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์สุจินดา กรรณสูต, ป.ร.ค.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

รักษาราชการแทน

(อาจารย์ชนากานต์ เพิ่มฉลาด, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุวัฒน์ บัวเลิศ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การพัฒนาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันที่ใช้น้ำแล้วด้วยปฏิกิริยาที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต

Developing Biodiesel Production from Waste Cooking Oil by Supercritical Reaction

โดย

นางสาวสุดาพร สุขจินดา

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรบัณฑิตสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สุดาพร สุขจินดา 2555: การพัฒนาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันที่ใช้แล้วด้วยปฏิกิริยาที่
สภาวะเหนือจุดวิกฤต ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) สาขา
วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
หลัก: รองศาสตราจารย์วิทยา ปั่นสุวรรณ, Ph.D. 113 หน้า

วัตถุประสงค์ของการวิจัยคือศึกษากระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันที่ใช้แล้วใน
ปฏิกิริยาที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต และหาปัจจัยที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันที่ใช้แล้ว
ซึ่งเป็นการลดปัญหาของเสียที่เกิดจากน้ำมันที่ใช้แล้ว ในการเกิดมลพิษสิ่งแวดล้อม และเป็นการนำ
น้ำมันที่ใช้แล้วกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ เพื่อการอนุรักษ์และรักษาสิ่งแวดล้อม ในการศึกษาได้
ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไบโอดีเซล ได้แก่ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 30:1
ถึง 60:1 อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง 250 ถึง 350 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 5 ถึง
45 นาที ปริมาณน้ำ 0 ถึง 5 เปอร์เซ็นต์ และอัตราความเร็วรอบในการกวน 500 รอบต่อนาที และ
น้ำมันไบโอดีเซลที่ได้ จะนำไปศึกษาคุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลตามวิธีมาตรฐาน และเพื่อ
เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานไบโอดีเซลชุมชนของประเทศไทย

จากการศึกษาพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันที่ใช้แล้วใน
ปฏิกิริยาที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต คืออัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 50:1
อุณหภูมิ 330 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา 30 นาที และปริมาณน้ำ 0% จะให้
เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 91.77 คุณสมบัติไบโอดีเซลที่ได้มีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานไบโอดีเซลชุมชนของประเทศไทย

ผลการเปรียบเทียบการผลิตไบโอดีเซลพบว่า การผลิตไบโอดีเซลโดยปฏิกิริยาที่สภาวะ
เหนือจุดวิกฤตให้ความบริสุทธิ์มากกว่า และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาสั้นกว่าการผลิตโดย
ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิชั่น รวมทั้งผลพลอยได้คือกลีเซอรอลจะให้ความบริสุทธิ์สูงกว่าด้วย

ลายมือชื่อนิติ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Sudaporn Sukchinda 2012: Developing Biodiesel Production from Waste Cooking Oil by Supercritical Reaction. Master of Science (Environmental Science), Major Field: Environmental Science, Department of Environmental Science. Thesis Advisor: Associate Professor Vittaya Punsuvon, Ph.D. 113 pages.

The objective of this research was to study the optimum condition of biodiesel production from waste cooking oil using supercritical reaction, which could reduce waste to environment. In this work the process parameters of molar ratio of methanol to oil 30:1 to 60:1, temperature 250 to 350°C, reaction time 5 to 45 minute, water content 0 to 5% and 500 rpm of stirring rate were studied. The property of the biodiesel obtained at the optimum condition was analyzed and compared to the community biodiesel standard of Thailand.

The result from this study showed the optimum conditions for biodiesel production from waste cooking oil using supercritical methanol were molar ratio of methanol to oil 50:1, temperature of 330°C, reaction time as 30 min and water content as 0 wt%. This condition gave 91.77% of fatty acid methyl esters. The quality of biodiesel met community biodiesel standard of Thailand.

The result comparison of biodiesel production showed that supercritical reaction gave higher purity and shorter time than transesterification reaction. In addition, glycerol obtained from this process had higher purity.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์วิทยา ปั้นสุวรรณ ประธานกรรมการที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ อาจารย์สุจินดา วรรณสุด และอาจารย์ชนากานต์ เพิ่มฉลาด กรรมการที่ปรึกษา ที่ให้ คำปรึกษาในการเรียน การค้นคว้าวิจัย และเอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ในการวิจัยในครั้งนี้ ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ และกราบขอบพระคุณ รศ.อิทธิพล ราศรีเกรียงไกร และ ดร.ศิริพร ลากเกียรติถาวร ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ที่ให้ความกรุณาตรวจแก้ไข วิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ที่กรุณาให้ทุน สนับสนุนและส่งเสริมการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์ความเป็นเลิศทาง วิชาการด้านปาล์มน้ำมัน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ทุกท่านที่ให้คำปรึกษาในการทำวิจัย ตลอดจน เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ในการทำวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบคุณกองยานพาหนะ อาคาร และสถานที่ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่อนุเคราะห์ตัวอย่างน้ำมันใช้แล้วในการวิจัย รวมทั้งเพื่อนนิสิตปริญญา โทวิทยาลัยสิ่งแวดล้อมรุ่น 34 ที่คอยเป็นกำลังใจให้

คุณค่าแห่งความดีหรือประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้แต่บิดา มารดา ครูบาอาจารย์ ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน ที่ได้อบรม ช่วยเหลือและสั่งสอน ตลอดจนให้ กำลังใจผู้วิจัยในทุกเรื่อง

สุดาพร สุขจินดา

กันยายน 2555

สารบัญ

หน้า

| | |
|--|-----|
| สารบัญ | (1) |
| สารบัญตาราง | (2) |
| สารบัญภาพ | (5) |
| คำนำ | 1 |
| วัตถุประสงค์ | 3 |
| การตรวจเอกสาร | 4 |
| อุปกรณ์และวิธีการ | 37 |
| อุปกรณ์ | 37 |
| วิธีการ | 39 |
| ผลและวิจารณ์ | 50 |
| สรุปและข้อเสนอแนะ | 63 |
| สรุป | 63 |
| ข้อเสนอแนะ | 65 |
| เอกสารและสิ่งอ้างอิง | 66 |
| ภาคผนวก | 72 |
| ภาคผนวก ก การเตรียมสารและการคำนวณค่าต่างๆที่ใช้ในงานวิจัย | 73 |
| ภาคผนวก ข วิธีวิเคราะห์หาคุณสมบัติของไบโอดีเซล | 79 |
| ภาคผนวก ค ตารางบันทึกผลการทดลอง | 86 |
| ภาคผนวก ง โครมาโทแกรมของตัวอย่างต่างๆที่วิเคราะห์ได้จากเครื่อง แก๊สโครมาโทกราฟี | 93 |
| ภาคผนวก จ ค่ามาตรฐานไบโอดีเซล | 109 |
| ประวัติการศึกษาและการทำงาน | 113 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| 1 องค์ประกอบทางเคมีและกายภาพของน้ำมันใช้แล้ว | 8 |
| 2 ปริมาณกรดไขมันของน้ำมันที่ใช้แล้วเปรียบเทียบกับน้ำมันทานตะวันกับน้ำมันถั่วเหลือง | 9 |
| 3 สมบัติวิกฤตของตัวทำละลายที่ใช้ในสถานะเหนือจุดวิกฤต | 20 |
| 4 สมบัติวิกฤตของน้ำมันที่ใช้แล้วในสถานะเหนือจุดวิกฤต | 21 |
| 5 สมบัติของก๊าซ ของเหลวและของไหลที่สถานะเหนือจุดวิกฤต | 22 |
| 6 การเปรียบเทียบระหว่างการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันกับการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้เมทานอลที่สถานะเหนือจุดวิกฤต | 25 |
| 7 การเปรียบเทียบวิธีการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน | 26 |
| 8 ลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ.2548 | 27 |
| 9 ลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน) | 29 |
| 10 ปริมาณและชนิดของกรดไขมันในน้ำมันใช้แล้วจากโรงอาหาร | 51 |
| 11 คุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลอง เมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานไบโอดีเซล | 59 |
| 12 ปริมาณและชนิดขององค์ประกอบเมทิลเอสเทอร์ของไบโอดีเซลที่สถานะที่เหมาะสม | 60 |
| 13 การเปรียบเทียบวิธีการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้ว | 62 |

สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางผนวกที่ | หน้า |
|--|------|
| ก1 ปริมาณและชนิดของกรดไขมันของน้ำมันไข่แล้วจากโรงอาหารของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ | 74 |
| ก2 ปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลองที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันไข่แล้วต่อเมทานอล | 75 |
| ก3 ตัวอย่างพื้นที่ได้กราฟของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากสภาวะเหนือจุดวิกฤตจากโครมาโทแกรมของภาพผนวกที่ ก1 | 77 |
| ข1 ปริมาณตัวอย่างน้ำมัน/ไขมันที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด | 84 |
| ค1 ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ โดยควบคุมปัจจัยอื่นๆ คืออัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่ 30:1 อัตราเร็วในการกวน 500 รอบต่อนาที และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 30 นาที | 87 |
| ค2 ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ โดยควบคุมปัจจัยอื่นๆ คืออัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่ 40:1 อัตราเร็วในการกวน 500 รอบต่อนาที และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 30 นาที | 88 |
| ค3 ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ โดยควบคุมปัจจัยอื่นๆ คืออัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่ 50:1 อัตราเร็วในการกวน 500 รอบต่อนาที และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 30 นาที | 89 |
| ค4 ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ โดยควบคุมปัจจัยอื่นๆ คืออัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่ 60:1 อัตราเร็วในการกวน 500 รอบต่อนาที และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 30 นาที | 90 |
| ค5 ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ โดยควบคุมปัจจัยอื่นๆ คืออัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่ 50:1 อัตราเร็วในการกวน 500 รอบต่อนาที และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 330 องศาเซลเซียส | 91 |
| ค6 ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ โดยควบคุมปัจจัยอื่นๆ คืออัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่ 50:1 อัตราเร็วในการกวน 500 รอบต่อนาที อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 330 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 30 นาที | 92 |

สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางผนวกที่ | หน้า |
|--|------|
| จ1 กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรด ไขมัน พ.ศ.2548 ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน | 110 |
| จ2 กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลระดับชุมชน พ.ศ.2549 ประกาศ กรมธุรกิจพลังงาน สำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน) | 112 |

สารบัญภาพ

| ภาพที่ | หน้า | |
|--------|--|----|
| 1 | กระบวนการเกิดและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของน้ำมันใช้แล้ว | 6 |
| 2 | ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน | 10 |
| 3 | กลไกการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน | 13 |
| 4 | แผนภาพความดันและอุณหภูมิของสารบริสุทธิ์ใดๆ | 17 |
| 5 | แผนภาพแสดงการเปลี่ยนแปลงของการแบ่งแยกสถานะระหว่างของเหลวและก๊าซ | 18 |
| 6 | เปอร์เซ็นต์ผลผลิตที่ได้สูงสุดที่ได้จากน้ำมันปาล์ม ในการใช้เมทานอลและเอทานอล | 30 |
| 7 | เปอร์เซ็นต์ของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ในการทำปฏิกิริยาที่เวลาต่างๆ | 31 |
| 8 | เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตจากน้ำมันหมักกับเมทานอลในอัตราส่วน โดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 45:1 ที่อุณหภูมิ 335 องศาเซลเซียส | 32 |
| 9 | เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากการผลิตที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตโดยใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน | 33 |
| 10 | เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ต่อปริมาณน้ำในน้ำมันที่ทำปฏิกิริยาที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต | 34 |
| 11 | เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ต่อปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันที่ทำปฏิกิริยาที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต | 35 |
| 12 | การเตรียมวัตถุดิบในการทดลอง | 40 |
| 13 | ขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้วที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต | 43 |
| 14 | ขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันที่ใช้แล้วปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน | 45 |
| 15 | สรุปขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้วด้วยปฏิกิริยาที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต | 48 |
| 16 | สรุปขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้วด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน | 49 |
| 17 | โครมาโทแกรมของกรดไขมันในน้ำมันใช้แล้วจากโรงอาหาร | 51 |
| 18 | ผลของอัตราส่วน โดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่มีต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตกันซ์ ที่อัตราส่วน โดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่ 30:1, 40:1, 50:1 และ 60:1 อุณหภูมิ 330 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 30 นาที | 53 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ | หน้า |
|---|------|
| 19 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อน้ำมันที่มีต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์ที่อัตราส่วน โดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่ 50:1 อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส จนถึง 350 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 30 นาที | 54 |
| 20 ผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อน้ำมันที่มีต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์ที่อัตราส่วน โดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่ 50:1 อุณหภูมิ 330 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 5 จนถึง 45 นาที | 55 |
| 21 ผลของปริมาณน้ำที่มีผลต่อน้ำมันที่มีต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์ที่อัตราส่วน โดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่ 50:1 อุณหภูมิ 330 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 30 นาที และปริมาณน้ำ 0 ถึง 5 เปอร์เซ็นต์ | 57 |
| 22 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ในสภาวะที่เหมาะสมในการทดลอง | 58 |
| 23 กลีเซอรอลที่ได้จากกระบวนการผลิตที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตของเมทานอล และปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา | 62 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพผนวกที่ | หน้า | |
|------------|--|----|
| ข1 | วิส โคมิเตอร์สำหรับวัดความหนืด | 80 |
| ข2 | อุปกรณ์ Pensky-Marten Closed Tester | 82 |
| ข3 | เครื่องเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง | 83 |
| ข4 | หลอดแก้ววัดปริมาตร | 83 |
| ง1 | โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วน โดยโมลระหว่างเมทานอลต่อ น้ำมันเท่ากับ 30:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 250 องศาเซลเซียส เวลาในการทำ ปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที | 94 |
| ง2 | โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วน โดยโมลระหว่างเมทานอลต่อ น้ำมันเท่ากับ 30:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 280 องศาเซลเซียส เวลาในการทำ ปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที | 94 |
| ง3 | โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วน โดยโมลระหว่างเมทานอลต่อ น้ำมันเท่ากับ 30:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 300 องศาเซลเซียส เวลาในการทำ ปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที | 95 |
| ง4 | โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วน โดยโมลระหว่างเมทานอลต่อ น้ำมันเท่ากับ 30:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 330 องศาเซลเซียส เวลาในการทำ ปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที | 95 |
| ง5 | โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วน โดยโมลระหว่างเมทานอลต่อ น้ำมันเท่ากับ 30:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 350 องศาเซลเซียส เวลาในการทำ ปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที | 96 |
| ง6 | โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วน โดยโมลระหว่างเมทานอลต่อ น้ำมันเท่ากับ 40:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 250 องศาเซลเซียส เวลาในการทำ ปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที | 96 |
| ง7 | โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วน โดยโมลระหว่างเมทานอลต่อ น้ำมันเท่ากับ 40:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 280 องศาเซลเซียส เวลาในการทำ ปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที | 97 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพผนวกที่ | หน้า |
|---|------|
| ง8 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 40:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 300 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที | 97 |
| ง9 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 40:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 330 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที | 98 |
| ง10 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 40:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 350 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที | 98 |
| ง11 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 50:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 250 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที | 99 |
| ง12 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 50:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 280 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที | 99 |
| ง13 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 50:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 300 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที | 100 |
| ง14 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 50:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 330 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที | 100 |
| ง15 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 50:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 350 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที | 101 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพผนวกที่ | หน้า |
|--|------|
| ง16 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล ต่อน้ำมันเท่ากับ 60:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 250 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที | 101 |
| ง17 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล ต่อน้ำมันเท่ากับ 60:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 280 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที | 102 |
| ง18 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล ต่อน้ำมันเท่ากับ 60:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 300 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที | 102 |
| ง19 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล ต่อน้ำมันเท่ากับ 60:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 330 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที | 103 |
| ง20 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล ต่อน้ำมันเท่ากับ 60:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 350 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที | 103 |
| ง21 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล ต่อน้ำมันเท่ากับ 50:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 330 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 5 นาที | 104 |
| ง22 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล ต่อน้ำมันเท่ากับ 50:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 330 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 15 นาที | 104 |
| ง23 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล ต่อน้ำมันเท่ากับ 50:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 330 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที | 105 |

สารบัญญภาพ (ต่อ)

| ภาพผนวกที่ | หน้า |
|--|------|
| ง24 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล ต่อน้ำมันเท่ากับ 50:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 330 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 45 นาที | 105 |
| ง25 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล ต่อเท่ากับ 50:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 330 องศาเซลเซียส เวลาในการทำ ปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที และปริมาณน้ำ 1% | 106 |
| ง26 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล ต่อน้ำมันเท่ากับ 50:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 330 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที และปริมาณน้ำ 2% | 106 |
| ง27 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล ต่อน้ำมันเท่ากับ 50:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 330 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที และปริมาณน้ำ 3% | 107 |
| ง28 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล ต่อน้ำมันเท่ากับ 50:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 330 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที และปริมาณน้ำ 4% | 107 |
| ง29 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล ต่อน้ำมันเท่ากับ 50:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 330 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที และปริมาณน้ำ 5% | 108 |

การพัฒนาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันที่ใช้แล้วด้วยปฏิกิริยาที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต

Developing Biodiesel Production from Waste Cooking Oil by Supercritical Reaction

คำนำ

ปัจจุบันมีการใช้พลังงานปิโตรเลียมจำนวนมาก ส่งผลให้พลังงานปิโตรเลียมมีจำนวนลดลง และราคาน้ำมันก็มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากการใช้พลังงานปิโตรเลียมในการประกอบกิจกรรมต่างๆ เช่น การคมนาคมขนส่ง เป็นต้น ประกอบกับประเทศไทยมีแหล่งน้ำมันดิบไม่เพียงพอต่อความต้องการ ทำให้ต้องนำเข้าน้ำมันดิบจากต่างประเทศ ซึ่งการนำเข้าน้ำมันดิบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปี ซึ่งการนำเข้าน้ำมันดิบในปี พ.ศ.2554 นั้นมีปริมาณเฉลี่ยปีละ 46,089 ล้านลิตรหรือคิดเป็นมูลค่า 976,789 ล้านบาท (กรมธุรกิจพลังงาน, 2555) จึงได้มีการวิจัยในการหาแหล่งพลังงานทดแทนจากแหล่งต่างๆ มาผลิตเป็นพลังงานทดแทนใช้แทนน้ำมันดีเซล หรือเรียกว่าไบโอดีเซล (Biodiesel) ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่สามารถผลิตได้ภายในประเทศ โดยไม่จำเป็นต้องนำเข้าจากต่างประเทศ

ไบโอดีเซล เป็นเชื้อเพลิงทดแทนที่ได้รับความสนใจ และเป็นแหล่งพลังงานที่สามารถหาได้ในประเทศ เช่น น้ำมันพืช หรือไขมันจากสัตว์ นอกจากนี้ไบโอดีเซลยังมีคุณสมบัติย่อยสลายได้เองตามกระบวนการทางชีวภาพ และไม่มีพิษ จึงไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากออกซิเจนในไบโอดีเซลให้การสันดาปที่สมบูรณ์กว่าดีเซลปกติ ทำให้มีเขม่าคาร์บอนน้อย จึงช่วยลดการอุดตันของระบบไอเสีย สามารถลดมลพิษทางอากาศได้ ทำให้การผลิตไบโอดีเซลได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในหลายประเทศทั่วโลก รวมทั้งประเทศไทยด้วย

การผลิตไบโอดีเซลเป็นแหล่งพลังงานทางเลือก แม้จะได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในปัจจุบัน แต่ยังมีปัญหาในการผลิตไบโอดีเซล คือต้นทุนของน้ำมันที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลนั้น มีราคาสูง เพราะน้ำมันพืชที่ใช้เป็นน้ำมันที่บริโภคได้ รวมทั้งมีการทำลายพื้นที่ป่าเพื่อปลูกพืชน้ำมันทางการค้ามากขึ้น ส่งผลให้ประเทศไทยสูญเสียพื้นที่ที่เป็นป่าทำให้พื้นที่ป่ามีจำนวนลดลง การนำ

น้ำมันใช้แล้วในครัวเรือนที่บริโภคไม่ได้ ซึ่งเป็นของเสียที่ทำลายและก่อให้เกิดมลพิษทางสิ่งแวดล้อม ตลอดจนการเป็นของเสียที่กำจัดได้ยากมาเป็นแหล่งพลังงานจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ

น้ำมันใช้แล้วเป็นน้ำมันที่ผ่านกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมอาหาร (จุฑาเกศ, 2551) หรือน้ำมันที่ผ่านการใช้แล้วในครัวเรือน โดยเป็นน้ำมันที่ยังไม่ผ่านการแยกชนิดของน้ำมัน ซึ่งส่วนใหญ่เป็นน้ำมันปาล์ม การนำน้ำมันที่ใช้แล้วมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลนั้น เป็นการลดต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซล โดยน้ำมันที่ใช้แล้วนั้นมีปริมาณกรดไขมันชนิดอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวที่สูง โดยได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบกับน้ำมันทานตะวันและน้ำมันถั่วเหลือง (Dizge *et al.*, 2009) และมีองค์ประกอบทางเคมีและกายภาพไม่เกินค่ามาตรฐาน ASTM กำหนดไว้ การนำน้ำมันใช้แล้วมาผลิตไบโอดีเซลนั้น เป็นการนำของเสียและนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ เพื่อการอนุรักษ์และรักษาสิ่งแวดล้อม โดยนำมาผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาที่สภาวะเหนือวิกฤต

ปัจจุบันได้มีการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้เมทานอลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต โดยไม่จำเป็นต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เพิ่มขึ้น แต่ในกระบวนการผลิตนั้นต้องใช้อุณหภูมิและความดันสูง เนื่องจากเมทานอลมีอุณหภูมิและความดันเหนือจุดวิกฤตคือ 239 องศาเซลเซียส และ 81 บาร์ ตามลำดับ

งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้ว ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาในระดับปฏิบัติการ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล และนำผลที่ได้ไปขยายผลการผลิตไบโอดีเซลเป็นพลังงานในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษากระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้วโดยใช้ปฏิกิริยาที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต และหาปัจจัยที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันที่ใช้แล้วในสภาวะเหนือจุดวิกฤต
2. เพื่อศึกษาคุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้จากปฏิกิริยาในสภาวะเหนือจุดวิกฤต ในระดับห้องปฏิบัติการ ตามมาตรฐาน ASTM กำหนดไว้ และเปรียบเทียบคุณสมบัติไบโอดีเซลที่ผลิตได้กับมาตรฐานไบโอดีเซลของประเทศไทย
3. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบกระบวนการผลิตไบโอดีเซล โดยใช้ปฏิกิริยาที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต กับการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

การตรวจเอกสาร

1. น้ำมันใช้แล้วหรือน้ำมันที่ผ่านการใช้ทอดแล้ว

1.1 ความหมายของน้ำมันใช้แล้ว

น้ำมันใช้แล้ว หรือน้ำมันเหลือใช้จากครัวเรือน หมายถึง น้ำมันที่ผ่านกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมอาหาร (จุฑาทาเกศ, 2551) หรือน้ำมันที่ผ่านการใช้แล้วในครัวเรือน โดยเป็นน้ำมันที่ยังไม่ผ่านการแยกชนิดของน้ำมัน ทั้งน้ำมันจากพืชหรือน้ำมันจากสัตว์ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นน้ำมันปาล์ม

1.2 ผลกระทบของน้ำมันต่อสิ่งแวดล้อม

เมื่อน้ำมันเกิดการปนเปื้อนลงสู่สิ่งแวดล้อมนั้น จะทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Zhong *et al.*, 2009) โดยผลกระทบของน้ำมันนั้น ส่งผลกระทบต่อด้านกายภาพ ด้านชีวภาพ ด้านเศรษฐกิจ และผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ ซึ่งสามารถที่จะจำแนกผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

1.2.1 ผลกระทบทางด้านกายภาพ

เมื่อน้ำมันปนเปื้อนลงสู่สิ่งแวดล้อมนั้น จะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบทางด้านกายภาพ โดยเมื่อน้ำมันไหลลงสู่แหล่งน้ำจะทำให้คราบน้ำมันลอยอยู่บนผิวน้ำ ทำให้น้ำมันเคลือบอยู่บนผิวน้ำ ซึ่งส่งผลต่อการส่องผ่านของแสงแดดไม่ให้ส่องผ่านสู่ใต้น้ำได้ จึงทำให้พืชน้ำไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ตามปกติ และเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำบริเวณด้านล่าง ซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิของน้ำบริเวณด้านล่างนั้นลดลง เมื่ออุณหภูมิของน้ำบริเวณด้านล่างนั้นลดลงนั้น จะส่งผลต่อค่าออกซิเจนละลายน้ำ นอกจากนี้การปกคลุมของคราบน้ำมันบนผิวน้ำทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนก๊าซหรือการละลายของก๊าซ เช่น ออกซิเจนลงสู่แหล่งน้ำได้ยากขึ้น

1.2.2 ผลกระทบทางด้านชีวภาพ

ผลที่เกิดจากการปนเปื้อนของน้ำมันเมื่อลงสู่สิ่งแวดล้อมนั้น จะส่งผลกระทบต่อทางด้านชีวภาพต่อสิ่งมีชีวิตทั้งพืช สัตว์ และสิ่งแวดล้อม เช่น แหล่งน้ำ ดิน เป็นต้น โดยเมื่อมีการปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำจะลอยอยู่บนผิวน้ำ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของห่วงโซ่อาหาร และเมื่อปนเปื้อนสู่ดินก็จะเกิดการสะสมอยู่ในดิน และแทรกซึมไปตามรากต้นไม้ ทำให้ต้นไม้ไม่สามารถเจริญเติบโตหรือตายได้

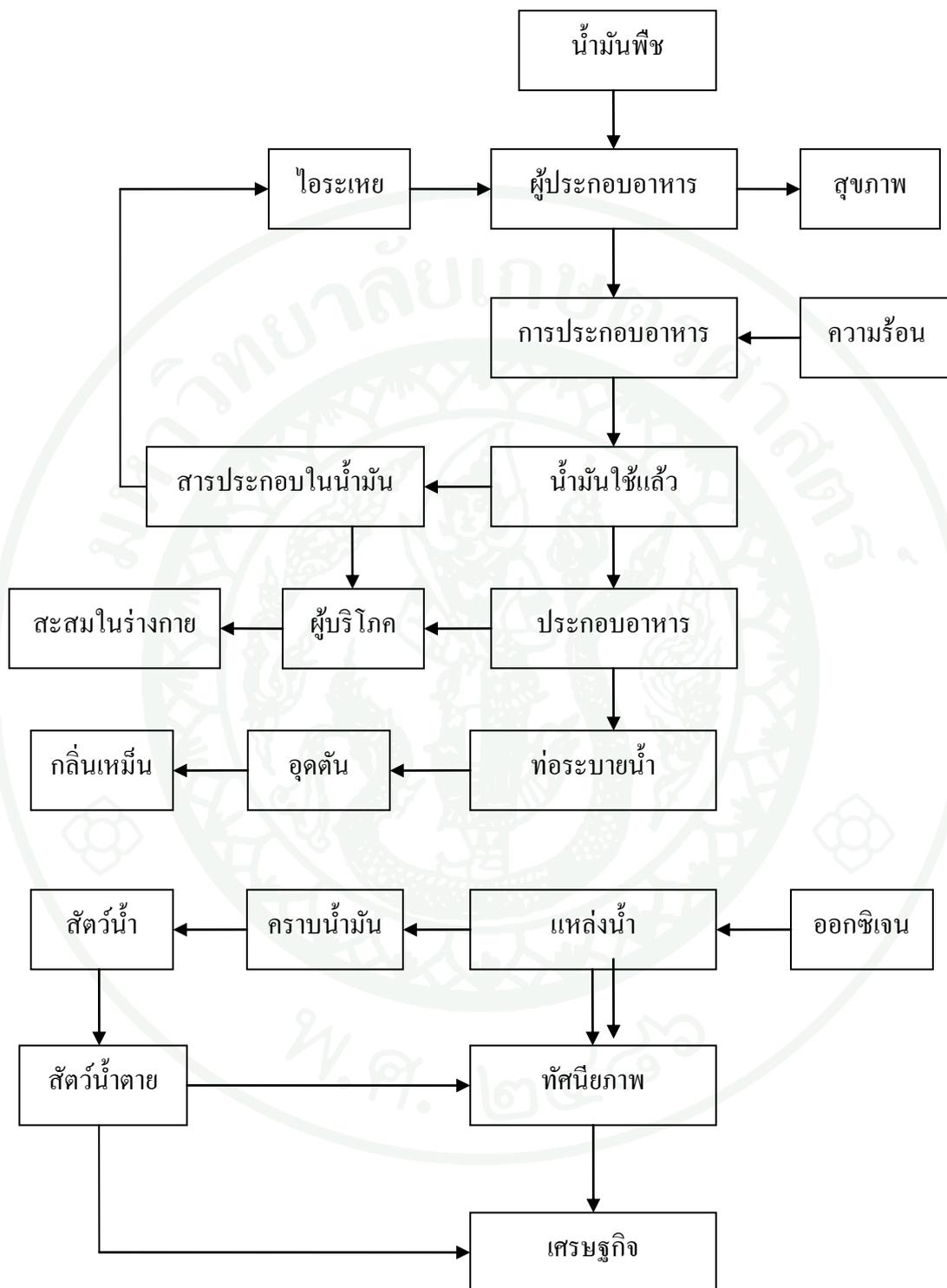
1.2.3 ผลกระทบทางด้านเศรษฐกิจ

ผลกระทบทางด้านเศรษฐกิจนั้น เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงทางด้านกายภาพและชีวภาพของสิ่งแวดล้อม ทั้งแหล่งน้ำ และดิน ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต จนทำให้สิ่งมีชีวิตไม่สามารถให้ผลผลิตได้ เมื่อสิ่งมีชีวิตไม่สามารถให้ผลผลิตได้ ก็จะทำให้แหล่งทรัพยากรลดลง โดยเฉพาะสัตว์น้ำเศรษฐกิจของประเทศ จึงทำให้เกิดการสูญเสียรายได้ทางเศรษฐกิจ นอกจากนี้หากมีการปนเปื้อนของน้ำมันในบริเวณแหล่งท่องเที่ยว อาจทำลายทัศนียภาพในบริเวณแหล่งท่องเที่ยวบริเวณนั้นอีกด้วย

1.2.4 ผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์

น้ำมันใช้แล้วเมื่อนำมาให้ความร้อน หรือผ่านการประกอบอาหารซ้ำอีกจะทำให้เกิดสารประกอบในน้ำมัน เช่น สารประกอบโพลาร์ และสารประกอบในกลุ่มสารก่อมะเร็ง ได้แก่ Cyclic fatty acid และ Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAH) เป็นต้น เมื่อผู้ประกอบอาหารนำน้ำมันใช้แล้วที่มีสารประกอบเหล่านั้นปนเปื้อนอยู่ในน้ำมันไปประกอบอาหาร ผู้บริโภคก็จะมีสารประกอบเหล่านั้นในร่างกาย จะทำให้โอกาสในการเป็นมะเร็งในผู้บริโภคมีมากขึ้น ขณะเดียวกันผู้ประกอบอาหารเองนั้น ก็จะได้รับไอรยะเหยงจากการประกอบอาหาร ส่งผลให้เกิดการสะสมในร่างกาย ทำให้โอกาสที่จะเป็นเนื้องอกในตับและปอด ตลอดจนมะเร็งเม็ดเลือดขาวมากขึ้น

น้ำมันใช้แล้วหากไม่มีการแยกนำไปกำจัดอย่างถูกวิธีก็จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งส่วนใหญ่ก็จะปล่อยลงท่ระบายน้ำ ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตามมา แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กระบวนการเกิดและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของน้ำมันใช้แล้ว

จากปัญหาน้ำมันใช้แล้วนั้น จนเกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมขึ้น ซึ่งเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมชนิดหนึ่ง ซึ่งในการจัดการปัญหาสิ่งแวดล้อมนั้น จะใช้หลักการอนุรักษ์เข้ามาจัดการ โดยการแปรสภาพสิ่งนำเข้า (Input) ให้เป็นสิ่งนำออก (Output) หรือการแปรสภาพจากน้ำมันใช้แล้วเป็นไบโอดีเซล โดยผ่านตัวเทคโนโลยี หรือกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้ว สามารถประยุกต์ใช้กับมิติทางสิ่งแวดล้อมทั้ง 4 มิติดังนี้

1. มิติทรัพยากร

การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้ว จนได้น้ำมันไบโอดีเซลที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลตามธรรมชาติ โดยน้ำมันที่ได้จากการผลิตนั้น จัดเป็นทรัพยากรที่มนุษย์สร้างขึ้นชนิดหนึ่ง เพื่อแก้ปัญหาพลังงานในการผลิตพลังงานทดแทนขึ้น

2. มิติเทคโนโลยี

การจัดการปัญหาน้ำมันใช้แล้ว โดยการแปรสภาพจากน้ำมันใช้แล้วเป็นไบโอดีเซล โดยผ่านตัวเทคโนโลยี หรือกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งเป็นปฏิบัติการที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตของเมทานอล เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้ว ให้ได้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่สูงที่สุด

3. มิติของเสีย/มลพิษ

น้ำมันใช้แล้วที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลในการทดลองนี้ เป็นของเสียที่เกิดจากการประกอบอาหารจากโรงอาหารของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ซึ่งเป็นการจัดการของเสียในการลดการเกิดมลพิษสิ่งแวดล้อม

4. มิติมนุษย์และสังคม

การนำน้ำมันใช้แล้วมาผลิตไบโอดีเซลนั้น จะส่งผลกระทบต่อคุณภาพชีวิตของมนุษย์ทางด้านสุขภาพอนามัย ซึ่งเป็นการลดการนำน้ำมันใช้แล้วที่มีสารประกอบปนอยู่ในการเกิดผลกระทบต่อสุขภาพ อีกทั้งทางด้านรายได้นั้นมีการรับซื้อน้ำมันใช้แล้ว ซึ่งก่อให้เกิดรายได้ขึ้นอีกทาง

1.3 ประโยชน์ของการนำน้ำมันใช้แล้วมาผลิตไบโอดีเซล

การนำน้ำมันใช้แล้วมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลนั้น เป็นการลดต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากต้นทุนของวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลในปัจจุบันนั้นมีราคาสูง การนำน้ำมันที่ใช้แล้วมาผลิตไบโอดีเซลจึงเป็นทางเลือกที่กำลังได้รับความสนใจในปัจจุบัน เนื่องจากปัญหาต้นทุนของวัตถุดิบที่มีราคาสูงและในปัจจุบันพบว่าประเทศไทยต้องนำเข้าวัตถุดิบ เช่น น้ำมันปาล์ม จากประเทศเพื่อนบ้าน เช่น อินโดนีเซีย อีกทั้งน้ำมันใช้แล้วยังสามารถหาได้ง่าย เช่น บ้านเรือน ร้านค้า เป็นต้น รวมทั้งยังเป็นการช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่จะเกิดขึ้น จากการทิ้งน้ำมันใช้แล้วลงสู่แหล่งน้ำทำให้ยากต่อการกำจัดหรือย่อยสลาย จึงทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมขึ้น ดังนั้นการนำน้ำมันที่ใช้แล้วมาผลิตไบโอดีเซลนั้นจึงมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และยังช่วยรักษาสิ่งแวดล้อมที่จะเกิดขึ้น

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีและกายภาพของน้ำมันใช้แล้ว

| องค์ประกอบทางเคมีและกายภาพ | หน่วย | ค่า |
|--|------------------------------|-------|
| ค่าความหนืด (Kinematic viscosity) | mm ² /s ที่ 313 K | 36.4 |
| ความหนาแน่น (Density) | kg/L ที่ 288 K | 0.924 |
| จุดไหลเท (Pour point) | K | 284 |
| จุดวาบไฟ (Flash point) | K | 485 |
| ค่าซีเทน (Cetane number) | - | 49 |
| ปริมาณขี้เถ้า (Ash content) | % โดยน้ำหนัก | 0.006 |
| ปริมาณกำมะถัน (Sulfur content) | % โดยน้ำหนัก | 0.009 |
| ปริมาณคาร์บอนตกค้าง (Carbon residue) | % โดยน้ำหนัก | 0.46 |
| ปริมาณน้ำ (Water content) | % โดยน้ำหนัก | 0.42 |
| ค่าความร้อนสูง (Higher heating value) | MJ/kg | 41.40 |
| กรดไขมันอิสระ (Free fatty acid) | mg KOH/g oil | 1.32 |
| ค่าสะaponิฟิเคชัน (Saponification value) | - | 188.2 |
| ค่าไอโอดีน (Iodine value) | - | 141.5 |

ที่มา: Ayhan Demirbas (2009)

ตารางที่ 2 ปริมาณกรดไขมันของน้ำมันใช้แล้วเปรียบเทียบกับน้ำมันทานตะวันกับน้ำมันถั่วเหลือง

| กรดไขมัน | น้ำมันทานตะวัน | น้ำมันถั่วเหลือง | น้ำมันใช้แล้ว |
|--------------------|----------------|------------------|---------------|
| Lauric (12:0) | - | - | 0.05 |
| Myristic (14:0) | 0.06 | 0.07 | 0.19 |
| Palmitic (16:0) | 5.68 | 10.87 | 8.90 |
| Palmitoleic (16:1) | 0.14 | 0.10 | 0.22 |
| Stearic (18:0) | 3.61 | 3.66 | 3.85 |
| Oleic (18:1) | 34.27 | 23.59 | 30.71 |
| Linoleic (18:2) | 54.79 | 53.86 | 54.35 |
| Linolenic (18:3) | 0.07 | 6.49 | 0.27 |
| Arachidic (20:0) | 0.25 | 0.37 | 0.29 |
| Gadoleic (20:1) | 0.13 | 0.22 | 0.18 |
| Behenic (22:0) | 0.69 | 0.45 | 0.61 |
| Lignoceric (24:0) | 0.23 | 0.18 | 0.24 |

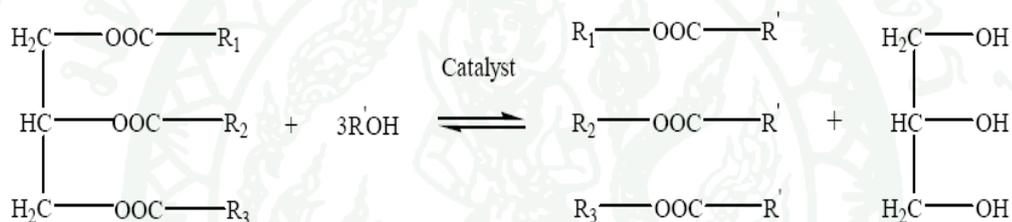
ที่มา: Dizge *et al.* (2009)

2. เทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลที่ผลิตจากปฏิกิริยาทางเคมีของน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์กับแอลกอฮอล์ เช่น เมทานอล หรือเอทานอล โดยผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ซึ่งมีกรดหรือเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะได้ผลผลิตออกมาเป็นเมทิลเอสเทอร์ หรือเอทิลเอสเทอร์ ที่เรียกว่าไบโอดีเซล แสดงดังภาพที่ 2

ไบโอดีเซล เป็นพลังงานทางเลือกที่มีความสำคัญ และได้มีการรณรงค์การใช้ไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นเนื่องจากเป็นเชื้อเพลิงที่มีการเผาไหม้ที่สะอาด ไม่ทำลายและรักษาสิ่งแวดล้อมอีกทั้งยังช่วยลดการตกค้างของสารพิษในบรรยากาศ ซึ่งแตกต่างกับการเผาไหม้น้ำมันไบโอดีเซลที่ไอเสียจากน้ำมันดีเซลเป็นสารก่อมะเร็งขึ้นในธรรมชาติ (Olutoye and Hameed, 2010)

จากการศึกษาพบว่าไบโอดีเซลเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่ได้จากพืชน้ำมันหรือไขมันสัตว์ (Jain *et al.*, 2010) และมีคุณสมบัติในการย่อยสลายเองได้ตามกระบวนการทางชีวภาพและไม่มีสารพิษ (non toxic) หรือก๊าซคาร์บอนซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจก (Green House Effect) และเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Georgogianni *et al.*, 2008) รวมทั้งจากการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน พบว่าที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ในเวลา 6 ชั่วโมง จะได้ผลผลิตของน้ำมันไบโอดีเซลปริมาณสูงสุด (Banerjee and Chakraborty, 2009) ขณะที่การใช้ปฏิกิริยาในสภาวะเหนือจุดวิกฤต สามารถผลิตไบโอดีเซลที่ให้ผลผลิตสูงสุดที่อุณหภูมิ 200-400 องศาเซลเซียส ในเวลาเพียง 5-20 นาที (Song *et al.*, 2008)



ภาพที่ 2 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน

ที่มา: Banerjee and Chakraborty (2009)

3. กระบวนการผลิตไบโอดีเซล

กระบวนการในการผลิตไบโอดีเซลที่ใช้ในปัจจุบันนี้มีหลายวิธีดังนี้ คือ

3.1 การใช้โดยตรง (Direct use and blending)

3.2 ไมโครอิมัลชัน (Micromulsion)

3.3 กระบวนการแตกสลายด้วยความร้อน (Thermalcracking or pyrolysis)

3.4 กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน (Transesterification) ประกอบไปด้วยวิธีการ

ย่อยๆคือ

3.4.1 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันที่ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

3.4.2 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันที่ใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

3.4.3 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้เอนไซม์ไลเปสเป็นตัวเร่งปฏิกริยา

3.4.4 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้ของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกริยา

3.1 การใช้น้ำมันพืชโดยตรง

การใช้น้ำมันพืชโดยตรง หรือผสมลงในน้ำมันดีเซลในสัดส่วนต่างๆ เพื่อต้องการลดความหนืดของน้ำมันพืช เมื่อนำมาใช้จะก่อปัญหาเกี่ยวกับเครื่องยนต์ แม้ว่าเครื่องยนต์ดีเซลบางประเภทจะสามารถทำงานได้กับน้ำมันพืชบริสุทธิ์ก็ตาม แต่ก็มีปัญหาตามมาเกิดขึ้นตามมา เช่น มียางเหนียวเกิดขึ้นจากปฏิกริยาออกซิเดชันของกรดไขมันอิสระในระหว่างการเก็บรักษา หรือปฏิกริยาพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) จากขั้นตอนการเผาไหม้

3.2 ไมโครอิมัลชัน

ไมโครอิมัลชันเป็นคอลลอยด์ที่อยู่ในสภาวะสมดุล ของระบบสองวัฏภาคระหว่างน้ำและน้ำมัน จะต้องมีการช่วยลดแรงตึงผิว (Surfactant) ชนิดมีประจุและไม่มีประจุเพื่อทำให้เกิดความคงสภาพ วิธีการนี้จะช่วยลดปัญหาเกี่ยวกับความหนืด โดยการใช้สารละลาย เช่น แอลกอฮอล์ คุณสมบัติของน้ำมันที่ผ่านกระบวนการไมโครอิมัลชันจะคล้ายคลึงกับน้ำมันดีเซล แต่ปัญหาที่พบเกี่ยวกับการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์

3.3 กระบวนการแตกสลายด้วยความร้อน

ไพโรไลซิส (Pyrolysis) เป็นการเปลี่ยนสารหนึ่งไปเป็นสารอื่นโดยอาศัยความร้อนที่อุณหภูมิในช่วง 450 –850 องศาเซลเซียส ไขมันสามารถถูกไพโรไลซิสเพื่อเปลี่ยนเป็นสารประกอบที่มีขนาดเล็กลง แต่วิธีการนี้มีข้อเสียคือ เครื่องมือมีราคาแพงมาก และเมื่อผ่านกระบวนการไพโรไลซิส จะทำให้ออกซิเจนถูกกำจัดออกไป ทำให้เกิดผลเสียต่อสภาพแวดล้อม นอกจากนี้กระบวนการนี้มักจะเป็นการผลิตเชื้อเพลิงที่มีคุณสมบัติเหมือนแก๊สโซลีนมากกว่าเกิดไบโอดีเซล

Junming *et al.* (2009) ศึกษาการผลิตน้ำมันแก๊สโซลีนจากน้ำมันถั่วเหลืองด้วยวิธีไพโรไลซิส โดยใช้ Al_2O_3 , Na_2CO_3 , K_2CO_3 และ MCM-41 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 350-400 องศาเซลเซียส ในเวลา 2 ชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ ที่กล่าวมาแล้วนี้จะให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตสูงสุด 75.3%, 80.6%, 73.3%, 75.6% และ 81.3% ตามลำดับ และค่าความเป็นกรด (Acid value) เท่ากับ 120, 89, 21, 28 และ 70 มิลลิกรัมของ KOH/g ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากผลการศึกษาการใช้ Al_2O_3 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้น จะให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิต 75.3% แต่จะมีค่าความเป็นกรดสูง 120 มิลลิกรัมของ KOH/g ในขณะที่ใช้ Na_2CO_3 กับ K_2CO_3 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้น จะให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิต คือ 73.3% และ 75.6% ตามลำดับ แต่ก็มีค่าความเป็นกรดที่ต่ำ คือ 21 และ 28 ตามลำดับ จากผลการศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตน้ำมันแก๊สโซลีนด้วยวิธีไพโรไลซิส นั้น การใช้ Na_2CO_3 กับ K_2CO_3 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้น จึงมีความเหมาะสมในการนำมาใช้กับเครื่องยนต์

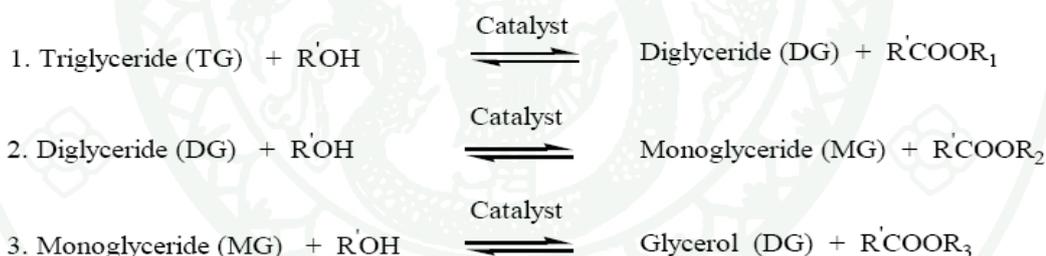
Zhang *et al.* (2009) ศึกษาการผลิตน้ำมันแก๊สโซลีนจากแกนฝักข้าวโพด ด้วยวิธีไพโรไลซิส โดยศึกษาเปรียบเทียบการผลิตระหว่างการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (HZSM-5 zeolite) และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (โดยใช้เครื่อง ASAP 2000) ในการทดลองครั้งนี้ได้ทำการศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการผลิตน้ำมันแก๊สโซลีน คือ อุณหภูมิ อัตราการไหลของแก๊ส ความสูงของแปลงข้าวโพด และขนาดของอนุภาค ผลการศึกษาพบว่า การใช้ HZSM-5 Zeolite เป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้น มีสถานะที่เหมาะสมในการให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตสูงสุด 56.8% ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สที่ 3.4 ลิตรต่อวินาที ความสูงของแปลงข้าวโพดที่ 10 เซนติเมตร และขนาดของอนุภาคที่เหมาะสมในการทดลองมีขนาดระหว่าง 1.0-2.0 มิลลิเมตร และน้ำมันที่ได้นั้นจะไม่เกิดการควบแน่นรวมตัวกันระหว่างแก๊ส น้ำและถ่านหินในขณะที่ปริมาณออกซิเจนลดลง 25% และขั้นตอนต่อไปจะเปลี่ยนอนุภาคของแก๊สให้เป็นของเหลวหรือน้ำมันเป็นวิธีที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าอัตราส่วนโดยโมลระหว่าง H/C, O/C และค่าการเผาไหม้สูงสุดของน้ำมันมีค่า 1.511 0.149 และ 34.6 MJ/kg ตามลำดับ จากการศึกษาเปรียบเทียบการผลิตน้ำมันแก๊สโซลีนด้วยวิธีไพโรไลซิส พบว่าในกระบวนการผลิตน้ำมันแก๊สโซลีนที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เครื่อง ASAP 2000 ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ทำให้ประสิทธิภาพของน้ำมันที่สูง สามารถที่จะนำไปใช้กับเครื่องยนต์ได้

3.4 กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน หรือที่เรียกว่า Alcoholysis เป็นกระบวนการผลิตไบโอดีเซล โดยการทำให้ปฏิกิริยาระหว่างไตรกลีเซอไรด์ของน้ำมันพืช หรือไขมันสัตว์กับแอลกอฮอล์ เพื่อเปลี่ยนรูปไตรกลีเซอไรด์ให้เป็นสารประกอบเอสเทอร์ หรือไบโอดีเซล โดยมีผลพลอยได้คือกลีเซอรอล ในการทำปฏิกิริยาสามารถใช้เบสหรือกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อทำหน้าที่ในการเร่งปฏิกิริยาเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ได้เร็วขึ้น

3.4.1 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันประกอบด้วยปฏิกิริยาย่อยแบบผันกลับได้ 3 ขั้นตอนย่อย โดยเริ่มจากไตรกลีเซอไรด์ เปลี่ยนเป็นไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ตามลำดับสุดท้ายได้เป็น เอสเทอร์ กับ กลีเซอรอล



ภาพที่ 3 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

ที่มา: Song *et al.*, (2008)

การผลิตเมทิลเอสเทอร์หรือไบโอดีเซลในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันนั้น สามารถเพิ่มอัตราเร็วของปฏิกิริยาด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา 3 ชนิดคือ ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นกรด ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเบส และตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเอนไซม์

3.4.2 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

การใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) หรือกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ในการผลิตไบโอดีเซลมีข้อดี คือ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีราคาถูก และสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน และปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันได้พร้อมกัน ดังผลงานวิจัยต่อไปนี้

Miao and Wu (2006) นำสาหร่าย *Chlorella protothecoides* ซึ่งเป็นสาหร่ายสายพันธุ์หนึ่งที่ดำรงชีวิตแบบ Heterotrophic และมีเปอร์เซ็นต์น้ำมันสะสมภายในเซลล์สูงถึง 55% มาใช้ในการศึกษากระบวนการผลิตไบโอดีเซล โดยใช้กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ที่ความเข้มข้น 100% มาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้ n-hexane ในการสกัดน้ำมันออกจากเซลล์ จากนั้นจึงใช้กรดซัลฟูริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ในสภาวะการทดลองที่แตกต่างกันของเวลาในการเกิดปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลกับน้ำมัน และอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ผลการศึกษาพบว่า อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลกับน้ำมัน 56:1 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และในเวลา 4 ชั่วโมงนั้น เป็นสภาวะที่เหมาะสมของปฏิกิริยาของการเกิดน้ำมันไบโอดีเซลจากสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella protothecoides*

Guan *et al.* (2009) ได้ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันข้าวโพดโดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ในการศึกษาได้ใช้กรด 3 ชนิดคือ กรด p-toluenesulfonic (PTSA) กรด benzenesulfonic และกรด H_2SO_4 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากผลการศึกษาพบว่า กรด p-toluenesulfonic (PTSA) ความเข้มข้น 4% สามารถให้เปอร์เซ็นต์ไบโอดีเซลสูงสุด 97.1% ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ในเวลา 2 ชั่วโมง

3.4.3 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

การใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นที่นิยมมากในการผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากมีราคาถูกและเป็นตัวเร่งที่ให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เร็วกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด แต่ข้อจำกัดที่สำคัญคือ ปฏิกิริยาที่ใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีความไวต่อน้ำและกรดไขมันอิสระ โดยน้ำจะทำให้ประสิทธิภาพของ

ตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง ขณะที่กรดไขมันอิสระจะทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสจะเกิดเป็นสบู่ขึ้น หรือเกิดปฏิกิริยาสะaponification) ดังผลงานวิจัยต่อไปนี้

Vyas *et al.* (2009) ได้ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากสบู่ดำด้วยวิธีทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้ $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในการศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน คือ อุณหภูมิ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลกับน้ำมันสบู่ดำ พบว่าอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลและน้ำมันจากสบู่ดำ 12:1 ใช้เวลา 6 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส โดยใช้ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา 6% ให้ปริมาณเปอร์เซ็นต์ผลผลิตสูงสุด 84%

Noiroj *et al.* (2009) ศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสในกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้ $\text{KOH}/\text{Al}_2\text{O}_3$ และ KOH/NaY เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม โดยทำการศึกษา % น้ำหนัก (wt%) ของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิดในสภาวะที่แตกต่างกันคือ $\text{KOH}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ศึกษาในสภาวะที่ 5, 10, 15, 20, 25, 30, และ 35 wt% ส่วน KOH/NaY ศึกษาในสภาวะที่ 7, 8, 9, 10, 13, และ 15 wt% ผลการศึกษาพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด $\text{KOH}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่ความเข้มข้น 25% น้ำหนัก (wt%) และ ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด KOH/NaY ที่ความเข้มข้น 10% น้ำหนัก (wt%) จะเกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์และให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตสูงสุด 91.07% ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 70 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 2-3 ชั่วโมง และมีอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล และน้ำมันปาล์ม 15:1

3.4.4 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้เอนไซม์ไลเปสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ไลเปสเป็นเอนไซม์ที่จัดอยู่ในกลุ่มไฮโดรเลส (Hydrolases) ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่ได้มาจากสิ่งมีชีวิตตามธรรมชาติ ได้แก่ พืช สัตว์ และจุลินทรีย์ โดยไลเปสมีความสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ในการย่อยสลายไขมัน นอกจากนี้ไลเปสยังสามารถเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในการผลิตไบโอดีเซลอีกด้วย ดังผลงานวิจัยดังต่อไปนี้

Charpe and Rathod (2011) ได้ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันดอกทานตะวัน โดยวิธีทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในการศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน คือ อุณหภูมิ เวลาในการทำปฏิกิริยา และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันและเมทานอล จากการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมของการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 45 องศา

เซลเซียส ความเข้มข้นของเอโนไซม์เท่ากับ 5 % และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน จากดอกทานตะวันเท่ากับ 3:1 และภายหลังจากปฏิกิริยาผ่านไป 24 ชั่วโมงพบว่า เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นจาก 55.8% ถึง 63.84%

การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้ว โดยน้ำมันใช้แล้วเป็นที่นิยมที่นำมาใช้ในการผลิตไบโอดีเซลมากขึ้นในปัจจุบัน ดังนั้นการนำน้ำมันใช้นั้นแล้วมาผลิตไบโอดีเซลจึงเป็นการรักษาสິงแวดล้อม เป็นการนำน้ำมันใช้แล้วมาใช้ในกระบวนการผลิตใหม่ ซึ่งเป็นการลดปัญหาการกำจัด หรือย่อยสลายของน้ำมันใช้แล้วในสิ่งแวดล้อม อีกทั้งการนำน้ำมันใช้มาเป็นวัตถุดิบยังเป็นการลดต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซลอีกด้วย ดังงานวิจัยที่มีการตรวจค้นเอกสารดังต่อไปนี้

Phan and Phan (2008) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้ว โดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 0.75 wt% เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อุณหภูมิ 30-50 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันคือ 7:1-8:1 จากการศึกษาพบว่า เปอร์เซ็นต์ผลผลิตที่ได้สูงสุดเท่ากับ 88-90% ในการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของไบโอดีเซลที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้ได้ใช้วิธีการทดสอบตามวิธีมาตรฐาน ASTM

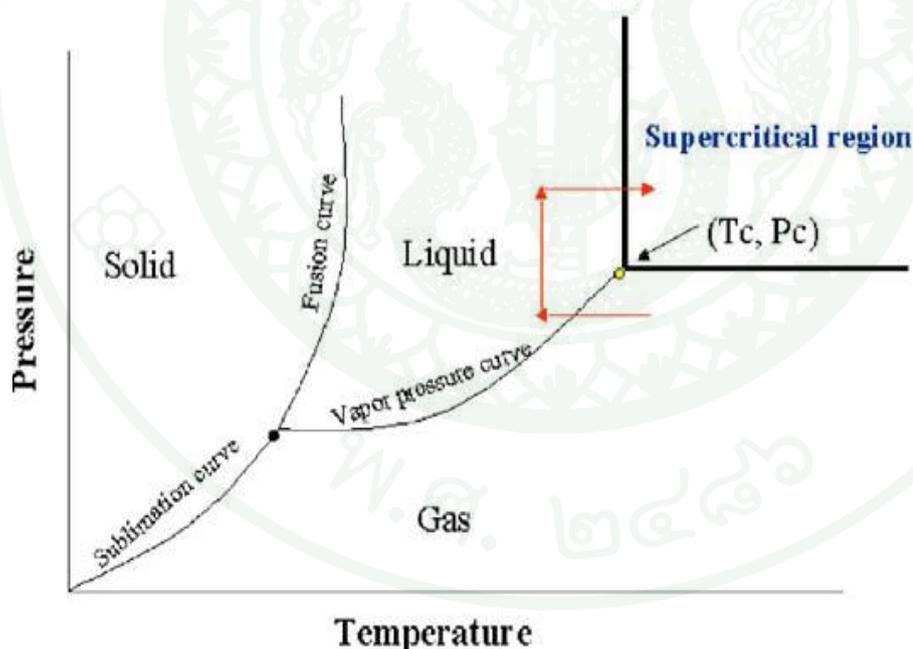
Chen *et al.* (2009) ได้ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้ว ซึ่งเป็นน้ำมันที่ได้จากครัวเรือนและร้านอาหาร โดยใช้เอโนไซม์ไลเปสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาการผสมระหว่างน้ำมันใช้แล้ว น้ำ เมทานอลและตัวทำละลายเฮกเซน (Hexane) ซึ่งผลผลิตหลักที่ได้จากปฏิกิริยาคือไบโอดีเซล หรือ Fatty acid methyl ester (FAME) เป็นผลมาจากเอโนไซม์ไลเปส น้ำ ตัวทำละลาย อุณหภูมิและอัตราการไหลของการผสมในปฏิกิริยาของกระบวนการผลิตไบโอดีเซล จากผลการศึกษาพบว่า เปอร์เซ็นต์ผลผลิตที่ได้สูงสุดของ Fatty acid methyl ester (FAME) คือ 91.08%

Jain *et al.* (2010) ศึกษาการนำน้ำมันที่เหลือใช้มาผลิตไบโอดีเซล โดยใช้กรดและเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเอสเทอริฟิเคชัน และทรานส์เอสเทอริฟิเคชันแบบสองขั้นตอน ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียสในปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน และที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันคือ 3:7 (v/v) ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก และเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (H_2SO_4 และ NaOH) 1% (w/w) จากการศึกษาเปรียบเทียบการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้ว โดยใช้ตัวเร่ง

ปฏิกิริยา พบว่ามีความแตกต่างกัน โดยการผลิตไบโอดีเซลที่ใช้กรด H_2SO_4 ในปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตสูงสุด 21.50% และการผลิตไบโอดีเซลที่ใช้เบส NaOH ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตสูงสุด 90.60 %

3.4.5 ปฏิกิริยาของของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต

การผลิตไบโอดีเซลโดยอาศัยหลักการที่ทำให้ตัวทำละลายที่เป็นแก๊สเปลี่ยนสถานะเป็นสารที่อยู่ในสภาวะเหนือจุดวิกฤต (Supercritical fluid, SCF) สารที่อยู่ในสภาวะเหนือจุดวิกฤต คือ สารที่มีอุณหภูมิเหนืออุณหภูมิวิกฤต และมีความดันเหนือความดันวิกฤต ที่สภาวะนี้สารดังกล่าวจะไม่ควบแน่นกลายเป็นของเหลวหรือระเหยกลายเป็นไอ เรียกสารที่อยู่ในสภาวะนี้ว่าของไหล (ธงชัย, 2547) แสดงดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 แผนภาพความดันและอุณหภูมิของสารบริสุทธิ์ใดๆ

ที่มา: Vemavarapu *et al.* (2005)

ของไหลในสถานะเหนือจุดวิกฤต (Supercritical fluid, SCF) คือ สารใดๆในสถานะที่มี อุณหภูมิที่อยู่เหนือจุดวิกฤต (Critical Temperature, T_c) และมีความดันอยู่เหนือความดันวิกฤต (Critical pressure, P_c) ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตนี้สารใดๆจะไม่ควบแน่นกลายเป็นของเหลว หรือ ระเหยกลายเป็นก๊าซ จะเรียกสารในสภาวะนี้ว่าของไหล (Fluid) และหากมีการเพิ่มความดันของสาร ให้สูงขึ้น จะทำให้สารมีคุณสมบัติที่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง และทำให้สารที่มีคุณสมบัติ ที่คล้ายก๊าซไปสู่คุณสมบัติที่คล้ายของเหลว (ตะวัน, 2543)



ภาพที่ 5 แผนภาพแสดงการเปลี่ยนแปลงของการแบ่งแยกสถานะระหว่างของเหลวและก๊าซ

ที่มา: สุวภัทร์ (2550)

การผลิตไบโอดีเซลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต จะทำให้สารมีคุณสมบัติอยู่ในสภาวะของไหล ทำให้มีน้ำมันมีคุณภาพที่ดี สำหรับผลงานวิจัยที่ทำการศึกษาโดยใช้ของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ได้แก่

Imahara *et al.* (2008) ได้ทำการศึกษาเทคโนโลยีในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชหรือไขมันจากสัตว์ในห้องปฏิบัติการ โดยวิธีเมทานอลในสภาวะเหนือจุดวิกฤต เนื่องจากในสภาวะเหนือจุดวิกฤตจะใช้อุณหภูมิและความดันสูง จากการศึกษาพบว่า อุณหภูมิในวิธีเมทานอลในสภาวะเหนือจุดวิกฤตที่เหมาะสมคือ ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300 องศาเซลเซียส โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส ความดันสูงกว่า 81 บาร์ จึงทำให้น้ำมันที่ได้มีประสิทธิภาพสูง

Gui *et al.* (2009) ได้ทำการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มกับเอทานอลโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในสภาวะเหนือจุดวิกฤต โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิแตกต่างกันตั้งแต่ 300-400 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 2-30 นาที และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันกับเอทานอลตั้งแต่

5-50 ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต จากการศึกษาพบว่า การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มในสภาวะเหนือจุดวิกฤต สามารถผลิตเป็นไบโอดีเซลในสภาวะที่เหมาะสมที่อุณหภูมิ 349 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 29 นาที อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันปาล์มกับเมทานอลเท่ากับ 33:2 ซึ่งสามารถให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตสูงสุด 79.2 % ต่อน้ำหนัก

Luca Fiori (2009) ได้ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันดอกทานตะวัน โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ในสภาวะเหนือจุดวิกฤต ในการศึกษาได้สกัดน้ำมันจากดอกทานตะวัน ปริมาณ 100 มิลลิลิตร (ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเมล็ดดอกทานตะวัน 0.19 และ 1.2 มิลลิเมตร) ที่ความดัน 280-550 บาร์ และอัตราการไหลของตัวทำละลายคงที่ 40 องศาเซลเซียส และ 10 กรัม/นาที่ตามลำดับ

Tan *et al.* (2010) ได้ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในสภาวะเหนือจุดวิกฤต โดยใช้เมทานอลเป็นสารในการทำปฏิกิริยา โดยนำปริมาณน้ำมันที่ได้จากการศึกษา มาเปรียบเทียบกับรายงานการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลในสภาวะเหนือจุดวิกฤตโดยใช้เอทานอล โดยมีตัวแปรในการศึกษาที่สำคัญคือ อุณหภูมิ เวลาในการทำปฏิกิริยา และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน จากการศึกษาพบว่า เปอร์เซ็นต์ผลผลิตสูงสุดของน้ำมันที่ใช้เมทานอลเป็นสารในการทำปฏิกิริยา 81.5 % ต่อน้ำหนัก และปริมาณน้ำมันที่ใช้เอทานอลเป็นสารในการทำปฏิกิริยาสูงสุด 81.5 % ต่อน้ำหนัก

4. ของไหลในสภาวะเหนือจุดวิกฤต

4.1 คุณสมบัติของของไหลในสภาวะเหนือจุดวิกฤต

4.1.1 คุณสมบัติการนำพา

การที่สารในสภาวะเหนือจุดวิกฤต หรือ Supercritical fluids นั้นมีความหนืดที่ต่ำ และมีสัมประสิทธิ์ของการแพร่กระจายสูง จึงทำให้สามารถกระจายตัวได้อย่างทั่วถึง ทำให้ตัวถูกละลายกระจายออกจาก Extraction zone ไปบริเวณอื่นได้ง่าย และมีอัตราการถ่ายเทมวลที่ดี ส่งผลให้สารในสภาวะเหนือจุดวิกฤตเป็นตัวทำละลายที่ดี ความหนืด และมีสัมประสิทธิ์ของการ

แพร่กระจายของ SCF จะมีความสัมพันธ์กับปัจจัยหลายประการ เช่น อุณหภูมิ ความดัน และชนิดของสาร SCF จึงต้องมีการปรับสภาวะให้มีความเหมาะสม เพื่อให้การสกัดที่ต้องการดีที่สุด

4.1.2 ความแรงของตัวทำละลาย

ความแรงของตัวทำละลายเป็นคุณสมบัติของ Supercritical Fluids ซึ่งความแรงของตัวทำละลายของสารในสถานะเหนือจุดวิกฤตจะมีค่าความแรงของตัวทำละลายของสารชนิดอื่นๆ เนื่องจากสามารถปรับค่าของตัวแปรให้มีความน้อยได้ และค่าความแรงของตัวทำละลายจะขึ้นอยู่กับความดันและอุณหภูมิ ณ จุดวิกฤต โดยการเพิ่มอุณหภูมิให้กับตัวทำละลายที่เป็นของเหลวนั้น จะทำให้ของเหลวมีการละลายเพิ่มขึ้น

4.1.3 ความสามารถในการคัดเลือก

ความสามารถในการคัดเลือก (Selectivity property) เป็นคุณสมบัติของ Supercritical Fluids โดยสามารถปรับอุณหภูมิและความดัน เพื่อให้มีค่าความแรงของตัวทำละลายของสารตามที่ต้องการ เพื่อให้ได้สารที่ต้องการมากที่สุด และได้สารที่ไม่ต้องการน้อยที่สุด อีกทั้งความต้องการได้สารที่บริสุทธิ์และมีปริมาณมาก

จากคุณสมบัติของสารในสถานะเหนือจุดวิกฤต หรือ Supercritical fluids ทำให้สารแต่ละชนิดในสถานะเหนือจุดวิกฤตมีสมบัติวิกฤตแตกต่างกันตามชนิดของสาร ได้แก่ อุณหภูมิ และความดัน แสดงดังตารางที่ 3 และตารางที่ 4

ตารางที่ 3 สมบัติวิกฤตของตัวทำละลายที่ใช้ในสถานะเหนือจุดวิกฤต

| Substance | Critical Temperature (°C) | Critical Pressure (Bar) | Critical Density (kg/ m ³) |
|----------------|------------------------------|----------------------------|---|
| Methane | -82.55 | 46.0 | 162 |
| Ethylene | 9.25 | 50.3 | 218 |
| Carbon dioxide | 31.05 | 73.8 | 468 |
| Propylene | 91.85 | 46.2 | 233 |

ตารางที่ 3 (ต่อ)

| Substance | Critical Temperature (°C) | Critical Pressure (Bar) | Critical Density (kg/ m ³) |
|---------------|------------------------------|----------------------------|---|
| Propane | 96.65 | 44.2 | 217 |
| Methanol | 239.45 | 81 | 302 |
| Diethyl ether | 194.55 | 36.4 | 265 |
| Water | 374.15 | 220 | 322 |

ที่มา: ธงชัย (2547)

ในปี ค.ศ. 2006 Kulkarni and Dalai นำน้ำมันใช้แล้ว มาทำการศึกษาถึงสมบัติวิกฤตที่ในสถานะเหนือจุดวิกฤต ซึ่งสมบัติวิกฤตของน้ำมันใช้แล้ว แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สมบัติวิกฤตของน้ำมันใช้แล้วในสถานะเหนือจุดวิกฤต

| Substance | Critical Temperature (°C) | Critical Pressure (Bar) | Molar ratio of alcohol to oil (mol) |
|----------------------------|------------------------------|----------------------------|--|
| Waste cooking oil (WCO) | 250 | 450 | 45:1 |

ที่มา: Kulkarni and Dalai (2006)

ความหนืดของของไหลที่สถานะเหนือจุดวิกฤตเป็นสมบัติอีกประการหนึ่ง ที่ทำให้ของไหลที่สถานะเหนือจุดวิกฤตเป็นตัวทำละลายที่ดี เนื่องจากความหนืดของของไหลที่สถานะเหนือจุดวิกฤตมีค่าใกล้เคียงกับแก๊ส โดยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ที่ความดันมากกว่าความดันวิกฤต โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต จะทำให้ค่าความหนืดลดลงและเมื่อความหนืดลดลงจะส่งผลให้ความหนาแน่นลดลงอย่างต่อเนื่องเช่นเดียวกัน เนื่องจากโมเลกุลของตัวทำละลายนั้นมีพลังงานมากขึ้น จึงทำให้โมเลกุลเกิดแรงผลักกัน ทำให้โมเลกุลนั้นกระจายตัวออกจากกันมากขึ้น ในขณะที่ความหนาแน่นคงที่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิกลับไม่มีผลต่อค่าความหนืดของตัวทำละลาย

ตารางที่ 5 สมบัติของก๊าซ ของเหลวและของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต

| สมบัติ | สถานะ | | |
|------------------------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| | ก๊าซ | ของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต | ของเหลว |
| ความหนาแน่น(g/cm^3) | $(0.6-2) \times 10^{-3}$ | 0.2-1.0 | 0.6-1.6 |
| การแพร่ (cm^2/s) | 0.1-0.4 | $(2-7) \times 10^{-4}$ | $(0.2-2) \times 10^{-5}$ |
| ความหนืด | 0.01-0.03 | 0.01-0.09 | 0.2-3.0 |

ที่มา: ซินนทัต (2549)

จากสมบัติของก๊าซ ของเหลวและของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตในตารางที่ 5 นั้น จึงทำให้ของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตมีสมบัติอยู่ระหว่างก๊าซกับของเหลว จึงทำให้ของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตนั้น มีคุณสมบัติในการเป็นตัวทำละลายที่ดีกว่าตัวทำละลายชนิดอื่นๆ และจากสมบัติของของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ยังทำให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์อย่างอื่นได้อย่างมากมาย เช่น นำมาใช้ในการแยกสาร หรือการทำให้สารนั้นๆ มีความบริสุทธิ์มากขึ้น เป็นต้น

4.2 ประโยชน์ของของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต

4.2.1 เนื่องจากของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตมีความสามารถในการละลาย และมีการถ่ายเทมวลที่ดี จึงได้มีการนำของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตมาเป็นตัวทำละลายในงานสกัด (Supercritical fluid extraction) การแยกสาร (Separation) หรือการทำให้สารบริสุทธิ์ (Purification) เช่น การสกัดสารออกจากพืชหรือสมุนไพร เป็นต้น

4.2.2 การนำของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตมาเป็นเฟสเคลื่อนที่ (Mobile phase) ในงานวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟี (Supercritical fluid chromatography)

4.2.3 การนำของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต มาใช้ในการผลิตอนุภาคขนาดเล็กหรือขนาดนาโนด้วยกระบวนการขยายตัวอย่างรวดเร็วของสารละลายที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต (Rapid Expansion of Supercritical Solutions, RESS) ซึ่งกระบวนการผลิตนี้สามารถผลิตอนุภาคขนาดเล็กได้ โดยตัวถูกละลายจะถูกละลายด้วยของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต

งานวิจัยจากน้ำมันใช้แล้ว มาผลิตไบโอดีเซลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต มีงานวิจัยหลายด้าน ดังผลงานวิจัยต่อไปนี้

Ayhan Demirbas (2009) ได้ศึกษาเปรียบเทียบการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้ว โดยใช้ เบทโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน กับเมทานอลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต จากการศึกษาเปรียบเทียบ พบว่าการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานั้นเปอร์เซ็นต์ผลผลิตในปริมาณที่ต่ำ และให้ปริมาณกรดไขมันอิสระในปริมาณที่สูง ส่วนการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้เมทานอลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานั้น จะให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตซึ่งมีปริมาณน้ำและปริมาณกรดไขมันอิสระที่ต่ำ

Patil *et al.* (2010) ศึกษาเปรียบเทียบการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้ว โดยในการศึกษา ได้ทำการเปรียบเทียบการผลิตไบโอดีเซล ทั้งในกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันและสภาวะเหนือจุดวิกฤต โดยใช้เฟอร์ริกซัลเฟต ที่มีคุณสมบัติเป็นกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และการใช้เมทานอลในสภาวะเหนือจุดวิกฤต โดยในกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันแบบสองขั้นตอนที่ใช้เฟอร์ริกซัลเฟต เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้กำจัดปริมาณกรดไขมันอิสระที่เกิดขึ้นในปริมาณมากจากน้ำมันเหลือใช้ จากการศึกษาพบว่า ในกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยใช้เฟอร์ริกซัลเฟต เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะได้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตสูงสุด 85-96% และการผลิตไบโอดีเซลโดยการใช้เมทานอลในสภาวะเหนือจุดวิกฤต จะให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตสูงสุดที่ได้ 50-65% โดยใช้เวลา 15 นาที โดยในการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันขึ้นอยู่กับตัวแปรที่สำคัญคืออัตราส่วนโดยโมลระหว่างแอลกอฮอล์กับน้ำมัน ตัวเร่งปฏิกิริยาและอุณหภูมิ ซึ่งจะมีผลต่อคุณสมบัติของน้ำมันที่ได้

Campanelli *et al.* (2010) ได้ศึกษาวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลคือ ใช้น้ำมันที่สามารถบริโภคได้ (Edible oil) น้ำมันที่ไม่สามารถบริโภคได้ (Non-edible oil) และน้ำมันใช้แล้ว พบว่าน้ำมันในแต่ละประเภทจะมีปริมาณกรดไขมันอิสระที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะน้ำมันใช้แล้วจะมีกรดไขมันอิสระ (FFA) ในปริมาณที่สูง ซึ่งมีผลต่อเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของไบโอดีเซลที่ได้ และพบว่าตัวแปรที่สำคัญในการศึกษาคือ อุณหภูมิ ความดัน และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแอลกอฮอล์กับน้ำมัน จึงได้มีการศึกษาโดยนำน้ำมันที่ใช้แล้วมาผลิตไบโอดีเซลโดยใช้เมทานอลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต โดยทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 345 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลกับ

น้ำมันเท่ากับ 42:1 และความดัน 200 บาร์ ผลการทดลองพบว่า ปฏิกิริยาเกิดขึ้นหลังจากเวลาผ่านไป 50 นาที ปฏิกิริยาจึงเกิดสมบูรณ์

Lee *et al.* (2012) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อผลผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมัน canola ที่ใช้แล้ว โดยนำมาผลิตไบโอดีเซลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตของเมทานอล ซึ่งได้ทำการทดลองอิทธิพลของอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 240 ถึง 270 องศาเซลเซียส โดยใช้ความดันคงที่ 100 บาร์ เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่ 15 ถึง 45 นาที และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลและน้ำมันที่อัตราส่วน 1:1, 1:5 และ 2:1 ผลการทดลองพบว่าผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลอง 102% ที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส ที่ความดันคงที่ 100 บาร์ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลและน้ำมันที่อัตราส่วน 2:1 และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 45 นาที โดยหลังจากการทดลองได้นำน้ำมันที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-MS เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของออกซิเจน ผลปรากฏว่าประกอบด้วย 3-methoxy-1, 2-propanediol, dimethoxymethane, และ 2,2-dimethoxypropane

Shin *et al.* (2012) นำน้ำมันใช้แล้วมาผลิตไบโอดีเซลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตของเมทานอล โดยไม่ผ่านการเตรียมการทดลองในการไล่น้ำ หรือกำจัดสิ่งต่างๆ ในน้ำมัน โดยได้ทำการศึกษาตัวแปรในการผลิตไบโอดีเซล 5 ตัวแปร ได้แก่ อุณหภูมิโดยทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 320 ถึง 350 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลและน้ำมัน ที่อัตราส่วน 30 ถึง 60 ความดัน 150 ถึง 250 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 ถึง 20 นาที และอัตราการกวนที่ 0 ถึง 1000 rpm จากการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตไบโอดีเซลคือ ที่อุณหภูมิ 335 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลและน้ำมัน ที่อัตราส่วน 45:1 ความดัน 200 บาร์ เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 15 นาที และอัตราการกวนที่ 500 rpm ซึ่งให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 89.91%

เมื่อทำการเปรียบเทียบการผลิตไบโอดีเซลระหว่างวิธีทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชันคือ แบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากับการใช้แอลกอฮอล์ในสภาวะเหนือจุดวิกฤต สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบระหว่างการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันกับการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้เมทานอลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต

| | การผลิตด้วยวิธีทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน | การผลิตโดยใช้เมทานอลในสภาวะเหนือจุดวิกฤต |
|--|--|--|
| เวลาในการทำปฏิกิริยา | 1-8 ชั่วโมง | 120-240 วินาที |
| สภาวะในการทำปฏิกิริยา | 10 bar, 30-65 ^o C | >81 bar, >239.4 ^o C |
| การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา | ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (จะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด เบส หรือเอนไซม์) | ไม่ต้องใช้ |
| กรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ | เกิดผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการจากปฏิกิริยาสะปอนิฟิเคชันเมื่อใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา | เกิดเมทิลเอสเทอร์ |
| ผลิตภัณฑ์ที่ได้ | ปกติ | สูงกว่าปกติ |
| การแยกสารเพื่อให้ผลิตภัณฑ์บริสุทธิ์ | เมทานอล และตัวเร่งปฏิกิริยา | เมทานอล |
| กระบวนการผลิต | ซับซ้อน | ไม่ซับซ้อน |

ที่มา: Saka and Kusdiana (2001)

ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด เบส และเอนไซม์ไลเปส ทำให้น้ำมันไบโอดีเซลที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบวิธีการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน

| ตัวแปร | การใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา | การใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา | เอนไซม์ไลเปสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา | การใช้แอลกอฮอล์ในสถานะเหนือจุดวิกฤต |
|-----------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| เวลาในการทำปฏิกิริยา | 60-70 นาที | 55-80 นาที | 30-40 นาที | 239-385 วินาที |
| กรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชหรือสัตว์ | เกิดเอสเทอร์ | เกิดสะปอนนิฟิเคชัน | เกิดเมทิลเอสเทอร์ | เกิดเมทิลเอสเทอร์ |
| น้ำในน้ำมันพืชหรือสัตว์ | มีผลกระทบต่อการปฏิกิริยา | มีผลกระทบต่อการปฏิกิริยา | ไม่มีผลกระทบต่อการปฏิกิริยา | - |
| ผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ที่ได้ | ปกติ | ปกติ | สูง | ดี |
| การแยกกลีเซอรอล | ยุ่งยาก | ยุ่งยาก | ง่าย | - |
| การทำให้เมทิลเอสเทอร์บริสุทธิ์ | ต้องทำการล้าง | ต้องทำการล้าง | ไม่จำเป็น | - |
| ราคาการผลิต | ถูก | ถูก | แพงกว่าวิธีอื่น | ปานกลาง |

ที่มา: Marchetti *et al.* (2007)

5. มาตรฐานของไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการต่าง ๆ นั้น หากจะมีการนำน้ำมันไบโอดีเซลมาใช้งานกับเครื่องยนต์ จะต้องผ่านการทดสอบคุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซล โดยแต่ละประเทศจะใช้มาตรฐานในการทดสอบคุณภาพน้ำมันไบโอดีเซลที่แตกต่างกัน และสำหรับประเทศไทยนั้นกรมธุรกิจพลังงานได้กำหนดลักษณะ และคุณภาพสำหรับเครื่องยนต์

การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน) เพื่อเป็นการส่งเสริมไบโอดีเซลมาใช้ในเชิงพาณิชย์ อีกทั้งยังเป็นการสร้างความเชื่อมั่นให้แก่ผู้บริโภค ตลอดจนเป็นการสนับสนุนให้ผลิตไบโอดีเซลมาใช้ รายละเอียดคุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลแสดงดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ.2548

| คุณสมบัติน้ำมันเชื้อเพลิง | หน่วย | วิธีทดสอบ | เกณฑ์ต่ำสุด | เกณฑ์สูงสุด |
|--|------------------------------------|--------------|-------------|-------------|
| เมทิลเอสเทอร์ | ร้อยละโดยน้ำหนัก | EN 14103 | 96.5 | - |
| ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15°C | กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร | ASTM D 1298 | 860 | 900 |
| ค่าความหนืดที่ 40°C | เซนติสโตกส์ | ASTM D 445 | 3.5 | 5.0 |
| จุดวาบไฟ | องศาเซลเซียส | ASTM D 93 | 120 | - |
| ปริมาณกำมะถัน | ร้อยละโดยน้ำหนัก | ASTM D 2622 | - | 0.0010 |
| กาก (ร้อยละ 10 ของกากที่เหลือจากการกลั่น) | ร้อยละโดยน้ำหนัก | ASTM D 4530 | - | 0.30 |
| ค่าซีเทน | | ASTM D 613 | 51 | - |
| เถ้าซัลเฟต | ร้อยละโดยน้ำหนัก | ASTM D 874 | - | 0.020 |
| น้ำ | ร้อยละโดยปริมาตร | EN ISO 12937 | - | 0.050 |
| สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด | ร้อยละโดยน้ำหนัก | EN 12662 | | 0.0024 |
| การกัดกร่อนแผ่นทองแดง | | ASTM D 130 | - | หมายเลข 1 |
| เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 °C | ชั่วโมง | EN 14112 | 6 | - |
| ค่าความเป็นกรด | มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัม | ASTM D 664 | - | 0.50 |
| ค่าไอโอดีน | กรัมไอโอดีน/100 กรัม | EN 14111 | - | 120 |

ตารางที่ 8 (ต่อ)

| คุณสมบัติน้ำมันเชื้อเพลิง | หน่วย | วิธีทดสอบ | เกณฑ์ ต่ำสุด | เกณฑ์ สูงสุด |
|-----------------------------------|--------------------|---|-----------------|-----------------|
| กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์ | ร้อยละโดยน้ำหนัก | EN 14103 | - | 12 |
| เมทานอล | ร้อยละโดยน้ำหนัก | EN 14110 | - | 0.20 |
| โมนอกลิเซอไรด์ | ร้อยละโดยน้ำหนัก | EN 14105 | - | 0.80 |
| ไดกลีเซอไรด์ | ร้อยละโดยน้ำหนัก | EN 14105 | - | 0.20 |
| ไตรกลีเซอไรด์ | ร้อยละโดยน้ำหนัก | EN 14105 | - | 0.20 |
| กลีเซอรินอิสระ | ร้อยละโดยน้ำหนัก | EN 14105 | - | 0.02 |
| กลีเซอรินทั้งหมด | ร้อยละโดยน้ำหนัก | EN 14105 | - | 0.25 |
| โลหะกลุ่ม1(โซเดียมและโพแทสเซียม) | มิลลิกรัม/กิโลกรัม | EN 14108และ EN 14109 | - | 5.0 |
| โลหะกลุ่ม2(แคลเซียมและแมกนีเซียม) | มิลลิกรัม/กิโลกรัม | pr EN14538 | - | 5.0 |
| ฟอสฟอรัส | ร้อยละโดยน้ำหนัก | ASTM D 4951 | - | 0.0010 |
| สารเติมแต่ง(ถ้ามี) | | ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบจาก อธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน | | |

ที่มา: กรมธุรกิจพลังงาน (2548)

ตารางที่ 9 ลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน)

| คุณสมบัติน้ำมันเชื้อเพลิง | หน่วย | วิธีทดสอบ | เกณฑ์ | |
|--------------------------------|--|---|--------|------------------------|
| | | | ต่ำสุด | สูงสุด |
| ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15°C | กิโลกรัม/ลูกบาศก์ เมตร | ASTM D 1298 | 860 | 900 |
| ค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 40°C | เซนติสโตกส์ | ASTM D 445 | 1.9 | 8.0 |
| จุดวาบไฟ | องศาเซลเซียส | ASTM 93 | 120 | |
| ปริมาณกำมะถัน | ร้อยละโดยน้ำหนัก | ASTM D 2622 | - | 0.0015 |
| ค่าซีเทน | | ASTM D 613 | 47 | |
| เถ้าซัลเฟต | ร้อยละโดยน้ำหนัก | ASTM D 874 | - | 0.02 |
| น้ำและตะกอน | ร้อยละโดยปริมาตร | ASTM D 2709 | - | 0.2 |
| การกัดกร่อนแผ่น ทองแดง | | ASTM D 130 | - | หมายเลข3 |
| ค่าความเป็นกรด | มิลลิกรัมโพแทสเซียม ไฮดรอกไซด์/ กรัม | ASTM D 664 | - | 0.80 |
| กลีเซอรินอิสระ | ร้อยละโดยน้ำหนัก | ASTM D 6584 | - | 0.02 |
| กลีเซอรินทั้งหมด | ร้อยละโดยน้ำหนัก | ASTM D 6584 | - | 1.5 |
| สี | | | ม่วง | ตรวจพินิจ ด้วยสายตา |
| สารเติมแต่ง(ถ้ามี) | | ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบจาก อธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน | | |

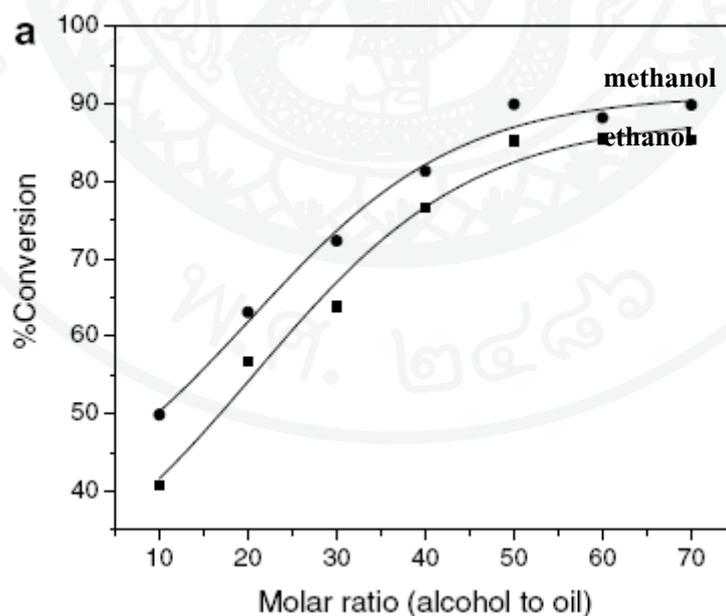
ที่มา: กรมธุรกิจพลังงาน (2549)

6. ปัจจัยสำคัญในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไบโอดีเซลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต สามารถอธิบายได้ดังนี้

6.1 ชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

ชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต โดย ชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ นั้น จะส่งผลต่อปริมาณของไบโอดีเซลที่ได้ โดย Rathore and Madras (2007) ได้ทำการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม โดยใช้เมทานอลและเอทานอลในการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งผลการศึกษาพบว่า การใช้เมทานอลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มให้ปริมาณไบโอดีเซลที่มากกว่าการใช้เอทานอลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ดังภาพที่ 6 จะเห็นได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบผลการผลิตไบโอดีเซลจากพืชได้ดินและน้ำมันปาล์ม ระหว่างการใช้เมทานอล และเอทานอลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตแล้วการใช้เมทานอลจะให้ปริมาณไบโอดีเซลมากกว่าเอทานอลที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 6 เปรียบเทียบผลผลิตที่ได้สูงสุดที่ได้จากน้ำมันปาล์ม ในการใช้เมทานอลและเอทานอล

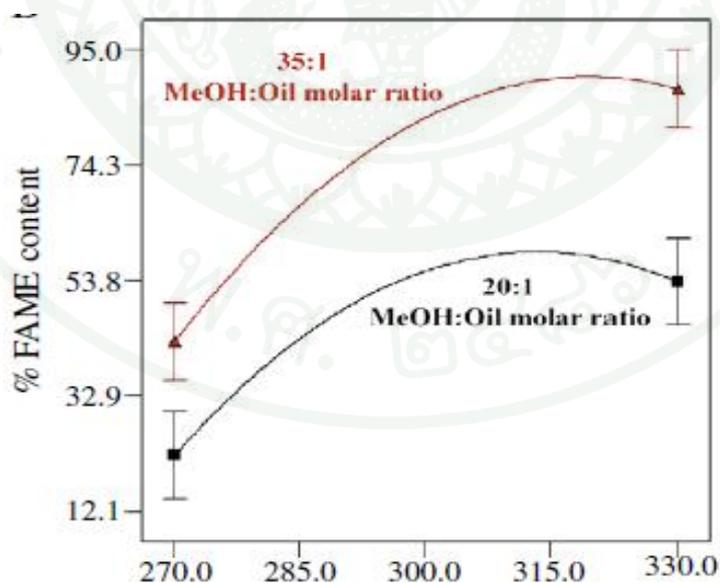
ที่มา: Rathore and Madras (2007)

6.2 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา

อุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อปริมาณไบโอดีเซล ในปฏิกิริยาที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต โดย Sawangkaew *et al.* (2011) ได้ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากเมล็ดปาล์มกับเมทานอลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ที่อุณหภูมิ 270-330 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาจากอุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส จนถึง 315 องศาเซลเซียส ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นสูงสุด และลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 325 องศาเซลเซียส เป็น 350 องศาเซลเซียส

6.3 ความดันที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

ความดันที่ใช้ในการทำปฏิกิริยานั้น ส่งผลต่อปริมาณไบโอดีเซลที่ได้เช่นเดียวกันกับอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา จากการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลของ Machmudah *et al.* (2008) พบว่าอุณหภูมิและความดันจะส่งผลต่อปริมาณไบโอดีเซลที่ได้ โดยที่ความดันที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นด้วย

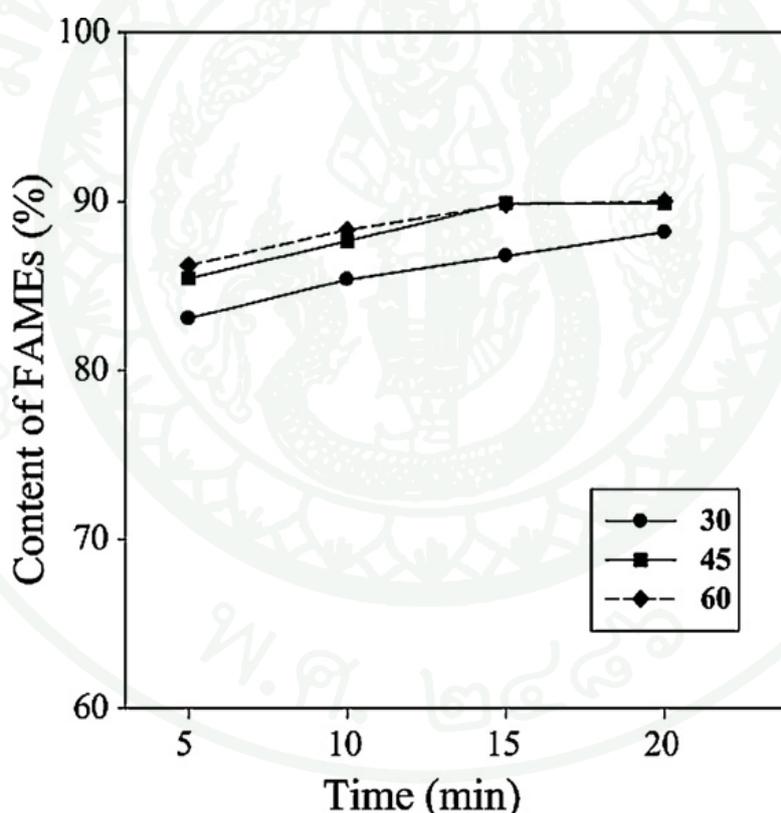


ภาพที่ 7 เปอร์เซ็นต์ของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ในการทำปฏิกิริยาที่เวลาต่างๆ

ที่มา: Sawangkaew *et al.* (2011)

6.4 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน

อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน เป็นตัวแปรหนึ่งที่สำคัญที่สุดที่มีผลต่อการผลิตไบโอดีเซล โดยในกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันนั้น อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันเท่ากับ 3:1 แต่ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตนั้น อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่ให้ผลผลิตสูงสุดเท่ากับ 45:1 แสดงดังภาพที่ 8 ซึ่ง Hee *et al.* (2012) ได้อธิบายไว้ว่า เปอร์เซ็นต์ผลผลิตที่ได้สูงสุด ในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันหมู ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตของเมทานอลเท่ากับ 45:1 ที่อุณหภูมิ 335 องศาเซลเซียส โดยให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ได้สูงสุดเท่ากับ 89.91%

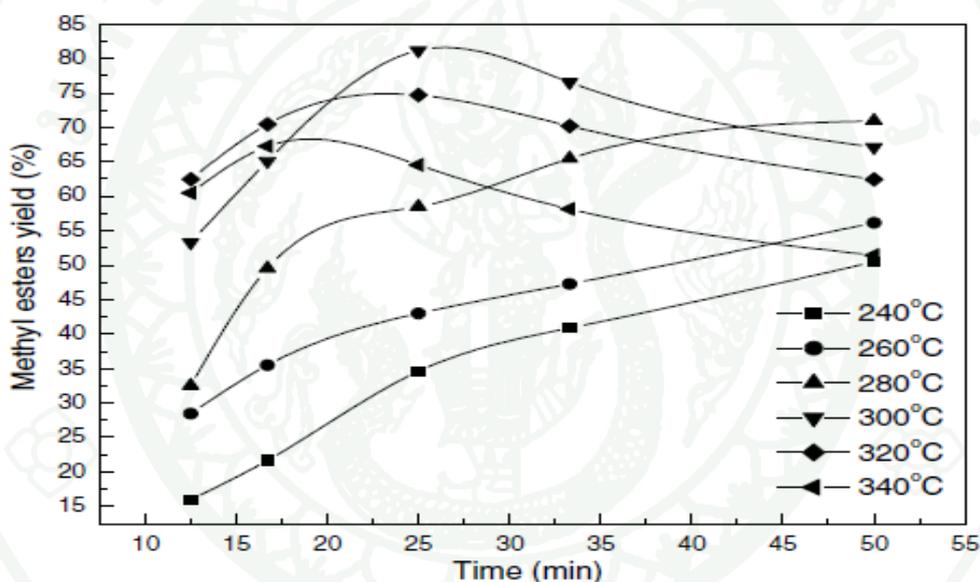


ภาพที่ 8 เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตจากน้ำมันหมูกับเมทานอลในอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 45:1 ที่อุณหภูมิ 335 องศาเซลเซียส

ที่มา: Hee *et al.* (2012)

6.4 ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา

ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยานั้นมีผลต่อปริมาณไบโอดีเซลได้เช่นกัน จากการทดลองของ He *et al.* (2007) ได้ศึกษาอิทธิพลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตของเมทานอลจากน้ำมันถั่วเหลือง ที่เวลา 10-55 นาที โดยได้ทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 240-340 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นสูงสุด เมื่อเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเป็น 25 นาที แสดงดังภาพที่ 9 และเมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาจาก 25 นาทีเป็น 55 นาที พบว่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ลดลงตามลำดับ



ภาพที่ 9 เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากการผลิตที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตโดยใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน

ที่มา: He *et al.* (2007)

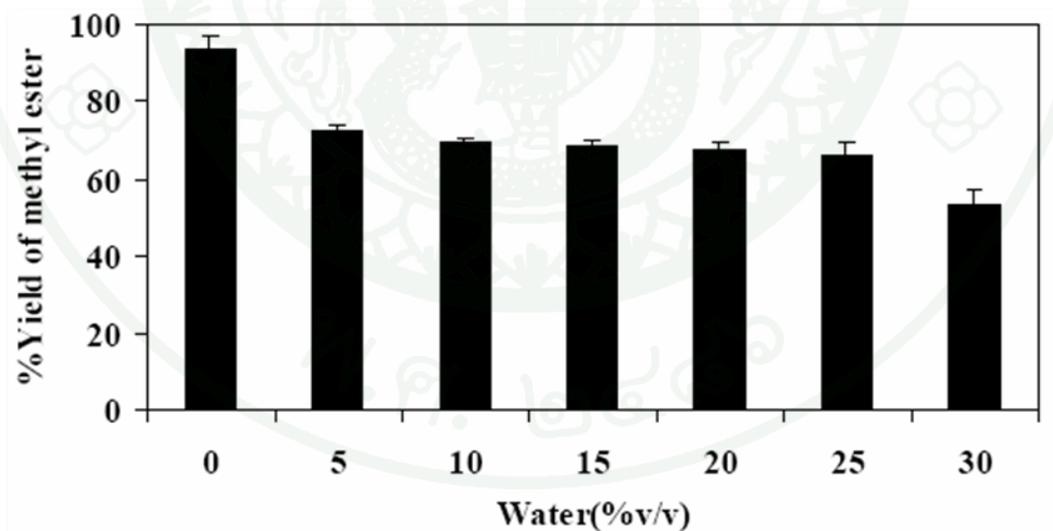
6.5 ปริมาณน้ำในน้ำมันที่ใช้ทำปฏิกิริยา

ปริมาณน้ำในน้ำมันที่ใช้ทำปฏิกิริยามีผลต่อปริมาณไบโอดีเซลที่ได้ โดยการมีน้ำในน้ำมันที่ใช้ทำปฏิกิริยานั้น จะส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์ของผลผลิตสูงสุดที่ได้ในการผลิตไบโอดีเซลทุกชนิด ยกเว้นการผลิตไบโอดีเซลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต พบว่า การมีน้ำในน้ำมันที่ใช้ทำปฏิกิริยานั้น

ไม่มีผลต่อการผลิตไบโอดีเซล โดย Petchmal *et al.* (2007) ได้ศึกษาผลของปริมาณน้ำในน้ำมันที่นำมาผลิตไบโอดีเซล โดยในการศึกษาได้ทำการเปรียบเทียบการผลิตไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์ฟิเคชันสองขั้นตอนและปฏิกิริยาที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ซึ่งการศึกษานี้สามารถอธิบายได้ว่าปริมาณน้ำในน้ำมันที่นำมาผลิตไบโอดีเซลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตนั้น มีผลต่อการผลิตไบโอดีเซล โดยได้ศึกษาปริมาณน้ำในปฏิกิริยาตั้งแต่ 0-30% จากผลการทดลองพบว่า เมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ลดต่ำลงตามปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้น

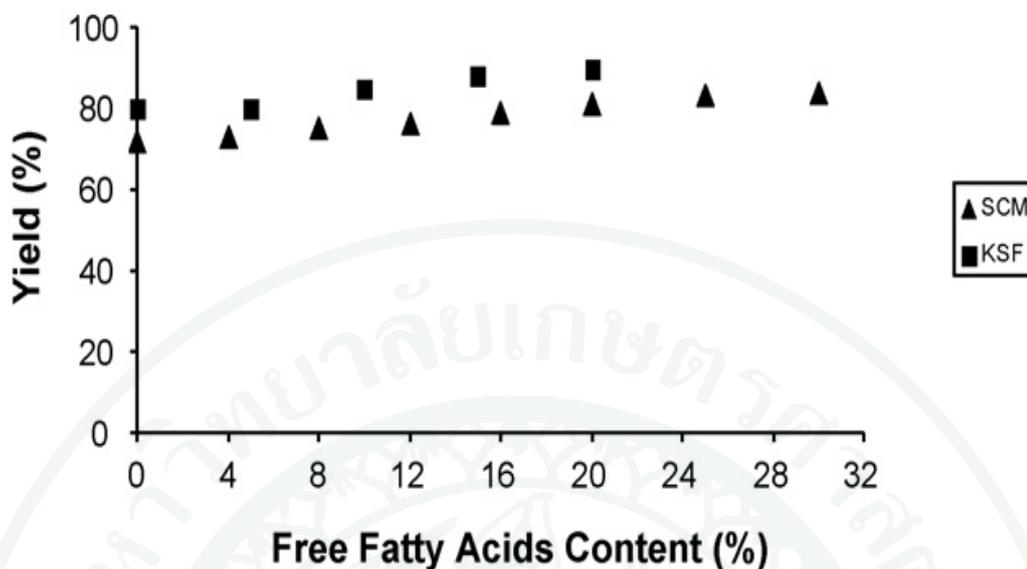
6.6 ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันที่ใช้ทำปฏิกิริยา

ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันที่ใช้ทำปฏิกิริยานั้น มีผลต่อการผลิตไบโอดีเซลเช่นเดียวกับปริมาณน้ำในน้ำมันที่ใช้ทำปฏิกิริยา โดย Tan *et al.* (2010) ศึกษาปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันที่ใช้ทำปฏิกิริยา พบว่า ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันจะไม่มีผลต่อการผลิตที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ทำให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ไม่แตกต่างตามปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันที่นำมาทำปฏิกิริยา



ภาพที่ 10 เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ต่อปริมาณน้ำในน้ำมันที่ทำปฏิกิริยาที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต

ที่มา: Petchmal *et al.* (2007)



ภาพที่ 11 เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ต่อปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันที่ทำปฏิกิริยาที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต

ที่มา: Tan *et al.* (2010)

7. ประโยชน์ของไบโอดีเซล

7.1 ด้านสิ่งแวดล้อม

7.1.1 การใช้ไบโอดีเซลเป็นการช่วยลดมลพิษทางอากาศ เนื่องจากการปล่อยควันจากการเผาไหม้ของก๊าซที่ไม่มีพิษ (Ayhan Demirbas, 2009) และก๊าซคาร์บอนซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจก และเป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิดสภาวะโลกร้อน

7.1.2 การนำน้ำมันใช้แล้วหรือน้ำมันที่เหลือใช้จากครัวเรือนมาผลิตไบโอดีเซลนั้นเป็นการลดปัญหาหมอกพิษสิ่งแวดล้อมที่จะเกิดขึ้น เนื่องจากน้ำมันหรือไขมันถ้าหากปล่อยออกสู่ภายนอกจะย่อยสลายได้ยาก และใช้เวลาย่อยสลายนานหากไม่มีการกำจัดอย่างถูกวิธีก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม และหากนำน้ำมันพืชใช้แล้วมาผลิตเป็นไบโอดีเซลจะช่วยลดปัญหาในการกำจัดน้ำมันพวกนี้ (Georgogianni *et al.*, 2008)

7.1.3 สามารถป้องกันไม่ให้เกิดการนำน้ำมันพืชใช้แล้ว ซึ่งจะมีสารก่อมะเร็งนั้นก็คือ สารไดออกซินมาประกอบอาหารซ้ำหรือนำไปผลิตเป็นอาหารสัตว์ต่อไป

7.2 ด้านเศรษฐศาสตร์

7.2.1 การใช้ไบโอดีเซลสามารถช่วยลดการนำเข้าของวัตถุดิบจากต่างประเทศ ซึ่งในแต่ละปีประเทศไทยต้องนำเข้าน้ำมันดิบ และวัตถุดิบจากต่างประเทศเป็นจำนวนมาก (กรมธุรกิจพลังงาน, 2555) การใช้ไบโอดีเซลจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ และสามารถช่วยสร้างงานอีกทั้งยังช่วยสร้างตลาดพลังงานไว้ใช้ในอนาคต

7.2.1 ช่วยรองรับผลผลิตทางการเกษตร ซึ่งเป็นการรับรองรายได้ของเกษตรกรในการปลูกพืชน้ำมันในการผลิตไบโอดีเซล นับเป็นผลดีกับเกษตรกรอีกด้วย

7.3 ด้านการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงในประเทศ

ประเทศไทยมีสัดส่วนการใช้ น้ำมันดีเซลสูงกว่าน้ำมันเบนซินมาก และในอนาคตมีแนวโน้มที่โรงกลั่นอาจจะผลิตน้ำมันดีเซลไม่เพียงพอต่อการใช้งานในประเทศ ดังนั้นการใช้ไบโอดีเซลจึงช่วยลดปัญหาการผลิตดีเซลของการผลิตของโรงกลั่นได้

7.4 ด้านสมรรถนะเครื่องยนต์

การผสมไบโอดีเซลสามารถช่วยเพิ่มดัชนีการหล่อลื่นให้กับน้ำมันดีเซลได้ ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ดีขึ้น เนื่องจากไบโอดีเซลมีออกซิเจนผสมอยู่ประมาณร้อยละ 10 (Lapuerta *et al.*, 2008) ทำให้การผสมระหว่างอากาศกับน้ำมันมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และเป็นการเพิ่มอัตราส่วนปริมาตรของอากาศต่อน้ำมันได้เป็นอย่างดีจึงทำให้การเผาไหม้ดีขึ้น

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. การผลิตไบโอดีเซลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต
 - 1.1 เครื่องปฏิกรณ์ (บริษัท Parr Instrument Company รุ่น 4848)
 - 1.2 เครื่องกลั่นระเหยสุญญากาศ (Rotary evaporator, บริษัท Buchi Rotavapor)
 - 1.3 เครื่องชั่งทศนิยมให้ความละเอียด 2 ตำแหน่ง
 - 1.4 กรวยแยก ขนาด 250 มิลลิลิตร
 - 1.5 กระดาษกรองเบอร์ 4 (บริษัท Whatman)
 - 1.6 แผ่นฟิล์ม (Laboratory Film) ปิดปีกเกอร์และอุปกรณ์เครื่องแก้ว (บริษัท Parafilm)
 - 1.7 ขวดก้นกลม (Round Bottom Flask) ขนาด 250 มิลลิลิตร
 - 1.8 ปีกเกอร์ ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. การผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน
 - 2.1 เครื่องกวนแม่เหล็กพร้อมให้ความร้อน (บริษัท Yellowline รุ่น Yellow MAG HS7)
 - 2.2 เครื่องชั่งทศนิยมให้ความละเอียด 2 ตำแหน่ง
 - 2.3 เครื่องแก้วควบแน่นของเหลว (Condenser)
 - 2.4 ฟลาสก์สามคอ
 - 2.5 ปีกเกอร์ ขนาด 250 มิลลิลิตร
 - 2.6 เครื่องชั่งทศนิยมให้ความละเอียด 2 ตำแหน่ง
 - 2.7 กรวยแยก ขนาด 250 มิลลิลิตร
 - 2.8 เทอร์โมมิเตอร์ ช่วงอุณหภูมิ 0-100 องศาเซลเซียส
 - 2.9 กระดาษยูนิเวอร์แซลอินดิเคชัน ช่วง pH 1-14
3. การวิเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ในไบโอดีเซลโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี
 - 3.1 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Agilent Technology รุ่น GC 6890 เฟลมไอออไนเซชันดีเทคเตอร์ (FID detector) ใช้แก๊สฮีเลียมเป็นแก๊สพา (Carrier Gas) โดยใช้ Capillary คอลัมน์ DB-WAX 127-7012 column (30 x0.32 mm x0.25 μ m)

- 3.2 เครื่องชั่งทศนิยมให้ความละเอียด 4 ตำแหน่ง
 - 3.3 ขวดสีขาขนาดเล็ก (บริษัท National Scientific Company)
 - 3.4 ไมโครปิเปต
 - 3.5 ขวด Vial ขนาด 2 มิลลิลิตร
4. การวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอดีเซล
 - 4.1 เครื่อง Constant-Temperature Bath และหลอดวัดความหนืด (Viscometer)
 - 4.2 เครื่องมือทดสอบจุดวาบไฟ (Pensky-martens Closed Flash Tester รุ่น HERZ)
 - 4.3 เครื่องเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifuge บริษัท CEN-D Nanasiam Intertrade. CO. Ltd. รุ่น LDJ-5C)
 - 4.4 ขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร
- สารเคมี**
1. การผลิตไบโอดีเซลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต
 - 1.1 เมทานอล (ความบริสุทธิ์ 99.5%, บริษัท Brightchem SDN BHD ควบคุมโดย QRec)
 - 1.2 น้ำกลั่น
 2. การผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน
 - 2.1 โพลีเอทิลีนไกลคอลไฮดรอกไซด์ (ความบริสุทธิ์ 85 เปอร์เซ็นต์ บริษัท Farmitalia Carlo Erba S.p.A. Milano)
 - 2.2 เมทานอล (ความบริสุทธิ์ 99.5%, บริษัท Brightchem SDN BHD ควบคุมโดย QRec)
 - 2.3 น้ำกลั่น
 3. การวิเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ในไบโอดีเซลโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี
 - 3.1 Methyl Heptadecanoate (C17:0) (ความบริสุทธิ์ 99%, บริษัท Fluka)
 - 3.2 n-Heptane (ความบริสุทธิ์ 99%, บริษัท Fluka)

4. การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด และกรดไขมันอิสระ

- 4.1 โซเดียมไฮดรอกไซด์ แอนดัสไตรส์ (ความบริสุทธิ์ 97 % บริษัท Carlo Erba Reagent Spa.)
- 4.2 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (ความบริสุทธิ์ 85 % บริษัท Farmitalia Carlo Erba S.p.A. Milano)
- 4.3 นอร์มอลโพรพานอล (ความบริสุทธิ์ 96%, บริษัท Flufa)
- 4.4 ฟีนอล์ฟทาลิน (บริษัท Merck Reagent)

5. การวิเคราะห์หองค์ประกอบกรดไขมัน

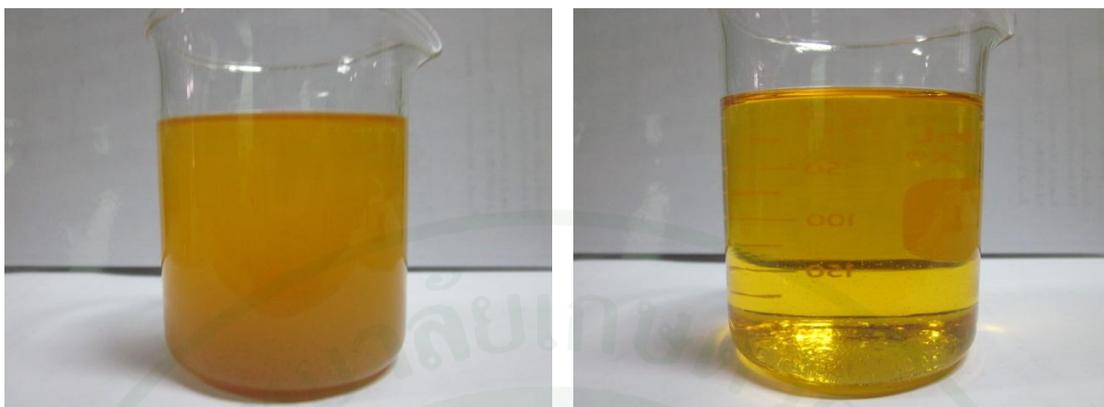
- 5.1 n-Heptane
- 5.2 BF₃ Methanol reagent
- 5.3 0.5 N methanolic sodium hydroxide solution
- 5.4 สารละลายอิ่มตัว NaCl
- 5.5 Internal Standard สาร Methyl Heptadecanoate (C17:0)

วิธีการ

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ จะแบ่งการวิจัยออกเป็น 4 ขั้นตอน คือ การเตรียมวัตถุดิบ การวิเคราะห์หาองค์ประกอบของกรดไขมันตัวอย่าง การวิเคราะห์หาคุณภาพของน้ำมันตัวอย่าง การผลิตไบโอดีเซลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤติ และการตรวจหาคุณภาพน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลอง ดังนี้

1. การเตรียมน้ำมันใช้แล้ว เพื่อเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล

ตัวอย่างของน้ำมันใช้ในการผลิตไบโอดีเซล จะใช้น้ำมันใช้แล้วของโรงอาหารกลางมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ประมาณ 12 ลิตร จากนั้นนำน้ำมันใช้แล้วมาเทรวมกัน แสดงดังภาพที่ 12 ก แล้วจึงทำการกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 4 เพื่อกำจัดเศษอาหารที่ตกค้างอยู่ในน้ำมันตัวอย่าง แสดงดังภาพที่ 12 ข จะได้น้ำมันตัวอย่างสำหรับใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล



(ก)

(ข)

ภาพที่ 12 การเตรียมวัตถุดิบ

(ก) น้ำมันใช้แล้วก่อนการกรอง

(ข) น้ำมันใช้แล้วหลังการกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 4

2. การวิเคราะห์หาองค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันตัวอย่าง

2.1 การเตรียมตัวอย่างด้วยปฏิกิริยาเพื่อวิเคราะห์หาองค์ประกอบของกรดไขมันที่ประกอบอยู่ในน้ำมันที่เตรียมไว้ในข้อ 1

2.1.1 ชั่งตัวอย่างน้ำมัน 40 มิลลิกรัม ลงในขวดสามคอขนาด 50 มิลลิลิตร

2.1.2 เติม 0.5 N NaOH ในเมทานอล 5 มิลลิลิตร ลงในตัวอย่างน้ำมันที่เตรียมไว้

2.1.3 ต่อขวดสามคอในข้อ 1 เข้ากับอุปกรณ์ควบแน่น และทำการรีฟลักซ์ที่อุณหภูมิประมาณ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

2.1.4 เติมสารละลาย BF_3 -Methanol reagent 3 มิลลิลิตร แล้วทำการรีฟลักซ์ต่อที่อุณหภูมิ ประมาณ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที ปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

2.1.5 เติมสารละลายอิ่มตัวของ NaCl 3 มิลลิลิตร โดยจะเกิดตะกอนสีขาวของเกลือ NaCl

2.1.6 เติม n-Heptane 10 มิลลิลิตร จากนั้นปิดจุกขวดสามคอแล้วเขย่า 3 นาที แล้วตั้งทิ้งไว้เพื่อให้เกิดการแยกชั้น

2.1.7 นำสารละลายที่เตรียมไว้ด้วยปฏิกิริยา Methylation ที่แยกชั้นในข้อ 6 แล้วมาประมาณ 1 มิลลิลิตร เก็บไว้ในขวดสีชาขนาด 2 มิลลิลิตร

2.1.8 ใช้ไมโครปิเปตดูดสารละลาย Internal Standard (Methyl Heptadecanoate (C17:0)) ใส่ในขวดสีชาที่เตรียมไว้ในข้อ 7 จากนั้นเขย่าให้เข้ากัน แล้วจึงนำสารที่เตรียมไว้ไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของกรดไขมันด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

2.2 การหาค่ากรดไขมันอิสระ (Free fatty acid) ที่ประกอบอยู่ในน้ำมันตัวอย่าง

2.2.1 ชั่งตัวอย่างน้ำมันประมาณ 4-5 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร

2.2.2 เติมสารละลายเอทานอล ปริมาณ 50 มิลลิลิตร นำไปให้ความร้อน จากนั้นเติมฟีนอล์ฟทาไลน์ อินดิเคเตอร์จำนวน 3-5 หยด

2.2.3 ไทเทรตด้วยสารละลาย NaOH 0.1 N จนกระทั่งได้สีชมพู

2.2.4 คำนวณปริมาณกรดไขมันอิสระจากสูตร

$$\% \text{ FFA} = \frac{\text{ปริมาณเบสที่ใช้ (กรัม)} \times \text{ความเข้มข้นเบส (N)} \times 25.6}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง (g)}}$$

3. การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้วที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต

3.1 เตรียมน้ำมันใช้แล้ว จำนวน 50 กรัม และเมทานอลตามอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน ตามที่แสดงไว้ในภาคผนวก ก โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน เท่ากับ 30:1, 40:1, 50:1 และ 60:1

3.2 ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 250, 280, 300, 330 และ 350 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่กำหนดไว้ในข้อ 1 ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที อัตราเร็วในการกวน 500 รอบต่อนาที แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมันอิสระ และปริมาณเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ เพื่อศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา

3.3 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณน้ำ โดยทำการทดลองที่ปริมาณน้ำ 0, 1, 2, 3, 4 และ 5% โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลที่ดีที่สุดที่สุดในข้อ 1 และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาที่ดีที่สุดที่สุดในข้อ 2 อัตรารอบในการกวน 500 รอบต่อนาที แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมันอิสระ และปริมาณเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ เพื่อศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา

การทดลองผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้วที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ในการผลิตที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 13 ก ส่วนภาพที่ 13 ข การแยกเมทานอลออกจากน้ำมันไบโอดีเซล ด้วยเครื่อง Rotary evaporator ภาพที่ 13 ค แสดงการนำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาใส่กรวยแยกชั้น และภาพที่ 13 ง แสดงเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากการผลิต



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพที่ 13 ขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้วที่สถานะเหนือจุดวิกฤต

(ก) การผลิตไบโอดีเซลที่สถานะเหนือจุดวิกฤตด้วยเครื่องปฏิกรณ์ (Par 4848)

(ข) แยกเมทานอลออกจากน้ำมันไบโอดีเซล ด้วยเครื่อง Rotary evaporator

(ค) นำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาใส่กรวยแยกชั้น

(ง) เมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการผลิต

4. การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้วด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

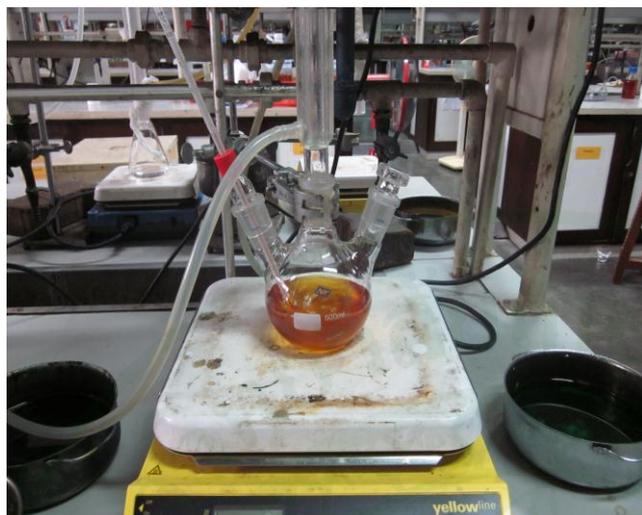
4.1 เตรียมน้ำมันใช้แล้ว จำนวน 50 กรัม ใส่งวดก้นกลม แล้วนำไปประกอบเข้ากับชุดอุปกรณ์ผลิตไบโอดีเซล จากนั้นอุ่นน้ำมันจนอุณหภูมิถึง 65 องศาเซลเซียส

4.2 ชั่งโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 7.91 กรัม ละลายในตัวทำละลายเมทานอลปริมาณ 7.91 กรัม คนให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นเทสารละลายโพแทสเซียมเมทอกไซด์ลงไปน้ำมันที่เตรียมไว้ กวนให้สารละลายที่เตรียมไว้เป็นเนื้อเดียวกันที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที ระหว่างทำปฏิกิริยาให้ควบคุมอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส ตลอดการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง

4.3 เมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดลง เทสารละลายที่ได้ลงไปกรวยแยก ตั้งสารละลายทิ้งไว้ให้เย็น เพื่อทำการแยกกลีเซอรอลออกจากน้ำมัน

4.4 ทำการล้างไบโอดีเซลในกรวยแยกด้วยน้ำร้อน จนกระทั่งน้ำล้างนั้นมีสภาพเป็นกลาง (pH7) โดยสังเกตจากน้ำล้างใสไม่ขุ่น

4.5 เทน้ำมันไบโอดีเซลจากกรวยแยกลงในบีกเกอร์ แล้วนำไปต้มในเตาโดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จากนั้นนำน้ำมันไปวิเคราะห์หาปริมาณเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 14 ขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้วปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

- (ก) การนำน้ำมันประกอบเข้ากับอุปกรณ์ผลิตไบโอดีเซล
- (ข) แยกเมทานอลออกจากน้ำมันไบโอดีเซลโดยใช้กรวยแยก
- (ค) การล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำร้อน

5. การวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ได้จากการผลิต

ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ได้จากการผลิตนั้น จะวิเคราะห์หาค่าเมทิลเอสเทอร์ ค่าความเป็นกรด ค่าความหนืด จุดวาบไฟ ค่ากลีเซอรินรวม และค่าน้ำและตะกอน ตามมาตรฐาน ASTM ที่กำหนดคุณภาพของไบโอดีเซลชุมชน โดยกรมธุรกิจพลังงาน

5.1 การวิเคราะห์หาเมทิลเอสเทอร์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

การวิเคราะห์หาเมทิลเอสเทอร์ โดยใช้คอลัมน์ DB-WAX 127-7012 column (30 m x 0.32 mm x 0.25 μ m: Agilent Technology, USA) มี แก๊สฮีเลียมเป็นแก๊สตัวพา ที่ความดัน 11.49 Psi ความเร็วเฉลี่ย 40 cm/sec อุณหภูมิของ oven เท่ากับ 80 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 50-250 องศาเซลเซียส ในอัตรา 10 องศาเซลเซียส/min แล้วจึงทำการฉีดสารตัวอย่างในปริมาณ 1 ไมโครลิตร โดยผลโครมาโทแกรมที่ได้ จะนำไปวิเคราะห์หาปริมาณเมทิลเอสเทอร์ในภาคผนวก ก โดยปริมาณเมทิลเอสเทอร์สามารถคำนวณได้ดังสูตร

$$C (\%) = \frac{[\sum A - A_{IS}] \times [C_{IS} \times V_{IS}]}{A_{IS} \times W} \times 100$$

โดยที่

C คือปริมาณของเมทิลเอสเทอร์ (%wt.)

$\sum A$ คือพื้นที่ใต้กราฟทั้งหมดของเมทิลเอสเทอร์ ตั้งแต่ C_8 ถึง $C_{24:0}$

C_{IS} คือความเข้มข้นของ Internal Standard (Methyl heptadecanoate: C_{17}) (mg/ml.)

V_{IS} คือปริมาตรของ Internal Standard ที่ใช้ (ml.)

W คือน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ (mg.)

5.2 การวิเคราะห์หาค่าความเป็นกรด

ชั่งตัวอย่างสาร 5 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ เติมสารละลายโพรพานอล กับ โทลูอีน ปริมาณ 50 มิลลิลิตร จากนั้นหยดฟีนอล์ฟทาไลน์ 2-3 หยด แล้วนำสารละลายที่ได้มาไตเตรตด้วยสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1 N จนถึงจุดยุติ สารละลายเปลี่ยนสีจากไม่มีสี

เป็นสีชมพู จุดปริมาณสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ใช้เพื่อคำนวณหาค่าความเป็นกรด ดังสมการ

$$\text{ค่าความเป็นกรด (AV)} = \frac{\text{ปริมาณสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ใช้ (มิลลิลิตร)} \times 56.1 \times 0.1}{\text{น้ำหนักของน้ำมันตัวอย่างตั้งต้น หรือเมทิลเอสเทอร์ (กรัม)}}$$

หน่วยเป็น: มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม

5.3 การคำนวณร้อยละของผลผลิต (Yield)

โดยการเปรียบเทียบน้ำหนักของน้ำมันเริ่มต้น กับน้ำหนักของเมทิลเอสเทอร์ภายหลังการทำปฏิกิริยา คิดเป็นร้อยละของน้ำมันวัตถุดิบ สามารถคำนวณหาร้อยละของผลผลิต (Yield) ได้ดังสมการ

$$\text{yield} = \frac{\text{Weight of product (g)}}{\text{Weight of Raw oil (g)}} \times 100$$

5.4 การหาความหนืด (Viscosity)

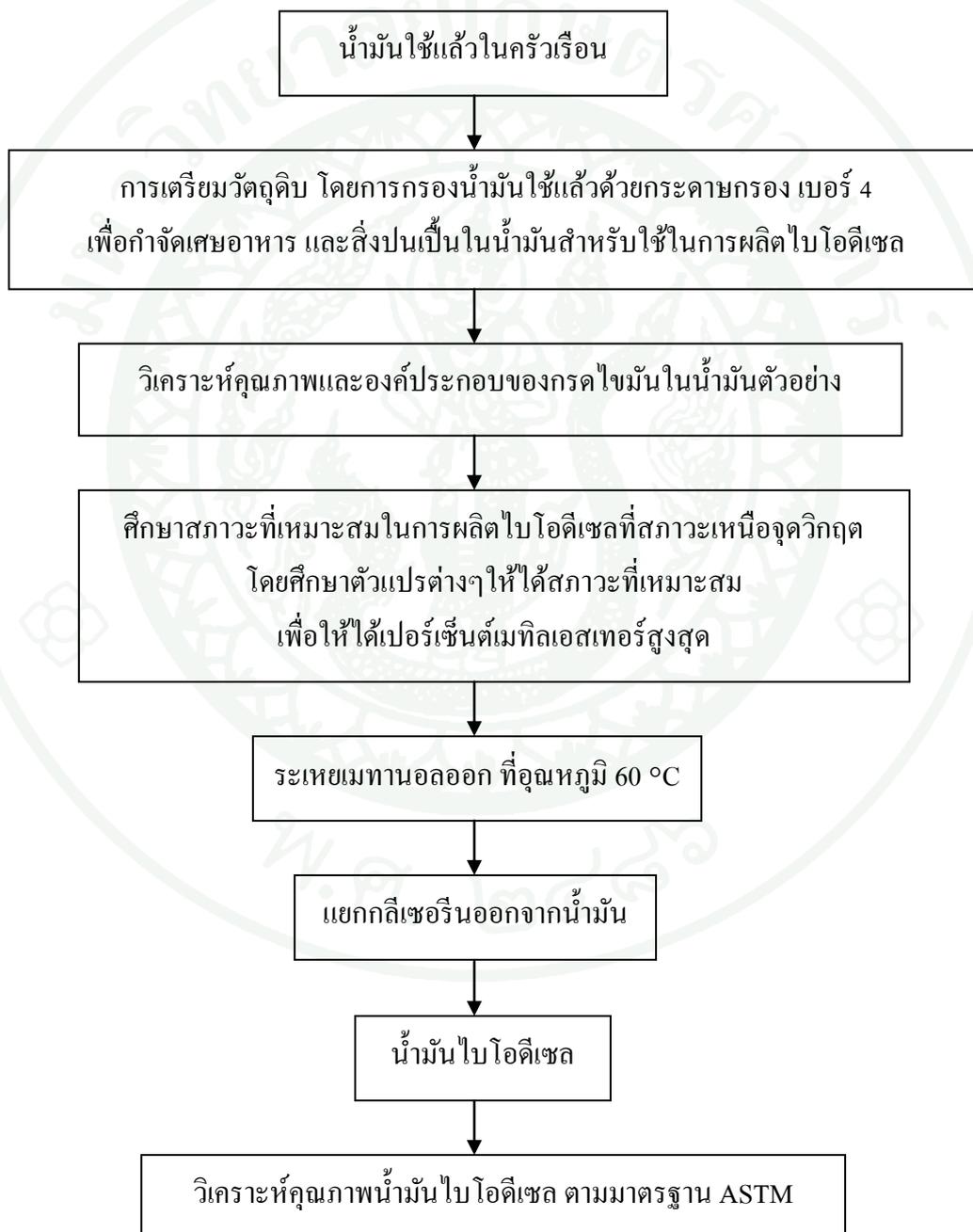
นำน้ำมันตัวอย่างใส่ใน Viscometer แล้วนำไปแขวนใน Viscometer bath จากนั้นใช้ suction หรือ pressure ปรับระดับให้ระดับบนอยู่สูงกว่าจุดจับเวลาจุดแรก ประมาณ 5 มิลลิเมตร จากนั้นปล่อยน้ำมันไหลอย่างอิสระ เริ่มจับเวลาเมื่อระดับบนไหลถึงจุดจับเวลาจุดแรก และหยุดเมื่อถึงจุดจับเวลาจุดที่สอง บันทึกเวลาที่ได้เป็นวินาที

5.5 การทดสอบจุดวาบไฟ

นำน้ำมันตัวอย่างประมาณ 80 มิลลิลิตร จุดเปลวไฟทดสอบและให้ความร้อนแก่น้ำมัน โดยการเพิ่มอุณหภูมิในอัตรา 5-6 องศาเซลเซียสต่อนาที แล้วสังเกตการวาบไฟของไอระเหยน้ำมัน

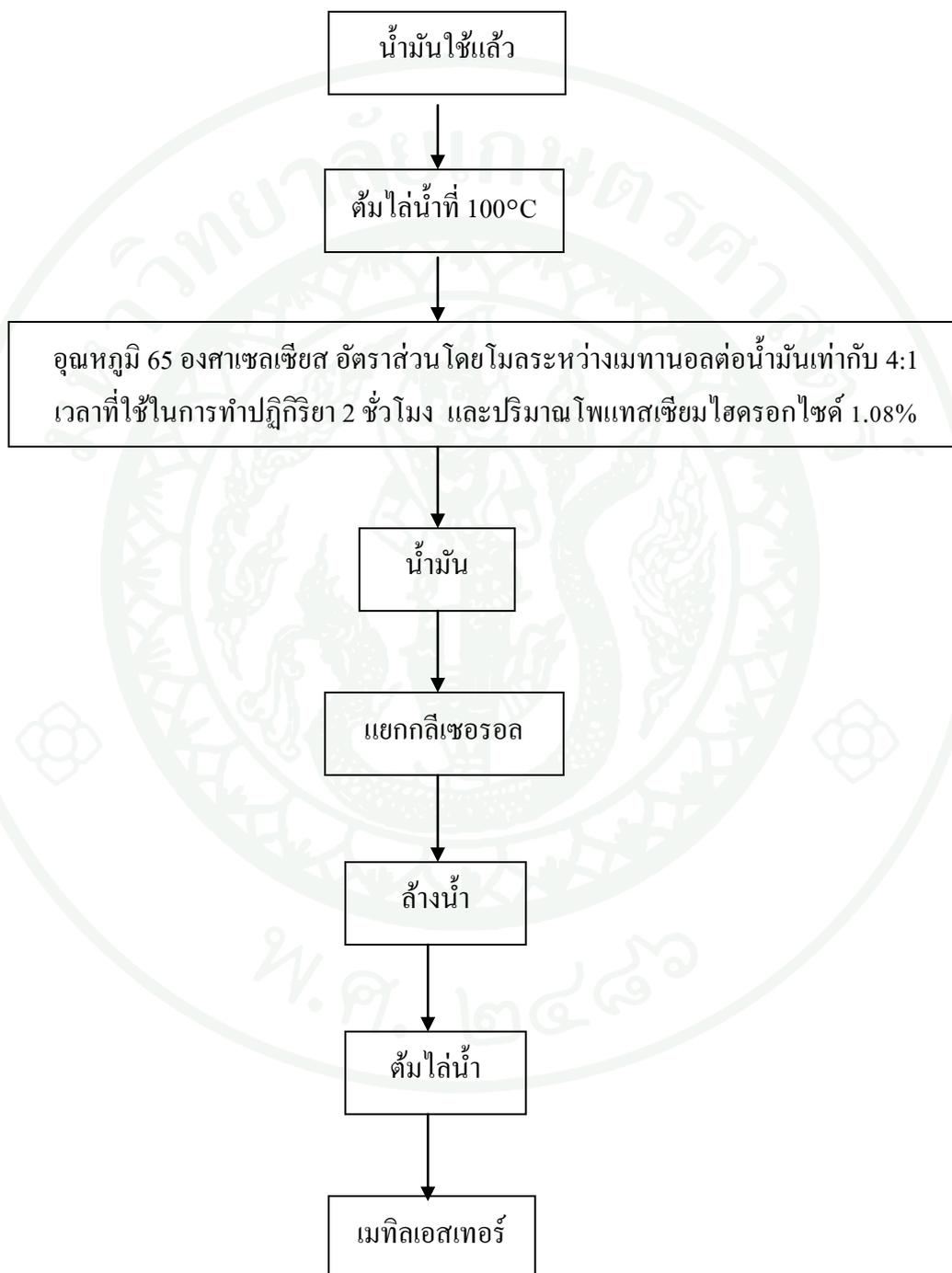
6. สรุปขั้นตอนการทดลองการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้ว

การทดลองการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้วตามที่ได้อธิบายมาเบื้องต้น สามารถสรุปขั้นตอนการทดลองได้ดังภาพที่ 15



ภาพที่ 15 สรุปขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้วด้วยปฏิกิริยาที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต

การทดลองการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้วด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ตามที่ได้อธิบายมาเบื้องต้น สามารถสรุปขั้นตอนการทดลองได้ดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 สรุปขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้วด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

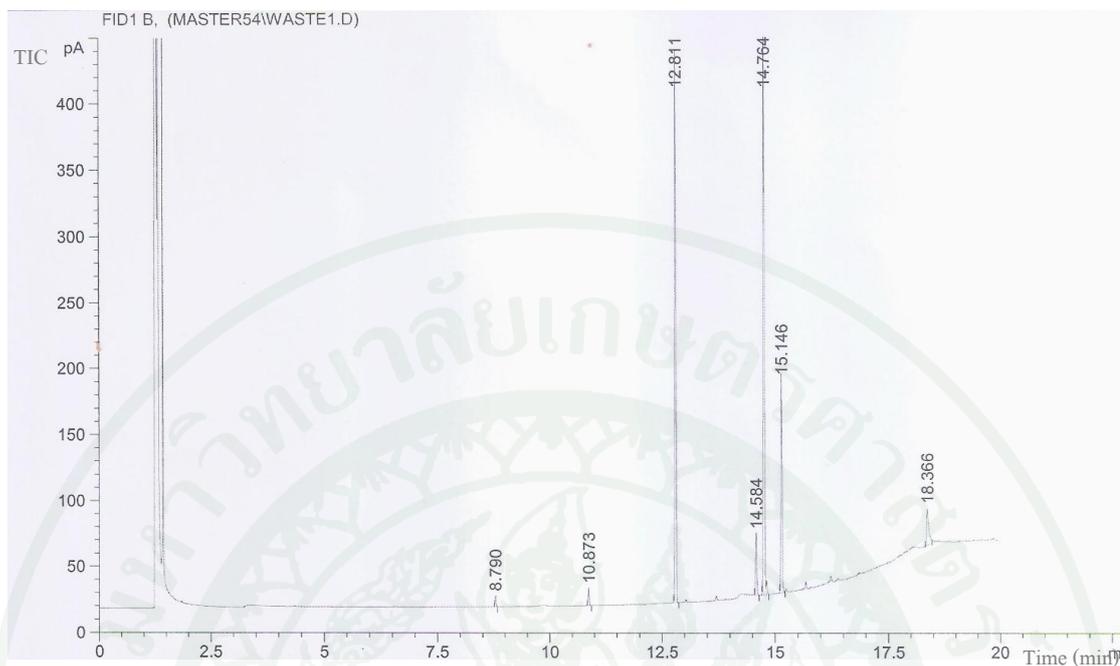
ผลและวิจารณ์

การวิจัยในครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล จากน้ำมันใช้แล้วที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต โดยทำการศึกษาตัวแปรต่างๆดังนี้ ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน ระหว่าง 30:1 ถึง 60:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ในช่วง 250 ถึง 350 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 ถึง 30 นาที ปริมาณน้ำในช่วง 0% ถึง 5% และอัตราความเร็วรอบในการกวนให้คงที่ 500 รอบต่อนาที ผลลัพธ์ที่ได้จะนำมาวิเคราะห์หาปริมาณเมทิลเอสเทอร์ และเมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมแล้วจะนำไปโอดีเซล ไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี เพื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานไบโอดีเซลชุมชน

เนื่องจากวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล เป็นน้ำมันใช้แล้วจากโรงอาหาร ซึ่งมีสิ่งเจือปนอยู่ และน้ำมันได้ผ่านการให้ความร้อนจำนวนหลายครั้ง ทำให้น้ำมันเกิดการแตกตัวเป็นกรดไขมันอิสระในปริมาณสูง ทำให้คุณสมบัติทั้งกายภาพและเคมีเปลี่ยนแปลงไป จึงต้องนำน้ำมันตัวอย่างมาวิเคราะห์หาองค์ประกอบของกรดไขมัน ก่อนที่จะนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล โดยผลการวิเคราะห์มีดังนี้

1. ผลการศึกษาปริมาณและชนิดขององค์ประกอบกรดไขมันจากน้ำมันใช้แล้วจากโรงอาหาร

ผลการวิเคราะห์ปริมาณและชนิดขององค์ประกอบกรดไขมันจากน้ำมันที่ใช้แล้วจากโรงอาหารด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี พบว่าไขมันจะประกอบด้วยกรดปาล์มมิก (Palmitic acid) ร้อยละ 34.57 กรดโอเลอิก (Oleic acid) ร้อยละ 41.71 กรดไลโนเลอิก (Linoleic acid) ร้อยละ 13.86 และกรดไขมันอื่นๆ อีกร้อยละ 9.86 ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่ได้สามารถนำมาคำนวณหาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของกรดไขมัน จากสมการในภาคผนวก ก เท่ากับ 272.78 กรัมต่อโมล น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของน้ำมัน เท่ากับ 856.33 กรัมต่อโมล และยังพบว่าน้ำมันจะประกอบด้วยกรดไขมันที่มีความยาวของจำนวนคาร์บอนอะตอมไม่เกิน 22 อะตอม ซึ่งโครมาโทแกรมขององค์ประกอบกรดไขมัน แสดงดังภาพที่ 17 และชนิดและปริมาณขององค์ประกอบกรดไขมัน แสดงดังตารางที่



ภาพที่ 17 โครมาโทแกรมของกรดไขมันในน้ำมันใช้แล้วจากโรงอาหาร

ตารางที่ 10 ปริมาณและชนิดของกรดไขมันในน้ำมันใช้แล้วจากโรงอาหาร

| ชนิดของกรดไขมัน | Reaction Time (นาที) | น้ำหนักโมเลกุล (กรัมต่อโมล) | ปริมาณของกรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก) |
|------------------|-------------------------|--------------------------------|---|
| Lauric (C12:0) | 8.790 | 200.32 | 0.61 |
| Myristic (C14:0) | 10.873 | 228.37 | 1.01 |
| Palmitic (C16:0) | 12.811 | 256.42 | 34.57 |
| Stearic (C18:0) | 14.584 | 284.48 | 4.02 |
| Oleic (C18:1) | 14.764 | 282.46 | 41.71 |
| Linoleic (C18:2) | 15.146 | 280.45 | 13.86 |
| Erucaic (C22:1) | 18.366 | 338.57 | 4.22 |

จากตารางที่ 10 สามารถคำนวณหาผลรวมโมเลกุลเฉลี่ยของน้ำมันตัวอย่าง ได้เท่ากับ 856.33 กรัมต่อโมล และกรดไขมันมีผลรวมโมเลกุลเฉลี่ยเท่ากับ 272.78 กรัมต่อโมล

2. ผลการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้วที่สถานะเหนือจุดวิกฤต

การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้วที่สถานะเหนือจุดวิกฤตนั้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองจะนำไปวิเคราะห์หาปริมาณเมทิลเอสเทอร์ตามมาตรฐาน ตามมาตรฐาน EN 14103 ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี โดยศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการผลิตไบโอดีเซลหรือปริมาณเมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์ ได้แก่

อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 30:1 ถึง 60:1

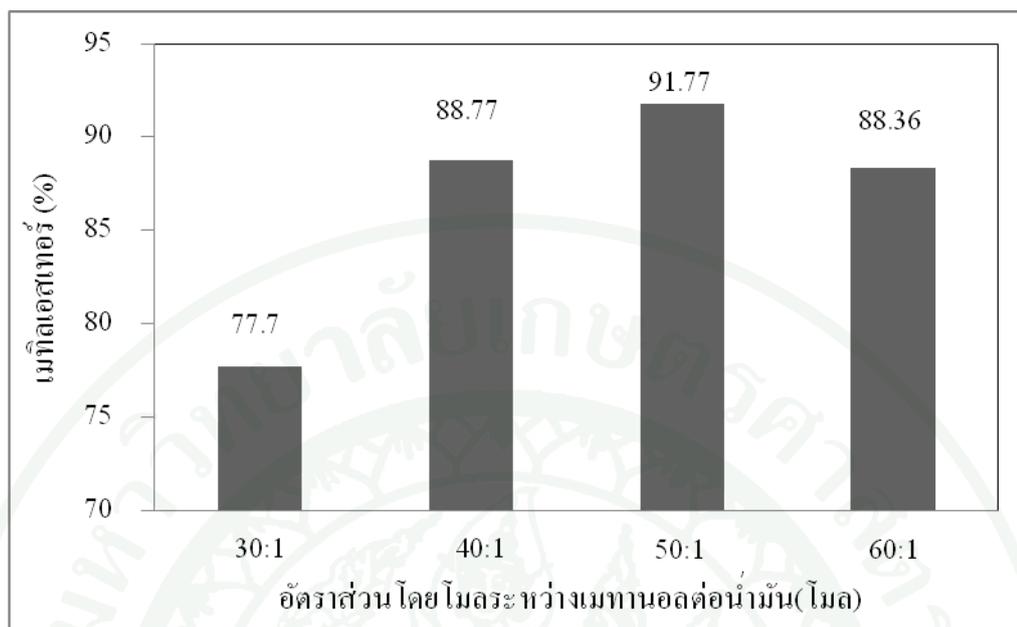
อุณหภูมิ 250 ถึง 350 องศาเซลเซียส

เวลาที่ใช้ในปฏิกิริยา 5 ถึง 45 นาที

ปริมาณน้ำ 0% ถึง 5%

2.1 ผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่มีต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์

จากการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่มีต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์ โดยศึกษาที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่ 30:1, 40:1, 50:1 และ 60:1 โดยควบคุมปัจจัยต่างๆให้คงที่คือ อุณหภูมิที่ในการทำปฏิกิริยาที่ 330 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที และใช้อัตราความเร็วรอบในการกวนให้คงที่ 500 รอบต่อนาที เมื่ออัตราส่วนโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันจาก 30:1 ไปเป็น 50:1 เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นสูงสุดจนถึงอัตราส่วนโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 50:1 เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์เท่ากับร้อยละ 91.77 และลดลงไปเมื่ออัตราส่วนโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 60:1 เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์เท่ากับร้อยละ 88.36 ผลการทดลอง แสดงดังภาพที่ 18

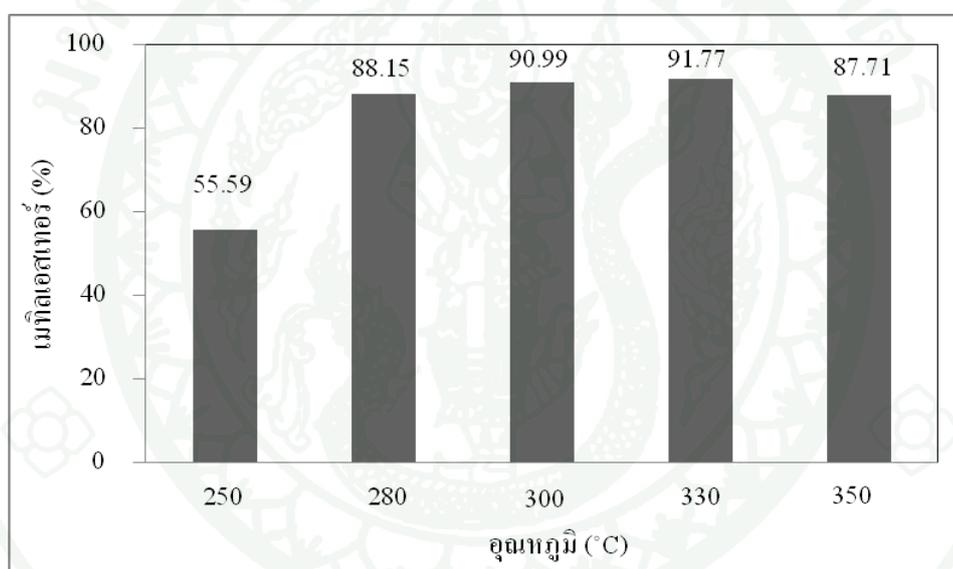


ภาพที่ 18 ผลของอัตราส่วน โดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่มีต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์ ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่ 30:1, 40:1, 50:1 และ 60:1 อุณหภูมิ 330 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 30 นาที

จากผลการทดลองพบว่า ที่อัตราส่วน โดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันใช้แล้วระหว่าง 30:1 ถึง 50:1 จะให้ผลของเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่สูงขึ้น แต่เมื่ออัตราส่วน โดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 60:1 จะให้ผลของเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ลดลงจากอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 50:1 จากผลการทดลองสามารถอธิบายได้ว่า ที่เมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นนั้น เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลในเมทานอลทำหน้าที่เป็นอิมัลซิไฟเออร์ มีผลต่อการแยกตัวของกลีเซอรอลจากเอสเทอร์ตามปริมาณเมทานอลเพิ่มขึ้น แต่เมื่อพิจารณาจากอัตราส่วน โดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 60:1 จะพบว่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ลดลง เนื่องจากปริมาณแอลกอฮอล์ที่มากเกินไป จะทำให้การแยกกลีเซอรอลจากเอสเทอร์ได้ยาก (Rashid and Anwar, 2008) และปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับไปทางซ้ายมือ ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ลดลง จากผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Hee *et al.* (2012) ซึ่งได้ทำการทดลองที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตของเมทานอลจากน้ำมันหมู โดยทำการทดลองที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 30:1 ถึง 60:1 ผลการทดลองพบว่า เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์มีค่าสูงสุด เมื่ออัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 45:1 และลดลงเมื่ออัตราส่วน โดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 60:1

2.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์

การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์พบว่า การทดลองที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 50:1 และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 30 นาที เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 250 องศาเซลเซียส ไปเป็น 330 องศาเซลเซียสนั้น ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นจาก 55.59 ไปเป็น 91.77 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทดลองจาก 330 องศาเซลเซียส ไปเป็น 350 องศาเซลเซียส พบว่า เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ลดลงจาก 91.77 ไปเป็น 87.71 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ผลการทดลอง แสดงดังภาพที่ 19



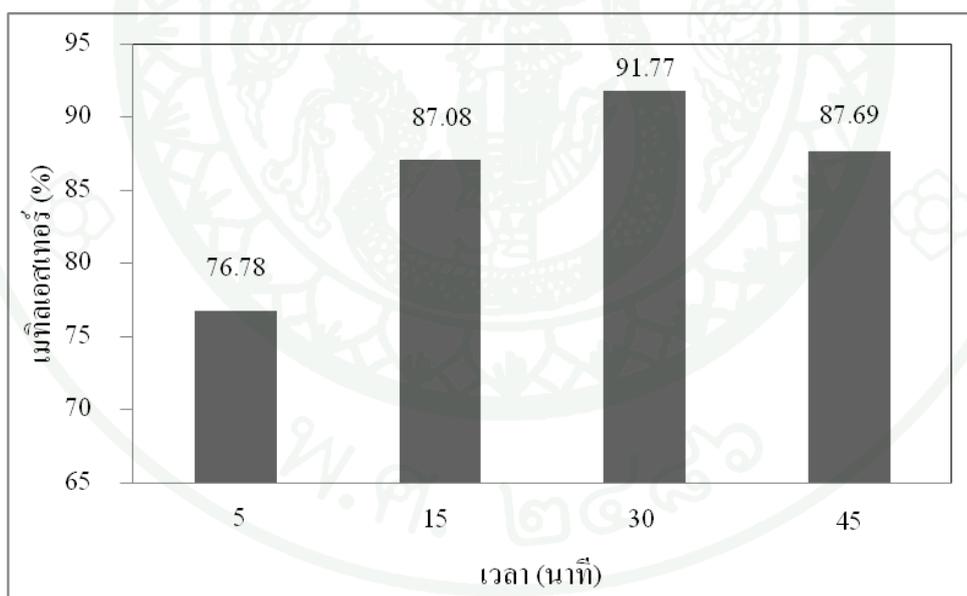
ภาพที่ 19 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อน้ำมันที่มีต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่ 50:1 อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส จนถึง 350 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 30 นาที

จากผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 330 องศาเซลเซียส ซึ่งให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์สูงสุด และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเป็น 350 องศาเซลเซียส จะให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ลดลง เนื่องจากน้ำมันที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการทำปฏิกิริยาในครั้งนี้เป็นน้ำมันใช้แล้วผ่านการประกอบอาหาร ซึ่งให้ความร้อนสูงและมีการปนเปื้อนของเศษอาหาร จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีของน้ำมัน ดังนั้นเมื่อใช้อุณหภูมิในการทดลองที่สูงขึ้น อาจทำให้เกิดการแตกตัวของน้ำมันมากขึ้น อีกทั้งยังมีการปนเปื้อนของ

อาหารในน้ำมัน จึงทำให้น้ำมันทำปฏิกิริยากับเมทานอลได้น้อยลง ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sawangkaew *et al.* (2011) ซึ่งได้ทำการทดลองการผลิตไบโอดีเซลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตของเมทานอลจากเมล็ดปาล์มที่อุณหภูมิ 270 ถึง 350 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิ 325 องศาเซลเซียส จะมีเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์สูงสุด และลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 350 องศาเซลเซียส

2.3 ผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์

เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์ โดยได้ทำการทดลองเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน 4 ระดับ คือ 5, 15, 30 และ 45 นาที ซึ่งทำการทดลองที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 50:1 และอุณหภูมิ 330 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 20



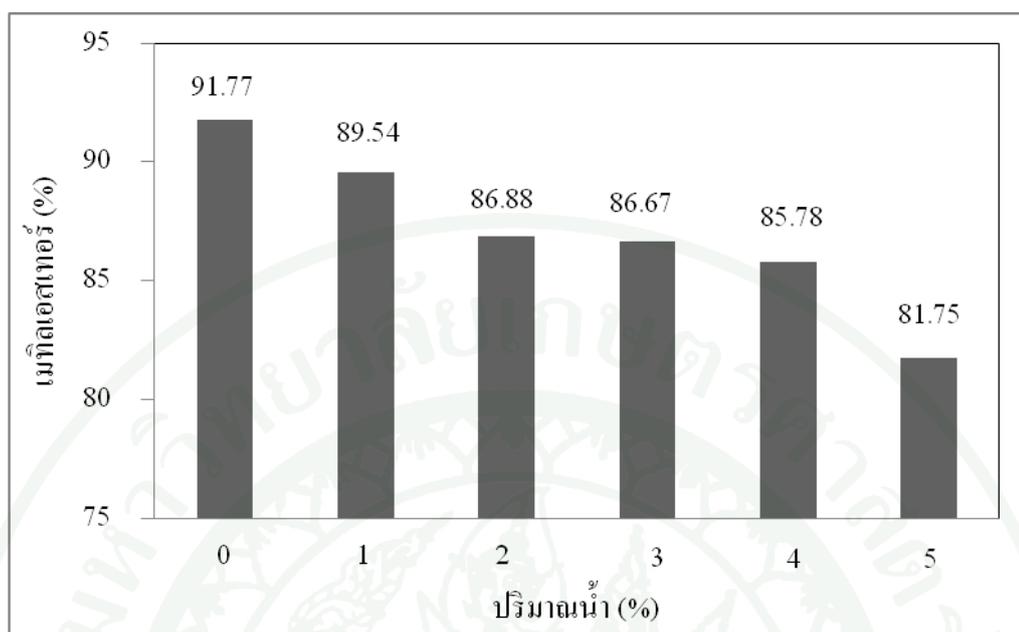
ภาพที่ 20 ผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อน้ำมันที่มีต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่ 50:1 อุณหภูมิ 330 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 5 จนถึง 45 นาที

จากการทดลองผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ที่มีต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์ แสดงดังภาพที่ 20 พบว่า เวลาที่เหมาะสมที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาคือ 30 นาที ซึ่งจะให้

เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์สูงสุดเท่ากับ 91.77 และเมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเป็น 45 นาที จะให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ลดลงจาก 91.77 เป็น 87.69 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากในช่วงเวลา 30 นาที ไตรกลีเซอไรด์และกรดไขมันจะเปลี่ยนเป็นเอสเทอร์ และเมื่อปฏิกิริยาเข้าสู่ภาวะสมดุลแล้วทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นเป็น 45 นาที เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ได้มีปริมาณลดลง ซึ่งการลดลงของเมทิลเอสเทอร์ที่เกิดขึ้นเป็นเพราะการใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาที่นาน จนปฏิกิริยาเข้าสู่ภาวะสมดุล ทำให้ไตรกลีเซอไรด์และกรดไขมันเปลี่ยนเป็นเมทิลเอสเทอร์เกือบหมด จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน จากผลการทดลองที่ได้ นั้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ He *et al.* (2007) ซึ่งได้ทำการทดลองศึกษาอิทธิพลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตของเมทานอลจากน้ำมันถั่วเหลือง โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 10 ถึง 55 นาที โดยใช้อุณหภูมิที่ 320 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองพบว่า เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์จะเพิ่มขึ้นสูงสุด เมื่อเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเป็น 25 นาที และเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์จะลดลงต่ำสุด เมื่อเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 25 นาที เป็น 55 นาที

2.4 ผลของปริมาณน้ำที่มีต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์

ผลการศึกษาปริมาณน้ำที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์ แสดงดังภาพที่ 21 โดยใช้อัตราส่วนระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 50:1 อุณหภูมิ 330 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 30 นาที และได้ทดลองปริมาณน้ำที่ส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์ จำนวน 6 ระดับคือ 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำจาก 0 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 5 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ลดลงจาก 91.77 ไปเป็น 81.75 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ หลังจากการทดลองผ่านไป 30 นาที พบว่าปริมาณน้ำที่ไม่ส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์คือ 0%



ภาพที่ 21 ผลของปริมาณน้ำที่มีผลต่อน้ำมันที่มีต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่ 50:1 อุณหภูมิ 330 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 30 นาที และปริมาณน้ำ 0 ถึง 5 เปอร์เซ็นต์

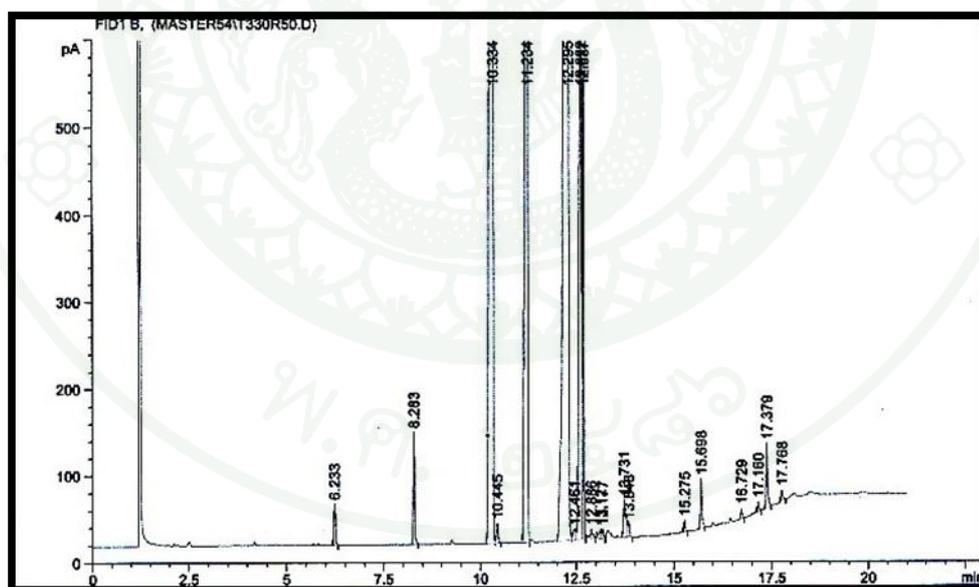
จากผลการทดลองพบว่า ปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 0% ซึ่งจะให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์สูงสุด และเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำในการทำปฏิกิริยาพบว่า เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ลดลง เนื่องจากปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ส่งผลให้ปฏิกิริยาย้อนกลับไปทางซ้ายมือ ทำให้เมทิลเอสเทอร์เปลี่ยนเป็นกรดไขมันอิสระ ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Petchmala *et al.* (2007) ได้ทำการผลิตไบโอดีเซลจากกรดไขมันปาล์มที่สถานะเหนือจุดวิกฤตของเมทานอล โดยศึกษาผลของปริมาณน้ำที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ศึกษาปริมาณน้ำคือ 0 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ ผลการทดลองพบว่า ปริมาณน้ำที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ โดยเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำลงในการทดลองทำให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ลดลง โดยเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์สูงสุดเมื่อปริมาณน้ำ 0 เปอร์เซ็นต์ และลดลงเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น โดยเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ต่ำสุดเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นเป็น 30 เปอร์เซ็นต์

จากผลการทดลองทั้งหมด ซึ่งได้ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลนั้น พบว่า สถานะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาจากน้ำมันใช้แล้วที่

สภาวะเหนือจุดวิกฤต คือ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 50:1 อุณหภูมิ 330 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 30 นาที และปริมาณน้ำ 0% ซึ่งให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 91.77 เปอร์เซ็นต์

3. ค่าคุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซล

การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันไข่แล้วที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตของเมทานอล พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลคือ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 50:1 อุณหภูมิ 330 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 30 นาที และปริมาณน้ำ 0% จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองไปทดสอบหาค่าคุณสมบัติไบโอดีเซล ได้แก่ ปริมาณน้ำและตะกอน จุดวาบไฟ ค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 40°C ค่าความเป็นกรด และค่าความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 15°C ผลการทดลองที่ได้จากการตรวจคุณสมบัติไบโอดีเซลชุมชน แสดงดังตารางที่ 11 และวิเคราะห์หาค่าเมทิลเอสเทอร์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ แสดงดังภาพที่ 22



ภาพที่ 22 โครมาโทแกรมของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ในสภาวะที่เหมาะสมในการทดลอง

ส่วนองค์ประกอบเมทิลเอสเทอร์ของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ในสภาวะที่เหมาะสม จากน้ำมันไข่แล้วที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตของภาพที่ 22 แสดงดังตารางที่ 12

ตารางที่ 11 คุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลอง เมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานไบโอดีเซล

| คุณสมบัติ | ไบโอดีเซลจาก น้ำมันใช้แล้ว ด้วยปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอ ริฟิเคชัน | ไบโอดีเซลจากน้ำมัน ใช้แล้วที่สภาวะเหนือ จุดวิกฤต | มาตรฐาน ไบโอดีเซล ชุมชนตามประกาศ ของกรมธุรกิจ พลังงาน |
|---|---|--|---|
| เมทิลเอสเทอร์ (%) | 82.35 | 91.77 | - |
| ความหนืดที่อุณหภูมิ 40°C (เซนติสโตกส์) | 5.18 | 5.20 | 1.9-8.0 |
| จุดวาบไฟ (°C) | 171 | 162 | มากกว่า 120 |
| ค่าความเป็นกรด (mgKOH/g) | 0.18 | 0.76 | น้อยกว่า 0.8 |
| ปริมาณน้ำและตะกอน | 0.006 | 0.006 | น้อยกว่า 0.2 |
| ความหนาแน่น ที่อุณหภูมิ 15°C (kg/ m ³) | 868.15 | 868.05 | 860-900 |

ที่มา: กรมธุรกิจพลังงาน (2548)

คุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ได้ ค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เท่ากับ 5.20 เซนติสโตกส์ จุดวาบไฟเท่ากับ 162 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรดเท่ากับ 0.76 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ปริมาณน้ำและตะกอนเท่ากับร้อยละ 0.006 โดยปริมาตรและความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียสเท่ากับ 868.05 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งผ่านมาตรฐานไบโอดีเซลชุมชนที่กำหนดโดยกรมธุรกิจพลังงาน

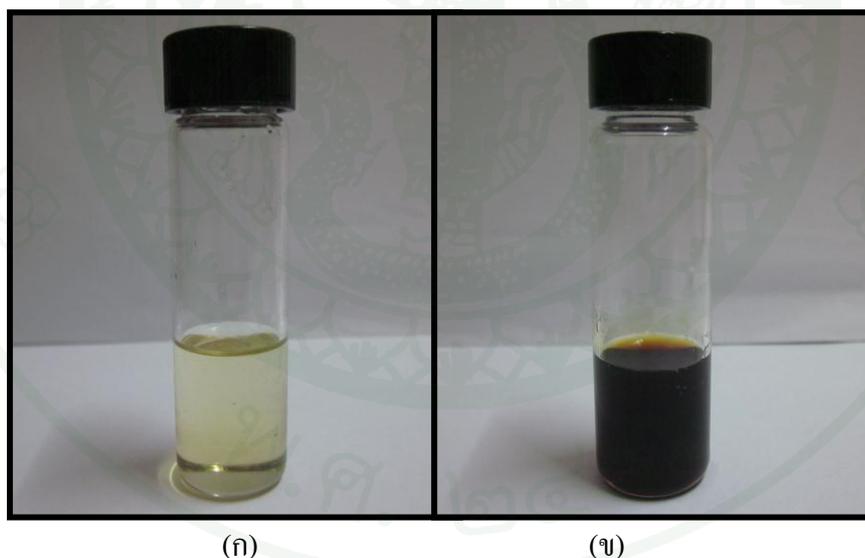
ตารางที่ 12 ปริมาณและชนิดขององค์ประกอบเมทิลเอสเทอร์ของไบโอดีเซลที่สภาวะที่เหมาะสม

| ชนิดของเมทิลเอสเทอร์ | Retention time (นาที) | ปริมาณของเมทิลเอสเทอร์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) |
|------------------------|-----------------------|--|
| Methyl laurate | 6.673 | 0.38624 |
| Methyl myristate | 8.788 | 0.81724 |
| Methyl palmitate | 10.840 | 30.47011 |
| Methyl palmitoleate | 10.947 | 0.18155 |
| Methyl heptadecanolate | 11.750 | 16.36441 |
| Methyl oleate | 12.846 | 40.22404 |
| Methyl stearate | 12.998 | 0.16996 |
| Methyl linoleate | 13.161 | 6.80118 |
| Methyl linolenate | 13.481 | 0.11635 |
| Methyl arachidate | 14.311 | 0.32209 |
| Methyl behenate | 15.887 | 0.09698 |
| Methyl erucate | 16.298 | 0.19145 |
| Methyl lingnocerate | 17.359 | 0.11106 |

จากปริมาณและชนิดขององค์ประกอบเมทิลเอสเทอร์ของไบโอดีเซลที่สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต นำมาคำนวณหาปริมาณเมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์ได้ร้อยละ 91.77

จากการเปรียบเทียบการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้วด้วยปฏิกิริยาที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต กับการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน พบว่า การผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์น้อยกว่าการผลิตไบโอดีเซลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต เนื่องจากในปฏิกิริยามีเมทานอลปริมาณมากพอที่จะทำให้ปฏิกิริยาเลื่อนไปทางขวาเกิดเมทิลเอสเทอร์ ซึ่งต่างจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ซึ่งมีเมทานอลปริมาณน้อย จึงอาจทำให้ปฏิกิริยาเกิดไม่สมบูรณ์ จึงทำให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์น้อยลงด้วย

จากการศึกษากระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้ว โดยศึกษาปฏิกิริยาที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตของเมทานอล และปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้น พบว่า กระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันนั้น มีความซับซ้อน เมื่อเปรียบเทียบกับปฏิกิริยาที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต โดยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันต้องทำการต้มไล่ไอน้ำก่อนทำปฏิกิริยา และเมื่อทำปฏิกิริยาแล้วต้องใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานานถึง 2 ชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบกับที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตของเมทานอลใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาเพียง 30 นาที จึงเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมที่สุด อีกทั้งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ขณะที่ปฏิกิริยาที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตนั้นใช้ความร้อนและความดันสูงในการทำปฏิกิริยา เมื่อได้ผลิตภัณฑ์แล้วปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจะต้องทำการล้างน้ำ โดยน้ำล้างไบโอดีเซลนั้นจะมีโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ออกมากับน้ำล้างด้วย ต่างกับวิธีปฏิกิริยาที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตไม่ต้องทำการล้างน้ำ อีกทั้งกลีเซอรอลที่ได้ก็มีความบริสุทธิ์กว่าปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน แสดงดังภาพที่ 23 และผลการเปรียบเทียบวิธีการผลิตไบโอดีเซลแสดงดังตารางที่ 13



ภาพที่ 23 กลีเซอรอลที่ได้จากกระบวนการผลิต

- (ก) กลีเซอรอลที่ได้จากกระบวนการผลิตที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตของเมทานอล
- (ข) กลีเซอรอลที่ได้จากกระบวนการผลิตปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

จากการเปรียบเทียบวิธีการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต กับ ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน สามารถสรุปวิธีการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันไข่แล้ว ดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 การเปรียบเทียบวิธีการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันไข่แล้ว

| ตัวแปร | ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา | ปฏิกิริยาที่สภาวะเหนือจุด วิกฤตของเมทานอล |
|------------------------------------|---|---|
| เวลาในการทำปฏิกิริยา | 120 นาที | 30 นาที |
| การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา | ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ | ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา |
| ผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ ที่ได้ | ปกติ | สูงกว่า |
| การทำให้เมทิลเอสเทอร์ บริสุทธิ์ | ต้องทำการล้าง | ไม่ต้องล้างน้ำ |
| น้ำล้างไบโอดีเซล | โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ปนอยู่ | - |
| การนำเมทานอลกลับมา ใช้ใหม่ | ไม่สามารถนำกลับมาใช้ได้ | สามารถนำกลับมาใช้ได้โดย การระเหยด้วยสุญญากาศ |
| การนำกลีเซอรอลไปใช้ | ต้องทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์ | - |

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้วด้วยปฏิกิริยาที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตของเมทานอล แล้วนำไบโอดีเซลที่ได้จากสภาวะที่เหมาะสมที่สุดมาทดสอบคุณสมบัติ ตามมาตรฐานไบโอดีเซลชุมชน จากการทดลองสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. คุณสมบัติของน้ำมันใช้แล้ว

จากการทดสอบคุณสมบัติของน้ำมันใช้แล้วพบว่า น้ำมันที่ใช้แล้วมีค่าความเป็นกรดเท่ากับ 1.008 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ค่ากรดไขมันอิสระเท่ากับร้อยละ 0.5427 โดยมีองค์ประกอบหลักคือ กรดโอเลอิก และกรดปาล์มมิติก ซึ่งเป็นองค์ประกอบของน้ำมันปาล์ม โดยเมื่อคำนวณหาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยจะได้ น้ำหนักโมเลกุลกรดไขมันอิสระเท่ากับ 272.78 กรัมต่อโมล และมีมวลโมเลกุลเฉลี่ยของน้ำมันใช้แล้วเท่ากับ 856.33 กรัมต่อโมล

2. การทดลองผลิตไบโอดีเซลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต

การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้วที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต โดยใช้จุดวิกฤตของเมทานอลในการทดลอง (อุณหภูมิที่จุดวิกฤตเท่ากับ 240 องศาเซลเซียส ความดันเท่ากับ 81 บาร์) โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมในการทดลองคือ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 50:1 อุณหภูมิ 330 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 30 นาที และปริมาณน้ำ 0% ซึ่งให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 91.77 เปอร์เซ็นต์

การทดลองโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้อุณหภูมิและความดันวิกฤตของเมทานอลในการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นตาม เมื่ออัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 50:1 และอุณหภูมิเท่ากับ 330 องศาเซลเซียส และเมื่อปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุลแล้วจะทำให้

เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ลดลง เมื่ออัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 60:1 เมื่ออุณหภูมิเท่ากับ 350 องศาเซลเซียส

เมื่อเพิ่มเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ได้มีปริมาณเพิ่มขึ้นตาม และเมื่อเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจนปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุลแล้ว จะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ลดลง และปริมาณน้ำในปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นนั้น จะทำให้แนวโน้มของเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ลดลง

3. คุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลอง

คุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองมีค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เท่ากับ 5.20 เซนติสโตกส์ จุควาไฟฟ้าเท่ากับ 162 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรดเท่ากับ 0.76 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ปริมาณน้ำและตะกอนเท่ากับร้อยละ 0.006 โดยปริมาตรและความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียสเท่ากับ 868.05 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งผ่านมาตรฐานไบโอดีเซลชุมชนที่กำหนดโดยกรมธุรกิจพลังงาน ซึ่งสามารถนำไปใช้กับเครื่องยนต์ทางการเกษตรได้

4. การเปรียบเทียบการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้วด้วยปฏิกิริยาที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตกับการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

จากการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้วด้วยปฏิกิริยาที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตกับการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน พบว่า การผลิตไบโอดีเซลน้ำมันใช้แล้วด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันนั้น ยังให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์น้อยกว่าการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้วด้วยปฏิกิริยาที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ทั้งนี้เนื่องจากการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้วด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันนั้น ใช้ปริมาณเมทานอลในการเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์ให้เปลี่ยนเมทิลเอสเทอร์ได้น้อยกว่าการผลิตไบโอดีเซลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ซึ่งใช้ปริมาณเมทานอลในการทำปฏิกิริยาจำนวนมาก จึงทำให้เกิดเมทิลเอสเทอร์มากกว่า ดังนั้นการผลิตผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้วด้วยปฏิกิริยาที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตจึงมีความเหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล

ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้วด้วยปฏิกิริยาที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต เป็นการนำน้ำมันใช้แล้วที่ต้องกำจัดทิ้งนำมาผลิตเป็นไบโอดีเซล เพื่อไม่ให้เกิดปัญหากับสิ่งแวดล้อม และเป็นกรนำน้ำมันใช้แล้วกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ เพื่อการอนุรักษ์และรักษาสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังสามารถลดต้นทุนการหาวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล และสามารถพัฒนาคุณภาพของไบโอดีเซลให้มีคุณภาพดี และสามารถนำไปใช้ได้โดยมีข้อเสนอแนะดังนี้

1. การผลิตไบโอดีเซลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตนั้น เป็นปฏิกิริยาที่ใช้อุณหภูมิและความดันในการทำปฏิกิริยาที่สูง ซึ่งในการผลิตไบโอดีเซลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตในขนาดคั้น ควรมีการนำตัวเร่งปฏิกิริยาเข้ามาประยุกต์ใช้ในการทดลอง เช่น การนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้ามาใช้ในการทำปฏิกิริยา เพื่อให้อุณหภูมิและความดันลดลง และสามารถให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่สูง
2. ควรหาวิธีการทำให้ไบโอดีเซลมีความบริสุทธิ์มากขึ้น โดยอาจทำปฏิกิริยาที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตของเมทานอลสูงๆ เพื่อให้ปริมาณร้อยละของเมทานอลสูงขึ้น
3. ควรนำแนวทางการทดลองนี้ไปปรับใช้กับแหล่งไขมันหรือน้ำมันใช้แล้วประเภทอื่น หรือจากแหล่งอื่น เพื่อนำมาเป็นแหล่งพลังงานแทนการนำไปกำจัดทิ้ง โดยนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติและองค์ประกอบของไขมัน เพื่อนำไปทำการทดลองกับไขมันหรือน้ำมันนั้นต่อไป

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. 2551. คู่มือการจัดการน้ำมันและไขมันจากปอดักไขมันและการนำไปใช้
ประโยชน์สำหรับบ้านเรือน. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ.
- กรมธุรกิจพลังงาน. 2548. ประกาศ เรื่อง ลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิล
เอสเตอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2548. แหล่งที่มา: <http://www.doeb.go.th/law/law.html>,
17 กุมภาพันธ์ 2554.
- _____. 2555. สถิติปริมาณและมูลค่าการนำเข้า ส่งออก น้ำมันเชื้อเพลิง. แหล่งที่มา:
http://www.doeb.go.th/info/data/datadistribution/graph/Graph55/July55/limp-q_crude53-55.xls, 20 พฤษภาคม 2555.
- จุฑาเกศ เทียนเมฆางกูร. 2551. การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันที่ผ่านการใช้ทอดแล้วโดยกระบวนการ
ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ชินนทัต สีนประเสริฐโชค. 2549. การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันดอกทานตะวันโดยใช้
คาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤตเป็นตัวกลาง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ธงชัย พัฒนารพันธ์. 2547. การศึกษาสภาวะการสกัดวิตามินอีจากวิตามินอีจากน้ำมันปาล์มโดยใช้
คาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ศุภฤดี รัตนพระ. 2549. การตรึงไลเปสจาก *Pseudomonas fluorescens* เพื่อผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมัน
เมล็ดทานตะวัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ตะวัน นัตร์สูงเนิน. 2543. การลดปริมาณคอเรสเตอรอลในไข่แดงผงโดยการสกัดด้วยคาร์บอนได
ออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุวรรณ อภัยสุวรรณ. 2550. การศึกษาเปรียบเทียบการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤตเป็นตัวกลางกับวิธีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Ayhan Demirbas. 2009. Biodiesel from waste cooking oil via base-catalytic and supercritical methanol transesterification. **Energy Conversion and Management**. 50: 923-927.

Banerjee, A. and R. Chakraborty. 2009. Parametric sensitivity in transesterification of waste cooking oil for biodiesel production—A review. **Resources Conservation and Recycling**. 53: 490-497.

Bocevskaja, M. and H. Sovova. 2007. Supercritical CO₂ extraction of essential oil from yarrow. **Supercritical Fluid**. 40: 360-367.

Campanelli, P., M. Banchero. and L. Manna. 2010. Synthesis of biodiesel from edible, non-edible and waste cooking oil via supercritical methyl acetate transesterification. **Fuel**. 89: 3675-3682.

Charpe, T. W. and V. K. Rathod. 2011. Biodiesel production using waste frying oil. **Waste Management**. 31: 85-90.

Chen, Y., B. Xiao, J. Chang, Y. Fu, P. Lv. and X. Wang. 2009. Synthesis of biodiesel from waste cooking oil using immobilized lipase in fixed bed reactor. **Energy Conversion and Management**. 50: 668-673.

Dizge, N., C. Aydinler, D. Y. Imer, M. Bayramoglu, A. Tanriseven and B. Keskinler. 2009. Biodiesel production from sunflower, soybean, and waste cooking oils by Transesterification using lipase immobilized onto a novel microporous polymer. **Bioresource Technology**. 100: 1983-1991.

- Georgogianni, K. G., M. G. Kontominasa, D. Avlonitis and V. Gergis. 2008. Conventional and in situ transesterification of sunflower seed oil for the production of biodiesel. **Fuel processing Technology**. 89: 503-509.
- Guan, G., K. Kusakabe, N. Sakurai and K. Moriyama. 2009. Transesterification of vegetable oil to biodiesel fuel using acid catalysts in the presence of dimethyl ether. **Fuel**. 88: 81-86.
- Gui, M.M., K. T. Teong and S. Bhatia. 2009. Supercritical ethanol technology for the production Of biodiesel: Process optimization studies. **Supercritical Fluid**. 49: 286-292.
- He, H., T. Wang and S. Zhu. 2007. Continuous production of biodiesel fuel from vegetable oil using supercritical methanol process. **Fuel**. 86: 442-447.
- Hee, Y.S., S.H. Lee, J.H. Ryu, S.Y. Bae. 2012. Biodiesel production from waste lard using Supercritical methanol. **Supercritical Fluids**. 61: 134-138.
- Imahara, H., E. Minami, S. Hari and S. Saka. 2008. Thermal stability of biodiesel in supercritical Methanol. **Fuel**. 87: 1-6.
- Jain, S., M.P. Sharma and S. Rajvanshi. 2010. Acid base catalyzed transesterification kinetics of waste cooking oil. **Fuel Processing Technology**. 92: 32-38.
- Junming, X., J. Xiao, H. Huang and G. Xiao. 2009. Liquid hydrocarbon fuels obtained by the pyrolysis of soybean oils. . **Bioresource Technology**. 100: 4867-870.
- Kulkarni, M.G. and A.K. Dalai. 2006. Waste cooking oil-An Economical Source for Biodiesel: A Review. **Ind Eng Chem Res**. 45: 2901-2913.

- Lapuerta, M., J. M. Herreros, L. L. Lyons, R. G. Contreras and Y. Briceno. 2008. Effect of the alcohol type used in the production of waste cooking oil biodiesel on diesel performance and emissions. **Fuel**. 87: 3161-3169.
- Lee, S., D. Posarac and N. Ellis. 2012. An experimental investigation of biodiesel synthesis from waste canola oil using supercritical methanol. **Fuel**, 91: 229-237.
- Leung, D.Y.C. and Y. Guo. 2006. Transesterification of Neat and Used Frying Oil: Optimization For Biodiesel Production. **Fuel Processing Technology**. 87:883-890.
- Luca Fiori. 2009. Supercritical extraction of sunflower seed oil: Experimental data and model Validation. **Supercritical Fluid**. 50: 218-224.
- Machmudah, S., M. Kondo, M. Sasaki, M. Goto, J. Munemasa, and M. Yamagata. 2008. Pressure effect in supercritical CO₂ extraction of plant seeds. **Supercritical Fluid**. 44: 301-307.
- Marchetti, J.M., V.U. Miguel and A.F. Erraza. 2007. Possible methods for biodiesel production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 11: 1300-1311.
- Miao, X. and Q. Wu. 2006. Biodiesel production from heterotrophic microalgal oil. **Bioresource Technology**. 6: 841-846.
- Noiroj, K., P. Intarapong, A. Luengnaruemitchai and S. Jai-in. 2009. A comparative study of KOH/Al₂O₃ and KOH/NaY catalysts for biodiesel production via transesterification from palm oil. **Renewable energy**. 34: 1145-1150.
- Olutoye, M.A. and B.H. Hameed. 2010. Transesterification of palm oil on K_yMg_{1-x}Zn_{1+x}O₃ catalyst: Effect of Mg–Zn interaction. **Fuel Processing Technology**. 91: 653-659.

- Patil, P., S. Deng, J.I. Rhodes. and P.J. Lammers. 2010. Conversion of waste cooking oil to biodiesel using ferric sulfate and supercritical methanol processes. **Fuel**. 89: 360-364.
- Petchmala, A., D. Yujaroen, A. Shotipruk, M. Goto and M. Sasaki. 2007. Production Methyl Esters from Palm Fatty Acids in Supercritical Methanol, pp. EEP3_1-EFP3_3. *In Proceedings of the 17th Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Chemistry Conference*. 29-30 October 2008. Chiang Mai university, Chiang Mai.
- Phan, A.N. and T.M. Phan. 2008. Biodiesel production from waste cooking oils. **Fuel**. 89: 360-364.
- Rashid, U. and F. Anwar. 2008. Production of biodiesel through optimized Alkali-catalyzed Transesterification of Rape seed oil. **Fuel**. 87: 265-273.
- Rathore V. and G. Madras. 2007. Synthesis of biodiesel from edible and non-edible oils in supercritical alcohols and enzymatic synthesis in supercritical carbon dioxide. **Fuel**. 86: 2650-2659.
- Saka, S. and D. Kusdiana. 2001. Biodiesel fuel from rapeseed oil as prepared in supercritical methanol. **Fuel**. 80: 225-231.
- Shin, H. Y., S. H. Lee., J. H. Ryu and S. Y. Bae. 2012. Biodiesel production from waste lard using supercritical methanol. **Supercritical Fluid**. 61: 134-138.
- Song, E., J. Lim, M. Lee and Y. Lee. 2008. Transesterification of RBD palm oil using supercritical Methanol. **Supercritical Fluid**. 44: 356-363.
- Suwangkeaw R., K. Bunyakiat and S. Ngamprasertsith. 2011. Continuous production of biodiesel with supercritical methanol: Optimization of a scale-up plug reactor by response surface methodology. **Fuel Processing Technology**. 92: 2285-2292.

- Tan, K., M. Gui., K. Lee and A. Mohamed. 2010. An optimized study of methanol and ethanol in supercritical alcohol technology for biodiesel production. **Supercritical Fluids**. 53: 82-87.
- Tan, T. K., K. T. Lee and A. R. Mohamed. 2010. Effects of free fatty acids, water content and co-solvent on biodiesel production by supercritical methanol reaction. **Supercritical Fluids**. 53: 88-91.
- Vemavarapu, C., M. J. Mollan, M. Loyada and T.E. Needham. 2005. Design and process aspects of laboratory scale SCF particle formation systems. **Pharmaceutics**. 292: 1-16.
- Vyas, A., N. Subrahmanyam and P.A. Patel. 2009. Production of biodiesel through transesterification of Jatropha oil using $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ solid catalyst. **Fuel**. 88: 625-628
- Zhang, H., R. Xiao, H. Huang and G. Xiao. 2009. Comparison of non-catalytic and catalytic Fast pyrolysis of corncob in a fluidized bed reactor. **Bioresource Technology**. 100: 1428-1434.
- Zhong, S. Y., J. H. Jun, W. Zhi, H. R. Xia, J. Y. Jun, L. X. Mei and Y. S. Peng. 2009. Bioremediation of Oil Spills in Cold Environments: A Review. **Pedosphere**. 19: 371-381.



ภาคผนวก



1. การคำนวณน้ำหนักโมเลกุลของน้ำมันใช้แล้วจากโรงอาหารของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากการวิเคราะห์ปริมาณและชนิดของกรดไขมันด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟของน้ำมันใช้แล้วจากโรงอาหารของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 ปริมาณและชนิดของกรดไขมันของน้ำมันใช้แล้วจากโรงอาหารของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

| ชนิดของกรดไขมัน | Reaction Time (นาที) | น้ำหนักโมเลกุล (กรัมต่อโมล) | ปริมาณของกรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก) |
|------------------|-------------------------|--------------------------------|---|
| Lauric (C12:0) | 8.790 | 200.318 | 0.61 |
| Myristic (C14:0) | 10.873 | 228.37 | 1.01 |
| Palmitic (C16:0) | 12.811 | 256.42 | 34.57 |
| Stearic (C18:0) | 14.584 | 284.48 | 4.02 |
| Oleic (C18:1) | 14.764 | 282.46 | 41.71 |
| Linoleic (C18:2) | 15.146 | 280.45 | 13.86 |
| Erucaic (C22:1) | 18.366 | 338.57 | 4.22 |

การคำนวณหาน้ำหนักโมเลกุลของน้ำมันใช้แล้ว สามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักโมเลกุลของกรดไขมันเฉลี่ย} &= \frac{\sum \{\%FA_n \times MW_n\}}{100} \\ &= \frac{\{(0.61 \times 200.318) + (1.01 \times 228.37) + (34.57 \times 256.42) + (4.02 \times 284.48) + \dots + (4.22 \times 338.57)\}}{100} \\ &= 272.7758 \text{ กรัมต่อโมล} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักโมเลกุลของน้ำมันใช้แล้วเฉลี่ย} &= (\text{น้ำหนักโมเลกุลของกรดไขมันอิสระ} \times 3) - 3 + 41 \\ &= 272.7758 \times 3 - 3 + 41 \\ &= 856.33 \text{ กรัมต่อโมล} \end{aligned}$$

2. ปริมาณน้ำมันใช้แล้วและเมทานอลที่ใช้ตามอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันใช้แล้ว

การคำนวณหาปริมาณน้ำมันใช้แล้วและเมทานอลที่ใช้ในสถานะเหนือจุดวิกฤต เพื่อผลิตไบโอดีเซล โดย

มวลโมเลกุลของน้ำมันใช้แล้วเท่ากับ 856.33 กรัมต่อโมล

มวลโมเลกุลของเมทานอลเท่ากับ 32 กรัมต่อโมล

ถ้าต้องการเตรียมอัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันต่อแอลกอฮอล์เท่ากับ 1:10 ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

ปริมาณน้ำมันใช้แล้วเริ่มต้นที่ใช้ 50 กรัม

โดยน้ำมันใช้แล้วมีมวลโมเลกุล เท่ากับ 856.33 กรัม/โมล

คิดเป็นจำนวน โมลเท่ากับ $\frac{50 \text{ กรัม}}{856.33 \text{ กรัม/โมล}} = 0.05839 \text{ โมล}$

ดังนั้น ปริมาณเมทานอลที่ใช้เท่ากับ $0.05839 \times 30 = 1.7517 \text{ โมล}$

หรือเท่ากับ $1.7517 \text{ โมล} \times 32 \text{ กรัม/โมล} = 56.05 \text{ กรัม}$

ในการทดลองจะใช้ปริมาณน้ำมันใช้แล้วเริ่มต้น 50.0 กรัม ดังนั้นปริมาณเมทานอลที่ใช้ดังนี้

ตารางผนวกที่ ก2 ปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลองที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันใช้แล้วต่อเมทานอล

| | น้ำหนักน้ำมันใช้แล้ว (กรัม) | น้ำหนักเมทานอลที่ใช้ (กรัม) |
|---|--------------------------------|--------------------------------|
| อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันใช้แล้วต่อเมทานอล | | |
| 30:1 | 50.0 | 56.05 |
| 40:1 | 50.0 | 74.73 |
| 50:1 | 50.0 | 93.42 |
| 60:1 | 50.0 | 112.11 |

3. ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

การคำนวณปริมาณเมทิลเอสเทอร์จากโครมาโทแกรม ซึ่งได้จากการวิเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ตามมาตรฐาน EN 14103 โดยใช้ Methyl Heptadecanoate เป็นสาร Internal standard สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\%FAME = \frac{[\sum A - A_{IS}]}{A_{IS}} \times \frac{[C_{IS} \times V_{IS}]}{W} \times 100$$

โดยที่

- %FAME คือปริมาณของเมทิลเอสเทอร์ (%wt.)
- $\sum A$ คือพื้นที่ใต้กราฟทั้งหมดของเมทิลเอสเทอร์ ตั้งแต่ C_8 ถึง $C_{24:0}$
- C_{IS} คือความเข้มข้นของ Internal Standard (Methyl heptadecanoate: C_{17}) (mg/มล.)
- V_{IS} คือปริมาตรของ Internal Standard ที่ใช้ (มล.)
- W คือน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ (mg)

ตารางผนวกที่ ก3 ตัวอย่างพื้นที่ใต้กราฟของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากสภาวะเหนือจุดวิกฤต
จากโครมาโทแกรมของภาพผนวกที่ ก1

| Peak No. | Retention time | Width (min) | Area [pA*s] | Area (%) | Name |
|----------|----------------|-------------|-------------|----------|-----------------------|
| 1 | 4.051 | 0.0277 | 13.53495 | 0.04588 | Methyl octanoate |
| 2 | 6.938 | 0.0000 | 0.00000 | 0.00000 | Methyl decanoate |
| 3 | 9.364 | 0.0257 | 98.01168 | 0.33221 | Methyl laurate |
| 4 | 11.655 | 0.0281 | 207.86203 | 0.70454 | Methyl myristate |
| 5 | 13.847 | 0.0452 | 7783.05957 | 26.38052 | Methyl palmitate |
| 6 | 14.051 | 0.0279 | 41.26950 | 0.13988 | Methyl palmitoate |
| 7 | 14.835 | 0.0476 | 6424.66162 | 21.77625 | Methyl heptadecanoate |
| 8 | 15.771 | 0.0445 | 911.88898 | 3.09083 | Methyl stearate |
| 9 | 16.001 | 0.0501 | 8969.60059 | 30.40227 | Methyl oleate |
| 10 | 16.389 | 0.0530 | 4575.03125 | 15.50697 | Methyl linoleate |
| 11 | 16.941 | 0.0299 | 83.95242 | 0.28455 | Methyl linolenate |
| 12 | 17.524 | 0.0315 | 79.29908 | 0.26878 | Methyl arachidate |
| 13 | 19.349 | 0.0409 | 26.58994 | 0.09013 | Methyl behenate |
| 14 | 19.715 | 0.0000 | 0.00000 | 0.00000 | Methyl erucate |
| 15 | 20.887 | 0.0000 | 0.00000 | 0.00000 | Methyl lingnocerate |
| Total | | | 2.95031e4 | | |

$$\text{จากสมการ} \quad \%FAME = \frac{[\sum A - A_{IS}]}{A_{IS}} \times \frac{[C_{IS} \times V_{IS}]}{W} \times 100$$

$$\begin{aligned} \text{จะได้} \quad \%FAME &= \frac{29503.1 - 6424.66162}{6424.66162} \times \frac{10.108 \times 1 \times 100}{58.2} \\ &= 3.5922 \times 0.1737 \times 100 \\ &= 62.39\% \end{aligned}$$

4. การคำนวณปริมาณร้อยละผลผลิตไบโอดีเซล (% Yield)

การคำนวณปริมาณร้อยละผลผลิตไบโอดีเซล สามารถหาได้จากการเปรียบเทียบน้ำหนักของน้ำมันเริ่มต้น กับน้ำหนักของเมทิลเอสเทอร์ภายหลังการทำปฏิกิริยา คิดเป็นร้อยละของน้ำมันวัตถุดิบ สามารถคำนวณหาร้อยละของผลผลิต (Yield) ได้ดังสมการ

$$\text{yield} = \frac{\text{น้ำหนักของเมทิลเอสเทอร์}}{\text{น้ำหนักของวัตถุดิบ}} \times 100$$

ตัวอย่างการคำนวณ

น้ำหนักของน้ำมันวัตถุดิบเริ่มต้นเท่ากับ 50 กรัม

น้ำหนักของเมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 31.89 กรัม

ดังนั้น ปริมาณร้อยละผลผลิตไบโอดีเซล เท่ากับ $\frac{31.89 \times 100}{50} = 63.78 \%$



ภาคผนวก ข
วิธีวิเคราะห์หาคุณสมบัติของไบโอดีเซล

1. วิธีวิเคราะห์ความหนืด

ทำการวิเคราะห์ความหนืดโดยใช้เครื่อง Constant-Temperature Bath โดยเริ่มจากเปิดเครื่อง Constant-Temperature Bath ปรับอุณหภูมิเป็น 40 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงใส่ตัวอย่างประมาณ 20 มิลลิลิตร ลงในหลอดวัดความหนืด (Viscometer) จากนั้นนำหลอดวัดความหนืดที่ใส่ตัวอย่างไว้เรียบร้อยแล้วไปใส่ในเครื่อง Constant-Temperature Bath รอจนอุณหภูมิกึ่งที่ประมาณ 30 นาที จากนั้นใช้ลูกยางดูดตัวอย่างจากหลอดวัดความหนืดให้ขึ้นมาอยู่เหนือขีดบนของหลอด แล้วเริ่มจับเวลาเมื่อตัวอย่างน้ำมันไหลจากขีดบนลงมาถึงขีดล่างของหลอดวัดความหนืด แสดงดังภาพผนวกที่ ข1 ทำการบันทึกเวลาที่ใช้ในการทดลอง จากนั้นวิเคราะห์ความหนืดได้จากสมการ

$$V = Ct$$

โดย V คือ ค่าความหนืด หน่วย เซนติสโตกส์ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

C คือ ค่าความหนืดต่อเวลาของหลอดวัดความหนืด ซึ่งในการทดลองนี้ใช้หลอดวัด (NO.200

L313) ความหนืดมีค่า C ที่ 40 องศาเซลเซียส เท่ากับ 0.1015 เซนติสโตกส์ต่อวินาที

T คือ เวลาที่สารตัวอย่างใช้ในการไหลจากขีดบนจนถึงขีดล่างของหลอดวัดความหนืด

หน่วยเป็นวินาที



ภาพผนวกที่ ข1 วิสโคมิเตอร์สำหรับวัดความหนืด

จากการทดลองวัดความหนืดของไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้วที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต จับเวลาได้ 50 วินาที สามารถนำมาวิเคราะห์ความหนืดได้ดังนี้

$$V = Ct$$

$$V = 50 \times 0.1015$$

$$= 5.075 \text{ เซนติสโตกส์}$$

2. การวิเคราะห์จุดวาบไฟ (Flash point)

2.1 อุปกรณ์การทดลอง

2.1.1 อุปกรณ์ Pensky-Marten Closed Tester

2.1.2 เทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน โดย

สำหรับการทดสอบที่อุณหภูมิตั้งแต่ 50-230°F (10-110°C) ใช้เมอร์โมมิเตอร์ 9F (9C)

สำหรับการทดสอบที่อุณหภูมิตั้งแต่ 230-700°F (110-370°C) ใช้เมอร์โมมิเตอร์ 10F (10C)

2.2 วิธีการทดลอง

2.2.1 จัดอุปกรณ์เครื่องมือ Pensky-Marten Closed Tester ควรระวังถ้วยที่ใส่น้ำมัน ตัวอย่างและส่วนอุปกรณ์ทุกชิ้นให้มีความสะอาดอย่างมาก

2.2.2 ใส่น้ำมันตัวอย่างลงในถ้วยจนถึงขีดที่กำหนด

2.2.3 ปิดฝาถ้วยและประกอบเครื่องมือ หมุนสกรูยึดอุปกรณ์ให้เรียบร้อย

2.2.4 จุดเปลวไฟทดสอบ (Test Flame) ให้มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 mm

2.2.5 ให้ความร้อนแก่น้ำมันตัวอย่าง โดยการเพิ่มอุณหภูมิในอัตรา (9-11°F)/นาที ((5-6°C)/นาที)

2.2.6 ปรับใบกวนน้ำมันตัวอย่างในถ้วย ให้หมุนในทิศทาง Downward direction ให้ได้ประมาณ 90-120 รอบ/นาที

2.2.7 นำเปลวไฟทดสอบเข้าไปในถ้วยที่อุณหภูมิจากจุดวาบไฟใช้เวลา 0.5 วินาที แล้วปล่อยทิ้งไว้ในถ้วยทดลอง 1 วินาที แล้วรีบนำขึ้น ทำตามวิธีนี้ทุกๆ ช่วงอุณหภูมิ 2°F (1°C) ที่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งสังเกตเห็นการวาบไฟของไอระเหยของน้ำมันตัวอย่างพร้อมกับบันทึกอุณหภูมิที่เกิดการวาบไฟ



ภาพผนวกที่ ข2 อุปกรณ์ Pensky-Martens Closed Tester

3. ค่าน้ำและตะกอนในน้ำมันเชื้อเพลิง (มาตรฐาน ASTM D2709)

ปริมาณความชื้นหรือน้ำที่มีอยู่ในน้ำมันใช้แล้วสามารถส่งผลกระทบต่อการผลิตไบโอดีเซล โดยปริมาณน้ำจะส่งผลทำให้เกิดสบู่ขึ้นในระหว่างการทำปฏิกิริยา เมื่อใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งการเกิดสบู่ในปฏิกิริยาขึ้นนั้น นอกจากจะสิ้นเปลืองแล้วยังส่งผลให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง

3.1 อุปกรณ์การทดลอง

3.1.1. เครื่องเหวี่ยง (Centrifugal)

3.1.2. หลอดแก้ววัดปริมาตร (Centrifuge tube)

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1. ล้างหลอดวัดปริมาตรน้ำและตะกอนให้สะอาด พร้อมทั้งทำการอบที่ $100 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ให้แห้ง

3.2.2. เติมน้ำมันที่ต้องการวิเคราะห์ปริมาตร 100 มิลลิลิตรในหลอดแก้ววัดปริมาตร จากนั้นปิดด้วยจุกก๊อก

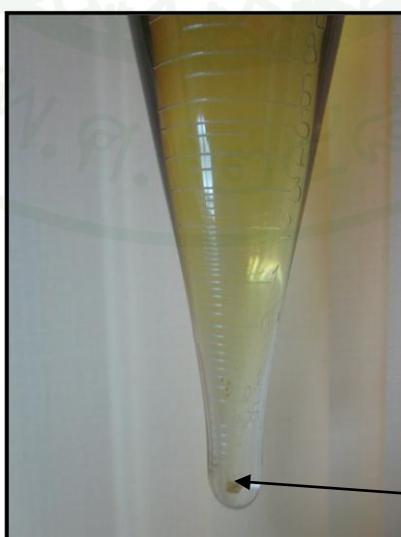
3.2.3. นำตัวอย่างในข้อ 2 ที่ใส่ในหลอดแก้ววัดปริมาตรใส่ในเครื่องเหวี่ยง (วางหลอดวัดปริมาตรโดยให้น้ำหนักสองด้านเท่ากัน เพื่อให้เกิดความสมดุลระหว่างการเหวี่ยงน้ำมันตัวอย่าง) อุณหภูมิ 32-35°C ทิ้งไว้ 15 นาที

3.2.4. เหวี่ยงด้วยความเร็วรอบประมาณ 600-700 รอบ/นาที เป็นเวลา 10 นาที ระหว่างทำการเหวี่ยงให้ควบคุมอุณหภูมิไม่ให้เกิน $65 \pm 5^{\circ}\text{C}$

3.2.5. หยุดเครื่องเหวี่ยงทำการอ่านพร้อมทั้งบันทึกปริมาตรของน้ำและตะกอนที่ได้ หากปริมาตรที่ได้ไม่ถึงขีดสเกลขีดแรก ให้บันทึกเป็น N/D (Not detect หรือไม่สามารถวัดค่าได้)



ภาพผนวกที่ ข3 เครื่องเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง



ขีดสเกลที่อ่านได้

ภาพผนวกที่ ข4 หลอดแก้ววัดปริมาตร

4. การวัดค่าความเป็นกรด ตามมาตรฐาน ASTM D664

ค่าของกรดคือ จำนวนมิลลิกรัมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเป็นกลางกับกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในน้ำมันจำนวน 1 กรัม ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณภาพน้ำมัน โดยที่น้ำมันคุณภาพดีจะมีค่าความเป็นกรดต่ำ หากน้ำมันมีกรดไขมันอิสระสูงจะมีค่าความเป็นกรดสูง

4.1 อุปกรณ์การทดลอง

4.1.1 ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มล.

4.1.2 ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มล.

4.1.3 บิวเรต

4.1.4 เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง

4.1.5 หลอดหยด

4.2 วิธีการทดลอง

4.2.1 ชั่งน้ำมันตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียว ปริมาณดังแสดงในตารางผนวกที่ ข1 ให้น้ำหนักแน่นนอน ใส่ในขวดรูปชมพู่ พร้อมทั้งบันทึกน้ำหนักน้ำมันตัวอย่าง

ตารางผนวกที่ ข1 ปริมาณตัวอย่างน้ำมัน/ไขมันที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด

| ค่าของกรด | น้ำหนักน้ำมัน ($\pm 10\%$) กรัม | ความละเอียดในการชั่ง \pm กรัม |
|-----------|-----------------------------------|---------------------------------|
| 0-1 | 20 | 0.05 |
| 1-4 | 10 | 0.02 |
| 4-15 | 2.5 | 0.01 |
| 15-75 | 0.5 | 0.001 |
| >75 | 0.1 | 0.0002 |

4.2.2 เติมสารผสมโพพานอลกับโทลูอิน ปริมาณ 125 มิลลิลิตร โดยใช้กระบอกตวง เขย่าให้น้ำมันตัวอย่างละลาย อาจใช้ความร้อนในกรณีที่น้ำมันไม่ละลายในสารละลาย

4.2.3 เติมสารละลายฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์ ปริมาณ 2 มิลลิลิตร

4.2.4 ไตเตรตด้วยสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จนสารละลายเริ่ม

เปลี่ยนสีเป็นสีชมพูอ่อน และคงตัวอยู่ 30 วินาที บันทึกปริมาตรของสารละลายมาตรฐาน โพลีแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้

4.3 วิธีคำนวณ

$$\text{ค่าของกรด} \quad AV = \frac{(A-B) \times N \times 56.1}{W}$$

AV = ค่าความเป็นกรด หน่วยเป็นมิลลิกรัมของ โพลีแทสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัมไขมัน

B = ความเข้มข้นของสารละลาย โพลีแทสเซียมไฮดรอกไซด์, นอร์มัล

V = ปริมาตรของสารละลาย โพลีแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรต, มิลลิลิตร

W = น้ำหนักน้ำมันตัวอย่าง, กรัม

$$\% \text{ FFA (as oleic acid)} = \frac{AV}{1.99}$$

ตัวอย่างการคำนวณค่าความเป็นกรดและปริมาณกรดไขมันอิสระ

ชั่งน้ำมันตัวอย่าง 2.0 กรัม ละลายในสารผสมโพรพานอลกับโทลูอีน ปริมาณ 125 มิลลิลิตร เติมสารละลายฟีนอล์ฟทาลินอินดิเคเตอร์ ปริมาณ 2 มิลลิลิตร ไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐาน โพลีแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จนสารละลายเริ่มเปลี่ยนสีเป็นสีชมพูอ่อน และคงตัวอยู่ 30 วินาที บันทึกปริมาตรของสารละลายมาตรฐาน โพลีแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้

$$AV = \frac{(0.2-0.1) \times 0.0676 \times 56.2}{2.01} = 0.18$$

ตัวอย่างการคำนวณปริมาณกรดไขมันอิสระในรูปของกรดโอเลอิก

$$\% \text{ FFA} = \frac{1.008}{1.99} = 0.5065$$



ตารางผนวกที่ ๑1 ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ โดยควบคุมปัจจัยอื่นๆ คืออัตราส่วนโดยโมลระหว่าง เมทานอลต่อน้ำมันที่ 30:1 อัตราเร็วในการกวน 500 รอบต่อนาที และเวลาที่ใช้ ในการทำปฏิกิริยา 30 นาที

| ลำดับ ที่ | อัตราส่วนโดย โมลระหว่าง เมทานอล ต่อน้ำมัน | อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส) | ความดัน (บาร์) | เวลาที่ใช้ ในการทำ ปฏิกิริยา (นาที) | % เมทิลเอสเทอร์ (% FAME) ในผลิตภัณฑ์ | % เมทิล เอสเทอร์ เฉลี่ย |
|--------------|--|--------------------------------|-------------------|--|--|-------------------------------|
| 1 | 30:1 | 250 | 61.2 | 30 | 62.39 | 59.65 |
| | 30:1 | 250 | 63.8 | 30 | 56.90 | |
| 2 | 30:1 | 280 | 65.3 | 30 | 68.52 | 67.22 |
| | 30:1 | 280 | 67.5 | 30 | 65.91 | |
| 3 | 30:1 | 300 | 72.9 | 30 | 81.54 | 81.07 |
| | 30:1 | 300 | 73.7 | 30 | 80.60 | |
| 4 | 30:1 | 330 | 77.6 | 30 | 78.24 | 77.60 |
| | 30:1 | 330 | 79.3 | 30 | 76.96 | |
| 5 | 30:1 | 350 | 82.7 | 30 | 63.54 | 68.05 |
| | 30:1 | 350 | 81.4 | 30 | 72.55 | |

ตารางผนวกที่ ค2 ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ โดยควบคุมปัจจัยอื่นๆ คืออัตราส่วนโดยโมลระหว่าง เมทานอลต่อน้ำมันที่ 40:1 อัตราเร็วในการกวน 500 รอบต่อนาที และเวลาที่ใช้ ในการทำปฏิกิริยา 30 นาที

| ลำดับ ที่ | อัตราส่วนโดย โมลระหว่าง เมทานอล ต่อน้ำมัน | อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส) | ความดัน (บาร์) | เวลาที่ใช้ ในการทำ ปฏิกิริยา (นาที) | % เมทิลเอสเทอร์ (% FAME) ในผลิตภัณฑ์ | % เมทิล เอสเทอร์ เฉลี่ย |
|--------------|--|--------------------------------|-------------------|--|--|-------------------------------|
| 1 | 40:1 | 250 | 69.6 | 30 | 55.54 | 55.84 |
| | 40:1 | 250 | 71.5 | 30 | 56.13 | |
| 2 | 40:1 | 280 | 76.9 | 30 | 64.37 | 64.68 |
| | 40:1 | 280 | 77.4 | 30 | 64.99 | |
| 3 | 40:1 | 300 | 84.3 | 30 | 89.18 | 85.04 |
| | 40:1 | 300 | 83.2 | 30 | 80.89 | |
| 4 | 40:1 | 330 | 107.4 | 30 | 89.75 | 88.77 |
| | 40:1 | 330 | 109.6 | 30 | 87.78 | |
| 5 | 40:1 | 350 | 110.9 | 30 | 86.38 | 83.88 |
| | 40:1 | 350 | 113.1 | 30 | 81.37 | |

ตารางผนวกที่ ค3 ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ โดยควบคุมปัจจัยอื่นๆ คืออัตราส่วนโดยโมลระหว่าง เมทานอลต่อน้ำมันที่ 50:1 อัตราเร็วในการกวน 500 รอบต่อนาที และเวลาที่ใช้ ในการทำปฏิกิริยา 30 นาที

| ลำดับ ที่ | อัตราส่วนโดย โมลระหว่าง เมทานอล ต่อน้ำมัน | อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส) | ความดัน (บาร์) | เวลาที่ใช้ ในการทำ ปฏิกิริยา (นาที) | % เมทิลเอสเทอร์ (% FAME) ในผลิตภัณฑ์ | % เมทิล เอสเทอร์ เฉลี่ย |
|--------------|--|--------------------------------|-------------------|--|--|-------------------------------|
| 1 | 50:1 | 250 | 74.9 | 30 | 55.59 | 55.59 |
| | 50:1 | 250 | 74.2 | 30 | 55.58 | |
| 2 | 50:1 | 280 | 95.9 | 30 | 90.63 | 88.15 |
| | 50:1 | 280 | 96.4 | 30 | 85.66 | |
| 3 | 50:1 | 300 | 109.6 | 30 | 92.52 | 90.99 |
| | 50:1 | 300 | 110.9 | 30 | 89.45 | |
| 4 | 50:1 | 330 | 135.5 | 30 | 91.45 | 91.77 |
| | 50:1 | 330 | 132.8 | 30 | 92.09 | |
| 5 | 50:1 | 350 | 183.3 | 30 | 89.33 | 87.71 |
| | 50:1 | 350 | 189.9 | 30 | 86.08 | |

ตารางผนวกที่ ๓4 ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ โดยควบคุมปัจจัยอื่นๆ คืออัตราส่วนโดยโมลระหว่าง เมทานอลต่อน้ำมันที่ 60:1 อัตราเร็วในการกวน 500 รอบต่อนาที และเวลาที่ใช้ ในการทำปฏิกิริยา 30 นาที

| ลำดับ ที่ | อัตราส่วนโดย โมลระหว่าง เมทานอล ต่อน้ำมัน | อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส) | ความดัน (บาร์) | เวลาที่ใช้ ในการทำ ปฏิกิริยา (นาที) | % เมทิลเอส เทอร์ (% FAME) ในผลิตภัณฑ์ | % เมทิล เอสเทอร์ เฉลี่ย |
|--------------|--|--------------------------------|-------------------|--|--|-------------------------------|
| 1 | 60:1 | 250 | 85.4 | 30 | 32.87 | 34.52 |
| | 60:1 | 250 | 87.3 | 30 | 36.17 | |
| 2 | 60:1 | 280 | 135.9 | 30 | 42.63 | 42.20 |
| | 60:1 | 280 | 137.4 | 30 | 41.76 | |
| 3 | 60:1 | 300 | 164.9 | 30 | 92.69 | 91.24 |
| | 60:1 | 300 | 163.8 | 30 | 89.78 | |
| 4 | 60:1 | 330 | 195.1 | 30 | 89.04 | 88.36 |
| | 60:1 | 330 | 197.6 | 30 | 87.67 | |
| 5 | 60:1 | 350 | 249.8 | 30 | 52.02 | 50.54 |
| | 60:1 | 350 | 252.4 | 30 | 49.05 | |

ตารางผนวกที่ ๕ ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ โดยควบคุมปัจจัยอื่นๆ คืออัตราส่วนโดยโมลระหว่าง เมทานอลต่อน้ำมันที่ 50:1 อัตราเร็วในการกวน 500 รอบต่อนาที และอุณหภูมิ ใช้ที่ในการทำปฏิกิริยา 330 องศาเซลเซียส

| ลำดับ ที่ | อัตราส่วนโดย โมลระหว่าง เมทานอล ต่อน้ำมัน | อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส) | ความดัน (บาร์) | เวลาที่ใช้ ในการทำ ปฏิกิริยา (นาที) | % เมทิลเอส เทอร์ (% FAME) ในผลิตภัณฑ์ | % เมทิล เอสเทอร์ เฉลี่ย |
|--------------|--|--------------------------------|-------------------|--|--|-------------------------------|
| 1 | 50:1 | 330 | 115.5 | 5 | 70.93 | 76.78 |
| | 50:1 | 330 | 113.8 | 5 | 82.62 | |
| 2 | 50:1 | 330 | 122.2 | 15 | 85.25 | 87.08 |
| | 50:1 | 330 | 120.1 | 15 | 88.91 | |
| 3 | 50:1 | 330 | 127.9 | 30 | 91.45 | 91.77 |
| | 50:1 | 330 | 128.7 | 30 | 92.09 | |
| 4 | 50:1 | 330 | 135.5 | 45 | 85.90 | 87.69 |
| | 50:1 | 330 | 139.6 | 45 | 89.48 | |

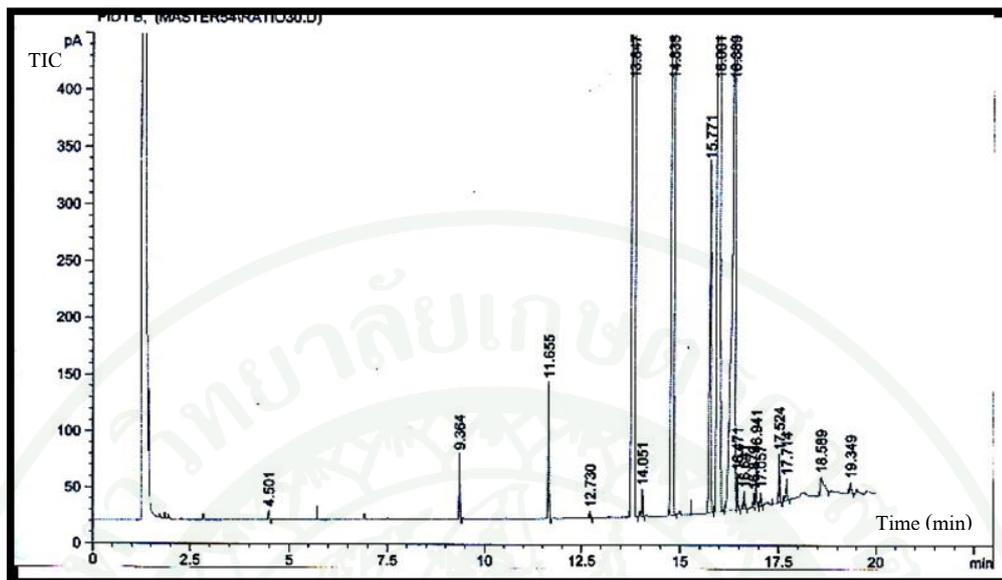
ตารางผนวกที่ ๑๖ ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ โดยควบคุมปัจจัยอื่นๆ คืออัตราส่วนโดยโมลระหว่าง เมทานอลต่อน้ำมันที่ 50:1 อัตราเร็วในการกวน 500 รอบต่อนาที อุณหภูมิ ใช้ที่ในการทำปฏิกิริยา 330 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 30 นาที

| ลำดับ ที่ | อัตราส่วน โดยโมล ระหว่าง เมทานอล ต่อน้ำมัน | อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส) | ความ ดัน (บาร์) | เวลาที่ใช้ ในการทำ ปฏิกิริยา (นาที) | ปริมาณ น้ำ (%) | % เมทิลเอส เทอร์ (% FAME) ในผลิตภัณฑ์ | % เมทิล เอสเทอร์ เฉลี่ย |
|--------------|--|--------------------------------|-----------------------|--|----------------------|--|-------------------------------|
| 1 | 50:1 | 330 | 139.7 | 30 | 1 | 89.45 | 89.54 |
| | 50:1 | 330 | 138.6 | 30 | 1 | 89.62 | |
| 2 | 50:1 | 330 | 140.1 | 30 | 2 | 86.47 | 86.88 |
| | 50:1 | 330 | 139.4 | 30 | 2 | 87.29 | |
| 3 | 50:1 | 330 | 136.7 | 30 | 3 | 85.58 | 86.67 |
| | 50:1 | 330 | 138.2 | 30 | 3 | 87.76 | |
| 4 | 50:1 | 330 | 138.9 | 30 | 4 | 84.75 | 85.78 |
| | 50:1 | 330 | 139.4 | 30 | 4 | 86.80 | |
| 5 | 50:1 | 330 | 137.7 | 30 | 5 | 80.30 | 81.75 |
| | 50:1 | 330 | 138.5 | 30 | 5 | 83.20 | |

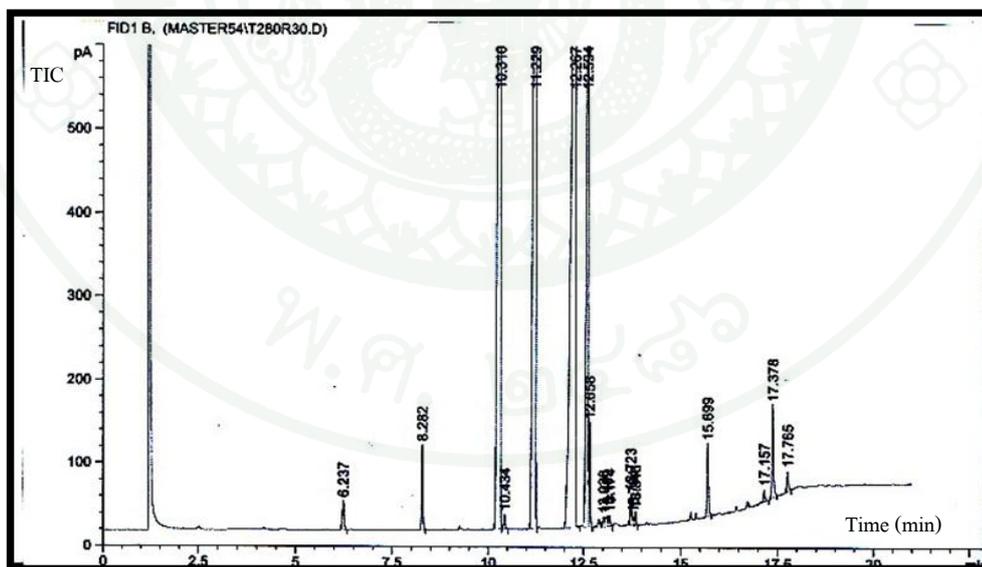


ภาคผนวก ง

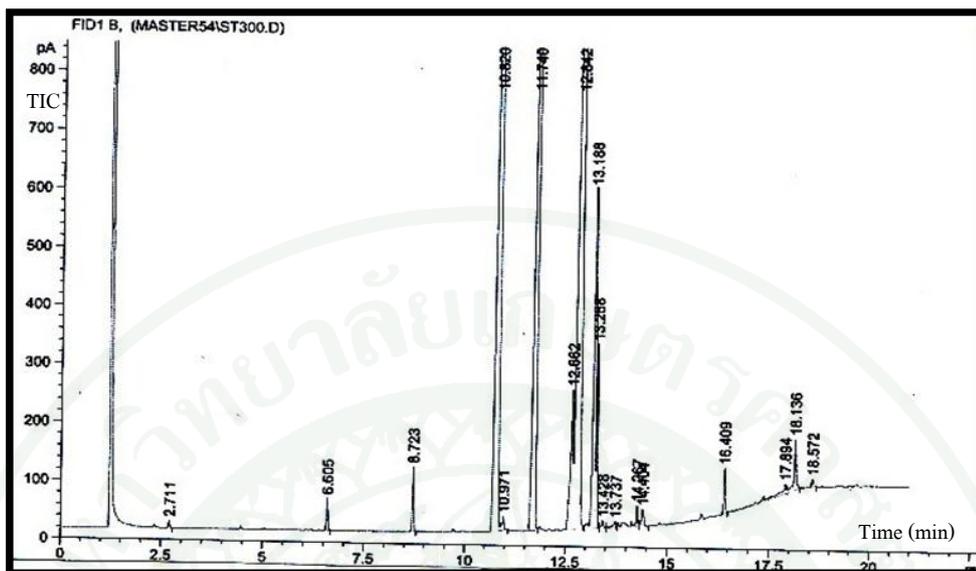
โครมาโทแกรมของตัวอย่างต่างๆที่วิเคราะห์ได้จากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ



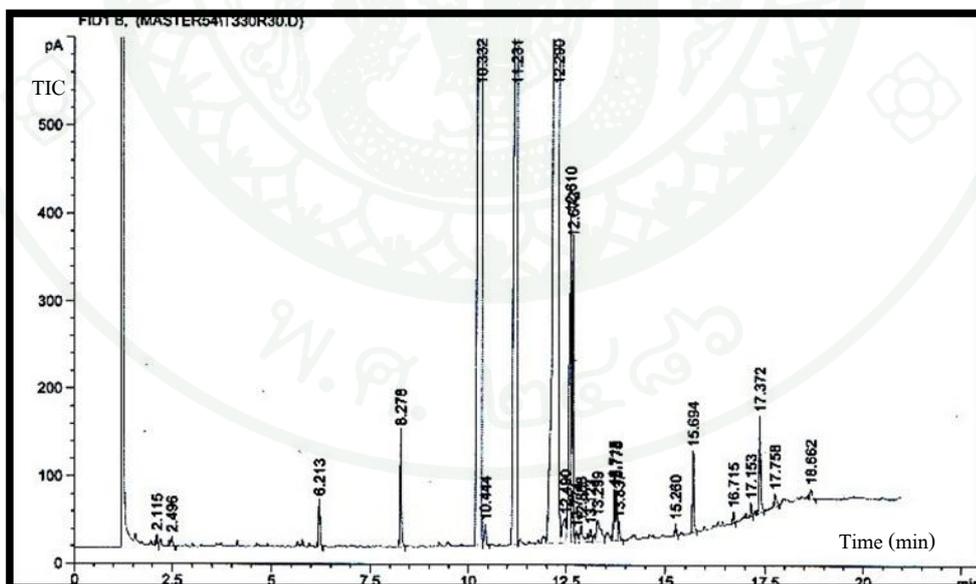
ภาพผนวกที่ ๑1 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วน โดยโมลระหว่างเมทานอลต่อ น้ำมันเท่ากับ 30:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 250 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที



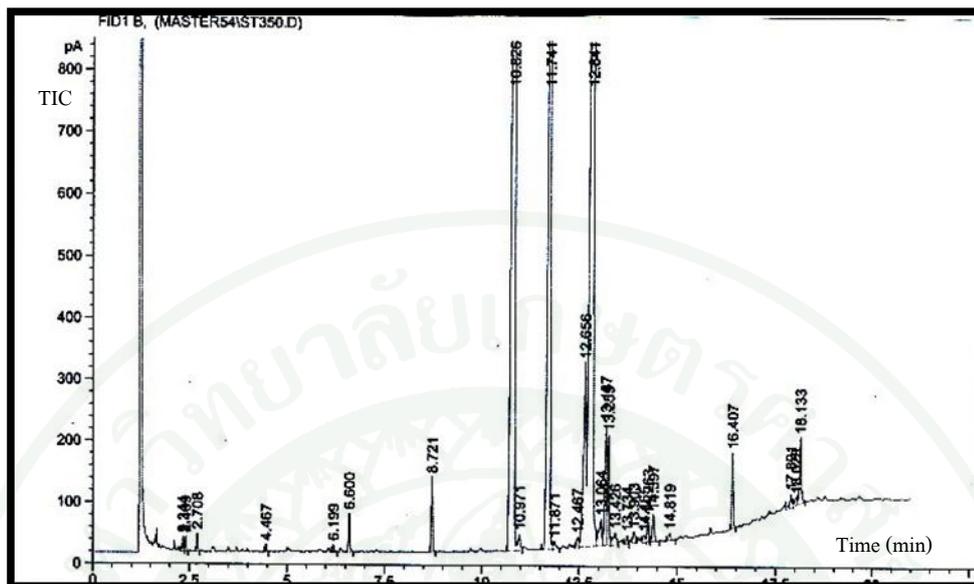
ภาพผนวกที่ ๑2 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วน โดยโมลระหว่างเมทานอลต่อ น้ำมันเท่ากับ 30:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 280 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที



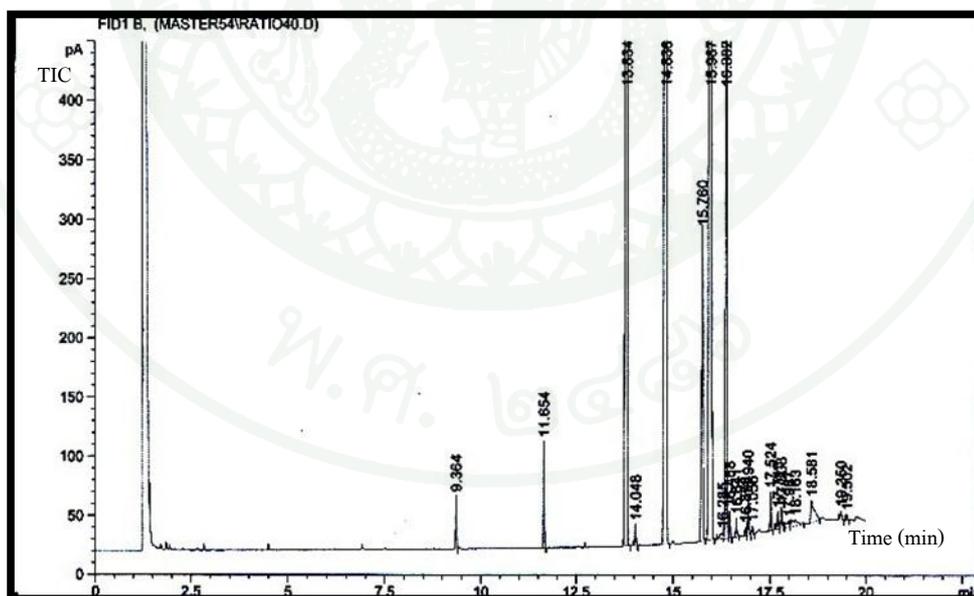
ภาพผนวกที่ 33 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วน โดยโมระหว่างเมทานอลต่อ น้ำมันเท่ากับ 30:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 300 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที



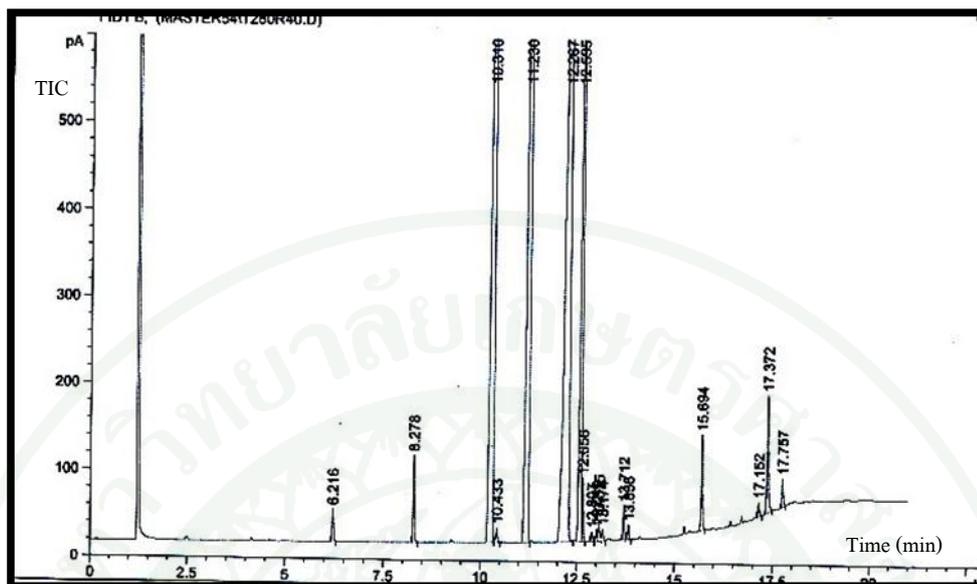
ภาพผนวกที่ 34 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วน โดยโมระหว่างเมทานอลต่อ น้ำมันเท่ากับ 30:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 330 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที



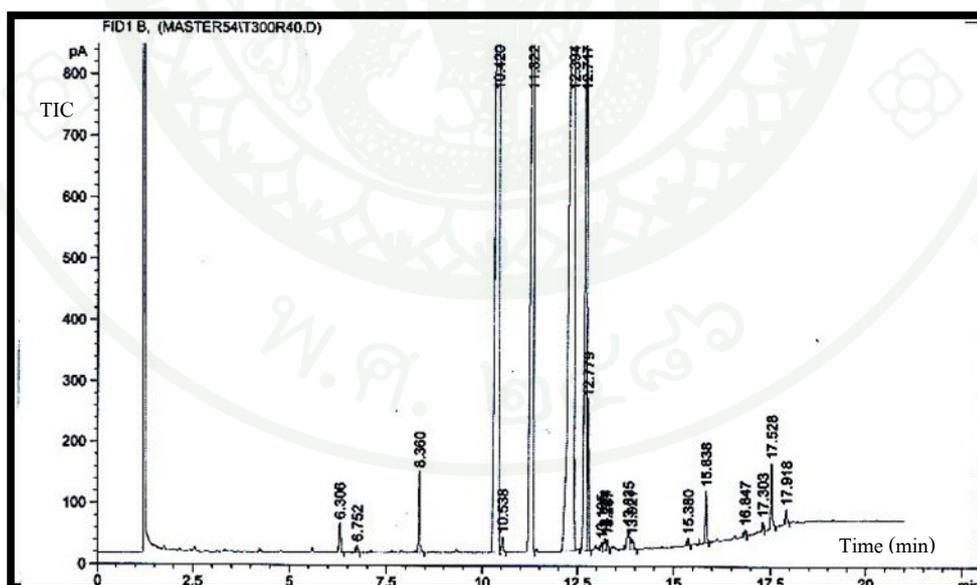
ภาพผนวกที่ 5 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วน โดยโมระหว่างเมทานอลต่อ น้ำมันเท่ากับ 30:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 350 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที



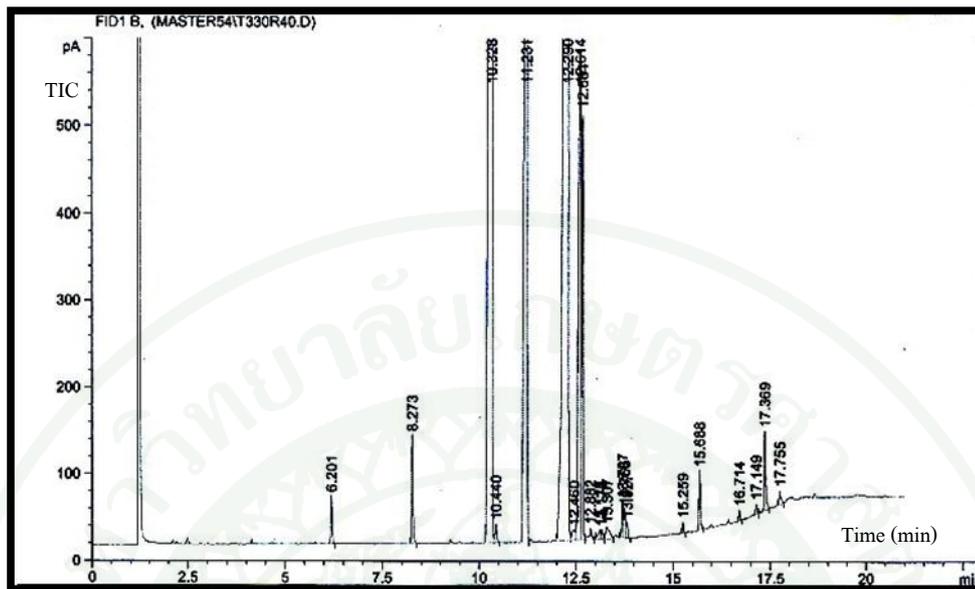
ภาพผนวกที่ 6 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วน โดยโมระหว่างเมทานอลต่อ น้ำมันเท่ากับ 40:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 250 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที



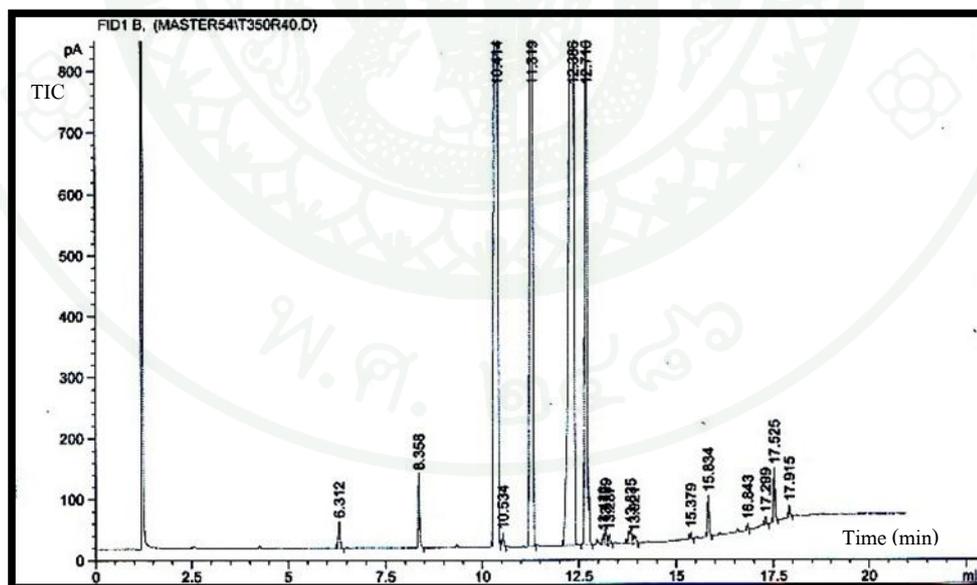
ภาพผนวกที่ ๗ โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อ น้ำมันเท่ากับ 40:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 280 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที



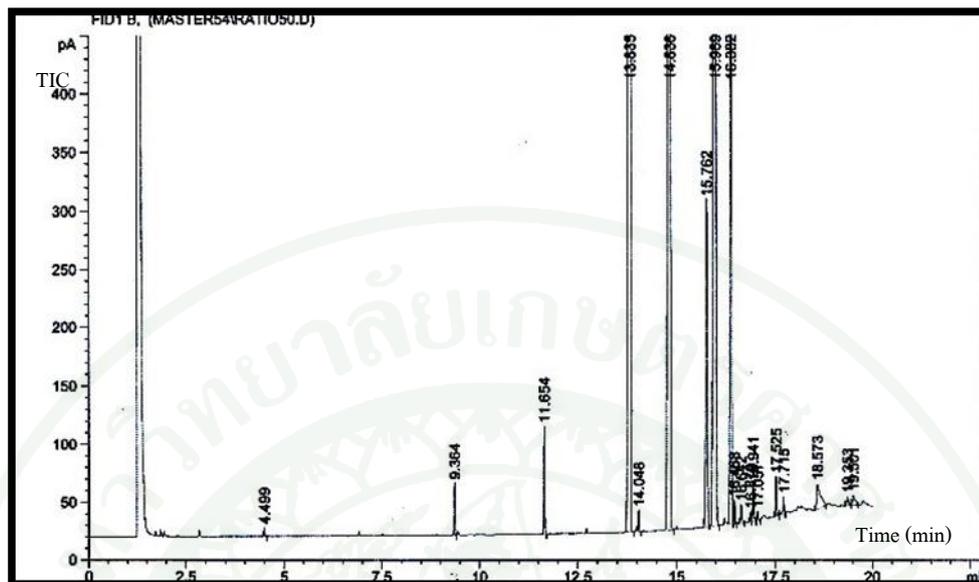
ภาพผนวกที่ ๘ โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อ น้ำมันเท่ากับ 40:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 300 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที



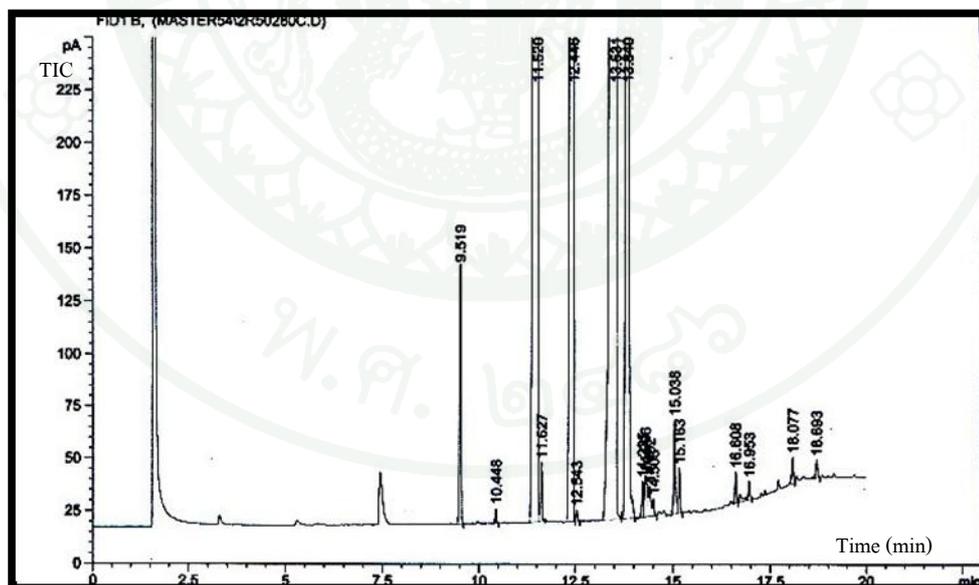
ภาพผนวกที่ 9 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อ น้ำมันเท่ากับ 40:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 330 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที



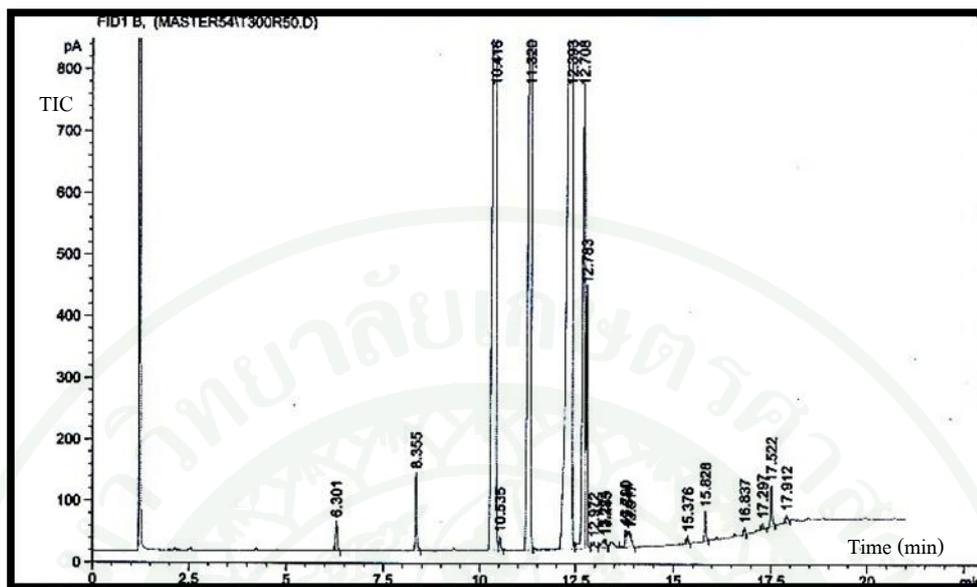
ภาพผนวกที่ 10 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล ต่อ น้ำมันเท่ากับ 40:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 350 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที



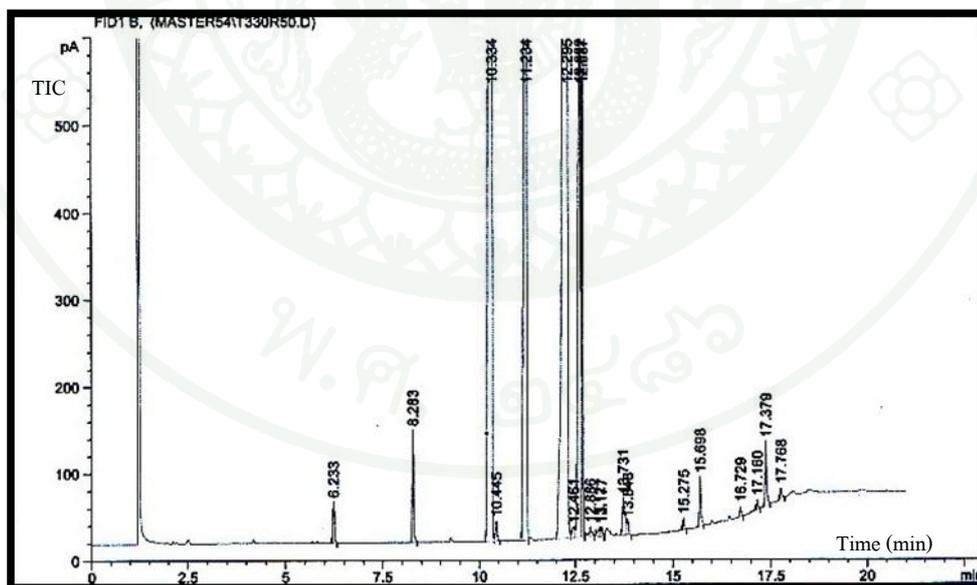
ภาพผนวกที่ 11 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล
ต่อน้ำมันเท่ากับ 50:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 250 องศาเซลเซียส เวลาในการ
ทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที



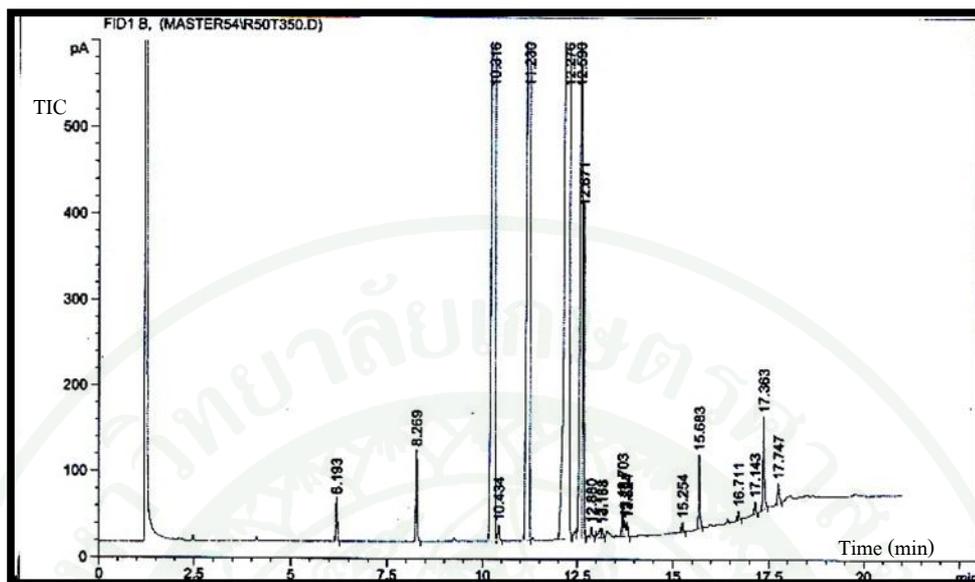
ภาพผนวกที่ 12 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล
ต่อน้ำมันเท่ากับ 50:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 280 องศาเซลเซียส
เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที



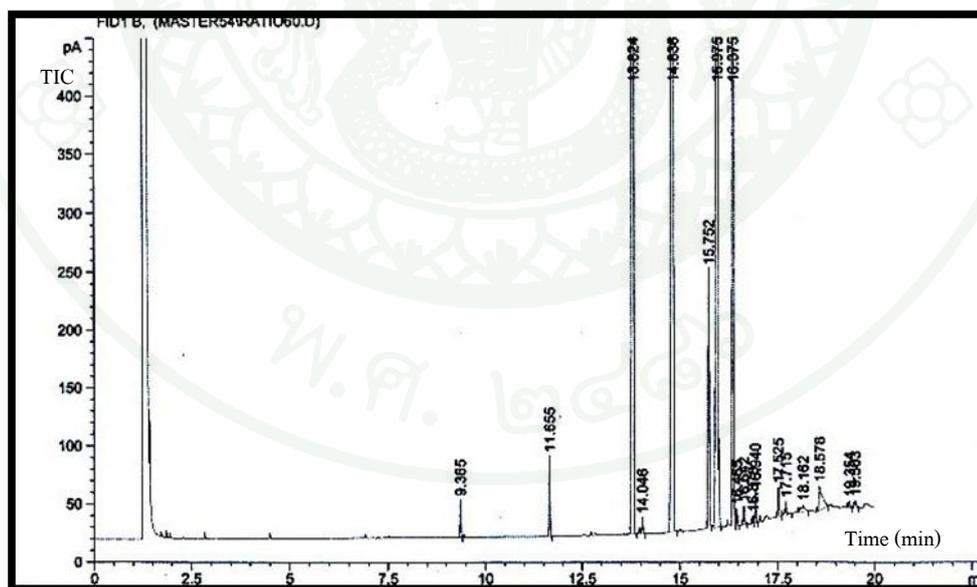
ภาพผนวกที่ 13 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล
ต่อน้ำมันเท่ากับ 50:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 300 องศาเซลเซียส
เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที



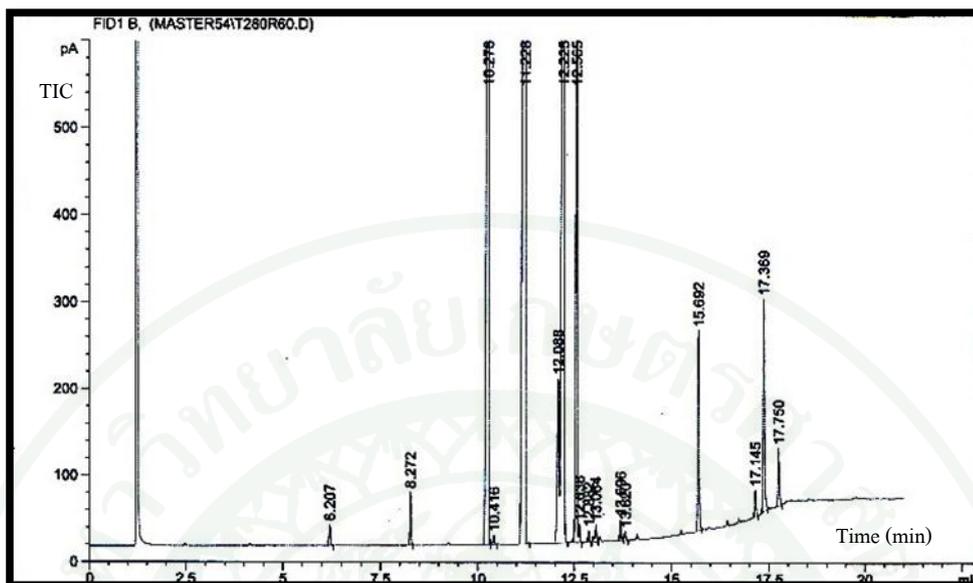
ภาพผนวกที่ 14 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล
ต่อน้ำมันเท่ากับ 50:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 330 องศาเซลเซียส
เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที



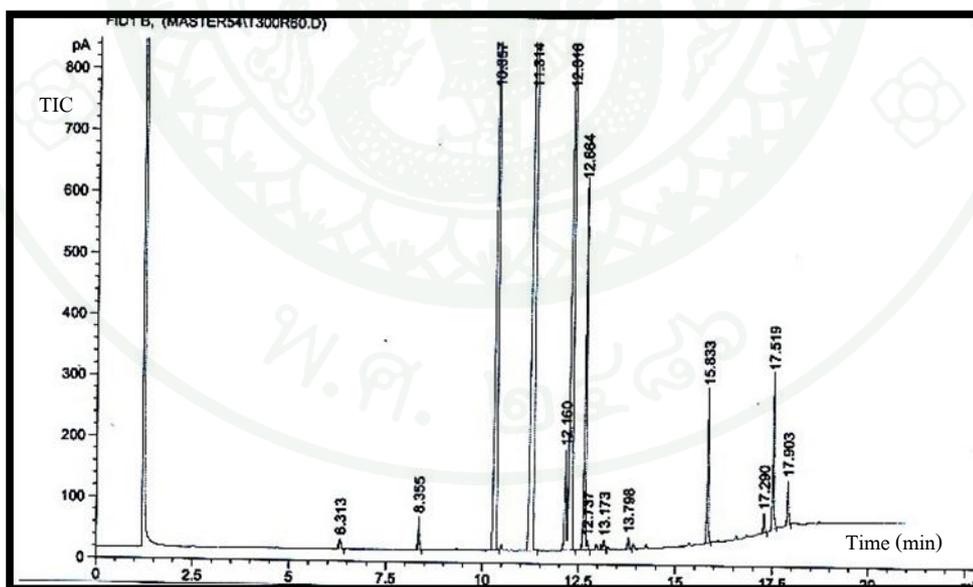
ภาพผนวกที่ 15 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล
ต่อน้ำมันเท่ากับ 50:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 350 องศาเซลเซียส
เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที



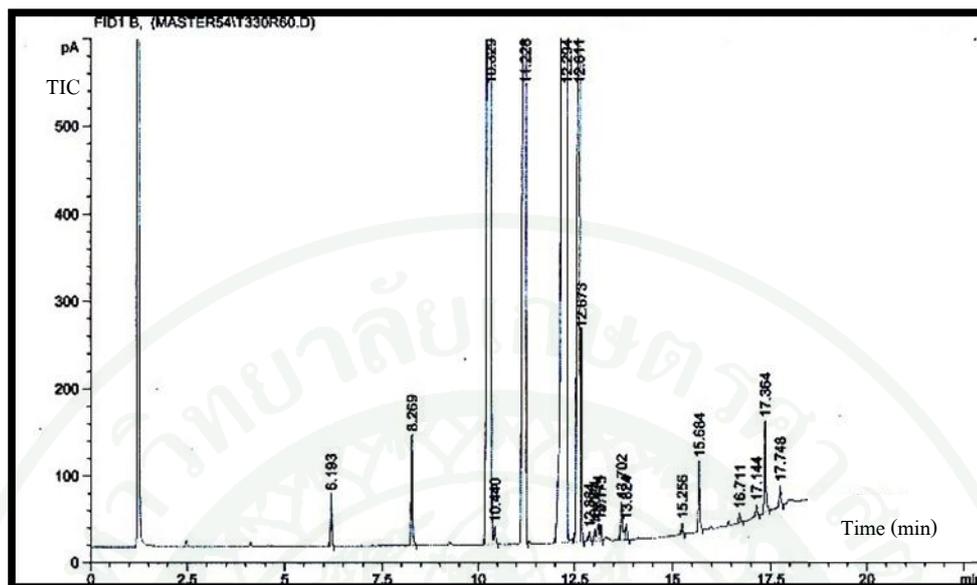
ภาพผนวกที่ 16 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล
ต่อน้ำมันเท่ากับ 60:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 250 องศาเซลเซียส
เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที



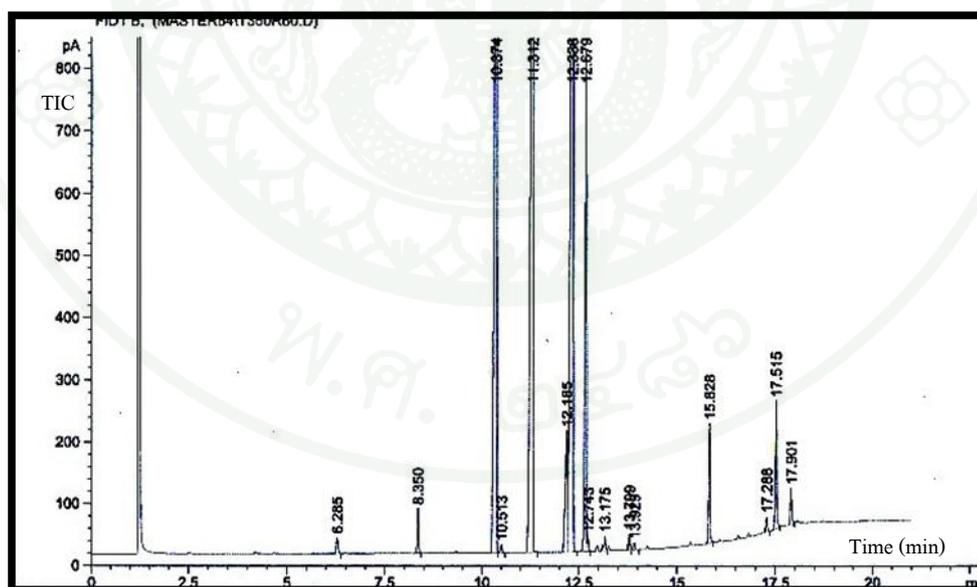
ภาพผนวกที่ 17 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล
ต่อน้ำมันเท่ากับ 60:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 280 องศาเซลเซียส
เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที



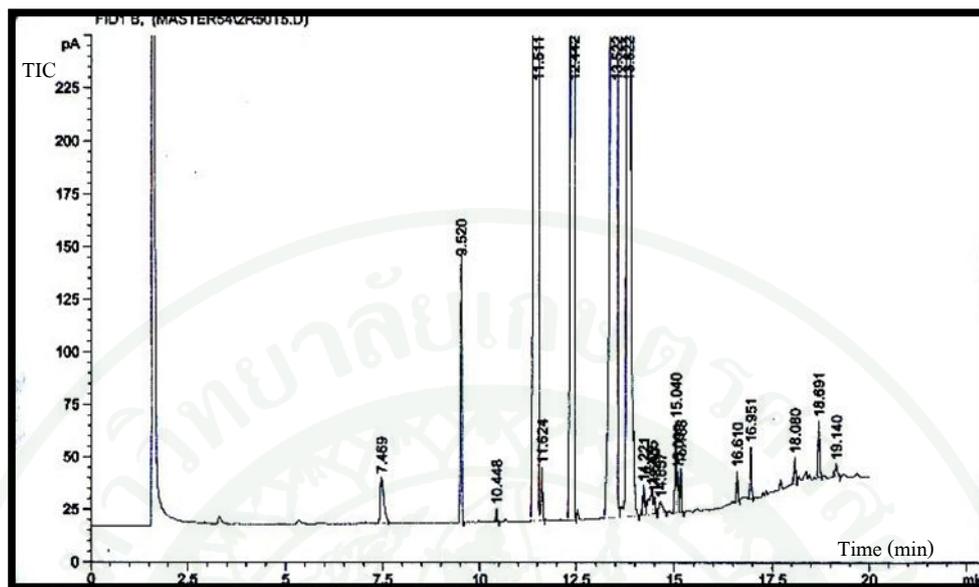
ภาพผนวกที่ 18 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล
ต่อน้ำมันเท่ากับ 60:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 300 องศาเซลเซียส
เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที



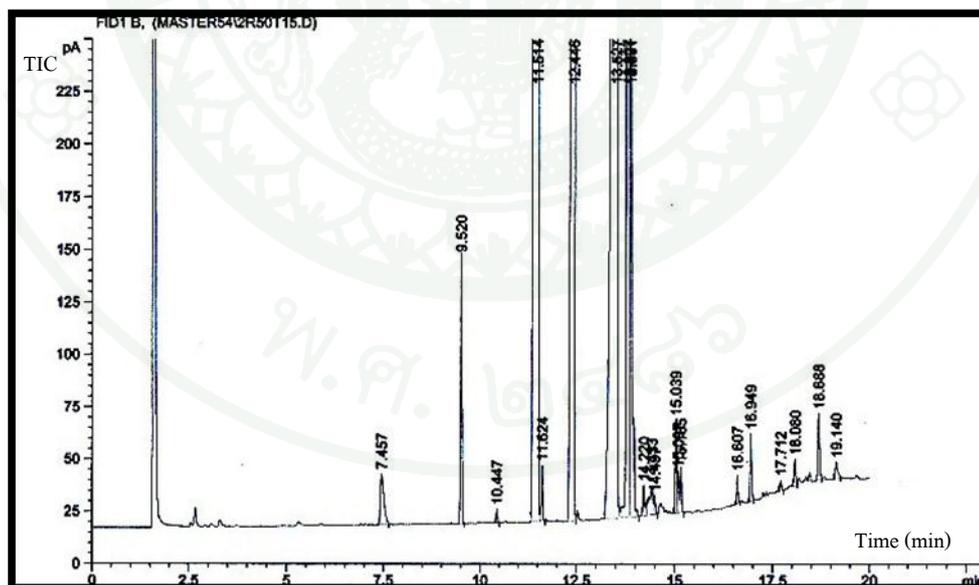
ภาพผนวกที่ 19 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล
ต่อน้ำมันเท่ากับ 60:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 330 องศาเซลเซียส
เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที



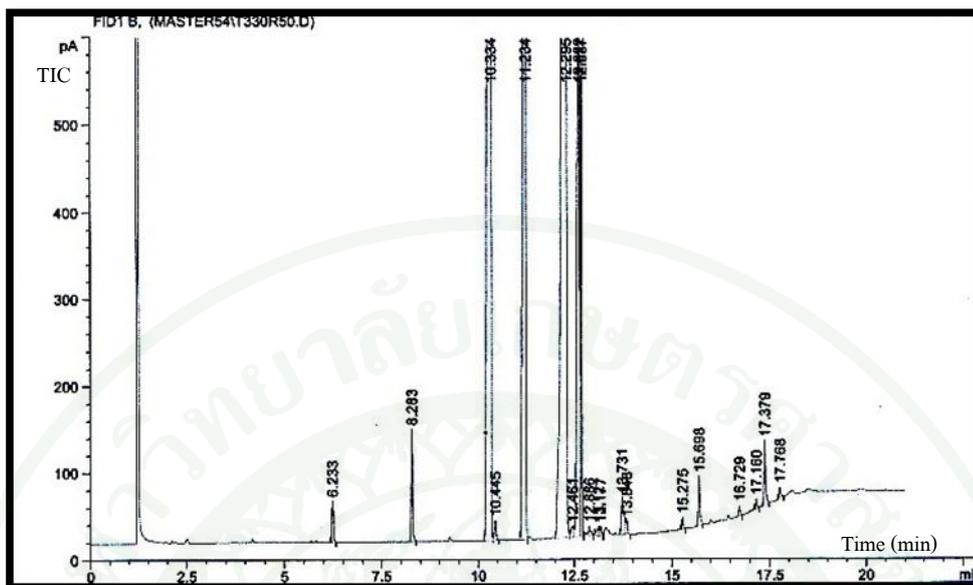
ภาพผนวกที่ 20 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล
ต่อน้ำมันเท่ากับ 60:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 350 องศาเซลเซียส
เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที



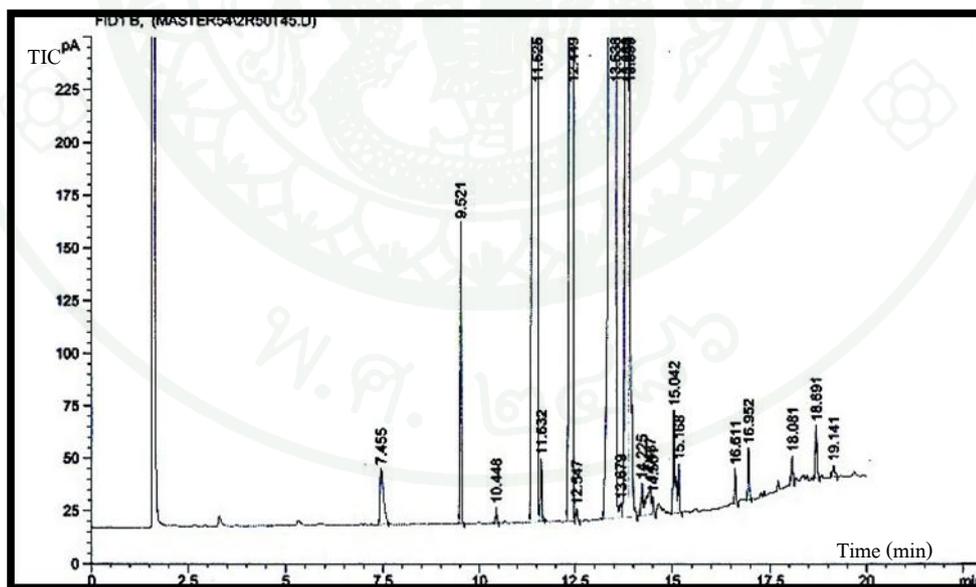
ภาพผนวกที่ 21 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล
ต่อน้ำมันเท่ากับ 50:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 330 องศาเซลเซียส
เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 5 นาที



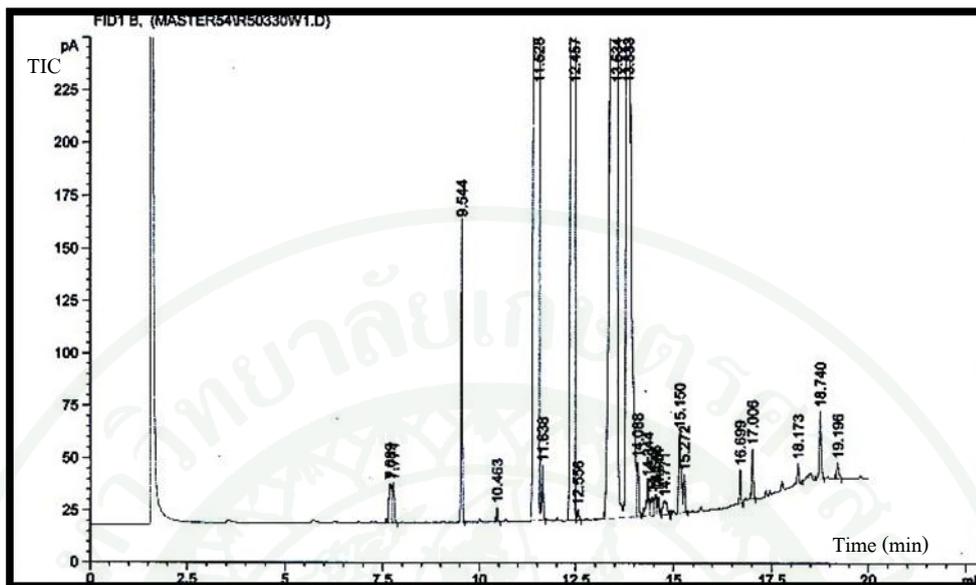
ภาพผนวกที่ 22 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล
ต่อน้ำมันเท่ากับ 50:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 330 องศาเซลเซียส
เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 15 นาที



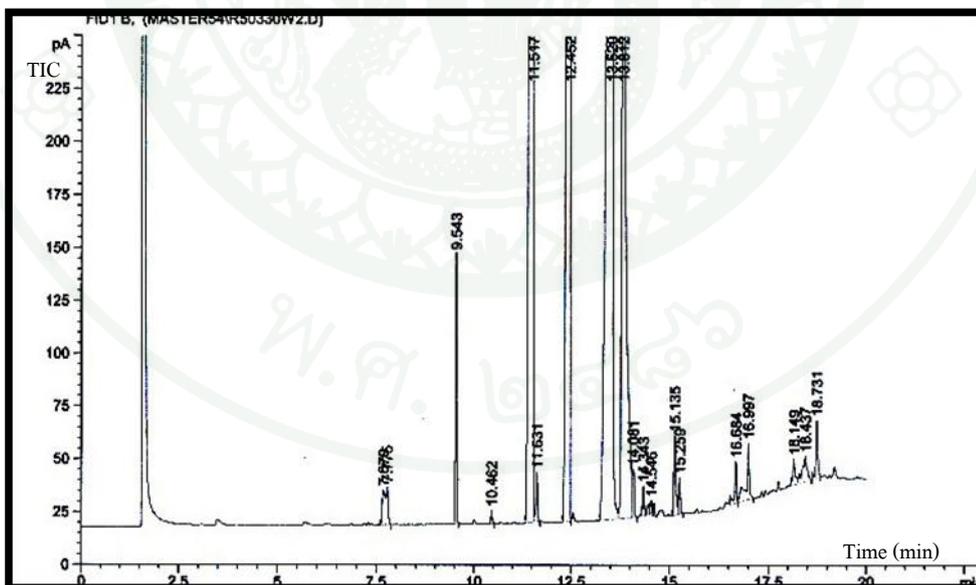
ภาพผนวกที่ 23 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล
ต่อน้ำมันเท่ากับ 50:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 330 องศาเซลเซียส
เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที



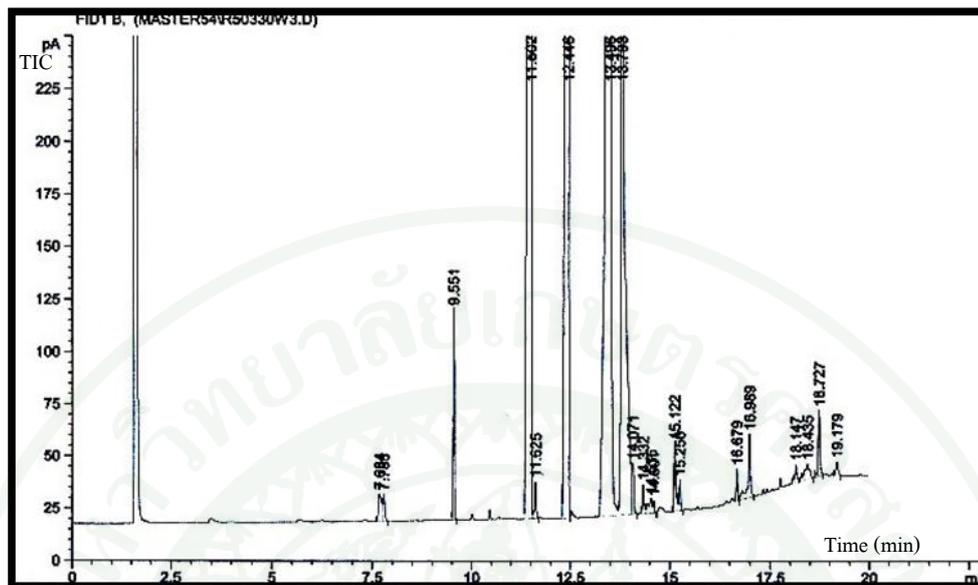
ภาพผนวกที่ 24 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล
ต่อน้ำมันเท่ากับ 50:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 330 องศาเซลเซียส
เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 45 นาที



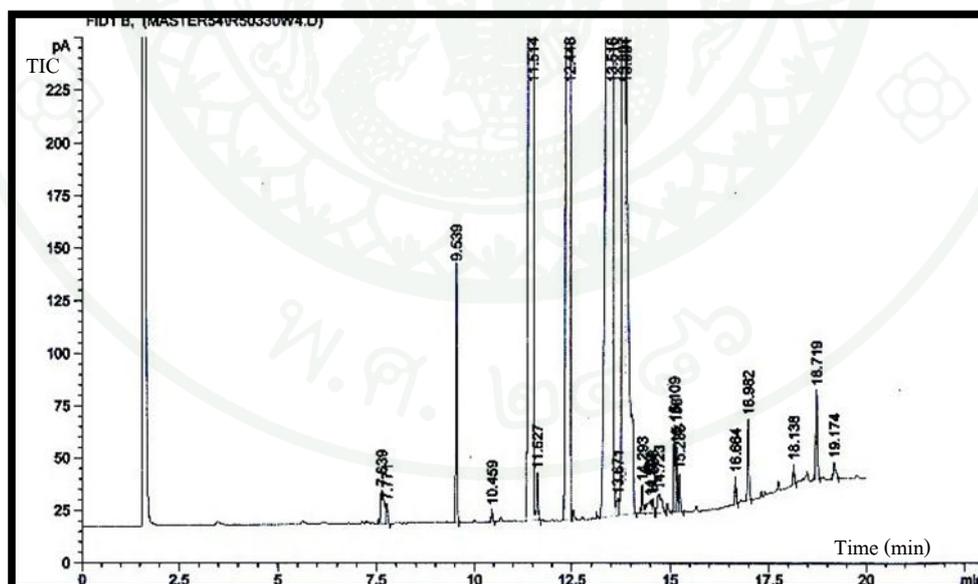
ภาพผนวกที่ 25 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล ต่อเท่ากับ 50:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 330 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที และปริมาณน้ำ 1%



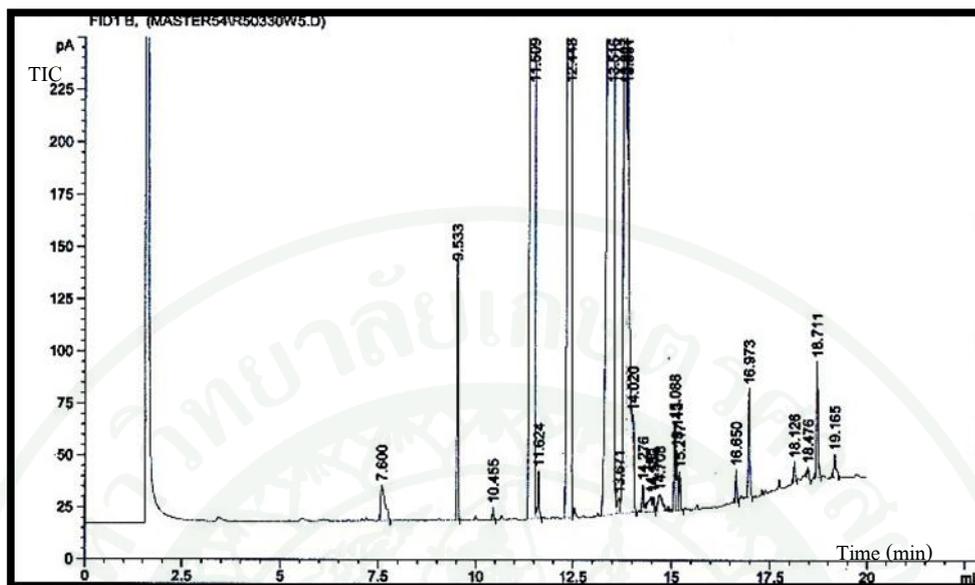
ภาพผนวกที่ 26 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล ต่อน้ำมันเท่ากับ 50:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 330 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที และปริมาณน้ำ 2%



ภาพผนวกที่ 27 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล
ต่อน้ำมันเท่ากับ 50:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 330 องศาเซลเซียส
เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที และปริมาณน้ำ 3%



ภาพผนวกที่ 28 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล
ต่อน้ำมันเท่ากับ 50:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 330 องศาเซลเซียส
เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที และปริมาณน้ำ 4%



ภาพผนวกที่ ๒๘ โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล
ต่อน้ำมันเท่ากับ 50:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 330 องศาเซลเซียส
เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที และปริมาณน้ำ 5%



ภาคผนวก จ
คำมาตรฐานไปโอดีเซล

ตารางผนวกที่ จ1 กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรด
ไขมัน พ.ศ. 2548 ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน*

| คุณสมบัติน้ำมัน เชื้อเพลิง | หน่วย | วิธีทดสอบ | เกณฑ์ ต่ำสุด | เกณฑ์ สูงสุด |
|---|--|--------------|-----------------|-----------------|
| เมทิลเอสเทอร์ | ร้อยละโดยน้ำหนัก | EN 14103 | 96.5 | - |
| ความหนาแน่น | กิโลกรัม/ลูกบาศก์ เมตร | ASTM D 1298 | 860 | 900 |
| ณ อุณหภูมิ 15°C | | | | |
| ค่าความหนืดที่ 40°C | เซนติสโตกส์ | ASTM D 445 | 3.5 | 5.0 |
| จุดวาบไฟ | องศาเซลเซียส | ASTM D 93 | 120 | - |
| ปริมาณกำมะถัน | ร้อยละโดยน้ำหนัก | ASTM D 2622 | - | 0.0010 |
| กาก (ร้อยละ 10 ของกาก ที่เหลือจากการกลั่น) | ร้อยละโดยน้ำหนัก | ASTM D 4530 | - | 0.30 |
| ค่าซีเทน | | ASTM D 613 | 51 | - |
| เถ้าซัลเฟต | ร้อยละโดยน้ำหนัก | ASTM D 874 | - | 0.020 |
| น้ำ | ร้อยละโดยปริมาตร | EN ISO 12937 | - | 0.050 |
| สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด | ร้อยละโดยน้ำหนัก | EN 12662 | - | 0.0024 |
| การกัดกร่อนแผ่น | | ASTM D 130 | - | หมายเลข |
| ทองแดง | | | | 1 |
| เสถียรภาพต่อการ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน | ชั่วโมง | EN 14112 | 6 | - |
| ณ อุณหภูมิ 110 °C | | | | |
| ค่าความเป็นกรด | มิลลิกรัมโพแทสเซียม ไฮดรอกไซด์/ กรัม | ASTM D 664 | - | 0.50 |
| ค่าไอโอดีน | กรัมไอโอดีน/100 กรัม | EN 14111 | - | 120 |
| กรดลิโนเลนิกเมทิลเอส เทอร์ | ร้อยละโดยน้ำหนัก | EN 14103 | - | 12 |

ตารางผนวกที่ จ1 (ต่อ)

| คุณสมบัติน้ำมันเชื้อเพลิง | หน่วย | วิธีทดสอบ | เกณฑ์ ต่ำสุด | เกณฑ์ สูงสุด |
|-----------------------------------|--------------------|---|-----------------|-----------------|
| เมทานอล | ร้อยละโดยน้ำหนัก | EN 14110 | - | 0.20 |
| โมนอกลิเซอไรด์ | ร้อยละโดยน้ำหนัก | EN 14105 | - | 0.80 |
| ไดกลีเซอไรด์ | ร้อยละโดยน้ำหนัก | EN 14105 | - | 0.20 |
| ไตรกลีเซอไรด์ | ร้อยละโดยน้ำหนัก | EN 14105 | - | 0.20 |
| กลีเซอรินอิสระ | ร้อยละโดยน้ำหนัก | EN 14105 | - | 0.02 |
| กลีเซอรินทั้งหมด | ร้อยละโดยน้ำหนัก | EN 14105 | - | 0.25 |
| โลหะกลุ่ม1(โซเดียมและโพแทสเซียม) | มิลลิกรัม/กิโลกรัม | EN 14108และ EN 14109 | - | 5.0 |
| โลหะกลุ่ม2(แคลเซียมและแมกนีเซียม) | มิลลิกรัม/กิโลกรัม | pr EN14538 | - | 5.0 |
| ฟอสฟอรัส | ร้อยละโดยน้ำหนัก | ASTM D 4951 | - | 0.0010 |
| สารเติมแต่ง(ถ้ามี) | | ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบจาก อธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน | | |

หมายเหตุ: * ราชกิจจานุเบกษา หน้า 12 เล่ม 122 ตอนพิเศษ 70ง. วันที่ 24 สิงหาคม 2548

ตารางผนวกที่ จ2 กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลระดับชุมชน พ.ศ.2549 ประกาศ
กรมธุรกิจพลังงาน สำหรับเครื่องยนต์การเกษตร

| คุณสมบัติน้ำมันเชื้อเพลิง | หน่วย | วิธีทดสอบ | เกณฑ์ | |
|--------------------------------|--|---|--------|------------------------|
| | | | ต่ำสุด | สูงสุด |
| ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15°C | กิโลกรัม/ลูกบาศก์ เมตร | ASTM D 1298 | 860 | 900 |
| ค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 40°C | เซนติสโตกส์ | ASTM D 445 | 1.9 | 8.0 |
| จุดวาบไฟ | องศาเซลเซียส | ASTM 93 | 120 | |
| ปริมาณกำมะถัน | ร้อยละโดยน้ำหนัก | ASTM D 2622 | - | 0.0015 |
| ค่าซีเทน | | ASTM D 613 | 47 | |
| เถ้าซัลเฟต | ร้อยละโดยน้ำหนัก | ASTM D 874 | - | 0.02 |
| น้ำและตะกอน | ร้อยละโดยปริมาตร | ASTM D 2709 | - | 0.2 |
| การกัดกร่อนแผ่น ทองแดง | | ASTM D 130 | - | หมายเลข3 |
| ค่าความเป็นกรด | มิลลิกรัมโพแทสเซียม ไฮดรอกไซด์/ กรัม | ASTM D 664 | - | 0.80 |
| กลีเซอรินอิสระ | ร้อยละโดยน้ำหนัก | ASTM D 6584 | - | 0.02 |
| กลีเซอรินทั้งหมด | ร้อยละโดยน้ำหนัก | ASTM D 6584 | - | 1.5 |
| สี | | | ม่วง | ตรวจพินิจ ด้วยสายตา |
| สารเติมแต่ง(ถ้ามี) | | ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบจาก อธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน | | |

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

| | |
|----------------------|---|
| ชื่อ | นางสาวสุคาพร สุขจินดา |
| เกิดวันที่ | 24 สิงหาคม 2530 |
| สถานที่เกิด | อำเภอเมือง จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ |
| ประวัติการศึกษา | วท.บ. (ประมง) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| ตำแหน่งปัจจุบัน | - |
| สถานที่ทำงานปัจจุบัน | - |
| ผลงานดีเด่น | - |
| ทุนการศึกษาที่ได้รับ | สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย กระทรวงวิทยาศาสตร์ |