



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาเพื่อนำไขมันปลาจากระบบบำบัดน้ำเสียไปผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการ
ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

The Study for Using of Fish Oil from Wastewater Treatment Plant to Produce Biodiesel
by Transesterification Process

นามผู้วิจัย นางสาวกมลอรินทร์ สุขวาสน์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์มงคล คำรงค์ศรี, Dr.Ing.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สัญญา สิริวิทยาปกรณ์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์มงคล คำรงค์ศรี, Dr.Ing.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สิงสถิตี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาเพื่อนำไขมันปลาจากระบบบำบัดน้ำเสียไปผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการ
ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

The Study for Using of Fish Oil from Wastewater Treatment Plant to Produce Biodiesel
by Transesterification Process

โดย

นางสาวกมลรินทร์ สุขาวาสน์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2553

ภุมรินทร์ สุภาวสน์ 2553: การศึกษาเพื่อนำไขมันปลาจากระบบบำบัดน้ำเสียไปผลิต
ไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
(วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์มงคล คำรงค์ศรี, Dr.Ing. 150 หน้า

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการนำไขมันปลาจากระบบบำบัดน้ำเสีย
ที่มีค่ากรดไขมันอิสระ 5.79 เปอร์เซ็นต์ ผลิตเป็นไบโอดีเซล(เมทิลเอสเทอร์) โดยขั้นตอนแรกเป็น
กระบวนการเอสเทอริฟิเคชันเพื่อลดค่ากรดไขมันอิสระในน้ำมันปลาให้น้อยกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ ใช้
กรดซัลฟูริกเข้มข้นที่ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันปลาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลเมทานอล
ต่อน้ำมันปลาที่ 6:1 อุณหภูมิ 50 ± 2 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ขั้นตอนที่สองเป็น
กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเพื่อผลิตไบโอดีเซล ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
ทำการศึกษา 4 ตัวแปร ได้แก่ อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันปลาจากปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน
ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยา พบว่าอัตราส่วนโดยโมลเมทานอล
ต่อน้ำมันปลาจากปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันที่ 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ 1.25 เปอร์เซ็นต์
โดยน้ำหนักน้ำมันปลาจากปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 50 ± 2 องศาเซลเซียส
ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที ให้ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ 86.30 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณผลผลิต
83.70 เปอร์เซ็นต์ และให้ค่าสูงสุดของผลผลิต 72.49 กรัมเปอร์เซ็นต์ไบโอดีเซล ดังนั้นจากปริมาณน้ำเสีย
172 ลูกบาศก์เมตรต่อวันของระบบบำบัดน้ำเสีย ถ้าสามารถนำไขมันและน้ำมันปลาทั้งหมดในระบบ
บำบัดน้ำเสีย 26.44 ลิตรต่อวันมาผลิตไบโอดีเซลได้ จะสามารถผลิตไบโอดีเซลได้ 22.21 ลิตรต่อวัน
หรือ 6,552 ลิตรต่อปี จากการประเมินค่าใช้จ่ายสารเคมีในการผลิตไบโอดีเซลพบว่าน้ำมันปลา
1 ลิตร สามารถผลิตไบโอดีเซลได้ 0.84 ลิตรคิดเป็นราคาค่าใช้จ่ายไบโอดีเซลลิตรละ 11.76
บาท หากคิดผลตอบแทนที่ได้จากน้ำมันปลาไบโอดีเซลราคา 31.75 บาทต่อลิตร ดังนั้น
ผลตอบแทนของไขมันปลาจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานที่ 22.21 ลิตรต่อวัน ให้
ผลตอบแทน 444 บาทต่อวัน หรือ 130,974 บาทต่อปี

Pumarin Sukavast 2010: The Study for Using of Fish Oil from Wastewater Treatment Plant to Produce Biodiesel by Transesterification Process. Master of Engineering (Environmental Engineering), Major Field: Environmental Engineering, Department of Environmental Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Mongkol Damrongsri, Dr.Eng. 150 pages.

This research work is aiming to find the suitable condition of transesterification process by using fish oil from wastewater treatment plant, composed of free fatty acid as 5.79% to produce biodiesel (methyl ester). The first step was esterification process for reducing the free fatty acid in fish oil until less than 2% by using concentrated sulfuric acid of 1% by weight of fish oil as catalyse and molar ratio between methanol and fish oil is 6:1, performed the reaction at $50\pm 2^{\circ}\text{C}$ for 60 minutes of reaction times. The second step was to find the suitable condition of transesterification process by using potassium hydroxide (KOH) as the catalyst. In this research, we studied 4 variables, molar ratio between methanol and fish oil in esterification process, amount of potassium hydroxide, temperature and time of reaction. The result found that when using molar ratio of methanol and fish oil at 6:1 in esterification process, potassium hydroxide 1.25% by weight of fish oil in esterification process as catalyse and performed the reaction at $50\pm 2^{\circ}\text{C}$ for 120 minutes resulted in 86.30% of percentage methylester and 83.70% of product as of 72.49 gram%/biodiesel. From the concerning data, the flow rate of wastewater treatment plant $172\text{ m}^3/\text{day}$ that obtained grease and oil 26.44 liters per day. That should produce the biodiesel of 22.21 liters per day or 6,552 liters per year. According to the production of biodiesel, 1 liter of fish oil resulted from the transesterification process could produce 0.84 liters of biodiesel. By this process the estimating cost of expense 11.76 baht per liter of biodiesel produced. Comparing to the cost of palm oil biodiesel is 31.75 baht/liter. Therefor, the profit of fish oil biodiesel production from wastewater treatment plant of 22.21 liters per day will be 444 baht/day or 130,974 baht/year.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.มงคล ดำรงค์ศรี ประธานกรรมการที่ปรึกษาที่ได้ให้คำแนะนำสั่งสอน สิ่งที่เป็นประโยชน์ ที่ทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จขึ้น ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สัตยา ลีวิทยาปกรณ กรรมการที่ปรึกษา สำหรับคำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ บริษัทฟินคัส ไทยแลนด์ จำกัด ที่อนุเคราะห์ตัวอย่างน้ำมันปลาและข้อมูลของระบบบำบัดน้ำเสีย ที่เป็นประโยชน์ในการวิจัย ขอขอบคุณโครงการศูนย์ไบโอดีเซล ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะแห่งชาติ (MTEC) ที่เอื้อเพื่อการวิเคราะห์คุณภาพของน้ำมัน และขอขอบพระคุณมูลนิธิการศึกษาเขต 100 ปีที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย จนการศึกษาวิจัยสำเร็จลุล่วง

ขอบคุณครอบครัวของข้าพเจ้าและเพื่อนๆ พี่ๆ ในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมที่ทำให้คำปรึกษาในวิธีการทดสอบรวมทั้งเอื้อเพื่ออุปกรณ์ในการวิเคราะห์

ประโยชน์อันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบแด่ครอบครัวของข้าพเจ้า ผู้มีพระคุณ และคณาจารย์ทุกท่าน ที่เมตตาให้คำอบรมสั่งสอนและแนะนำจนวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วง

ภูมรินทร์ สุกาวาสน์

มีนาคม 2553

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำอธิบายสัญลักษณ์ คำย่อ และความหมาย	(14)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	52
ผลและวิจารณ์	64
สรุปและข้อเสนอแนะ	87
สรุป	87
ข้อเสนอแนะ	90
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	91
ภาคผนวก	98
ภาคผนวก ก การคำนวณค่าต่างๆในงานวิจัย	99
ภาคผนวก ข โครมาโทแกรมของเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากการวิเคราะห์ ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีตามวิธีมาตรฐาน EN 14103	123
ภาคผนวก ค ผลการวิเคราะห์	147
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	150

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	คุณสมบัติของกรดไขมัน	6
2	ลักษณะทางกายภาพของน้ำมันบางชนิด	9
3	ข้อเปรียบเทียบบางประการระหว่างหน่วยกำจัดอนุภาคแบบตกตะกอนและแบบทำให้ลอยด้วยวิธี Dissolved-Air Flotation	21
4	ปริมาณการใช้วัตถุดิบเสริมในอุตสาหกรรมอาหารทะเลแช่แข็ง	23
5	ปริมาณการใช้น้ำในกระบวนการผลิตปลาแช่เยือกแข็ง	24
6	ปริมาณการผลิตน้ำมันพืชและไขสัตว์ 17 ชนิดของโลก พ.ศ. 2543-2547 (พินตัน)	27
7	องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันปลาเซลมอน	29
8	การเปรียบเทียบข้อแตกต่างระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส กรด เอนไซม์	41
9	คุณภาพไบโอดีเซลที่มีผลต่อเครื่องยนต์	44
10	การกำหนดลักษณะและคุณภาพของของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันพ.ศ. 2552	49
11	คุณสมบัติของน้ำมันปลาจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานแยกชิ้นส่วนเนื้อปลา	69
12	ส่วนประกอบของกรดไขมันในน้ำมันปลา	70
13	ไบโอดีเซลที่ได้จากระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน	73
14	ผลการตรวจวัดคุณภาพไบโอดีเซลจากน้ำมันปลาที่มาจากระบบบำบัดน้ำเสีย	84
15	ต้นทุนการผลิตไบโอดีเซล 1 ลิตร	85
16	ปริมาณไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากระบบบำบัดน้ำเสีย	86

ตารางผนวกที่

ก1	ส่วนประกอบของกรดไขมันในน้ำมันปลาที่มาจากระบบบำบัดน้ำเสีย	106
ก2	ตัวอย่างค่าโครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์	109
ก3	ปริมาณวัตถุดิบน้ำมันปลา 1 ลิตร เพื่อผลิตไบโอดีเซล	116
ก4	ปริมาณไบโอดีเซล 1 ลิตรที่ผลิตจากวัตถุดิบน้ำมันปลา	116
ก5	ปริมาณไบโอดีเซลที่ผลิตได้	120

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า	
ค1	เปอร์เซ็นต์ของผลผลิตและเปอร์เซ็นต์ของเมทิลเอสเทอร์ ในกระบวนการ ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 3:1, 6:1, 9:1 และ 12:1 ใช้ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.0 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศา เซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที	148
ค2	เปอร์เซ็นต์ของผลผลิตและเปอร์เซ็นต์ของเมทิลเอสเทอร์ ในกระบวนการ ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ใช้ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.75, 1.00, 1.25 และ 1.25 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศา เซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที	148
ค3	เปอร์เซ็นต์ของผลผลิตและเปอร์เซ็นต์ของเมทิลเอสเทอร์ ในกระบวนการ ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ใช้ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็น ตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 40, 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30, 60, 90 และ 120 นาที	149

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน	4
2	โครงสร้างทางเคมีของกลีเซอรอลที่ทำปฏิกิริยากับกรดไขมัน	5
3	ภาพระบบ Dissolved Air Flotation	18
4	ภาพระบบ Dissolved Air Flotation with recycle	18
5	ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน	19
6	เศษกากตะกอนจากระบบ Dissolved-Air Flotation	19
7	แผนผังกระบวนการผลิตอาหารทะเลแช่เยือกแข็ง	22
8	กระบวนการบำบัดน้ำเสีย	25
9	ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน	31
10	แสดงขั้นตอนย่อยของทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์	31
11	ขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน	37
12	ปฏิกิริยาการเกิดสบู่	38
13	ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน	38
14	ขั้นตอนการเตรียมน้ำมันปลาเพื่อเข้าสู่กระบวนการผลิตไบโอดีเซล	59
15	ขั้นตอนการทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน	60
16	ขั้นตอนการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน	61
17	ขั้นตอนกระบวนการล้างไบโอดีเซล	61
18	กระบวนการบำบัดน้ำเสีย	65
19	น้ำทิ้งบริเวณบ่อดักไขมัน	66
20	ไขมันและน้ำมันปลาจากบ่อดักไขมันและเมื่อตั้งทิ้งไว้ที่ 4 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง	67
21	เศษกากตะกอนจากระบบ Dissolved-Air Flotation	68
22	ลักษณะของน้ำมันปลาวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนต่างๆ	72

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
23	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปลาที่มีผลต่อค่าความหนืดของไบโอดีเซลโดยทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที	77
24	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปลาที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ผลผลิต โดยทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที	78
25	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล ต่อน้ำมันที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ของเมทิลเอสเทอร์ โดยทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที	79
26	ความสัมพันธ์ของปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ของผลผลิต โดยทำปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอริฟิเคชันที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ทำปฏิกิริยาที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที	80
27	ความสัมพันธ์ของปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ของเมทิลเอสเทอร์ โดยทำปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอริฟิเคชันที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ทำปฏิกิริยาที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที	81
28	ความสัมพันธ์ของเวลาและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ของผลผลิตโดยทำปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอริฟิเคชันที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	82
29	ความสัมพันธ์ของเวลาและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ของเมทิลเอสเทอร์ โดยทำปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอริฟิเคชันที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	83

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก1	ประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันของระบบบำบัดน้ำเสียโรงงาน ฟีนคัส (ไทยแลนด์) จำกัด 104
ก2	โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ 109
ข1	โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอส เทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที 124
ข2	โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอส เทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที 124
ข3	โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอส เทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 9:1 ปริมาณ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที 125
ข4	โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอส เทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 9:1 ปริมาณ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที 125
ข5	โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอส เทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 12:1 ปริมาณ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที 126

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ข6 โคโรมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 12:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที	126
ข7 โคโรมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที	127
ข8 โคโรมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที	127
ข9 โคโรมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.00 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที	128
ข10 โคโรมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.00 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที	128
ข11 โคโรมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที	129

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ข12 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที	129
ข13 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที	130
ข14 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที	130
ข15 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 40 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที	131
ข16 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 40 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที	131
ข17 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 40 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที	132

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ข18 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 40 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที	132
ข19 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 40 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที	133
ข20 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 40 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที	133
ข21 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 40 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที	134
ข22 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 40 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที	134
ข23 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที	135

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า	
ข24	โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที	135
ข25	โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที	136
ข26	โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที	136
ข27	โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที	137
ข28	โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที	137
ข29	โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที	138

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ข30 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที	138
ข31 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที	139
ข32 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที	139
ข33 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที	140
ข34 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที	140
ข35 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที	141

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ข36 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที	141
ข37 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที	142
ข38 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที	142
ข39 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที	143
ข40 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที	143
ข41 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที	144

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ข42 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที	144
ข43 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที	145
ข44 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที	145
ข45 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที	146
ข46 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที	146

คำอธิบายสัญลักษณ์ คำย่อ และความหมาย

%wt	=	Percentage by weight
AV	=	Acid Value
AOCS	=	American Oil Chemists' Society
ASTM	=	American Society for Testing and Materials
cSt	=	Centistroke
DAF	=	Dissolved-Air Flotation
EN	=	European Standards
FAME	=	Fatty Acid Methyl Ester
FFA	=	Free Fatty Acid
GC	=	Gas Chromatography
GC-MS	=	Gas Chromatography Mass Spectrophotometry
GW-GT	=	Grease and Oil waste from Grease Trap
GW-DAF	=	Grease and Oil waste from Dissolved-Air Flotation
Gram% Biodiesel	=	Gram percent Biodiesel
H ₂ SO ₄	=	Sulfuric acid
HHV	=	High Heating Value
KOH	=	Potassium hydroxide
mgKOH/g	=	Milligram potassium hydroxide per gram
MJ/kg	=	Megajoule per kilogram
% Yield	=	เปอร์เซ็นต์ของผลผลิตไบโอดีเซล
% FAME	=	เปอร์เซ็นต์ของเมทิลเอสเทอร์ที่แสดงถึงความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลโดยค่าดังกล่าวมาจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี
กลีเซอรอล	=	เป็นแอลกอฮอล์ชนิดหนึ่ง มีสูตรทางเคมี C ₃ H ₅ (OH) ₃ เป็นผลพลอยได้จากการผลิตไบโอดีเซลและสบู่ เป็นสารที่ละลายได้ในน้ำและแอลกอฮอล์
กลีเซอริน	=	เป็นชื่อทางการค้า ประกอบไปด้วย กลีเซอรอลและน้ำ

คำอธิบายสัญลักษณ์ คำย่อ และความหมาย (ต่อ)

กรัม-เปอร์เซ็นต์ไบโอดีเซล =	=	เป็นหน่วยที่คิดเพื่อนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงถึงผลการผลิตไบโอดีเซลที่ขึ้นกับ %Yield และ % FAME โดยหน่วยดังกล่าวมาจาก
		ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลต่อวัตถุดิบ 1 กรัม × เปอร์เซ็นต์ของเมทิลเอสเทอร์(ไบโอดีเซล)ที่ผลิตได้
ไขมันปลา	=	ของเสียที่ทำการคัดแยกมาจากผิวหนังน้ำทิ้งในบ่อตกไขมันมีสถานะเป็นของแข็งกึ่งของเหลว
ค่าความร้อน	=	เป็นปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักเชื้อเพลิง เมื่อเชื้อเพลิงนั้นๆถูกเผาไหม้ โดยทั่วไปค่าความร้อนมี 2 ประเภท คือค่าความร้อนสูง (high heating value) และค่าความร้อนต่ำ (low heating value)
ค่าของกรด	=	ค่าของกรดของน้ำมัน คือ จำนวนมิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเป็นกลางกับกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในน้ำมัน 1 กรัม ซึ่งค่าของกรดเป็นค่าที่ชี้บอกถึงความเป็นกรดของน้ำมัน หากน้ำมันพืชหรือสัตว์นั้นมีคุณภาพดี กรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบอยู่ไม่หลุดออกเป็นกรดไขมันอิสระ น้ำมันนั้นจะมีค่าของกรดต่ำ แต่หากน้ำมันถูกทำลายด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซ์ น้ำมันนั้นๆจะมีกรดไขมันอิสระสูงขึ้น และมีค่าของกรดสูงขึ้นด้วย
ซิลิกา เจล	=	สารดูดความชื้น
น้ำมันปลา	=	น้ำมันที่แยกมาจากชั้นไขมันปลาในบ่อตกไขมันมีสถานะเป็นของเหลวผ่านการกำจัดตะกอน และใช้สารดูดความชื้นดูดซับน้ำออก
เศษกากตะกอน	=	กากของเสียที่ออกมาจากระบบ Dissolved-Air Flotation

การศึกษาเพื่อนำไขมันปลาจากระบบบำบัดน้ำเสียไปผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการ ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

The Study for Using of Fish Oil from Wastewater Treatment Plant to Produce Biodiesel by Transesterification Process

คำนำ

เนื่องจากปัญหาวิกฤตพลังงานในปัจจุบัน ราคาน้ำมันสูงที่ขึ้นได้ส่งผลกระทบต่อประเทศที่นำเข้าพลังงานทั้งในด้านความมั่นคงทางพลังงานและทางด้านเศรษฐกิจ ปัจจุบันประเทศไทยมีความต้องการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงในปริมาณมากโดยเฉพาะน้ำมันดีเซลมีความต้องการใช้ถึง 43 ล้านลิตรต่อวัน คิดเป็น 46.6 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณน้ำมันที่ใช้ภายในประเทศ ซึ่งมีสัดส่วนการใช้สูงกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ จึงมีความพยายามหาแหล่งพลังงานทดแทนใหม่ เช่น ก๊าซธรรมชาติ ก๊าซโซฮอลล์ พลังงานจากชีวมวล และพลังงานทดแทนอื่นๆ รวมถึงไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลเป็นชื่อเรียกที่หมายถึงเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ซึ่งเป็นพืชผลจากเกษตรกรรม โดยผ่านกระบวนการทางเคมี เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างไขมันให้เป็นเอสเทอร์ของกรดไขมัน การเรียกชื่อสารเอสเทอร์ที่ได้จะขึ้นอยู่กับชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เช่น เมื่อใช้แอลกอฮอล์ที่ชื่อเมทานอลจะเรียกสารที่ได้ว่าเมทิลเอสเทอร์ และเมื่อใช้เอทานอลในการทำปฏิกิริยาจะเรียกสารที่ได้ว่าเอทิลเอสเทอร์ โดยการผลิตไบโอดีเซลของประเทศไทยในปัจจุบันพบว่ามีความขัดข้องในการผลิตไม่เพียงพอ เนื่องจากวัตถุดิบหลักคือ น้ำมันที่ใช้แล้วนั้นมีจำนวนไม่เพียงพอต่อความต้องการของตลาดและพืชน้ำมันเองยังมีต้นทุนการผลิตในราคาที่สูง ประกอบกับต้องการการปรับปรุงพันธุ์พืชน้ำมันเพื่อให้ได้ปริมาณน้ำมันต่อไร่มากขึ้น จึงยังต้องอาศัยการศึกษาวิจัยจากหน่วยงานราชการและเอกชนอย่างต่อเนื่อง อีกทั้งแนวโน้มความต้องการใช้ไบโอดีเซลที่มีปริมาณมากขึ้น เป็นผลให้กระทรวงพลังงานและกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ขยายพื้นที่เพาะปลูกพืชน้ำมัน โดยมีแนวโน้มการขยายพื้นที่ปลูกปาล์มเป็น 2.5 ล้านไร่ในปี 2555 เพื่อรองรับกับการผลิตไบโอดีเซลที่ตั้งเป้าว่าสามารถแทนที่การนำเข้าน้ำมันดีเซลให้ได้ 10 เปอร์เซ็นต์ ต่อปี (ไทยโพสต์, 2551)

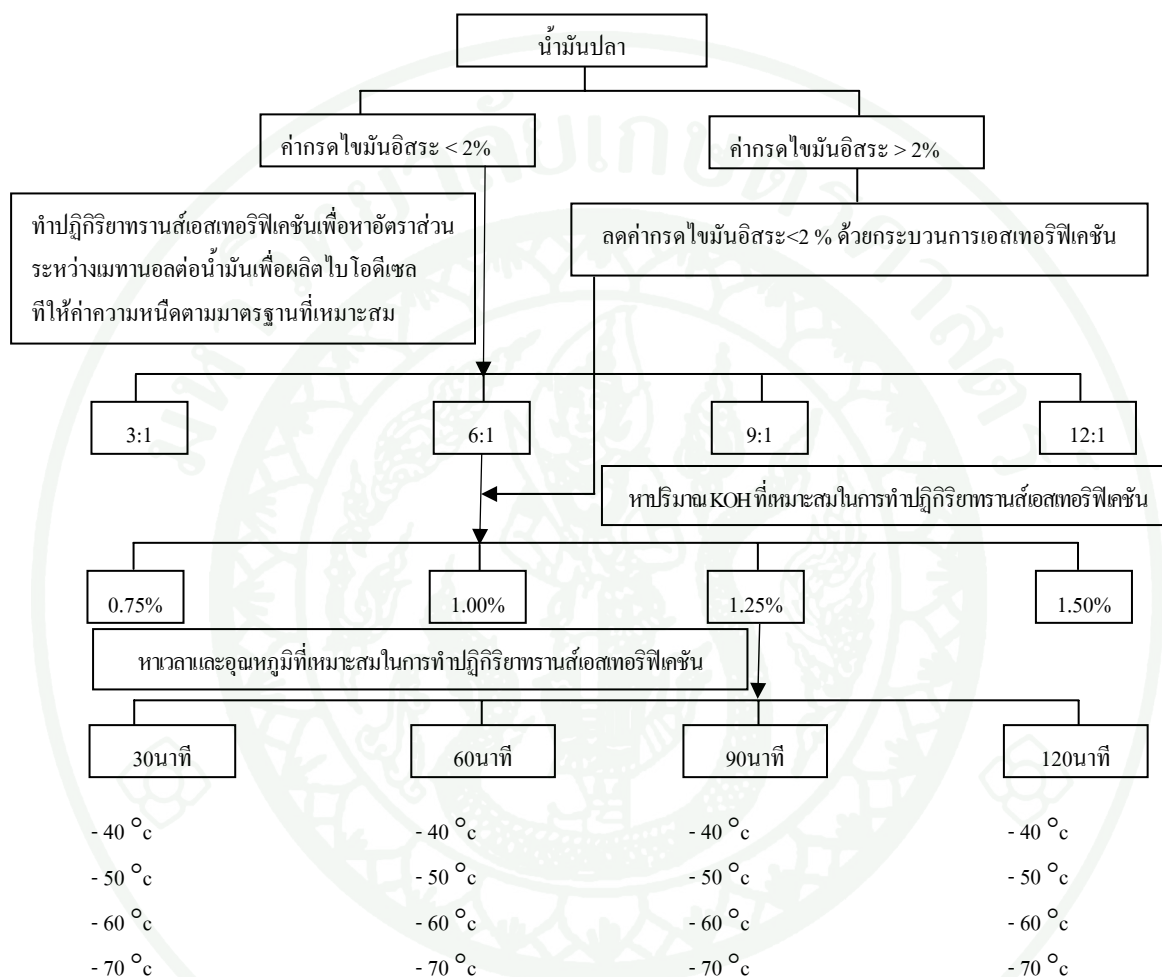
น้ำมันและไขมันซึ่งพบในน้ำเสียที่มาจากร้านอาหารทั่วไป และมาจากโรงงานอุตสาหกรรมอาหารนั้นก่อให้เกิดปัญหาทางสิ่งแวดล้อม โดยไขมันที่พบในน้ำเสียนั้นเป็นสารอินทรีย์ที่มีเสถียรภาพและย่อยสลายโดยแบคทีเรียได้ยาก อีกทั้งยังเป็นปัจจัยที่รบกวนการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสียทุกชนิด โดยปริมาณของน้ำมันและไขมันในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมแปรเปลี่ยนตามชนิดของอุตสาหกรรม ไขมันที่อยู่ในน้ำเสียจะลอยตัวบนผิวหน้าของเหลวและส่งผลกระทบทำให้การถ่ายเทออกซิเจนในระบบบำบัดขั้นที่ 2 (Secondary Treatment) ไม่ได้ จึงมีความจำเป็นต้องกำจัดออกด้วยกระบวนการบำบัดเบื้องต้น (Primary Treatment) เพื่อป้องกันไม่ให้ส่งผลกระทบต่อกระบวนการบำบัดขั้นที่ 2 การกำจัดไขมันของโรงงานคือการดักไขมันในบ่อดักไขมันทั่วไป แต่ถ้าสามารถนำไขมันเหล่านี้มาผลิตเป็นไบโอดีเซลได้จะเป็นการลดของเสียที่จะเกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต ทั้งยังได้ไบโอดีเซลกลับมาใช้เพิ่มอีกด้วย งานวิจัยนี้จึงให้ความสนใจเปลี่ยนไขมันที่เป็นสารอินทรีย์ที่กำจัดยากในระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานเปลี่ยนเป็นพลังงานทดแทนไบโอดีเซลโดยทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันกับเมทิลแอลกอฮอล์เพื่อศึกษาคุณภาพและปริมาณผลผลิตรวมถึงต้นทุนของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ ซึ่งงานวิจัยนี้สามารถขยายผลการศึกษาไปยังโรงงานอื่นๆ ที่มีลักษณะของเสียที่คล้ายคลึงกันเพื่อเป็นการเพิ่มวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล อีกทั้งวัตถุดิบดังกล่าวนี้ยังเป็นของเสียที่มาจากระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งนอกจากจะได้พลังงานทดแทนใหม่แล้ว ยังเป็นการกำจัดไขมันและน้ำมันที่รบกวนกระบวนการบำบัดน้ำเสีย สุดท้ายประโยชน์ของการผลิตไบโอดีเซลด้วยวัตถุดิบที่ผลิตภายในประเทศยังสามารถลดการนำเข้าน้ำมันจากต่างประเทศได้อีกทางหนึ่ง

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลโดยวิธีทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจากไขมันในอุตสาหกรรมการแยกชิ้นส่วนปลาแชลมอนและปลาเทราท์ โรงงานฟินด์ส ไทยแลนด์ จำกัด โดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ศึกษาหาความสัมพันธ์ของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิ และเวลาในการทำปฏิกิริยา
2. ทดสอบคุณสมบัติของไบโอดีเซล (เมทิลเอสเทอร์) ที่ผลิตได้จากสภาวะที่เหมาะสม
3. ประเมินปริมาณไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากไขมันและน้ำมันปลาในน้ำเสียของโรงงานตัวอย่าง
4. เพื่อศึกษาหาต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซลจากวัตถุดิบที่เป็นไขมันและน้ำมันปลาในน้ำเสียของโรงงานตัวอย่าง

ขอบเขตของงานวิจัย

1. เมื่อทำการแยกน้ำมันปลาออกจากน้ำและกำจัดสิ่งปนเปื้อนรวมทั้งทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นแล้วจึงนำน้ำมันปลาไปเริ่มทำการศึกษา



ภาพที่ 1 กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

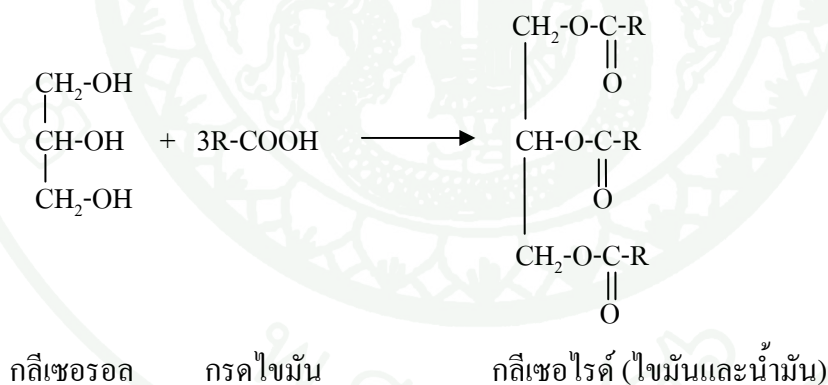
2. ศึกษาคุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากเปอร์เซ็นต์ของเมทิลเอสเทอร์ (%FAME), ความหนาแน่น, ความหนืด, จุดไหลเท, ค่าความร้อนการเผาไหม้แบบกรอส (gross), จุดวาบไฟ, ค่าความเป็นกรด

การตรวจเอกสาร

งานวิจัยชิ้นนี้เป็นการศึกษาเพื่อนำของเสียคือไขมันและน้ำมันที่เกิดจากขั้นตอนการล้างเนื้อปลาจากอุตสาหกรรมการแยกชิ้นส่วนเนื้อปลาแชลมอนและปลาเทราท์เพื่อการส่งออก โดยการศึกษาไขมันและน้ำมันจากน้ำเสียดังกล่าวเพื่อนำมาผลิตไบโอดีเซลนั้นมีการศึกษาหาข้อมูลและรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับไบโอดีเซล รวมทั้งแหล่งวัตถุดิบในการวิจัยในครั้งนี้ โดยรายละเอียดของเอกสารที่เกี่ยวข้อง แบ่งเป็นหัวข้อตามลำดับ ดังนี้

ไขมันและน้ำมัน

ไขมันและน้ำมัน เป็นกลีเซอไรด์ของกรดไขมัน โดยกรดไขมันทั่วไปมีจำนวนคาร์บอนอะตอม 16-18 (Sawyer *et al.*, 2003) เนื่องจากมีกรดไขมันเป็นจำนวนมากจึงทำให้มีไขมันสัตว์และน้ำมันพืชในธรรมชาติมากชนิดตามไปด้วย หมู่ไฮดรอกซิลทั้ง 3 หมู่ของกลีเซอรอลสามารถถูกเอสเทอร์ไฟด์โดยกรดไขมันชนิดต่างๆทำให้เกิดเป็น โมโน, ไดหรือไตร-กลีเซอไรด์



ภาพที่ 2 โครงสร้างทางเคมีของกลีเซอรอลที่ทำปฏิกิริยากับกรดไขมัน

ความแตกต่างระหว่างน้ำมันและไขมันไม่มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน ขึ้นอยู่กับจุดหลอมเหลวของสาร หรือขึ้นกับโครงสร้างหมู่ R ของกรดไขมัน โดยทั่วไปเมื่อหมู่ R เป็นกรดไขมันอิ่มตัวกลีเซอไรด์จะเป็นของแข็ง และเป็นของเหลวเมื่อ R เป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัว ในน้ำมันหมู่ R จะเป็นหมู่ที่ไม่อิ่มตัวสูงมาก (สมพงษ์, 2542)

1. สมบัติทางกายภาพของไขมันและน้ำมัน (นิธิยา, 2548)

สมบัติทางกายภาพของไขมันและน้ำมัน มีความสัมพันธ์โดยตรงต่อองค์ประกอบทางเคมีในโมเลกุลของไตรเอซิลกลีเซอรอลในไขมันและน้ำมันนั้น จึงใช้ประโยชน์ของสมบัติทางกายภาพในการจำแนกและชี้บ่งชนิดไขมันและน้ำมันรวมทั้งการนำไขมันและน้ำมันไปใช้ประโยชน์

จุดหลอมเหลว (Melting point) คืออุณหภูมิที่ทำให้ไขมันเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว จนหมด ช่วงการหลอมเหลวจะเป็นช่วงแคบหรือกว้างขึ้นกับชนิดของไตรเอซิลกลีเซอรอลที่ประกอบในไขมัน ถ้าไขมันประกอบด้วยไตรเอซิลกลีเซอรอลชนิดเดียวกันทั้งหมด จะมีจุดหลอมเหลวที่แน่นอน โดยจุดหลอมเหลวของสารจะสูงหรือต่ำขึ้นกับขึ้นอยู่กับจุดหลอมเหลวของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในโมเลกุล โดยจุดหลอมเหลวของกรดไขมันจะเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนคาร์บอนในโมเลกุลของกรดไขมันเพิ่มขึ้น และจุดหลอมเหลวของกรดไขมันจะลดลง เมื่อจำนวนพันธะคู่ในโมเลกุลของกรดไขมันเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของกรดไขมัน

Trivial (systematic) name; acronym	Molecular weight	Melting point (°C)	Boiling point (°C)
Caprylic (Octanoic) acid; 8:0	144.213	16.5	239.3
Capric (Decanoic) acid; 10:0	172.268	31.5	270
Lauric (Dodecanoic) acid; 12:0	200.322	44	131
Myristic (Tetradecanoic) acid; 14:0	228.376	58	250.5
Palmitic (Hexadecanoic) acid; 16:0	256.430	63	350
Palmitoleic [9(Z)-Hexadecenoic] acid; 16:1	254.412	-	-
Stearic (Octadecanoic) acid; 18:0	284.484	71	360
Oleic [9(Z)-Octadecenoic] acid; 18:1	282.468	16	286
Linoleic (9z, 12z-Octadecadienoic) acid; 18:2	280.452	-5	229-230
Linolenic (9Z, 12Z, 15Z-Octadecatrienoic) acid; 18:3	278.436	-11	230-232
Erucic (13Z-Docosenoic) acid; 22:1	338.574	33.4	265

ที่มา: Knothe *et al.*, (2005)

1.2 การเรียงตัวของรูปของผลึก (Crystalline arrangements) ไขมันแตกต่างจากน้ำมัน คือ ไขมันเป็นของแข็งและน้ำมันเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง ไขมันซึ่งเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้องมีลักษณะการเรียงตัวเป็นรูปผลึกได้หลายรูป (polymorphism) และแต่ละรูปมีจุดหลอมเหลวต่างกัน โดยขนาดและจำนวนของผลึกที่เกิดจะแปรไปตามชนิดของไขมันและอุณหภูมิของไขมันและน้ำมัน เมื่อทำให้เย็นลงจนถึงอุณหภูมิที่เปลี่ยนสถานะกลายเป็นของแข็ง (solidification temperature)

1.3 จุดแข็งตัว (Solidifying point) คืออุณหภูมิที่ทำให้ไขมันหรือน้ำมันกลายเป็นของแข็ง อุณหภูมิที่น้ำมันเริ่มแข็งตัวเป็นของแข็ง เรียกว่า เกิด solidification และเรียกจุดนี้ว่า solidifying point อุณหภูมิจุดนี้มักจะต่ำกว่าจุดหลอมเหลว 2-3 องศาเซลเซียส ไขมันที่ประกอบไปด้วยไตรเอซิลกลีเซอรอลหลายชนิดจะมีผลทำให้จุดแข็งตัวเป็นช่วงกว้าง

1.4 การละลาย (Solubility) ไขมันและน้ำมันทุกชนิดไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้ดีในตัวทำละลายไขมัน ได้แก่ ปิโตรเลียมอีเทอร์ เฮกเซน ไดเอทิลอีเทอร์ คลอโรฟอร์ม เบนซีน เอทิลแอลกอฮอล์ อะซีโตน คาร์บอนไดซัลไฟด์ ไซโคลเฮกเซน และคาร์บอนเตตระคลอไรด์ พวกที่เป็น unsymmetrical mixed triacylglycerol ละลายได้ดีกว่าพวกที่เป็น symmetrical mixed triacylglycerol

1.5 ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ความถ่วงจำเพาะของไขมันหรือน้ำมันนิยมนวัดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ยกเว้นกรณีที่ไขมันเป็นของแข็งและมีจุดหลอมเหลวสูง อาจวัดที่อุณหภูมิ 40 หรือ 60 องศาเซลเซียส ไขมันหรือน้ำมันที่มีจำนวนพันธะคู่ที่โมเลกุลของกรดไขมันเพิ่มขึ้น หรือมีคาร์บอนเพิ่มขึ้น จำทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะน้ำมันและไขมันเพิ่มขึ้นด้วย ไขมันที่อยู่ในสภาพของแข็งจะมีค่าความหนาแน่น หรือค่าความถ่วงจำเพาะแตกต่างไปจากเมื่อได้รับความร้อนแล้วหลอมตัวกลายเป็นของเหลว เพราะขณะที่เป็นของเหลวจะมีปริมาตรเพิ่มขึ้น

1.6 การหักเหของแสง (Refractive index) เป็นการวัดองศาการหักเหของลำแสงที่เกิดขึ้นเมื่อให้แสงผ่านจากตัวกลางหนึ่งไปยังตัวกลางหนึ่ง ค่าการหักเหของแสงของไขมันและน้ำมันชนิดต่างๆ ขึ้นกับความยาวของสายคาร์บอนในโมเลกุลของกรดไขมัน จำนวนพันธะคู่ และชนิดของไตรเอซิลกลีเซอรอลที่เป็นส่วนประกอบ ถ้ามีจำนวนคาร์บอนเพิ่มขึ้นหรือมีจำนวนพันธะคู่เพิ่มขึ้น จะมีค่าการหักเหแสงเพิ่มขึ้น ค่าไอโอดีนของน้ำมันเป็นตัวชี้บ่งปริมาณของพันธะคู่ จะมีความสัมพันธ์กับค่าการหักเหของแสงด้วย และถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ค่าการหักเหของแสงลดลง

1.7 ความหนืด (Viscosity) ความหนืดของไขมันและน้ำมัน เป็นปัจจัยสำคัญในการออกแบบระบบการขนถ่ายไขมันและน้ำมัน ความหนืดของไขมันจะเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนคาร์บอนในโมเลกุลของกรดไขมันที่มีองค์ประกอบของไตรเอซิลกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น ความหนืดจะลดลงเมื่อจำนวนพันธะคู่ในโมเลกุลของกรดไขมันเพิ่มขึ้น และเมื่ออุณหภูมิของกรดไขมันและน้ำมันเพิ่มขึ้น

1.8 Smoke point คือ อุณหภูมิที่ไขมันหรือน้ำมันได้รับความร้อนจนเกิดควัน, Flash point คือ อุณหภูมิที่ไขมันหรือน้ำมันกลายเป็นไอแล้วรวมตัวกับอากาศเกิดติดไฟขึ้นและ Fire point คือ อุณหภูมิที่ไขมันหรือน้ำมันเกิดการเผาไหม้

1.9 สี (colour) สีเป็นตัวชี้บ่งคุณภาพของน้ำมันได้ น้ำมันแต่ละชนิดจะมีสีแตกต่างกัน ขึ้นกับสารสีที่มีปนในวัตถุดิบที่นำมาใช้สกัดน้ำมันและวิธีการกำจัดสีโดยการฟอกย้อม น้ำมันที่มีสีเหลืองอ่อนจะมีคุณภาพดีกว่าน้ำมันที่มีสีเหลืองเข้ม

1.10 Solid Fat Index เป็นการวัดเปอร์เซ็นต์ของไขมันหรือน้ำมันที่เปลี่ยนเป็นของแข็งหรืออยู่ในสภาพแข็งตัวเป็นผลึกที่อุณหภูมิหนึ่ง ซึ่งการเกิดผลึกวัดได้จากปริมาณที่เปลี่ยนไป

ตารางที่ 2 ลักษณะทางกายภาพของน้ำมันบางชนิด

Parameters	Non-edible oil				Edible oil		Petroleum	
	Jatropha	Rubber seed	Castor	Pongamia pinnata	Rapeseed	Palm	Soybean	derived diesel
Viscosity (cSt) at 40 °C	4.80	5.81	–	4.80	4.50	4.42	4.08	2.60
Specific gravity	-	0.874	0.960	-	0.882	0.860-0.090	0.885	0.850
Calorific value (MJ/kg)	39.23	36.50	39.50	-	37.00	-	39.76	42
Flash point (°C)	135	130	260	150	170	182	69	68
Cloud point (°C)	-	4	-12	-	-4	15	-2	-
Pour point (°C)	2	-	-32	-	-12	15	-3	-20
Ash content (wt%)	0.012	-	0.020	0.005	-	0.020	-	0.010
Acid value (mgKOH/g)	0.400	0.118	-	0.620	-	0.080	-	-

ที่มา: Gui, M. (2008)

2. การจำแนกชนิดของไขมันและน้ำมันในอุตสาหกรรม (นิธิยา, 2548)

- ก. Non-drying oil น้ำมันกลุ่มนี้จะไม่แห้งเมื่อตั้งทิ้งไว้หรือทำให้เป็นฟิล์ม เช่น น้ำมันมะกอก
- ข. Semi-drying oil น้ำมันกลุ่มนี้เกิดฟิล์มได้อย่างช้าๆ เช่น น้ำมันเมล็ดฝ้าย
- ค. Drying oil น้ำมันกลุ่มนี้จะแห้งไวเมื่อสัมผัสกับอากาศและเกิดฟิล์มได้ง่าย เช่น น้ำมันลินสีด

ในทางอุตสาหกรรมจำแนกไขมันและน้ำมันตามสมบัติเฉพาะตัวและการนำไปใช้ประโยชน์
ในทางอุตสาหกรรม แบ่งออกเป็น 10 กลุ่ม คือ

2.1 Milk fat group เป็นไขมันที่ได้จากน้ำมันสัตว์ต่างๆ กรดไขมันในน้ำมันประกอบด้วย กรดโอเลอิกประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ กรดปาล์มติก 25 เปอร์เซ็นต์ กรดสเตียริก 15 เปอร์เซ็นต์

ส่วนประกอบของไขมันนมจะแปรผันตามอาหารของสัตว์และแหล่งของน้ำนมในอุตสาหกรรมจะ
ใช้ไขมันนมสำหรับทำเนย

2.2 Lauric acid group เป็นไขมันที่พบได้ในเนื้อในของเมล็ดพืชตระกูลปาล์ม
ลักษณะเฉพาะคือมีกรดลอริกสูง โดยเฉพาะน้ำมันมะพร้าวมีสูงถึง 40-50 เปอร์เซ็นต์ และมีปริมาณ
กรดไขมันอิ่มตัวน้อยซึ่งเป็นผลดีต่ออายุการเก็บรักษา มีลักษณะแข็งทนทานต่อการออกซิเดชันและ
ละลายได้ดี จึงเหมาะใช้ในอุตสาหกรรมสบู่

2.3 Vegetable butter group เป็นน้ำมันที่ได้จากเมล็ดพืช ได้แก่ โคคาบัตเตอร์ มีเนื้อสัมผัส
นุ่ม มีจุดหลอมเหลวในช่วงสั้น ประกอบด้วยกรดไขมันที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ มีราคาค่อนข้างสูง ใช้
ในอุตสาหกรรมยา

2.4 Animal fat group กลุ่มของไขมันที่ได้จากสัตว์ เช่นน้ำมันหมู ไขวัว ประกอบไปด้วย
กรดไขมันอิ่มตัวสูงประมาณ 30-40 เปอร์เซ็นต์ และกรดไขมันไม่อิ่มตัวชนิดโอเลอิกสูงถึง 50
เปอร์เซ็นต์ ไขมันเหล่านี้มีจุดหลอมเหลวสูง ใช้ในอุตสาหกรรมสบู่และใช้ประกอบอาหาร

2.5 Oleic-Linoleic acid group เป็นกลุ่มของน้ำมันที่ใหญ่ที่สุดและมีความสำคัญมาก เป็น
น้ำมันที่ได้จากพืชทั้งหมด ประกอบไปด้วยไขมันอิ่มตัวน้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ ส่วนใหญ่
ประกอบด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัว คือกรดโอเลอิกและกรดลิโนเลอิก น้ำมันเหล่านี้เป็นของเหลวที่
อุณหภูมิห้อง ใช้เป็นน้ำมันสำหรับปรุงอาหารดีที่สุด เช่นน้ำมันจาก ฝ้าย ข้าวโพด ถั่วลิสง งา
ทานตะวัน ดอกคำฝอย และส่วนเนื้อของผลมะกอกและปาล์ม

2.6 Erucic acid group เป็นกลุ่มของน้ำมันจากมัสตาร์ดและเรพสิด มีความสำคัญมากใน
อุตสาหกรรม น้ำมันกลุ่มนี้มาจากประเทศจีน อินเดีย และยุโรป ใช้เป็นน้ำมันสำหรับปรุงอาหารได้
ละใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่น (lubricants) มีราคาถูกกว่าพืชน้ำในชนิดอื่น

2.7 Linolenic acid group เป็นกลุ่มน้ำมันที่มีกรดไลโนเลนิกสูง และมีกรดโอเลอิกและกรด
ลิโนเลอิกสูงด้วย น้ำมันในกลุ่มนี้คือ น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันลินสีด

2.8 Conjugated acid group น้ำมันที่สำคัญคือ น้ำมันตังอิ้ว ประกอบด้วยกรดอีลีโอสเตอริก
(eleosteric acid) ซึ่งมีคาร์บอน 18 อะตอม และพันธะคู่ 3 อันเป็นจำนวนมาก โมเลกุลของน้ำมันที่มี

Conjugated double bond จะทำให้เกิดออกซิเดชันและพอลิเมอร์เชชันง่าย น้ำมันกลุ่มนี้แห้งเร็วกว่า drying oil จึงใช้ในอุตสาหกรรมเคลือบเงา น้ำมันกลุ่มนี้มีในประเทศจีนเท่านั้น

2.9 Marine oil group น้ำมันกลุ่มนี้ได้จากปลาชนิดต่างๆและปลาฉลาม ประกอบด้วยกรดไขมันที่มีจำนวนคาร์บอน 16, 20, 22 อะตอม จำนวนพันธะคู่ในโมเลกุลของไขมันที่มีคาร์บอน 20 และ 22 อะตอมมีมากกว่า 3 อัน เป็นน้ำมันที่มีราคาถูกที่สุด ใช้ประโยชน์เป็นน้ำมันบริโภค ผลิตภัณฑ์และเป็น protective coating

2.10 Hydroxy acid group เป็นกลุ่มน้ำมันละหุ่ง ใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่น ใช้ในอุตสาหกรรม protective coating

3. การแยกวิธีการสกัดแยกไขมันและน้ำมัน (นิธิยา, 2548)

3.1 การเจียว (Rendering)

3.1.1 การเจียวแห้ง (Dry rendering) คือการใช้เนื้อเยื่อไขมันที่ไม่เปียกน้ำเจียวในภาชนะเปิด ใช้อุณหภูมิ 220 -230 องศาฟาเรนไฮต์ น้ำมันที่ได้จะมีกลิ่นหอม แต่อาจมีคุณภาพไม่ดีเนื่องจากความร้อนจะทำให้ไขมันบางส่วนเกิดออกซิเดชัน และถ้าอุณหภูมิสูงเกินไป น้ำมันที่ได้จะมีสีคล้ำ น้ำมันที่ได้จะถูกแยกโดยการตกตะกอน การปั่นเหวี่ยง หรือการกรอง

3.1.2 การเจียวเปียก (Wet Rendering) คือการเติมน้ำร้อนหรือพ่นไอน้ำลงบนเนื้อเยื่อไขมันในภาชนะปิดภายใต้ความดันต่ำประมาณ 45-75 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และมีการไล่เอาอากาศออกเพื่อลดการเกิดออกซิเดชัน ข้อเสียของการเจียวเปียกคือ อาจทำให้เกิดอิมัลชันของน้ำและน้ำมันซึ่งอิมัลชันที่เกิดขึ้นทำลายได้ยาก

3.2 การบีบ (Pressing หรือ Expilling)

เป็นวิธีที่นิยมใช้กับเมล็ดพืชแบ่งเป็น

3.2.1 การบีบเย็น นิยมใช้กับเมล็ดพืชที่มีปริมาณน้ำมันสูง เช่น งา ถั่วลิสง ถั่วเหลือง มะกอก และมะพร้าว น้ำมันที่ได้สามารถนำไปใช้ได้เลยโดยไม่ต้องผ่านการทำให้บริสุทธิ์ น้ำมันที่ได้มีคุณภาพดี แต่มีประสิทธิภาพในการแยกน้ำมันต่ำเพราะในกากยังมีน้ำมันเหลืออีกมาก

3.2.2 การบีบร้อน มีประสิทธิภาพมากกว่าการบีบเย็น กากที่เหลือจากการบีบเย็นจะนำมาทำการบีบร้อนโดยใช้เครื่องอัดแบบไฮดรอลิก หรือเครื่องอัดแบบสกรู

3.3 การสกัดน้ำมันด้วยตัวทำละลาย

การสกัดไขมันหรือน้ำมันจากตัวทำละลายเป็นวิธีที่นิยมใช้ และสามารถสกัดน้ำมันออกจากเมล็ดพืชที่มีปริมาณน้ำมันต่ำ หรือสกัดน้ำมันออกจากกากที่เหลือจากการบีบด้วยเครื่องอัดตัวทำละลายที่ใช้ต้องไม่เป็นพิษต่อร่างกาย ได้แก่ เฮกเซน คาร์บอนไดซัลไฟด์ และไดเอทิลอีเทอร์ เป็นต้น ตัวทำละลายที่นิยมใช้ คือ เฮกเซน วิธีนี้ให้ปริมาณน้ำมันสูงกว่าวิธีอื่น แต่เสียค่าใช้จ่ายมากกว่าวิธีอื่นเพราะตัวทำละลายมีราคาแพง และแม้จะกลั่นแยกตัวทำละลายกลับมาใช้ได้อีกก็ตามแต่มีบางส่วนที่ระเหยหายไปด้วย น้ำมันที่ได้ออกมาไม่บริสุทธิ์ เรียกว่า น้ำมัน crude oil ที่ต้องนำไปผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ต่อไป

การกำจัดไขมันและน้ำมันในระบบบำบัดน้ำเสีย (Grease and Oil Removal in Wastewater Treatment Plant)

ไขมันและน้ำมันพบได้บ่อยในน้ำเสียที่มาจากร้านอาหารทั่วไป ไขมันและน้ำมันเหล่านี้เป็นสารประกอบแอลกอฮอล์ หรือ กลีเซอรอล รวมกับกรดไขมันต่างๆ (เกรียงศักดิ์, 2539) สามารถไปขัดขวางกระบวนการทางชีวะทั้ง aerobic และ anaerobic ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียลดลง มันไม่ถูกย่อยสลายใน anaerobic digestion ถ้ามีอยู่ในกากตะกอนจะทำให้เกิด scum สะสมอยู่ใน digester เป็นจำนวนมาก ทำให้เครื่องกรองอุดตันและทำให้กากตะกอนนั้นไม่เหมาะที่จะไปใช้ทำปุ๋ย สารเหล่านี้ถ้ามีปรากฏในน้ำโสโครก จะก่อให้เกิดฟิลาที่ผิวน้ำ เกิดเป็นคราบที่ชายฝั่ง และทำให้ท่อน้ำโสโครกอุดตัน (กรรณิการ์, 2544) อีกทั้งไขมันและน้ำมันที่หลุดเข้าไปในระบบบำบัดน้ำเสียนั้นจะส่งผลต่อระบบบำบัดทางชีวภาพ เนื่องจากไขมันไปสะสมหุ้มตะกอนจุลินทรีย์ (sludge) ทำให้เกิดปัญหาตะกอนไม่จมตัว หรือไปเคลือบผิวจุลินทรีย์ในระบบทำให้ไม่ได้รับอากาศและสารอาหาร (Camarrota, 2006) เนื่องจากไขมันและน้ำมันมีความสามารถในการละลายน้ำและค่าความถ่วงจำเพาะต่ำจึงลอยเป็นฟิลาอยู่เหนือผิวน้ำ จึงส่งผลต่ออัตราการย่อยสลายของจุลินทรีย์ลดลง

(Metcalf and Eddy, 2004 ; Sawyer *et al.*, 2003) โดยไขมันและน้ำมันนั้นมักเป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ยากและเป็นปัจจัยที่รบกวนการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสียทุกชนิด เมื่อตกตะกอนลงก้นบ่อหรือสระน้ำอาจไปยับยั้งการย่อยสลายของจุลินทรีย์ก้นบ่อได้ (มันสิน, 2545)

การกำจัดน้ำมันหรือไขมันออกจากน้ำเสียที่นิยมใช้กันทั่วไป มักเริ่มจากการแยกหรือทำให้ไขมันหรือน้ำมันแยกชั้นกับน้ำเสียก่อน แล้วจึงแยกออกจากน้ำเสียเพื่อไปกำจัดต่อไป ซึ่งมักอาศัยกระบวนการทางกายภาพเป็นหลัก หรืออาจอาศัยกระบวนการทางเคมีร่วมกับทางกายภาพเพื่อให้ไขมันหรือน้ำมันดังกล่าวแยกตัวจากน้ำเสียได้ดีหรือสมบูรณ์ขึ้น (สันทด, 2549)

บ่อดักไขมันเป็นการแยกไขมัน น้ำมันหรือสกปรกอื่นๆ ที่มีน้ำหนักเบาและลอยน้ำได้ ออกจากน้ำเสีย โดยอาศัยวิธีทางกายภาพอย่างง่าย ๆ คือไขมัน น้ำมัน จะมีน้ำหนักเบาและมีคุณสมบัติสามารถลอยอยู่ผิวน้ำของน้ำได้ โดยการวางท่อให้ต่ำกว่าระดับผิวน้ำในบ่อดักไขมัน น้ำเสียจะไหลลงที่ก้นระบายออกอีกด้านหนึ่งของบ่อดักไขมัน ส่วนไขมันหรือน้ำมันจะอยู่ที่ผิวน้ำ และถูกดักและติดค้างในบ่อดัก เมื่อสะสมในปริมาณมากพอจะถูกคัดออกไปทิ้งหรือนำไปกำจัดด้วยวิธีเหมาะสมต่อไป โดยสามารถแบ่งวิธีการกำจัดไขมันและน้ำมันออกจากน้ำเสียได้ดังนี้ (วีระ, 2545)

1. กำจัดไขมันและน้ำมันออกจากน้ำเสีย มีหลายวิธีดังต่อไปนี้ (เกรียงศักดิ์, 2539)

1.1 การเติมคลอรีน

การเติมคลอรีนเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ช่วยในการกำจัดไขมันต่างๆ ในน้ำเสีย คลอรีนที่ใช้ในการเติมลงไปอาจเป็นสารละลาย โดยที่จะเติมสารละลายคลอรีนลงในถังตกตะกอนชั้นแรก หรือในถังเติมอากาศ โดยทั่วไปแล้วใส่คลอรีนประมาณ 2 ถึง 5 มิลลิกรัมต่อลิตร อาจเพียงพอที่จะกำจัดไขมันออกจากน้ำเสีย

1.2. การเติมคลอรีนรวมกับการเป่าอากาศ

การเติมคลอรีนรวมกับการเป่าอากาศ จะเป็นวิธีที่ดีกว่าการเติมคลอรีนอย่างเดียว สำหรับการกำจัดไขมันออกจากน้ำเสีย ระบบนี้จะเป่าอากาศที่ใช้ก๊าซคลอรีนผสมกับอากาศเพื่อเป่าลงไปในถังเป่าอากาศ โดยทั่วไปจะใช้คลอรีนประมาณ 2 ถึง 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

1.3 การเพิ่มอุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดน้ำมัน ถ้าอุณหภูมิของน้ำมันในน้ำเสียสูงขึ้น ค่าความตึงผิวของน้ำมันจะลดลงทำให้น้ำมันต่างๆลอยขึ้นมาได้ง่ายขึ้นจึงเป็นประโยชน์ต่อการกำจัดน้ำมันออกจากน้ำเสียได้อย่างมาก

1.4 การขจัด

ในบางครั้งพวกไขมันในน้ำเสียได้ไหลลงสู่บ่อเปือกในสถานีสูบน้ำเสียเป็นประจำ ทำให้พวกไขมันเกิดการสะสมและเกาะตามกำแพงของบ่อ ปัญหานี้อาจแก้ไขได้โดยใช้น้ำฉีดแรงๆ และหรือการขจัดบริเวณที่มีไขมันเกาะติดอยู่ และถ้าจำเป็นควรถ่ายน้ำเสียทิ้งออกจากบ่อเปือกอย่างช้าๆ จากนั้นจึงทำการขจัดเอาไขมันที่ติดอยู่บริเวณพื้นบ่อเปือกออก วัตถุประสงค์ของการกำจัดไขมันออกจากน้ำเสียในบ่อเปือกคือป้องกันไม่ให้ไขมันเหล่านี้ไปอุดตันในเครื่องสูบน้ำ

1.5 การเป่าอากาศ

การเป่าอากาศเป็นระบบที่ต้องใช้พลังงานมาก แต่จะทำให้ระบบบำบัดน้ำเสียมีประสิทธิภาพมากขึ้น เพราะว่าไม่เพียงแต่จะสามารถกำจัดไขมันออกได้เท่านั้น ยังสามารถกำจัดพวกตะกอนหนัก ช่วยลดค่าบีโอดี ช่วยลดค่าสารแขวนลอย ช่วยควบคุมกลิ่นในระบบบำบัด ช่วยลดปริมาณตะกอนที่สะสมที่เกาะสะสมอยู่บริเวณกำแพง และบริเวณก้นบ่อเปือก ระบบเป่าอากาศนี้มีหลักการ คือ เป่าอากาศลงในน้ำ พวกฟองอากาศจะนำพวกไขมันต่างๆลอยขึ้นมา จากนั้นจึงทำการตักหรือกวาดไขมันเหล่านี้ขึ้นมาจากถังเป่าอากาศ

1.6 การทำให้ลอย (Flotation)

การทำให้ลอยเป็นกระบวนการที่นิยมใช้กันมากสำหรับการกำจัดน้ำมันและไขมัน ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและมีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันและไขมันค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการอื่นๆ กระบวนการทำให้ลอยนี้มีหลักการคือ นำพวกน้ำมันหรือไขมันซึ่งมีน้ำหนักเบาให้ลอยขึ้น โดยอาศัยแรงลอยตัวของฟองอากาศพองพาพวกน้ำมันหรือไขมันเหล่านี้ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ จากนั้นใช้วิธีการกวาดพวกน้ำมันหรือไขมันที่อยู่บริเวณผิวน้ำออกจากถัง (วีระ, 2545) นั้นมี

ความสอดคล้องกับ González (1996) ที่กล่าวถึง กระบวนการ Flotation ที่ไม่เพียงแต่เป็นการกำจัดไขมัน อีกทั้งยังสามารถกำจัดสารแขวนลอย (suspended solids) ได้อีกด้วย

Flotation เป็นวิธีการแยกตะกอนออกจากระบบ โดยทำให้ตะกอนต่างๆ ในน้ำเสียลอยขึ้นสู่บริเวณผิวชั้นบนของผิวน้ำเพื่อทำการกวาดทิ้งไป วิธีนี้นิยมใช้กับตะกอนที่ยากแก่การตกตะกอน เช่น ตะกอนแขวนลอยที่มีน้ำหนักเบามาก พวกไขมันต่างๆ ซึ่งใช้เวลาในการแยกตะกอนน้อยกว่าวิธีการตกตะกอน ปัญหาคือการทำให้ตะกอนลอยขึ้นมาบนผิวน้ำ วิธีการคือ ต้องทำให้ความถ่วงจำเพาะของตะกอนมีน้อยกว่าน้ำเสีย โดยการใช้ฟองอากาศรวมเกาะกับตะกอนเพื่อทำให้ความถ่วงจำเพาะของทั้งฟองอากาศรวมกับตะกอนมีค่าน้อยกว่าความถ่วงจำเพาะของน้ำเสีย

การนำระบบ Flotation ไปใช้ในทางปฏิบัติมีดังนี้

- (1) ใช้ทำหน้าที่เป็นระบบบำบัดก่อนขั้นต้น คือติดตั้งก่อนหน้าถึงตกตะกอนแรก
- (2) ใช้ทำหน้าที่เป็นระบบบำบัดขั้นต้น คือติดตั้งก่อนหน้าระบบบำบัดขั้นที่สอง
- (3) ใช้ทำหน้าที่บำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมขั้นตอนหนึ่งเสียก่อน ก่อนที่จะไหลไปรวมกับน้ำเสียชุมชน เพื่อนำไปบำบัดต่อไป
- (4) ใช้ทำหน้าที่แยกตะกอนบางประเภทออกจากน้ำเสีย ซึ่งไม่สามารถแยกออกได้โดยวิธีอื่นๆ
- (5) ใช้ทำหน้าที่เพิ่มความเข้มข้นของตะกอนในระบบบำบัดน้ำเสียขั้นที่สอง โดยทั่วไประบบ Flotation จะมีทั้งข้อดีและข้อเสีย ดังนี้

ข้อดีของระบบ Flotation

- (1) พวกไขมัน ตะกอนเบา ตะกอนหนักต่างๆ สามารถถูกแยกออกจากน้ำเสียได้ โดยใช้เพียงถังเดียว
- (2) ระบบนี้ต้องการพื้นที่ในการติดตั้งน้อย เพราะระบบนี้มีค่าอัตราน้ำล้นออกสูง และมีเวลากักเก็บต่ำ ซึ่งหมายถึงว่าใช้ถังที่มีขนาดเล็กและส่งผลให้ประหยัดค่าก่อสร้างระบบบำบัดน้ำเสีย

(3) ระบบนี้ไม่มีปัญหาเรื่องกลิ่นเหม็นรบกวน เพราะเวลาเก็บกักของน้ำเสียในถัง Flotation มีน้อย และปริมาณออกซิเจนของน้ำเสียในถัง Flotation จะมีมากเกินไป จึงไม่ก่อให้เกิดปัญหาเรื่องกลิ่นเหม็นรบกวน

(4) ระบบนี้สามารถแยกตะกอนชนิดต่างๆออกจากน้ำเสียได้มากกว่าระบบการตกตะกอน

(5) พกตะกอนต่างๆที่ถูกแยกออกจากน้ำเสียบางชนิด สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้

ข้อเสียของระบบ Flotation

(1) ต้องการเครื่องมือในการควบคุมระบบมากกว่าถังตกตะกอนธรรมดา ค่าไฟฟ้า ค่าสารเคมี ค่าบำรุงรักษา จะสูงกว่าการใช้ถังตกตะกอน

(2) ประสิทธิภาพในการแยกตะกอนแขวนลอยโดยระบบ Flotation จะต่ำกว่าของระบบถังตกตะกอน

(3) ระบบ Vacuum Flotation มีราคาสูง เพราะต้องการถังที่มีความแข็งแรงสามารถทนต่อความดันสูงๆได้ และต้องคอยตรวจสอบระบบอย่างสม่ำเสมอไม่ให้มีรอยแตกรั่วเกิดขึ้นในถังได้ ถ้ามีรอยแตกรั่วของถังเพียงเล็กน้อย ระบบ Flotation นี้ จะไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

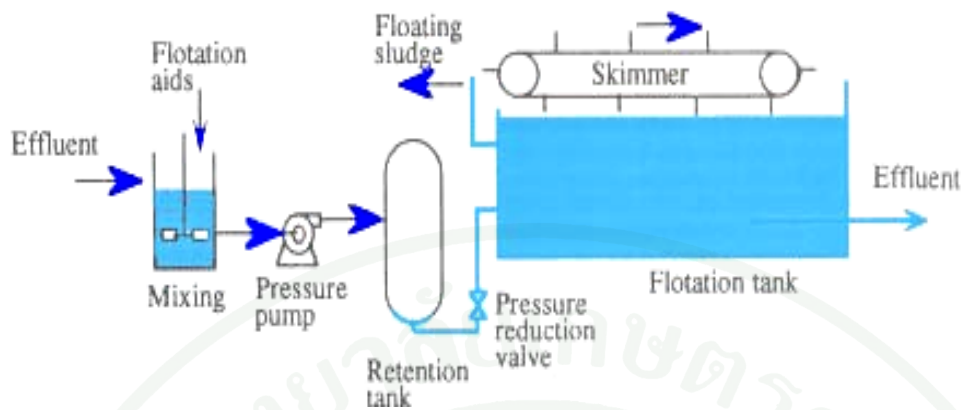
1.6.1 การทำให้ตะกอนลอยที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย มี 3 วิธี (เกรียงศักดิ์, 2539)

ก. Dissolved-Air Flotation

Dissolved-Air Flotation เป็นกระบวนการกำจัดสิ่งที่ย่อยบนผิวน้ำ โดยใช้ความดันอัดอากาศละลายน้ำเสีย เป็นการอัดอากาศโดยใช้ความดันมากกว่าความดันบรรยากาศปกติหลายเท่า เพื่อให้ อากาศละลายกับน้ำเสียในถังพักน้ำเสีย (retention tank) เป็นเวลาหลายนาที ตามด้วยการ ลดความดันอากาศลงให้ถึงระดับความดันอากาศปกติโดยผ่านเข้าสู่ถังทำให้ลอย (flotation tank) ซึ่งอากาศละลายอยู่ในน้ำเสียที่ถูกกดไว้ด้วยความดันที่สูงกว่าความดัน

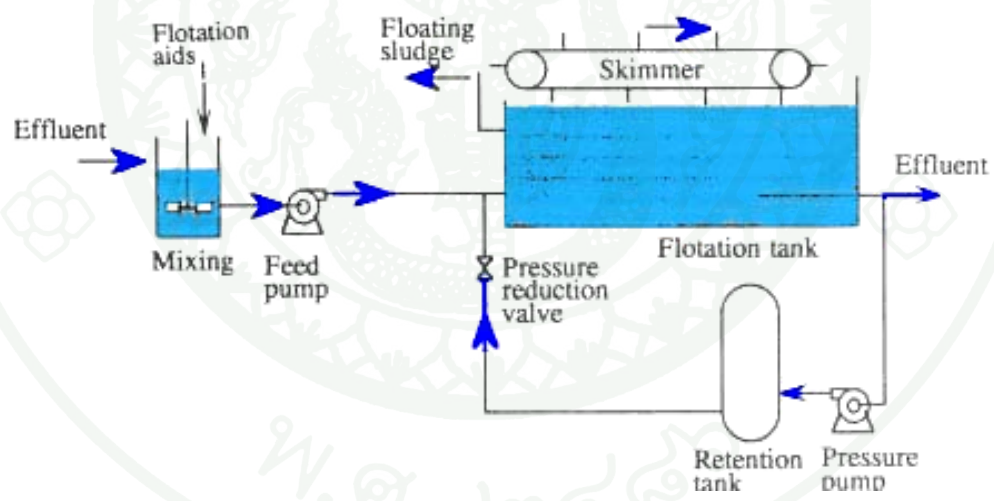
บรรยากาศปกตินั้น จะลอยหนีออกจากน้ำผ่านของแข็งที่ละลายอยู่ในน้ำเสียแล้วยกของแข็งให้ลอยขึ้นสู่ผิวของเหลวกลายเป็นฟอง (วิระ, 2545 และ Al-Shamrani, 2002) ซึ่งวิธีนี้มีอยู่ 2 ระบบด้วยกันคือ ระบบไม่มีการหมุนเวียนใช้กับน้ำที่มีตะกอนชนิดไม่เปราะ และระบบมีการหมุนเวียน ใช้กับน้ำที่มีตะกอนชนิดเปราะแตกหักง่าย ดังนั้นจึงไม่เหมาะที่จะให้น้ำตะกอนไหลเข้าสู่ถังความดันโดยตรง เพราะตะกอนอาจแตกกระจายไป ลักษณะการทำงานของระบบนี้คือ จะนำน้ำจากถัง Flotation ไปยังถังความดัน แล้วจึงปล่อยออกไปรวมกับน้ำที่จะเข้าสู่ระบบ (Influent) เพื่อนำไปปล่อยเข้าสู่ถัง Flotation สำหรับการแยกตะกอนออกจากน้ำเสียต่อไป (เกรียงศักดิ์, 2539) ในระบบที่ใช้ความดันต่ำจะใช้ค่าความดันระหว่าง 275 ถึง 350 กิโลปาสกาล และในระบบที่มีการหมุนเวียนน้ำจะมีการนำน้ำที่บำบัดจาก DAF แล้วเข้ามาหมุนเวียนในระบบ 15 ถึง 120 เปอร์เซ็นต์ (Metcalf & Eddy, 2003) และมีการใช้สารเร่งการเกิดตะกอน Coagulation/Flocculation (Geraldes *et al.*, 2008) เช่น อลูมิเนียม เกลือเฟอริก และแอกทิเวเต็ดซิลิกา เร่งการเกิด flog เพื่อให้สามารถจับกับฟองอากาศได้ดีขึ้น และมีการใช้โพลิเมอร์ร่วมเพื่อช่วยให้ฟองอากาศที่จับกับของแข็งจับตัวกันง่ายขึ้น (Metcalf & Eddy, 2003) ซึ่งระบบนี้สามารถจับส่วนที่เป็น fine particle matter ได้ถึง 80-90 เปอร์เซ็นต์ และสามารถลดความขุ่นของน้ำให้ต่ำกว่า 1 NTU ได้ อีกทั้งลดสารเคมีที่ใช้ในการบำบัด และทำให้ surface loading สูง จึงส่งผลให้ระบบบำบัดมีขนาดเล็กลงตามมา (Vitor *et al.*, 2007)

González (1996) กล่าวว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบที่สำคัญ เช่น ความเข้มข้นของของแข็ง (solids concentration), อัตราส่วนของอากาศต่อของแข็ง (ratio of air to solids), ปริมาณอากาศที่ลดลงหลังจากผ่านถังอัดความดัน, ค่า pH ที่ 4.5-6 (ที่ pH 5 ดีที่สุดเนื่องจากโปรตีนจะละลายน้ำและทำให้ไม่เกิด emulsion), อัตราการไหลที่เหมาะสม และผู้ควบคุมระบบที่ดี



ภาพที่ 3 ระบบ Dissolved-Air Flotation

ที่มา: González (1996)



ภาพที่ 4 ระบบ Dissolved-Air Flotation with recycle

ที่มา: González (1996)



ภาพที่ 5 ถัง Dissolved-Air Flotation

ที่มา: บริษัท ฟินด์ส (ไทยแลนด์) จำกัด (2552)



ภาพที่ 6 เศษกากตะกอนจากระบบ Dissolved-Air Flotation

ที่มา: บริษัท ฟินด์ส (ไทยแลนด์) จำกัด (2552)

ข. Air flotation หลักการของวิธีที่สองคือ การเติมอากาศหรือเป่าอากาศลงในน้ำเสียโดยตรง ณ ความดันบรรยากาศ ในการเป่าอากาศจะทำให้เกิดฟองอากาศที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศประมาณ 2-3 มิลลิเมตร น้ำพาตะกอนต่างๆลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ จากนั้นพวกตะกอนที่ลอยขึ้นมาจะถูกกวาดทิ้งออกไป สำหรับฟองอากาศที่มีขนาดใหญ่ขึ้น จะส่งผลให้ความเร็วของฟองอากาศที่ลอยขึ้นมามีมากขึ้นด้วย แต่วิธีนี้ไม่เป็นที่นิยมในการแยกตะกอนออกจากน้ำเสียเพราะประสิทธิภาพในการแยกตะกอนมีต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีแรก

ค. Vacuum flotation หลักการของวิธีนี้คือ พยายามเป่าอากาศลงในน้ำเสียจนถึงจุดอิ่มตัว ซึ่งมีอยู่ 2 วิธีคือ เป่าอากาศลงในน้ำเสียโดยตรง หรืออีกวิธีคือ ปลดปล่อยอากาศเข้าไปในเครื่องสูบน้ำเอง ระบบนี้จะใช้ถังปิด ซึ่งจะเก็บน้ำที่ถูกเป่าอากาศลงไปถึงจุดอิ่มตัว ขณะนี้ภายในถังจะมีสภาพเป็นสุญญากาศ เมื่อถังนี้ถูกเปิดออกโดยใช้ตัวควบคุมแล้ว พวกอากาศที่ละลายอยู่ในน้ำจะแยกออกมาจากน้ำในลักษณะของฟองอากาศเล็กๆ พวกฟองอากาศเล็กๆเหล่านี้จะพาตะกอนต่างๆในน้ำเสียลอยขึ้นมาบนผิวน้ำในลักษณะฝ้าตะกอน (Scum) ซึ่งสามารถแยกออกจากน้ำได้โดยการกวาดและหรือการสูบบอก วิธีนี้ต้องการพื้นที่สำหรับการติดตั้งระบบน้อยกว่าสองวิธีแรก

ทั้ง 3 วิธี ของระบบ Flotation ที่ได้กล่าวข้างต้น อาจเติมสารเคมีบางชนิดลงไปในระบบดังกล่าว เพื่อช่วยให้ตะกอนเล็กๆเกาะติดกัน และจะทำให้โครงสร้างที่สามารถเกาะติดกับฟองอากาศได้ดียิ่งขึ้น เป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกตะกอนของระบบ Flotation สารเคมีที่นิยมใช้กันสำหรับช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ Flotation ได้แก่ สารอนินทรีย์ เช่น Alum, FeCl_3 , Activated silica, $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ และสารอินทรีย์ เช่น Amyl alcohol, Pine oil, Cresylic acid

ชนิดของถังสำหรับหน่วยบำบัดชนิดนี้จะมีทั้งแบบสี่เหลี่ยมและวงกลม เช่นเดียวกับถังตกตะกอน ถังแบบสี่เหลี่ยมจะสะดวกกว่าในการคำนวณและออกแบบเพื่อการเพิ่มขนาด (Scale-Up) รวมใช้พื้นที่น้อยกว่า โดยทั่วไปถังสี่เหลี่ยมจะมีความลึกประมาณ 1.5 เมตร และมีอัตราการน้ำล้น (Overflow Rate) ในช่วง 190-300 เมตรต่อวัน ขึ้นกับน้ำที่จะบำบัด ภายในมีแผ่นกั้น (Baffle) วางเฉียงประมาณ 60 องศา เพื่อนำฟองอากาศไปสะสมที่ผิวน้ำและเพื่อลดความเร็วของน้ำ และลดการรบกวนฟล็อกที่ลอยอยู่ ระยะเวลาที่เก็บโดยทั่วไปอยู่ในราว 5-20 นาที ขึ้นอยู่กับอัตราการบรรทุก (Loading rate) และความลึกของถัง เป็นการเปรียบเทียบหน่วยกำจัดอนุภาคแบบตกตะกอนและแบบทำให้ลอยด้วยวิธี Dissolved-Air Flotation

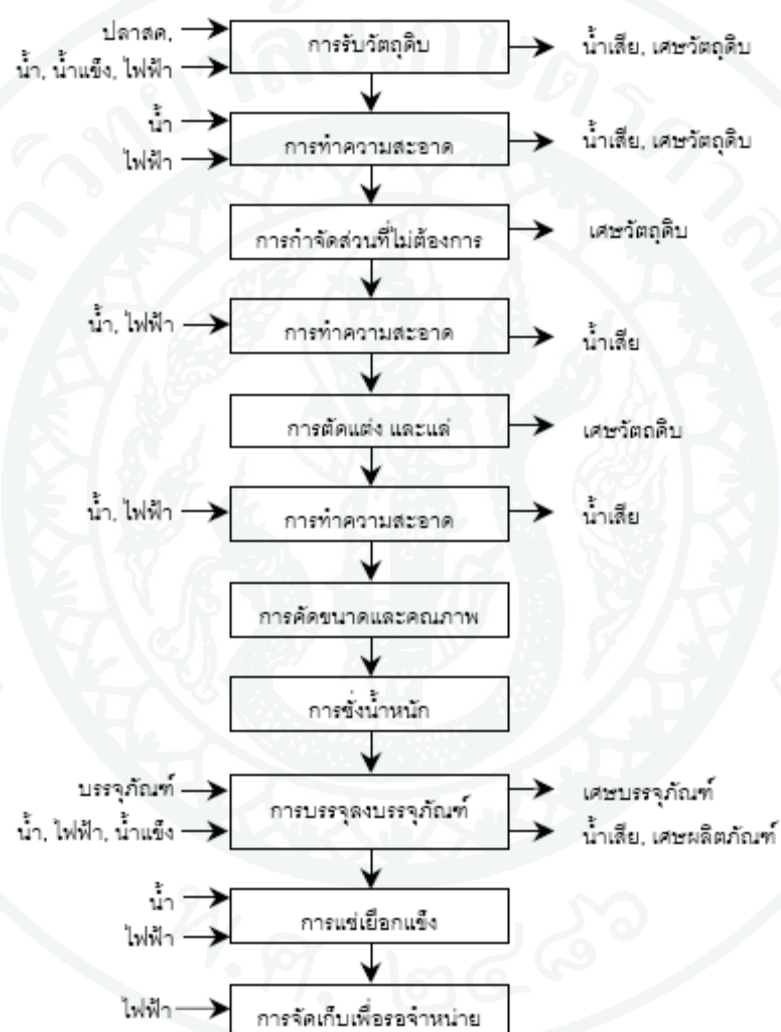
ตารางที่ 3 ข้อเปรียบเทียบบางประการระหว่างหน่วยกำจัดอนุภาคแบบตกตะกอนและแบบทำให้ลอยด้วยวิธี Dissolved-Air Flotation

	ถังตกตะกอน	ระบบ DAF
ความสามารถในการกำจัดตะกอนที่หนัก	ได้	ไม่ได้
ความเหมาะสมในการใช้กับน้ำที่มีสาหร่าย	ไม่เหมาะสม	เหมาะสม
ความง่ายในการริเริ่ม (Start Up) และปิดเปิดระบบขณะทำงาน	ง่าย	ง่ายและทำได้ทันที
ความชำนาญของผู้ควบคุมและดำเนินระบบ	ต่ำ	สูง
ระยะเวลากักเก็บ	สูง	ต่ำ
ค่าลงทุน	สูง-ปานกลาง	ปานกลาง-ต่ำ
ค่าการดำเนินการ	ปานกลาง-ต่ำ	ปานกลาง-สูง

ที่มา: สุเทพ (2550)

อุตสาหกรรมอาหารทะเลแช่เยือกแข็ง (ประเภทปลา)

เนื่องจากผลิตภัณฑ์อาหารทะเลแช่เยือกแข็ง มีความหลากหลายตามชนิดของสัตว์น้ำที่นำมาผลิต แต่มีกรรมวิธีการผลิตเป็นขั้นตอนหลักๆ ดังนี้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2548)



ภาพที่ 7 แผนผังกระบวนการผลิตอาหารทะเลแช่เยือกแข็ง

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ (2548)

1. การใช้ทรัพยากรและพลังงาน

1.1 การใช้วัตถุดิบ สามารถจำแนกได้ 2 ประเภท คือวัตถุดิบหลัก ได้แก่ อาหารทะเลสด และวัตถุดิบเสริม ได้แก่ น้ำสะอาด น้ำแข็ง สารเคมีที่ใช้เพิ่มคุณสมบัติ น้ำ ได้แก่ เกลือทะเล (NaCl) และ คลอรีน (NaOCl) รวมถึงบรรจุภัณฑ์ต่างๆ

ตารางที่ 4 ปริมาณการใช้วัตถุดิบเสริมในอุตสาหกรรมอาหารทะเลแช่แข็ง

ผลิตภัณฑ์	ปริมาณการใช้ไฟฟ้า (kw-h/ตันผลิตภัณฑ์)	ปริมาณการใช้ น้ำ (ลบ.ม./ตันผลิตภัณฑ์)	ปริมาณการใช้ น้ำเย็น (ลบ.ม./ตันผลิตภัณฑ์)	ปริมาณการใช้ น้ำแข็ง (ลบ.ม./ตันผลิตภัณฑ์)
อาหารทะเลแช่แข็ง	366-2491	13-83	7-39	1-11

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ (2548)

1.2 การใช้น้ำ มีการใช้ทั้งน้ำสะอาดหรือน้ำประปา เพื่อล้างทำความสะอาดวัตถุดิบและหากต้องการให้น้ำประปามีคุณสมบัติในการกำจัดเชื้อโรค การเติมคลอรีนลงไปผสมที่ความเข้มข้นที่กำหนด จำนวนครั้งและขั้นตอนการล้างต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของผลิตภัณฑ์และเกณฑ์การกำหนดปริมาณเชื้อให้หลงเหลือในผลิตภัณฑ์นั้น รวมถึงมีการใช้น้ำแข็ง เพื่อคงความสดและควบคุมการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ในระหว่างกระบวนการผลิต เพื่อต้องการให้น้ำแข็งมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง จะมีการเติมเกลือแกงลงไปให้น้ำแข็งด้วย

ตารางที่ 5 ปริมาณการใช้น้ำในกระบวนการผลิตปลาแช่เยือกแข็ง

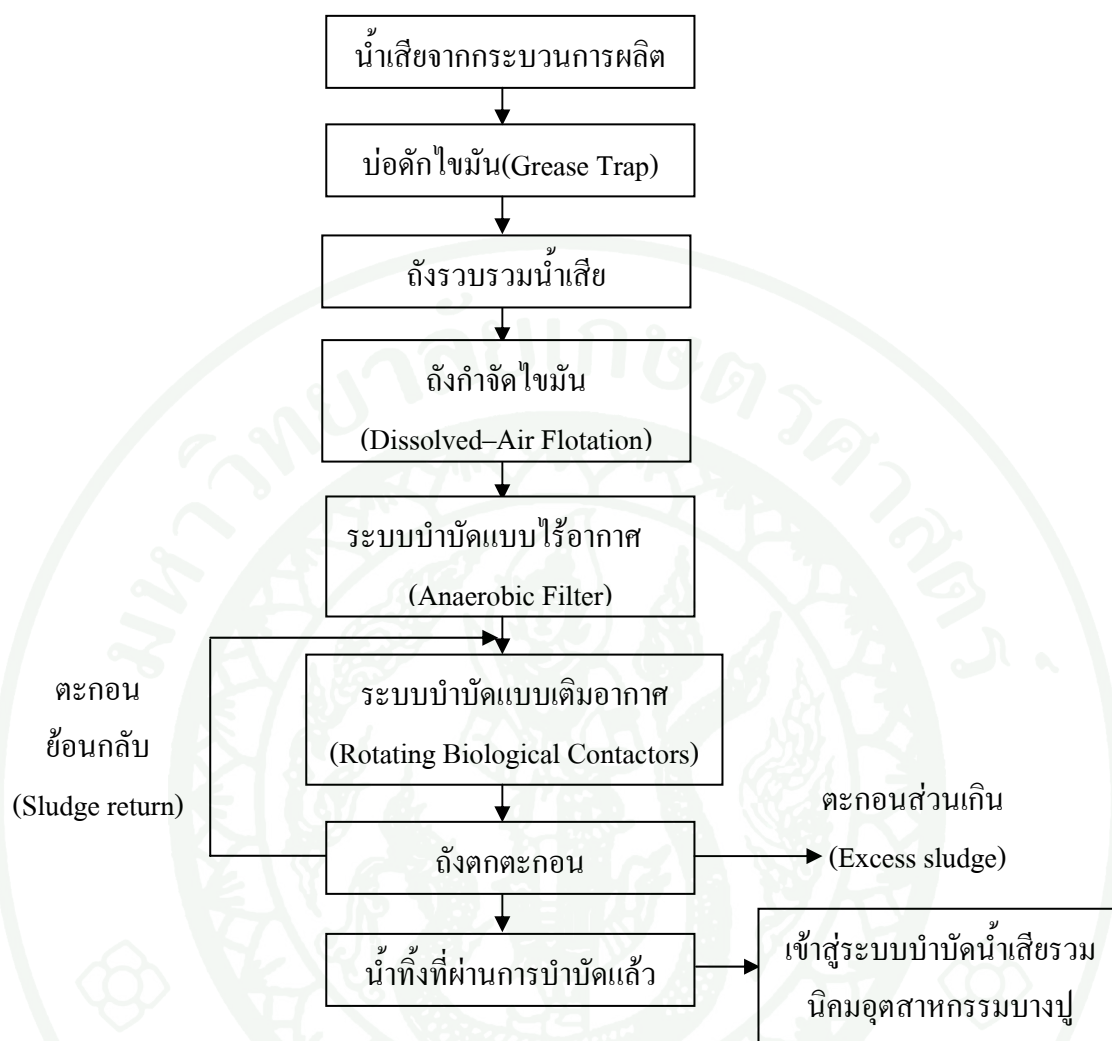
ขั้นตอนการผลิต	ปริมาณน้ำใช้ (ลบ.ม./ตันวัตถุดิบ)
การละลายน้ำแข็ง	3
การทำความสะอาดวัตถุดิบ	0.6
การทอดเกล็ด	6-9
การตัดหัวปลา	0.6
การตัดแต่งชิ้นต้น	0.6-1.8
การลอกหนังปลา	0.1-0.4
การตัดแต่งชิ้นสุดท้าย	0.1
การแช่เยือกแข็งและจัดเก็บ	0.1

ที่มา: บริษัท ฟินคัส(ไทยแลนด์)จำกัด, 2552

หมายเหตุ: ปริมาณการผลิตปลาแซลมอนและปลาเทราท์ 16 ตัน/วัน

โดยน้ำเสียส่วนใหญ่มาจากกระบวนการล้างวัตถุดิบ และจากแหล่งอื่นๆ ได้แก่ จากการใช้เพื่ออุปโภคในสำนักงาน การชำระทำความสะอาดมือและเท้าของพนักงานปฏิบัติการ การล้างสายการผลิตและภาชนะต่างๆ

น้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตจะถูกส่งไปบำบัดด้วยระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงาน ซึ่งอาจแตกต่างกันตามลักษณะความพร้อมในการลงทุน ลักษณะคุณภาพน้ำเสีย สภาพแวดล้อมของโรงงานและปัจจัยอื่นๆ



ภาพที่ 8 กระบวนการบำบัดน้ำเสีย

ที่มา: บริษัท ฟินคัส (ไทยแลนด์) จำกัด (2552)

ไบโอดีเซล

ไบโอดีเซล คือ สารประกอบโมโนอัลคิลเอสเทอร์ (mono-alkyl ester) ซึ่งเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) ของน้ำมันพืช น้ำมันที่ใช้แล้ว หรือสัตว์ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ประเภทไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ ทำ

ปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดหรือเบส (Schinas, 2008) การเรียกชื่อสารเอสเทอร์ที่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ทำปฏิกิริยาเช่น เมทิลเอสเทอร์ เอทิลเอสเทอร์ (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2549) สามารถผลิตได้จากวัตถุดิบที่หลากหลายที่ผลิตทั่วไปเป็นพวกที่ทำมาจากน้ำมันพืช เช่นเมล็ดถั่วเหลือง, เมล็ดฝ้าย, เมล็ดปาล์ม, ถั่วลิสง, เรพส์/คาโนลา, ทานตะวัน, ดอกคำฝอย, มะพร้าว ซึ่งชนิดของวัตถุดิบจะขึ้นอยู่กับแหล่งที่ปลูกและคุณภาพของวัตถุดิบ (Knothe, 2005) รวมทั้งการผลิตไบโอดีเซลจากไขมันที่ทำมาจากน้ำมันที่ใช้แล้วจากร้านอาหาร โดยไขมันเหล่านี้มีความหนืดมากกว่าน้ำมันพืชอีกทั้งมีปริมาณกรดไขมันอิสระสูงและมีน้ำปนเปื้อนซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพในการเปลี่ยนเป็นไบโอดีเซล จึงต้องมีกระบวนการลดความหนืดของไขมันเหล่านี้ (Meng *et.al.*, 2007; Wang *et.al.*, 2006; Cayli *et.al.*, 2008; Encinar *et.al.*, 2007; Ozbay *et.al.*, 2008)

สำหรับประเทศไทยในปี 2548 พบว่าน้ำมันพืชที่เหลือจากแหล่งที่ใช้ไขมันทั้งหมดทั่วประเทศ มีปริมาณรวมปีละ 74.5 ล้านลิตร โดยกลุ่มครัวเรือนมีปริมาณน้ำมันพืชเหลือจากการใช้แล้วมากที่สุดคือ 47.2 ล้านลิตรต่อปี รองลงมาได้แก่สถานประกอบการ 22.5 ล้านลิตรต่อปี โรงงานอุตสาหกรรม 3.4 ล้านลิตร และผู้จำหน่ายของทอดในตลาด 1.3 ล้านลิตรต่อปี สำหรับการสำรวจปริมาณน้ำมันใช้แล้วจากสถานประกอบการนั้น พบว่าได้จากกลุ่มผู้ผลิตอาหารฟาสต์ฟู้ดมากที่สุด รองลงมาได้แก่ ร้านอาหาร โรงแรม โรงพยาบาลและห้างสรรพสินค้า แต่ยังมีปัญหาในการรวบรวมและคุณภาพน้ำมัน เนื่องจากน้ำมันที่ใช้ทอดที่อุณหภูมิสูงหลายครั้ง และมีการปนเปื้อนจากกระบวนการทำอาหาร ทำให้ต้องมีการควบคุมคุณภาพน้ำมันทั้งก่อนและหลังการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน จึงจะผลิตไบโอดีเซลได้ตามมาตรฐานที่กำหนด (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2549)

ตารางที่ 6 ปริมาณการผลิตน้ำมันพืชและไขสัตว์ 17 ชนิดของโลก พ.ศ. 2543-2547 (พันตัน)

น้ำมันพืช/ไขสัตว์	2543	2544	2545	2546	2547
น้ำมันถั่วเหลือง	25,563	27,828	29,861	31,288	30,694
น้ำมันปาล์ม	21,868	23,984	25,392	28,109	30,651
น้ำมันเมล็ดเรพ	14,502	13,730	13,307	12,663	14,916
น้ำมันทานตะวัน	9,745	8,200	7,624	8,924	9,399
น้ำมันถั่วลิสง	4,539	5,141	5,181	4,511	4,732
น้ำมันเมล็ดฝ้าย	3,850	4,052	4,234	3,982	4,400
น้ำมันเมล็ดในปาล์ม	2,698	2,947	3,042	3,344	3,57
น้ำมันมะพร้าว	3,261	3,499	3,145	3,286	3,032
น้ำมันมะกอก	2,540	2,761	2,718	2,903	2,978
น้ำมันข้าวโพด	1,966	1,962	2,016	2,015	2,015
น้ำมันงา	705	747	822	782	789
น้ำมันลินสีด	705	648	585	597	631
น้ำมันละหุ่ง	497	515	438	430	496
น้ำมันพืชทั้งหมด	92,439	96,014	98,365	102,834	108,290
Butter	5,967	6,010	6,188	6,274	6,348
ไขมัน	8,202	7,693	8,073	8,043	8,137
น้ำมันปลา	1,411	1,131	934	990	1,095
น้ำมันหมู	6,739	6,780	7,006	7,200	7,279
น้ำมัน/ไขสัตว์ทั้งหมด	22,319	21,614	22,201	22,507	22,859
รวมน้ำมันพืชและไขมันสัตว์	114,758	117,628	120,566	125,341	131,149

ที่มา: สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (2549)

พนมพร (2544) กล่าวถึงข้อดีของไบโอดีเซลในเชิงเศรษฐศาสตร์คือ ราคาถูก ช่วยพยุงราคาพืชผลทางการเกษตร หากสามารถนำเอาผลผลิตทางการเกษตรมาแปรรูปโดยทำเป็นน้ำมันได้จะช่วยลดการนำเข้าน้ำมันดิบจากต่างประเทศ ประมาณการใช้น้ำมันดีเซล 15,000 ลิตรต่อปี ถ้าใช้ไบโอดีเซลเพียง 5 เปอร์เซ็นต์ จะใช้ไบโอดีเซลถึง 750 ลิตรต่อปี หรือ ประมาณ 2 ลิตรต่อวัน

และข้อดีด้านสิ่งแวดล้อมและคุณภาพชีวิตก็คือ ช่วยลดมลพิษในอากาศ เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลพบว่าสารไฮโดรคาร์บอน (HC) ลดลง 93 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ลดลง 50 เปอร์เซ็นต์

Marchetti and Errazu (2008) กล่าวว่า มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ ของการผลิตไบโอดีเซล คือ ค่าวัตถุดิบ จึงมีความพยายามที่จะพัฒนาเทคโนโลยีในการผลิตโดยลดค่าใช้จ่ายในส่วนนี้ของวัตถุดิบ เช่นการใช้น้ำมันที่ใช่แล้ว หรือน้ำมันพืชและไขมันสัตว์ที่เป็นของเสียในกระบวนการผลิตซึ่งสอดคล้องกับ Mustafa (2006) ที่กล่าวว่าไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันที่บริโภคได้มีราคาแพงกว่าน้ำมันดีเซลและไม่มีความสะดวกทางเศรษฐกิจ การใช้น้ำมันที่ใช่แล้ว เช่นไขมันจากร้านอาหารและไขมันสัตว์จึงถูกนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล

Reyes and Sepulveda (2006) ทำการศึกษาไบโอดีเซลที่ป็นเมทิลเอสเทอร์ของ น้ำมันปลาแซลมอน พบว่าเมทิลเอสเทอร์ที่ได้มีปริมาณกรดไขมันอิสระสูง จึงใช้กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยใช้กรดและเบส โดยในการศึกษานี้เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันปลาแซลมอนที่ผสมกับน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนต่างๆ และ น้ำมันปลาแซลมอนที่ใช้ความร้อนสูงสุดในการสกัด (Refine salmon oil) เมื่อทำการทดสอบในเครื่องยนต์พบว่า มีผลต่อ maximum power (KW), Fuel Consumption (L/h), Specific fuel consumption (Kg/KWh) และ Opacity ที่ 2,200 รอบต่อนาที

Hamed *et al.* (2008) ทำการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้น้ำมันปลาแซลมอนจากเศษก้างและเนื้อส่วนที่เหลือจากการชำแหละแล้วโดยศึกษาเปรียบเทียบน้ำมันจาก 2 ตัวอย่าง คือจาก acidified salmon hydrolysate และ Grinding พบว่าชนิดของกรดไขมันอิสระที่ได้มีมีองค์ประกอบและปริมาณที่ไม่แตกต่างกันแต่พบว่าการใช้ Alkaline-catalysed Tranesterification ไม่เหมาะที่จะผลิตเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปลาแซลมอนเนื่องจากค่าความเป็นกรดที่สูง จึงใช้วิธีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน (two step process) โดยใช้ 1 เปอร์เซ็นต์กรดซัลฟิวริกเข้มข้น และตามด้วย 0.5 เปอร์เซ็นต์โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือ 52 ± 2 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบในการหมุนของเซนตริฟิวจ์ 600 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่ 9.2:1 ได้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ 99 เปอร์เซ็นต์ แต่ค่าต้นทุนที่ใช้มีค่าสูงเป็น 2 เท่าของไบโอดีเซลที่ทำมาจากถั่วเหลือง

ตารางที่ 7 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันปลาแซลมอน

ชนิดของกรดไขมัน	เปอร์เซ็นต์	ชนิดของกรดไขมัน	เปอร์เซ็นต์
C14:0 Miristic	5.08	C16:2 Hexadecadienoic	1.03
C15:0 Pentadecanoic	0.45	C16:3 Hexadecatrienoic	0.19
C16:0 Palmitic	15.39	C16:4 Hexadecatetraenoic	0.70
C17:0 Heptadecanoic	0.46	C18:2 Linoleic	3.78
C18:0 Stearic	4.00	C18:3 Linoleic	0.43
C19:0 Nonadecanoic	0.08	C18:3 Linolenic	0.99
C20:0 Eicosaenoic	0.15	C18:4 Octadecatetraenoic	1.27
C22:0 Docosaenoic	0.09	C18:4 Octadetetraenoic	0.60
Total saturated	25.70	C20:2 Eicosadienoic	0.30
C14:1 Miristoleic	0.16	C20:3 Eicosatrienoic	0.30
C16:1 Palmitoleic	7.55	C20:4 Eicosatetraenoic	2.08
C17:1 Heptadecanoic	0.79	C20:5 Eicosapentaenoic	9.49
C18:1 Oleic	20.76	C21:5 Heneicosapentaenoic	0.54
C19:1 Nonadecanoic	0.42	C22:4 Docosatetraenoic	0.30
C20:1 Eicosaenoic	2.33	C22:5 Docosapentaenoic	4.94
C22:1 Docosaenoic	0.92	C22:6 Docosahexaenoic	13.99
C24:1 Tetracosanoic	0.42	Total polyunsaturated	40.93
Total monounsaturated	33.35		
Total			99.98

ที่มา: Reyes and Sepulveda (2006)

1. เทคโนโลยีในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล

Khan (2002) ได้แบ่งเทคโนโลยีในการผลิตไบโอดีเซลไว้ ดังนี้

1.1 การใช้โดยตรงกับเครื่องยนต์ดีเซลปิโตรเลียมและการผสมกับน้ำมันเชื้อเพลิง

ปิโตรเลียม (Directed use and Blending)

เครื่องยนต์ที่จะใช้ไบโอดีเซลโดยไม่ต้องผสมน้ำมันดีเซล ที่เรียกว่า B100 ต้องมีการดัดแปลงเครื่องยนต์ และอุปกรณ์ในระบบเชื้อเพลิงบางชนิดที่ต้องสัมผัสกับไบโอดีเซล เนื่องจากไบโอดีเซลมีคุณสมบัติในการทำละลาย จึงส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของชิ้นส่วนที่ทำมาจากธรรมชาติในเครื่องยนต์และระบบลำเลียงน้ำมัน (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2549)

การใช้ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์และรถยนต์ดีเซล Word-Wide Fuel Charter (WWFC) มีการยอมรับการใช้ในเครื่องยนต์รอบสูงที่ไม่ต้องดัดแปลงเครื่องยนต์ หรือชิ้นส่วนใดๆ โดยใช้ไบโอดีเซลผสมน้ำมันดีเซลในอัตราส่วนร้อยละ 5 หรือต่ำกว่า 5 โดยปริมาตร (B5) สำหรับการใช้งานทั่วไป ไบโอดีเซลที่นำมาผสมกับน้ำมันดีเซลต้องเป็นไบโอดีเซลที่มีคุณภาพตามมาตรฐาน EN 14214 และมาตรฐาน ASTM 6751 และเมื่อผสมเป็น B5 น้ำมันนั้นต้องมีคุณสมบัติตรงตามมาตรฐานน้ำมันดีเซลด้วย หากต้องการไบโอดีเซลในสัดส่วนการผสมสูงกว่าร้อยละ 5 หรือใช้โดยไม่ผสมน้ำมันดีเซลเลย จะต้องมีการดัดแปลงเครื่องยนต์และชิ้นส่วนประกอบรถยนต์ตามน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ เพื่อลดปัญหาที่อาจเกิดขึ้น (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2549)

1.2 กระบวนการไมโครอิมัลชัน (Microemulsion)

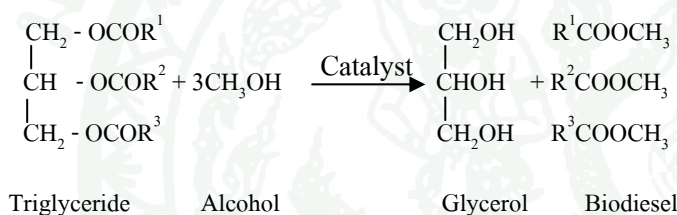
ไมโครอิมัลชันคือ คอลลอยด์ที่กระจายตัวอยู่ในภาวะสมดุลซึ่งเกิดจากการก่อรูปขึ้นเองจากของเหลวสองชนิดที่ไม่ละลายกัน เนื่องจากน้ำมันพืชบริสุทธิ์จะมีความหนืดสูงไมโครอิมัลชันจะช่วยลดปัญหาเกี่ยวกับความหนืดได้โดยการใช้ตัวทำละลาย เช่น แอลกอฮอล์ คุณสมบัติของน้ำมันที่ผ่านกระบวนการไมโครอิมัลชัน จะคล้ายคลึงกับน้ำมันดีเซล แต่พบปัญหาเกี่ยวกับการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (คุชฎี, 2549)

1.3 กระบวนการแตกตัวด้วยความร้อน (Pyrolysis)

ไพโรไลซิส (Pyrolysis) เป็นกระบวนการที่ใช้เปลี่ยนสารชนิดหนึ่งไปเป็นอีกชนิดหนึ่งโดยใช้ความร้อนหรือความร้อนรวมกับตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการนี้จะให้ความร้อนโดยไม่มีอากาศหรือแก๊สออกซิเจนและจะเกิดการแตกสลายของพันธะเคมีของสารทำให้เกิดสารเคมีที่มีขนาดเล็กโมเลกุลเล็กกลอง เคมีของการไพโรไลซิส (Pyrolytic chemistry) จะมุ่งเน้นในการพิจารณากลไกของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นเพราะว่ามีทิศทางปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแตกต่างกันรวมทั้งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาก็แตกต่างกันด้วยวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสสามารถใช้พวกน้ำมันพืช ไขมันสัตว์ กรดไขมันอิสระ และเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันอิสระ (Kumar, 2003)

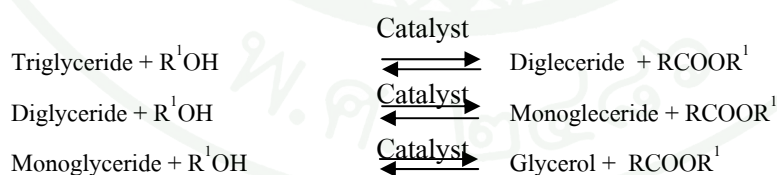
1.4 กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification)

กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาของไขมันกับแอลกอฮอล์ เพื่อเปลี่ยนรูปให้เป็นสารประกอบเอสเทอร์โดยมีผลพลอยได้คือกลีเซอรอล ปฏิกิริยาทั่วไปแสดงดังภาพที่ 9 และ 10 ปฏิกิริยาเป็นแบบย้อนกลับเริ่มจากไตรกลีเซอไรด์ ถูกเปลี่ยนเป็นไดกลีเซอไรด์ จากนั้นถูกเปลี่ยนต่อไปเป็นโมโนกลีเซอไรด์และถูกเปลี่ยนเป็นกลีเซอรอล ซึ่งในแต่ละขั้นตอนจะได้ เอสเทอร์ 1 โมเลกุล (Fukuda *et al.*, 2001) โดยกระบวนการนี้เป็นขั้นตอนการลดความหนืดของน้ำมันพืช ที่ไม่มีผลกระทบต่อค่าการให้ความร้อน (heating value) จึงทำให้ fuel atomization , combustion , emission characteristics มีค่าการใช้งานที่ดีกว่าน้ำมันพืชธรรมดา (Mustafa, 2006) และมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน แบ่งเป็น ตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมี (chemical catalyst) และตัวเร่งปฏิกิริยาทางชีวภาพ (enzymatic catalyst) (Fukuda *et al.*, 2001)



ภาพที่ 9 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

ที่มา: Meher *et al.* (2006)



ภาพที่ 10 ขั้นตอนย่อยของทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์

ที่มา: Meher *et al.* (2006)

1.4.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมี (chemical catalyst)

ก. กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้ เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ข้อดีคือเป็นเทคโนโลยีที่มีการลงทุนไม่สูงนัก เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ใช้ อุณหภูมิต่ำ และความดันต่ำกว่า 2 บรรยากาศ ผลได้ของปฏิกิริยาสูงถึง 98 เปอร์เซ็นต์ แต่ กระบวนการนี้ไม่เหมาะ กับวัตถุดิบที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระสูงเนื่องจากจะเกิดฟองสบู่และ ส่งผลให้ผลได้ (Yield) ของกระบวนการผลิตลดลง (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี แห่งชาติ, 2549)

Rashid *et al.* (2008) ได้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการผลิตเมทิลเอสเทอร์จาก เมล็ดทานตะวัน โดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน พบว่าใช้สัดส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเมล็ดทานตะวัน เป็น 6:1 โดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักเป็นตัวเร่ง ปฏิกิริยา พบว่าได้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เป็น 97.1 เปอร์เซ็นต์

Chung *et al.* (2009) ได้ทำการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันของปื๊ดที่ได้จากการย่างด้วย กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยศึกษาถึงชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสที่มีผลต่อร้อยละของ เมทิลเอสเทอร์ พบว่าการใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการทรานส์เอส เทอร์ฟิเคชันนั้น ได้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่ 97 เปอร์เซ็นต์ซึ่งสูงที่สุดเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ เป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมเมทิลเลท โดยสภาวะที่ใช้คืออัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6:1 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันทำปฏิกิริยาที่ 65 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 180 นาที

Schinas *et al.* (2009) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากเมล็ดฟักทองพบว่า มีปริมาณน้ำมันในเมล็ด ฟักทอง 42-45 เปอร์เซ็นต์จากน้ำหนักแห้ง ทำการสกัดน้ำมันดังกล่าวด้วยตัวทำละลายเฮกเซน จากนั้น นำน้ำมันเข้าสู่กระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้เบสเป็น ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6:1 ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 1 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักน้ำมันทำปฏิกิริยาที่ 65 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 นาทีพบว่าได้ร้อยละของ ผลิตไบโอดีเซล 97.5 เปอร์เซ็นต์

ทัศนีย์ (2550) ได้ทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมทางสถิติของการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าอัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6.9:1 และเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1.5เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ทำปฏิกิริยาที่ 45 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 90 นาที พบว่าได้เมทิลเอสเทอร์เป็น 97.9 เปอร์เซ็นต์

ข. กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ที่ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

สามารถใช้ได้กับวัตถุดิบทุกชนิดและค่ากรดไขมันอิสระทุกระดับ แต่ข้อด้อยคือใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานานและใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงกว่าการใช้เบสเป็นสารเร่งปฏิกิริยา จึงทำให้ต้นทุนการผลิตต่อหน่วยสูงกว่า (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2549)

Bhatti *et al.* (2008) ทำการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ไขมันของเนื้อไก่ และเนื้อแกะ ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยากรดและเบสในปฏิกิริยากระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันพบว่าการใช้กรดเป็นสารเร่งปฏิกิริยาได้ร้อยละของผลผลิตมากกว่าการใช้เบสเป็นสารเร่งปฏิกิริยา โดยปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละของผลผลิตคือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยา เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำมันต่อเมทานอลที่ 1:30 ในน้ำมันไก่พบว่าเมื่อใช้กรดซัลฟูริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมงให้ร้อยละของผลผลิตสูงสุดและในน้ำมันแกะพบว่าเมื่อใช้กรดซัลฟูริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมงให้ร้อยละของผลผลิตสูงสุด 99.01 ± 0.71 เปอร์เซ็นต์ และ 93.21 ± 5.07 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ให้ค่าร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่ 98.29 เปอร์เซ็นต์และ 97.25 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

Marchetti *et al.* (2008) พบว่าใช้กรดซัลฟูริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชันให้ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลที่สูง แต่ปฏิกิริยาดำเนินไปช้ามาก อาจใช้เวลาในการดำเนินปฏิกิริยามากกว่า 1 วัน จากการศึกษาของ Freedman and Pryde ที่ใช้กรดซัลฟูริก 1 เปอร์เซ็นต์โดยโมล อัตราส่วนของเมทานอลต่อน้ำมัน 30:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 50 ชั่วโมง ให้ร้อยละของผลผลิตไบโอดีเซล 99 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้แอลกอฮอล์ชนิดบิวทานอลใช้อุณหภูมิที่ 117 องศาเซลเซียสในการทำปฏิกิริยา และเมื่อใช้แอลกอฮอล์ชนิดเอทานอล

จะใช้อุณหภูมิที่ 78 องศาเซลเซียสในการทำปฏิกิริยา ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 และ 18 ชั่วโมง ตามลำดับ

ค. กระบวนการ 2 ขั้นตอน (Two-stage process)

ขั้นตอนที่ 1 เป็นปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน และขั้นตอนที่ 2 เป็นปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน เพื่อเป็นการแก้ปัญหาจุดด้อยของ 2 กระบวนการข้างต้น กล่าวคือ สามารถใช้ได้น้ำมันที่มีค่ากรดไขมันอิสระสูง ในขณะเดียวกันก็มีการใช้พลังงานต่ำ โดยหลักการ คือใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันก่อนเข้าสู่การใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ถึงแม้ว่ากระบวนการนี้จะใช้พลังงานต่ำกว่ากระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในขั้นตอนเดียว แต่หากใช้วัตถุดิบที่มีค่าความเป็นกรดสูงมากๆ จะส่งผลให้กระบวนการในขั้นตอนแรกจะใช้เวลามากขึ้น และส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตต่อหน่วยของไบโอดีเซลสูงขึ้นตามไปด้วย (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2549)

Naik *et al.* (2007) ทำการผลิตไบโอดีเซลจาก Karanja และราคาถูกในการผลิตไบโอดีเซลด้วยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นกรดและเบส โดยตัวอย่างน้ำมันมีปริมาณกรดไขมันอิสระมากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ ใช้กระบวนการ 2 ขั้นตอนคือใช้กรด และ เบส พบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือใช้กรดซัลฟูริก 0.5 เปอร์เซ็นต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันเป็น 6:1 ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เพื่อลดปริมาณกรดไขมันอิสระ และเข้าสู่กระบวนการ ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้เมทิลเอสเทอร์ 96.6–97.0 เปอร์เซ็นต์

Hamed *et al.* (2008) ทำการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปลาแซลมอน โดยพบว่าเมื่อใช้กระบวนการ 2 ขั้นตอน โดยใช้กระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อลดค่าความเป็นกรดให้ต่ำกว่า 3 มิลลิกรัม โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 8.95 ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 52 ± 2 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง จากนั้นจึงใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในขั้นตอนมา ที่อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมัน 4.7 ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 52 ± 2 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 0.5 ชั่วโมง ได้ร้อยละของผลผลิตไบโอดีเซลเป็น 97.6 ± 2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งได้ร้อยละของผลผลิตไบโอดีเซลที่มากกว่าเมื่อเทียบกับการใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเพียงขั้นตอนเดียวที่

อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมัน 10:3 ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 52 ± 2 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง ที่ได้ร้อยละของผลผลิตไบโอดีเซลเพียง 22 เปอร์เซ็นต์

Wang *et al.* (2006) ผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันที่ใช้แล้วในประเทศจีน ซึ่งน้ำมันที่ใช้มีค่าความเป็นกรดสูง 75.92 ± 0.04 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้กระบวนการ 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นกรดฟอสฟอริก 2 เปอร์เซ็นต์ในกระบวนการเอสเทอริฟิเคชัน และใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ในกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันพบว่าได้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ 97.22 เปอร์เซ็นต์ ใช้อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมัน 10:1 ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 4 ชั่วโมง อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 95 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับการใช้กรดซัลฟิวริก 4 เปอร์เซ็นต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเพียงขั้นตอนเดียวที่ให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมัน 20:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 ชั่วโมง อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 95 องศาเซลเซียส

Meng *et al.* (2007) ทำการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันที่ใช้แล้วซึ่งมีปริมาณกรดไขมันอิสระสูง จึงทำการลดปริมาณกรดไขมันอิสระด้วยการทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้ปริมาณกรดไขมันอิสระ < 1 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นจึงเข้าสู่กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันกับเมทานอล โดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อผลิตเป็นไบโอดีเซล พบว่าสภาวะในการทำปฏิกิริยาที่อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6:1 ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 1.0 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักทำปฏิกิริยาที่ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 90 นาที เมื่อนำมาทดสอบการใช้งานกับเครื่องยนต์พบว่าสามารถใช้งานกับเครื่องยนต์ดีเซลได้โดยไม่ต้องมีการปรับปรุงเครื่องยนต์ และเมื่อนำไปผสมกับน้ำมันดีเซลพบว่า B20 (ไบโอดีเซล น้ำมันดีเซล 80) สามารถลดคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), ไฮโดรคาร์บอน (HC) และ อนุภาคเล็ก (particles) ได้ 18.6 เปอร์เซ็นต์, 26.7 เปอร์เซ็นต์ และ 20.58 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

Canakci (2007) ศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชเหลือทิ้งของร้านอาหารและไขมันสัตว์ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่มีราคาถูก พบว่าวัตถุดิบดังกล่าวมีปริมาณของกรดไขมันอิสระสูง ซึ่งจะมีผลต่อปริมาณ อัลคิลเอสเทอร์ที่ได้เนื่องจากกรดไขมันทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสจะเกิดเป็นสบู่ขึ้นมา (soap) และสบู่ที่เกิดขึ้นจะไปส่งผลต่อการแยกชั้นของน้ำมันไบโอดีเซลออกจากชั้นกลีเซอริน จึงมีความจำเป็นที่ต้องทำการลดปริมาณกรดไขมันอิสระ

จากวัตถุดิบเหล่านี้โดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยให้กรดไขมันอิสระในวัตถุดิบทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิชั่นกับสารเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดเพื่อเพิ่มปริมาณเมทิลเอสเทอร์

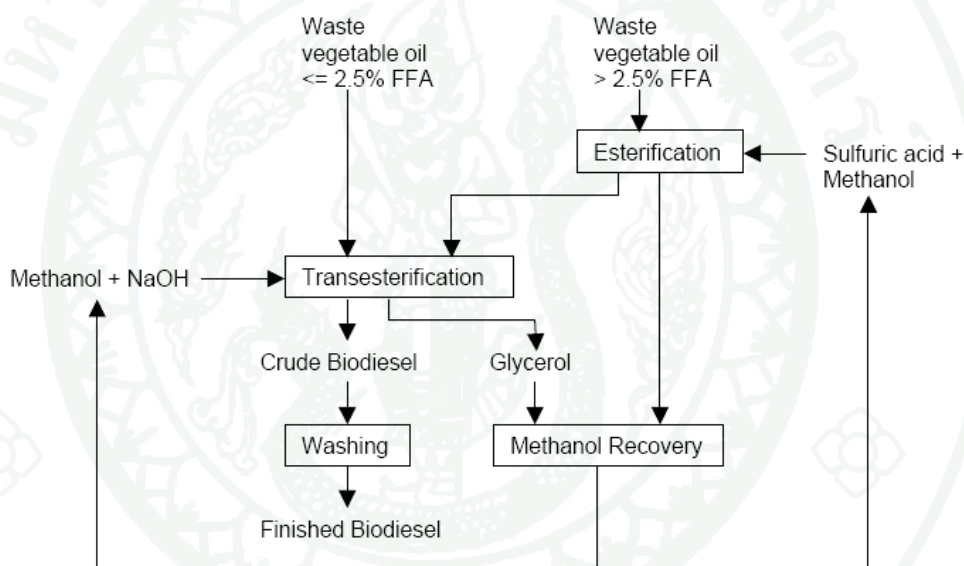
1.4.2 ผลิตโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในรูปแบบอื่นๆ

การใช้เอนไซม์ในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันถึงแม้ใช้เวลานานในการทำปฏิกิริยาแต่มีข้อได้เปรียบคือ ไม่ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่กำจัดยาก ไม่สิ้นเปลืองพลังงาน เพราะใช้อุณหภูมิต่ำในการทำปฏิกิริยา มีความจำเพาะต่อปฏิกิริยาสูง แต่มีต้นทุนในการผลิตสูงและไม่เสถียร ดุษฎี (2549) จึงทำการศึกษการตรึงไลเปสจาก *Pseudomonas fluorescens* เพื่อผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดทานตะวัน ด้วยการตรึงไลเปสบนไคโตซานและซีไลท์ พบว่าเอนไซม์ที่ถูกตรึงบนไคโตซานด้วยวิธีการดูดซับทางกายภาพ ให้กิจกรรมเอนไซม์สูงสุด จึงนำมาเป็นตัวเร่งในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน พบว่าใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันเมล็ดทานตะวันกับเมทานอล 1:3 ปริมาณเอนไซม์ที่ถูกตรึง 100 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักน้ำมัน มีน้ำในปฏิกิริยา 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักน้ำมัน ทำปฏิกิริยาที่ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง ได้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ 25 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อใช้เอนไซม์อิสระที่สภาวะเดียวกันพบว่าได้เมทิลเอสเทอร์ 33 เปอร์เซ็นต์

ชินนัต (2549) ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันทานตะวันโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตเป็นตัวกลาง โดยพบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความดัน 150 บาร์ เวลา 60 นาที อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันทานตะวันต่อเมทานอลที่ 1:42 โดยผสมเมทานอลและคาร์บอนไดออกไซด์ในปั๊มเพิ่มความดัน โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าปริมาณเมทิลเอสเทอร์สูงสุดที่ได้มีค่า 21.81 เปอร์เซ็นต์

ณัฐมณีน (2549) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากปาล์มเสตียรินโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิธีพ่นเพื่อแก้ปัญหาการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณร้อยละ 1 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ไบโอดีเซลได้สูงสุด ร้อยละ 75.29 และมีความบริสุทธิ์ร้อยละ 92.69 ที่ 60 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 30: 1 ความเร็วรอบในการกวน 300 รอบต่อนาที และปริมาณเตตระไฮโดรฟูแรนร้อยละ 10 พบว่าคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลและอยู่ในค่ามาตรฐานของกระทรวงพาณิชย์ ยกเว้นค่าความหนืดที่มีค่า $4.6 \text{ mm}^2/\text{s}$ ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ไม่เกิน $4.1 \text{ mm}^2/\text{s}$

สุภภัทร์ (2550) ศึกษาเปรียบเทียบการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้ขั้นตอนการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤตเป็นตัวกลางกับวิธีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าเมื่อเปรียบเทียบการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤตเป็นตัวกลาง กับการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบส และจากการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนนั้นพบว่าการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้กระบวนการให้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤตเป็นตัวกลางยังให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่น้อยกว่าการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบส และการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอน ทั้งนี้เนื่องจากการไม่ผสมกันของน้ำมันปาล์มและเมทานอลในเครื่องปฏิกรณ์ ถึงแม้ว่าได้ใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤตเข้าร่วมในการเกิดปฏิกิริยาแล้วก็ตาม



ภาพที่ 11 ขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

ที่มา: Waste management and research center (2008)

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (2549) ได้แบ่งปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณเอทิลเอสเทอร์ไว้คือ

- อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา
- ชนิดและความเข้มข้นของสารเร่งปฏิกิริยา
- การผสมสารตั้งต้น
- อัตราส่วนระหว่างน้ำมันและแอลกอฮอล์

- ความบริสุทธิ์ของสารตั้งต้น

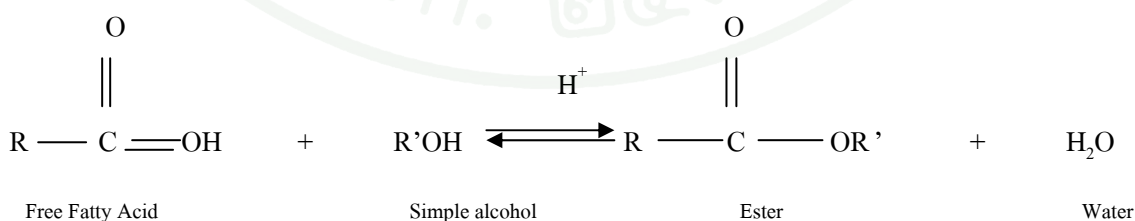
Gerpen (2005) กล่าวว่าสำหรับวัตถุดิบที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระมากเช่น น้ำมันจากการปรุงอาหารมีปริมาณกรดไขมันอิสระที่ 2-7 เปอร์เซ็นต์ น้ำมันจากสัตว์/ไขสัตว์ มีกรดไขมันอิสระ 5-30 เปอร์เซ็นต์หรือวัตถุดิบที่มีคุณภาพต่ำเช่น จากบ่อตกไขมันอาจมีกรดไขมันอิสระสูงถึง 100 เปอร์เซ็นต์และเมื่อใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยากรดไขมันอิสระเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับเบสเกิดเป็นสบู่และน้ำ ดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 ปฏิกิริยาการเกิดสบู่

ที่มา: Gerpen (2005)

จุดประสงค์ของการ Pretreat คือเพื่อลดปริมาณกรดไขมันอิสระ (Free fatty acid) ที่สูงในวัตถุดิบ แล้วจึงเข้าสู่กระบวนการทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชันต่อไป ในกรณีที่ปริมาณกรดไขมันอิสระที่มากถึง 5 เปอร์เซ็นต์นั้นยังสามารถทำให้ปฏิกิริยายังคงดำเนินไปได้ แต่ปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสอาจต้องใส่เพิ่มลงไปเนื่องจากส่วนหนึ่งไปทำปฏิกิริยากับกรดไขมันอิสระเกิดเป็นสบู่แต่สามารถกำจัดสบู่ออกไปได้ในขั้นตอนของการแยก กลีเซอรอล ในขั้นตอนการล้างด้วยน้ำ เมื่อกรดไขมันอิสระสูงกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ สบู่จะเป็นตัวขัดขวางในการแยกชั้นระหว่างเมทิลเอสเตอร์กับกลีเซอรอล และมีส่วนทำให้เกิดการผสมกันกับน้ำที่ใช้ล้าง ในกรณีนี้ การใช้สารเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด เช่น กรดซัลฟูริก จะเปลี่ยนกรดไขมันอิสระเป็นเอสเตอร์ได้ ดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 ปฏิกิริยาเอสเตอร์ฟิเคชัน

ที่มา: Khan (2002)

ในกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันนั้น แอลกอฮอล์ที่ใช้ในปฏิกิริยาต้องปราศจากน้ำและกรดไขมันอิสระ เนื่องจากจะทำให้ปฏิกิริยานั้นช้าลง พบว่าการมีน้ำเพียง 0.1 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้ปริมาณของเอสเทอร์ที่ได้้น้อยลง (Canakci, 2005 ; Romano, 1982 ; Freedman *et al.*, 1982 ; Canakci and Gerpen, 1999) และน้ำมันที่มีความชื้นมากกว่า 0.5 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้เอสเทอร์ที่ได้มีค่าน้อยกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ (Canakci and Gerpen, 2001a)

จากการศึกษาพบว่าในกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันนั้น การใช้วัตถุดิบที่มีกรดไขมันอิสระมากกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ นั้น ควรใช้ปฏิกิริยาที่ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนจึงตามด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบส อีกทั้งปริมาณของน้ำในไตรกลีเซอไรด์มีผลต่อปริมาณการผลิตมากกว่าปริมาณกรดไขมันอิสระ โดยเห็นได้ว่า เมื่อใช้น้ำมันที่ผ่านการทอดแล้วมีกรดไขมันอิสระ 4 เปอร์เซ็นต์ และทำการกำจัดน้ำออกไป พบว่า ร้อยละของเอสเทอร์ที่ได้เพิ่มจาก 86 เปอร์เซ็นต์เป็น 94 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อทำวิธีเดียวกันกับน้ำมันถั่วเหลืองพบว่าได้ร้อยละของเอสเทอร์ 97 (Çayli, 2007) และการผลิตไบโอดีเซลของ Titipong *et al.* (2006) โดยการใช้การผสมของเมทานอลและเอทานอลในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจากน้ำมันที่ใช้แล้วนั้น เนื่องจากน้ำมันที่ใช้ทดสอบนั้นผ่านการทอดมาแล้วทำให้มีน้ำปน 7.3 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักต่อน้ำหนัก จึงต้องทำการกำจัดน้ำออกโดยใช้ซิลิกาเจลปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวกำจัดน้ำออกและกรองซิลิกาเจลที่ดูดซับน้ำไว้แล้วออกด้วยกระดาษกรอง ก่อนเริ่มปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อไม่ให้ส่งผลต่อปริมาณร้อยละของเอสเทอร์ที่ได้

2. ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

2.1 ผลของความชื้นและกรดไขมันอิสระ

สำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส (NaOH, KOH, คาร์โบเนต เป็นต้น) กลีเซอไรด์และแอลกอฮอล์ที่ใช้ต้องไม่มีน้ำเป็นส่วนผสม เพราะน้ำจะทำให้เกิดสบู่ในระหว่างการปฏิกิริยา อีกทั้งสบู่ที่เกิดขึ้นจะไปลดประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา และทำให้ค่าความหนืดของไบโอดีเซลสูงขึ้น ทำให้น้ำมันมีลักษณะเป็นเจล ยากต่อการแยกไบโอดีเซลออกจากกลีเซอรอล

Kusdiana and Saka (2004) ทำการศึกษาเปรียบเทียบร้อยละของผลผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันด้วยเมทานอล ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเปรียบเทียบกับการใช้กรดซัลฟุริก 3 เปอร์เซ็นต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและปฏิกิริยาแบบ

การใช้สภาวะเหนือจุดวิกฤต พบว่าในการใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงไปเป็นไบโอดีเซลลดลงเมื่อปริมาณน้ำในตัวอย่งน้ำมันเพิ่มขึ้น และในการใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้นพบว่าปริมาณน้ำเพียง 0.1 เปอร์เซ็นต์ทำให้ร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลลดลง โดยปริมาณน้ำ 5 เปอร์เซ็นต์ในน้ำมันส่งผลให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ลดลง 6 เปอร์เซ็นต์ และในการผลิตไบโอดีเซลแบบการใช้สภาวะเหนือจุดวิกฤต ปริมาณน้ำไม่มีผลกระทบต่อร้อยละผลผลิตไบโอดีเซล

ปัจจัยที่ทำให้เกิดสบู่ นอกจากน้ำแล้ว ยังมีกรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid) ที่จะทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส ดังนั้นในการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน น้ำมันวัตถุดิบที่ใช้ควรมีค่าความเป็นกรดไม่เกิน 4 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เพราะปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันวัตถุดิบที่มากเกินไปจะทำให้ได้ปริมาณไบโอดีเซลน้อยลง (Ramadhas *et al.*, 2005)

สำหรับน้ำมันวัตถุดิบที่ค่าความเป็นกรดมากกว่า 4 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ต้องนำน้ำมันนั้นมาลดค่าความเป็นกรดด้วยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันโดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วจึงนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาต่อ (Ramadhas *et al.*, 2005)

2.2 ผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน

Agarwal (2007) กล่าวว่า อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันมีผลต่อการผลิตไบโอดีเซล ตามสมการการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันนั้นใช้อัตราส่วนของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันที่ 3:1 แต่เนื่องจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน เป็นปฏิกิริยาแบบผันกลับ แอลกอฮอล์ที่ใช้ในปฏิกิริยาจึงต้องมีปริมาณมากพอที่จะทำให้ปฏิกิริยาเกิดไปทางขวามากขึ้น ซึ่งจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์มากขึ้น ดังนั้นถ้าใช้อัตราส่วนมากขึ้นจะทำให้ได้เอสเทอร์ (ไบโอดีเซล) มากขึ้น และระยะเวลาสั้นลงด้วย โดยอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน 6:1 เป็นค่าที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม พบว่าได้ปริมาณเอสเทอร์มากกว่า 98 เปอร์เซ็นต์

2.3 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถแบ่งออกได้เป็น เบส กรด เอนไซม์ กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันที่ใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะเกิดเร็วกว่าเมื่อใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แต่กลีเซอรอล

ที่มีกรดไขมันอิสระมากและมีน้ำผสมอยู่ด้วย การใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะเหมาะสมกว่า (Ma and Hanna, 1999) โดยในตารางที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด กรด เบส เอนไซม์

Agarwal (2007) กล่าวว่าโซเดียมอัลคอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด และการใช้โซเดียมเมทอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพดีกว่าการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ แต่โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีราคาถูก และนิยมใช้ในระดับอุตสาหกรรม พบว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบสที่ความเข้มข้น 0.5-1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันพืชเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้ได้ร้อยละของผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซล (Yield) 94-99 เปอร์เซ็นต์ และการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ได้ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น แต่กลับเพิ่มค่าใช้จ่ายในการล้างเอาตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์

ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบข้อแตกต่างระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส กรด เอนไซม์

ตัวแปร	ตัวเร่งชนิดเบส	ตัวเร่งชนิดกรด	เอนไซม์ไลเปส
อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)	60-70	55-80	30-40
กรดไขมันอิสระในน้ำมัน	เกิดสบู่	เกิดเอสเทอร์	เกิดเอสเทอร์
น้ำในน้ำมัน	มีผลกระทบต่อการเกิดปฏิกิริยา	มีผลกระทบต่อการเกิดปฏิกิริยา	ไม่มีผลกระทบต่อการเกิดปฏิกิริยา
ปริมาณผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์	ปกติ	ปกติ	สูง
การ Recovery			
กลีเซอรอล	ยาก	ยาก	ง่าย
การทำให้เมทิลเอสเทอร์บริสุทธิ์	ทำการล้างซ้ำ	ทำการล้างซ้ำ	ไม่ต้องล้าง
ราคา	ถูก	ถูก	ค่อนข้างแพง

ที่มา: Marchetti *et al.* (2005)

2.4 ผลของเวลาและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา

Meher *et al.*, (2006) พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะแปรผันโดยตรงกับเวลา คือถ้าเวลาในการทำปฏิกิริยามากขึ้น จะทำให้ได้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์(%FAME) มากขึ้น

Leunge and Guo (2006) ทำการศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยน้ำมันคาโนลาและน้ำมันที่ผ่านการใช้ทอดแล้ว พบว่าการเกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์นั้นไม่เพียงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาแต่รวมถึงความเร็วในการกวนผสมและเวลาในการทำปฏิกิริยาดำเนินการ โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและความเร็วในการกวนผสม ระยะเวลาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาที่ 70 องศาเซลเซียส อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันที่ 7.5:1 และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.0 เปอร์เซ็นต์และ 1.1 เปอร์เซ็นต์ สำหรับน้ำมันคาโนลาและน้ำมันที่ผ่านการใช้ทอดแล้ว ตามลำดับ พบว่าในน้ำมันคาโนลานั้นเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันที่ 15 นาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาเกิดขึ้นสมบูรณ์ไม่มีไตรกลีเซอไรด์เหลือในน้ำมันเหลือเพียงโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และกรดไขมันอิสระเล็กน้อย เมื่อทำการทดสอบด้วย Thin Layer Chromatography (TLC) และในน้ำมันที่ผ่านการใช้ทอดแล้วนั้น ปฏิกิริยาเกิดขึ้นรวดเร็วในช่วงแรก การเปลี่ยนแปลงเป็นเอสเทอร์ที่ 90 เปอร์เซ็นต์ภายใน 5 นาทีแรก หลังจากนั้นปฏิกิริยาดำเนินช้าลงจนเข้าสู่ภาวะสมดุล ปฏิกิริยาเข้าสู่สภาวะสูงสุดที่ 15 นาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส และเมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาต่อจนถึง 30 นาที ร้อยละการผลิตของไบโอดีเซลที่ได้คือ 87.5 เปอร์เซ็นต์ และ 85.3 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เนื่องจากระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่นานจะเพิ่มปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเอสเทอร์และเร่งปฏิกิริยาการเกิดสบู่ทำให้ร้อยละของผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้ลดลง ดังนั้นเวลาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันที่ใช้ทอดแล้วคือเวลาในการทำปฏิกิริยา 15 นาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส

Ramadhass *et al.* (2005) ทำการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดยางพาราที่มีกรดไขมันอิสระสูง 17 เปอร์เซ็นต์ จึงเหมาะกับการกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบสองขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกเป็นปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันด้วยกรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจนกรดไขมันอิสระในน้ำมันมีค่าน้อยกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันด้วยเบส พบว่าอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้อง ทำให้เปอร์เซ็นต์การแปลงผันเป็นเอสเทอร์มีค่าต่ำมาก (ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเป็นเอสเทอร์จะ

เกิดในอัตราที่เร็วกว่า โดยพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 45 ± 5 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิที่สูงกว่านี้จะมีโอกาสทำให้สูญเสียเมทานอลและผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีสีเข้มขึ้น รวมทั้งเพิ่มต้นทุนในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลให้มากขึ้นด้วย

Agarwal (2007) พบว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลกระทบต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน แต่อย่างไรก็ตามถ้าเพิ่มเวลาให้เพียงพอในการทำปฏิกิริยา ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นสมบูรณ์ภายใต้การทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้อง แต่อุณหภูมิที่ในทั่วไปจะใช้ที่อุณหภูมิใกล้เคียงเดือดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ เช่น ถ้าใช้เมทานอล อุณหภูมิที่ใช้คือ 60-70 องศาเซลเซียสที่ความดันบรรยากาศ(โดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา)

Patil and Deng (2009) ทำการศึกษาอุณหภูมิที่มีผลต่อร้อยละของผลผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ใช้ karanja oil ศึกษาที่อุณหภูมิ 40-80 องศาเซลเซียส, *J. curcas* oil ศึกษาที่อุณหภูมิ 40-100 องศาเซลเซียส ส่วนใน canola oil และ corn oil ศึกษาที่อุณหภูมิ 40-120 องศาเซลเซียส พบว่าร้อยละของผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุดที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และร้อยละของผลผลิตไบโอดีเซลจะลดลงเมื่ออุณหภูมิมากกว่า 60 องศาเซลเซียส ควรหลีกเลี่ยงการทำปฏิกิริยาที่สูงกว่า 60 องศาเซลเซียส เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงจะเร่งให้เกิดสบู่ และเร่งให้เกิดการระเหยของเมทานอล ส่วนใน corn oil พบว่าร้อยละของผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุดที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

2.5 ผลของอัตราการกวนผสม

การกวนผสมเป็นปัจจัยสำคัญในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน เพราะน้ำมันหรือไขมันที่นำมาผลิตนั้นไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน ดังนั้นจึงต้องมีการกวนผสมให้เนื้อสารสัมผัสกัน จึงจะเกิดผลผลิตเป็นไบโอดีเซล (Meher *et al.*, 2006)

ตารางที่ 9 คุณภาพไบโอดีเซลที่มีผลต่อเครื่องยนต์

ข้อกำหนด	คุณภาพไบโอดีเซลที่มีผลต่อเครื่องยนต์
1. ปริมาณเมทิลเอสเทอร์	ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ แสดงถึงความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซล และการเกิดปฏิกิริยาการผลิตไบโอดีเซลที่สมบูรณ์ มาตรฐานกำหนดให้มีปริมาณมากกว่าร้อยละ 96.5 โดยน้ำหนัก เมื่อปริมาณเอสเทอร์น้อยกว่าที่กำหนดซึ่งบอกถึงยังมีโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ หรือไตรกลีเซอไรด์อยู่ในไบโอดีเซลในปริมาณสูงกว่าที่กำหนด ส่งผลให้ความหนืดของไบโอดีเซลมีค่าสูง และเกี่ยวเนื่องกับการอุดตันในหัวฉีด หรือกระบอกสูบของเครื่องยนต์
2. ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส	ความหนาแน่นเป็นตัวแปรสำคัญในการออกแบบระบบหัวฉีดจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล ค่าความหนาแน่นเป็นตัวบ่งบอกถึงปริมาณของพลังงานเชื้อเพลิง เมื่อค่าความหนาแน่นมีค่ามากจะทำให้พลังงานความร้อนมากขึ้นตามไปด้วยเมื่อเทียบกับปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงในปริมาณเดียวกัน น้ำมันไบโอดีเซลมีความหนาแน่นมากกว่ามากกว่าน้ำมันดีเซล แต่ค่าปริมาณพลังงานโดยรวมของน้ำมันไบโอดีเซลมีค่าต่ำกว่า ความหนาแน่นของไบโอดีเซลจากวัตถุดิบน้ำมันพืชแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกัน นอกจากนี้ปริมาณเมทานอลที่ตกค้างในไบโอดีเซลยังเป็นสาเหตุให้ความหนาแน่นมีค่าต่ำอีกด้วย
3. ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส	ความหนืดเกี่ยวข้องกับการไหล การฉีดเป็นฝอยของหัวฉีด ในห้องเผาไหม้การฉีดเป็นฝอยขนาดเล็กจะทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ ความหนืดของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันพืชที่ใช้เป็นวัตถุดิบ อีกทั้งความหนืดยังเป็นดัชนีแสดงการเสื่อมสภาพของไบโอดีเซลเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันอีกทางหนึ่ง
4. จุกวาวไฟ	จุกวาวไฟเป็นค่าอุณหภูมิต่ำสุดเมื่อเปลวไฟผ่านเหนือไอของน้ำมัน แล้วทำให้น้ำมันติดไฟ ปริมาณเมทานอลที่เหลือในไบโอดีเซลทำให้จุกวาวไฟมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานได้ จุกวาวไฟมีผลต่อการขนส่ง เคลื่อนย้าย และการจัดเก็บ ปริมาณเมทานอลที่เหลืออยู่ในไบโอดีเซลในปริมาณมากกว่า 0.2 เปอร์เซ็นต์ส่งผลให้จุกวาวไฟมีค่าต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 9 (ต่อ)

ข้อกำหนด	คุณภาพไบโอดีเซลที่มีผลต่อเครื่องยนต์
5. กำมะถัน	ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงที่มีปริมาณกำมะถันต่ำ เนื่องจากน้ำมันพืชดิบที่ใช้ในการผลิตมักมีองค์ประกอบของกำมะถันต่ำกว่า 15 ส่วนในล้านส่วน องค์ประกอบกำมะถันในน้ำมัน เมื่อถูกเผาไหม้จะเปลี่ยนเป็นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งถูกปล่อยออกมาพร้อมไอเสียจากเครื่องยนต์และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม
6. คากดำ	ปริมาณคากดำมีความสัมพันธ์กับปริมาณกลีเซอไรด์ กรดไขมันอิสระ สบู่ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่หลงเหลือในไบโอดีเซล หากมีปริมาณคากดำสูงกว่าในข้อกำหนดซึ่งบอกถึงยังคงมีสารต่างๆ ที่กล่าวถึงข้างต้นหลงเหลือในไบโอดีเซล นอกจากนั้นแสดงถึงแนวโน้มของปริมาณคากดำที่เหลืออยู่หลังจากการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ มีผลต่อการอุดตันในหัวฉีดหรือที่ลูกสูบ ทำให้กำลังของเครื่องลดลง เครื่องยนต์สกปรก และต้องเปลี่ยนถ่ายน้ำมันเครื่องบ่อยครั้ง
7. เถ้าขี้เถ้า	เถ้าขี้เถ้าเกิดจากการเผาไหม้ของสารปนเปื้อนในไบโอดีเซล เนื่องมาจากการตกค้างของสบู่และตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณเถ้าขี้เถ้ามีผลต่อการอุดตันในเครื่องยนต์
8. น้ำ	ปริมาณในน้ำมันทำให้การเผาไหม้ไม่ดี นอกจากนั้นน้ำในไบโอดีเซลยังเป็นสาเหตุให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลติกระหว่างน้ำกับเอสเทอร์ เกิดเป็นกรดไขมันอิสระ ซึ่งส่งผลกระทบต่อการกัดกร่อนในเครื่องยนต์ และเป็นตัวเร่งให้เกิดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในถังเก็บน้ำมัน ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้หัวฉีดอุดตัน
9. สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด	สารปนเปื้อนในน้ำมันไบโอดีเซลส่วนใหญ่เป็นผลมาจากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันและปฏิกิริยาข้างเคียง เช่น ปฏิกิริยาการเกิดสบู่ของกรดไขมันอิสระและตัวเร่งปฏิกิริยาเบส ตัวเร่งปฏิกิริยาและสารที่ไม่สะปอนิฟาย ได้แก่ ไขมันที่ไม่อยู่ในรูปของกลีเซอไรด์, กรดไขมันอิสระ, สารประกอบไฮโดรคาร์บอน, แอลกอฮอล์อย่างแข็ง, triterpene alcohol, สารประกอบแคโรทีน วิตามินและอื่นๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัตถุดิบน้ำมันพืชเริ่มต้น

ตารางที่ 9 (ต่อ)

ข้อกำหนด	คุณภาพไบโอดีเซลที่มีผลต่อเครื่องยนต์
	โดยทั่วไปสิ่งปนเปื้อนทั้งหมดจะถูกกำจัดออกจากไบโอดีเซลในขั้นตอนการล้างน้ำ สิ่งปนเปื้อนในไบโอดีเซลมีผลเสียต่อเครื่องยนต์หลายด้าน เช่น คุณสมบัติด้านความเสถียรของไบโอดีเซลระหว่างการเก็บรักษา เมื่อสารประกอบของสารที่ไม่ระเหยในฟาย เปลี่ยนสภาพกลายเป็นสารที่มีผลในการลดคุณสมบัติด้านความเสถียรของไบโอดีเซล
10. การกัดกร่อนแผ่นทองแดง	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง แสดงการกัดกร่อนของน้ำมันต่อโลหะที่ใช้เป็นชิ้นส่วนในเครื่องยนต์ดีเซล เนื่องจากปริมาณกรด เช่น กรดไขมันอิสระ และสารประกอบซัลเฟอร์ในน้ำมัน ซึ่งค่าการกัดกร่อนนี้มีผลต่อการทำงานของเครื่องยนต์
11. ค่าของกรด	แสดงความเป็นกรดในน้ำมันไบโอดีเซล เป็นผลมาจากปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันวัตถุดิบและปริมาณกรดที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งมีผลต่อการกัดกร่อนในเครื่องยนต์ ทำให้อายุการใช้งานของปั๊มและไส้กรองของน้ำมันลดลง นอกจากนี้ยังแสดงถึงการเสื่อมสภาพของน้ำมัน เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลติกจากปริมาณน้ำที่ปนอยู่ในน้ำมันและผลของสภาวะในการจัดเก็บ
12. กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์	แสดงถึงพันธะคู่หรือความไม่อิ่มตัวของน้ำในไบโอดีเซล ซึ่งมีแนวโน้มทำให้เกิดพอลิเมอร์ในเครื่องยนต์ ทำให้เกิดการอุดตัน และการเสื่อมสภาพของน้ำมันเครื่อง ปริมาณกรดไขมันลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์ ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันพืชที่เลือกมาใช้เป็นวัตถุดิบ
13. เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส	การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติจากปฏิกิริยาออกซิเดชันเนื่องจากการเกิดสารประเภทเพอร์ออกไซด์ (peroxide linkage) ขึ้นระหว่างพันธะคู่ของกรดไขมันไม่อิ่มตัว ที่อยู่ในโครงสร้างของไบโอดีเซล ปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดเมื่อน้ำมันสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศโดยที่ความร้อนและแสงแดดมีผลช่วยเร่งปฏิกิริยา ในขณะที่โลหะ เช่น ทองแดงและตะกั่ว เป็นตัวเร่งให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วขึ้น ผลของปฏิกิริยาทำให้เกิดสารพอลิเมอร์ (oxidation polymerization) และเกิดของแข็งที่ไม่ละลายในไบโอดีเซล

ตารางที่ 9 (ต่อ)

ข้อกำหนด	คุณภาพไบโอดีเซลที่มีผลต่อเครื่องยนต์
	เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน นอกจากจะขึ้นกับประเภทคุณสมบัติของน้ำมันพืชที่ใช้เป็นวัตถุดิบแล้ว ยังขึ้นกับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลอีกด้วย โดยกระบวนการผลิตที่มีการให้ความร้อนสูง แก่ไบโอดีเซลเป็นระยะเวลานาน อาจส่งผลให้เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน
14. ค่าไอโอดีน	ค่าไอโอดีนแสดงถึงพันธะคู่ในน้ำมัน ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของน้ำมันพืชที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล ค่าไอโอดีนต่ำแสดงถึงการมีสัดส่วนกรดไขมันอิ่มตัวในโครงสร้างไบโอดีเซลสูง ทำให้ไม่มีแนวโน้มในการออกซิเดชัน นอกจากนี้ค่าไอโอดีนยังมีความสัมพันธ์กับจุดขุ่น ซึ่งแสดงถึงอุณหภูมิที่น้ำมันเริ่มเกิดไข หรือจับตัวเป็นก้อนแข็ง ไบโอดีเซลที่มีค่าไอโอดีนต่ำจะมีจุดขุ่นสูง ซึ่งมีผลต่อการใช้งานสภาพอากาศเย็น ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบมีค่าไอโอดีน 50-55
15. เมทานอล	เมทานอลเป็นสารตั้งต้นที่เหลือจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งจำเป็นต้องกำจัดออกให้หมดก่อนนำไบโอดีเซลออกจำหน่าย จึงต้องมีปริมาณต่ำในไบโอดีเซล จุดวาบไฟของไบโอดีเซลคือ 130 องศาเซลเซียส เมทานอลมีจุดวาบไฟต่ำ ถ้ามีเมทานอลปนในไบโอดีเซล ไบโอดีเซลที่ได้จะมีค่าจุดวาบไฟต่ำลงด้วย ซึ่งมีผลต่อความปลอดภัยในการเก็บรักษา การขนส่งและการนำมาใช้ในเครื่องยนต์ เมทานอลที่มีค่าความเข้มข้นมากกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ จะมีผลกระทบต่อค่าซีเทนและความหล่อลื่นของน้ำมัน
16. โมโนกลีเซอไรด์, ไดกลีเซอไรด์และไตรกลีเซอไรด์	ปริมาณโมโนกลีเซอไรด์, ไดกลีเซอไรด์และไตรกลีเซอไรด์แสดงถึงความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซล ปริมาณโมโนกลีเซอไรด์, ไดกลีเซอไรด์และไตรกลีเซอไรด์ที่เหลือจากการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันที่ไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้เกิดการอุดตันบริเวณหัวฉีด กระบอกสูบ และวาล์วภายในเครื่องยนต์

ตารางที่ 9 (ต่อ)

ข้อกำหนด	คุณภาพไบโอดีเซลที่มีผลต่อเครื่องยนต์
17. กลีเซอรินอิสระ	ปริมาณกลีเซอรินที่เหลืออยู่ในไบโอดีเซล เนื่องมาจากการแยกกลีเซอรินไม่สมบูรณ์ ทำให้ปัญหาการแยกชั้นของกลีเซอรินในการจัดเก็บไบโอดีเซล รวมถึงการสะสมที่บริเวณด้านล่างของถังน้ำมัน
18. กลีเซอรินทั้งหมด	กลีเซอรินทั้งหมดคือปริมาณของกลีเซอรินอิสระ และปริมาณกลีเซอรินในโมเลกุลโมโนกลีเซอไรด์, ไดกลีเซอไรด์และไตรกลีเซอไรด์ที่เจือปนในองค์ประกอบไบโอดีเซล ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันไม่สมบูรณ์ มีผลก่อให้เกิดการอุดตันที่บริเวณหัวฉีดและไส้กรอง และปัญหาการใช้งานในสภาพอากาศเย็น
19. โลหะกลุ่ม 1 (โซเดียมและโพแทสเซียม) โลหะกลุ่ม 2 (แคลเซียมและแมกนีเซียม)	เป็นการวัดปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส สบู่ และโลหะหนักจากน้ำที่ใช้ในขั้นตอนการล้างไบโอดีเซล ที่ยังหลงเหลือในผลิตภัณฑ์ อีกทั้งแคลเซียมยังมีคุณสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีสำหรับกระบวนการพอลิเมอไรซ์ของเอสเทอร์อีกด้วย
20. ฟอสฟอรัส	ฟอสฟอรัสเป็นสารที่ปนเปื้อนอยู่ในวัตถุดิบน้ำมันพืชตั้งแต่เริ่มต้น หากไม่ทำการกำจัดออกจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล จะทำให้ไบโอดีเซลที่ผลิตได้มีฟอสฟอรัสปนอยู่ ซึ่งจะทำความเสียหายให้กับอุปกรณ์กะตะไลติกส์ คอนเวอร์เตอร์ (Catalytic converter) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมการแพร่มลพิษ จากการที่มาตรฐานของการแพร่มลพิษเป็นกฎข้อบังคับมากขึ้น อุปกรณ์ดังกล่าวจึงเป็นอุปกรณ์สำคัญในเครื่องยนต์

ที่มา: สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (2549)

ตารางที่ 10 การกำหนดลักษณะและคุณภาพของของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอร์
ของกรมฯ พ.ศ. 2552

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงต่ำ	วิธีทดสอบ 1/
1	เมทิลเอสเตอร์ ร้อยละโดยน้ำหนัก (Methyl Ester, % wt.)	ไม่ต่ำกว่า 96.5	EN 14103
2	ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 °ซ กิโลกรัม/ ลูกบาศก์เมตร (Density at 15 °C, kg/m 3)	ไม่ต่ำกว่า 860-900 และ ไม่สูงกว่า	ASTM D 1298
3	ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 °ซ เซนติสโตกส์ (Viscosity at 40 °C, cSt)	ไม่ต่ำกว่า 3.5 -5.0 และ ไม่สูงกว่า	ASTMD 445
4	จุดวาบไฟ องศาเซลเซียส (Flash Point, °C)	ไม่ต่ำกว่า 120	ASTM D 93
5	กำมะถัน ร้อยละโดยน้ำหนัก (Sulphur, %wt.)	ไม่สูงกว่า 0.0010	ASTMD 2622
6	กากถ่าน ร้อยละโดยน้ำหนัก (ร้อยละ 10 ของกากที่เหลือจากการกลั่น) (Carbon Residue , on 10 % distillation residue, %wt)	ไม่สูงกว่า 0.30	ASTMD 4530
7	จำนวนซีเทน (Cetane Number)	ไม่ต่ำกว่า 51	ASTMD 613
8	เถ้าซัลเฟต ร้อยละโดยน้ำหนัก (Sulphated Ash, %wt.)	ไม่สูงกว่า 0.02	ASTMD 874
9	น้ำ ร้อยละโดยน้ำหนัก (Water, wt.)	ไม่สูงกว่า 0.050	EN ISO 12937
10	สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด ร้อยละโดยน้ำหนัก (Total Contaminate, %wt.)	ไม่สูงกว่า 0.0024	EN 12662

ตารางที่ 10 (ต่อ)

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงต่ำ	วิธีทดสอบ 1/
11	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (Copper Strip Corrosion)	ไม่สูงกว่า	หมายเลข1 ASTMD130
12	เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยา ชั่วโมง ออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส (Oxidation Stability at 100 °C, hours)	ไม่ต่ำกว่า	10 EN 14112
13	ค่าความเป็นกรด มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัม (Acid Value , mg KOH/g)	ไม่สูงกว่า	0.50 ASTMD664
14	ค่าไอโอดีน กรัมไอโอดีน/100 กรัม (Iodine Value , g Iodine / 100 g))	ไม่สูงกว่า	120 EN 14111
15	กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์ ร้อยละโดยน้ำหนัก (Linolenic Acid Methyl Ester , %wt.)	ไม่สูงกว่า	12.0 EN 14103
16	เมทานอล ร้อยละโดยน้ำหนัก (Methanol, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.20 EN 14110
17	โมโนกลีเซอไรด์ ร้อยละโดยน้ำหนัก (Monoglyceride %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.80 EN 14105
18	ไดกลีเซอไรด์ ร้อยละโดยน้ำหนัก (Diglyceride , %wt)	ไม่สูงกว่า	0.20 EN 14105
19	ไตรกลีเซอไรด์ ร้อยละโดยน้ำหนัก (Triglyceride , %wt)	ไม่สูงกว่า	0.20 EN 14105
20	กลีเซอรินอิสระ ร้อยละโดยน้ำหนัก (Free glycerin , %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.02 EN 14105

ตารางที่ 10 (ต่อ)

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงต่ำ	วิธีทดสอบ 1/
21	กลีเซอรินทั้งหมด ร้อยละ โดยน้ำหนัก (Total glycerin, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.25 EN 14105
22	โลหะกลุ่ม 1 (โซเดียมและโปแตสเซียม) มิลลิกรัม/กิโลกรัม (Group I metals (Na+K), mg/kg)	ไม่สูงกว่า	5.0 EN 14108 และ EN 14109
	โลหะกลุ่ม 2 (แคลเซียมและแมกนีเซียม) มิลลิกรัม/กิโลกรัม (Group II metals (Ca+Mg), mg/kg)	ไม่สูงกว่า	5.0 pr EN 14538
23	ฟอสฟอรัส ร้อยละ โดยน้ำหนัก (Phosphorus, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.0010 ASTM D4951
24	สารเติมแต่ง (ถ้ามี) (Additive)	ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบจากอธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน	

หมายเหตุ 1/ วิธีทดสอบอาจใช้วิธีอื่นที่เทียบเท่าได้ แต่ในกรณีที่มีข้อโต้แย้ง ให้ใช้วิธีที่กำหนดในรายละเอียดแนบท้ายนี้

ที่มา: ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน.ราชกิจจานุเบกษา (2552)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. การวิเคราะห์ปริมาณไขมันและน้ำมัน (Grease and Oil)

1.1 ในน้ำตัวอย่าง

- 1.1.1 เครื่องมือที่ใช้สำหรับสกัด (soxhlet)
- 1.1.2 เครื่องดูดสุญญากาศ
- 1.1.3 buchner funnel เส้นผ่านศูนย์กลาง 12 เซนติเมตร
- 1.1.4 อ่างไอน้ำที่สามารถให้อุณหภูมิคงที่ที่ 85 องศาเซลเซียส
- 1.1.5 ขวดสกัด (extraction flask) ขนาด 125 มิลลิลิตร
- 1.1.6 เครื่องชั่งอย่างละเอียด
- 1.1.7 ตู้อบ
- 1.1.8 อ่างน้ำแข็ง
- 1.1.9 glass beads
- 1.1.10 เดซิเคเตอร์
- 1.1.11 electric heating mantle

1.2 ในเศษกากตะกอนจากถัง Dissolved-Air Flotation

- 1.2.1 เครื่องมือที่ใช้สำหรับสกัด (soxhlet)
- 1.2.2 เครื่องดูดสุญญากาศ
- 1.2.3 buchner funnel เส้นผ่านศูนย์กลาง 12 เซนติเมตร
- 1.2.4 อ่างไอน้ำที่สามารถให้อุณหภูมิคงที่ที่ 85 องศาเซลเซียส
- 1.2.5 ขวดสกัด (extraction flask) ขนาด 125 มิลลิลิตร
- 1.2.6 เครื่องชั่งอย่างละเอียด
- 1.2.7 ตู้อบ
- 1.2.8 อ่างน้ำแข็ง
- 1.2.9 glass beads
- 1.2.10 เดซิเคเตอร์
- 1.2.11 electric heating mantle

1.2.12 บีกเกอร์ขนาด 150 มิลลิลิตร

1.2.13 ครกพร้อมลูกบด (Mortar with pestle) ทำด้วย porcelain

1.2.14 สำลีที่ปราศจากกริสและน้ำมัน (ให้สะกิดด้วยตัวทำละลายก่อน)

2. การเตรียมน้ำมันปลาแชลมอนจากบ่อดักไขมัน

2.1 เครื่องปั่นเหวี่ยง

2.2 ฝามัสลิน

2.3 เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง (ยี่ห้อ DENVER INSTRUMENT APX-1502)

2.4 ตู้อบให้ความร้อน

2.5 ถ้วยกระเบื้อง

2.6 กรวยแยก ขนาด 500 มิลลิลิตร (ยี่ห้อ Pyrex)

3. การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน

3.1 เครื่องกวนแม่เหล็กและให้ความร้อน (ยี่ห้อ Cole-Parmer Cat No: 03407-15)

3.2 กระดาษกรองเบอร์ 4 (บริษัท Whatman)

3.3 แท่งกวนแม่เหล็ก (Magnetic bar)

3.4 เทอร์โมมิเตอร์ ช่วงอุณหภูมิ 0-100 องศาเซลเซียส (ยี่ห้อ SK)

3.5 แผ่นฟิล์ม ปิดบีกเกอร์และอุปกรณ์เครื่องแก้ว (ยี่ห้อ PARAFILM)

3.6 พีเอชมิเตอร์ (ยี่ห้อ DENVER INSTRUMENT Model 215)

3.7 ชุดเครื่องแก้วควบแน่นของเหลว (Condenser)

3.8 เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง (ยี่ห้อ DENVER INSTRUMENT APX-1502)

3.9 เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง (ยี่ห้อ DENVER INSTRUMENT)

3.10 ชุดเครื่องแก้ว

4. การวิเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

4.1 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี model GC-2010 , Shimadzu Japan

แก๊สตัวพา: He

คอลัมน์: FID อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส

อินเจกเตอร์: DB-Wax อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส, split ratio 25

4.2 เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง: BL210S, Sartorius, Goettingen

4.3 เครื่องผสม (Vortex Mixer): KMC-1300V, VISION, Korea

4.4 ขวด Vial ขนาด 10 มิลลิลิตร

5. การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด

5.1 ชุดเครื่องแก้วสำหรับการไตเตรท



สารเคมี

1. การวิเคราะห์ปริมาณไขมันและน้ำมัน (Grease and Oil)

1.1 ในน้ำตัวอย่าง

1.1.1 กรดเกลือ (32 นอร์มอล, บริษัท J.T Baker)

1.1.2 ตัวทำละลายอินทรีย์

n-haxane จุดเดือด 49 องศาเซลเซียส

1.1.3 กระดาษกรอง Whatman No.40 เส้นผ่านศูนย์กลาง 11 เซนติเมตร

1.1.4 diatomaceous-silica filter aid suspension, 10 กรัมต่อลิตรของน้ำกลั่น

1.1.5 ผ้ามีสลินตัดเป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 เซนติเมตร

1.1.6 หลอดสำหรับสกัดด้วยตัวกระดาษกรอง

1.1.7 น้ำกลั่น

1.2 ในเศษกากตะกอนจากถัง Dissolved-Air Flotation

1.2.1 กรดเกลือเข้มข้น

1.2.2 ตัวทำละลายอินทรีย์

n-haxane จุดเดือด 49 องศาเซลเซียส

1.2.3 $MgSO_4 \cdot H_2O$ เตรียมโดยใช้น้ำมาแผ่เป็นแผ่นบางๆแล้วอบให้แห้งที่ 150 องศาเซลเซียส

2. การเตรียมน้ำมันปลาแหลมอนจากบ่อดักไขมัน

2.1 ซิลิกา เจล

2.2 น้ำกลั่น

3. การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน

3.1 น้ำมันปลาที่ผ่านการบำบัดและทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นแล้ว

3.2 กรดซัลฟูริกเข้มข้น (H_2SO_4 36 นอร์มอล, บริษัท J.T Baker)

3.3 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (ความบริสุทธิ์ 86.0 เปอร์เซ็นต์ , บริษัท J.T Baker)

3.4 เมทานอล (ความบริสุทธิ์ 99.8 เปอร์เซ็นต์, บริษัท Mallinckrodt Chemicals)

3.5 ซิลิกา เจล

3.6 น้ำกลั่น (pH = 5.5)

**4. การวิเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี
(ตามมาตรฐาน EN 14103)**

4.1 Methyl Heptadecanoate, C17:0: ความบริสุทธิ์ 95 เปอร์เซ็นต์

4.2 n-Heptane: ความบริสุทธิ์ 99 เปอร์เซ็นต์, Analysis Grade, Fluka

5. การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด

5.1 ไอโซโพรพานอล (บริษัท J.T.Baker)

5.2 ฟีนอล์ฟทาลีน (ความบริสุทธิ์ 99.99 เปอร์เซ็นต์, บริษัท Carlo Erba Reagent)

5.3 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (ความบริสุทธิ์ 86.0 เปอร์เซ็นต์, บริษัท J.T.Baker)

5.4 น้ำกลั่น

วิธีการทดลอง

1. การวิเคราะห์ปริมาณไขมันและน้ำมัน (Grease and Oil)

1.1 ในน้ำตัวอย่าง

ทำการเก็บตัวอย่างน้ำบริเวณน้ำทิ้งที่มาจากกระบวนการผลิต (ภาพที่ 19) และเมื่อตัวอย่างถูกนำมายังห้องปฏิบัติการ ทำเครื่องหมายบอกระดับตัวอย่างในขวดหรือชั่งน้ำหนัก เพื่อนำมาหาปริมาณของตัวอย่างภายหลัง ทำตามขั้นตอน

1.1.1 ทำให้เป็นกรดด้วย 1+1 HCl (ปกติใช้ 5 มิลลิลิตร) จนพีเอช 2 หรือต่ำกว่า

1.1.2 เตรียมการกรองโดยวางผ้ามัสลินบนที่กรอง แล้วปูทับด้วยกระดาษกรอง ผ่านสารละลาย filter aid ที่เตรียมลงไป 100 มิลลิลิตร ใช้เครื่องดูดสุญญากาศดูดแห้ง ล้างด้วยน้ำกลั่น 1 ลิตร จนกระทั่งแห้ง

1.1.3 กรองตัวอย่างที่เตรียมไว้ และดูดให้แห้ง

1.1.4 ปากคีบหยิบกระดาษกรองออกมา วางบนกระจกนาฬิกา เช็ดข้างๆ ที่กรองให้เกลี้ยงโดยใช้กระดาษกรองที่ชุ่มด้วยตัวทำละลายที่ใช้สกัด วางกระดาษกรองนี้รวมบนกระจกนาฬิกา ม้วนกระดาษกรองเข้าด้วยกัน และใส่ลงในหลอดสำหรับสกัดที่ทำด้วยกระดาษกรอง (paper extraction thimble)

1.1.5 นำไปอบให้แห้งที่ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ใส่เม็ดแก้วลงไปให้เต็ม ซึ่งขวดที่ใช้สกัดใส่ thimble ลงไปในเครื่องสกัดเดิม 100 มิลลิลิตรของ n-hexane ลงในขวดที่ใช้ในการสกัดและสกัดกรีตและน้ำมันด้วยอัตรา 200 รอบต่อชั่วโมง เป็นเวลา 4 ชั่วโมง นับจากเริ่มสะกัดรอบแรก

1.1.6 กลั่น n-hexane หรือ solvent mixture ออกไป จากขวดที่ใช้สกัดในอ่างน้ำร้อนที่ 85 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปทำให้แห้งด้วยอ่างน้ำร้อน หรือเป่าลมลงไปประมาณ 15 นาที

1.1.7 ทำให้เย็นในเคซิเคเตอร์ (30 นาที) ชั่ง

การคำนวณ

$$\text{mg / L grease and oil} = \frac{\text{mg increase in weight of flask} \times 1,000}{\text{ml sample}}$$

1.2 ในเศษกากตะกอนจากถัง Dissolved-Air Flotation

ทำการเก็บตัวอย่างเศษกากตะกอน (ภาพที่ 21) เมื่อตัวอย่างเศษกากตะกอนมาถึงห้องปฏิบัติการ ทำให้เป็นกรดโดยการเติม conc.HCl 1 มิลลิลิตรต่อตัวอย่าง 80 กรัมแล้วทำตามดังนี้

1.2.1 ชั่งกากตะกอนที่เปียก 20 ± 0.5 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 150 มิลลิลิตร ทำให้พีเอชลดลงจนถึง 2.0 (ปกติใช้ 0.3 มิลลิลิตร conc. HCl) เติม 25 กรัม $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ คนให้เข้ากัน และให้แผ่ไปตามด้านข้างของบีกเกอร์ให้ทั่ว ตั้งทิ้งไว้ 15-30 นาที เพื่อให้แข็ง แล้วจึงถ่ายของแข็งนี้ลงในครกกระเบื้อง (porcelain mortar) บดให้แตกเป็นผง เทลงใน thimble เช็ดข้างครกและบีกเกอร์ให้สะอาดด้วยกระดาษกรองซึ่งชุบด้วยตัวทำละลาย แล้วใส่รวมลงไปใน thimble ใส่เม็ดแก้วลงไปให้เต็ม เติมตัวทำละลาย 100 มิลลิลิตร แล้วสกัดในเครื่องมือสกัด soxhlet ด้วยอัตรา 20 รอบต่อชั่วโมงเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

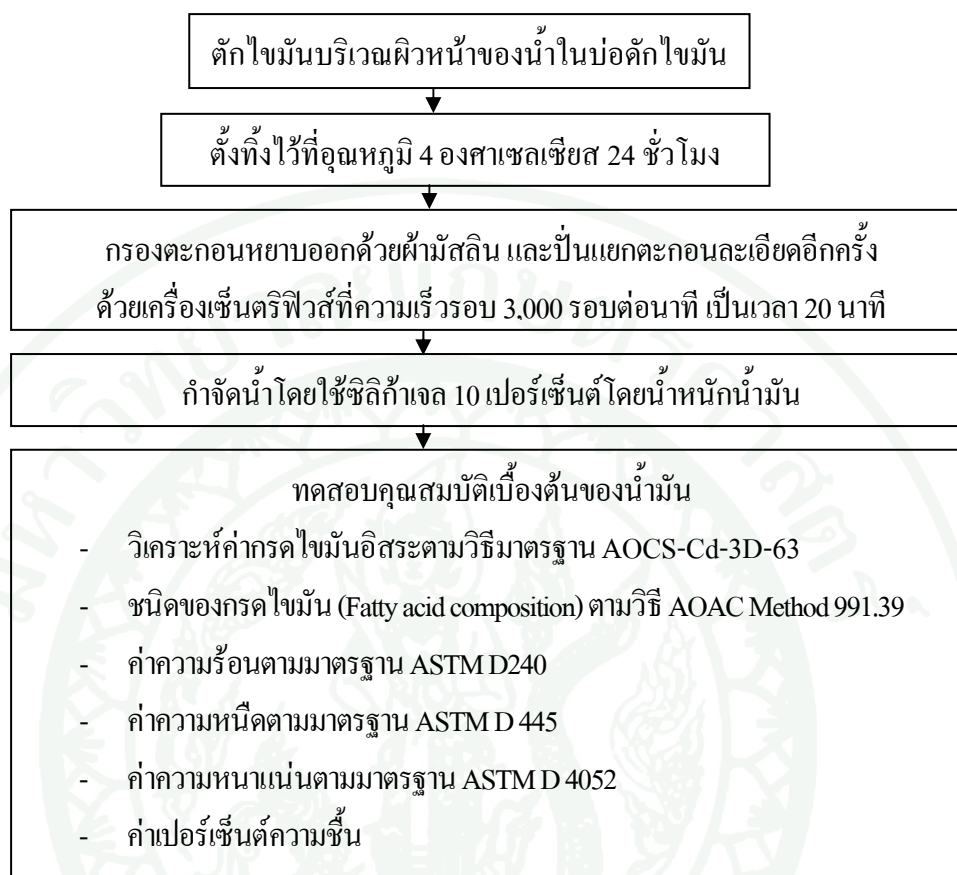
1.2.2 ถ้าในขวดสกัดมีความชื้น หรือมีสารห้อยแขวนปนอยู่ ให้กำจัดโดยกรองผ่านสำลีลงในขวดที่ทราบน้ำหนัก กลั่นตัวทำละลายจากขวดสกัดในน้ำร้อนที่ 85 องศาเซลเซียส ทำให้แห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนและเป่าอากาศลงไปประมาณ 15 นาที

1.2.3 ทำให้เย็นในเคสเคเตอร์ 30 นาที ชั่ง

การคำนวณ

$$\% \text{ grease and oil} = \frac{\text{gain in weight of flask (g)} \times 100}{\text{weight of wet solid (g)}}$$

2. การเตรียมน้ำมันปลาจากบ่อดักไขมัน



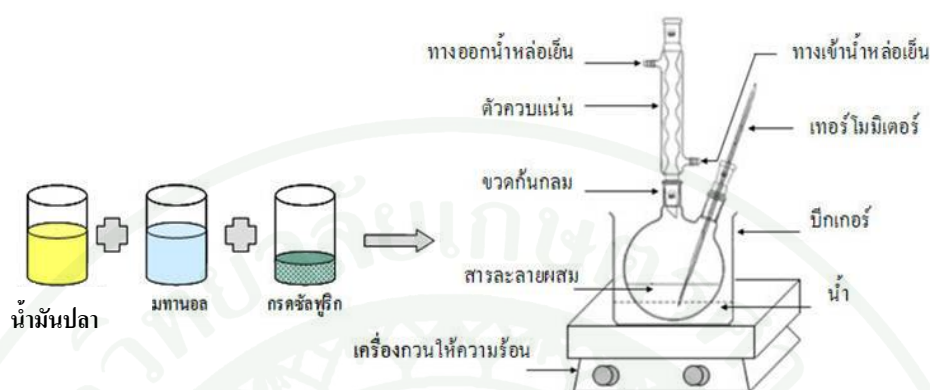
ภาพที่ 14 ขั้นตอนการเตรียมน้ำมันปลาเพื่อเข้าสู่กระบวนการผลิตไบโอดีเซล

3. การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน

3.1 ขั้นตอนที่ 1: ปฏิกริยาเอสเทอริฟิเคชันด้วยกรดซัลฟูริกเพื่อลดปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปลาให้ < 2 เปอร์เซนต์

ชั่งน้ำมันที่ผ่านการบำบัดข้างต้นแล้ว 50 กรัม ใส่ลงในขวดก้นกลม อุ่นจนได้อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่ 6:1 โดยเตรียมเมทานอลและปริมาณกรดซัลฟูริก 1.0 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักน้ำมัน วิธีการคำนวณดังแสดงไว้ในภาคผนวก ก ทำการอุ่นสารละลายที่เตรียมไว้จนได้อุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิน้ำมัน จากนั้นผสมกับน้ำมันปลาที่อุ่นไว้ลงในขวดก้นกลม กวนผสมด้วยแท่งกวนแม่เหล็กที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาเป็นเวลา 60 นาที หยุดปฏิกิริยาโดยเขย่าขวดทำปฏิกิริยาในน้ำเย็น หลังจากนั้นเพรสลิคภัณฑ์ที่ได้ลงใน

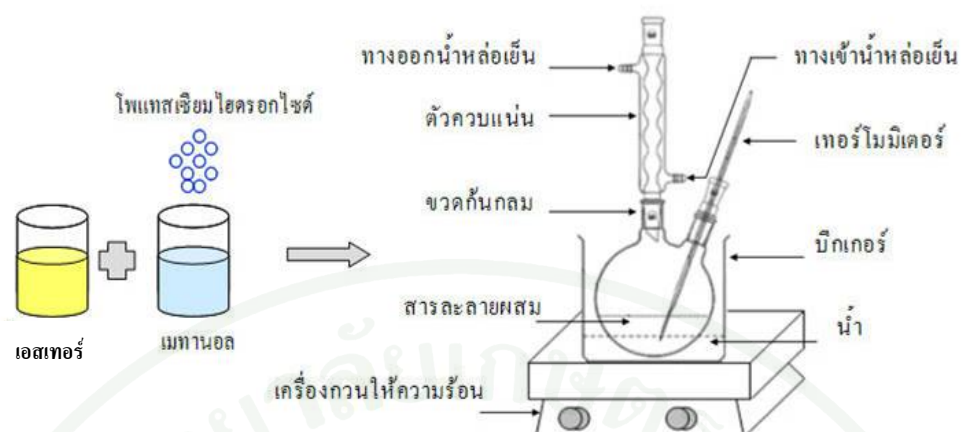
กรวยแยก ตั้งทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง ทำการไขผลิตภัณฑ์ที่อยู่ชั้นล่างเพื่อนำไปทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันด้วยเบส และแบ่งตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด



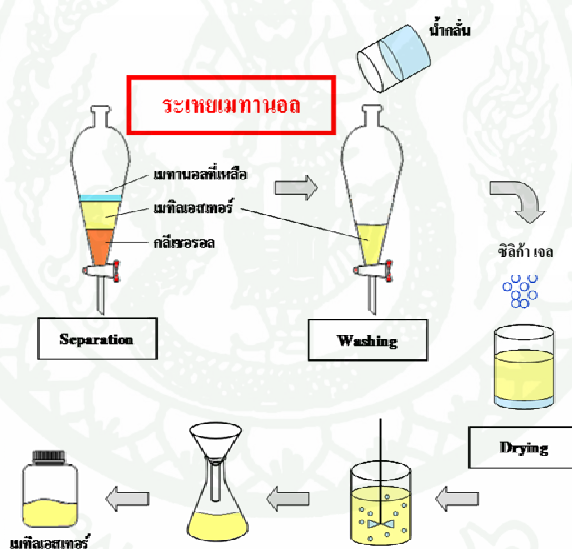
ภาพที่ 15 ขั้นตอนการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

3.2 ขั้นตอนที่ 2: ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เพื่อผลิตไบโอดีเซล

ชั่งน้ำมันที่ผ่านกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชันข้างต้น 50 กรัม ใส่ลงในขวดกั่นกลม อุ่นจนได้อุณหภูมิที่ต้องการ เตรียมเมทานอลตามสัดส่วนโดย ชั่งโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ละลายในเมทานอลที่เตรียมไว้ อุ่นด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กและให้ความร้อนจนได้อุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิน้ำมัน จากนั้นนำสารละลายที่เตรียมไว้ผสมกับน้ำมันที่ผ่านกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชันที่อุ่นไว้ในขวดกั่นกลม กวนผสมด้วยแท่งกวนแม่เหล็กที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาเทผลิตภัณฑ์ที่ได้ลงในกรวยแยก ตั้งทิ้งไว้ 1 คืน ได้ผลิตภัณฑ์แยกเป็นสองชั้น ทำการไขเซอรอลชั้นล่างออก ชั้นบนเป็นไบโอดีเซล (เมทิลเอสเทอร์) ที่ต้องทำการระเหยเมทานอลที่ยังเหลือออก โดยการให้ความร้อนที่ 65 องศาเซลเซียส 15 นาที จากนั้นทำการล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำกลั่นอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ทำการล้างซ้ำจนกระทั่งน้ำล้างมีค่า pH เท่ากับน้ำกลั่นที่ใช้ และทำการดูดความชื้นที่เหลือด้วยซิลิกาเจลประมาณ 1 กรัม และกรองซิลิกาเจลออกด้วยกระดาษกรองเบอร์ 4 นำตัวอย่างไบโอดีเซลที่ได้ไปวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ ค่าความเป็นกรด และคุณสมบัติต่างๆ



ภาพที่ 16 ขั้นตอนการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน



ภาพที่ 17 ขั้นตอนกระบวนการล้างไบโอดีเซล

4. การวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ (%FAME) ในผลิตภัณฑ์โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (ตามมาตรฐาน EN 14103)

การวิเคราะห์หาปริมาณเมทิลเอสเทอร์ ได้วิเคราะห์ตามมาตรฐานของ EN 14103: 2003 โดยมีขั้นตอนดังนี้ ซึ่งตัวอย่าง (ไบโอดีเซล) 250 มิลลิกรัม ใส่ลงในขวด Vial ขนาด 10 มิลลิลิตร หลังจากนั้นเติมสารละลายเมทิลเฮปตะดิกาโนเอท ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ลงไปใน

ปริมาณ 5 มิลลิลิตร แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณเมทิลเอสเทอร์โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี
วิธีการคำนวณตามสมการในภาคผนวก ก

5. การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด

ชั่งเมทิลเอสเทอร์ 5 กรัมใส่ขวดรูปชมพู่ เติมสารละลายไอโซโพรพานอล 50 มิลลิลิตร
หยดฟีนอล์ฟทาไลน์ 2-3 หยด จากนั้นนำสารละลายผสมที่ได้มาไตเตรทด้วยสารละลาย
โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล จนสารละลายจะเปลี่ยนจากไม่มีสีไปเป็นสี
ชมพูที่จุดยุติ บันทึกปริมาตรสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เพื่อคำนวณหาค่าความเป็นกรด
ตามสมการในภาคผนวก ก

6. การคำนวณร้อยละของผลที่ได้ (Yield)

การคำนวณร้อยละของผลที่ได้ตามวิธีของ Leung and Guo (2006) โดยสามารถคำนวณได้
จากสมการ

$$\%Yield = \frac{\text{weight of product (g)} \times 100}{\text{weight of raw oil (g)}}$$

เมื่อ $\text{weight of product} =$ น้ำหนักผลิตภัณฑ์ที่ได้ หน่วยเป็น กรัม
 $\text{weight of raw oil} =$ น้ำหนักน้ำมันเริ่มต้น หน่วยเป็น กรัม

7. การวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอดีเซล

วิเคราะห์โดยโครงการเคยูไบโอดีเซล (KU Biodiesel)

- 7.1 วิเคราะห์ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ตามวิธีมาตรฐาน EN14103
- 7.2 วิเคราะห์ความหนืดของไบโอดีเซลตามวิธีมาตรฐาน ASTM D445
- 7.3 วิเคราะห์ค่าความร้อนการเผาไหม้แบบกรอสตามวิธีมาตรฐาน ASTM D240

วิเคราะห์โดยศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (mtech)

- 7.4 วิเคราะห์ค่าความหนาแน่นของไบโอดีเซลตามวิธีมาตรฐาน ASTM 4050

วิเคราะห์โดยกรมวิทยาศาสตร์บริการ

7.5 วิเคราะห์ค่าจุดไหลเทตามวิธีมาตรฐาน ASTM D5950

7.6 วิเคราะห์ค่าความร้อนการเผาไหม้แบบกรอสตามวิธีมาตรฐาน ASTM D240

7.7 วิเคราะห์จุดวาบไฟ (แบบถ้วยปิดเพนสกี-มาร์เทนส์) ตามมาตรฐาน ASTM D93



ผลและวิจารณ์

จากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานแยกชิ้นส่วนเนื้อแชลมอนและปลาเทราท์ ไชมันและน้ำมันที่เกิดจากกระบวนการผลิตจะถูกกำจัดบริเวณบ่อดักไขมัน (Grease Trap) และบริเวณถัง Dissolved-Air Flotation จึงทำการศึกษาปริมาณของไขมันและน้ำมันในบริเวณ 2 ส่วนนี้ เพื่อเลือกจุดเก็บตัวอย่างมาทำการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไบโอดีเซลจากไขมันปลาที่มาจากระบบบำบัดน้ำเสียโดยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน โดยไขมันปลาที่มาจากระบบบำบัดน้ำเสียนั้น ในขั้นตอนแรกนั้นทำการแยกชั้นของเหลวที่เป็นน้ำมันปลาทำการกำจัดตะกอนเศษปลาออกและใช้ซิลิกาเจลกำจัดน้ำในน้ำมันปลาที่แยกออกมาจากน้ำเสีย จากนั้นทดสอบค่ากรดไขมันอิสระและความชื้นที่มีในน้ำมันปลาเบื้องต้นก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันให้ได้คุณภาพและปริมาณที่สูงที่สุด ในการวิจัยทำการศึกษาดัชนีแปรในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ดังนี้ ศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่ค่าการทดลอง 3:1, 6:1, 9:1 และ 12:1 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.75, 1.00, 1.25 และ 1.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 30, 60, 90 และ 120 นาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 40, 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบในการผสมด้วยแท่งกวนแม่เหล็กที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที โดยระบบที่ใช้ต้องมีการรีฟลักซ์ (Reflux) ช่วยควบแน่นไอของเมทานอล เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงเกินไปทำให้เมทานอลระเหยออกไปนอกระบบ ซึ่งส่งผลต่อปริมาณและคุณภาพของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ นอกจากนี้ได้ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติไบโอดีเซลที่ได้เช่น ค่าความหนืด (ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D 445) ความหนาแน่น (ASTM D 4052-96), ค่าความเป็นกรด (ตามวิธีมาตรฐาน AOCS-Cd-3D-63) ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ (ตามวิธีมาตรฐาน EN 14103), จุดไหลเท (ASTM D 5950-02), ค่าความร้อน (ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D 240) และจุดวาบไฟ (ASTM D 93-08) เพื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานไบโอดีเซลของกรมธุรกิจพลังงาน อีกทั้งคำนวณต้นทุนในการผลิตเพื่อเปรียบเทียบความคุ้มค่าที่ได้

1. การวิเคราะห์ปริมาณไขมันและน้ำมัน (Grease and Oil)

1.1 ไขมันและน้ำมันจากบ่อดักไขมัน (Grease and Oil Waste from Grease Trap; GW-GT)

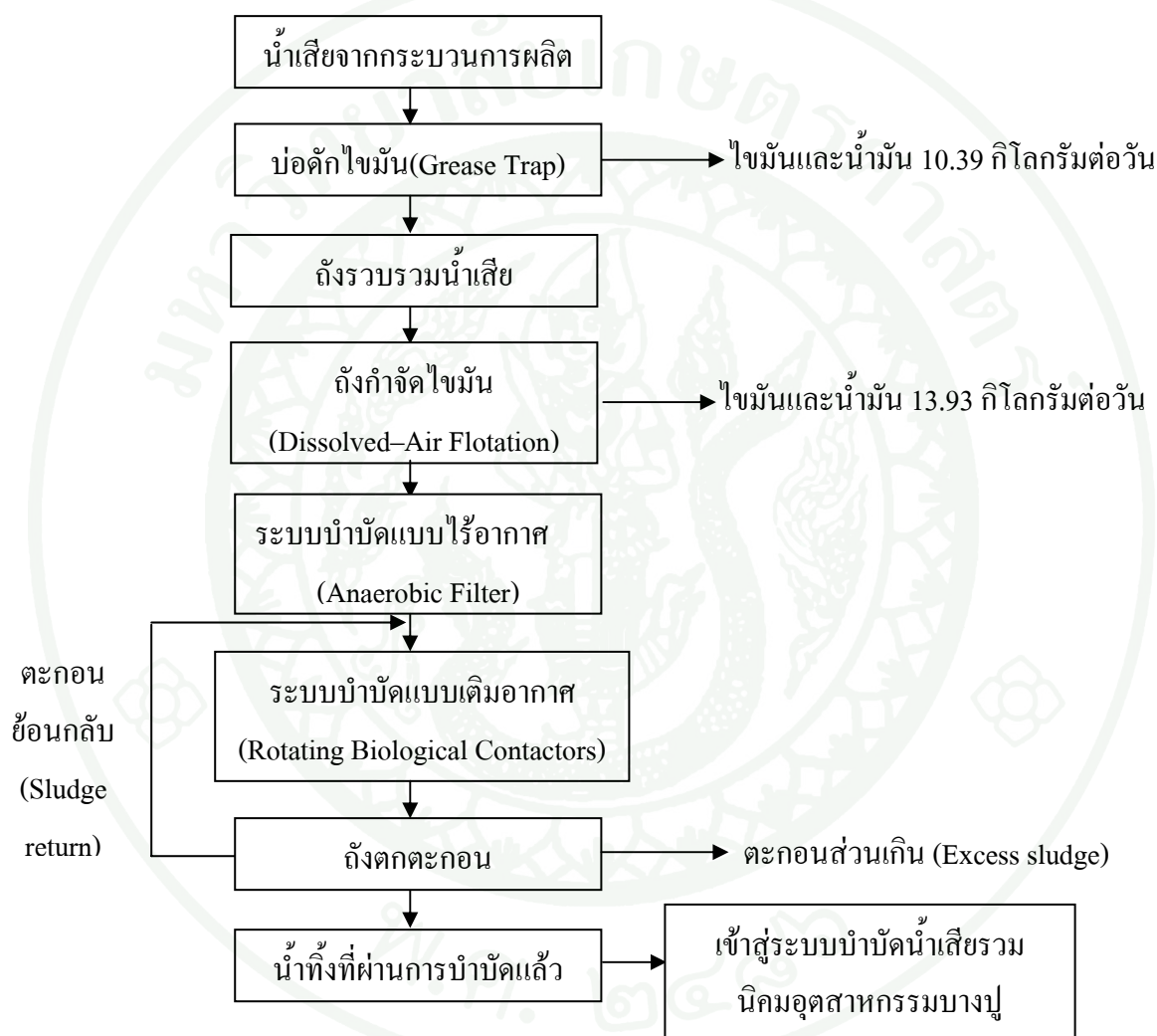
1.1.1 การประเมินปริมาณไขมันและน้ำมันจากน้ำล้าง

ปริมาณน้ำเสีย (มกราคม – กรกฎาคม 2552) เฉลี่ย 172 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน

ปริมาณไขมันและน้ำมัน (Grease and Oil) (กรกฎาคม 2552) เฉลี่ย 151 มิลลิกรัมต่อลิตร

ปริมาณน้ำมันปลาที่ได้จากระบบบำบัดน้ำเสียในเดือนกรกฎาคม 2552 เท่ากับ 25.97 กิโลกรัมต่อวัน หรือ 28.23 ลิตรต่อวัน

ประสิทธิภาพในการกำจัดไขมันของบ่อดักไขมันมีประสิทธิภาพที่ 40 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสามารถแยกไขมันและน้ำมันที่ได้จากบ่อดักไขมัน (GW-GT) เท่ากับ 10.39 กิโลกรัมต่อวัน



ภาพที่ 18 กระบวนการบำบัดน้ำเสีย

ที่มา: บริษัท ฟินด์ส (ไทยแลนด์) จำกัด (2552)



ภาพที่ 19 น้ำทิ้งบริเวณบ่อดักไขมัน

ที่มา: บริษัท ฟินด์ส (ไทยแลนด์) จำกัด (2552)

ลักษณะของน้ำที่เข้าสู่ระบบถังดักไขมันเป็นสีขาวขุ่น มีเศษตะกอนปลา โดยน้ำจะผ่านตะแกรงแยกเอาสิ่งสกปรกชิ้นใหญ่ออกไปก่อน น้ำที่ผ่านตะแกรงออกมาจะเป็นน้ำเสียที่มีไขมันผสมอยู่ เมื่อปล่อยไว้ในถังดักไขมัน ไขมันจะลอยตัวขึ้นมาบริเวณผิวน้ำเป็นฝ้าขาว จากนั้นจะมีพนักงานทำการดักไขมันที่ลอยเป็นฝ้าออกมาแยกทิ้งไว้ในถังรวบรวมไขมัน ทำให้เห็นชั้นไขมันชัดเจน โดยลักษณะของไขมันก่อนการแยกเป็นของแข็งกึ่งของเหลว สีขาวเป็นฟองเนื้อละเอียดมีน้ำมันสีส้ม ลอยแยกตัวกับน้ำเสีย มีกลิ่นปลาชัดเจน เมื่อนำมาตั้งทิ้งไว้ที่ 4 องศาเซลเซียส น้ำเสียที่เก็บมาจะแยกตัวเป็นสามชั้น โดยชั้นล่างสุดเป็นน้ำ ถัดมาเป็นชั้นเศษชิ้นส่วนเนื้อปลา และบนสุดเป็นชั้นน้ำมันปลา ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 20



ภาพที่ 20 ไขมันและน้ำมันปลาจากบ่อดักไขมันและเมื่อดักทิ้งไว้ที่ 4 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ที่มา: บริษัท ฟินดัส (ไทยแลนด์) จำกัด (2552)

1.2 ไขมันและน้ำมันจากเศษกากตะกอนในถัง Dissolved-Air Flotation (Grease and Oil Waste from Dissolved-Air Flotation; GW-DAF)

ประสิทธิภาพในการกำจัดไขมันของถังกำจัดไขมันมีประสิทธิภาพที่ 90 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสามารถแยกไขมันและน้ำมันที่ได้จากถัง Dissolved-Air Flotation (GW-DAF) เท่ากับ 13.93 กิโลกรัมต่อวัน (รายละเอียดการคำนวณดูได้จากภาคผนวก ก)

ลักษณะกากของเสียที่ออกมาจากถัง Dissolved-Air Flotation (DAF) เป็นฟองสีขาว เมื่อดักทิ้งไว้จะยุบตัว และมีน้ำมันซึมอยู่บริเวณด้านบน การแยกไขมันออกจากกากของเสียให้ได้มากที่สุดควรทำทันทีหลังจากกากของเสียออกมาจากระบบ เนื่องจากการทิ้งไว้นานจะทำให้ น้ำมันที่อยู่ในกากของเสียแข็ง ทำให้ได้ปริมาณน้ำมันน้อย ลักษณะเศษกากตะกอนที่ออกมาจากระบบ Dissolved-Air Flotation (DAF) แสดงดังภาพที่ 21



ภาพที่ 21 เศษกากตะกอนจากระบบ Dissolved-Air Flotation

ที่มา: บริษัท ฟินคัส (ไทยแลนด์) จำกัด (2552)

จากการเปรียบเทียบปริมาณไขมันของทั้งในบริเวณบ่อดักไขมันและจากกากของเสียที่ออกมาจากระบบ Dissolved Air Flotation จะเห็นได้ว่าปริมาณเฉลี่ยของไขมันในบริเวณบ่อดักไขมันมีปริมาณน้อยกว่าไขมันที่สกัดมาจากกากของเสียของ Dissolved-Air Flotation แต่การแยกน้ำมันในบริเวณบ่อดักไขมันมีความสะดวกและใช้เวลาน้อยกว่าการแยกไขมันของ Dissolved-Air Flotation ที่กากของเสียมีปริมาณสูงเนื่องจากเป็นกากของเสียที่เป็นน้ำมันและตะกอนปนารวมตัวกับสารเร่งการเกิดตะกอนและโพลิเมอร์ที่ใช้ในระบบ Dissolved-Air Flotation การนำน้ำมันจากของเสียดังกล่าวจึงต้องใช้ความร้อนคือการเจียวเพื่อทำการดึงน้ำมันในกากตะกอนออกมา และด้วยข้อจำกัดของกากตะกอนที่การสกัดน้ำมันออกจากกากตะกอนให้ได้มากที่สุดนั้น ควรทำในขณะที่ย้อนของกากตะกอนเท่ากับอุณหภูมิที่แต่น้ำมันออกมา จึงเป็นการยากที่สามารถดึงน้ำมันในกากตะกอนออกมาได้หมด อีกทั้งคุณภาพของวัตถุดิบน้ำมันที่ได้ยังมีคุณภาพด้อยกว่าน้ำมันที่ได้จากบ่อดักไขมัน เนื่องจากน้ำมันในบริเวณบ่อดักไขมันนั้นไม่ได้ผ่านการเจียวให้ความร้อน แต่น้ำมันที่สกัดมาจากกากของเสียของ Dissolved-Air Flotation นั้นต้องทำการเจียวให้ความร้อน เพื่อให้ไขมันออกมา ซึ่งทำให้สีน้ำมันเข้มขึ้น และปริมาณกรดไขมันอิสระมากขึ้นด้วย ส่งผลต่อต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซลที่สูงตามมาด้วย ในงานวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยจึงใช้น้ำมันปลาจากบ่อดักไขมัน (Grease Trap) ของโรงงานแยกชิ้นส่วนเนื้อปลาแชลมอนและปลาเทราท์มาศึกษาการผลิตเป็นไบโอดีเซล

2. น้ำมันปลาที่เตรียมได้จากไขมันปลาในบ่อตกไขมัน

2.1 ผลการศึกษาปริมาณและชนิดของกรดไขมันในน้ำมันปลาจากระบบบำบัดน้ำเสีย

เนื่องจากชนิดของน้ำมันที่แตกต่างกัน จะมีปริมาณและชนิดของกรดไขมันที่แตกต่างกันออกไป จำเป็นต้องศึกษาถึงองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันก่อนนำมาผลิตไบโอดีเซล เพื่อให้ทราบถึงคุณสมบัติต่างๆเบื้องต้นของน้ำมันชนิดนั้นๆ และผลจากการวิเคราะห์น้ำมันปลาที่ได้มาจากระบบบำบัดน้ำเสียนั้นพบว่า ลักษณะน้ำมันปลาที่ผ่านการกำจัดกากตะกอนและดูดซับน้ำ (ความชื้น) ด้วยซิลิกาเจลแล้ว จะได้น้ำมันปลาสถานะเป็นของเหลวสีส้ม ใส มีกลิ่นปลาเล็กน้อย แสดงดัชนีภาพที่ 20 และเมื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นในการเป็นเชื้อเพลิงของน้ำมันปลา ได้ผลดังตารางที่ 11 เมื่อวิเคราะห์ปริมาณและชนิดของกรดไขมันด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี แมสสเปกโตรมิเตอร์ ของน้ำมันดังกล่าว ดังตารางที่ 12พบว่าส่วนใหญ่ไขมันประกอบไปด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัวชนิดกรดโอเลอิก (Oleic acid) มากที่สุดถึง 23.69 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาเป็นกรดอีรูติก (Erucic acid) ปริมาณ 13.31 เปอร์เซ็นต์ และกรดปาล์มมิก (Palmitic acid) 9.94 เปอร์เซ็นต์ สามารถคำนวณน้ำหนักโมเลกุลของน้ำมันดังกล่าวจากสมการในภาคผนวก ก เท่ากับ 922.31 กรัมต่อโมล

ตารางที่ 11 คุณสมบัติของน้ำมันปลาจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานแยกชิ้นส่วนเนื้อปลา

คุณสมบัติ	หน่วย	ค่าที่ตรวจวัดได้
ค่าความหนืด ¹	เซนติสโตก (cSt)	32.40
ค่ากรดไขมันอิสระ	เปอร์เซ็นต์ (% as Oleic acid)	5.79
ค่าความชื้น	เปอร์เซ็นต์(%)	0.10
ค่าการให้ความร้อน ¹ (HHV)	เมกะจูลต่อกิโลกรัม (MJ/kg)	39.76
ค่าความหนาแน่น ²	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm ³)	0.9198

หมายเหตุ ¹ วิเคราะห์โดยโครงการเคยูไบโอดีเซล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

² วิเคราะห์โดยศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ

ตารางที่ 12 ส่วนประกอบของกรดไขมันในน้ำมันปลาจากระบบบำบัดน้ำเสีย

ชนิดของกรดไขมัน		เปอร์เซ็นต์
กรดไขมันไม่อิ่มตัว		
C16:1 n-7	Palmitoleic	4.30
C18:1 n-9 cis	Oleic	23.69
C:18:1 n-7	Vaccenic	3.07
C18:2 n-6 cis	Linoleic	7.60
C18:3 n-3	Linolenic	3.01
C20:1 n-9	Eicosenoic	9.72
C20:3 n-3	Eicosatrienoic	0.60
C20:4 n-6	Arachidonic	0.48
C20:5 n-3	Eicosapentanoic	6.26
C22:1 n-9	Erucic	13.31
C22:2	Docosadienoic	0.64
C22:5	Docosapentaenoic	2.56
C22:6	Docosahexaenoic	7.71
C24:1	Nervonic	0.86
กรดไขมันอิ่มตัว		
C14:0	Myristic	3.05
C16:0	Palmitic	9.94
C18:0	Stearic	2.17
C20:0	Arachidic	0.30
C21:0	Heneicosanoic	0.74
รวม		100.00

หมายเหตุ วิเคราะห์โดยศูนย์วิทยาศาสตร์ฮาลาล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (วิเคราะห์โดยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์)

3. การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน

3.1 ผลของปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันด้วยกรดซัลฟูริกเพื่อลดปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปลาให้ < 2 เปอร์เซ็นต์

ขั้นตอนนี้เป็นการลดปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันตัวอย่าง 5.79 เปอร์เซ็นต์ให้เหลือค่ากรดไขมันอิสระน้อยกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ (เทียบกับกรดโอเลอิก) โดยทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันด้วยกรดซัลฟูริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้กรดไขมันอิสระทำปฏิกิริยากับกรดเกิดเป็นเอสเทอร์ เพื่อในขั้นตอนการทำปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน โดยใช้เบส จะไม่เหลือกรดไขมันอิสระไปจับกับเบสจนเกิดสบู่ ซึ่งจะส่งผลทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณลดลง โดยสภาวะการทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันใช้กรดซัลฟูริกที่ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และเข้าสู่กระบวนการเอสเทอริฟิเคชันที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันปลาเป็น 6:1 ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 50 ± 2 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยานาน 60 นาที จากนั้นแยกส่วนที่เป็นเอสเทอร์ชั้นบนมาทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันต่อไป ซึ่งจากขั้นตอนนี้ได้ร้อยละของผลผลิตเท่ากับ 96.60 เปอร์เซ็นต์

3.2 ผลของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เพื่อผลิตไบโอดีเซล

ขั้นตอนนี้เป็นการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปลาที่ผ่านปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด เพื่อให้ปริมาณกรดไขมันอิสระลดลงน้อยกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ (เทียบกับกรดโอเลอิก) โดยในขั้นตอนนี้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล จากอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน ปริมาณตัวโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เวลาและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เพื่อให้ได้ไบโอดีเซลที่มีคุณภาพและความคุ้มค่าที่เหมาะสม

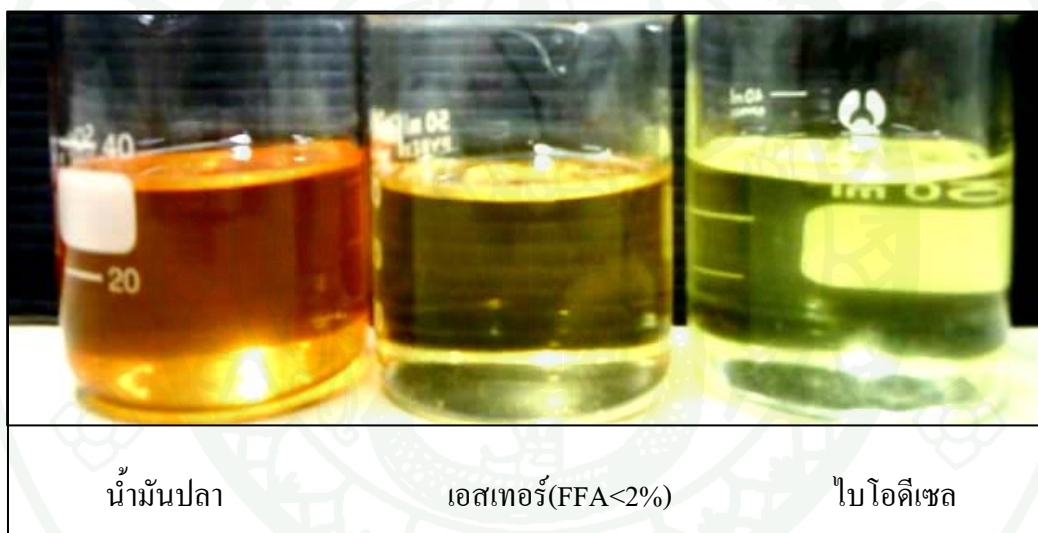
ในการพิจารณาการเลือกสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตจะคำนึงถึงปริมาณคือ เปอร์เซ็นต์ของผลผลิต (% Yield) และคุณภาพคือเปอร์เซ็นต์ของเมทิลเอสเทอร์ (%FAME) ของไบโอดีเซลควบคู่กัน รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 10 ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงกำหนดหน่วยที่ใช้ในการพิจารณาเป็นหน่วยกรัมเปอร์เซ็นต์ไบโอดีเซล โดยหน่วยดังกล่าวมาจาก

สูตรการคำนวณ

กรัมเปอร์เซ็นต์ไบโอดีเซล = ปริมาณผลผลิตต่อวัตถุดิบ 1 กรัม $\times$ เปอร์เซ็นต์ของเมทิลเอสเทอร์
 (Gram % Biodiesel = Product (gram)/1gram crude fish oil $\times$ % Methyl ester)

และ

ปริมาณผลผลิตต่อวัตถุดิบ 1 กรัม = $\frac{\text{เปอร์เซ็นต์ผลผลิต}}{100}$



ภาพที่ 22 ลักษณะของน้ำมันปลาวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนต่างๆ

ตารางที่ 13 ไบโอดีเซลที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

ลำดับ	อัตราส่วน ระหว่าง เมทานอลต่อ น้ำมัน	เมทานอล		น้ำมันปลา		การทำปฏิกิริยา				ผลิตภัณฑ์		
						KOH		เวลา (นาที)	ปริมาณผลผลิตต่อ วัตถุดิบ 1 กรัม	ผลผลิต (%Yield)	เปอร์เซ็นต์ ผลิตเอสเตอร์ (%FAME)	กรัม-เปอร์เซ็นต์ ไบโอดีเซล
						(เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก น้ำมัน)	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)					
		กรัม	โมล	กรัม	โมล							
1	3:1	5.21	0.163	50	0.054	1.00	60	30	0.69	69.14	-	-
2	6:1	10.42	0.325	50	0.054	1.00	60	30	0.75	74.83	79.50	59.63
3	9:1	15.63	0.488	50	0.054	1.00	60	30	0.80	79.83	76.39	61.11
4	12:1	20.84	0.650	50	0.054	1.00	60	30	0.81	80.77	77.34	62.64
5	6:1	10.42	0.325	50	0.054	0.75	60	30	0.81	80.60	74.77	60.56
6	6:1	10.42	0.325	50	0.054	1.00	60	30	0.80	79.69	79.35	63.48
7	6:1	10.42	0.325	50	0.054	1.25	60	30	0.78	78.09	80.66	62.91
8	6:1	10.42	0.325	50	0.054	1.50	60	30	0.77	76.69	79.55	61.25
9	6:1	10.42	0.325	50	0.054	1.25	40	30	0.86	85.59	79.82	68.65
10	6:1	10.42	0.325	50	0.054	1.25	40	60	0.85	85.42	80.56	68.48
11	6:1	10.42	0.325	50	0.054	1.25	40	90	0.85	85.34	83.17	70.69

ตารางที่ 13 (ต่อ)

		เมทานอล		น้ำมันปลา		การทำปฏิกิริยา				ผลิตภัณฑ์			
อัตราส่วนระหว่าง เมทานอลต่อ น้ำมัน						KOH (เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก น้ำมัน)		อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	เวลา (นาที)	ปริมาณผลิตต่อ วัตถุดิบ1กรัม	เปอร์เซ็นต์ ผลผลิต (%Yield)	เปอร์เซ็นต์ เมทิลเอสเตอร์ (%FAME)	กรัม-เปอร์เซ็นต์ ไบโอดีเซล
ลำดับ	น้ำมัน	กรัม	โมล	กรัม	โมล								
12	6:1	10.42	0.325	50	0.054	1.25	40	120	0.86	85.50	84.28		72.48
13	6:1	10.42	0.325	50	0.054	1.25	50	30	0.83	82.99	83.63		69.41
14	6:1	10.42	0.325	50	0.054	1.25	50	60	0.83	83.05	84.14		69.84
15	6:1	10.42	0.325	50	0.054	1.25	50	90	0.82	82.43	85.40		70.03
16	6:1	10.42	0.325	50	0.054	1.25	50	120	0.84	83.70	86.30		72.49
17	6:1	10.42	0.325	50	0.054	1.25	60	30	0.77	76.52	82.18		63.28
18	6:1	10.42	0.325	50	0.054	1.25	60	60	0.78	77.65	85.70		66.85
19	6:1	10.42	0.325	50	0.054	1.25	60	90	0.76	75.65	84.16		63.96
20	6:1	10.42	0.325	50	0.054	1.25	60	120	0.76	75.61	83.84		63.72
21	6:1	10.42	0.325	50	0.054	1.25	70	30	0.72	72.13	78.46		56.49

ตารางที่ 13 (ต่อ)

		เมทานอล		น้ำมันปลา		การทำปฏิกิริยา				ผลิตภัณฑ์		
อัตราส่วน ระหว่าง เมทานอลต่อ น้ำมัน						KOH (เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก น้ำมัน)				เปอร์เซ็นต์ ผลผลิต	เปอร์เซ็นต์ เมทิลเอสเตอร์ (%FAME)	กรัม-เปอร์เซ็นต์ ไบโอดีเซล
ลำดับ	น้ำมัน	กรัม	โมล	กรัม	โมล		อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	เวลา (นาที)	ปริมาณผลต่อ วัตถุดิบกรัม	(%Yield)		
22	6:1	10.42	0.325	50	0.054	1.25	70	60	0.69	69.16	80.68	55.67
23	6:1	10.42	0.325	50	0.054	1.25	70	90	0.68	68.28	86.11	58.55
24	6:1	10.42	0.325	50	0.054	1.25	70	120	0.69	69.02	86.40	59.62

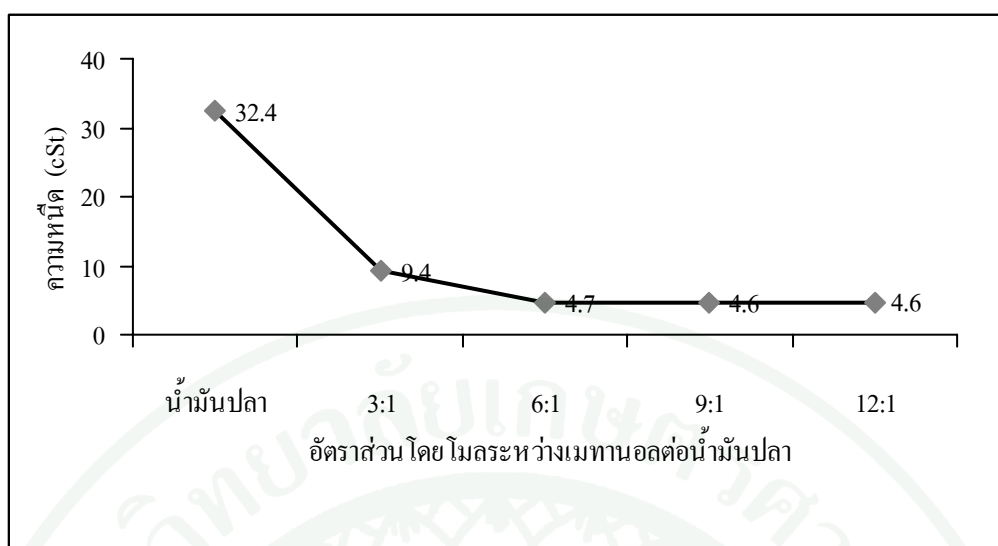
หมายเหตุ น้ำมันปลาที่ใช้ในกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันมีค่ากรดไขมันอิสระน้อยกว่า 2 เปอร์เซ็นต์

3.2.1 ผลของอัตราส่วนโดยโมระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน

เพื่อเป็นการลดจำนวนการทดลอง จึงเริ่มต้นด้วยการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่มีผลต่อความหนืดของน้ำมัน โดยในขั้นตอนนี้น้ำมันปลาที่มาจากระบบบำบัดน้ำเสียมีค่ากรดไขมันอิสระน้อยกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ (เทียบกับกรดโอเลอิก) จึงไม่ผ่านกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชันด้วยกรดมาก่อน สภาวะที่ใช้ทดลองคือ ศึกษาอัตราส่วนโดยโมระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่ 3:1, 6:1, 9:1 และ 12:1 ตามลำดับ โดยมีสภาวะการทดลองอื่นๆคงที่ คือ ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน อุณหภูมิในการทดลอง 60 ± 2 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที

3.2.1.1 ผลของอัตราส่วนโดยโมระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่มีผลต่อความหนืดของไบโอดีเซล

ความหนืดเกี่ยวข้องกับการไหล การฉีดเป็นฝอยของหัวฉีด ในห้องเผาไหม้ การฉีดเป็นฝอยขนาดเล็กทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ ความหนืดของไบโอดีเซลขึ้นกับชนิดของน้ำมันที่ใช้เป็นวัตถุดิบ เกณฑ์มาตรฐานกำหนดให้ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส มีค่าในช่วง 3.5-5.0 เซนติสโตก (cSt) และความหนืดยังเป็นดัชนีแสดงการเสื่อมสภาพของไบโอดีเซล เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนโดยโมระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันมีผลต่อค่าความหนืดของไบโอดีเซลที่ผลิตได้นั้น จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มจำนวนเมทานอลต่อน้ำมันที่มากขึ้น ค่าความหนืดจะลดลงโดยเห็นได้ว่าที่อัตราส่วนโดยโมระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่ 3:1 จะทำให้ค่าความหนืดน้ำมันลดลงอย่างรวดเร็วจาก 32.4 เซนติสโตก เหลือที่ 9.4 เซนติสโตก แต่ค่าความหนืดที่ได้ยังไม่สามารถนำมาใช้เป็นอัตราส่วนในการผลิตไบโอดีเซลได้ เนื่องจากค่าความหนืดเกินมาตรฐานที่กรมธุรกิจพลังงานกำหนด เมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่ 6:1 พบว่าค่าความหนืดลดลงมาที่ 4.7 เซนติสโตก ซึ่งอยู่ในช่วงค่ามาตรฐานความหนืดของไบโอดีเซลที่กรมธุรกิจพลังงานกำหนด ทั้งค่ามาตรฐานชุมชน (1.9-8.0 เซนติสโตก) และมาตรฐานเชิงพาณิชย์ (3.5-5.0 เซนติสโตก) และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่ 9:1 และ 12:1 พบว่าค่าความหนืดลดลงมาที่ 4.6 เซนติสโตก แสดงดังภาพที่ 23

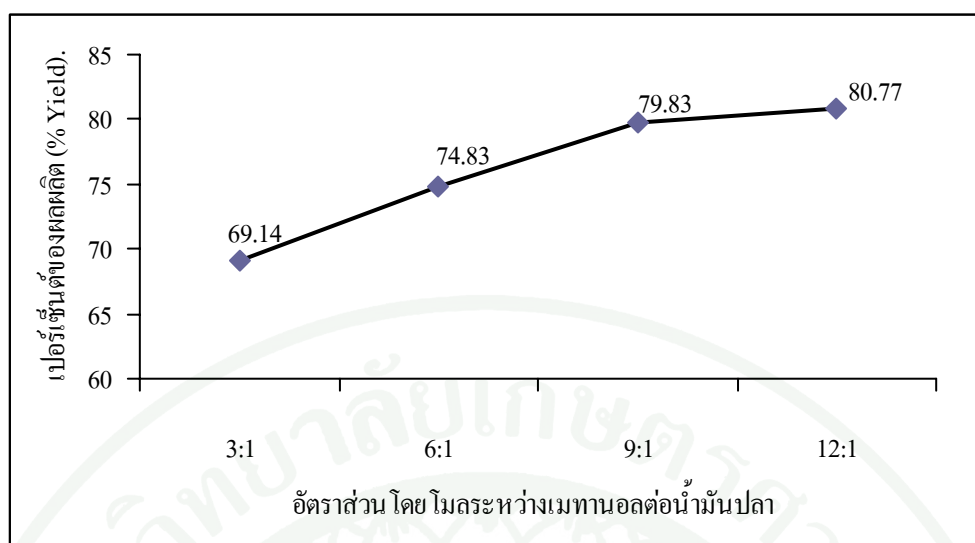


ภาพที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปลาที่มีผลต่อค่าความหนืดของไบโอดีเซลโดยทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

3.2.1.2 ผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันปลาที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ของผลผลิต (%Yield)

สมการการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันในกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันนั้น โดยทั่วไปใช้อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันที่ 3:1 แต่เนื่องจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน เป็นปฏิกิริยาแบบผันกลับ แอลกอฮอล์ที่ใช้ในปฏิกิริยาจึงต้องมีปริมาณมากพอที่จะทำให้ปฏิกิริยาเกิดไปทางขวามากขึ้น ซึ่งจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์มากขึ้น

ในการเพิ่มปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลให้สูงจึงต้องทำการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน เนื่องจากอัตราส่วนโดยโมลที่เพิ่มขึ้นระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันทำให้การสัมผัสระหว่างโมเลกุลของเมทานอลและน้ำมันเพิ่มมากขึ้น ทำให้การเปลี่ยนไปเป็นเอสเทอร์มากขึ้นจนถึงจุดสมดุล แสดงดังภาพที่ 24 แต่ปัญหาของอัตราส่วนปริมาณเมทานอลที่มากเกินไปจะทำให้เกิดการละลายของน้ำมันในเมทานอลมากขึ้น ส่งผลให้การแยกกลีเซอรินออกจากน้ำมันทำได้ยาก

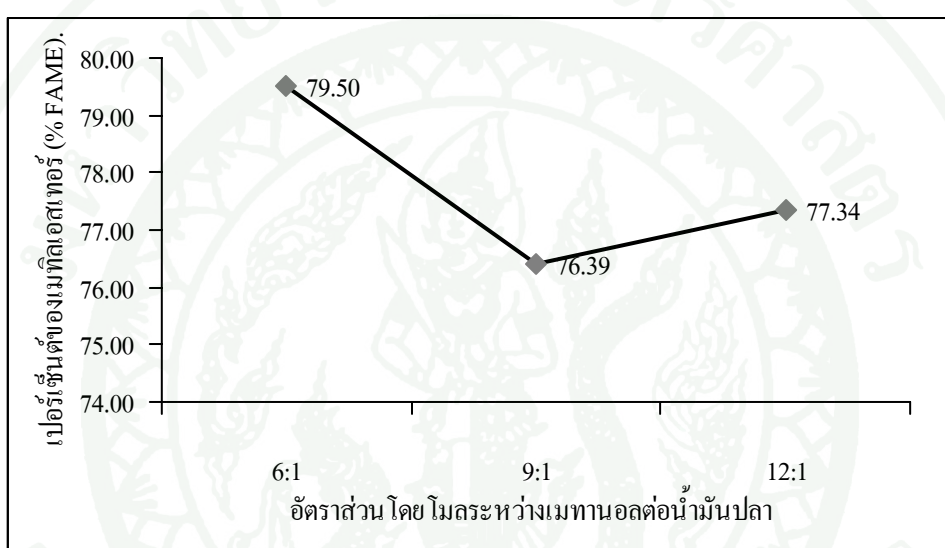


ภาพที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปลาที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ผลผลิต โดยทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

3.2.1.3 ผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันปลาที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ของเมทิลเอสเทอร์ (%FAME)

การผลิตไบโอดีเซลต้องคำนึงถึงคุณภาพของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ด้วย โดยน้ำมันไบโอดีเซล (เมทิลเอสเทอร์) ที่ผลิตด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันกับเมทานอล นั้นคุณภาพหลักวัดในรูปเปอร์เซ็นต์ของเมทิลเอสเทอร์ (%FAME) ซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์ของเมทิลเอสเทอร์ที่สูงแสดงถึงความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซล และการเกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ โดยมาตรฐานกำหนดให้มีปริมาณมากกว่า 96.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อปริมาณเอสเตอร์น้อยกว่าที่กำหนด แสดงถึงยังมีโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ หรือไตรกลีเซอไรด์อยู่ในไบโอดีเซลในปริมาณที่สูงกว่าที่กำหนด ส่งผลให้ความหนืดมีค่าสูง และเกี่ยวเนื่องกับการอุดตันในหัวฉีด หรือกระบอกสูบของเครื่องยนต์ และจากการนำน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากขั้นตอนแรกโดยการศึกษาอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่ 6:1, 9:1 และ 12:1 ให้ค่าความหนืดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานจึงนำน้ำมันที่ผลิตจากอัตราส่วนดังกล่าวมาศึกษาถึงอัตราส่วนที่ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ของเมทิลเอสเทอร์สูงที่สุด เพื่อนำมาศึกษาภาวะเพิ่มเติม โดยผลศึกษาพบว่าอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่ 3:1 นั้นให้ค่าความหนืดที่สูงเกินมาตรฐานจึงไม่นำไปศึกษาเปอร์เซ็นต์ของเมทิลเอสเทอร์และเมื่อนำอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่ 6:1, 9:1 และ 12:1 มาทำการศึกษาคูณภาพของเมทิลเอส

เทอร์ในรูปของเปอร์เซ็นต์ของเมทิลเอสเทอร์พบว่าอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่ 6:1 ให้ค่าเปอร์เซ็นต์ของเมทิลเอสเทอร์สูงสุดคือ 79.50 อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันที่ 9:1 และ 12:1 ให้ค่าเปอร์เซ็นต์ของเมทิลเอสเทอร์ที่ 76.39 และ 77.34 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าลดลงจากอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่ 6:1 เห็นได้ว่าเมื่อปริมาณเมทานอลมากขึ้นทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ของเมทิลเอสเทอร์ลดลง เนื่องจากปริมาณเมทานอลที่มากขึ้นส่งผลให้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ลดลง ส่งผลให้การเร่งปฏิกิริยาลดลงไปส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ของเมทิลเอสเทอร์ลดลงดังกล่าว แสดงดังภาพที่ 25



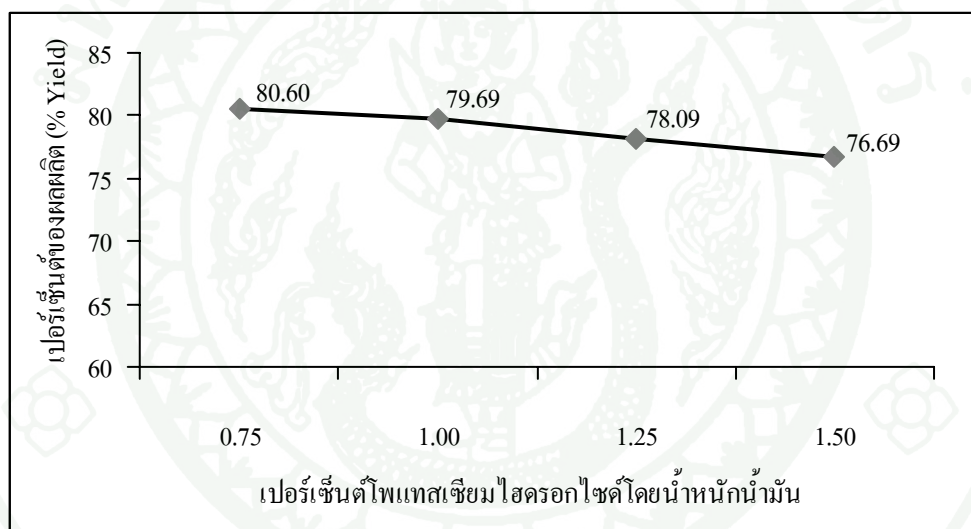
ภาพที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล ต่อน้ำมันที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ของเมทิลเอสเทอร์ โดยทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

3.2.2 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (น้ำมันปลาที่ใช้ผ่านกระบวนการเอสเทอริฟิเคชันจนค่ากรดไขมันอิสระ < 2 เปอร์เซ็นต์)

3.2.2.1 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ของผลผลิต (%Yield)

จากการเลือกอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่ 6:1 ที่ให้ค่าความหนืดที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน อีกทั้งให้ค่าเปอร์เซ็นต์ของเมทิลเอสเทอร์ที่สูงที่สุด จึงนำ

อัตราส่วนดังกล่าวมาศึกษาถึงปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ในการทำปฏิกิริยาที่ให้ค่าเปอร์เซ็นต์ของเมทิลเอสเทอร์สูงสุด โดยสภาวะที่ใช้ทดลองคือ ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ 0.75, 1.00, 1.25 และ 1.50 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักน้ำมันตามลำดับ มีสภาวะการทดลองอื่นๆคงที่ คือ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6:1 อุณหภูมิในการทดลอง 60 ± 2 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยารีฟลักซ์ 30 นาที พบว่าปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อร้อยละของผลผลิต เห็นได้ว่าที่ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันให้เปอร์เซ็นต์ของผลผลิตสูงสุดคือ 80.60 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เพิ่มมากขึ้น เปอร์เซ็นต์ของผลผลิตจะลดลง เนื่องจากโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับกรดไขมันอิสระเกิดเป็นสบู่ ทำให้ในการแยกผลิตภัณฑ์มีชั้นของสบู่เกิดขึ้นระหว่างชั้นกลีเซอรอลและเมทิลเอสเทอร์ แสดงดังภาพที่ 26

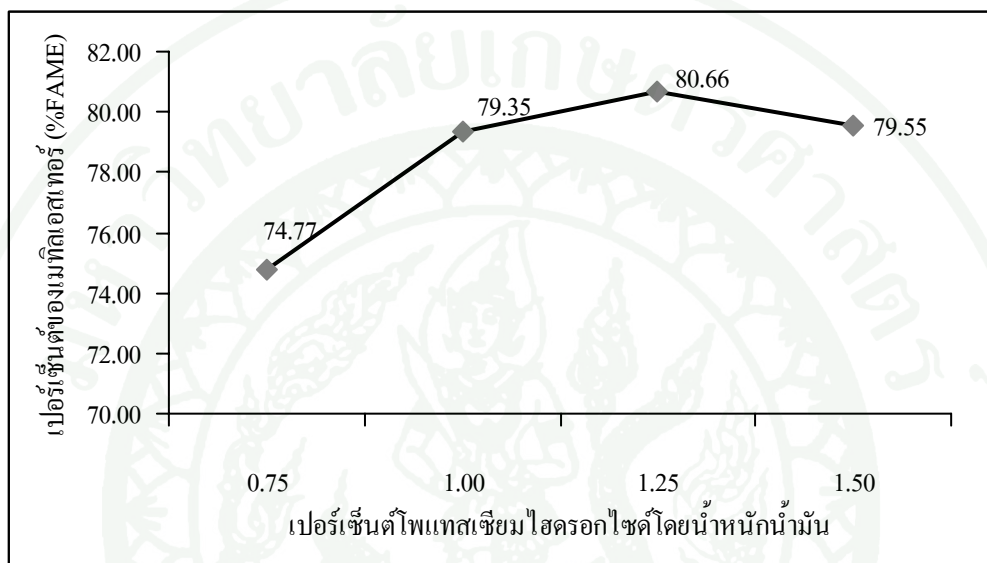


ภาพที่ 26 ความสัมพันธ์ของปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ของผลผลิตโดยทำปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอริฟิเคชันที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ทำปฏิกิริยาที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

3.2.2.2 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ของเมทิลเอสเทอร์ (%FAME)

เมื่อศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ทำให้เปอร์เซ็นต์ของเมทิลเอสเทอร์ มากที่สุด โดยอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่ 6:1 ทำ

ปฏิกิริยาที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที พบว่าที่ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักน้ำมัน ให้ค่าเปอร์เซ็นต์ของเมทิลเอสเทอร์มากที่สุดคือ 80.66 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเห็นได้ว่าค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ลดลง ดังนั้นการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากเกินไป นอกจากไม่ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นแล้ว ทั้งยังทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการล้างเอาตัวเร่งปฏิกิริยาออก แสดงดังภาพที่ 27



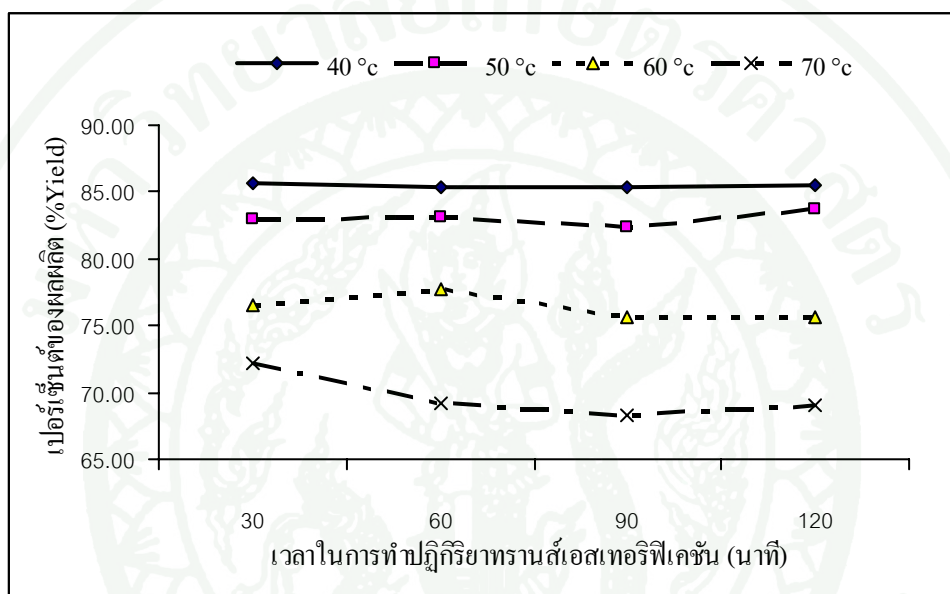
ภาพที่ 27 ความสัมพันธ์ของปริมาณ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ของเมทิลเอสเทอร์โดยทำปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ทำปฏิกิริยาที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

ในการศึกษาครั้งนี้ต้องการเมทิลเอสเทอร์ที่มีคุณภาพที่ดีที่สุด จึงใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่ 6:1 ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา นำมาศึกษาหาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลาที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ของผลผลิตและเปอร์เซ็นต์ของเมทิลเอสเทอร์

3.2.3 ผลการศึกษาเวลาและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ของผลผลิต (%Yield) (น้ำมันปลาที่ใช้ผ่านกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชันจนค่ากรดไขมันอิสระ < 2 เปอร์เซ็นต์)

จากผลการวิจัยพบว่าที่เวลาในการทำปฏิกิริยาเดียวกัน เมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์ของผลผลิตที่ได้ลดลง เนื่องมาจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นเป็นการเร่งการ

เกิดปฏิกิริยาการเกิดสบู่ ซึ่งการเกิดสบู่เนื่องทำให้รบกวนการแยกชั้นของไบโอดีเซล ทำให้เปอร์เซ็นต์ของผลผลิตน้อยลง อีกทั้งอุณหภูมิที่สูงมากกว่าจุดเดือดของเมทานอล อาจทำให้มีการสูญเสียเมทานอลออกไปนอกระบบทำให้เปอร์เซ็นต์ของผลผลิตลดลงดังกล่าว ส่วนที่อุณหภูมิเดียวกัน เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นพบว่าส่งผลน้อยต่อปริมาณของผลผลิต อาจเนื่องมาจากการวิจัยครั้งนี้ใช้ปริมาณน้ำมันตัวอย่างเพียง 50 กรัม และในขั้นตอนการล้างผลิตภัณฑ์อาจมีการสูญเสียปริมาณของผลผลิตไปด้วย ทำให้ความแตกต่างที่เกิดขึ้นของเปอร์เซ็นต์ของผลผลิตในแต่ละช่วงเวลาไม่ชัดเจน

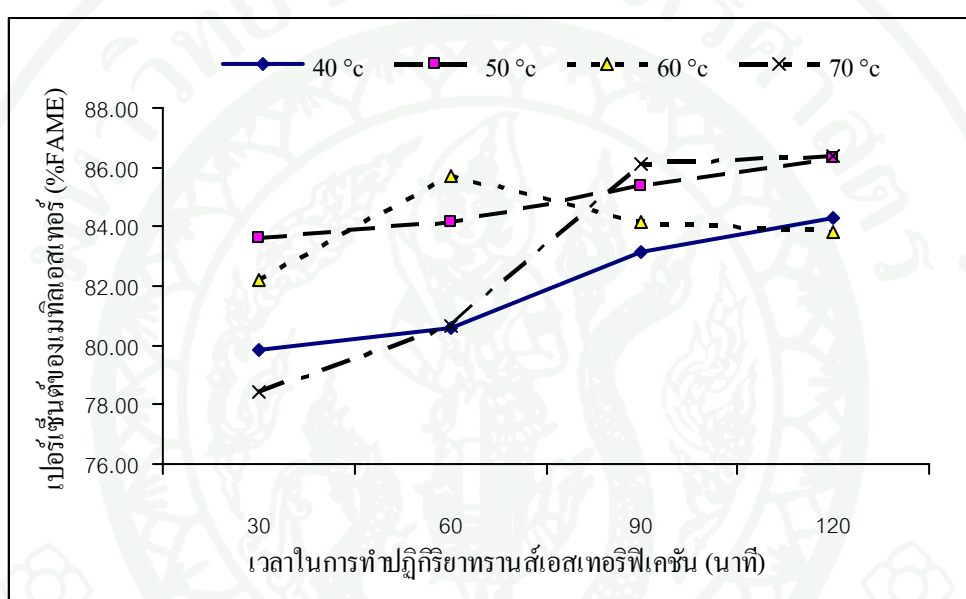


ภาพที่ 28 ความสัมพันธ์ของเวลาและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ของผลผลิต โดยทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

3.2.4 ผลการศึกษาเวลาและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ของเมทิลเอสเทอร์ (%FAME) (น้ำมันปลาที่ใช้ผ่านกระบวนการเอสเทอริฟิเคชันจนค่ากรดไขมันอิสระ < 2 เปอร์เซ็นต์)

จากผลการวิจัยพบว่า ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเดียวกัน เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ปฏิกิริยาจะเกิดสมบูรณ์มากขึ้น ส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์ของเมทิลเอสเทอร์มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Meher *et al.*, (2006) ที่พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะแปรผันโดยตรงกับเวลา คือที่อุณหภูมิเดียวกัน เวลาในการทำปฏิกิริยามากขึ้น จะทำให้ได้เปอร์เซ็นต์ของ

เมทิลเอสเทอร์มากขึ้น ยกเว้นที่อุณหภูมิ 60 องศา เห็นได้ว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ลดลงอาจเนื่องมาจากการใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาที่นานไปจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเอสเทอร์ขึ้น เกิดปฏิกิริยาการย้อนกลับของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันส่งผลให้ปริมาณเอสเทอร์ที่ได้มีค่าลดลง สอดคล้องกับการศึกษาของ Leunge and Guo (2006) ในส่วนของอุณหภูมิพบว่าอุณหภูมิที่ให้ค่าเปอร์เซ็นต์ของเมทิลเอสเทอร์สูงส่วนใหญ่อยู่ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับ Ramadhas et al.(2005) ที่พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงเป็นเอสเทอร์จะเกิดในอัตราที่เร็วกว่า โดยพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 45 ± 5 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 29 ความสัมพันธ์ของเวลาและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ของเมทิลเอสเทอร์ โดยทำปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

4. สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล

จากการพิจารณาไบโอดีเซลในหน่วยของกรัมเปอร์เซนต์ไบโอดีเซลนั้นได้เลือกสภาวะการผลิตที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่ 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ 50 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที ให้ค่ากรัมเปอร์เซนต์ไบโอดีเซลที่สูงที่สุดคือ 72.49 กรัมเปอร์เซนต์ไบโอดีเซล

5. ค่าคุณสมบัติของไบโอดีเซล

จากไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากน้ำมันปลาในระบบบำบัดน้ำเสีย เมื่อนำมาทดสอบคุณภาพของน้ำมันพบว่าไบโอดีเซลที่ได้มีคุณภาพผ่านเกณฑ์มาตรฐานไบโอดีเซลชุมชน ซึ่งสามารถนำไปใช้กับเครื่องยนต์การเกษตรรอบต่ำได้ แสดงดังตารางที่ 14

ตารางที่ 14 ผลการตรวจวัดคุณภาพน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปลาที่มาจากระบบบำบัดน้ำเสีย

รายการ	หน่วย	ผลวิเคราะห์	ค่ามาตรฐาน EN 14214	ค่ามาตรฐาน ชุมชน
เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ (%FAME) EN 14103	เปอร์เซ็นต์ (%)	86.30	96.50	-
ค่าความเป็นกรด (Acid value)	มิลลิกรัม โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม (mgKOH/g)	0.34	<0.5	<0.8
ความหนืดของไบโอดีเซล ¹ ASTMD445	เซนติสโตรกส์ (cSt)	4.1	3.5-5.0	1.9-8.0
ความหนาแน่น ² ที่ 15 °C ASTM 4050-96(2002)	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m ³)	885.1	860-900	860-900
จุดไหลเท ² ASTM D5950-02 ²	องศาเซลเซียส (°C)	-3	-	-
ค่าความร้อนการเผาไหม้แบบ กรอส (gross) ² ASTM D240-02(2007)	เมกกะจูลต่อกิโลกรัม (MJ/kg)	39.95	-	-
จุดวาบไฟ (แบบถ้วยปิดเพนสกี- มาร์เทนส์) ² ASTMD93-08	องศาเซลเซียส (°C)	176.5	>120	>120

ที่มา: ¹วิเคราะห์โดยโครงการเคยูไบโอดีเซล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

²วิเคราะห์โดยกรมวิทยาศาสตร์บริการ

6. ต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปลา (สารเคมีเกรดอุตสาหกรรม)

การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปลา 1 ลิตร จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอนสามารถผลิตไบโอดีเซลได้ 0.84 ลิตร มีค่าใช้จ่ายสารเคมี 9.87 บาท หรือคิดเป็นค่าใช้จ่ายสารเคมี 11.76 บาทต่อ 1 ลิตรไบโอดีเซลที่ผลิตได้ (การคำนวณตามภาคผนวก ก)

ตารางที่ 15 ต้นทุนการผลิตไบโอดีเซล 1 ลิตร

กระบวนการ	สารเคมี	ราคา (บาท)
กระบวนการเอสเทอริฟิเคชัน	เมทานอล	5.25
	กรดซัลฟูริก	0.21
กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน	เมทานอล	5.07
	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (95 เปอร์เซ็นต์)	1.23
รวม		11.76

หมายเหตุ ราคาสารเคมีอ้างอิงจากบริษัทเอิร์ท เคมีแลป จำกัด

ราคานี้ไม่รวมขั้นตอนการกำจัดความชื้นออกจากน้ำมันปลาด้วยซิลิกาเจลและการกำจัดตะกอนที่ปนเปื้อน

7. ปริมาณไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากไขมันปลาจากระบบบำบัดน้ำเสีย

ไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากการวิจัยครั้งนี้ใช้กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ขั้นตอน และตัวอย่างน้ำมันที่ได้มาจากบ่อดักไขมันของโรงงาน พบว่าน้ำมันปลา 1 ลิตร เมื่อผ่านกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอน สามารถให้ผลผลิตไบโอดีเซลที่ 0.84 ลิตร ซึ่งจากปริมาณไขมันและน้ำมันจากบ่อดักไขมัน (GW-GT) ของโรงงานจำนวน 11.30 ลิตรต่อวันนั้นสามารถผลิตไบโอดีเซลได้ 9.49 ลิตรต่อวัน คิดเป็น 2,800 ลิตรต่อปี และถ้าสามารถนำไขมันและน้ำมันจากระบบบำบัดน้ำเสียมาผลิตไบโอดีเซลได้ทั้งหมดได้ผลแสดงดังตารางที่ 16

ตารางที่ 16 ปริมาณไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากระบบบำบัดน้ำเสีย

แหล่งที่มา	ไบโอดีเซล (ลิตรต่อวัน)	ไบโอดีเซล (ลิตรต่อปี)
1.ไขมันและน้ำมัน จากบ่อดักไขมัน (GW-GT)	9.49	2,800
2.ไขมันและน้ำมัน จากถัง DAF (GW-DAF)	12.72	3,752
รวมไขมันและน้ำมันจากระบบ บำบัดน้ำเสีย (1+2)	22.21	6,552

หมายเหตุ การคำนวณดูรายละเอียดตามภาคผนวก ก

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากไขมันปลาจากระบบบำบัดน้ำเสียโดยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน และจากน้ำมันปลาในแต่ละครั้งที่ทำการเก็บตัวอย่างจะมีค่ากรดไขมันอิสระไม่เท่ากัน เนื่องจากชนิดและสัดส่วนของปลาที่ใช้ในการผลิต โดยน้ำมันปลาที่ทำการแยกออกมาจากระบบบำบัดน้ำเสียที่มีค่ากรดไขมันอิสระมากกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ (เทียบกับกรดโอเลอิก) ไม่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันด้วยเบสเพียงขั้นตอนเดียวเนื่องจากจะส่งผลให้คุณภาพและปริมาณของไบโอดีเซลที่ได้ต่ำ ต้องทำให้น้ำมันปลาตัวอย่างเข้าสู่กระบวนการลดปริมาณกรดไขมันอิสระด้วยกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชันด้วยกรดก่อน เพื่อให้กรดไขมันอิสระทำปฏิกิริยากับกรดกลายเป็นเอสเทอร์ จึงเข้าสู่กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันด้วยเบสเพื่อผลิตน้ำมันไบโอดีเซลต่อไป

1. การวิเคราะห์ปริมาณไขมันและน้ำมัน

จากการเปรียบเทียบปริมาณไขมันและน้ำมันในบ่อดักไขมัน (Grease Trap) และในกากของเสียที่ออกจากระบบ Dissolved-Air Flotation พบว่าการเก็บตัวอย่างน้ำมัน และการแยกน้ำมันบริเวณบ่อดักไขมันมีความสะดวกกว่าในการเก็บตัวอย่างและสกัดน้ำมันจากเศษกากตะกอนที่ออกจากระบบ Dissolved-Air Flotation ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้จึงใช้ไขมันและน้ำมันจากบ่อดักไขมันเพื่อการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล

2. สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลและคุณสมบัติของไบโอดีเซล

สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากไขมันปลาที่มาจากระบบบำบัดน้ำเสียนั้นพบว่าเมื่อนำน้ำมันปลาผ่านกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชันให้กรดไขมันอิสระน้อยกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ แล้วนั้นให้ปริมาณผลผลิตที่ 96.60 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อนำน้ำมันปลามีกรดไขมันอิสระที่น้อยกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ (เทียบกับกรดโอเลอิก) ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อผลิตเป็นไบโอดีเซลที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันปลา 6:1 ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักน้ำมันปลาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำการกวนผสมที่ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 120 นาที ให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงสุด ดังนั้น

เมทิลเอสเทอร์จากสถานะนี้จึงมีคุณภาพสูงสุด เนื่องจากปริมาณของเมทิลเอสเทอร์ที่สูงแสดงถึงความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซล และการเกิดปฏิกิริยาการผลิตไบโอดีเซลที่สมบูรณ์ ซึ่งจากการทดสอบค่าร้อยละเมทิลเอสเทอร์พบว่าไบโอดีเซลที่สภาวะดังกล่าวให้ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ 86.30 เปอร์เซ็นต์ และให้เปอร์เซ็นต์ของผลผลิตที่ 83.70 เปอร์เซ็นต์ คิดเป็นหน่วยกรัมเปอร์เซ็นต์ไบโอดีเซลที่ 72.49 เปอร์เซ็นต์ จึงนำไบโอดีเซลที่ผลิตได้ที่สภาวะดังกล่าวมาทดสอบ เปอร์เซ็นต์ของเมทิลเอสเทอร์, ค่าความหนืด, ค่าความเป็นกรด, ค่าความหนาแน่นที่ 15 องศาเซลเซียส, จุดไหลเท, ค่าความร้อน และจุดวาบไฟพบว่าคุณสมบัติเป็นไปตามข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน) ที่ประกาศโดยโดยกรมธุรกิจพลังงานซึ่งเครื่องยนต์การเกษตร หมายความว่า เครื่องยนต์สูบลมเดียว 4 จังหวะ สูบนอน ระบายความร้อนด้วยน้ำ

3. ต้นทุนค่าสารเคมีในการผลิตไบโอดีเซล 1 ลิตร

ต้นทุนค่าสารเคมีในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปลาจากระบบบำบัดน้ำเสียในกรณีที่ใช้เปอร์เซ็นต์กรดไขมันอิสระของน้ำมันปลาตัวอย่างมากกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ ต้องใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอนซึ่งใช้ต้นทุนสารเคมีในการผลิต 11.76 บาทต่อลิตรไบโอดีเซลที่ผลิตได้

4. ปริมาณและผลตอบแทนของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ (จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอน)

การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปลา 1 ลิตร จากระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอนสามารถผลิตไบโอดีเซลได้ 0.84 ลิตร ถ้าสามารถนำไขมันและน้ำมันจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานตัวอย่างทั้งส่วนของบ่อดักไขมันและจากถัง DAF มาผลิตไบโอดีเซลจะได้ไบโอดีเซล 22.21 ลิตรต่อวัน หรือ 6,552 ลิตรต่อปี

จากข้อมูลในการวิจัยพบว่าต้นทุนค่าสารเคมีในการผลิตไบโอดีเซลจากไขมันปลาในระบบบำบัดน้ำเสียพบว่ามีราคา 11.76 บาทต่อลิตร ดังนั้นเมื่อคิดเทียบกับราคาไบโอดีเซลที่มาจากน้ำมันปาล์มที่มีราคา 31.75 บาทต่อลิตร (รายละเอียดการคำนวณตามภาคผนวก ก) พบว่าไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากไขมันปลามีราคาถูกกว่าไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม 19.99 บาทต่อลิตร

ถ้าต้องซื้อน้ำมันไบโอดีเซลปาล์ม 22.21 ลิตรต่อวัน และ 6,552 ลิตรต่อปีคิดเป็นค่าใช้จ่ายในการซื้อน้ำมัน 705 บาทต่อวัน หรือ 208,026 บาทต่อปีตามลำดับ

ถ้าสามารถนำไขมันและน้ำมันจากระบบบำบัดน้ำเสียทั้งหมดทำการผลิตไบโอดีเซลได้ 22.21 ลิตรต่อวัน และ 6,552 ลิตรต่อปี คิดเป็นค่าใช้จ่ายสารเคมีในการผลิต 261 บาทต่อวันและ 77,052 บาทต่อปี สามารถให้ผลตอบแทนเมื่อเทียบกับการซื้อน้ำมันไบโอดีเซลปาล์มในปริมาณเท่ากันได้ถึง 444 บาทต่อวันและ 130,974 บาทต่อปี ตามลำดับ

5. ข้อเสนอแนะในงานวิจัย

1. การเก็บรักษาน้ำมันปลาที่ออกมาจากระบบบำบัดน้ำเสีย ควรทำการแยกน้ำมันปลาเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อรักษาสภาพของน้ำมันปลา ไม่ให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ที่อาจเกิดขึ้นจากไขมันหรือน้ำมันได้รับความร้อนสูง ซึ่งไขมันและน้ำมันจะถูกไฮโดรไลซ์เป็นกรดไขมันอิสระและกลีเซอรอล ซึ่งปริมาณกรดไขมันอิสระที่มากกว่า 2 เปอร์เซ็นต์นี้ จะส่งผลให้การผลิตไบโอดีเซลให้ได้คุณภาพที่ดีต้องผ่านกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อลดปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันให้มีค่า < 2 เปอร์เซ็นต์ ก่อนเข้าสู่กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อผลิตเป็นไบโอดีเซล

2. การวิจัยนี้เพื่อให้ได้ปริมาณร้อยละของการผลิตมากที่สุด ในกรณีที่ปริมาณกรดไขมันอิสระในตัวอย่ำน้ำมันปลามากกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ จึงมีกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อเปลี่ยนให้กรดไขมันอิสระส่วนเกินทำปฏิกิริยากับกรดเกิดเป็นเอสเทอร์ ดังนั้นเมื่อเข้าสู่กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันด้วยเบสเพื่อผลิตไบโอดีเซลจึงเกิดสบู่น้อย ส่งผลให้ร้อยละของการผลิตมาก แต่อาจใช้การผลิตแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเบสเพียงขั้นตอนเดียวได้ โดยการคำนวณปริมาณเบสที่ไปทำปฏิกิริยากับกรดไขมันอิสระในน้ำมันจนกลายเป็นสบู่ (ตามภาคผนวก ก) แล้วจึงใช้ปริมาณเบสตามการวิจัยที่ 1.25 เปอร์เซ็นต์ โดยนำน้ำหนักน้ำมันเข้าสู่ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเพียงขั้นตอนเดียว แต่วิธีนี้ร้อยละผลผลิตที่ได้จะต่ำกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอนเนื่องจากกรดไขมันอิสระในน้ำมันทำปฏิกิริยากับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เกิดเป็นสบู่ ทำให้ปริมาณไบโอดีเซลที่ได้ลดลง

3. คำนึงถึงการจัดการกลีเซอรินที่เป็นผลพลอยได้จากการผลิตไบโอดีเซล การผลิตไบโอดีเซลมีปริมาณกลีเซอรินดิบเกิดขึ้น 10-15 โดยน้ำหนักของปริมาณผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซล และมีกลีเซอรอลร้อยละ 30-60 โดยน้ำหนักขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิต กลีเซอรินดิบที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลมีองค์ประกอบของกลีเซอริน สบู่ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ไบโอดีเซล เมทานอล และน้ำ ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลยังไม่สามารถนำกลีเซอรอลมาใช้ประโยชน์ได้โดยตรง เนื่องจากต้องเสียค่าใช้จ่ายในการลงทุนค่อนข้างสูง อย่างไรก็ตามกลีเซอรอลที่ได้จากกระบวนการ

ผลิตไบโอดีเซลสามารถนำมาใช้ในการเผาเพื่อให้พลังงานความร้อนที่สามารถนำกลับไปใช้ในกระบวนการผลิต หรือนำกลับไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตกลีเซอรินบริสุทธิ์

4. คำนึงถึงความปลอดภัยในการดำเนินงาน โดยเฉพาะการดำเนินงานกับเมทานอล ซึ่ง เป็นสารอันตรายและไวไฟ

5. การกำจัดน้ำในน้ำมันปลาเริ่มต้นเมื่อกำจัดตะกอนที่ปนเปื้อนมาแล้ว อาจใช้การระเหย เอน้ำออกที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที และการกำจัดน้ำในไบโอดีเซลอาจให้น้ำมันผ่านชั้นเกลือสินเธาว์เพื่อดูดซับน้ำแทนได้เนื่องจากมีราคาถูก และต้องมีการกรองน้ำเกลือ ออกไม่ให้ปนเปื้อนไปกับไบโอดีเซล

ข้อเสนอแนะ

1. ราคาต้นทุนในการผลิต ส่วนใหญ่จะแปรผันตามราคาของเมทานอล และเมื่อมีการพัฒนาต่อไป อาจใช้เอทานอลที่สามารถผลิตเองในประเทศจากผลผลิตทางเกษตรกรรม ซึ่งอาจมีราคาถูกกว่าราคาของเมทานอลที่นำเข้า แต่เอทานอลที่ใช้จะต้องปราศจากน้ำ เนื่องจากจะส่งผลต่อคุณภาพไบโอดีเซล

2. ในบริเวณดังกล่าว การดักแยกไขมันออกมารวมถึงการดักแยกตะกอนชิ้นส่วนปลาด้วยซึ่ง เศษชิ้นส่วนปลาเหล่านี้มีส่วนของน้ำมันที่สามารถนำมาสกัดแยกน้ำมันและไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้ โดยต้องมีการศึกษาถึงสัดส่วนปริมาณน้ำมันที่ได้ออกมาจึงสามารถสรุปได้ถึงความเหมาะสมในการนำไปใช้ประโยชน์

3. ควรมีการศึกษาหาวิธีการแยกไขมันและน้ำมันในกากของเสียที่ออกมาจากถัง Dissolved-Air Flotation เพื่อนำไขมันและน้ำมันในส่วนดังกล่าวมาทำการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งเป็นการเพิ่มปริมาณไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากไขมันและน้ำมันที่อยู่ในน้ำเสียของโรงงานตัวอย่าง

4. ควรมีการนำไบโอดีเซลที่ผลิตได้ไปทำการทดสอบกับเครื่องยนต์การเกษตรเพื่อดู ประสิทธิภาพในการใช้งานจริง

5. ควรมีการศึกษาค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียที่มากจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากน้ำที่ผ่านการล้างไบโอดีเซลจะมีค่าความเป็นด่างสูงจากปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาส่วนเกิน

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. 2548. แนวปฏิบัติที่ดี ด้านการป้องกันและลดมลพิษ อุตสาหกรรมอาหารทะเล
แช่เยือกแข็งประเภทปลา. เล่มที่ 7/8 มกราคม 2548

กรรณิการ์ สิริสิงห. 2549. เคมี่ของน้ำ น้ำโสโครก และการวิเคราะห์. คณะวิทยาศาสตร์และ
เทคโนโลยี สถาบันราชภัฏจันทรเกษม, กรุงเทพฯ.

กองบรรณาธิการ. 2551. สิ่งแวดล้อม. ไทยโพสต์, แหล่งที่มา:
http://www.thaipost.net/index.asp?bk=sunday&post_date=20/Jan/2551&news_id=153349&cat_id=110400, 28 สิงหาคม, 2551.

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2539. วิศวกรรมกำจัดน้ำเสีย เล่ม 2 . มิตรนราการพิมพ์, กรุงเทพฯ.

จุฑาเกศ เทียนเมธางกูร. 2551. การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันที่ผ่านการใช้ทอดแล้วโดย
กระบวนการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ชินนัท สินประเสริฐโชติ. 2549. การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันทานตะวันโดยใช้
คาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤตเป็นตัวกลาง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ณัฐมณฑน์ ลีจินดา. 2549. การผลิตไบโอดีเซลจากปาล์มสเตียรีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธ
พันธ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คุณฐิ รัตนพระ. 2549. การตรึงไลเปสจาก *Pseudomonas fluorescens* เพื่อผลิตไบโอดีเซลจาก
เมล็ดทานตะวัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ทัศนีย์ สวัสดิ์พาณิชย์. 2550. การหาสภาวะที่เหมาะสมทางสถิติของการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมัน
สบู่ดำด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา. วิทยานิพนธ์
ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นฤภา อากะพงษ์. 2552. การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ของเสียปลาทะเลจากโรงงานอาหาร
ทะเลแช่แข็งเพื่อผลิตไบโอดีเซล

นิธิยา รัตนานนท์. 2548. วิทยาศาสตร์การอาหารของไขมันและน้ำมัน. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์
, กรุงเทพฯ

ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน. 2550. กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอส
เทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2550. ราชกิจจานุเบกษา. แหล่งที่มา:
http://www.dede.go.th/dede/fileadmin/user_bers/biodiesel/biodiesel_2007.pdf, 28
สิงหาคม, 2551.

พจนีย์ แซ่อ่อง. การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยใช้
ไมโครเวฟ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พนมพร ธนอมทรัพย์. 2544. ไบโอดีเซล: เชื้อเพลิงแห่งยุค. คอลัมน์ โลกสิ่งแวดลอม
แหล่งที่มา: <http://www.moph.go.th/ops/doctor/drOct44/world801.doc>, 28 สิงหาคม,
2551.

มันสิน ตันจุลเวศม์. 2545. เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะ
วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

วีระ ดังชาล. 2545. **เคมีของน้ำและการบำบัดน้ำเสีย**. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, กรุงเทพฯ.

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย(วว.). 2549. **รอบรู้เรื่องราวไบโอดีเซล**. พิมพ์พินิจ การพิมพ์, กรุงเทพฯ.

สมพงศ์ จันทร์โพธิ์ศรี. 2542. **เคมีอินทรีย์ เล่ม 2**. ศูนย์ส่งเสริมวิชาการ กรุงเทพฯ.

สันทนต์ ศิริอนันต์ไพบุลย์. 2549. **ระบบบำบัดน้ำเสีย: การเลือกใช้ การออกแบบ การควบคุม และการแก้ไขปัญหา**. ท้อป, กรุงเทพฯ.

สุเทพ สิริวิทย์ปกรณ. 2550. **เทคโนโลยีน้ำเสีย**. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สุวภัทร์ อภัยสุวรรณ. 2550. **การศึกษาการเปรียบเทียบการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤตเป็นตัวกลางกับวิธีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Adam Karl Khan. 2002. **Kinetics and catalyst Development**. M.S. Thesis, University of Queensland.

Agarwal A.K. 2007. Biofuels (alcohols and biodiesel) application as fuels for internal combustion engines. **Energy and Combustion Science**. 33: 233-271

Al-Shamrani, A.A. 2002. Separation of oil from water by dissolved air floatation. **Colloids and surfaces. A: Physicochemical and Engineering Aspects**. 209: 15-26.

- Arvanitoyannis, L. 2008. **Waste management for the Food Industries**. Food Science and Technology, International Series.
- Bhatti, H.N., M.A. Hanif, M. Qasim and Ata-ur-Rehman. 2008. Biodiesel production from waste tallow. **Fuel**. 87(13-14): 2961-2966.
- Cammarota, M.C. and D.M.G.Freire . 2006. A Review on hydrolytic enzymes in the treatment of wastewater with high oil and grease content. **Bioresource Technology**. 97: 2195-2210.
- Canaki, M. 2007. The potential of restaurant waste lipids as biodiesel feedstocks. **Bioresource Technology**. 98: 183-190.
- Canakci, M., and J.V. Gerpen,. 2001. A pilot plant to produce biodiesel from high free fatty acid feedstocks. Paper No. 016049, 2001 ASAE. **Annual International Meeting**. Sacramento, CA.
- Çaylı, G. and Selim Küsefoğlu. 2008. Increased yields in biodiesel production from used cooking oils by a two step process: Comparison with one step process by using TGA. **Fuel Processing Technology**. 89(2): 118-122.
- Chung, K., J. Kim and K. Lee. 2009. Biodiesel production by transesterification of duck tallow with methanol on alkali catalysts. **Biomass and Bioenergy**. 33(1): 155-158.
- Encinar J.M., J.F.González and A. Rodríguez-Reinares. 2007. Ethanolysis of used frying oil. Biodiesel preparation and characterization. **Fuel Processing Technology**. 88: 513–522
- Fukuda, H., A. Kondo and H Noda. 2001. Biodiesel fuel production by transesterification of oils. **Journal of Bioscience and Bioengineering**. 92(5): 405-416.

- Geraldes, V., A. Anil^a, M.N. Pinho^a, E. Duarte^b. 2008. Dissolved air flotation of surface water for spiral-wound module nanofiltration pre-treatment. **Desalination**. 228: 191-199.
- Gerpen, J.V. 2005. Biodiesel processing and production. **Fuel Processing Technology**. 86: 1097-1107.
- González, J.F. 1996. **Wastewater treatment in the fishery industry**. Fishery and aquaculture Department. Available Source: E:\DAF\Wastewater treatment in the fishery industry - 3_Primary Treatment.htm, August 28, 2008.
- Gui, M.M., K.T. Lee and S. Bhatia. 2008. Feasibility of edible oil vs. non-edible oil vs. waste edible oil as biodiesel feedstock. **Energy 33 (2008)**. 1646-1653
- Hamed M., El-Mashad, Ruihong Zhang, Roberto J. and Avena-Bustillos. 2008. A two-step process for biodiesel production from salmon oil. **Biosystem Engineering**. 99: 220-227.
- Issariyakul, T., Mengesh G.Kulkarni, Ajay K.Dalai and Narendra N. Bakhshi. 2007. Production of biodiesel from waste fryer grease using mixed methanol/ethanol system. **Fuel Processing Technology**. 88: 429-436.
- Knothe, G, Jon Van Gerpen and Jurgen Krah. 2005. **The Biodiesel Handbook**. Urbana, Ill : AOCS Press.
- Kouzu, M., T. Kasuno, M.Tajika, Y. Sugimoto, S. Yamanaka and J. Hidaka. 2008. Calcium oxide as a solid base catalyst for transesterification of soybean oil and its application to biodiesel production. **Fuel**. 2798-2806.
- Kumar, S., Gupta, A.K. and Naik. S.N. 2003. Conversion of non-edible oil into biodiesel. **Journal of Scientific and Industrial Research**. 62: 124-132.

- Kusdiana D. and S. Saka. 2004. Effects of water on biodiesel fuel production by supercritical methanol treatment. **Bioresource Technology**. 91: 289-295
- Leung, D.Y.C. and Y.Guo. 2006. Transesterification of neat and used frying oil: Optimization for Biodiesel production. **Fuel Processing Technology**. 87(10): 883-890
- Marchetti, J.M., V.U. Miguel and A.F.Errazu. 2007. Possible method for biodiesel production. **Renewable Energy Reviews**. 11: 1300 -1311.
- Marchetti, J.M. and A.F.Errazu. 2008. Comparison of different heterogeneous catalysts and different alcohols for the esterification reaction of oleic acid. **Fuel**. 87(15-16): 3477-3480
- Marchetti, J.M. and A.F.Errazu. 2008. Esterification of free fatty acids using sulfuric acid as catalyst in the presence of triglycerides. **Biomass and Bioenergy**. 32(9). 892-895.
- Meher, L.C., D.Vidya Sagar, S.N. Naik. 2006. Technical aspect of biodiesel production by transesterification-review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 10: 248-268.
- Meng, X., G. Chen, Y. Wang. 2008. Biodiesel production from waste cooking oil via alkali catalyst and its engine test. **Fuel Processing Technology**. 89(9): 851-857.
- Metcalf and Eddy. 2004. **Wastewater Engineering Treatment and Reuse fourth edition**. McGraw-Hill Companies, New York.
- Ozbay, N., N. Oktar, N. Alper Tapan. 2008. Esterification of free fatty acids in waste cooking oils (WCO): Role of ion-exchange resins. **Fuel**. 87: 1789–1798.

- Patil, P.D. and S. Deng. 2009. Optimization of biodiesel production from edible and non-edible vegetable oil. **Fuel**. 88(2009): 1302-1306
- Ramadhya, A.S., S. Jayaraj and C. Muraleedharan. 2005. Biodiesel production from high FFA Rubber seed. **Oil Fuel**. 84(4): 335-340
- Rashid, U., F. Anwar, B.R. Moser, S. Ashraf. 2008. Production of sunflower oil methyl esters by optimized alkali-catalyzed methanolysis. **Biomass and Bioenergy**. 32: 1202-1205.
- Reyes, J.F. and M.A. Sepúlveda. 2006. PM-10 emissions and power of a Diesel engine fueled with crude and refined Biodiesel from salmon oil. **Fuel**. 85(12-13): 1714-1719.
- Sawyer, C.N., Perry L. McCarty and Gene F. Parkin. 2003. **Chemistry for Environmental Engineering and Science fifth edition**. McGraw-Hill Companies, New York.
- Schinas, P., G. Karavalakis, C. Davaris, G. Anastopoulos, D. Karonis, F. Zannikos, S. Stournas and E. Lois. 2009. Pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) seed oil as an alternative feedstock for the production of biodiesel in Greece. **Biomass and Bioenergy**: 33: 44-49.
- Velluth, G. 1983. Performance of vegetable oils and their monoesters as fuels for diesel engines. **SAE Technical Paper Series no. 831358**. Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA.
- Wang, Y., S. Ou, P. Liu, F. Xue, S. Tang. 2006. Comparison of two different processes to synthesize biodiesel by waste cooking oil. **Journal of Molecular Catalysis A: Chemical**. 252: 107-112.
- Waste management and research center. **Feasibility report small scale biodiesel production**. Available Source: <http://www.p2pays.org/ref/40/39910.pdf>, August 28, 2008.





1. การคำนวณปริมาณไขมันและน้ำมันในระบบบำบัดน้ำเสีย

น้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัด

$$Q_0 = \text{ปริมาณน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียเฉลี่ย } 172 \text{ m}^3/\text{day}$$

ทำการวิเคราะห์ปริมาณไขมันและน้ำมัน (Grease and Oil) .ในตัวอย่างน้ำเสียด้วยวิธี Soxhlet Extraction

จากสูตร

$$\text{mg / L oil and grease} = \frac{\text{mg increase in weight of flask} \times 1,000}{\text{ml sample}}$$

แทนค่า

$$\begin{aligned} \text{mg / L oil and grease} &= \frac{0.0755 \times 10^3 \times 1,000}{500} \\ &= 151 \text{ mg/L} \end{aligned}$$

$$C_0 = \text{ปริมาณไขมันและน้ำมันในน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบบำบัด} = 151 \text{ mg/L}$$

จากสูตร

$$\text{ปริมาณไขมันและน้ำมันในน้ำเสียต่อวัน} = Q_0 \times C_0$$

แทนค่า

$$\begin{aligned} &= 172 \text{ m}^3/\text{day} \times 151 \text{ mg/L} \\ \text{ปริมาณไขมันและน้ำมันในน้ำเสียต่อวัน} &= 25.97 \text{ kg/day} \end{aligned}$$

ค่าความหนาแน่นของไขมันปลา 0.9198 g/cm^3 (วิเคราะห์โดยศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ)

จากสูตร

$$\rho = \frac{m}{v}$$

เมื่อ

ρ = หน่วยเป็น กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3) หรือ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m^3)

m = มวลสาร หน่วยเป็นกรัม (g) หรือ กิโลกรัม (kg)

v = ปริมาตร หน่วยเป็น ลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3) หรือลูกบาศก์เมตร (kg/m^3)

แทนค่า

$$0.9198 \text{ g/cm}^3 = \frac{25.97 \text{ kg}}{v}$$

$$v = 28.23 \text{ L}$$

ดังนั้นปริมาณไขมันและน้ำมันเท่ากับ 28.23 L/day

จากวันผลิตทั้งปีของโรงงาน 295 day

ดังนั้นปริมาณไขมันและน้ำมันต่อปีได้ 8,328 L/year

ปอดักไขมัน

ประสิทธิภาพในการกำจัดไขมันและน้ำมัน 40 เปอร์เซ็นต์

จากสูตร

$$E_s = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \times 100$$

$$\begin{aligned}
 E_s &= \text{ประสิทธิภาพการลดค่า Grease and Oil} \\
 C_o &= \text{Grease and Oil ที่เข้าสู่บ่อดักไขมัน} \\
 C_1 &= \text{Grease and Oil ที่ผ่านบ่อดักไขมันออกไป}
 \end{aligned}$$

แทนค่า

$$40 = \frac{151 - C_1}{151} \times 100$$

$$C_1 = 90.6 \text{ mg/L}$$

$$\text{ดังนั้น Grease and Oil ที่ผ่านบ่อดักไขมันออกมาเพื่อเข้าสู่ถัง DAF} = 90.6 \text{ mg/L}$$

จากประสิทธิภาพการบำบัดไขมันและน้ำมันของบ่อดักไขมัน 40 % ดังนั้นไขมันและน้ำมันที่ตกได้จากถังดักไขมัน = $(151 - 90.6) \text{ mg/L} \times 172 \text{ m}^3 = 10.39 \text{ kg}$

Dissolved Air Flotation

1. ปริมาณน้ำเสียเฉลี่ย $172 \text{ m}^3/\text{day}$
2. ปริมาณไขมันและน้ำมันเข้าสู่ DAF เท่ากับ 90.6 mg/L

ประสิทธิภาพในการกำจัดไขมันและน้ำมัน 90 เปอร์เซ็นต์

จากสูตร

$$E_s = \frac{C_1 - C_2}{C_1} \times 100$$

$$\begin{aligned}
 E_s &= \text{ประสิทธิภาพการลดค่า Grease and Oil} \\
 C_1 &= \text{Grease and Oil ที่เข้าสู่ถัง DAF} \\
 C_2 &= \text{Grease and Oil ที่ผ่านถัง DAF ออกไป}
 \end{aligned}$$

แทนค่า

$$90 = \frac{90.6 - C_2}{90.6} \times 100$$

$$C_2 = 9.06 \text{ mg/L}$$

ดังนั้น Grease and Oil ที่ผ่านถึง DAF ออกไป = 9.6 mg/L

จากประสิทธิภาพการบำบัดไขมันและน้ำมันของบ่อดักไขมัน 90 % ดังนั้นไขมันและน้ำมันที่ได้จากกากของเสียที่มาจากถึง DAF = $(90.6 - 9.6) \text{ mg/L} \times 172 \text{ m}^3 = 13.93 \text{ kg}$

เมื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณไขมันและน้ำมัน (Grease and Oil) ในตัวอย่างเศษกากตะกอนที่ออกมาจากถึง DAF ด้วยวิธี Soxhlet Extraction

จากสูตร

$$\% \text{ grease and oil} = \frac{\text{gain in weight of flask (g)} \times 100}{\text{weight of wet solid (g)}}$$

แทนค่า

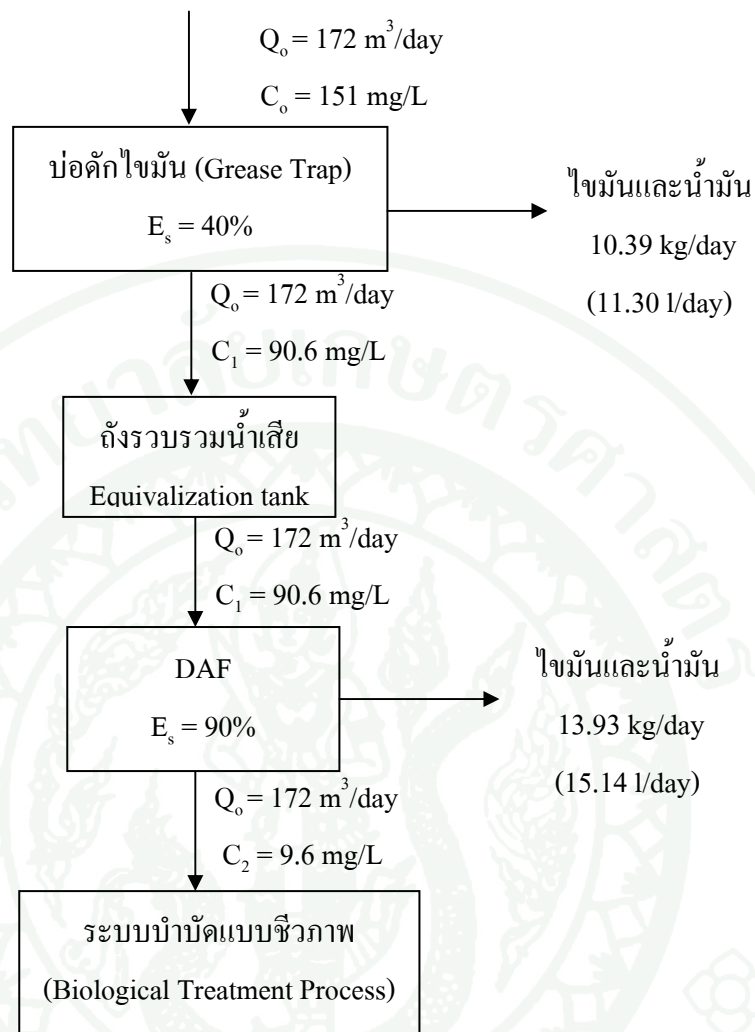
$$\% \text{ grease and oil} = \frac{0.3840 \text{ g} \times 100}{20 \text{ g}}$$

$$= 1.92 \text{ เปอร์เซ็นต์}$$

แสดงว่ามีน้ำมันในกากของเสียที่ออกมาจากถึง DAF 1.92% จากกากตะกอน 100% ดังนั้นการนำน้ำมันทั้งหมด 13.93 kg ออกจากกากตะกอนทั้งหมด ต้องใช้ปริมาณกากตะกอน

$$= \frac{13.93 \text{ kg} \times 100}{1.92}$$

$$\text{ปริมาณกากตะกอนจากถึง DAF} = 725.52 \text{ kg/day}$$

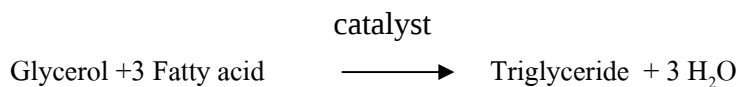


ภาพผนวกที่ ก1 ประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันของระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานฟีนคัส (ไทยแลนด์) จำกัด

2. การคำนวณหามวลโมเลกุลของตัวอย่างน้ำมัน

จากการวิเคราะห์ปริมาณและชนิดของกรดไขมันด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรเมตรี ของน้ำมันปลาที่แยกมาจากบ่อดักไขมัน สามารถคำนวณหาน้ำหนักโมเลกุลของน้ำมันปลาได้จากสมการโครงสร้างน้ำมัน ดังนี้

จากปฏิกิริยาการเกิดไขมัน



ได้สมการการคำนวณ ดังนี้

$$MW_{\text{Oil}} = MW_{\text{G}} + 3(MW_{\text{xFA}}) - 3MW_{\text{H}}$$

$$\text{โดยที่ } MW_{\text{xFA}} = \sum \left[\% \frac{FA_n}{100} \times MW_n \right]$$

MW_{Oil} = น้ำหนักโมเลกุลของกรดไขมัน

MW_{G} = น้ำหนักโมเลกุลของกลีเซอรอล (92.09 กรัมต่อโมล)

MW_{xFA} = น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของกรดไขมัน

MW_{H} = น้ำหนักโมเลกุลของน้ำ (18 กรัมต่อโมล)

ตัวอย่างการคำนวณ

$$\begin{aligned} \bar{R} &= \left[\frac{(228.40 \times 3.05) + (256.40 \times 9.94) + \dots + (328.57 \times 7.71) + (366.63 \times 0.86)}{100} \right] \\ &= 294.77 \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} MW (\text{น้ำมันปลา}) &= 92 + 294.77(3) - 54 \\ &= 922.31 \text{ กรัมต่อโมล} \end{aligned}$$

ตารางผนวกที่ ก1 ส่วนประกอบของกรดไขมันในน้ำมันปลาจากระบบบำบัดน้ำเสีย

ชนิดของกรดไขมัน		น้ำหนักโมเลกุล	เปอร์เซ็นต์
กรดไขมันไม่อิ่มตัว			
C16:1 n-7	Palmitoleic	254.40	4.30
C18:1 n-9 cis	Oleic	282.40	23.69
C:18:1 n-7	Vaccenic	282.40	3.07
C18:2 n-6 cis	Linoleic	280.40	7.60
C18:3 n-3	Linolenic	278.40	3.01
C20:1 n-9	Eicosenoic	310.50	9.72
C20:3 n-3	Eicosatrienoic	306.53	0.60
C20:4 n-6	Arachidonic	304.50	0.48
C20:5 n-3	Eicosapentanoic	302.52	6.26
C22:1 n-9	Erucic	338.59	13.31
C22:2	Docosadienoic	336.59	0.64
C22:5	Docosapentaenoic	330.57	2.56
C22:6	Docosahexaenoic	328.57	7.71
C24:1	Nervonic	366.63	0.86
กรดไขมันอิ่มตัว			
C14:0	Myristic	228.40	3.05
C16:0	Palmitic	256.40	9.94
C18:0	Stearic	284.40	2.17
C20:0	Arachidic	312.54	0.30
C21:0	Heneicosanoic	326.57	0.74
รวม			100.00

หมายเหตุ: วิเคราะห์โดยศูนย์วิทยาศาสตร์ฮาลาล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (วิเคราะห์โดยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์)

3. การคำนวณหาอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน

การคำนวณหาอัตราโดยโมลระหว่างเมทานอลและน้ำมันที่ใช้ในกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน มีวิธีการดังนี้

กำหนด

$$\text{มวลโมเลกุลของน้ำมันปลา} = 922.31 \text{ กรัม}$$

$$\text{มวลโมเลกุลของเมทานอล} = 32.04 \text{ กรัม}$$

ในกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน ใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลและน้ำมันเท่ากับ 3:1, 6:1, 9:1 และ 12:1 โดยใช้น้ำมันเริ่มต้น 100 กรัม

ตัวอย่างการคำนวณ

$$\text{เมทานอล 1 โมลมีน้ำหนัก} = 32.04 \text{ กรัม}$$

$$\text{น้ำมันปลามีน้ำหนัก} = 922.31 \text{ กรัม}$$

ถ้าใช้น้ำมันปลา 100 กรัม

ดังนั้นเมื่อใช้เมทานอลต่อน้ำมันปลาอัตราส่วนโดยโมลที่ 3:1

$$\text{ต้องใช้เมทานอล } \frac{100 \times 32.04 \times 3}{922.31} = 10.4217 \text{ กรัม}$$

4. การคำนวณหาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์)

ทำการศึกษาปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ 0.75, 1.0, 1.25 และ 1.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน

ตัวอย่างการคำนวณ

ความบริสุทธิ์ของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 86.00 เปอร์เซ็นต์

- โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.75 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักน้ำมัน
น้ำมันปลา 100 กรัม
ดังนั้นต้องชั่งโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

$$\frac{0.75 \times 100}{86} = 0.8721 \text{ กรัม}$$

5. การคำนวณหาปริมาณเมทิลเอสเทอร์(FAME) จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี

การคำนวณหาปริมาณเมทิลเอสเทอร์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี ตามมาตรฐาน EN 14103 ซึ่งใช้ Methyl Heptadecanoate เป็นสาร Internal Standard สามารถคำนวณโดยใช้สมการ

$$\% \text{ FAME} = \frac{(\sum A) - A_{EI}}{A_{EI}} \times \frac{C_{EI} \times V_{EI}}{m} \times 100 \%$$

โดยที่

% FAME = เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์

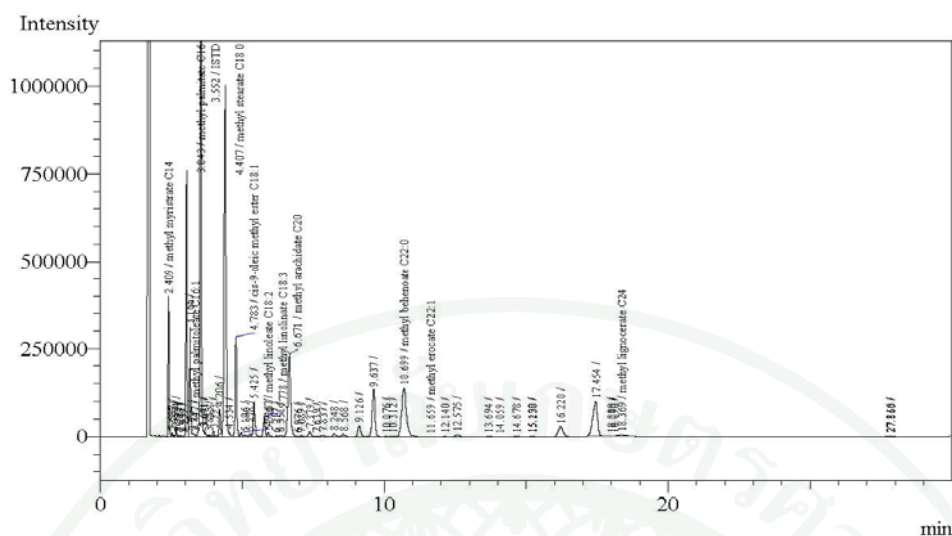
$\sum A$ = พื้นที่ใต้กราฟรวมของเมทิลเอสเทอร์ตั้งแต่ C_{14} ถึง C_{24}

A_{EI} = พื้นที่ใต้กราฟรวมของสารละลายมาตรฐาน Methyl Heptadecanoate ($C_{17:0}$)

C_{EI} = ความเข้มข้นของ Heptadecanoate ($C_{17:0}$) หน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อมิลลิตร

V_{EI} = ปริมาตรของ Heptadecanoate ($C_{17:0}$) หน่วยเป็นไมโครลิตร

m = น้ำหนักเมทิลเอสเทอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ หน่วยเป็นมิลลิกรัม



ภาพผนวกที่ ก2 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์

ตารางผนวกที่ ก2 ตัวอย่างค่าโครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์

Peak	Ret.Time	Area	Height	Name
1	2.409	803265	396860	methyl myristate (C14:0)
2	2.537	29305	10835	
3	2.582	10636	4503	
4	2.674	45518	19593	
5	2.757	4952	1565	
6	2.847	7548	2993	
7	2.939	1866	732	
8	3.043	2003753	760080	methyl palmitate (C16:0)
9	3.166	900309	310452	
10	3.277	3926	2134	
11	3.347	5258	2214	methyl palmitoleate(C16:1)
12	3.552	4487110	1366898	ISTD
13	3.641	3630	2210	
14	3.671	9009	4206	
15	3.833	19073	4472	
16	3.993	42596	14585	

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

Peak	Ret.Time	Area	Height	Name
17	4.206	285587	72344	
18	4.407	4549401	1001719	methyl stearate (C18:0)
19	4.534	4850	2164	
20	4.783	1053053	282295	cis-9 oleic methyl ester (C18:1)
21	4.967	41280	10010	methyl linoleate (C18:2)
22	5.106	31253	4741	
23	5.278	30265	6376	
24	5.425	428543	98983	
25	5.778	245376	57371	methyl linolate (C18:3)
26	5.916	48887	10651	
27	6.217	6558	1614	
28	6.351	25523	3962	
29	6.671	1507130	233464	methyl arachidate (C20:0)
30	6.976	1538	384	
31	7.089	7280	1342	
32	7.379	80686	12925	
33	7.639	3189	666	
34	7.837	19658	3228	
35	8.248	52432	7551	
36	8.568	44007	6142	
37	9.126	212451	30957	
38	9.637	891040	132889	
39	10.076	3867	554	
40	10.312	11134	1013	
41	10.699	1583813	138956	methyl behenoate (C22:0)
42	11.659	1176	204	methyl erocate (C22:1)

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

Peak	Ret.Time	Area	Height	Name
43	12.140	7278	730	
44	12.575	50041	5674	
45	13.694	14385	1384	
46	14.059	3721	326	
47	14.678	16800	1622	
48	15.199	3855	861	
49	15.230	6112	884	
50	16.220	340941	28029	
51	17.454	1144393	99791	
52	18.000	4131	748	
53	18.018	2786	779	
54	18.090	1262	668	
55	18.369	89342	4989	methyl lignocerate (C24:0)
56	27.816	18798	1691	
57	27.863	15735	1653	
Total		21267311	5176666	

ตัวอย่างการคำนวณปริมาณเมทิลเอสเทอร์

จากตารางผนวกที่ก1 สามารถคำนวณหาตัวแปรต่างได้ ดังนี้ คือ
โดยที่

$$\begin{aligned}
 \Sigma A &= 21267311 \\
 A_{EI} &= 4487110 \\
 C_{EI} &= 10.018 \text{ มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร} \\
 V_{EI} &= 1 \text{ มิลลิลิตร} \\
 m &= 53 \text{ มิลลิกรัม}
 \end{aligned}$$

จากสมการ

$$\begin{aligned}\% \text{ FAME} &= \frac{(\sum A) - A_{EI}}{A_{EI}} \times \frac{C_{EI} \times V_{EI}}{m} \times 100 \% \\ &= \frac{(21267311) - 4487110}{4487110} \times \frac{10.018 \times 1}{53} \times 100\% \\ &= 70.69 \%\end{aligned}$$

6. การคำนวณหาร้อยละผลผลิตที่ได้ (%Yield)

การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ผลได้ของไบโอดีเซลตามวิธีของ Lueng และ Guo(2006) โดยสามารถคำนวณจากสมการ

$$\% \text{Yield} = \frac{\text{weight of product (g)} \times 100}{\text{weight of rawoil (g)}}$$

ตัวอย่างการคำนวณ

น้ำหนักของน้ำมันปลาวัตถุดิบเริ่มต้นเท่ากับ 50 กรัม

น้ำหนักของเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้เท่ากับ 43.33 กรัม

$$\text{ดังนั้นปริมาณเมทิลเอสเทอร์เท่ากับ } \frac{43.33 \times 100}{50} = 86.66 \text{ เปอร์เซ็นต์}$$

7. การคำนวณค่าความเป็นกรดและปริมาณกรดไขมันอิสระ

ชั่งสารตัวอย่าง 5 กรัมใส่ขวดรูปชมพู่ เติมน้ำละลายโพพานอล 50 มิลลิลิตร หยดฟีนอล์ฟทาลีน 2-3 หยด จากนั้นนำสารละลายที่ได้มาไตเตรทด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล สารละลายจะเปลี่ยนจากไม่มีสีเป็นสีชมพูที่จุดยุติ จดปริมาตรสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เพื่อคำนวณหาค่าความเป็นกรดตามสมการดังนี้

$$AV = \frac{56.1 \times N \times V}{m}$$

AV (Acid Value) = ค่าความเป็นกรด, มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัมไขมัน

N = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์, นอร์มัล

V = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไตเตรต, มิลลิลิตร

m = น้ำหนักน้ำมัน, กรัม

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซล

ปริมาตรสารละลายโพตัสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ 10.3 มิลลิลิตร

น้ำหนักน้ำมัน 5.01 กรัม

ดังนั้นค่าความเป็นกรดของน้ำมันเท่ากับ

$$AV = \frac{56.1 \times 0.1 \times 10.3}{5.01}$$

$$= 11.53 \quad \text{มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม}$$

การคำนวณปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมัน

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

%FFA = ปริมาณกรดไขมันอิสระ, ร้อยละโดยน้ำหนัก

1.99 = ค่าคงที่ในการเปลี่ยนค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลเมื่อเทียบกับกรดโอเลอิก

ใช้สำหรับน้ำมันที่มีกรดโอเลอิกเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง

ดังนั้นค่ากรดไขมันอิสระ เมื่อเทียบกับกรดโอเลอิก

$$\begin{aligned}\%FFA(as\ Oleic\ acid) &= \frac{11.53}{1.99} \\ &= 5.79 \text{ เปอร์เซ็นต์}\end{aligned}$$

8. การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปลา 1 ลิตร

8.1 การคำนวณปริมาณน้ำมันปลา 1 ลิตร

การคำนวณจากน้ำมันปลาปริมาตร 1 ลิตร (1,000 มิลลิลิตร)

ค่าความหนาแน่นของน้ำมัน 0.9198 กรัมต่อมิลลิเมตร

ดังนั้นน้ำมันปลา 1,000 มิลลิลิตร

จากสูตร

$$\rho = \frac{m}{v}$$

เมื่อ

ρ = หน่วยเป็น กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3) หรือ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m^3)

m = มวลสาร หน่วยเป็นกรัม (g) หรือ กิโลกรัม (kg)

v = ปริมาตร หน่วยเป็น ลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3) หรือลูกบาศก์เมตร (kg/m^3)

แทนค่า

$$0.9198 = \frac{m}{1,000}$$

$$m = 919.80 \text{ กรัม}$$

ดังนั้นน้ำมันปลา 1 ลิตรหนัก 919.80 กรัม

8.2 การคำนวณปริมาตรน้ำมันที่ได้จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันที่ผ่านกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชัน 96.6 เปอร์เซ็นต์
 ดังนั้น น้ำมันปลา 919.80 กรัม

$$\text{ให้ปริมาณน้ำมันที่ผ่านกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชัน } \frac{96.60 \times 919.80}{100} = 888.53 \text{ กรัม}$$

จากสูตร

$$\rho = \frac{m}{v}$$

แทนค่า

$$\begin{aligned} 0.9198 &= \frac{888.53}{v} \\ v &= 966.04 \text{ มิลลิลิตร} \end{aligned}$$

ดังนั้นคิดเป็นปริมาตรน้ำมันที่ผ่านกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชัน 966.04 มิลลิลิตร

8.3 การคำนวณปริมาตรไบโอดีเซลที่ได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซล 83.70 เปอร์เซ็นต์
 น้ำมันปลาที่ผ่านกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชัน 888.53 กรัม

$$\text{ให้ปริมาณน้ำมันไบโอดีเซล } \frac{888.53 \times 83.70}{100} = 743.70 \text{ กรัม}$$

จากสูตร

$$\rho = \frac{m}{v}$$

แทนค่า

$$\begin{aligned} 0.8851 &= \frac{743.70}{v} \\ v &= 840.24 \text{ มิลลิลิตร} \end{aligned}$$

ดังนั้นคิดเป็นปริมาตรไบโอดีเซล 840.24 มิลลิลิตร

ตารางผนวกที่ ก3 ปริมาณวัตถุดิบน้ำมันปลา 1 ลิตรเพื่อผลิตไบโอดีเซล

รายการ	น้ำมันปลา (FFA>2)	การผลิตไบโอดีเซลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสอง ขั้นตอน	
		เอสเทอร์ฟิเคชัน (น้ำมันปลา FFA<2)	ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (ไบโอดีเซล)
เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	100	96.60	83.70
ค่าความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.9198	0.9198	0.8851
การคำนวณปริมาณน้ำมัน (กรัม)	919.8	888.53	743.70
การคำนวณปริมาตรน้ำมัน (มิลลิลิตร)	1,000	966.04	840.24

ตารางผนวกที่ ก4 ปริมาณไบโอดีเซล 1 ลิตร ที่ผลิตจากน้ำมันปลา

รายการ	น้ำมันปลา (FFA>2)	การผลิตไบโอดีเซลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสอง ขั้นตอน	
		เอสเทอร์ฟิเคชัน (น้ำมันปลา FFA<2)	ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (ไบโอดีเซล)
เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	100	96.60	83.70
ค่าความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.9198	0.9198	0.8851
การคำนวณปริมาณน้ำมัน (กรัม)	1,095	1,058	885.10
การคำนวณปริมาตรน้ำมัน (มิลลิลิตร)	1,190	1,150	1,000

หมายเหตุ การคำนวณใช้วิธีเดียวกับตัวอย่างการคำนวณปริมาณวัตถุดิบน้ำมันปลา 1 ลิตรเพื่อผลิตไบโอดีเซล

9. ต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซล (สารเคมีเกรดอุตสาหกรรม)

9.1 ปริมาณสารเคมีและต้นทุนที่ใช้จากน้ำมันปลา 1 ลิตรเพื่อผลิตไบโอดีเซล

จาก เมทานอล (บริสุทธิ์ 98 เปอร์เซ็นต์) กิโลกรัมละ 23 บาท

กรดซัลฟูริก (บริสุทธิ์ 98 เปอร์เซ็นต์) กิโลกรัมละ 19 บาท

โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (บริสุทธิ์ 95 เปอร์เซ็นต์) กิโลกรัมละ 88 บาท

ก. กระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชัน (น้ำหนักโมเลกุลน้ำมันปลา 922.31 กรัม)

ใช้อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1

ดังนั้นน้ำมันปลา 919.8 กรัม ใช้เมทานอล

$$\frac{919.8 \times 6 \times 32.04}{922.31} = 191.72 \text{ กรัม}$$

$$\text{ราคาเมทานอล } 191.72 \times \frac{23}{1,000} = 4.41 \text{ บาท}$$

ใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน

ดังนั้นใช้ปริมาณกรดซัลฟูริก

$$\frac{919.80 \times 1}{100} = 9.20 \text{ กรัม}$$

$$\text{ราคากรดซัลฟูริก } 9.20 \times \frac{19}{1,000} = 0.17 \text{ บาท}$$

ข. กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (น้ำหนักโมเลกุลน้ำมันปลา 922.31 กรัม)

ใช้อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1

ดังนั้นน้ำมันจากกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชัน 888.53 กรัม ใช้เมทานอล

$$\frac{888.53 \times 6 \times 32.04}{922.31} = 185.20 \text{ กรัม}$$

$$\text{ราคาเมทานอล } 185.20 \times \frac{23}{1,000} = 4.26 \text{ บาท}$$

ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน

ดังนั้นใช้ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

$$\frac{888.53 \times 1.25}{100} = 11.11 \text{ กรัม}$$

โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (บริสุทธิ์ 95 เปอร์เซ็นต์)

ดังนั้นใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ $\frac{100 \times 11.11}{95} = 11.69 \text{ กรัม}$

ราคาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ $11.69 \times \frac{88}{1,000} = 1.03 \text{ บาท}$

รวมค่าใช้จ่ายสารเคมีที่ใช้กับน้ำมันปลา 1 ลิตร ได้ไบโอดีเซล 0.84 ลิตร เท่ากับ

$$4.41 + 0.17 + 4.26 + 1.03 = 9.87 \text{ บาท}$$

9.2 ปริมาณสารเคมีและต้นทุนที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล 1 ลิตร

ก. กระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชัน (น้ำหนักโมเลกุลน้ำมันปลา 922.31 กรัม)

ใช้อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1

ดังนั้นน้ำมันปลา 1,095 กรัม ใช้เมทานอล

$$\frac{1,095 \times 6 \times 32.04}{922.31} = 228.23 \text{ กรัม}$$

ราคาเมทานอล $228.23 \times \frac{23}{1,000} = 5.25 \text{ บาท}$

ใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน

ดังนั้นใช้ปริมาณกรดซัลฟูริก

$$\frac{1,095 \times 1}{100} = 10.95 \text{ กรัม}$$

ราคากรดซัลฟูริก $10.95 \times \frac{19}{1,000} = 0.21 \text{ บาท}$

ข. กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (น้ำหนักโมเลกุลน้ำมันปลา 922.31 กรัม)

ใช้อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1

ดังนั้นน้ำมันจากกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชัน 1,058 กรัม ใช้เมทานอล

$$\frac{1,058 \times 6 \times 32.04}{922.31} = 220.52 \text{ กรัม}$$

$$\text{ราคามะทานอล } 220.52 \times \frac{23}{1,000} = 5.07 \text{ บาท}$$

ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน
ดังนั้นใช้ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

$$\frac{1,058 \times 1.25}{100} = 13.23 \text{ กรัม}$$

โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (บริสุทธิ์ 95 เปอร์เซ็นต์)

$$\text{ดังนั้นใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ } \frac{100 \times 13.23}{95} = 13.93 \text{ กรัม}$$

$$\text{ราคาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ } 13.93 \times \frac{88}{1,000} = 1.23 \text{ บาท}$$

รวมค่าใช้จ่ายสารเคมีที่ใช้เพื่อผลิตไบโอดีเซล 1 ลิตร เท่ากับ

$$5.25 + 0.21 + 5.07 + 1.23 = 11.76 \text{ บาท}$$

10. ปริมาณไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากแหล่งเก็บตัวอย่างไขมันและน้ำมัน

ค่าความหนาแน่นของน้ำมันปลา 0.9198 กรัมต่อมิลลิลิตร

ไขมันและน้ำมันจากบ่อดักไขมัน (GW-GT) 10.39 กิโลกรัมต่อวัน เท่ากับ 11.30 ลิตรต่อวัน

ไขมันและน้ำมันจากถัง DAF (GW-DAF) 13.93 กิโลกรัมต่อวัน เท่ากับ 15.14 ลิตรต่อวัน

ไขมันและน้ำมันจากระบบบำบัดน้ำเสีย 24.32 กิโลกรัมต่อวัน เท่ากับ 26.44 ลิตรต่อวัน

จากการผลิตไบโอดีเซลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน

เปอร์เซ็นต์ผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้จากน้ำมันปลาที่ผ่านกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชัน 83.70 เปอร์เซ็นต์

$$\text{ดังนั้นเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของไบโอดีเซลจากน้ำมันปลาเริ่มต้น } \frac{83.70 \times 96.6}{100} = 80.85 \text{ เปอร์เซ็นต์}$$

ค่าความหนาแน่นของไบโอดีเซล 0.8851 กรัมต่อมิลลิลิตร

ไบโอดีเซลจากไขมันและน้ำมันจากบ่อดักไขมัน (GW-GT) 8.40 กิโลกรัมต่อวัน

เท่ากับ 9.49 ลิตรต่อวัน

ไบโอดีเซลจากไขมันและน้ำมันจากถัง DAF (GW-DAF) 11.26 กิโลกรัมต่อวัน

เท่ากับ 12.72 ลิตรต่อวัน

ไบโอดีเซลจากไขมันและน้ำมันจากระบบบำบัดน้ำเสีย 19.66 กิโลกรัมต่อวัน

เท่ากับ 22.21 ลิตรต่อวัน

ตารางผนวกที่ ก5 ปริมาณไบโอดีเซลที่ผลิตได้

แหล่งที่มา	ไบโอดีเซล (ลิตรต่อวัน)	ไบโอดีเซล (ลิตรต่อปี)
1. ไขมันและน้ำมัน จากบ่อดักไขมัน (GW-GT)	9.49	2,800
2. ไขมันและน้ำมัน จากถัง DAF (GW-DAF)	12.72	3,752
รวมไขมันและน้ำมันจากระบบ บำบัดน้ำเสีย (1+2)	22.21	6,552

หมายเหตุ วันทำการ 1 ปี เท่ากับ 295 วัน

10. การเตรียมสารเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล

(กรณีปริมาณกรดไขมันอิสระ > 2 เปอร์เซ็นต์ การเตรียมเบสที่ใช้ในปฏิกิริยาเพื่อผลิตไบโอดีเซลสำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเพียงขั้นตอนเดียว)

ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล หรือ KOH_{total}

$$KOH_{total} = KOH_{Neutralization} + KOH_{transesterification}$$

โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. $KOH_{Neutralization}$ หรือปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์สำหรับทำให้น้ำมันเป็นกลาง, กรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ มีค่าดังนี้

$$KOH_{Neutralization} = \frac{A \times AV}{1,000}$$

เมื่อ

A = ปริมาณน้ำมันปลา, กรัม

AV = ค่าของกรด, มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัมไขมัน

2. $KOH_{\text{transesterification}}$ หรือปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา, กรัม
 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ มีค่าดังนี้

$$KOH_{\text{Transesterification}} = \frac{A \times B}{100}$$

เมื่อ

A = ปริมาณน้ำมัน, กรัม

B = ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา, % โดยน้ำหนักน้ำมัน

ตัวอย่างการคำนวณปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

ต้องการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปลา จำนวน 919.8 กรัม (1ลิตร) โดยมีข้อมูลดังนี้

น้ำมันปลาที่มีค่าของกรด (Acid Value) 11.53 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์/ กรัมไขมัน

ต้องการใช้อัตราส่วนโดยมวลระหว่างน้ำมันปลาต่อเมทานอล คือ 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน คือร้อยละ 1.25 โดยน้ำหนักน้ำมัน

A = ปริมาณน้ำมันปลา 919.8 กิโลกรัม = 100×1000 กรัม

$$\begin{aligned} KOH_{\text{Neutralization}} &= \frac{919.8 \times 11.53}{1,000} \\ &= 10.61 \text{ กรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} KOH_{\text{Transesterification}} &= \frac{919.8 \times 1.25}{100} \\ &= 11.50 \text{ กรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์} \end{aligned}$$

$$KOH_{\text{total}} = KOH_{\text{Neutralization}} + KOH_{\text{transesterification}}$$

$$\begin{aligned}
 &= 10.61 + 11.50 \\
 &= 22.11 \text{ กรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์}
 \end{aligned}$$

กรณีโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์บริสุทธิ์ 95.00 เปอร์เซ็นต์ต้องใช้ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

$$KOH = \frac{100 \times 22.11}{95}$$

$$= 23.27 \text{ กรัม}$$

ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบสำหรับผลิตไบโอดีเซลของน้ำมันปลา ที่มีคุณสมบัติข้างต้น คือ

1. ชั่งน้ำมันปลา 919.8 กรัม อุ่นที่อุณหภูมิที่ต้องการ
2. ชั่งเมทานอล $6 \times 919.8 \times 32.04 / 922.31 = 191.72$ กรัม
(อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1)
3. ชั่งปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ชนิดเกล็ด = 23.27 กรัม
4. ละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในเมทานอลจนเป็นเนื้อเดียวกันอุ่นให้ได้อุณหภูมิเดียวกับน้ำมัน
5. เทสารละลายลงในข้อ 4 ลงในน้ำมันปลา เริ่มทำปฏิกิริยาผลิตไบโอดีเซลที่สภาวะที่กำหนด ใช้ความถี่รอบในการกวน 600 รอบต่อนาที ปฏิกิริยาที่ดำเนินไปต้องมีการพลิกชั้นน้ำมันที่ระเหยออกไปกลับลงมาในระบบ

11. ราคาน้ำมันไบโอดีเซลปาล์ม

$$\text{จากสูตรคำนวณราคาขาย B100} = 0.97\text{CPO} + 0.15 \text{ MtOH} + 3.32$$

โดยที่ B100 = ราคาขายไบโอดีเซล 100 ในเขตกรุงเทพฯ หน่วยบาทต่อลิตร

CPO = ราคาขายน้ำมันปาล์มดิบในเขตกรุงเทพฯ หน่วยบาทต่อกิโลกรัม, 25.75 บาท (25 มี.ค.53, กรมการค้าภายใน)

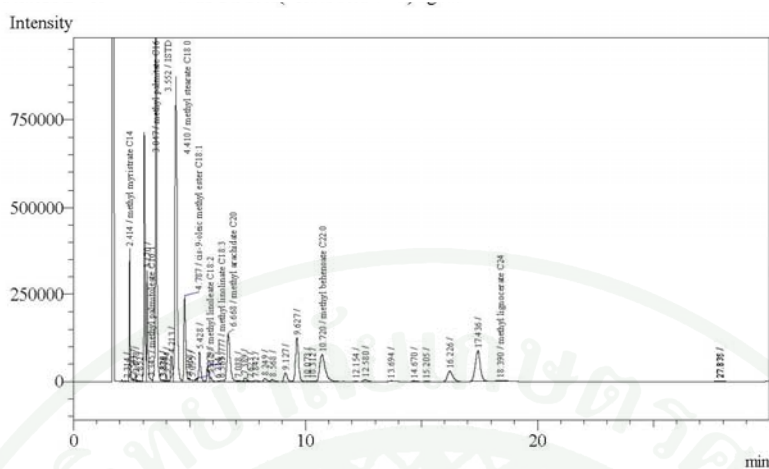
MtOH = ราคาขายเมทานอลในเขตกรุงเทพฯ หน่วยบาทต่อกิโลกรัม, 23 บาท
แทนค่า

$$B100 = 0.97(25.75) + 0.15(23) + 3.32 \quad 31.75 \text{ บาท}$$

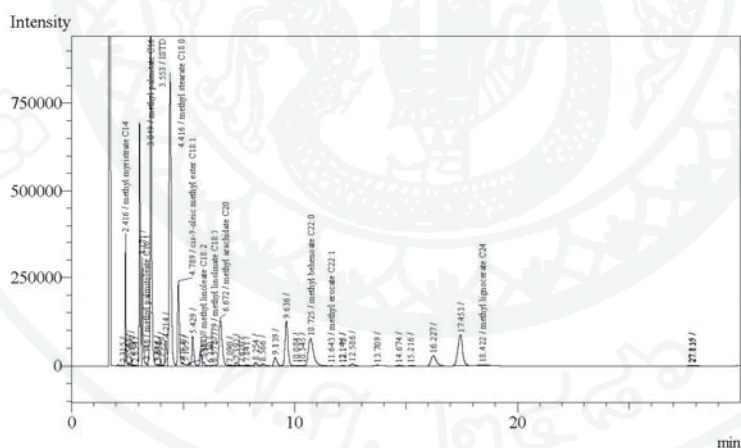


ภาคผนวก ข

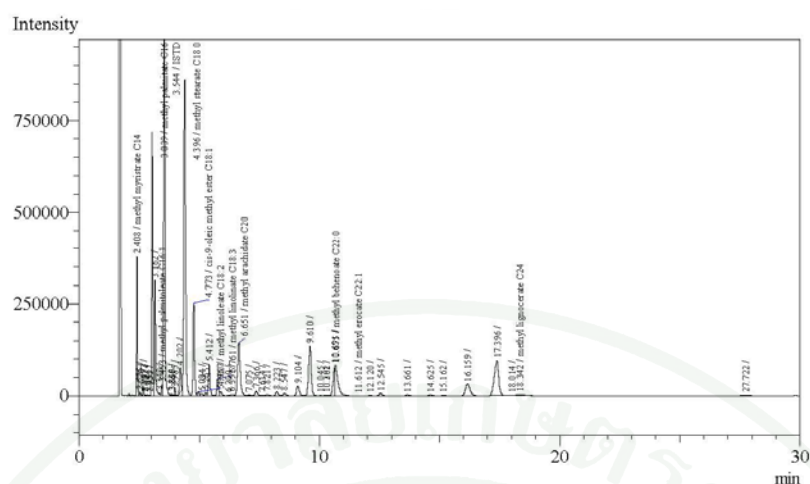
โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย
เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีตามวิธีมาตรฐาน EN 14103



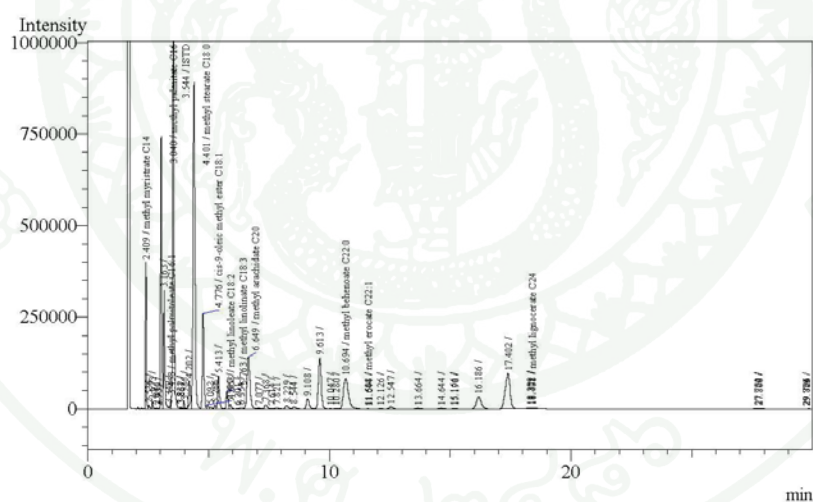
ภาพผนวกที่ ๕ โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 12:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที



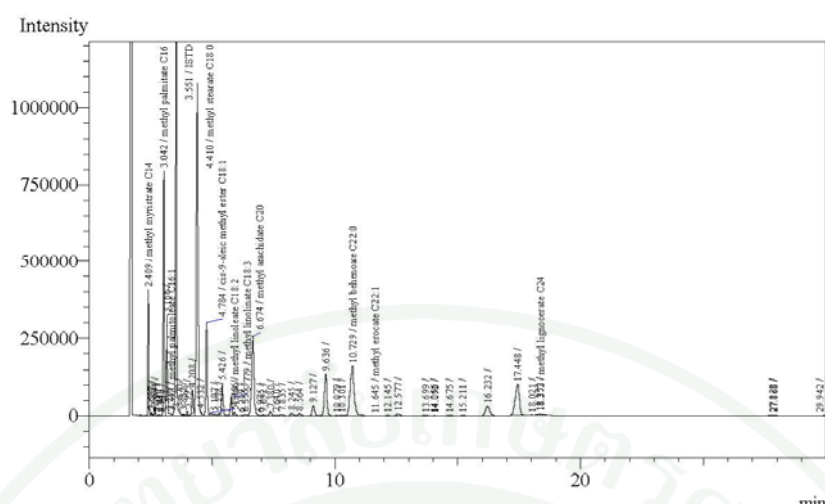
ภาพผนวกที่ ๖ โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 12:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที



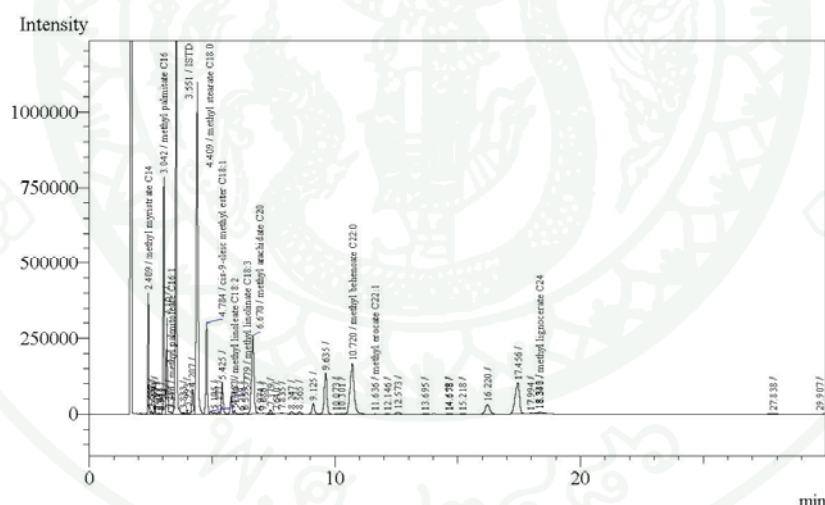
ภาพผนวกที่ ข7 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที



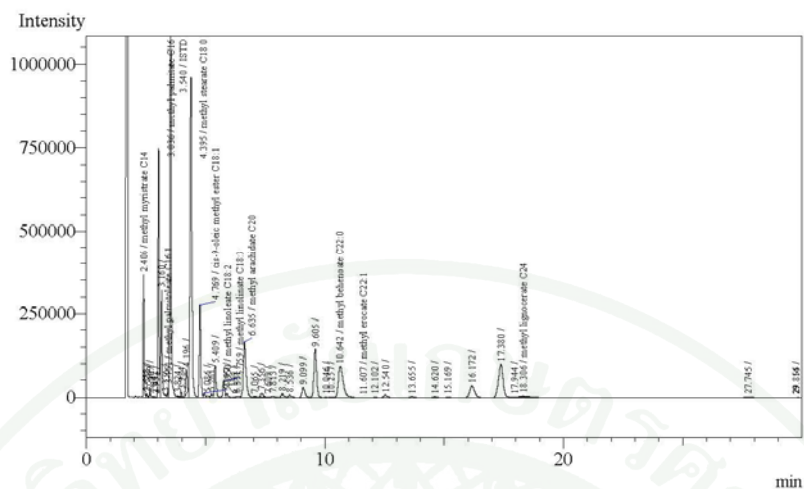
ภาพผนวกที่ ข8 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที



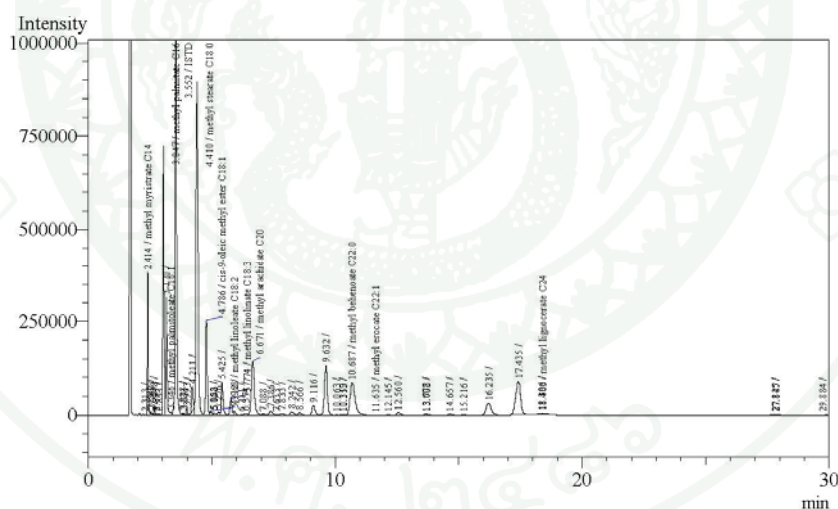
ภาพผนวกที่ ข9 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.00 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที



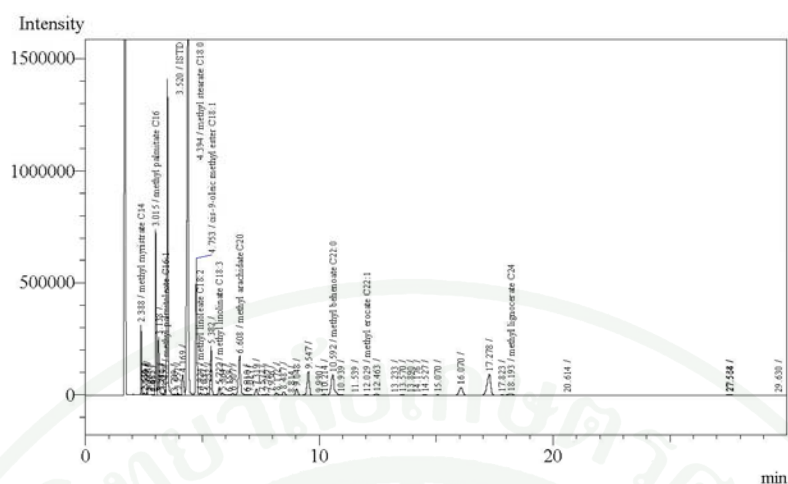
ภาพผนวกที่ ข10 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.00 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที



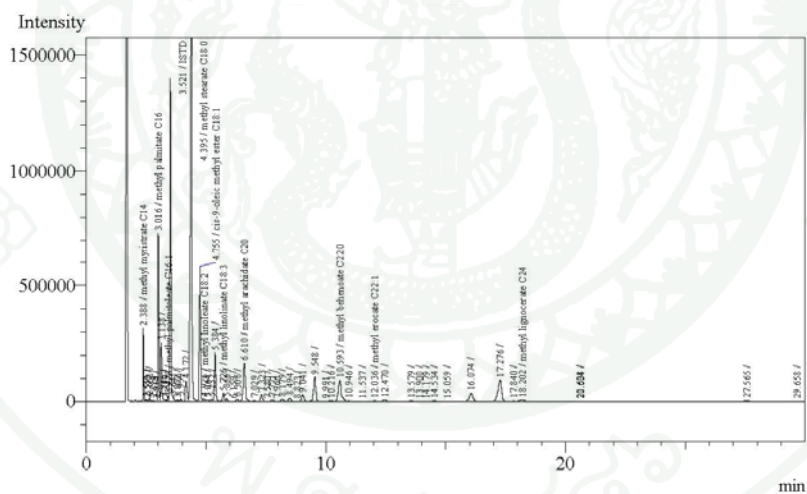
ภาพผนวกที่ ข13 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที



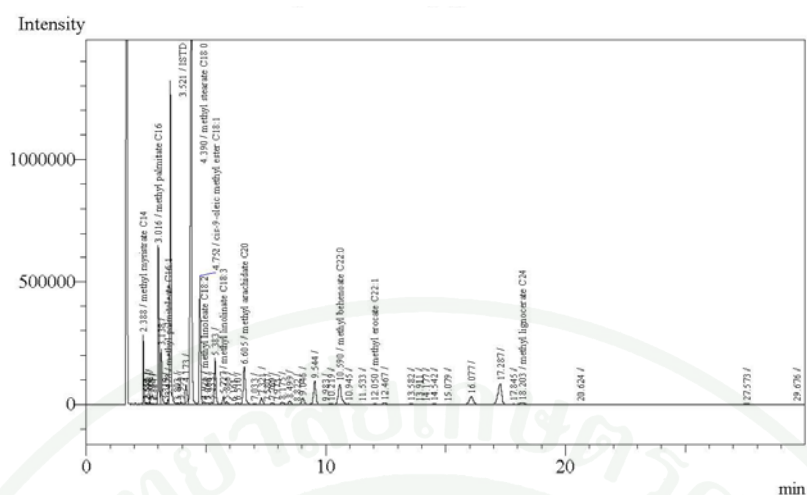
ภาพผนวกที่ ข14 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที



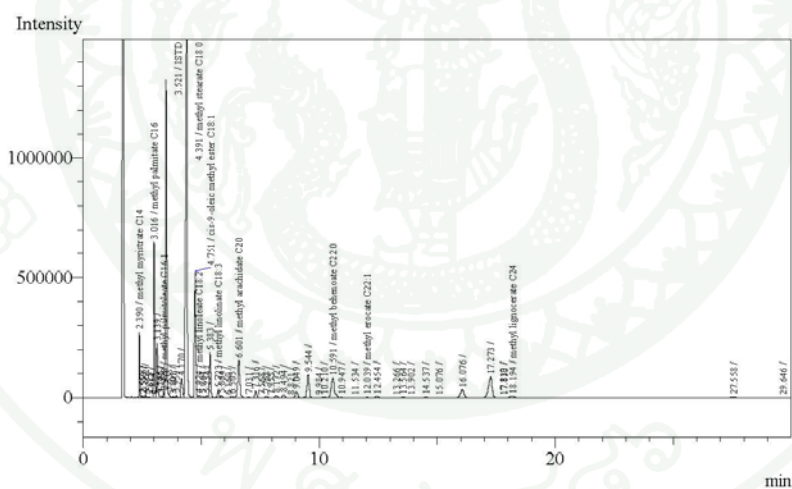
ภาพผนวกที่ ข15 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 40 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที



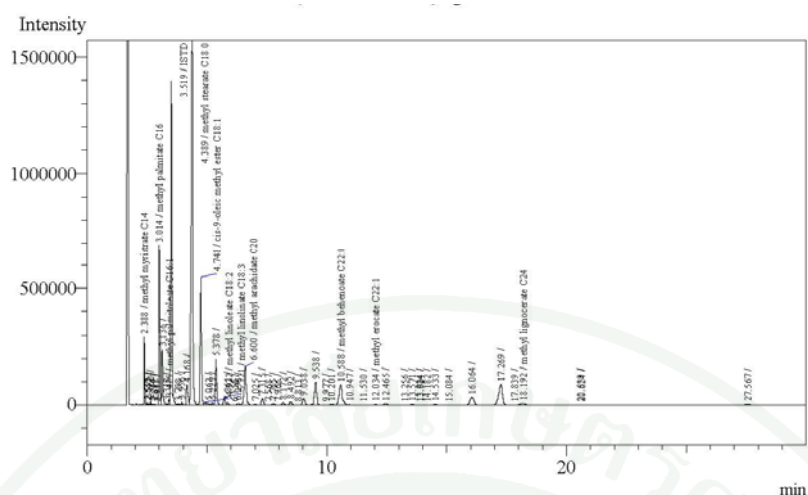
ภาพผนวกที่ ข16 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 40 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที



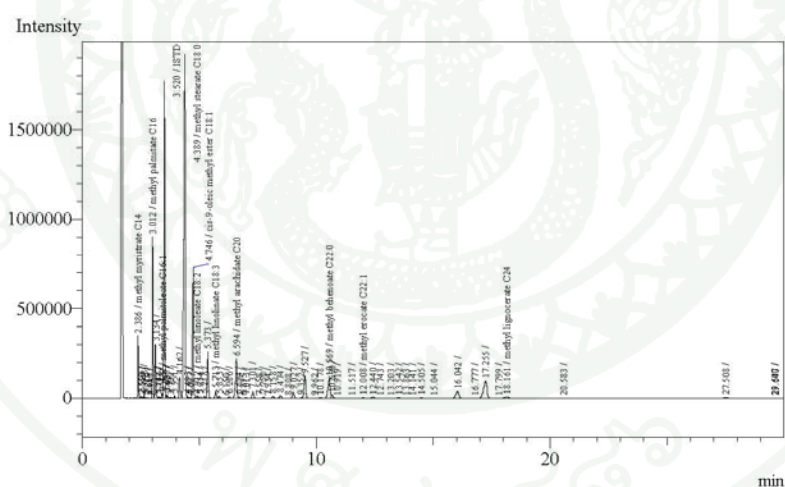
ภาพผนวกที่ ข17 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 40 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที



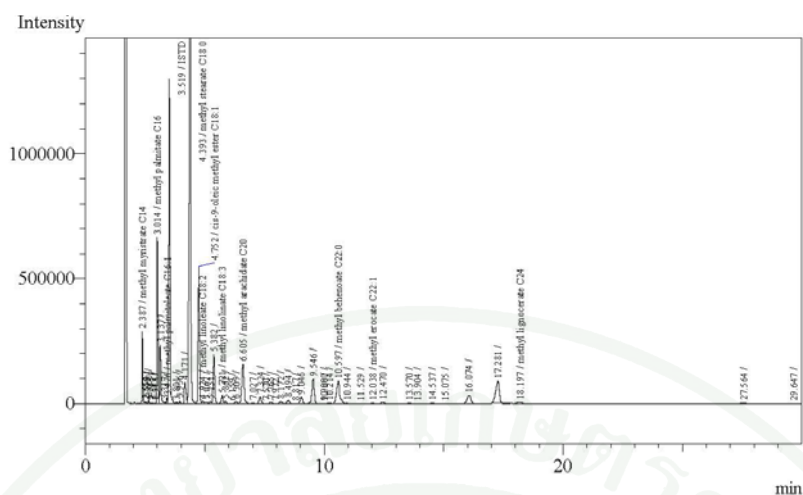
ภาพผนวกที่ ข18 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 40 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที



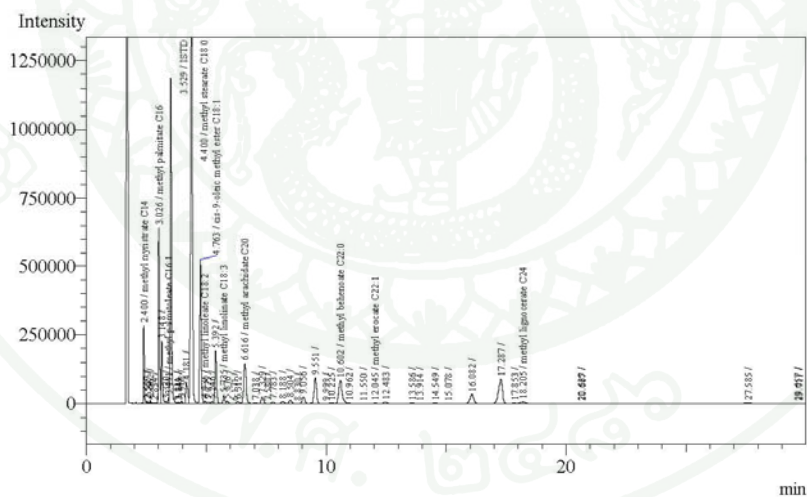
ภาพผนวกที่ ข19 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 40 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที



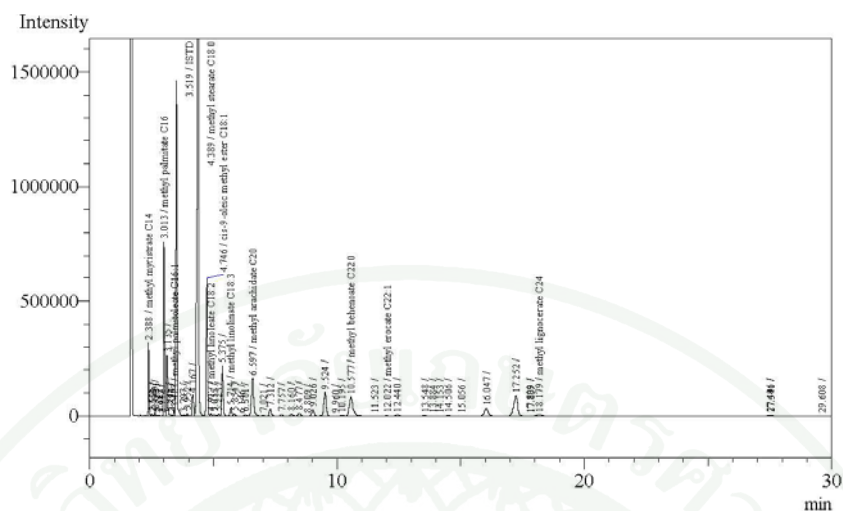
ภาพผนวกที่ ข20 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 40 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที



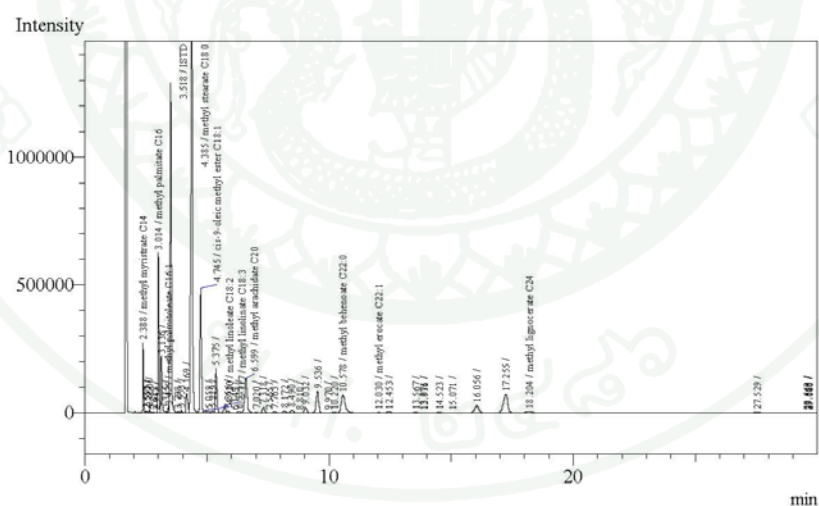
ภาพผนวกที่ ข21 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 40 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที



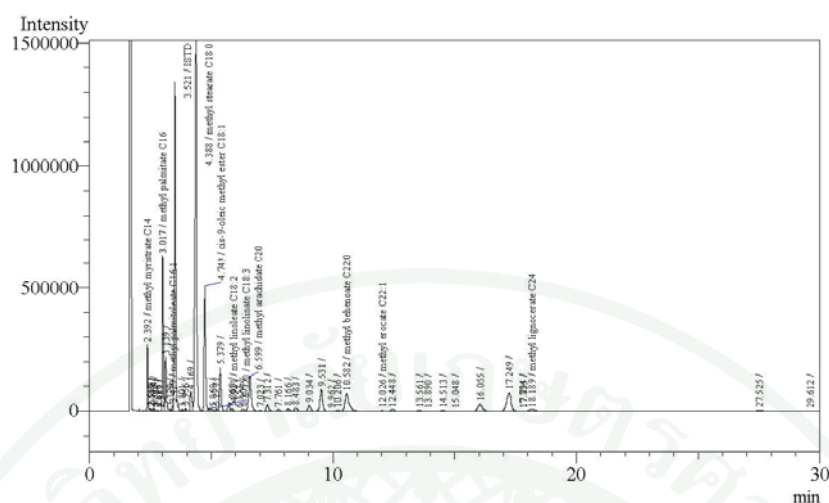
ภาพผนวกที่ ข22 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 40 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที



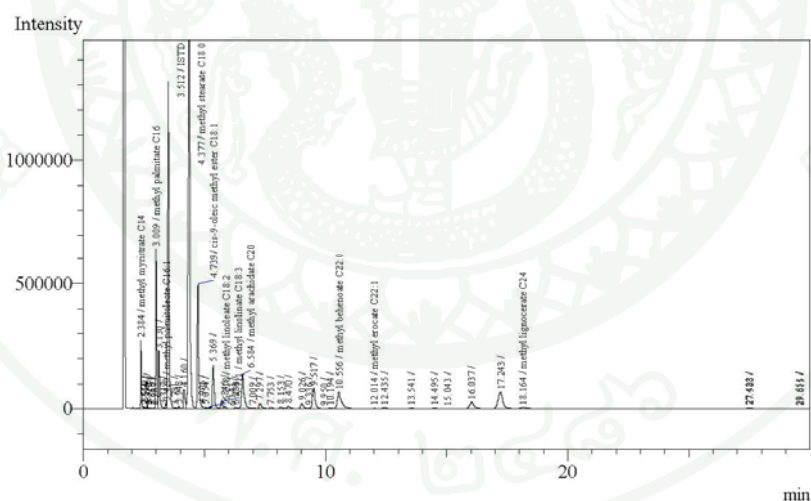
ภาพผนวกที่ ข27 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที



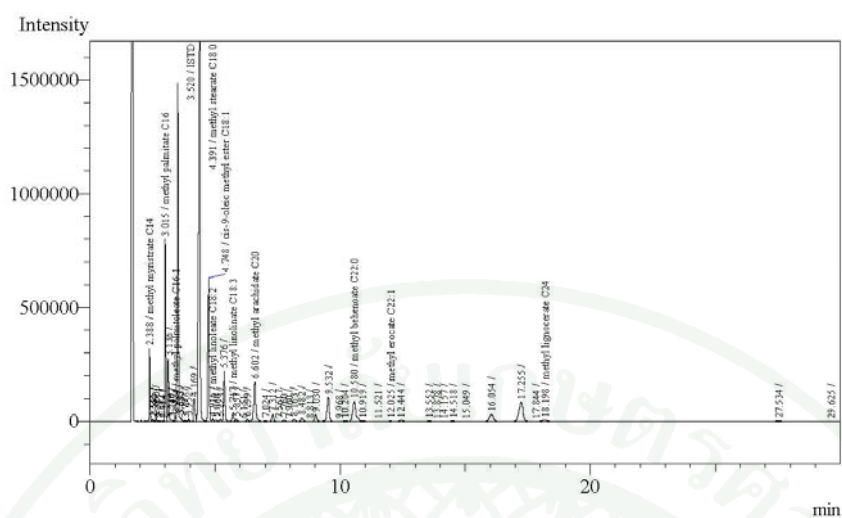
ภาพผนวกที่ ข28 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที



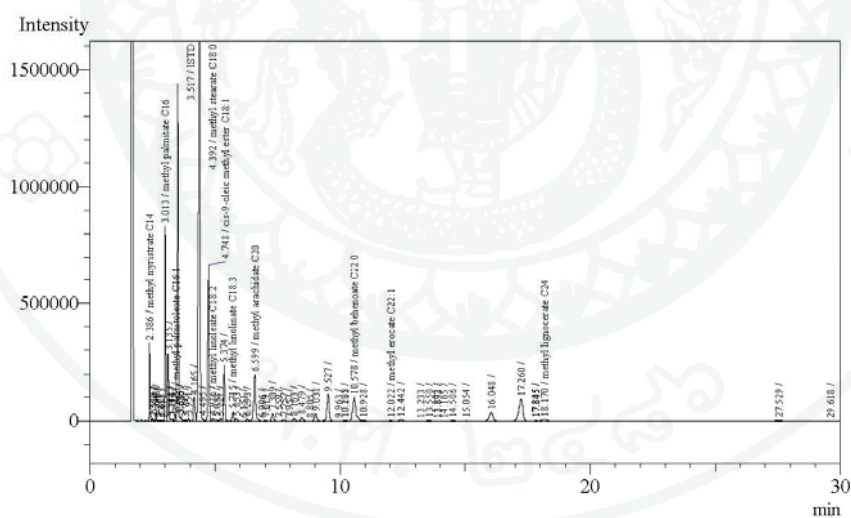
ภาพผนวกที่ ข29 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที



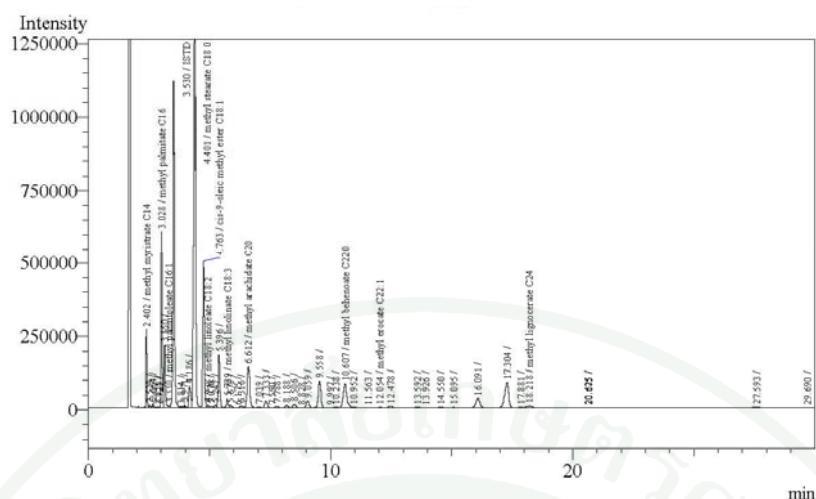
ภาพผนวกที่ ข30 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที



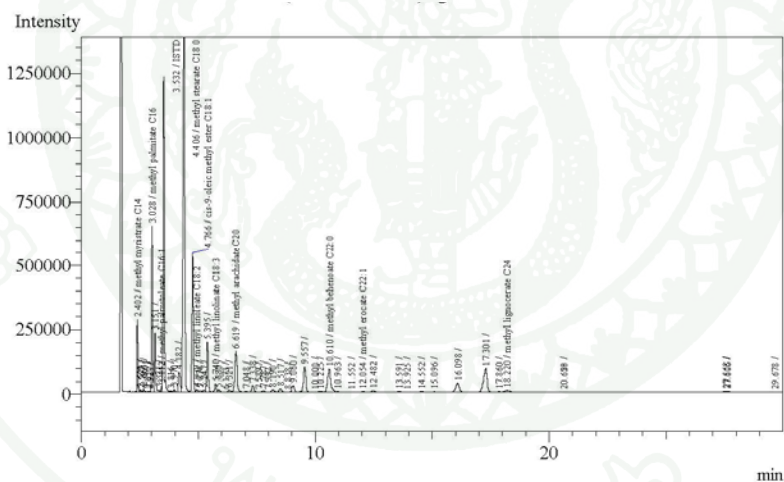
ภาพผนวกที่ ข31 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที



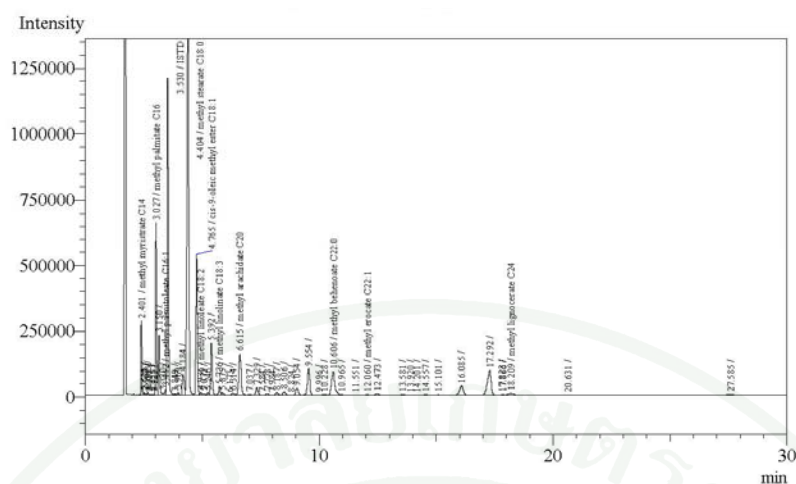
ภาพผนวกที่ ข32 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที



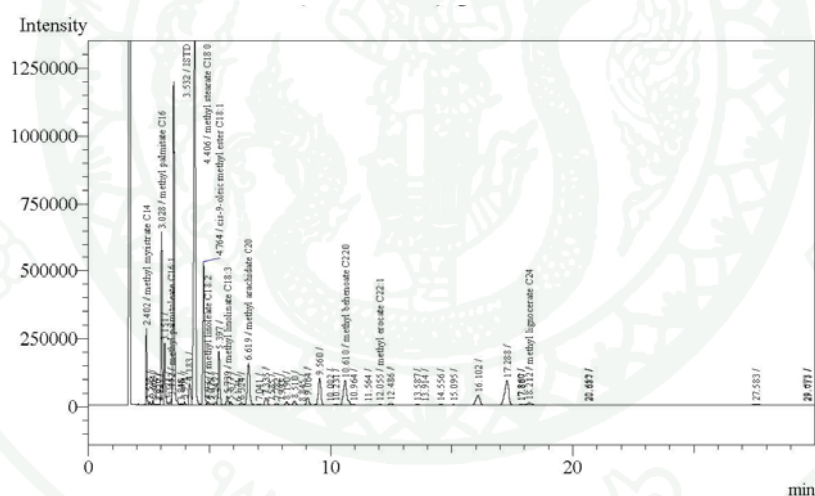
ภาพผนวกที่ ข33 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที



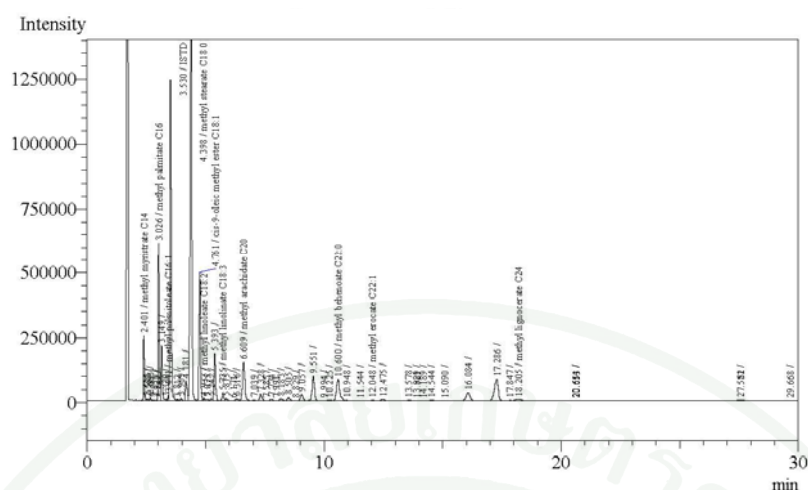
ภาพผนวกที่ ข34 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที



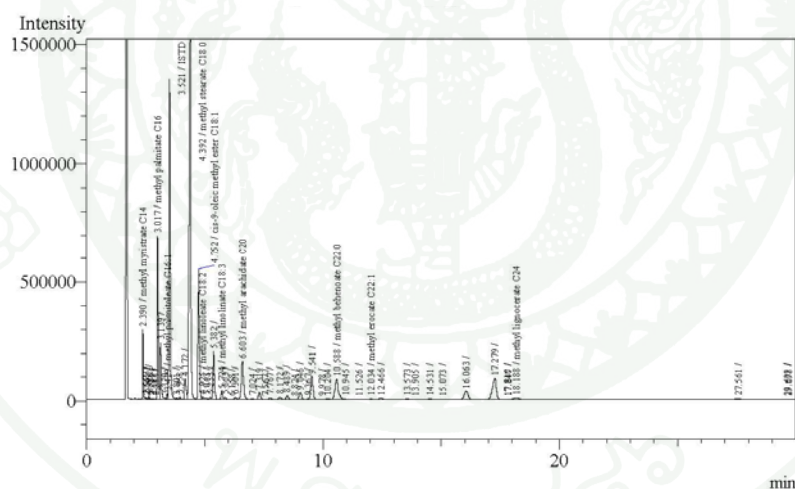
ภาพผนวกที่ ข35 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที



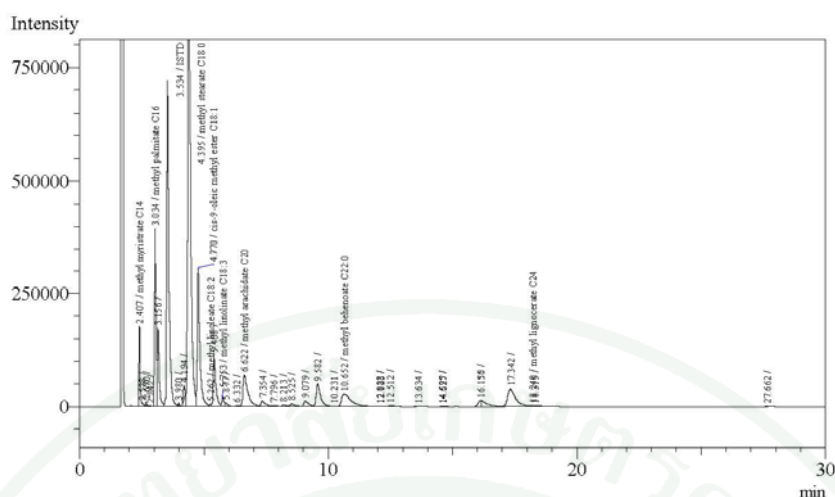
ภาพผนวกที่ ข36 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที



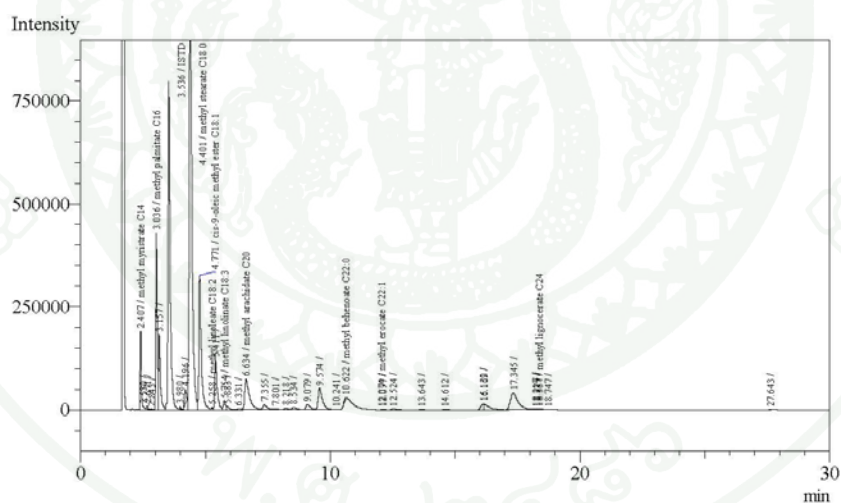
ภาพผนวกที่ ข37 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที



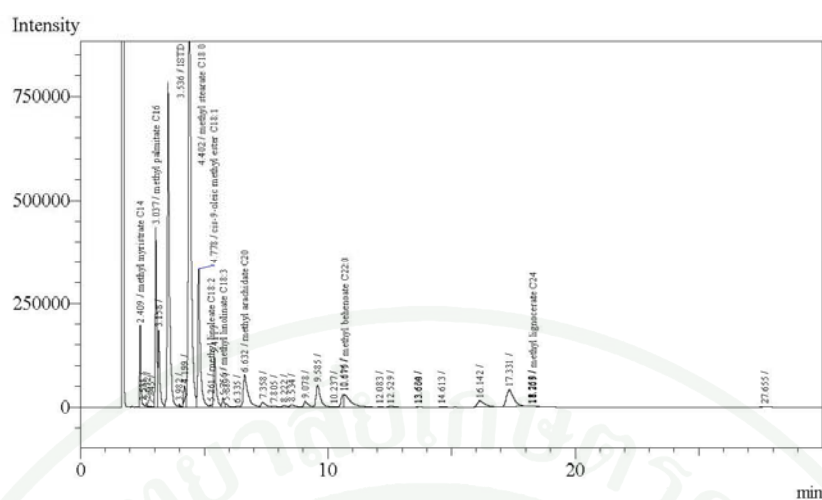
ภาพผนวกที่ ข38 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที



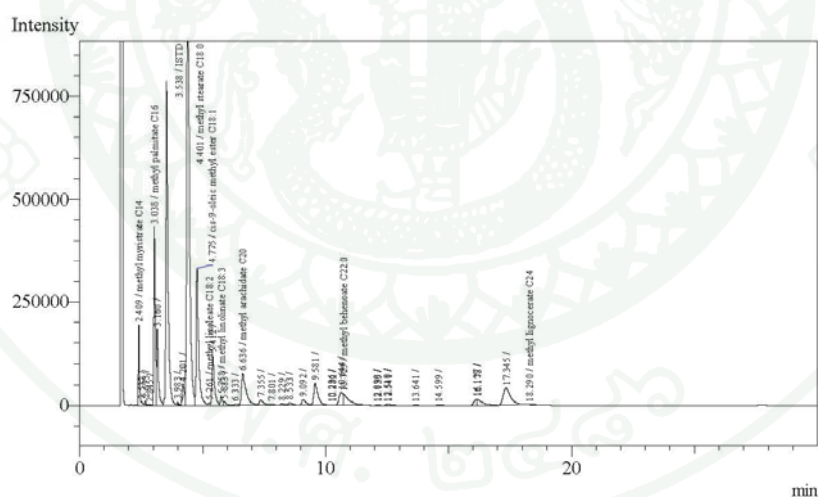
ภาพผนวกที่ ข39 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที



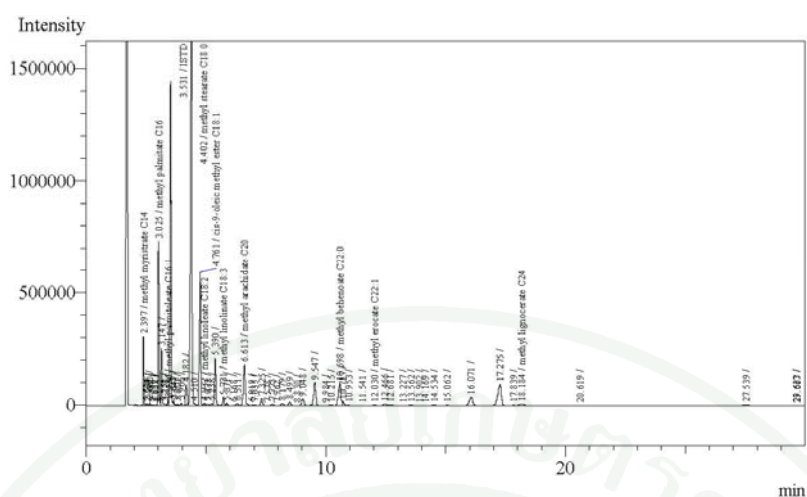
ภาพผนวกที่ ข40 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที



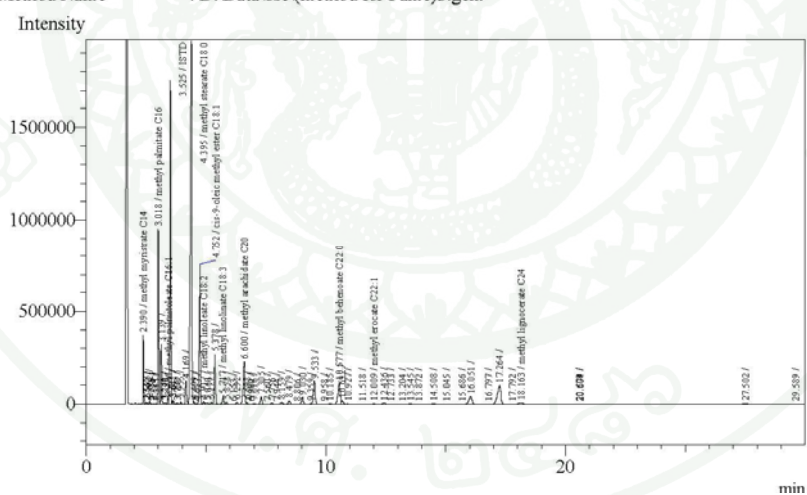
ภาพผนวกที่ ข41 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที



ภาพผนวกที่ ข42 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที



ภาพผนวกที่ ข43 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที



ภาพผนวกที่ ข44 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที



ตารางผนวกที่ ค1 เปอร์เซ็นต์ของผลผลิตและเปอร์เซ็นต์ของเมทิลเอสเทอร์ในกระบวนการ
ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 3:1,
6:1, 9:1 และ 12:1 ใช้ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดย
น้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส
และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที

อัตราส่วนโดย โมลเมทานอลต่อ น้ำมันปลา	เปอร์เซ็นต์ของผลผลิต			เปอร์เซ็นต์ของเมทิลเอสเทอร์		
	(%Yield)			(%FAME)		
	1	2	เฉลี่ย	1	2	เฉลี่ย
3:01	63.40	74.88	69.14	-	-	-
6:01	76.74	72.92	74.83	78.19	80.80	79.50
9:01	82.06	77.60	79.83	76.42	76.36	76.39
12:01	81.14	80.40	80.77	77.55	77.12	77.34

ตารางผนวกที่ ค2 เปอร์เซ็นต์ของผลผลิตและเปอร์เซ็นต์ของเมทิลเอสเทอร์ ในกระบวนการ
ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ใช้
ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.75, 1.00, 1.25 และ 1.50 เปอร์เซ็นต์โดย
น้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส
และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที

%KOH	เปอร์เซ็นต์ของผลผลิต				เปอร์เซ็นต์ของเมทิลเอสเทอร์			
	(%Yield)				(%FAME)			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
0.75	79.88	80.61	81.31	80.60	72.37	71.62	80.31	74.77
1.00	77.92	79.69	81.46	79.69	80.80	78.19	79.05	79.35
1.25	76.28	78.09	79.90	78.09	80.80	78.75	82.44	80.66
1.50	74.26	76.69	79.12	76.69	78.00	78.36	82.29	79.55

ตารางผนวกที่ ค3 เปอร์เซ็นต์ของผลผลิตและเปอร์เซ็นต์ของเมทิลเอสเทอร์ ในกระบวนการ
ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ใช้
ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่ง
ปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 40, 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส และเวลา
ในการทำปฏิกิริยา 30, 60, 90 และ 120 นาที

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	เปอร์เซ็นต์ของผลผลิต (%Yield)			เปอร์เซ็นต์ของเมทิลเอสเทอร์ (%FAME)		
		1	2	เฉลี่ย	1	2	เฉลี่ย
40	30	84.40	86.78	85.59	79.82	79.82	79.82
	60	84.84	86.00	85.42	80.56	80.56	80.56
	90	84.14	86.54	85.34	83.17	83.17	83.17
	120	84.60	86.98	85.50	84.28	84.28	84.28
50	30	80.66	85.32	82.99	83.51	83.75	83.63
	60	81.44	84.66	83.05	84.22	84.05	84.14
	90	81.06	83.80	82.43	85.01	85.79	85.40
	120	82.60	84.80	83.70	86.19	86.41	86.30
60	30	75.78	77.26	76.52	83.56	80.80	82.18
	60	75.60	79.70	77.65	85.61	85.79	85.70
	90	74.40	76.90	75.65	84.10	84.22	84.16
	120	73.80	77.42	75.61	83.50	84.18	83.84
70	30	71.26	73.00	72.13	78.46	78.46	78.46
	60	68.02	70.30	69.16	80.68	80.68	80.68
	90	67.26	69.30	68.28	86.11	86.11	86.11
	120	68.14	69.90	69.02	86.40	86.40	86.40

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาว ภูมิรินทร์ สุภาवासัน
วัน เดือน ปี ที่เกิด	25 มีนาคม พ.ศ.2525
สถานที่เกิด	จังหวัดพระนครศรีอยุธยา
ประวัติการศึกษา	ระดับอุดมศึกษา วท.บ.(เทคนิคการแพทย์) คณะสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์(2547)
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนมูลนิธิการศึกษาเขต 100 ปี (พ.ศ.2551)

