



## รายงานการวิจัย

(เครื่องผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบแบบหีบแยก)

( Plant of Bio-diesel from Press Separate Crude Palm Oil)

โดย

ชื่อหัวหน้าโครงการ นายปัญญา แดงวิไลลักษณ์

ชื่อผู้ร่วม นายวชร กาลาสี

นายดิษฐ์พร ตุงโสธานนท์

นายชัยรัตน์ เพชรศิริ

RCH

TP

359

.B46

ค953

ที่ปรึกษา

ชื่อที่ปรึกษา นายจรรวดีตร เจริญสุข

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน...116902  
วันเดือนปี...16 ส.ค. 2554

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2551

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร

## เครื่องผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบแบบหีบแยก

นายปัญญา แดงวิไลลักษณ์

รายงานฉบับสมบูรณ์ 2553

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและออกแบบเครื่องผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบแบบหีบแยก ด้วยคลื่นไมโครเวฟแบบต่อเนื่อง โดยคลื่นไมโครเวฟจะใช้เวลาสั้นกว่าการให้ความร้อนแบบทั่วไป ซึ่งในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบชนิดกรดไขมันอิสระสูงโดยทั่วไปจะใช้การผลิตแบบสองขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกจะทำการลดกรดไขมันอิสระด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน มีกรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อให้กรดไขมันอิสระที่มีค่าน้อยกว่าร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก หรือ 6 mg KOH/g หลังจากนั้นจะนำมาผลิตไบโอดีเซลต่อด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ซึ่งใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากผลการทดลองพบว่าสามารถลดค่าความเป็นกรดของน้ำมันปาล์มดิบจาก 15-24 mg KOH/g ให้มีค่าน้อยกว่า 6 mg KOH/g ที่สภาวะการลดกรดไขมันอิสระแบบต่อเนื่องคือ ปริมาณเมทานอล 34.5% โดยปริมาตร, ปริมาณกรดซัลฟิวริก 9.2% โดยปริมาตร และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์ 84 วินาที ที่กำลังคลื่นสูงสุด 800 วัตต์ และนำไปผลิตเป็นไบโอดีเซลด้วยคลื่นไมโครเวฟแบบต่อเนื่องได้ความบริสุทธิ์ 83% โดยน้ำหนัก ที่สภาวะปริมาณเมทานอล 20% โดยปริมาตร, ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ กรดไขมันอิสระ +4% โดยน้ำหนัก และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์ 84 วินาที ที่กำลังคลื่นสูงสุด 800 วัตต์

ระบบทำความสะอาดไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง เนื่องจากในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยทั่วไปจะต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบส โดยไตรกลีเซอไรด์จะทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ได้ผลิตภัณฑ์เป็นกลีเซอรอลกับเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน หรือไบโอดีเซลที่ยังไม่ล้าง ซึ่งไบโอดีเซลที่ยังไม่ล้างจะมีสิ่งเจือปนที่ละลายอยู่ในชั้นของเอสเทอร์คือ กลีเซอรอลอิสระ, สบู่, เมทานอล, กรดไขมันอิสระ, ตัวเร่งปฏิกิริยา, น้ำ และกลีเซอไรด์ สิ่งเจือปนเหล่านี้จะมีผลต่ออายุการใช้งานของเครื่องยนต์ ดังนั้นไบโอดีเซลจะต้องผ่านกระบวนการทำความสะอาดก่อนนำไปใช้งาน ระบบการล้างไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องแบ่งเป็น 5 ส่วนคือ คอลัมน์สเตรย์, คอลัมน์ป้อนอากาศ, คอลัมน์พักแยก, คอลัมน์เกลือ และถังผลิตภัณฑ์ ซึ่งผลการทดลองปรากฏว่า ไบโอดีเซลมีคุณสมบัติต่างๆ ดังนี้ กลีเซอรินอิสระเท่ากับ 0.009 % โดยน้ำหนัก, ปริมาณน้ำ 0.07 % โดยน้ำหนัก, ความหนาแน่น  $885 \text{ kg/m}^3$ , เมทิลเอสเทอร์ 97 % โดยน้ำหนัก และ ค่าความหนืด ณ อุณหภูมิ  $40^\circ\text{C}$  เท่ากับ  $5.83 \text{ cSt}$  แต่ข้อเสียของการล้างด้วยน้ำคือ น้ำทำให้เกิดสบู่, ต้องบำบัดน้ำเสียที่เกิดขึ้น และต้องระเหยน้ำออกจากไบโอดีเซลก่อนนำไปใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Plant of Bio-Diesel From Press Separate Crude Palm Oil****Mr.Panya Daungvilailux****Report 2010****Abstract**

This project was studied and designs the biodiesel continuous production process from crude palm oil (CPO) by using a microwave irradiation which the reaction time is shorter than conventional heating. For conventional the biodiesel production from crude palm oil containing a high free fatty acid content by using a two-stage process. The first-stage was a free fatty acid (FFA) reducing process for reduce FFA to less than 2% w/w or 6 mg KOH/g by using sulfuric acid as the catalyst in an esterification reaction which was then followed by a transesterification reaction using sodium hydroxide as the catalyst as the second-stage. Results from the experimental showed that the continuous process for reducing the acid value of CPO from 15-24 mg KOH/g to less than 6 mg KOH/g was found to be 34.5% v/v methanol, 9.2% v/v H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and 84 sec residence time in reactor at the maximum power output of microwave irradiation is 800 watt. And the methyl ester content of biodiesel was 83% w/w with 20% v/v methanol, FFA (esterified oil) +4% w/w and 84 sec residence time in reactor at the maximum power output of microwave irradiation is 800 watt.

Due to the conventional biodiesel production is by using alkali-catalyzed transesterification. In this reaction, triglycerides were reacted with an alcohol to produce glycerol and fatty acid monoalkyl esters (FAME) which are the untreated biodiesel. The untreated biodiesel contains several impurities: free glycerol, soap, methanol, free fatty acids (FFA), catalyst, water and glycerides. The engine life can be reduced by high levels of impurities. Therefore, the purification stage is essential. The system of water washing biodiesel system had the five components: spray column, bubble column, settling column, salt column and dry column. The results have shown that the properties of biodiesel are as follows. 0.009%w/w free glycerol, 0.07%w/w water, 885 kg/m<sup>3</sup> density, 97%w/w methyl ester and 5.83 at 40°C viscosity. The water washing had some disadvantages: emulsions, wastewater treatment and drying of final product.

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จได้เพราะความร่วมมือจากหลายๆ ฝ่ายด้วยกัน หน่วยงานแรกที่จะกล่าวถึงคือ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร ที่ได้ให้การสนับสนุนงบประมาณในการวิจัย สนับสนุนด้านเครื่องมือและสถานที่ และ นายกฤษ สมนึก ที่ให้ข้อมูล และคำปรึกษา ข้าพเจ้าและคณะขอขอบคุณ ณ ที่นี้

นายปัญญา แดงวิไลลักษณ์ และคณะ

เมษายน 2553



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตโครงการ	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์	3
2.1 บทนำ	3
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	11
3.1 การผลิตน้ำมันเอสเทอร์จากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์	11
3.2 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน	13
3.3 กระบวนการทำน้ำมันให้บริสุทธิ์	15
3.4 เมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว	16
3.5 การผลิตเมทิลเอสเทอร์	17
3.6 ทฤษฎีการคำนวณ	27
3.7 ปฏิกิริยาสaponifiเคชัน	28
3.8 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน	29
3.9 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส	29
3.10 ตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา	30
3.11 คุณสมบัติของไบโอดีเซล	31
3.12 การล้างไบโอดีเซล	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.13 เทคโนโลยีการล้างไบโอดีเซล	35
3.14 ไมโครเวฟ	42
3.15 คลื่น	42
3.16 การแผ่รังสีของคลื่น	44
3.17 ลักษณะของคลื่นไมโครเวฟ	44
3.18 กลไกการระเหยของน้ำออกจากวัสดุที่อบแห้งด้วยไมโครเวฟ	45
3.19 แหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ	45
3.20 แม่กนีตรอน	47
3.21 โครงสร้างของแม่กนีตรอน	47
3.22 หลักการทำงานของแม่กนีตรอน	49
3.23 ข้อควรระวังในการใช้เตาไมโครเวฟ	52
3.24 วิธีป้องกันโดยใช้ระบบ Child lock	53
3.25 คลื่นไมโครเวฟ	53
บทที่ 4 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	56
4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	56
4.2 วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	60
4.3 วิธีการทดลอง	60
4.4 การหาสถานะในการลดค่าความเป็นกรดของน้ำมันปาล์มดิบ	63
4.5 การวางแผนการทดลอง	64
4.6 การหารูปแบบสมการทำนายความสัมพันธ์	66
4.7 การหาสถานะที่เหมาะสมในการลดปริมาณกรดไขมันอิสระ	67
4.8 การวิเคราะห์ปริมาณค่าความเป็นกรด	67
4.9 ชุดทดสอบกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยคลื่นไมโครเวฟ	69
4.10 ขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซลด้วยคลื่นไมโครเวฟแบบต่อเนื่อง	70
4.11 การผลิตไบโอดีเซลแบบกะ	77
4.12 หลักการผลิตไบโอดีเซล	79
4.13 วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.14 เครื่องล้างใบ โอติเซลจากน้ำมันพีชใช้แล้วแบบต่อเนื่อง	90
4.15 การทดลองติดเครื่องยนต์	93
<b>บทที่ 5 ผลการทดลอง</b>	<b>95</b>
5.1 ผลการลดกรดไขมันอิสระน้ำมันปาล์มดิบด้วยคลีนไมโครเวฟแบบกะ	95
5.2 สรุปผลการลดกรดไขมันอิสระน้ำมันปาล์มดิบด้วยคลีนไมโครเวฟแบบกะ	100
5.3 ผลการลดกรดไขมันอิสระน้ำมันปาล์มดิบด้วยคลีนไมโครเวฟแบบต่อเนื่อง	100
5.4 ผลการผลิตใบ โอติเซลจากน้ำมันปาล์มดิบด้วยคลีนไมโครเวฟแบบต่อเนื่อง	102
5.5 วิธีการทดลองหาค่าเวลาเซโบลซ์ของน้ำมัน	103
5.6 วิธีการทดลองหาค่า pH	104
5.7 วิธีการทดลอง	108
5.8 ผลการทดลองแต่ละคอต้ม	110
<b>บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง</b>	<b>116</b>
<b>บรรณานุกรม</b>	<b>118</b>
<b>ภาคผนวก</b>	<b>120</b>
ก การคำนวณ	120
ข ชุดการทดลอง	125
ค.คุณสมบัติของใบ โอติเซล	145

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของโครงการ

พลังงานเป็นปัจจัยสำคัญในการพัฒนาประเทศ แต่การจัดการพลังงานของประเทศยังต้องพึ่งปิโตรเลียมนำเข้าถึงประมาณร้อยละ 50 ของอุปทานพลังงาน และเชื้อเพลิงฟอสซิลซึ่งมีส่วนถึงประมาณร้อยละ 80 ส่วนที่เหลือได้มาจากมวลชีวภาพ และพลังงานน้ำเนื่องจากเชื้อเพลิงฟอสซิลโดยเฉพาะปิโตรเลียมได้ก่อให้เกิดปัญหามลพิษแก๊สเรือนกระจกและจากวิกฤตการณ์พลังงานในปี พ.ศ. 2516, 2524, 2549 การจัดหาพลังงานในอนาคตควรจำกัดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล และพัฒนาแหล่งพลังงานทดแทนให้มากขึ้นหนึ่งในแหล่งพลังงานทดแทนนั้นได้แก่ การนำน้ำมันพืชมาทดแทนน้ำมันดีเซล หรือที่เราเรียกว่าไบโอดีเซล ซึ่งในปัจจุบันทางคณะผู้จัดทำได้ดำเนินการเกี่ยวกับการผลิตน้ำมันปาล์มมาเป็นปีที่ 6 แล้ว เช่น 1.สร้างเครื่องแยกผลออกจากทะลายปาล์ม ได้รับรางวัล 1 ใน 10 งานวิจัยดีเด่นในปี 2546 ของทางสกว. 2.สร้างเครื่องแยกเปลือกกับเมล็ดใน 3.เครื่องหีบน้ำมันปาล์ม 4.เครื่องกรองน้ำมันปาล์ม 5.เครื่องผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันที่ใช้แล้ว 6.เครื่องผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิจากหีบรวม 7.ทดสอบสมรรถนะและการสึกหรอของเครื่องยนต์สูบลเดียวโดยใช้น้ำมันไบโอดีเซล B100 จากประสบการณ์ที่ผ่านมาเพื่องานวิจัยที่ต่อเนื่องโครงการที่เสนอขอมานี้เป็นการสร้างชุดการผลิตใหม่ให้ครบถ้วนสมบูรณ์ตั้งแต่เก็บเกี่ยวปาล์มทะลายมาได้ถึงการนำน้ำมันไบโอดีเซล ในการพัฒนาประเทศเพื่อรองรับการนำผลิตผลการเกษตรอย่างปาล์มน้ำมันมาใช้เป็นส่วนหนึ่งของพลังงานทดแทนจากน้ำมันดิบ ในมุมมองของการอยู่ร่วมกันโดยไม่ทำร้ายธรรมชาติ กล่าวคือ ถ้าต้องการใช้พลังงานจากน้ำมันมากขึ้นก็ต้องปลูกพืชตระกูลน้ำมัน ให้มากขึ้น ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ปรุงอาหารของพืชจะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซออกซิเจนโลกใบนี้ของเราก็จะกลับมาสู่สภาวะสมดุลอีกครั้ง อีกในหนึ่งสถาบันฯ ได้มีเครื่องมือ อุปกรณ์ทดสอบบางส่วนสามารถทำการวิจัยได้ จากวิกฤตการณ์น้ำมันราคาสูง ซึ่งมีผลกระทบโดยตรงต่อเศรษฐกิจ และความมั่นคงของประเทศโดยตรง นับตั้งแต่ปลายปี พ.ศ. 2543 เป็นต้นมาจนถึงปัจจุบัน (2550) ราคาน้ำมันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนตอนนี้ทะลุขาร์ตไปเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ราคาน้ำมันดีเซลปกติ (ก่อนหน้าราคาวิกฤติ) อยู่ที่ประมาณลิตรละ 7-8 บาท ก็ได้พุ่งสูงไปถึงลิตรละ 23-27 บาท ตามปริมาณการใช้ที่เพิ่มขึ้น และการจำกัดการผลิตของกลุ่มประเทศโอเปค ผู้ที่มีอิทธิพลสูงสุดในการกำหนดชะตาราคาน้ำมัน

ในปัจจุบันประเทศไทยได้มีการปลูกปาล์มน้ำมันมีประมาณ 2 ล้านไร่และรัฐบาลนี้ก็ได้ประกาศไว้ว่าจะขยายพื้นที่ปลูกให้ได้ถึง 10 ล้านไร่ ภายใน 25 ปี ซึ่งจะเห็นได้ว่าประเทศไทยเราจะมีปริมาณน้ำมันที่ได้จากปาล์มน้ำมันไว้ใช้สำหรับบริโภคและอุปโภค จากงานวิจัยหลากหลายชิ้นได้ทำการทดลองนำน้ำมัน

ปาล์มมาทำน้ำมันผสม น้ำมันไบโอดีเซล ฯลฯ โดยนำน้ำมันเหล่านี้มาผ่านขบวนการ เอสเตอริฟิเคชันเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติให้ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล นอกจากนี้ยังทำการทดลองผสมที่อัตราส่วนต่างๆ เพื่อหาสูตรที่เหมาะสมกับการใช้งานเพื่อให้สามารถใช้งานกับน้ำมันเหล่านี้ได้โดยไม่เกิดปัญหาใดๆ โดยตรวจสอบคุณสมบัติ และเลือกเอาสูตรที่จะใช้ได้มาทำการทดสอบในเครื่องยนต์จริง จากนั้นทำการทดสอบเครื่องยนต์ในห้องทดสอบวัดกำลัง การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง มลพิษ และทำการปรับแต่งเครื่องยนต์ ด้วยเทคนิคต่างๆ เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานกับน้ำมันไบโอดีเซล ถ้านักวิจัยเป็นผลสำเร็จจะเป็นประโยชน์กับเกษตรกร ประชาชน และประเทศชาติ ที่สามารถใช้เชื้อเพลิงน้ำมันพืชได้ไม่ต้องพึ่งน้ำมันดีเซลซึ่งต้องนำเข้าจากต่างประเทศ

## 1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อทดลองผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบแยก ที่มีคุณภาพ และราคาถูก

## 1.3 ขอบเขตโครงการ

1. สร้างเครื่องผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบแบบเอสเตออร์ 20 ลิตรต่อชั่วโมง
2. นำน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้ไปทดสอบหาคุณสมบัติ เวลาเซย์โบลต์ ค่า PH เปรียบเทียบกับมาตรฐานน้ำมันดีเซล

## 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถสร้างเครื่องผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบได้
2. สามารถผลิตน้ำมันไบโอดีเซลที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับมาตรฐานน้ำมันดีเซลหมุนเร็ว
3. ทำให้เป็นการสนับสนุนผลิตผลของชาวสวนปาล์ม
4. เป็นการช่วยชาติประหยัดเงินในการสั่งซื้อทรัพยากรพลังงานจากต่างประเทศ
5. สามารถใช้เป็นพลังงานทดแทนได้ในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# วรรณกรรมปริทรรศน์

### 2.1 บทนำ

พลังงานเป็นปัจจัยสำคัญในการพัฒนาประเทศ แต่การจัดการพลังงานของประเทศยังต้องพึ่งปิโตรเลียมนำเข้าถึงประมาณร้อยละ 50 ของอุปทานพลังงาน และเชื้อเพลิงฟอสซิลซึ่งมีสัดส่วนถึงประมาณร้อยละ 80 ส่วนที่เหลือ ได้มาจากมวลชีวภาพ และพลังน้ำเนื่องจากเชื้อฟอสซิล โดยเฉพาะปิโตรเลียมได้ก่อให้เกิดปัญหามลพิษแก่สิ่งแวดล้อมและจากวิกฤตการณ์พลังงานในปี พ.ศ. 2516 การจัดหาพลังงานในอนาคตควรจำกัดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล และพัฒนาแหล่งพลังงานทดแทน ให้มากขึ้น หนึ่งในแหล่งพลังงานทดแทนนั้น ได้แก่ การนำน้ำมันพืชมาทดแทนน้ำมันดีเซล หรือที่เราเรียกว่า ไบโอดีเซล โดยมีงานวิจัยทั้งในประเทศและต่างประเทศที่เกี่ยวข้องดังนี้

### 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยของ ร.ศ. พูลพร แสงบางปลา นายสมาคมวิศวกรรมยานยนต์ไทย จากเอกสารประกอบการสัมมนาเรื่องการใช้ไบโอดีเซลกับเครื่องยนต์มีผลอย่างไร 29 พฤษภาคม 2544 [1] ได้ทำการทดสอบกับน้ำมันพืช 4 ชนิดดังนี้คือ น้ำมันถั่ว น้ำมันมะพร้าว น้ำมันสลัดดี น้ำมันสบู่ดำ น้ำมันมันพืชเหล่านี้มาผสมกับน้ำมันดีเซลโดยอัตราส่วนน้ำมันพืชต่อน้ำมันดีเซล คือ 20% 40% 60% และ 80% และได้ทดสอบโดยใช้น้ำมันพืช 100% โดยตรงโดยไม่ผสมน้ำมันดีเซล โดยก่อนทำการทดสอบมีการหาคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันเพื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล โดยเครื่องยนต์ที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไปเป็นเครื่องยนต์ KUBOTA สูบเดียว เครื่องยนต์ PETTER 2 สูบ และเครื่องยนต์ดีเซล 3 สูบ KIRLOSKAR R33 ในการทดสอบได้มีการทดสอบหาสมรรถนะของเครื่องใช้น้ำมันดีเซล 100% โดยทดสอบค่า bsfc brake และ power

Freedman และคณะ (1984) ทำการทดลอง โดยใช้น้ำมันพืช 4 ประเภท คือ น้ำมันถั่วลิสง น้ำมันจากเมล็ดฝ้าย น้ำมันดอกทานตะวัน และน้ำมันถั่วเหลือง เป็นสารตั้งต้นภายใต้สภาพและเงื่อนไขคือ ทำปฏิกิริยากับเมทานอล ที่อัตราส่วนโมล 6: 1 โดยใช้โซเดียมเมทอกไซด์ 0.5 เปอร์เซ็นต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และควบคุมอุณหภูมิที่ 60 °ซ ตลอดการทดลอง สามารถประมาณค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นเมทิลเอสเทอร์ได้ประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ จากการสุ่มตัวอย่างที่เวลา 1 นาทีของการทดลองสำหรับน้ำมันถั่วเหลืองและน้ำมันดอกทานตะวัน และหลังจากนั้น 1 ชั่วโมง อัตราเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ส่วนใหญ่จะมีพฤติกรรมในลักษณะที่คล้ายคลึงกัน สำหรับน้ำมันพืชทั้ง 4 ชนิด คือ เปอร์เซ็นต์ความเป็นเมทิลเอสเทอร์ประมาณ 93 ถึง 98 เปอร์เซ็นต์

Ryan III และคณะ (1984) ได้ทำการทดสอบเครื่องยนต์แบบ Indirect Injection และเครื่องยนต์แบบ Direct Injection โดยใช้น้ำมันพืชหลาย ๆ ชนิดอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 140 °ซ ผลปรากฏว่าเครื่องยนต์แบบ Indirect Injection ไม่มีปัญหาในการเดินเครื่องระยะยาว แต่เครื่องยนต์แบบ Direct Injection มีปัญหาเรื่องการสะสมของสารประกอบคาร์บอนพอสมควร แต่ดีกว่าการใช้โดยไม่ได้อุ่นร้อนเป็นอย่างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Chiyuki และ Jun-ichi (1988) ทำการศึกษาน้ำมันพืชเรพซิด กับเครื่องยนต์ดีเซลยี่ห้อ ยามาฮ่า มีห้องเผาไหม้ล่วงหน้า น้ำมันลดทอน และน้ำมันลดกรด ผลการทดสอบสรุปว่า น้ำมันเรพซิดในสภาพลดกรดแล้วสามารถใช้แทนน้ำมันดีเซลได้ ส่วนน้ำมันลดทอน และน้ำมันดิบใช้ไม่ได้ เนื่องจากมีการหลงเหลือจากการเผาไหม้อยู่ภายในห้องเผาไหม้เป็นจำนวนมาก

Cvengros และ Povazanec (1996) ได้ศึกษาการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันเรพซิด โดยใช้โซดาไฟเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิต และได้สรุปว่า น้ำมันที่ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันมีควรมีความเป็นกรด (acidity number) สูงกว่า 2 mg KOH/g และปริมาณน้ำต้องไม่เกิน 0.1 wt %. การมีค่าความเป็นกรดเกินปริมาณที่สูงกว่า 2 mg KOH/g อาจแก้ไขได้ด้วยการเพิ่มโซดาไฟ แต่การเกิดปฏิกิริยาจะต่ำลง มีการสูญเสียเมทิลเอสเทอร์ในชั้นของกลีเซอรอลสูงขึ้น และเกิดเจลในชั้นของเมทิลเอสเทอร์มากขึ้น โดยการเกิดปฏิกิริยาระหว่างกรด และโซดาไฟจะเกิดเป็นสบู่ และสบู่ซึ่งเป็นสารอิมัลชันฟายเออร์ โดยการเกิดปริมาณที่สูงจะทำให้กลีเซอรอลละลายในชั้นเมทิลเอสเทอร์มากขึ้น ส่งผลให้การแยกกลีเซอรอลโดยแรงโน้มถ่วงโลกทำได้ยากขึ้นเป็นผลให้เกิดสมุดเร็วขึ้น และหยุดยั้งการเกิดปฏิกิริยา Cvengros และ Povazanec ได้ทำการขจัดสบู่ของเกลือโซเดียมโดยการใส่กรดฟอสฟอริก สลายสบู่ให้เป็นกรดไขมัน และโซเดียมฟอสเฟตก่อนที่จะทำเป็นกลางด้วยแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งจะได้น้ำและสบู่ของเกลือแอมโมเนียม แต่สบู่ของเกลือแอมโมเนียมสามารถเผาไหม้ได้ทำให้ไม่มีปริมาณเถ้าเหลืออยู่

Peterson และคณะ (1996) ได้ทำการทดสอบใช้เอสเทอร์ผลิตจากน้ำมันเรพซิด และน้ำมันถั่วเหลือง ที่ผ่านการใช้ทอดอาหารแล้ว ในรถบรรทุกขนาดเล็ก เครื่องยนต์ดีเซลวิ่งบนถนนตามระยะทางจริง ผลปรากฏว่า ในระยะทาง 1400 ไมล์แรก แรงม้าของเครื่องยนต์ที่ใช้เอสเทอร์มีค่าเทียบเท่ากับน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล แต่ในช่วงหลังจนถึง 35,500 ไมล์ กำลังแรงม้าของเครื่องยนต์ที่ใช้เอสเทอร์มีการลดลง และน้อยกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล 2 เปอร์เซ็นต์

ในการทดลองชุดเดียวกัน Peterson ได้ทำการทดลองใช้เอสเทอร์ในเครื่องยนต์ดีเซล ในห้องทดลอง ช่วงระยะเวลา 200 ชั่วโมง เมื่อวิเคราะห์ผลการสึกหรอจากการป่นเปื้อนอยู่ในระบบน้ำมันหล่อลื่น ได้ผลดังนี้

- ปริมาณเหล็กที่ป่นเปื้อนในน้ำมันหล่อลื่นซึ่งบ่งบอกถึงการสึกหรอของกระบอกสูบเพลาลูกเบี้ยว และเพื่องขับ พบว่าของเครื่องยนต์ที่ใช้เอสเทอร์มีค่ามากกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลเล็กน้อย แต่อยู่ในช่วงที่กำหนด
- ปริมาณอลูมิเนียมที่ป่นเปื้อนในน้ำมันหล่อลื่น ซึ่งบ่งบอกถึงการ สึกหรอของ ลูกสูบและเบร้ง พบว่าเครื่องยนต์ที่ใช้เอสเทอร์มีค่าไม่แตกต่างจากเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล
- การวิเคราะห์ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นหลังใช้งาน 200 ชั่วโมงพบว่า ของเครื่องยนต์ที่ใช้เอสเทอร์อยู่ในช่วงมาตรฐานที่กำหนดและใกล้เคียงกับเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล
- แหวนลูกสูบของเครื่องยนต์ที่ใช้เอสเทอร์ สึกหรอต่ำกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิง ดีเซลมาก แต่ลูกสูบจะสึกหรอสูงกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลเล็กน้อย ส่วนการสึกหรอของลิ้นไอดีจะมีค่าเท่ากับเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล แต่การ สึกหรอของลิ้นไอเสียจะต่ำกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลเล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ปริมาณการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ที่ใช้เอสเตอร์ จะมากกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลประมาณ 10-15 เปอร์เซ็นต์โดยประมาณ

Ma และคณะ (1998) ได้ทดลองการผลิตเอสเตอร์จากไขมันสัตว์กับเมทานอล โดยใช้ปฏิกิริยา ตัวเร่งเบส พบว่าในช่วง 1 นาทีแรกอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะค่อนข้างช้ามาก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการกวนผสมแต่ ที่ระยะเวลาตั้งแต่ 1 ถึง 5 นาที ต่อมาปฏิกิริยาจะเกิดรวดเร็วมาก และอัตราเปอร์เซ็นต์ความเป็นเมทิลเอสเตอร์ก็ เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเช่นกัน หลังจากนั้นอัตราเร็วของปฏิกิริยาดังกล่าวจะค่อย ๆ ลดลงจนค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็น เมทิลเอสเตอร์สูงสุดที่เวลาประมาณ 15 นาที ส่วนปริมาณของโคกลีเซอไรด์และโมโนกลีเซอไรด์ จะเพิ่มขึ้นในช่วงแรกและค่อย ๆ ลดลงจนมีค่าคงที่เมื่อสิ้นสุดกระบวนการ จะมีปริมาณของโมโนกลีเซอไรด์มากกว่าโคกลีเซอไรด์มากกว่าไตรกลีเซอไรด์ตามลำดับ

Kelvin, Shane และ Paul (1999) ทำการศึกษาน้ำมันเรพซิด ในสภาพลดกัมลศกรดแล้วนำมา กรองด้วยกรองที่ความละเอียดขนาด 5 ไมครอน นำไปผสมกับน้ำมันดีเซลในอัตราส่วน 25 : 75 ทำการทดสอบ กับเครื่องยนต์ดีเซลที่มีห้องเผาไหม้ล่วงหน้า โดยเปรียบเทียบกับการใช้ น้ำมันดีเซลทำการทดสอบเป็นเวลา 170 ชั่วโมง ผลการทดสอบพบว่า กำลังของเครื่องยนต์และอัตราความสิ้นเปลืองของน้ำมันเชื้อเพลิงไม่แตกต่างกับการ ใช้ น้ำมันดีเซลมากนัก และไม่มีผลผิดปกติของปริมาณโลหะที่สึกหรอผสมในน้ำมันหล่อลื่นหลังใช้งาน

Altin และคณะ (2001) ได้สรุปว่า เมื่อใช้น้ำมันพืชเป็นเชื้อเพลิงแทนน้ำมันดีเซล จะมีการ สูญเสียกำลังงานเพียงเล็กน้อย แต่จะมีการปลดปล่อยอนุภาคของแข็ง (particulate matter) ที่สูงกว่าและหากใช้ น้ำมันพืชดิบเป็นเชื้อเพลิงจะต้องทำการดัดแปลงเครื่องยนต์ ส่วนเมทิลเอสเตอร์ที่ผลิตจากน้ำมันพืชจะมีสมรรถนะ ของเครื่องยนต์และสมบัติของก๊าซไอเสียที่ปล่อยออกมาใกล้เคียงกับการใช้น้ำมันดีเซล ดังนั้นจะได้รับการยอมรับ ในการใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลได้สูงกว่า

Crabbe และคณะ (2001) ได้แสดงความเห็นว่า น้ำมันปาล์มดิบ (crude palm oil) เป็นน้ำมัน พืชที่สำคัญ 1 ใน 4 ของตลาดโลก และมีราคาถูกกว่าน้ำมัน canola น้ำมันเรพซิด และน้ำมันถั่วเหลือง ซึ่ง เหมาะสมในการใช้ทดแทนน้ำมันดีเซล โดย Crabbe และคณะ ได้ผลิตเมทิลเอสเตอร์ โดยใช้กรดซัลฟิวริกเป็น ตัวเร่งปฏิกิริยา และสรุปว่า การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันที่เหมาะสมควรใช้สัดส่วนเมทานอลต่อ น้ำมัน เองโมเลกุลเท่ากับ 40 : 1 กรดซัลฟิวริก 5% (vol/w%) ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 9 ชม.

Bari และคณะ (2002) ได้ทำการทดสอบเครื่องยนต์ ยี่ห้อฮันมาร์ รุ่น L60AE-DTM single cylinder 4 stroke air cooled diesel engine. โดยใช้น้ำมันพืชอุณหภูมิที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่าที่อุณหภูมิห้อง (30 - 32<sup>o</sup> C) ความหนืดของน้ำมันพืชมีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซลประมาณ 10 เท่า และมีของแข็งผสมอยู่ จึงใช้เดินเครื่อง โดยตรงไม่ได้ หากต้องการให้ได้ น้ำมันพืชไหลดีต้องอุ่นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 60<sup>o</sup> C และหากต้องการให้ความ หนืดใกล้เคียงน้ำมันดีเซล ต้องอุ่นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 90<sup>o</sup> C

ธีรวัฒน์ อภิชาติ (2545) ทำการทดสอบเครื่องยนต์ดีเซลสูบนอกสูบเดียว 4 จังหวะ ยี่ห้อ คู โบต้า รุ่น ET 80 แบบ IDI 500 ซี.ซี. โดยใช้น้ำมันปาล์มดิบ และน้ำมันปาล์มโอเลอิน ผลปรากฏว่าเครื่องยนต์ สามารถทำงานได้ แต่การสึกหรอของเครื่องยนต์ ได้แก่ แหวนลูกสูบ โดยเฉพาะแหวนอัด สูงกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซลมาก ทำให้อายุการใช้งานของเครื่องยนต์ลดลงจากการใช้น้ำมันดีเซลประมาณ 2 เท่า ในกรณีที่ใช้น้ำมันปาล์มโอเลอิน และ 10 เท่าในกรณีที่ใช้น้ำมันปาล์มดิบ

ชาคริต ทองอุไร และคณะ (2544) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากผลิตผลปาล์มน้ำมัน คือ น้ำมันทอดใช้แล้ว น้ำมันปาล์มรีไฟน์ น้ำมันปาล์มแยกยางเหนียวและลดกรดชนิดหีบรวม (เกรคบี) ไชปาล์มส เตียรินและ superhard stearin ด้วยกระบวนการ transesterification แบบกะ โดยใช้เมทิลแอลกอฮอล์เป็นสารเข้า ทำปฏิกิริยาและใช้โซดาไฟเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า กรรมวิธีการผลิตอาจแบ่งได้เป็น 6 ขั้นตอน คือ การ เตรียมน้ำมัน การเตรียมสารละลาย การทำปฏิกิริยา การแยกกลีเซอริน การล้าง และการจัดน้ำ ผลได้ของเมทิล เอสเตอร์ที่ผลิตได้มีความบริสุทธิ์เกือบ 100% สภาวะการผลิตที่เหมาะสม โดยใช้สัดส่วนเชิงโมลของน้ำมันต่อ เมทิลแอลกอฮอล์เป็น 1 : 6 หรือเมทิลแอลกอฮอล์ประมาณ 20% โดยน้ำหนัก และโซดาไฟ 0.5 – 1% ของ น้ำมันอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 60 – 80 องศาเซลเซียส โดยมีกรวณประมาณ 15 – 30 นาที และ ปลอ่ยให้เกิดปฏิกิริยาต่อานาน 3–4 ชั่วโมง เมทิลเอสเตอร์ที่ได้มีสมบัติหลายประการใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลหมุน เร็ว เช่น ความหนาแน่น ความหนืด ค่าความร้อน และช่วงอุณหภูมิการกลั่น แต่จุดไหลเทจะสูงกว่าน้ำมันดีเซล เนื่องจากมีสัดส่วนเมทิลเอสเตอร์ที่อึดตัวที่มีจุดหลอมเหลวสูงในปริมาณมาก

นุชิตา ชันนุรพา และคณะ (2545) [2] ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืช 3 ชนิด คือ น้ำมันเมล็ดฝ้าย น้ำมันเมล็ดในปาล์ม และน้ำมันเมล็ดละหู่ ครั้งละ 800 กรัม ด้วยปฏิกิริยา transesterification ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NaOH 0.1% 0.5% และ 1% ของน้ำหนักน้ำมัน กับสัดส่วนน้ำหนักเมทานอลต่อน้ำมัน 1 : 10 1 : 6.67 และ 1 : 5 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 2 ชั่วโมงและความเร็วรอบในการกรวณ 500 รอบ/ นาที พบว่า ผลได้สูงสุดจากน้ำมันเมล็ดฝ้ายเท่ากับ 94.9% ที่สัดส่วนน้ำหนักเมทานอลต่อน้ำมัน 1 : 6.67 ตัวเร่ง ปฏิกิริยา 0.5% ของน้ำหนักน้ำมันผลได้สูงสุดจากน้ำมันเมล็ดในปาล์มเท่ากับ 92.1% ที่สัดส่วนน้ำหนักเมทานอล ต่อน้ำมันและน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาเดียวกันกับน้ำมันเมล็ดฝ้าย ผลได้สูงสุดจากน้ำมันละหู่เท่ากับ 83.6% ที่ สัดส่วนน้ำหนักเมทานอลต่อน้ำหนัก 1 : 5 และตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5% น้ำหนักน้ำมัน วิเคราะห์เมทิลเอสเตอร์ใน ผลผลิตจากการดูแสงอินฟราเรดของหมู่เมทิลและคาร์บอนิลด้วยเทคนิค FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) โดยเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมันจากน้ำมันทั้ง 3 ชนิดมีสมบัติใกล้เคียงกันโดยมีความหนาแน่น และความหนืดสูงกว่าน้ำมันดีเซล แต่จุดกลั่นเริ่มต้น (initial boiling point, IBP) ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล ทั้งนี้ น้ำมัน เมล็ดฝ้ายให้ไบโอดีเซลสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลมากที่สุด

สมิตร โจมฉลา และนายรัตพงศ์ วงศ์พิมพ์รัมย์ พ.ศ. 2525 [3] ปริญญาโท สาขา ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร เรื่องการศึกษาเชื้อเพลิงทดแทน น้ำมันดีเซล โดยศึกษาคุณสมบัติของน้ำมันพืชเพื่อทดแทนน้ำมันดีเซลโดยการนำน้ำมันพืชมาผสมน้ำมันดีเซลที่ สัดส่วนในการผสม 5% 10% 20% 30% และ 50% เปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลมาตรฐานเพื่อคุณสมบัติทาง กายภาพ และศึกษาถึงกำลังงาน และทอร์คที่ได้เมื่อนำมาใช้ร่วมกับเครื่องยนต์โดยเครื่องยนต์ที่นำมาทดสอบเป็น เครื่องยนต์ NISSAN TD27 4 สูบ 16 วาล์ว

ศ.ดร.ปริดา วิบูลย์สวัสดิ์ [5] ผู้อำนวยการสถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต กล่าวว่า การทดลองและการพัฒนาใช้น้ำมันพืชในเครื่องยนต์ดีเซล ได้ทำการ ในรูปแบบน้ำมันผสมระหว่างดีเซลกับน้ำมันพืช และน้ำมันพืชล้วน ซึ่งน้ำมันพืชที่ทดลองมีทั้งน้ำมันพืชดิบ น้ำมัน พืชที่ผ่านการกรอง และน้ำมันพืชที่ได้รับการแปลงในรูปเอสเตอร์ โดยน้ำมันที่ได้รับการทดสอบและนำมาใช้ อย่างกว้างขวางใน อเมริกา ยุโรป และออสเตรเลีย ได้แก่ Rape Seed Oil , ทานตะวันและถั่วลิสง น้ำมันพืชเหล่านี้มี

ความหนืดสูงจึงเหมาะสำหรับเผาไหม้ในเครื่องยนต์ที่มีความเร็วรอบต่ำ เช่นเครื่องยนต์สำหรับเกษตรกรรม และการประมงที่ควบคุมมลพิษไม่เข้มงวดมากนัก นอกจากนี้ยังกล่าวอีกว่าสำหรับน้ำมันดีเซลที่ผสมกับน้ำมันพืชต่ำกว่า 15 % จะเผาไหม้ในเครื่องยนต์ อัดระเบิดแล้วปล่อยออกไซด์ของไนโตรเจน ในปริมาณใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล แต่จะมีคาร์บอนมอนอกไซด์ ฟุนละอองและควันดำสูงกว่ามาตรฐานควบคุมไอเสียจากยานพาหนะ ถ้าน้ำมันพืชมาดัดแปลงเป็นเมทิลเอสเทอร์ที่มีความหนืดต่ำลงจะมีการเผาไหม้ที่ดีขึ้นและเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์หรือฟุนน้อยลง แต่ราคาก็จะสูงขึ้นไปด้วย

ในปี 2004 งานวิจัยของวีระชัย เลิศสถาพรสุข และคณะ [1] เรื่องการใช้รังสีไมโครเวฟเร่งการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง และผลกระทบของการใช้ไบโอดีเซลในเครื่องยนต์ดีเซลกำเนิดไฟฟ้าขนาด 100 kW ได้ทำการศึกษากระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันพืชที่ผ่านการใช้งานแล้ว ภายใต้การทำปฏิกิริยาทรานส์เอทิลเลชันด้วยรังสีไมโครเวฟ ไบโอดีเซลที่ผลิตได้นั้นนำไปทดสอบความบริสุทธิ์ด้วยเครื่อง HPLC ทดสอบสมบัติทางเชื้อเพลิงตามมาตรฐาน ASTM และนำไปทดสอบสมรรถนะและมลพิษในเครื่องยนต์ดีเซลกำเนิดไฟฟ้าที่ควบคุมความเร็วรอบคงที่ 1500 รอบต่อนาที และปรับเปลี่ยนภาระของเครื่องยนต์ที่ 0, 25, 50 และ 75 kW ตามลำดับและนำไปเปรียบเทียบกับการทำงานของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง ผลการศึกษาพบว่าภายใต้การให้ความร้อนในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอทิลเลชันแบบต่อเนื่องด้วยรังสีไมโครเวฟที่อัตราส่วนเชิงโมลของน้ำมันพืช 1 ส่วน ต่อเอทานอล 12 ส่วน ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 3% โดยน้ำหนักเป็นสารเร่งปฏิกิริยา และใช้เวลาทำปฏิกิริยา 30 วินาที สามารถเปลี่ยนน้ำมันพืชที่ใช้แล้วไปเป็นไบโอดีเซลได้สมบูรณ์ ด้านผลกระทบต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์พบว่า การใช้ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงส่งผลให้ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ลดลงเล็กน้อย และส่วนผลกระทบต่อมลพิษ พบว่าการใช้ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงมีอัตราการปลดปล่อยไฮโดรคาร์บอนลงได้ร้อยละ 25.11 และมีอัตราการปลดปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์เฉลี่ยลดลงร้อยละ 17.96 แต่มีอัตราการปลดปล่อยไนโตรเจนออกไซด์เฉลี่ยเพิ่มขึ้นร้อยละ 2.74 เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง

ในปี 2006 ทรงพล และพิภพ [2] ได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไบโอดีเซลโดยให้ความร้อนกับไมโครเวฟทั้งแบบกะและแบบต่อเนื่อง โดยประยุกต์ใช้เตาไมโครเวฟ 800 วัตต์ที่ใช้กันทั่วไปใช้น้ำมันปาล์มรีไฟน์กับเมทานอลเป็นสารตั้งต้น โดยมีโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การทดลองจะศึกษาถึงร้อยละ โดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา (0.3%, 0.4%, 0.5%) สัดส่วนเกินพอของเมทานอล (100%, 200%, 300%) และกำลังไฟไมโครเวฟ Low (20%), Medium-Low (30%), Medium (50%), Medium-High (70%), High (100%) และใช้ retention time 2 นาที ในการผลิตแบบกะซึ่งใช้ screw-cap bottle 250 มิลลิลิตร พบว่าที่ กำลังไฟ Low ความร้อนต่ำเกินไปจนไม่เกิดปฏิกิริยาและที่ Medium-High และ High ความร้อนสูงเกินไปจนเมทานอลกลายเป็นไอและมีความดันสูง สภาวะเหมาะสมที่สุดที่ กำลังไฟ Medium-Low 0.4%NaOH และสัดส่วนเมทานอลเกินพอ 200% ไบโอดีเซลซึ่งวิเคราะห์ด้วย Thin layer chromatograph(TLC) ได้ความบริสุทธิ์ไบโอดีเซล 99.1% ในการผลิตแบบต่อเนื่องพบว่าที่ กำลังไฟ Low และ Medium-Low ไม่เกิดปฏิกิริยา กำลังไฟ High เกิดการเดือดภายในถังปฏิกรณ์แก้ว สภาวะที่ดีที่สุดคือการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้กำลังไฟ Medium-High ที่ 0.5%NaOH และสัดส่วนเมทานอลเกินพอ200% ได้ความบริสุทธิ์เอสเทอร์ 95.7% ผลได้ของไบโอ-ดีเซลขึ้นอยู่กับเกิดการเกิดปฏิกิริยา Saponification ข้างเคียง ที่ส่งผลต่อเนื่องในขั้นตอน กระบวนการล้างด้วยน้ำ

ในปี 2004 Saifuddin และคณะ [3] ได้ทำการศึกษากระบวนการผลิตเอทิลเอสเทอร์ โดยใช้ น้ำมันพืช ใช้แล้ว และใช้หลักการของคลื่นไมโครเวฟเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนเพื่อหาสภาวะที่ดีที่สุดของ กระบวนการผลิต พบว่าการเปลี่ยนสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น เป็นสาเหตุทำให้โมเลกุลเกิดการหมุนอย่างรวดเร็ว และได้เกิดความร้อนจากแรงเสียดทานเนื่องจากการเคลื่อนที่ ซึ่งเป็นการเพิ่มอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งสภาวะที่ดีที่สุดของกระบวนการ คือ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5% โดยน้ำหนัก ของน้ำมันพืชใช้แล้ว, ปริมาณของเอทานอล 100%, บันผสมกับปริมาณที่ทำให้ของเหลวกระเด็นน้อยสุด ระหว่างปฏิกิริยาการผสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน และใช้การแผ่รังสีไมโครเวฟในการผสมที่ 50% ของกำลัง สูงสุดที่ 750 วัตต์

ในปี 2008 สราญกร [4] นำเสนอผลการทดลองในงานประชุมวิชาการ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ครั้งที่ 16 ว่า คลื่นอัลตราโซนิคและคลื่นไมโครเวฟ สามารถใช้เป็นแหล่งพลังงาน ความร้อน เพื่อสังเคราะห์ไบโอดีเซลได้ดีกว่าการต้ม การทดลองเริ่มจากการนำกรดไขมันอิสระบริสุทธิ์และ ตัวเร่งปฏิกิริยาพื้นฐานคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้ความร้อนเป็นพลังงาน กระบวนการดังกล่าว ซึ่งเป็น เทคนิคที่ทำกันทั่วไปทำให้น้ำมันส่วนหนึ่งกลายเป็นสบู่ นักวิจัยจึงเปลี่ยนตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นกรดซัลฟิวริก ทำให้ได้ไบโอดีเซลตามที่ต้องการแต่ใช้เวลาในการสังเคราะห์นานขึ้น จากการทดลองใช้คลื่นอัลตราโซนิค และคลื่นไมโครเวฟพบว่าสามารถใช้เครื่องไมโครเวฟที่ใช้กันทั่วไปมาดัดแปลง โดยเจาะรูด้านบน ติดตั้ง คอนเดนเซอร์ เพื่อให้ไอที่ลอยออกไปเกิดการควบแน่นตกลงมาภายใน ป้องกันเมทานอลหรือไบโอดีเซล ระเหยออกไป ทั้งยังให้ความร้อนได้สูงสุด ทำให้สามารถสังเคราะห์ไบโอดีเซลได้ 87% ในเวลาเพียง 4 นาที เมื่อเทียบกับการสังเคราะห์ด้วยความร้อน ซึ่งใช้เวลานานถึง 6 ชั่วโมง

ในปี 2007 Azcan and Danisman [5] ได้ทำการทดลองโดยนำน้ำมันจากเมล็ดฝ้ายมาผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 323 K, 328 K, 333 K, 338 K ใช้เวลา ภายในเครื่องไมโครเวฟ 5, 6, 7 นาที อัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อน้ำมันคือ 0.5%, 1.0%, 1.5% และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 โดยน้ำหนัก ผลปรากฏว่า สภาวะที่ เหมาะสมที่สุดในการผลิตไบโอดีเซลคือ ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 333 K ใช้เวลาภายในเครื่อง ไมโครเวฟ 7 นาที และอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันเท่ากับ 1.5% โดยน้ำหนัก ได้ไบโอดีเซลที่มีความ บริสุทธิ์ 99.8%

ในปี 2008 Azcan and Danisman [6] ได้ทำการทดลองอีกครั้งโดยนำน้ำมัน rapeseed มาผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 313 K, 323 K, 333 K ใช้เวลาภายในเครื่อง ไมโครเวฟ 1, 3, 5 นาที และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ชนิดคือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ กับ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันคือ 0.5%, 1.0%, 1.5% โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนโดยโมลของเม

ทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ผลปรากฏว่า สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลคือ ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 333 K, ใช้เวลาภายในเครื่องไมโครเวฟ 5 นาที และอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันเท่ากับ 1.0% โดยน้ำหนัก ได้ไบโอดีเซลที่มีความบริสุทธิ์ 99.4% และปริมาณผลได้ของไบโอดีเซล (%yield) เท่ากับ 91.7%

ในปี 2008 Lertsathapomsuk และคณะ [7] ได้ทดสอบเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าจากเครื่องยนต์ดีเซล โดยใช้น้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วมาผลิตเป็นไบโอดีเซลด้วยกระบวนการเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบต่อเนื่องโดยใช้เครื่องไมโครเวฟขนาด 800 วัตต์ทำการผลิตน้ำมัน ส่วนหนึ่งในงานวิจัยได้กล่าวถึงการผลิตไบโอดีเซลที่มีความบริสุทธิ์ 97% โดยทำปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโดยโมลของเอทานอลต่อน้ำมัน 12:1 ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 3% และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาภายในเครื่องไมโครเวฟ 30 วินาที

ในปี ค.ศ. 1984 Freedman และคณะ[1] ทำการทดลอง โดยใช้น้ำมันพืช 4 ประเภท คือ น้ำมันถั่วลิสง น้ำมันจากเมล็ดฝ้าย น้ำมันดอกทานตะวัน และน้ำมันถั่วเหลือง เป็นสารตั้งต้นภายใต้สภาพและเงื่อนไข คือ ทำปฏิกิริยามะทานอลที่อัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 6:1 โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5% เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และควบคุมอุณหภูมิที่ 60 °C ตลอดการทดลอง ได้เปอร์เซ็นต์ของเมทิลเอสเทอร์ประมาณ 80% จากการสุ่มตัวอย่างที่เวลา 1 นาทีของการทดลองสำหรับน้ำมันถั่วเหลืองและน้ำมันดอกทานตะวัน และหลังจากนั้น 1 ชั่วโมง ปริมาณของเมทิลเอสเทอร์ส่วนใหญ่จะมีพฤติกรรมในลักษณะที่คล้ายคลึงกัน

ในปี ค.ศ. 1996 Cvengros และ Povazanec[2] ได้ศึกษาการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันเรพซิด โดยใช้โซดาไฟเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิต และได้สรุปว่า น้ำมันที่ทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิ-เคชันควรมีความเป็นกรด (acid number) สูงกว่า 2 mg KOH/g และปริมาณน้ำต้องไม่เกิน 0.1% โดยน้ำหนัก การมีค่าความเป็นกรดเกินปริมาณที่สูงกว่า 2 mg KOH/g อาจแก้ไขด้วยการเพิ่ม โซดาไฟ แต่การเกิดปฏิกิริยาจะต่ำลง มีการสูญเสียเมทิลเอสเทอร์ในชั้นของกลีเซอรอลสูงชัน และเกิดเจลในชั้นของเมทิลเอสเทอร์มากขึ้น โดย การเกิดปฏิกิริยาระหว่างกรดและโซดาไฟจะทำให้เกิดสบู่ และสบู่ซึ่งเป็นสารอิมันซิฟายเออร์(Emulsifier) จะทำให้กลีเซอรอลละลายในชั้นเมทิลเอสเทอร์มากขึ้น ส่งผลให้การแยกกลีเซอรอลโดยแรงโน้มถ่วงของโลกทำได้ยากขึ้นเป็นผลให้เกิดสมมูลเร็วขึ้น และหยุดยั้งการเกิดปฏิกิริยา Cvengros และ Povazanec ได้ทำการขจัดสบู่ของเกลือโซเดียมโดยการ ใช้กรดฟอสฟอริกสลายสบู่ให้เป็นกรดไขมันและ โซเดียมฟอสเฟต ก่อนที่จะทำให้เป็นกลางด้วยแอม โมเนียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งจะได้น้ำและสบู่ของเกลือแอมโมเนีย แต่สบู่ของเกลือแอมโมเนียสามารถเผาไหม้ได้ทำให้ไม่มีปริมาณเถ้าเหลืออยู่

ในปี ค.ศ. 1998 Ma และคณะ[3] ได้ทดลองการผลิตเอสเทอร์จากไขมันวัวกับเมทานอล โดยใช้ปฏิกิริยาตัวเร่งเบส พบว่าในช่วง 1 นาทีแรกอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะค่อนข้างช้ามาก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการผสม แต่ที่ระยะเวลาตั้งแต่ 1 ถึง 5 นาที ต่อมาปฏิกิริยาจะเกิดรวดเร็วมาก และอัตราเปอร์เซ็นต์ความเป็นเมทิลเอสเทอร์ก็เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเช่นกัน หลังจากนั้นอัตราเร็วของปฏิกิริยาดังกล่าวจะค่อยๆ ลดลงจนค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นเมทิลเอสเทอร์สูงสุดที่เวลาประมาณ 15 นาที ส่วนปริมาณของไดกลีเซอไรด์ (di-glycerides) และ

โมโนกลีเซอไรด์ (mono-glycerides) จะเพิ่มขึ้นในช่วงแรกและค่อยๆ ลดลงจนมีค่าคงที่เมื่อสิ้นสุดกระบวนการ จะมีปริมาณของโมโนกลีเซอไรด์มากกว่าไดกลีเซอไรด์มากกว่าไตรกลีเซอไรด์ตามลำดับ

ในปี ค.ศ. 2008 Berriosa และ Skeltonb[6] ได้เปรียบเทียบกระบวนการทำความสะอาดไบโอดีเซล 3 แบบ คือ การล้างด้วยน้ำ (Water washing) เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange resins) และแมกนิซอล (Magnesol) เพื่อให้ได้ตามมาตรฐาน EN 14214 ซึ่งได้แสดงในผลในตารางที่ 2.1, 2.2 และ 2.3 และได้สรุปผลการเปรียบเทียบในแต่ละแบบว่า กระบวนการล้างด้วยน้ำเป็นการทำความสะอาดไบโอดีเซลที่ทำให้ไบโอดีเซลมีความสะอาดมากที่สุด โดยสังเกตจากค่า กลีเซอรินอิสระ และปริมาณของเมทานอลผ่านมาตรฐาน อุณหภูมิของน้ำมีผลต่อการลดปริมาณของเมทานอล การล้างด้วยน้ำควรใช้อัตราส่วนของน้ำต่อน้ำมันเท่ากับ 0.5 : 1.0 ที่อุณหภูมิใด ความเร็วรอบของการกวนส่งผลต่อการล้างเล็กน้อย ใน และควรใช้เวลาในการล้างประมาณ 10-30 นาที แต่การล้างด้วยน้ำ มีข้อเสียคือ น้ำทำให้เกิดสบู่มีผลต่อการแยกชั้นของน้ำและน้ำมัน ต้องบำบัดน้ำเสียที่เกิดขึ้น ต้องระเหยน้ำออกจาก ไบโอดีเซลก่อนนำไปใช้ กระบวนการล้างด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ไม่สามารถทำความสะอาด ไบโอดีเซลให้ได้ตามมาตรฐานคือ กลีเซอรินอิสระ และปริมาณของ เมทานอลไม่ผ่าน โดยให้ไบโอดีเซลไหลผ่านเรซิน คอลัมน์ที่อัตราการไหลประมาณ 500 ลิตร (ไบโอดีเซล)/กิโลกรัม ข้อเสียของการล้างแบบเรซิน คือ ราคาแพง แต่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ด้วยการนำเมทานอลมาทำความสะอาดเรซิน และกระบวนการล้างด้วยแมกนิซอลมีผลเช่นเดียวกับกระบวนการล้างด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออน มีผลต่อการลดลงของปริมาณของเมทานอลมากกว่าแบบเรซิน และกลีเซอรอลอิสระลดได้ใกล้เคียงกับมาตรฐาน ซึ่งในการทดลองได้ทดสอบกระบวนการล้างด้วยแมกนิซอลที่สถานะ อุณหภูมิบรรยากาศ อัตราส่วนของแมกนิซอล 0.25%, 0.50%, 0.75% และ 1.00% โดยใช้เวลาในการผสม แมกนิซอลกับไบโอดีเซลที่ 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 นาที และได้สรุปว่า ทุกอัตราส่วนของแมกนิซอลสามารถล้างให้ผ่านค่ากลีเซอรินอิสระยกเว้นที่อัตราส่วน 0.25% และต้องใช้เวลาในการผสมมากกว่า 10 นาที แต่ทั้ง 3 กระบวนการไม่สามารถทำให้ลดปริมาณน้ำให้ผ่านมาตรฐานได้

## บทที่ 3

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 3.1 การผลิตน้ำมันเอสเทอร์จากน้ำมันพืชหรือไขมันจากสัตว์

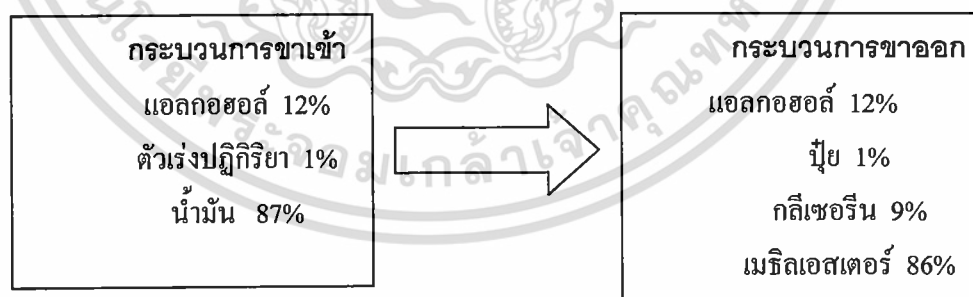
มีอยู่ 3 แนวทางด้วยกันคือ

- การใช้ด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการ Transesterification ของน้ำมันด้วยแอลกอฮอล์
- การใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยตรงในกระบวนการ Esterification ของน้ำมันด้วยแอลกอฮอล์
- กระบวนการเปลี่ยนน้ำมันเป็นกรดไขมัน ( Fatty acid ) จากนั้นแปลงเป็นเอสเทอร์โดยการใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ในปัจจุบันการผลิตเอสเทอร์จะนิยมใช้กระบวนการแรกเนื่องจากต้นทุนในการผลิตต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากเหตุผลดังนี้

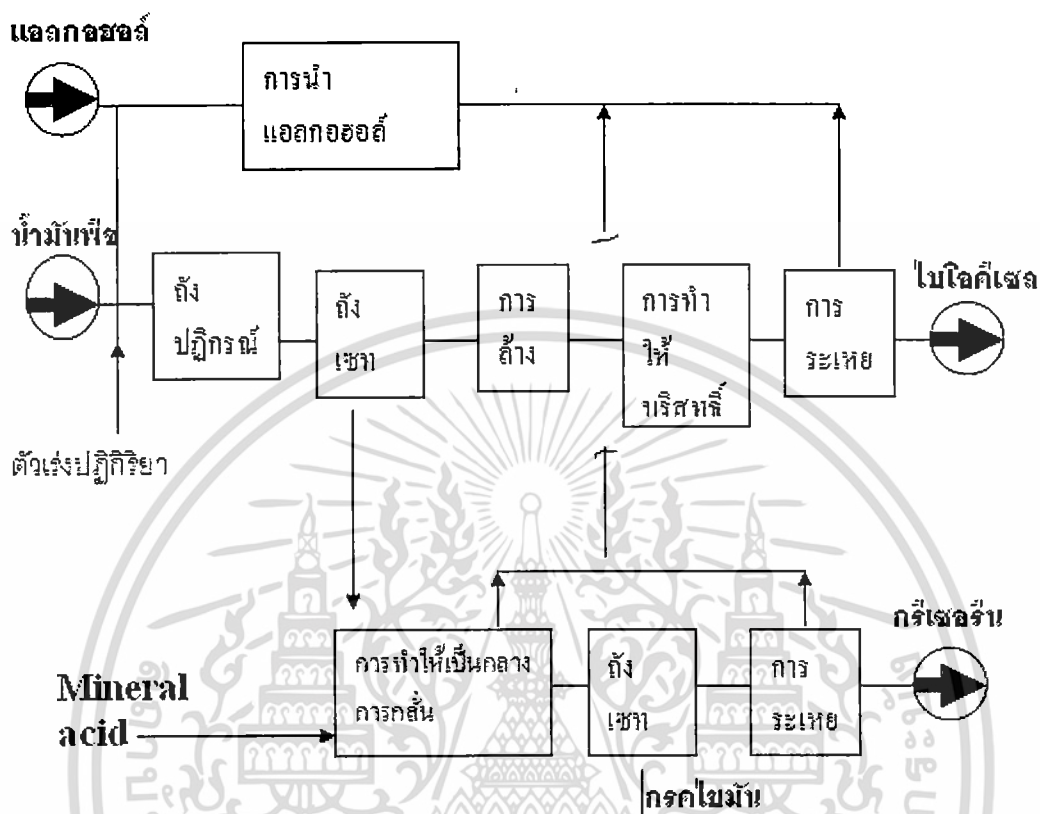
- กระบวนการสามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิต่ำ และที่ความดัน 138 kPa
- สามารถแปลงวัตถุดิบเป็นผลผลิตได้สูง ( High conversion ) ถึง 98 % และใช้เวลาสั้น
- สามารถแปลงเป็นเมธิลเอสเทอร์โดยตรง
- การสร้างถังปฏิกรณ์ง่ายไม่ซับซ้อน

ในการผลิตเมธิลเอสเทอร์ สัดส่วนของสารที่ใส่ในกระบวนการและผลผลิตที่ได้ออกมาประมาณได้ดังนี้



รูปที่ 3.1 แสดงสัดส่วนของสารขาเข้าและผลผลิตที่ได้ออกมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แสดงกระบวนการทั่วไปในการผลิตไบโอดีเซล

รูปที่ 3.1 เป็นกระบวนการทั่วไปในการผลิตไบโอดีเซล ไขมันหรือน้ำมันจะทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ เช่น เมทานอล และมีตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจะได้กลีเซอริน และเมทิลเอสเทอร์หรือไบโอดีเซล เมทานอลที่ใส่เข้าไปในกระบวนการ โดยปกติจะใส่เข้าไปมากกว่าปริมาณทางทฤษฎี เพื่อช่วยให้การทำปฏิกิริยาเร็วขึ้น และสามารถทำการนำเมทานอลส่วนเกินกลับมาใช้อีก ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยามักจะใช้ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (โซดาไฟ) หรือโพแตสเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งจะทำการละลายในเมทานอลก่อน

อย่างไรก็ตาม หากน้ำมันที่จะนำมาใช้ผลิตเมทิลเอสเทอร์มีปริมาณร้อยละของกรดไขมันอิสระอยู่สูง การใช้กระบวนการต่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดังปกติจะไม่สามารถทำได้ การใช้ปฏิกิริยากรดและด่างประกอบกัน จะช่วยทำให้สามารถเกิดกระบวนการ Transesterification ได้ (จากการทดลองในห้องปฏิบัติการของผู้วิจัย) ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ เป็นการหากระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันพืชใช้แล้ว ซึ่งปริมาณกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในน้ำมันจะมีการแปรเปลี่ยนไปตามสภาวะการเก็บกักน้ำมันนานมากน้อยเพียงใด และขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันซึ่งจะปะปนกัน เช่น น้ำมันปาล์ม น้ำมันสัตว์ น้ำมันถั่วเหลือง ต่างๆ ดังนั้น หากใช้กระบวนการต่างปกติ อาจทำให้ร้อยละของการเปลี่ยนน้ำมันเป็นเอสเทอร์อาจมีค่าที่ไม่คงที่

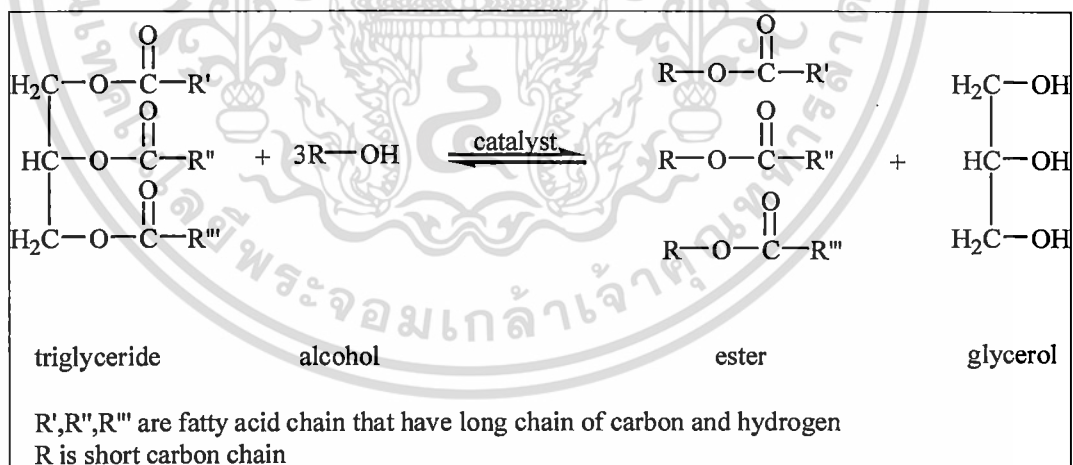
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นการปรับค่าปริมาณกรดไขมันอิสระลงให้อยู่ในระดับต่ำ (ประมาณ 1 %) ด้วยกระบวนการกรดและเมธานอล จากนั้นก็เข้าสู่กระบวนการด่างทั่วไปจะช่วยให้ค่าปริมาณร้อยละของการเปลี่ยนน้ำมันเป็นเอสเทอร์ได้ค่าที่แน่นอนยิ่งขึ้น

### 3.2 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน [6]

#### ก) ตัวเร่งปฏิกิริยา

แม้ว่ากระบวนการในการผลิตเมธิลเอสเทอร์จากกรดไขมัน ( Fatty acid methyl ester : FAME ) ไม่จำเป็นต้องใช้ความดันหรืออุณหภูมิที่สูง แต่จำเป็นต้องมีตัวเร่งปฏิกิริยา มีงานวิจัยอย่างต่อเนื่องในการหาตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ ที่เหมาะสม รวมถึงเอ็นไซม์ และตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็ง อย่างไรก็ตาม ในการผลิตเมธิลเอสเทอร์ในเชิงพาณิชย์ในต่างประเทศ หรือในการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตเอสเทอร์ทั้งในต่างประเทศหรือภายในประเทศเอง จะใช้สารละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( หรือ โพแทสเซียม - ไฮดรอกไซด์ ) ผสมกับเมธิลแอลกอฮอล์ หรือเมธานอล ซึ่งอันที่จริงยังไม่ใช่เป็นทางเลือกที่ถูกต้องนัก ทั้งนี้เพราะปฏิกิริยาเกิดขึ้นระหว่างแอลกอฮอล์กับด่าง ( Alkali ) อีกทั้งตัวเร่งปฏิกิริยาก็นำกลับมาใช้ใหม่ได้ยาก เพราะตัวเร่งปฏิกิริยานี้จะละลายอยู่ในกลีเซอรอลและมีบางส่วนละลายอยู่ใน เอสเทอร์ของกรดไขมัน ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ถ้าในตัวน้ำมันที่ใช้มีกรดไขมันอิสระ ( FFA ) อยู่ กรดไขมันอิสระนี้จะต้องทำการ esterified ก่อนที่จะใส่โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นตัวเร่ง โดยทั่วไปตัวทำปฏิกิริยา ( Reactant ) จะต้องปราศจากน้ำ เพื่อหลีกเลี่ยงกระบวนการเกิดสบู่ ( Saponification ) ( ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่



รูปที่ 3.3 แสดงโครงสร้างการเกิดปฏิกิริยา

ตัวอย่าง เดิม โซเดียม ไฮดรอกไซด์ลงไปประมาณ 0.5 -1.0 % โดยน้ำหนัก ของน้ำมันพืชที่ต้องทำการ Esterified ซึ่งจะเท่ากับ 4.6 - 9.2 g ของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ต่อน้ำมันที่ใช้ 1 litre ส่วนน้ำมันปาล์มโอลิอินทอกลินพบว่ามีค่า FFA อยู่ในช่วง 0.5 % (แสดงอยู่ในเทอมของกรดปาล์มมิติก) และอาจสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึง 10 % สำหรับน้ำมันปาล์มดิบ ดังนั้นปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต้องเติมจึงแปรตามชนิดของน้ำมันที่ใช้ เพื่อลดปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ จึงจำเป็นที่จะต้องทำการวัดค่าปริมาณ FFA ก่อนโดยวิธีไตเตรท ซึ่งการทดสอบหากใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.025 M หรือ 0.025 Molar ( 1 g./litre. ) เราก็สามารถคำนวณปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ต้องใช้ในถังปฏิกรณ์ได้ ดังนั้น ถ้าใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.025 M จำนวน 1 ml เพื่อทำให้น้ำมันปาล์มจำนวน 1 ml เป็นกลาง เราจะต้องใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์หนัก 1 g เพื่อทำให้น้ำมันปาล์ม 1 litre เป็นกลาง นอกจากนี้เรายังต้องใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มอีก 3.50 g ต่อน้ำมันปาล์ม 1 litre เพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา รวมทั้งสิ้นจะต้องใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์หนัก  $1 + 3.5 = 4.5$  g ในกระบวนการ transesterify ทุก ๆ 1 litre ของน้ำมันปาล์มที่ใช้ (หรือจากตัวเลข 4.6 - 9.2 g ข้างต้น)

#### ข) เมธานอล

เพื่อลดการเกิดสบู่ เมธานอลทั้งหมดจะต้องปราศจากน้ำเจือปน โดยทั่วไปจำเป็นต้องใช้เมธานอลในปริมาณที่เกินพอจากทางทฤษฎี ซึ่งปริมาณที่เกินพอนี้จะต้องเท่ากับเท่าใดนั้นขึ้นอยู่กับน้ำมันที่จะต้องถูก Transesterified ในการทำปฏิกิริยา จะต้องใช้ 3 โมเลกุลของเมธานอลในการทำปฏิกิริยากับ 1 โมเลกุลของ glyceryl tripalmitate และเมื่อรู้ค่าน้ำหนักโมเลกุลของสารประกอบ ก็จะสามารถคำนวณปริมาณเมธานอลที่ต้องใช้ในทางทฤษฎีได้ ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงค่าปริมาณสารที่ใช้

	Glyceryl ester MW	Methanol MW	Stoichiometric ratio
trilaurate	680.64	3x32.042	14.12 % $\frac{w}{w}$
trimyristate	764.74	3x32.042	12.57 % $\frac{w}{w}$
tripalmitate	848.83	3x32.042	11.32 % $\frac{w}{w}$
tristearate	932.93	3x32.042	10.30 % $\frac{w}{w}$
trioleate	884.83	3x32.042	10.86 % $\frac{w}{w}$

น้ำมันปาล์มเป็นของผสมของสารประกอบข้างต้นนี้ ( รวมทั้งพวก di- และ mono-glycerides) ในทางทฤษฎีจะต้องใช้เมธานอลสูงถึง 14 % โดยน้ำหนัก แต่ในทางปฏิบัติแนะนำให้ใช้ 20 - 22 % โดยน้ำหนัก ทั้งนี้อาจเป็นเพราะปฏิกิริยาสามารถย้อนกลับได้ (reversible) ดังนั้นการมีตัวทำปฏิกิริยาเกินมา 1 ตัว จะทำให้ได้ผลผลิต (yield) ที่สูงขึ้น หรืออีกนัยหนึ่งเมธานอลที่เกินนี้จะต้องถูกใช้ในการทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ได้โซเดียมเมธอกไซด์ ไม่ว่าจะด้วยเหตุผลใดก็ตาม หากเป็นไปได้ ภายหลังกระบวนการเราควรต้องทำการดึงเอาเมธานอลส่วนเกินนี้มากลับมาใช้ใหม่ให้ได้ ทั้งนี้เนื่องจากเมธานอลมีราคาแพง และไอของมันเป็นพิษ หากปล่อยให้ระเหยสู่อากาศก็เป็นมลภาวะ และเป็นการทำให้อุตสาหกรรมผลิตเมธิลเอสเทอร์สูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ก) เวลาและอุณหภูมิ

เวลาที่ต้องใช้ในการเกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ และอุณหภูมิที่ต้องใช้นั้น ได้มีผู้ทำการวิจัยศึกษาไว้ ที่อุณหภูมิ 60 – 65 °ซ โดยทั่วไปจะเกิดปฏิกิริยาประมาณ 95 % ภายในระยะเวลา 30 นาที

แม้ว่าอุณหภูมิของปฏิกิริยาโดยปกติจะตั้งไว้ให้ต่ำกว่าจุดเดือดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ ( จุดเดือดของเมทานอลอยู่ที่ 64.7 °ซ ) บางครั้งหากในน้ำมันมีไขสเตอริน ( Solid stearin) และ Palmitin ซึ่งจำเป็นต้องละลายก่อนนั้น เราจะต้องทราบอุณหภูมิค่าสุดที่ควรใช้ในการละลายไขเหล่านี้ โดยไม่ทำให้เมทานอลในน้ำมันเดือด

จากการศึกษาค้นคว้าทดสอบของผู้วิจัยและจากข้อมูลของผู้วิจัย และผู้ผลิตไบโอดีเซลทั่วไปพบว่า กระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์ อาจจำแนกได้ 4 วิธีการด้วยกัน ได้แก่

1) กระบวนการ Transesterification อย่างง่าย โดยใช้สารละลายโซเดียมเมทอกไซด์ ซึ่งกระบวนการนี้ใช้ได้ดี กับน้ำมันพืชบริสุทธิ์ทั่วไป และน้ำมันพืชใช้แล้ว ที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระต่ำ (ต่ำกว่า 2 %)

2) กระบวนการลดกรดไขมันอิสระก่อน โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความถ่วงจำเพาะ 1.25 เช่นน้ำมันปาล์มดิบจากการหีบเส้นใย น้ำมันปาล์มดิบประเภทหีบรวม หรือน้ำมันใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระสูง

3) กระบวนการลดกรดไขมันอิสระก่อนโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความถ่วงจำเพาะ 1.95 เช่นน้ำมันปาล์มดิบจากการหีบเส้นใย น้ำมันปาล์มดิบประเภทหีบรวม หรือน้ำมันใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระสูง ซึ่งกระบวนการนี้จะคล้ายคลึงกับกระบวนการในข้อ 2) เพียงแต่ว่าปริมาณน้ำที่ใช้เป็นตัวทำละลายจะมีปริมาณที่ต่ำ ทำให้น้ำมันที่ผ่านการลดกรดแล้ว ไม่จำเป็นต้องผ่านการล้างด้วยน้ำอีก

เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการลดกรด ตามข้อ 2) และ ข้อ 3) แล้วจะตามด้วยกระบวนการ Transesterification ดังข้อ 1)

4) กระบวนการ esterification ของกรดไขมันอิสระ โดยการใช้เมทานอล ควบคู่กับกรด ซึ่งกระบวนการนี้เหมาะกับน้ำมันพืชใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระในปริมาณที่สูง ( 2 – 5 % )

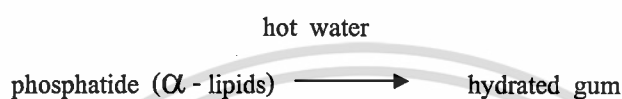
### 3.3 กระบวนการทำน้ำมันให้บริสุทธิ์

การทำน้ำมันพืชจากน้ำมันดิบจนเป็นน้ำมันบริสุทธิ์สำเร็จรูปเพื่อมุ่งให้ประโยชน์ได้ดีที่สุด และด้านทานการเสื่อมคุณภาพของน้ำมันจะต้องผ่านกระบวนการต่าง ๆ โดยใช้หลักการเดียวกับวิธีที่ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำมันพืชทั่วไป แบ่งออกเป็นดังนี้

1. กระบวนการกำจัดยางเหนียว (degumming) น้ำมันดิบจากพืชมีสารประกอบอินทรีย์ที่มีธาตุฟอสฟอรัส มีลักษณะเป็นยางเหนียว (gum) รวมอยู่ด้วยที่เรียกว่า ฟอสฟาไทด์ (phosphatide) ได้แก่ lecithin และ cephalin ทำให้น้ำมันเสื่อมคุณภาพในการเก็บรักษาหรือเมื่อถูกความร้อนจะเกิดยางเหนียวติดภาชนะและทำให้น้ำมันเสียเร็ว การกำจัดยางเหนียวมีหลักการให้ยางเหนียวรวมตัวตกตะกอนโดยใช้น้ำร้อน

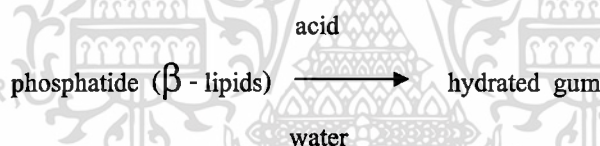
และสารเคมีต่าง ๆ เช่น กรดฟอสฟอริก กรดซิตริก และอื่น ๆ วิธีการกำจัดยางเหนียวแบ่งตามลักษณะของการเกิดปฏิกิริยามี 2 วิธี

1.1 การใช้น้ำร้อนกำจัดยางเหนียว (hot water degumming) น้ำมันดิบมีฟอสฟาไทด์เป็นสารประกอบซึ่งมีลักษณะเป็นยางเหนียวทำโดยการเติมน้ำร้อนลงไปใต้น้ำมันให้สารเหล่านี้เกิดสภาพไฮเดรต (hydrated form) ทำให้มีสมบัติที่ไม่ละลายในน้ำมันและมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าน้ำมัน ดังนั้นสามารถแยกออกจากน้ำมันได้ด้วยการเหวี่ยงหรือตกตะกอน การที่ใช้น้ำร้อนเพราะว่าเกิดสภาพไฮเดรตของยางเหนียวได้ดีกว่าในน้ำเย็น ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ปฏิกิริยาการเกิดไฮเดรตของยางเหนียวด้วยน้ำร้อน

1.2 การใช้กรดกำจัดยางเหนียว (acid degumming) ยางเหนียวที่เป็นพวก non-hydrate จะไม่เกิดสภาพไฮเดรตกับน้ำร้อนจึงต้องใช้กรดช่วยทำปฏิกิริยาก่อนแล้วจึงเกิดสภาพไฮเดรต ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ปฏิกิริยาการเกิดไฮเดรตของยางเหนียวด้วยกรด

กรดทำหน้าที่ไปปรับสภาพให้เหมาะสมเพื่อให้ยางเหนียวจับกับน้ำและตกตะกอนออกมาได้ นอกจากนี้กรดยังช่วยดึงโลหะหนักที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาใต้น้ำมันหมื่นหินตกตะกอนด้วยการกำจัดยางเหนียวด้วยกรดมีความจำเป็นมาก ถ้าไม่แยกยางเหนียวออกจะทำให้เกิดการสูญเสียน้ำมันในกระบวนการกำจัดกรดไขมันอิสระมาก เนื่องจากเกิดอิมัลชัน (emulsion)

### 3.4 เมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว

การผลิตเมทิลเอสเทอร์เป็นกระบวนการทางเคมี เรียกว่า กรรมวิธีทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน (Transesterification) ซึ่งเป็นการนำน้ำมันพืชมาทำปฏิกิริยากับ แอลกอฮอล์ โดยใช้ กรด ด่าง หรือ เอนไซม์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ขั้นตอนทางเคมี คือ การเปลี่ยน triglyceride ซึ่งเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ในน้ำมันพืช ให้เป็นเอสเทอร์ กับ กลีเซอรอล หากใช้เมทานอล เป็นตัวทำปฏิกิริยาจะเรียกว่าเมทิลเอ

สเตอร์ หากใช้เอทานอล ก็เรียกว่า เอทิลเอสเตอร์ สำหรับการทดสอบครั้งนี้ ได้ใช้น้ำมันปาล์มโอลลีอิน ทำปฏิกิริยากับเมทานอล โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

### 3.5 การผลิตเมทิลเอสเตอร์

การผลิตเมทิลเอสเตอร์ จะกล่าวถึงตั้งแต่ขั้นตอนการไตเตรท การเตรียมสารตั้งต้น การทำปฏิกิริยา การแยกกลีเซอรอล ตลอดจนถึงการล้างสิ่งสกปรกออกจากเมทิลเอสเตอร์

#### 1. การเตรียมน้ำมันก่อนทำปฏิกิริยา

น้ำมันพืชที่ใช้แล้วที่ใช้ในการผลิต จะต้องนำมาเตรียมให้มีความเหมาะสมก่อนนำเข้ากระบวนการผลิตเมทิลเอสเตอร์ โดยนำมาวัดปริมาณกรดไขมันอิสระที่ผสมอยู่

#### 2. การไตเตรท

เนื่องจากในน้ำมันพืชแต่ละครั้งจะมีจำนวนกรดไขมันอิสระไม่เท่ากัน และการใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมก็มีผลสำคัญต่อการผลิต กรดไขมันอิสระเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ปริมาณตัวเร่งเหลือต่ำกว่าค่าเหมาะสม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาค่าปริมาณกรดไขมันอิสระ และเพื่อหาปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสม

#### ก. สารเคมีที่ใช้

น้ำมันพืชที่ใช้แล้ว	9 ml.
Isopropanal	15 ml.
Phenophtalein in iPropanal	0.5 ml.
NaOH solution at 0.025 molar	

#### ข. ขั้นตอนการไทเทรต

1. เติมน้ำมันพืชที่ใช้แล้วลงในขวดรูปกรวยปริมาณ 3 ml. 3 ตัวอย่าง
2. เติม Isopropanal ลงในน้ำมันพืชที่ใช้แล้วทั้ง 3 ตัวอย่าง ๆ ละ 5 ml.
3. เขย่าให้เข้ากัน (สีของตัวอย่างจะใส)
4. เติม Phenophtalein in iPropanal ลงในน้ำมันพืชที่ใช้แล้วทั้ง 3 ตัวอย่าง และเขย่าให้เข้ากัน
5. เตรียม NaOH solution at 0.025 molar ในบิวเรต ให้เต็มหลอด บันทึกจุดเริ่มต้น จากนั้นค่อย ๆ ปล่อยสารหยดลงในตัวอย่างช้า ๆ สลับกับการเขย่า เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของสี หากเขย่าแล้วสีของตัวอย่างเริ่มกลายเป็นสีชมพู และไม่เปลี่ยนกลับเป็นสีใสอีก ให้หยุดและดูปริมาณการใช้สาร NaOH solution at 0.025 molar ในบิวเรต บันทึกค่า
6. ปฏิบัติเช่นเดียวกันทั้ง 3 ตัวอย่าง

7. หาค่าเฉลี่ยของปริมาณการใช้ NaOH solution at 0.025 molar
8. นำค่าเฉลี่ยในข้อ 7 มาหารด้วย 3 (เนื่องจากใช้ตัวอย่างละ 3 ml)  
จะได้ปริมาณ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ใช้เพื่อทำให้น้ำมันเป็นกลาง  
และ ต้องผสม โซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่ม เพื่อเร่งปฏิกิริยา ( ตามทฤษฎี )  
อีก 3.50 g
9. นำคำตอบที่ได้จากข้อ 8 มาคูณกับปริมาณน้ำมันพืชที่ใช้แล้วที่ใช้ในการผลิตแต่ละ  
ครั้ง (ในการผลิตครั้งนี้ใช้น้ำมันพืชที่ใช้แล้วครั้งละ 20 lite)

หมายเหตุ กรณีใช้โปตัสเซียมไฮดรอกไซด์ ต้องผสมเพิ่มเพื่อเร่งปฏิกิริยา ( ตามทฤษฎี ) 4.90 g

### 3. การเตรียมสารละลายโซเดียมเมทอกไซด์

ในการผลิตเมทิลเอสเทอร์ในครั้งนี้ ได้เลือกเมทิลแอลกอฮอล์หรือเมทานอล เป็นแอลกอฮอล์ในการทำปฏิกิริยาเพราะมีราคาถูก ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา ได้เลือกใช้โซดาไฟ หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพราะมีราคาถูกและเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้เร็ว ในการเตรียมสารละลายเริ่มต้นด้วยการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ ลงในเมทานอลแล้วกวนให้ละลายเข้ากันโดยใช้เมทานอลจำนวน 25 lite และปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์จะแปรผันตามปริมาณกรดไขมันอิสระที่อยู่ในน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว ซึ่งหาได้จากการไทเทรต บวกกับ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์มโอลีอิน

### 4. การทำปฏิกิริยา

ในการผลิตได้ใช้ถังปฏิกรณ์ขนาด 20 lite เริ่มต้นด้วยการนำน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว 20 lite มาอุ่นให้ได้อุณหภูมิ 60 °ซ พร้อมกับเปิดเครื่องกวนที่ความเร็วรอบ 150 rpm เพื่อให้ไขมันได้รับความร้อนทั่วถึง หลังจากนั้นให้เติมสารละลายโซเดียมเมทอกไซด์ลงในน้ำมันที่อุ่นไว้ ให้ความร้อนและทำการกวนจนครบ 30 นาที ปิดเครื่องกวนและให้ความร้อนต่ออีก 30 นาที จากนั้นปิดฮีทเตอร์ และปล่อยให้ถังไว้ภายในถังปฏิกรณ์จะเกิดการแยกชั้นของเมทิลเอสเทอร์ และกลีเซอรอล โดยเมทิลเอสเทอร์ ที่มีน้ำหนักเบาจะอยู่ข้างบนและกลีเซอรอลซึ่งหนักกว่าจะอยู่ด้านล่าง

### 5. การแยกกลีเซอรอล

กลีเซอรอลจะถูกถ่ายออกทางด้านล่างของถังปฏิกรณ์ในขณะที่ยังร้อนอยู่ เนื่องจากหากทิ้งไว้จนเย็น กลีเซอรอลจะแข็งตัว ถ่ายกลีเซอรอล (สีน้ำตาลเข้ม) ลงในถัง และแยกเมทิลเอสเทอร์ (สีเหลือง) ซึ่งไหลตามออกมาไว้อีกลัง โดยไม่ให้ผสมกัน ทิ้งไว้ข้ามคืน กลีเซอรอลเมื่ออุณหภูมิลดลงจะเริ่มแข็งตัว ส่วนเมทิลเอสเทอร์จะยังคงสภาพของเหลวอยู่ ในการเติมเมทิลเอสเทอร์ลงในถังล่างจะต้องเติมอย่างช้า ๆ และให้ปะทะกับน้ำผสมกรดซัลฟูริก เบา ๆ เนื่องจากหาก เติมลงแรงเกินไป จะทำ

ให้เมทิลเอสเทอร์รวมตัวกับน้ำ เกิดเป็นสารอิมัลชัน และรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันทำให้แยกออกจากกันได้ง่าย

## 6. การล้างสิ่งสกปรก

การล้างเมทิลเอสเทอร์ มีจุดประสงค์เพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อน เช่น สบู่ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างโซดาไฟกับกรดไขมันอิสระหรือน้ำมันกลีเซอรอลที่ละลายอยู่ในชั้นเมทิลเอสเทอร์ โซดาไฟ เมทานอลที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา และน้ำมันที่ทำปฏิกิริยาไม่หมด ให้ได้เมทิลเอสเทอร์ที่บริสุทธิ์ และมีค่า pH เป็นกลาง จึงจำเป็นต้องมีการล้างซ้ำกันหลาย ๆ ครั้ง โดยในครั้งแรก นำมาล้างด้วยน้ำผสมกรดซัลฟูริก วิธีการล้าง ทำได้โดยการเติมกรดซัลฟูริก ลงในน้ำ กวนให้เข้ากัน จากนั้นถ่ายเมทิลเอสเทอร์ลงไป ใช้ปั๊มลมทำให้เกิดฟองจากกันถึง เมทิลเอสเทอร์ที่ล้างแล้วจะลอยอยู่บนบน ตรงกลางจะมีคราบสบู่ และด้านล่างจะเป็นน้ำ ในการล้างครั้งต่อไป ให้ล้างด้วยน้ำเปล่าด้วยวิธีเดียวกัน ทำการล้างหลาย ๆ ครั้งจนกว่าค่า pH ของเมทิลเอสเทอร์มีค่าเท่ากับ 7 สุดท้ายจะได้เมทิลเอสเทอร์ที่บริสุทธิ์และมีค่าเป็นกลาง

## 7. ผลกระทบของตัวแปรในกระบวนการผลิต

ตัวแปรสำคัญที่มีผลกระทบต่อเช่นต์ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์จากกระบวนการ ทรานเอสเทอริฟิเคชันมีดังนี้ ( Ma and Hanna, 1999 ; Srivastava and Prasad , 2000 ; Ma, et al)

### ก. เวลาในการทำปฏิกิริยา

เปอร์เซ็นต์ความเป็นเมทิลเอสเทอร์ เป็นสัดส่วนโดยตรงเพิ่มขึ้นอยู่กับตัวแปรเวลาที่ใช้ในการดำเนินปฏิกิริยา (Freedman et al ., 1984) จากการทดลอง โดยใช้ไขมันพืช 4 ประเภท คือ น้ำมันถั่วลิสง น้ำมันจากเมล็ดฝ้าย น้ำมันดอกทานตะวัน และน้ำมันถั่วเหลือง เป็นสารตั้งต้นภายใต้สภาพและเงื่อนไข คือทำปฏิกิริยากับเมทานอล ที่อัตราส่วนโมล 6:1 โดยใช้โซเดียมเมทอกไซด์ 0.5 เปอร์เซ็นต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และควบคุมอุณหภูมิที่  $60^{\circ}\text{C}$  ทดลองการทดลองสามารถประมาณค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นเมทิลเอสเทอร์ได้ประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ จากการสุ่มตัวอย่างที่ เวลา 1 นาทีของการทดลอง สำหรับน้ำมันถั่วเหลืองและน้ำมันดอกทานตะวัน และหลังจากนั้น 1 ชั่วโมง อัตราเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ส่วนใหญ่จะมีพฤติกรรมในลักษณะที่คล้ายคลึงกันสำหรับน้ำมันพืชทั้ง 4 ชนิด คือเปอร์เซ็นต์ความเป็นเมทิลเอสเทอร์ประมาณ 93 ถึง 98 เปอร์เซ็นต์

ส่วนการค้นคว้าของ Ma et al. (1998) ได้ทดลองการผลิตเอสเทอร์จากไขมันวัวกับเมทานอล โดยใช้ปฏิกิริยาตัวเร่งเบส พบว่าในช่วง 1 นาทีแรกอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะค่อนข้างช้า มาก ทั้งนี้อาจเนื่องจากการกวนผสมแต่ที่ระยะเวลาตั้งแต่ 1 ถึง 5 นาที ต่อมาปฏิกิริยาจะเกิดรวดเร็วมาก และอัตรา

เปอร์เซ็นต์ความเป็นเมทิลเอสเทอร์ก็เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเช่นกัน หลังจากนั้นอัตราเร็วของปฏิกิริยาดังกล่าวจะค่อย ๆ ลดลงจนค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นเมทิลเอสเทอร์สูงสุดที่เวลาประมาณ 15 นาที ส่วนปริมาณของไดกลีเซอไรด์และโมนอกลิเซอไรด์ จะเพิ่มขึ้นในช่วงแรกและค่อย ๆ ลดลงจนมีค่าคงที่เมื่อสิ้นสุดกระบวนการจะมีปริมาณของโมนอกลิเซอไรด์มากที่สุดรองลงมาคือไดกลีเซอไรด์และน้อยที่สุดคือไตรกลีเซอไรด์

#### ข. อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา

กระบวนการปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน สามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของสารตั้งต้น ในกรณีของน้ำมันละหุ่ง ปฏิกิริยาจะดำเนินไปและให้ผลเป็นที่น่าพอใจเหมาะสมที่สุด ที่อุณหภูมิประมาณ 20 ถึง 35 °C ซึ่งใช้อัตราส่วนโมลของสารตั้งต้น 6:1 ถึง 12 : 1 และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส อยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.005 ถึง 0.35 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันพืช (Smith,1949) ส่วนสารตั้งต้นของเมทานอลกับน้ำมันถั่วเหลือง ใช้อัตราส่วนโมล 6:1 ใช้ 1 เปอร์เซ็นต์ของโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ตลอดการทำปฏิกิริยา แตกต่างกัน 3 ระดับคือ 60 45 และ 32 °C พบว่า เมื่อเวลาของการทำปฏิกิริยาครบ 1 ชั่วโมง เปอร์เซ็นต์ความเป็นเมทิลเอสเทอร์ ที่อุณหภูมิ 60 และ 45 °C มีค่าเท่ากัน แต่ที่อุณหภูมิ 32 °C จะมีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย จึงเห็นได้ว่า อุณหภูมิของปฏิกิริยามีผลกระทบต่อการศึกษาอย่างเห็นได้ชัด (Freedman al.,1984)

โดยทั่วไปแล้วอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา จะเป็นฟังก์ชันโดยตรงกับอุณหภูมิที่ใช้ จากงานวิจัยส่วนใหญ่พบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยามากที่สุด คือ อุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับจุดเดือดของเมทานอล ซึ่งอยู่ประมาณ 60 ถึง 70 °C ภายใต้ความดันบรรยากาศ มีสภาพและเงื่อนไขที่ไม่รุนแรงนัก แต่ต้องการสารตั้งต้นที่มีปริมาณน้ำและกรดไขมันที่ต่ำมาก (Huied ., 1996) เปอร์เซ็นต์ความเป็นเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน จะมีค่าสูงสุดเมื่อทำปฏิกิริยาที่ช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 60 ถึง 80 °C ที่อัตราส่วนโดยโมลของสารตั้งต้นระหว่างแอลกอฮอล์กับน้ำมันเท่ากับ 6:1 (Dunn and Bagby , 1995 ; Chang, et., 1996)

#### ค. ความบริสุทธิ์ของสารตั้งต้น

คุณภาพของสารตั้งต้นและความบริสุทธิ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา ที่เหมาะสมสำหรับการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมันด้วยตัวเร่งเบส มีดังนี้ (Peterson et al .1996)

- ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ควรมีความบริสุทธิ์ของเนื้อสาร มากกว่า 85 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งโดยปกติต้องมีน้ำผสมอยู่โดยหลีกเลี่ยงไม่ได้ประมาณ 14 ถึง 15 เปอร์เซ็นต์ และควรมีองค์ประกอบของเกลือคาร์บอเนตต่ำเพราะอาจจะมีผลทำให้ผลผลิตเมทิลเอสเทอร์ขึ้นได้
- เมทานอลที่ใช้ควรมีความบริสุทธิ์สูง ไม่ควรมีน้ำผสมอยู่เลย ขอมให้มีได้ไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่อนุญาตให้น้ำมันเบนซินอยู่ได้เล็กน้อย เพราะไม่มีผลต่อปฏิกิริยา

- น้ำมันเรพซีพ (rapeseed) คิบควรจะต้องผ่านการกรองและมีลักษณะใส เพราะตะกอนที่มีอยู่ในน้ำมันจะมีผลต่อการแยกวัฏภาคของกลีเซอรอลออกจากผลิตภัณฑ์เอทิลเอสเทอร์ของน้ำมัน นอกจากนี้แล้วยังสามารถเป็นตัวกลางทำให้เกิด ระบบอิมัลชันซึ่งมีเสถียรภาพสูงระหว่างการล้างด้วยน้ำอีกด้วย ทั้งนี้ต้องไม่มีปริมาณน้ำและกรดไขมันอิสระมากเกินไป เนื่องจากจะทำให้สิ้นเปลืองตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้น

### ง. ความชื้นและกรดไขมัน

ความบริสุทธิ์ของวัตถุดิบ ซึ่งใช้เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาทรานเอสเตอริฟิเคชัน ด้วยตัวเร่งเบส ไตรกลีเซอไรด์ที่ใช้ต้องมีค่าเป็นกรดควรน้อยกว่า 1 และสารตั้งต้นต้องปราศน้ำ แต่ถ้ามีน้ำที่มีค่าความเป็นกรดมากกว่า 1 หรือปริมาณน้ำผสมอยู่เล็กน้อยจะต้องเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อชดเชยกับการทำให้กรดไขมันอิสระเป็นกลาง และส่วนหนึ่งสูญเสียไปกับการละลาย หรือแตกตัวของปริมาณน้ำที่ปนเปื้อนด้วย (Wright et al, 1944)

นอกจากนี้แล้วปริมาณน้ำทั้งที่เกิดขึ้นและมีอยู่ระหว่างการทำปฏิกิริยาจะทำให้เกิดปฏิกิริยาจะทำให้เกิดปฏิกิริยาสะพอนิฟิเคชัน ได้ผลิตภัณฑ์สบู่ ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ต้องสิ้นเปลืองตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงอีกด้วย สบู่ที่เกิดขึ้นจะส่งผลกระทบต่อทำให้ความหนืดของผลิตภัณฑ์เอทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันเพิ่มขึ้น และเกิดการก่อตัวเป็น โครงสร้างเจลซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญ ทำให้กระบวนการแยกของผลิตภัณฑ์ที่ได้ระหว่าง วัฏภาคของกลีเซอรอลและเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันทำได้ยากยิ่งขึ้น

### จ. อัตราส่วนโมลระหว่างแอลกอฮอล์กับไตรกลีเซอไรด์

อัตราส่วนโมลของสารตั้งต้นระหว่างแอลกอฮอล์กับไตรกลีเซอไรด์ ของปฏิกิริยาทรานเอสเตอริฟิเคชัน เป็นตัวแปรสำคัญที่สุดตัวหนึ่งซึ่งมีผลกระทบต่อผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ อย่างมาก โดยปกติอัตราส่วนสมมูลมวลสารสัมพันธ์ สำหรับปฏิกิริยาทรานเอสเตอริฟิเคชัน โดยทางทฤษฎีแล้วต้องการแอลกอฮอล์ 3 โมลทำปฏิกิริยากับ 1 โมลไตรกลีเซอไรด์ เพื่อให้ได้ผลผลิตเอทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน 3 โมล และกลีเซอรอล 1 โมลแต่เนื่องจากปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นชุดของปฏิกิริยาตามลำดับที่ผันกลับได้ ดังนั้นจึงต้องใช้แอลกอฮอล์ที่มากเกินไป เพื่อขับเคลื่อนให้สมดุลของปฏิกิริยาปฏิกิริยาเลื่อนไปทางผลิตภัณฑ์มากที่สุด นอกจากนี้แล้วอัตราส่วนโมลยังมีผลสัมพันธ์กับชนิดของตัวเร่งแอลกอฮอล์ที่ใช้อีกด้วย

### ฉ. ชนิดและความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้สำหรับกระบวนการปฏิกิริยาทรานเอสเตอริฟิเคชันสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ เบส กรด และเอนไซม์ (Ma and Hanna, 1999)



ตารางที่ 3.2 เมทิลเอสเทอร์มาตรฐาน EUROPE และ USA

	EUROPE	USA
Standard / Specification	EN 14214	ASTM D-6751
Application	FAME	FAMAE
Aetanc No.	>51	>47
Methanol (% mass)	<0.20	-
Ester content (% mass)	>96.5	-
Monoglyceride (% mass)	<0.8	-
Diglyceride (% mass)	<0.2	-
Triglyceride (% mass)	<0.2	-
Free glycerol (% mass)	<0.02	<0.02
Total glycerol (% mass)	<0.25	<0.24

ตารางที่ 3.3 แสดงรายละเอียดข้อกำหนดทางคุณภาพ ของเมทิลเอสเทอร์ตามมาตรฐาน ASTM PS 121 เปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลปิโตรเลียมตามมาตรฐาน ASTM D 975

Standard Test	ASTM D 975	ASTM PS 121	Thai Regulation
Fuel	Diesel Fuel	Biodiesel	High Speed Deisel
Major Substance	Hydrocarbon C 10-C21	Fatty Acid Nathy Ester C12-C22	
Higher Heating Value, Mj/kg			
Kinematic Viscosity, cSt @ 40 <sup>o</sup> C	1.3 – 4.1	1.9 – 6.0	1.8 – 4.1
Specific gravity, kg/l @ 60 <sup>o</sup> C	0.85	0.88	0.81 – 0.87
Water Content, ppm by wt	161	0.05%max	0.05%max
Carbon, wt %	87	77	-
Hydrogen, wt%	13	23	-
Oxygen, wt%	0	11	-
Sulfur, wt%	0.05max	0	0.05max
Boiling Point Rang, <sup>o</sup> C	188 - 343	182 - 338	-
Flash Point, <sup>o</sup> C	>52	100 – 170	>52
Cloud Point, <sup>o</sup> C	-15 to 5	-3 to 12	-
Pour Point, <sup>o</sup> C	-35 to 15	-15 to 6	10<
Cetane Number	>47	-	>47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ก. ดัชนีซีเทน (Cetane Index)

ดัชนีซีเทนเป็นค่าแสดงคุณภาพในการจุดระเบิดของน้ำมันเชื้อเพลิง (Ignition quality) น้ำมันที่มี Ignition delay สั้นสุดจะมีคุณสมบัติการต้านทานการน็อกได้ดีที่สุด Ignition delay คือ ความล่าช้าในการติดไฟ โดยทั่วไปกำหนดให้ไม่เกิน 0.003 วินาที ยิ่งสั้นเท่าไรยิ่งดี เริ่มจากน้ำมันถูกฉีดเข้ากระบอกสูบ ใช้เวลาในการอุ่นเป็นไป (Vapour) และรวมตัวกับอากาศเริ่มลุกไหม้ (Rapid combustion) น้ำมันที่มีค่าซีเทนสูงจะมีความล่าช้าในการติดไฟสั้น และหากมีค่าซีเทนต่ำจะมีความล่าช้าในการติดไฟนาน

กรณีที่น้ำมันเชื้อเพลิงมีค่าซีเทนต่ำเกินไป จะทำให้มีการสะสมน้ำมันเชื้อเพลิงไว้มาก ๆ แล้วลุกไหม้ขึ้นพร้อมกันทีเดียว อันเป็นผลให้เกิด Detonation knock ขึ้น น้ำมันที่มีค่าซีเทนพอเหมาะจะช่วยให้เครื่องยนต์ติดง่ายเครื่องยนต์เดินเรียบมีควันและเขม่า น้อยและประหยัดเชื้อเพลิงด้วย ดัชนีซีเทน ของน้ำมันดีเซลตามข้อกำหนดของกระทรวงพาณิชย์ไม่ต่ำกว่า 47 การหาค่าซีเทนทำตาม ASTM D 976

### ข. ความหนืด (Viscosity)

ความหนืดของของเหลว คือ อัตราการต้านทานต่อการไหลภายในเนื้อของของเหลว น้ำมันที่มีความหนืดต่ำจะไหลได้ง่าย ส่วนน้ำมันที่มีความหนืดสูงจะไหลได้ช้า ดังนั้นความหนืดต้องมีค่าที่เหมาะสม ความหนืดของน้ำมันเชื้อเพลิงมีอิทธิพลต่อรูปร่างของละอองน้ำมัน หากความหนืดสูงจะทำให้การฉีดเป็นฝอยละอองไม่ดี ละอองน้ำมันมีขนาดใหญ่ น้ำมันพุ่งไปไกล นอกจากนี้ น้ำมันจะพุ่งเป็นสายแทนที่จะเป็นละอองเล็ก ๆ ผลคือน้ำมันรวมกับอากาศไม่ดีทำให้การสันดาปไม่สมบูรณ์ กำลังเครื่องยนต์และประสิทธิภาพตกในที่สุด และยังเป็นเครื่องยนต์ขนาดเล็กแล้วน้ำมันอาจจะพุ่งไปกระทบกระบอกสูบ ขะล้างฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นลงสู่ก้นอ่างทำให้เครื่องยนต์สึกหรอมาก และน้ำมันเครื่องสกปรกเร็ว

น้ำมันเชื้อเพลิงที่มีความหนืดต่ำ จะทำให้น้ำมันที่พ่นออกมาเป็นฝอยละเอียดมาก จึงพุ่งไปไม่ไกลเท่าที่ควรการสันดาปจะไม่ดีนัก กำลังและประสิทธิภาพเครื่องยนต์ตกเช่นกัน น้ำมันเชื้อเพลิงที่ความหนืดต่ำจะมีการรั่วกลับในตัวปั๊มเชื้อเพลิงแรงดันสูงมาก ภายใต้อุณหภูมิเช่นนี้จำนวนน้ำมันที่ผ่านหัวฉีดออกไปจะน้อยกว่าที่ควรทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องตก นอกจากนี้การสึกหรอของชิ้นส่วนในระบบเชื้อเพลิงอาจจะมากขึ้นเนื่องจากความหนืดต่ำจะทำให้การหล่อลื่นที่ไม่ดี ความหนืดของน้ำมันดีเซลตามข้อกำหนดของกระทรวงพาณิชย์อยู่ในช่วง 1.8 – 4.1 cSt ที่อุณหภูมิ 40° C และการหาค่าซีเทนทำตาม ASTM D 445

### ค. ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) / (API Gravity)

เป็นการระบุความหนักเบาของน้ำมันที่อุณหภูมิ 15.6° ซ ซึ่งใช้สเกล API โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้ Degree API Gravity @ 15.6° ซ = (141.5 / SP.Gr @ 15.6° ซ) - 131.5 เป็นที่นำ

สังเกตว่าน้ำมันที่มี API gravity ยิ่งต่ำลง ความถ่วงจำเพาะจะยิ่งสูง (มีค่าใกล้ 1 เข้าไปทุกที) น้ำมันก็ยิ่งหนักขึ้น และในทางตรงข้าม ถ้าน้ำมันยิ่งเบาลง API gravity ก็ยิ่งสูงขึ้นและความถ่วงจำเพาะยิ่งต่ำลงด้วย นอกจากนี้ความถ่วงจำเพาะของน้ำมันยังมีส่วนสัมพันธ์กับ

- ปริมาณไฮโดรเจนในน้ำมัน คือน้ำมันที่หนักขึ้น (API ต่ำลง) จะมีเปอร์เซ็นต์ของไฮโดรเจนในน้ำมันน้อยลง

- ค่าความร้อนของน้ำมันคือค่าความร้อนของน้ำมันต่อหน่วยน้ำหนักจะลดลงเมื่อน้ำมันหนักขึ้น (ความถ่วงจำเพาะสูงขึ้นหรือ API ต่ำลง)

ความถ่วงจำเพาะของน้ำมันดีเซลตามข้อกำหนดของกระทรวงพาณิชย์ อยู่ในช่วง 0.81 ถึง 0.87 ที่อุณหภูมิ 15.6 / 15.6<sup>o</sup> C และการหาค่าซีเทนทำตาม ASTM D 1298

### ง. ค่าความร้อน (Heating Value/ Calorific Value)

ค่าความร้อน คือความร้อนที่ได้จากการลุกไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิงกับออกซิเจน ค่าความร้อนที่ได้มี 2 กรณี ในกรณีทีหนึ่ง เป็นความร้อนที่ได้หลังจากการลุกไหม้และมีการกลั่นตัวของไอน้ำเป็นหยดน้ำ เรียกว่าค่าความร้อนสูง (High Heating Value : HHV) ในกรณีที่สอง เป็นความร้อนที่ได้ในกรณีที่ไอน้ำไม่มีการกลั่นตัวเป็นหยดน้ำ เรียกว่าค่าความร้อนต่ำ (Low Heating Value : LHV) สำหรับหน่วยที่ใช้ทั่วไปมีอยู่ 2 หน่วย คือ

1. หน่วย บี.ที.ยู (British Thermal Unit) หมายถึงปริมาณความร้อนที่ทำให้ น้ำจำนวน 1 ปอนด์ มีอุณหภูมิสูงขึ้น 1<sup>o</sup>F เรียกว่า 1 หน่วยความร้อน บี.ที.ยู

2. หน่วยแคลอรี (calorie) หมายถึงปริมาณความร้อน ที่ทำให้น้ำจำนวน 1 g มีอุณหภูมิสูงขึ้น 1<sup>o</sup>ซ เรียกว่า 1 หน่วยความร้อนแคลอรี 1 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม เท่ากับ 1.8 บีทียู/ปอนด์

เชื้อเพลิงที่ใช้กับเครื่องยนต์เผาไหม้ภายใน จะต้องมีไฮโดรเจนเป็นส่วนประกอบเสมอและเมื่อเกิดการลุกไหม้จะต้องได้น้ำ (H<sub>2</sub>O) เสมอน้ำที่ได้จากการเผาไหม้จะอยู่ในรูปไอน้ำ เมื่อยังร้อนอยู่ แต่เมื่อเย็นลงก็จะกลั่นตัวเป็นหยดน้ำ ค่าความร้อนที่หาได้จากเครื่องมือในห้องปฏิบัติการจะเป็นค่าความร้อนสูง หมายถึง ค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ รวมกับค่าความร้อนแฝงที่ได้จากการกลั่นตัวของไอน้ำ การหาค่าความร้อนทำตาม ASTM D 240

### จ. จุดวาบไฟ (Flash Point)

จุดวาบไฟของน้ำมันเชื้อเพลิง มีความสำคัญในด้านอันตรายจากอัคคีภัยในการขนส่งเก็บรักษา และใช้งานเท่านั้น แต่ไม่มีความสำคัญโดยตรงต่อการสันดาปและประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ นอกจากนี้ยังใช้จุดวาบไฟ สำหรับตรวจสอบหากมีน้ำมันชนิดเบาว่าเจือปน อุณหภูมิจุดวาบไฟของน้ำมันดีเซลตามข้อกำหนดของกระทรวงพาณิชย์ ไม่ต่ำกว่า 50<sup>o</sup>ซ การหาอุณหภูมิจุดวาบไฟทำตาม ASTM D 93

### ฉ. การกลั่น (Distillation)

การกลั่น คือ ความสามารถในการระเหยของน้ำมันเชื้อเพลิง คุณสมบัติข้อนี้มี ความสำคัญต่อการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซล โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเครื่องยนต์รอบปานกลางและรอบสูง สำหรับความสามารถในการระเหยที่เหมาะสมนั้นขึ้นอยู่กับรอบ ขนาด และการออกแบบของเครื่องยนต์ การใช้เชื้อเพลิงที่ระเหยยากนั้นจะทำให้ น้ำมันฉีดเป็นฝอยไม่ดี ผลคือกำลัง และประสิทธิภาพของเครื่องตก หากใช้เชื้อเพลิงที่ระเหยง่ายเกินไปจะทำให้กำลังและประสิทธิภาพของเครื่องตกเช่นกัน เนื่องจากอาจจะเกิด Vapour lock ในระบบเชื้อเพลิงหรือหยดน้ำมันเชื้อเพลิงที่ฉีดออกจากหัวฉีดไม่สามารถที่จะไปไกลเท่าที่ควร ช่วงการกลั่นของน้ำมันควรจะต่ำที่สุดโดย ไม่ทำให้คุณสมบัติด้านจุดวาบไฟ การลุกติดไฟ ค่าความร้อน ตลอดจนความชื้นเสียไป หากอุณหภูมิที่น้ำมันกลั่นออกมา 10% สูงไปจะทำให้เครื่องยนต์ติดยาก หากอุณหภูมิที่น้ำมันกลั่นออกมา 10% และ 80% ห่างกันเกินไป จะทำให้ช่วงเวลาการอุ่นเครื่องยนต์นานขึ้น ส่วนอุณหภูมิที่น้ำมันกลั่นตัวออกมา 90% และจุดสุดท้ายของการกลั่นต่ำ จะช่วยลด การเกิดเถ้าคาร์บอน และความสกปรกของน้ำมันเครื่องยนต์ การหาอุณหภูมิการกลั่นทำตาม ASTM D 86

### ช. น้ำและตะกอน (Water and Sediment)

น้ำและตะกอนเป็นอุปสรรคตัวหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับอายุการใช้งานของไส้กรอง น้ำมันเชื้อเพลิง เนื่องจากทำให้เกิดไขและการอุดตันของกรองน้ำมันเชื้อเพลิง การหาน้ำและตะกอนทำตาม ASTM D 2709

### ซ. กากถ่าน (Carbon Residue)

กากถ่าน คือ กากคาร์บอน หรือเขม่าที่เหลือตกค้างในน้ำมันเชื้อเพลิงจากการเผาไหม้ กากคาร์บอนเป็นตัวชี้ให้เห็นสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิงนั้น ๆ ว่าถ้านำไปใช้กับเครื่องยนต์แล้วจะเกิดเขม่าจับตามชิ้นส่วนของเครื่องยนต์มากน้อยเพียงใด การหากากถ่านทำตาม ASTM D 4530

### ฅ. เถ้า (Ash)

เถ้าเป็นสารที่ไม่ไหม้ไฟ ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปของ ของแข็ง หรือสบูโลหะที่ละลายได้ในน้ำมันเชื้อเพลิง เถ้าเป็นตัวที่เป็นอันตรายต่อการสึกหรอของเครื่องยนต์ การหาเถ้าทำตาม ASTM D 482

### ฉ. ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์

วัดโดยเทคนิค TLC (Thin Layer Chromatograph) โดยใช้ Stationary Phase : Chromarod – S III และ 1<sup>st</sup> mobile phase : n-hexane : diethyl ether : formic acid = 50:20:03, 2<sup>nd</sup> mobile phase : n-hexane:benzone= 1:1 เพื่อหาความบริสุทธิ์ของความเป็นเมทิลเอสเทอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6 ทฤษฎีการคำนวณ

#### สมการพลังงาน

$$Z_1 + (P_1/\gamma) + (V_1^2/2g) + H_p - H_m - H_L = Z_2 + (P_2/\gamma) + (V_2^2/2g) \quad (1)$$

$Z_1$ = ความสูงที่จุด 1	(m)
$Z_2$ = ความสูงที่จุด 2	(m)
$V_1$ = ความเร็วต้น	(m/s)
$V_2$ = ความเร็วปลาย	(m/s)
$g$ = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก	(m/s <sup>2</sup> )
$P_1$ = ความดันต้น	(N/m <sup>2</sup> )
$P_2$ = ความดันปลาย	(N/m <sup>2</sup> )
$\gamma$ = ความหนาแน่นเชิงน้ำหนัก	(N/m <sup>3</sup> )
$H_m$ = พลังงานที่ใช้ไปกับมอเตอร์	(m)
$H_L$ = การสูญเสียแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างตำแหน่ง 1 และ 2	(m)
$H_p$ = เสดความดันของปั๊ม	(m)
$\rho$ = น้ำหนักจำเพาะ	(N/m <sup>3</sup> )

สมการถ่ายเทความร้อนของฮีตเตอร์

$$Q = m \cdot C_p \Delta t \quad (2)$$

$Q$ = อัตราการถ่ายเทความร้อน	(W)
$m$ = อัตราการไหลของมวล	(kg / s)
$C_p$ = ค่าความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่	(kJ / kg.k )
$\Delta t$ = การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	(k)

#### สมการหาค่าลึงมอเตอร์ในการกวน

$$Q - W = \Delta U \quad (3)$$

$Q$ = อัตราการถ่ายเทความร้อน	(W)
$W$ = งานจากภายนอก	(W)

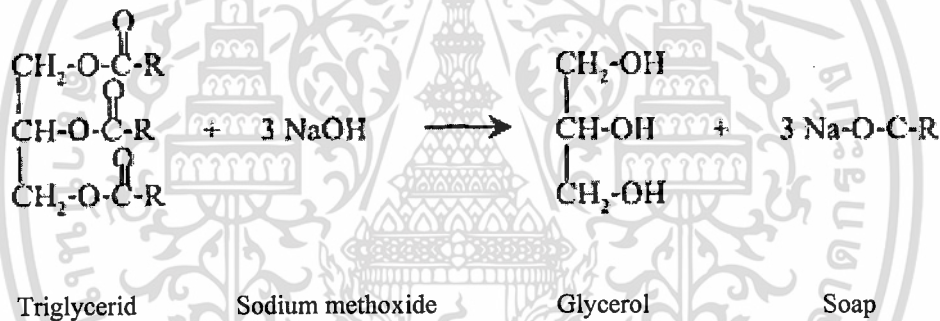
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta U = \text{พลังงานภายนอก}$$

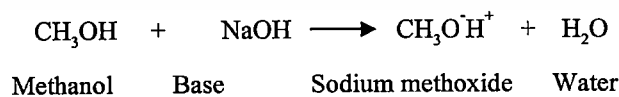
(W)

### 3.7 ปฏิกิริยาสะปอนิฟิเคชัน (saponification)

ปฏิกิริยาข้างเคียงที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันคือปฏิกิริยาสะปอนิฟิเคชัน (saponification) หรือเป็นปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดสบู่ โดยไตรกลีเซอไรด์จะไปทำปฏิกิริยากับเบสได้ผลิตภัณฑ์เป็นกลีเซอรอลกับสบู่ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 การใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นเบสแก่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน จะทำให้เกิด ปฏิกิริยาสะปอนิฟิเคชันในระหว่างการทำปฏิกิริยา ซึ่งจะทำให้เกิดสบู่ ถ้าเกิดสบู่ขึ้นมากเกินไปอาจทำให้มีปัญหาในขั้นตอนการทำความสะอาดไบโอดีเซล เนื่องจากวิธีการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาจาก ไบโอดีเซลด้วยการใช้น้ำล้าง จะทำให้การแยกชั้นระหว่างน้ำล้างกับไบโอดีเซลใช้เวลานาน ดังนั้นก่อนการทำปฏิกิริยาควรจะต้องป้องกันน้ำที่ปะปนในสารตั้งต้น เพื่อลดการเกิดสบู่ คือ ปริมาณน้ำที่ปนเปื้อนมากับน้ำมันพืช และปริมาณน้ำในแอลกอฮอล์ ต้องมีปริมาณน้ำปะปนน้อยที่สุด แต่อย่างไรก็ตาม น้ำจะเกิดขึ้นในขั้นตอนการละลายเบสในแอลกอฮอล์ก่อนผสมกับน้ำมันพืช ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ปฏิกิริยาสะปอนิฟิเคชันทำให้เกิดสบู่

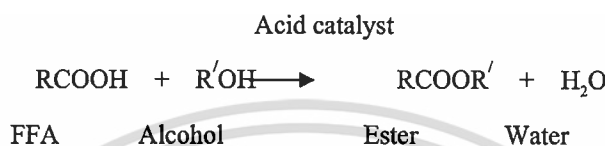


รูปที่ 3.7 ปฏิกิริยาการละลายเบสในแอลกอฮอล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.8 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน

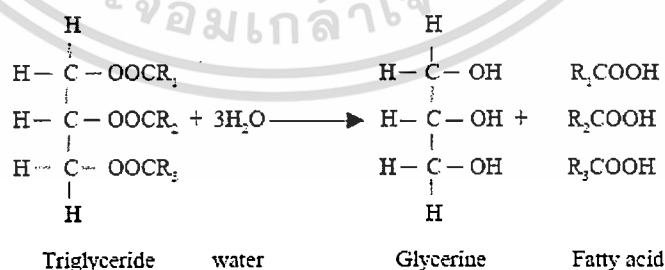
ปฏิกิริยาที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่สามารถย้อนกลับได้ ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาระหว่างกรดคาร์บอกซิลิกกับแอลกอฮอล์ โดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อให้เกิดผลิตภัณฑ์เร็วขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ เอสเทอร์ และน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ปฏิกิริยานี้จะเปลี่ยนกรดไขมันอิสระของน้ำมันให้เป็นเอสเทอร์ หรือเป็นปฏิกิริยาที่สามารถช่วยลดกรดไขมันอิสระของน้ำมันที่มีค่ากรดไขมันอิสระสูง ก่อนนำไปผลิตเป็นไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยา ทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน



รูปที่ 3.8 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน

### 3.9 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis)

ปฏิกิริยาข้างเคียงที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันคือ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ถ้ามีน้ำปะปนอยู่ในสารตั้งต้น ได้แก่ น้ำมัน และแอลกอฮอล์ จะทำให้น้ำไปทำปฏิกิริยากับไตรกลีเซอไรด์ ได้กลีเซอรอล และกรดไขมันอิสระ ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ปฏิกิริยานี้เป็น คุณสมบัติทางเคมีของการเกิดเอสเทอร์ เมื่อมีกรดหรือเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ถ้ามีน้ำในกระบวนการเอสเทอร์ริฟิเคชันมาก จะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสมากขึ้นเช่นกัน ซึ่งทำให้ปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันสูงขึ้น และส่งผลต่อในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน ในขั้นตอนต่อไป เนื่องจากต้องเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยา และส่งผลต่อการสูญเสียปริมาณของเมทิลเอสเทอร์ไปในชั้นของกลีเซอรอล



รูปที่ 3.9 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.10 ตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา

#### 3.10.1 ชนิดและความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา

กระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากกรดไขมันอิสระด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยการใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทกรด ได้แก่ sulfuric, phosphoric, hydrochloric organic, sulfonic เป็นต้น ตัวเร่งปฏิกิริยากรดก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและเกิดการกัดกร่อนต่ออุปกรณ์ในการผลิตมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเบส แต่ในกรณีน้ำมันที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลมีค่ากรดไขมันอิสระสูงมากกว่า 2 % โดยน้ำหนัก ควรจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทกรด เพื่อไปทำปฏิกิริยากับกรดไขมันอิสระในน้ำมัน เพื่อเปลี่ยนให้เป็นเอสเทอร์ การใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะดีกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทเบส เนื่องจากถ้าใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดปฏิกิริยาสะปอนิฟิเคชัน หรือเป็นปฏิกิริยาทำให้เกิดสบู่ ส่งผลต่อปริมาณและคุณภาพของเมทิลเอสเทอร์

#### 3.10.2 อัตราส่วนระหว่างแอลกอฮอล์กับน้ำมัน

อัตราส่วนโดยโมลของสารตั้งต้นระหว่างแอลกอฮอล์กับ ไตรกลีเซอไรด์ในปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นตัวแปรที่สำคัญที่มีผลต่อปริมาณของเมทิลเอสเทอร์และปริมาณกรดไขมันอิสระที่ลดลง จากสมการของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลกับน้ำมัน มีอัตราส่วน 1:1 แต่เนื่องจากปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ ดังนั้นเพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดเอสเทอร์สูงสุดจึงมักใช้แอลกอฮอล์ที่มากเกินไปจากทฤษฎี เพื่อไปขับเคลื่อนให้สมดุลของปฏิกิริยาเลื่อนไปทางผลิตภัณฑ์มากที่สุดแอลกอฮอล์ที่นิยมใช้ในการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันเพื่อผลิตไบโอดีเซลได้แก่ เอทานอล และเมทานอล ซึ่งเอทานอลได้จากการหมักพืช เศษซากพืช เพื่อเปลี่ยนแป้งจากพืชให้เป็นน้ำตาลแล้วเปลี่ยนจากน้ำตาลเป็นแอลกอฮอล์ ส่วนเมทานอลได้จากก๊าซธรรมชาติและการสังเคราะห์ทางเคมี เป็นแอลกอฮอล์ที่มีสายโซ่สั้นที่สุดและเป็นของเหลวที่มีความเป็นขี้ผึ้งซึ่งช่วยเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยากับไตรกลีเซอไรด์ แต่เมทานอลมีการกัดกร่อนสูงกว่าและระเหยง่ายกว่า เอทานอล ส่วนใหญ่จะใช้เมทานอลเนื่องจากมีราคาถูกกว่า และมีคุณสมบัติทางเคมีที่เหมาะสมกว่า แต่เมทานอลมีอันตรายมากกว่าเอทานอล

#### 3.10.3 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา

ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันสามารถเกิดขึ้นได้ในสภาวะอุณหภูมิที่แตกต่างกัน แม้ว่าจะทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้อง (25°C) แต่การเกิดปฏิกิริยาจะดำเนินไปอย่างช้าๆ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาให้สูงขึ้นปฏิกิริยาจะดำเนินไปด้านหน้าได้เร็วขึ้น ดังนั้นอุณหภูมิก็น่าจะเปรียบเสมือนตัวเร่งปฏิกิริยาตัวหนึ่ง การผลิตเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันเมล็ดยาง ที่มีกรดไขมันอิสระสูง ด้วยวิธีการผลิตแบบสองขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกได้ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน และได้แสดงข้อสังเกตเกี่ยวกับ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน เพื่อลดกรดไขมันอิสระของน้ำมันเมล็ดยางให้น้อยกว่า 2% ว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในการทำปฏิกิริยา คือ 45±5°C ถ้าอุณหภูมิสูงเกินไปอาจทำให้น้ำมันเป็นสีดำ และส่งผลต่อ

ต้นทุนการผลิต นอกจากนี้ ได้ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการผลิต เมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มดิบชนิดหีบรวม ซึ่งมีกรดไขมันอิสระอยู่ในช่วง 8-14 % โดยน้ำหนัก ด้วยกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบสองขั้นตอนนี้ โดยขั้นตอนนี้แรกใช้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน ที่อุณหภูมิ 60°C เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสม ภายใต้สภาวะอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดไขมันอิสระ 10:1 ใช้กรดซัลฟิวริก ประมาณ 0.8 % โดยน้ำหนัก สามารถลดกรดไขมันอิสระให้มีค่าน้อยกว่า 1 % โดยน้ำหนัก ภายในเวลา 30 วินาที จากงานวิจัยต่างๆ ทำให้ทราบว่า มีหลายตัวแปรที่มีผลต่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เช่น ชนิดของน้ำมันที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบ และอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะช่วยเพิ่มอัตราเร็วปฏิกิริยาขึ้นด้วย แต่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาไม่ควรเกินจุดเดือดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ เนื่องจากจะเกิดการสูญเสียปริมาณของแอลกอฮอล์ก่อนที่ปฏิกิริยาจะสมบูรณ์

#### 3.10.4 ความรุนแรงในการผสม

ความรุนแรงในการผสมสามารถหาได้จากตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number,  $N_{Re}$ ) ซึ่งความรุนแรงในการผสมเป็นตัวแปรที่มีผลต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันค่อนข้างน้อย โดยการกวนผสมในช่วงแรก วัตถุประสงค์ของสารตั้งต้น คือ น้ำมัน แอลกอฮอล์ และกรดซัลฟิวริก จะถูกกวนผสมเพื่อให้สารตั้งต้นเป็นวัฏภาคเดียวกัน เนื่องจากสารทั้งสามชนิดไม่สามารถละลายเป็นเนื้อเดียวกันเองได้ แต่การกวนผสมจะส่งผลต่อปฏิกิริยาในช่วงเริ่มต้นค่อนข้างช้า เนื่องจากการแพร่ระหว่างสารตั้งต้นทั้งสามวัฏภาคไม่ดีเพียงพอ แต่เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปเรื่อยๆจนเริ่มเกิดเป็น เอสเทอร์ การผสมจะมีผลต่อปฏิกิริยามากขึ้น โดยจะเป็นตัวกระตุ้นและชักนำให้ระบบแพร่กระจายระหว่างกันกลายเป็นวัฏภาคเดียว ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในเวลาต่อมา แต่ถ้าทราบความรุนแรงในการผสมที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา จะทำให้สามารถนำข้อมูลมาออกแบบเครื่องปฏิกรณ์และขยายขนาดของปริมาณการผลิตได้

#### 3.10.5 ความบริสุทธิ์ของสารตั้งต้น

ความบริสุทธิ์ของวัตถุดิบหรือน้ำมันที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันสามารถวัดความบริสุทธิ์ได้จากกรดไขมันอิสระ และไม่ควรมีน้ำปะปน เนื่องจากถ้ามีน้ำปะปนมากจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) เช่นเดียวกับเมทานอลที่ต้องมีความบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่า 98% และน้ำมันที่ผ่านกระบวนการลดกรดไขมันอิสระ ควรมีปริมาณกรดไขมันอิสระน้อยกว่า 2 % โดยน้ำหนัก ถ้ามีปริมาณกรดไขมันอิสระสูงจะส่งผลต่อกระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์ในขั้นตอนที่สองด้วยปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน ซึ่งจะทำให้กรดไขมันอิสระไปทำปฏิกิริยากับเบส เกิดเป็นสบู่เรียกว่า ปฏิกิริยาซาโปนิฟิเคชัน (saponification)

### 3.11 คุณสมบัติของไบโอดีเซล [8]

ในปัจจุบันมีมาตรฐานกำหนดเกี่ยวกับคุณภาพในการผลิตไบโอดีเซลของประเทศต่างๆ ซึ่งประเทศไทยได้กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซล 2 มาตรฐานด้วยกันคือ ลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน) พ.ศ. 2549 ดังแสดง ในภาคผนวก ค

และลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2550 ดังแสดงภาคผนวก ก ซึ่งมีคุณสมบัติต่างๆ ที่มีผลต่อการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซลดังนี้

### 3.11.1 ดัชนีซีเทน (Cetane Index)

ดัชนีซีเทนเป็นค่าแสดงคุณภาพในการจุดระเบิดของน้ำมันเชื้อเพลิง (ignitions quality) น้ำมันที่มี ignition delay สั้นสุดจะมีคุณสมบัติการต้านทานการน็อคได้ดีที่สุด ignition delay คือความล่าช้าในการติดไฟ โดยทั่วไปกำหนดให้ไม่เกิน 0.003 วินาที ยิ่งสั้นเท่าไรยิ่งดี เริ่มจากน้ำมันถูกฉีดเข้ากระบอกสูบ ใช้เวลาในการอุ่นเป็นไอ (vapors) และรวมตัวกับอากาศเริ่มลุกไหม้ (raped-combustion) น้ำมันที่มีค่าซีเทนสูงจะมีความล่าช้าในการติดไฟสั้น และหากมีค่าซีเทนต่ำจะมีความล่าช้าในการติดไฟนาน กรณีที่น้ำมันเชื้อเพลิงมีค่าซีเทนต่ำเกินไป จะทำให้มีการสะสมน้ำมันเชื้อเพลิงไว้มากแล้ว ลุกไหม้ขึ้นพร้อมกันทีเดียวเป็นผลให้เกิด detonations knock น้ำมันที่มีค่าซีเทนพอเหมาะจะช่วยให้เครื่องยนต์ดีเซลง่าย เครื่องยนต์เดินเรียบมีควันและเขม่าน้อยและประหยัดเชื้อเพลิงด้วย ดัชนีซีเทน ของน้ำมันดีเซลตามข้อกำหนดของกระทรวงพาณิชย์ ไม่ต่ำกว่า 47 การหาค่าซีเทนทำตามมาตรฐาน ASTM D976

### 3.11.2 ความหนืด (Viscosity)

ความหนืดของของเหลว คืออัตราต้านทานต่อการไหลภายในเนื้อของของเหลว น้ำมันที่มีความหนืดต่ำจะไหลได้ง่าย ส่วนน้ำมันที่มีความหนืดสูงจะไหลได้ช้า ความหนืดของน้ำมันเชื้อเพลิงยังมีอิทธิพลต่อรูปร่างของละอองน้ำมันเชื้อเพลิง หากความหนืดสูงจะทำให้การฉีดเป็นฝอยละอองไม่ดี ละอองน้ำมันมีขนาดใหญ่ น้ำมันพุ่งไปไกล นอกจากนี้ น้ำมันจะพุ่งเป็นสายแทนที่จะเป็นละอองเล็กๆ ผลคือน้ำมันรวมกับอากาศไม่ดีทำให้การสันดาปไม่สมบูรณ์ กำลั้งเครื่องยนต์และประสิทธิภาพลดลง และยังเป็นเครื่องยนต์ขนาดเล็กแล้วน้ำมันอาจจะพุ่งไปกระทบกระบอกสูบ ชะล้างฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นลงสู่ก้นอ่าง ทำให้เครื่องยนต์สึกหรอและน้ำมันเครื่องสกปรกเร็ว น้ำมันเชื้อเพลิงที่มีความหนืดต่ำ จะทำให้น้ำมันที่พ่นออกมาเป็นฝอยละเอียดมากจึงพุ่งไปไม่ไกลเท่าที่ควร การสันดาปจะไม่ดีนัก กำลั้งและประสิทธิภาพเครื่องยนต์ตกเช่นกัน น้ำมันเชื้อเพลิงที่ความหนืดต่ำจะมีการรั่วกลับไปในตัวปั๊มเชื้อเพลิงแรงดันสูงมาก จึงทำให้ปริมาตรของน้ำมันที่ผ่านหัวฉีดออกไปน้อยลงทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ลดลงเช่นกัน นอกจากนี้การสึกหรอของชิ้นส่วนในระบบเชื้อเพลิงอาจจะมากขึ้น เนื่องจากความหนืดต่ำจะทำให้การหล่อลื่นไม่ดีเท่าที่ควร ความหนืดของน้ำมันดีเซลตามข้อกำหนดของกระทรวงพาณิชย์อยู่ในช่วง 1.8-4.1 cSt ที่อุณหภูมิ 40 °C และการหาค่าความหนืดทำตามมาตรฐาน ASTM D445

### 3.11.3 ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) / (API Gravity)

เป็นการระบุความหนักเบาของน้ำมันที่อุณหภูมิ 15.6 °C ซึ่งใช้สเกล API โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้ Degree API Gravity ณ อุณหภูมิ 15.6 °C =  $[(141.5 / \text{SP.Gr ณ อุณหภูมิ } 15.6 \text{ } ^\circ\text{C}) - 131.5]$  เป็นที่น่าสังเกตว่า น้ำมันที่มี API gravity ยิ่งต่ำลงความถ่วงจำเพาะจะยิ่งสูงขึ้น น้ำมันจึงหนักขึ้น และในทางตรงกันข้าม น้ำมัน

ยิ่งเบาลง API gravity ยิ่งสูงขึ้นและความถ่วงจำเพาะยิ่งต่ำลงด้วย นอกจากนี้ความถ่วงจำเพาะของน้ำมันยังมี ความสัมพันธ์กับปริมาณของไฮโดรเจนในน้ำมัน คือน้ำมันหนักขึ้น (API ต่ำลง) จะมีปริมาณของไฮโดรเจน ในน้ำมันน้อยลง และมีความสัมพันธ์กับค่าความร้อนของน้ำมัน หรือค่าความร้อนของน้ำมันต่อหน่วย น้ำหนักจะลดลงเมื่อน้ำมันหนักมากขึ้น (ความถ่วงจำเพาะสูงขึ้นหรือ API ต่ำลง) ความถ่วงจำเพาะของน้ำมัน คีเซลตามข้อกำหนดของกระทรวงพาณิชย์ อยู่ในช่วง 0.81-0.87 ณ อุณหภูมิ 15.6 °C และการหาค่าความ ถ่วงจำเพาะทำตามมาตรฐาน ASTM D1298

### 3.11.4 ค่าความร้อน (Heating Value/Calorific Value)

ค่าความร้อน คือความร้อนที่ได้จากการลุกไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิงกับออกซิเจน ค่าความร้อนที่ ได้มี 2 กรณี คือ กรณีที่หนึ่งเป็นความร้อนที่ได้หลังจากการลุกไหม้ และมีการกลั่นตัวของไอน้ำเป็นหยดน้ำ เรียกว่า ค่าความร้อนสูง (High Heating Value: HHV) ในกรณีที่สองเป็นความร้อนที่ได้ในกรณีที่ไอน้ำไม่มี การกลั่นตัวเป็นหยดน้ำ เรียกว่า ค่าความร้อนต่ำ (Low Heating Value: LHV) เชื้อเพลิงที่ใช้กับเครื่องยนต์เผา ไหม้ภายในจะต้องมีไฮโดรเจนเป็นส่วนประกอบเสมอ และเมื่อเกิดการเผาไหม้จะเกิดน้ำขึ้นด้วยเสมอ ซึ่งอยู่ ในสถานะไอน้ำและเมื่อเย็นตัวลงก็จะกลั่นตัวเป็นหยดน้ำ ค่าความร้อนที่หาได้จากเครื่องมือใน ห้องปฏิบัติการจะเป็นค่าความร้อนสูง หมายถึงค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ รวมกับค่าความร้อนแฝงที่ ได้จากการกลั่นตัวของไอน้ำ การหาค่าความร้อนทำตามมาตรฐาน ASTM D240 หน่วยของค่าความร้อนมี 2 หน่วย คือ

3.3.4.1 หน่วย บี.ที.ยู (British Thermal Unit) หมายถึง ปริมาตรความร้อนที่ทำให้ น้ำจำนวน 1 ปอนด์ มีอุณหภูมิสูงขึ้น 1 °F เรียกว่า 1 หน่วยความร้อน BTU

3.3.4.2 หน่วยแคลอรี (Calorie) หมายถึง ปริมาณความร้อนที่ทำให้ น้ำจำนวน 1 กรัม มี อุณหภูมิสูงขึ้น 1 °C เรียกว่า 1 หน่วยความร้อนแคลอรี 1 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม เท่ากับ 1.8 บีทียู ต่อปอนด์

### 3.11.5 จุดวาบไฟ (Flash Point)

จุดวาบไฟของน้ำมันเชื้อเพลิง มีความสำคัญในด้านอันตรายจากอัคคีภัยในการขนส่งเก็บรักษา และการใช้งานเท่านั้น แต่ไม่มีความสำคัญโดยตรงต่อการสันดาปและประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ นอกจากนี้ยังใช้จุดวาบไฟ สำหรับตรวจสอบหากมีน้ำมันชนิดเบากว่าเจือปน อุณหภูมิจุดวาบไฟของน้ำมัน คีเซลตามข้อกำหนดของกระทรวงพาณิชย์ ไม่ต่ำกว่า 50 °C การหาอุณหภูมิจุดวาบไฟทำตาม ASTM D93

### 3.11.6 การกลั่น (Distillation)

การกลั่น คือความสามารถในการระเหยของน้ำมันเชื้อเพลิง คุณสมบัติข้อนี้มีความสำคัญต่อการ ทำงานของเครื่องยนต์คีเซล โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเครื่องยนต์รอบปานกลางและรอบสูง สำหรับ ความสามารถในการระเหยที่เหมาะสมนั้นขึ้นอยู่กับรอบ ขนาด และการออกแบบเครื่องยนต์ การใช้เชื้อเพลิง

ที่ระเหยยากนั้น จะทำให้น้ำมันจับเป็นฝอยไม่ได้ ผลคือกำลังและประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ลดลง หากใช้เชื้อเพลิงที่ระเหยง่ายเกินไปจะทำให้กำลังและประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ลดลงเช่นกัน เนื่องจากอาจจะเกิด vapor lock ในระบบเชื้อเพลิงหรือหยคน้ำมันเชื้อเพลิงที่ฉีดออกจากหัวฉีดออกไปไกลเกินไป ช่วงการกลั่นของน้ำมันควรจะต่ำที่สุดโดย ไม่ทำให้คุณสมบัติ การจุดควาไฟ การลุกติดไฟ ค่าความร้อน และความข้นใสไม่ได้ตามมาตรฐาน หากอุณหภูมิที่น้ำมันกลั่นออกมา 10% และ 80% ห่างกันเกินไป จะทำให้ช่วงเวลาการอุ่นเครื่องยนต์นานขึ้น ส่วนอุณหภูมิที่น้ำมันกลั่นตัวออกมา 90% และจุดสุดท้ายของการกลั่นต่ำ จะช่วยลดการเกิดเขม่าคาร์บอน และความสกปรกของน้ำมันเครื่อง การหาอุณหภูมิการกลั่นทำตามมาตรฐาน ASTM D86

### 3.11.7 น้ำและตะกอน (Water and Sediment)

น้ำและตะกอนเป็นอุปสรรคตัวหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับอายุการใช้งานของไส้กรองน้ำมันเชื้อเพลิง เนื่องจากทำให้เกิดไขและการอุดตันของกรองน้ำมันเชื้อเพลิง การหาน้ำและตะกอนทำตามมาตรฐาน ASTM D2709

### 3.11.8 กากถ่าน (Carbon Residue)

กากถ่าน คือกากคาร์บอน หรือเขม่าที่เหลืตกค้างในน้ำมันเชื้อเพลิงจากการเผาไหม้กากคาร์บอนเป็นตัวชี้ให้เห็นสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิงนั้นๆ ว่าถ้านำไปใช้กับเครื่องยนต์แล้วจะเกิดเขม่าจับขึ้นส่วนของเครื่องยนต์มากน้อยเพียงใด การหากากถ่านทำตามมาตรฐาน ASTM D4530

### 3.11.9 เถ้า (Ash)

เถ้าเป็นสารที่ไม่ไหม้ไฟ ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปของ ของแข็ง หรือสบูโลหะที่ละลายได้ในน้ำมันเชื้อเพลิง เถ้าเป็นตัวที่เป็นอันตรายต่อการสึกหรอของเครื่องยนต์ การหาเถ้าทำตามมาตรฐาน ASTM D482

## 3.12 การล้างไบโอดีเซล [9]

วัตถุประสงค์หลักในการล้างไบโอดีเซลคือ การกำจัดสิ่งเจือปนที่ละลายอยู่ในชั้นของ เอสเทอร์ เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ กลีเซอรอล และเมทานอล ให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน เนื่องจากสิ่งเจือปนเหล่านี้จะส่งผลเสียต่อ ปะเก็นยาง ท่อส่งน้ำมัน ถึงเก็บน้ำมัน เนื่องจากสิ่งเจือปนมีฤทธิ์การกัดกร่อนสูง และอาจส่งผลต่อไปยังหัวฉีดทำให้อุดตันได้ โดยขั้นตอนการกำจัดสิ่งเจือปนต่างๆ สามารถทำได้ดังนี้

### 3.12.1 การกำจัดแอลกอฮอล์

เนื่องจากเมทานอลมีจุดเดือดเท่ากับ 64.7 °C และน้ำไบโอดีเซลมีจุดเดือด มากกว่า 150 °C ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของน้ำมันและอัตราส่วนผสมของเมทานอลในการทำปฏิกิริยา ดังนั้นเราจึงสามารถแยกออกจากไบโอดีเซลได้ด้วยคุณสมบัติดังกล่าว ซึ่งเมทานอลจะเริ่มสูญเสียบางส่วนตั้งแต่กระบวนการผลิต ในการแยกเมทานอลควรจะแยกหลังจากการทำปฏิกิริยาเสร็จสิ้น ซึ่งอาจจะติดตั้งอุปกรณ์การแยกเมทานอล

หรือเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อเปลี่ยนสถานะของเมทานอลจากไอเป็นของเหลวในกระบวนการแยก กลิเซอรอลก็ได้ แต่ยังมีเมทานอลที่ละลายอยู่ในชั้นของเอสเทอร์ (ไบโอดีเซล) ดังนั้นจึงต้องกำจัดออกด้วยการล้าง

### 3.12.2 การกำจัดกลีเซอรอล

ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการในการทำปฏิกิริยา จะทำการแยกกลีเซอรอล ออกจากไบโอดีเซลด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก คือ ตั้งทิ้งไว้ประมาณ 30-60 นาที เพื่อให้กลีเซอรอลตกนอนก้นและทำการถ่ายกลีเซอรอล ออก แต่ยังมีกลีเซอรอลที่ละลายอยู่ในชั้นของไบโอดีเซล จึงต้องทำการล้างด้วยน้ำ หรือล้างแบบแห้ง เพื่อลดปริมาณของกลีเซอรอลให้ได้ตามมาตรฐาน ปริมาณกลีเซอรอลที่ละลายอยู่ในชั้นของ ไบโอดีเซลวัดได้จากค่ากลีเซอรอลอิสระ

### 3.12.3 การกำจัดตัวเร่งปฏิกิริยา

ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันจะต้องมีตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไป ด้านหน้าทำให้ได้เอสเทอร์ แต่หลังจากทำปฏิกิริยาเหล่านี้เสร็จสิ้น จะเหลือตัวเร่งปฏิกิริยาปนมากับเอสเทอร์ ซึ่งจะต้องกำจัดออกก่อนที่จะนำไปใช้งาน เนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นเบสแก่มีฤทธิ์การกัดกร่อนสูง ทำให้ส่งผลต่อท่อส่งน้ำมัน และหัวฉีดอาจจะอุดตันได้ การกำจัดสามารถทำได้ด้วยการล้างด้วยน้ำและการล้างแบบแห้ง ในกรณีการล้างด้วยน้ำ โดยหลักการคือต้องการให้น้ำสัมผัสกับน้ำมันมากที่สุด เพื่อเป็นตัวนำโซเดียมไฮดรอกไซด์ออกจากไบโอดีเซล น้ำล้างที่ได้ จะเป็นน้ำสบู่ เราจะต้องล้างจนกว่าน้ำล้างจะสะอาด ซึ่งอาจวัดได้จากค่า pH ของน้ำล้างจะต้องมีค่าเท่ากับ 7

### 3.12.4 การกรองไบโอดีเซล

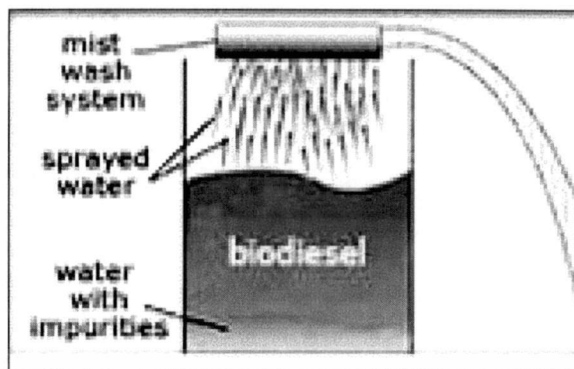
ไบโอดีเซลต้องผ่านกรองละเอียดที่น้อยกว่า 1 ไมครอน เพื่อให้มั่นใจว่าน้ำมันไบโอดีเซล ที่ได้ไม่มีการปนเปื้อน และปลอดภัยต่อหัวฉีดของเครื่องยนต์ เนื่องจากเครื่องยนต์ดีเซลมีขนาดรูหัวฉีด เล็กเพียง 2 ไมครอน ดังนั้นในการออกแบบระบบการกรองจะต้องมีขนาดเล็กกว่าเพื่อป้องกันการอุดตันของหัวฉีด

## 3.13 เทคโนโลยีการล้างไบโอดีเซล

### 3.13.1 การล้างด้วยน้ำ

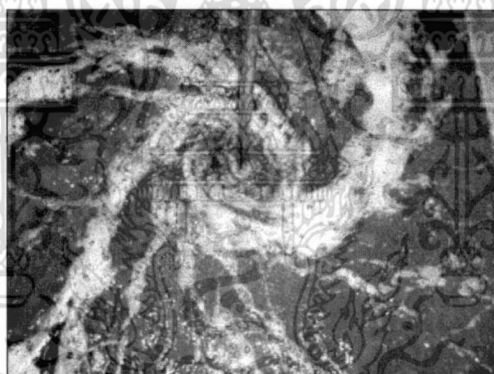
3.13.1.1 การสเปรย์น้ำ เป็นกระบวนการปะทะกันระหว่างน้ำกับไบโอดีเซลเพื่อไม่ทำให้ ไบโอดีเซลที่ยังไม่ผ่านการล้าง เกิดสปูมากเกินไป การสเปรย์น้ำนี้จะชะล้างสิ่งสกปรกที่เราไม่ต้องการออกไป จากไบโอดีเซล หลักการแยกชั้นของน้ำกับน้ำมันใช้หลักการทางกายภาพ คือความหนาแน่นของน้ำเท่ากับ  $1000 \text{ kg/m}^3$  และไบโอดีเซลมีค่าความหนาแน่นอยู่ระหว่าง  $860-900 \text{ kg/m}^3$  ดังนั้นของเหลวที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าจะลอยอยู่ด้านบน ทำให้น้ำที่ผ่านการชะล้างกับไบโอดีเซลแล้วจะแยกตัวลงสู่ด้านล่าง ส่วนไบโอดีเซลจะลอยขึ้นด้านบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 การสเปรย์น้ำ

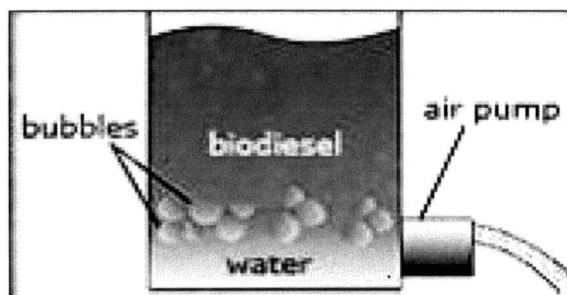
3.13.1.2 การกววน เป็นกระบวนการผสมกันระหว่างน้ำกับไบโอดีเซลโดยใช้ใบกวน ทำให้ของเหลวสองชนิดที่มีความหนาแน่นต่างกันมากสัมผัสกันมากกว่าการการสเปรย์น้ำ แต่ความสำคัญของกระบวนการนี้ขึ้นอยู่กับประเภทของใบกวนและความเร็วรอบของใบกวน เนื่องจากถ้าผสมรุนแรงเกินไป อาจทำให้เกิดปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน หรือเกิดสบู่



รูปที่ 3.11 การกววน

3.13.1.3 การใช้ฟองอากาศ ฟองอากาศหมายถึง ลักษณะของฟิล์มของเหลวบางๆ รูปทรงกลมหรือครึ่งทรงกลมที่มีอากาศหรือก๊าซชนิดต่างๆ อยู่ในฟองอากาศ เมื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการล้างไบโอดีเซลคือ จะใส่น้ำในถังล้างไบโอดีเซลด้วยอัตราส่วนน้ำต่อไบโอดีเซล 1:1 แล้วเปิดปั๊มอากาศ จะทำให้เกิดการรวมผสมกันระหว่างไบโอดีเซลที่อยู่ด้านบนและน้ำที่อยู่ด้านล่าง กระบวนการนี้มีจุดเด่นกว่ากระบวนการล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำที่กล่าวมาคือ น้ำและไบโอดีเซลจะสัมผัสกันมากที่สุด ซึ่งความรุนแรงในการผสมจะขึ้นอยู่กับขนาดของฟองอากาศและความดันของอากาศที่ใส่เข้าไปในถังล้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



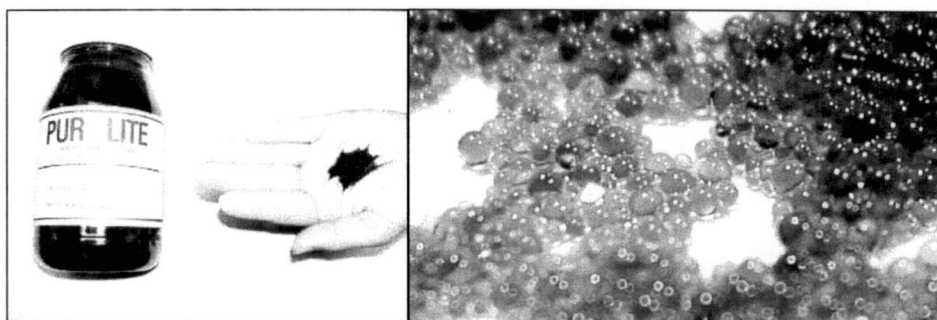
รูปที่ 3.12 การใช้ฟองอากาศ

### 3.13.2 การล้างแบบแห้ง

#### 3.13.2.1 เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange Resins)

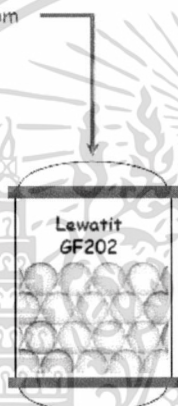
Ion exchange resins คือ การแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) เป็นปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนไอออนจากสารของแข็งกับไอออนของละลาย โดยที่กระบวนการนี้จะไม่ทำให้โครงสร้างของแข็งเกิดการเปลี่ยนแปลงมากนัก และโดยทั่วไปสารของแข็งที่นิยมใช้คือ เรซิน (resin) ซึ่งเป็นสารพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบเชื่อมขวาง หรือแบบร่างแห สมบัติโดยทั่วไปของเรซิน คือต้องมีไอออนอิสระที่สามารถแลกเปลี่ยนกับไอออนในน้ำได้ แต่ไม่ละลายน้ำและต้องมีช่องว่างภายในโครงสร้างโมเลกุลอย่างเพียงพอเพื่อให้ไอออนต่างๆ ผ่านเข้าออกได้สะดวก มีบริษัทที่ศึกษาเกี่ยวกับการแลกเปลี่ยนไอออนเพื่อทำความสะอาดไบโอดีเซลคือ บริษัท LANXESS Deutschland GmbH และ บริษัท The Purolite Company ซึ่งมีผลิตภัณฑ์คือ Lewatit® GF 202 และ Purolite PD206 ตามลำดับ เรซินจะถูกบรรจุในคอลัมน์ทรงแนวตั้งเพื่อดักจับไอออนของกลีเซอรอล และสบู่ จากไบโอดีเซลที่ไหลผ่าน กระบวนการของบริษัท LANXESS คือนำไบโอดีเซลที่แยกกลีเซอรอล ออกแล้วมาอุ่นที่อุณหภูมิ 30-40 °C แล้วนำมาไหลผ่านเรซินที่เรียงกัน 3-4 ชั้น ดังแสดงในรูปที่ 3.13 และสามารถนำ เรซินกลับมาใช้ใหม่ได้ ด้วยการใส่เมทานอลล้างเรซินที่จับไอออนของกลีเซอรอล และสบู่ส่วน เรซินของบริษัท Purolite มีลักษณะการทำงานเช่นเดียวกัน และได้แสดงการใช้เมทานอลล้างเรซิน ที่จับไอออนของกลีเซอรอลของบริษัท Purolite ดังแสดงในรูปที่ 3.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 ตัวอย่างเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

Biodiesel from  
phase separation  
glycerine: 600...2000 ppm  
soap: 10 - 200 ppm



#### Operating information

- Fresh GF202 is first preconditioned by drying with 3-4 bed volumes MeOH at 2BV/h. The MeOH is then drained and the biodiesel passed into the reactor. Before the MeOH wash, the biodiesel is also drained.
- After preconditioning, GF202 is only subjected to alternate MeOH / biodiesel treatments and never washed with water.
- 100% bed volume water-wet, 95% in MeOH, 90% in biodiesel + glycerine

#### Operating Conditions:

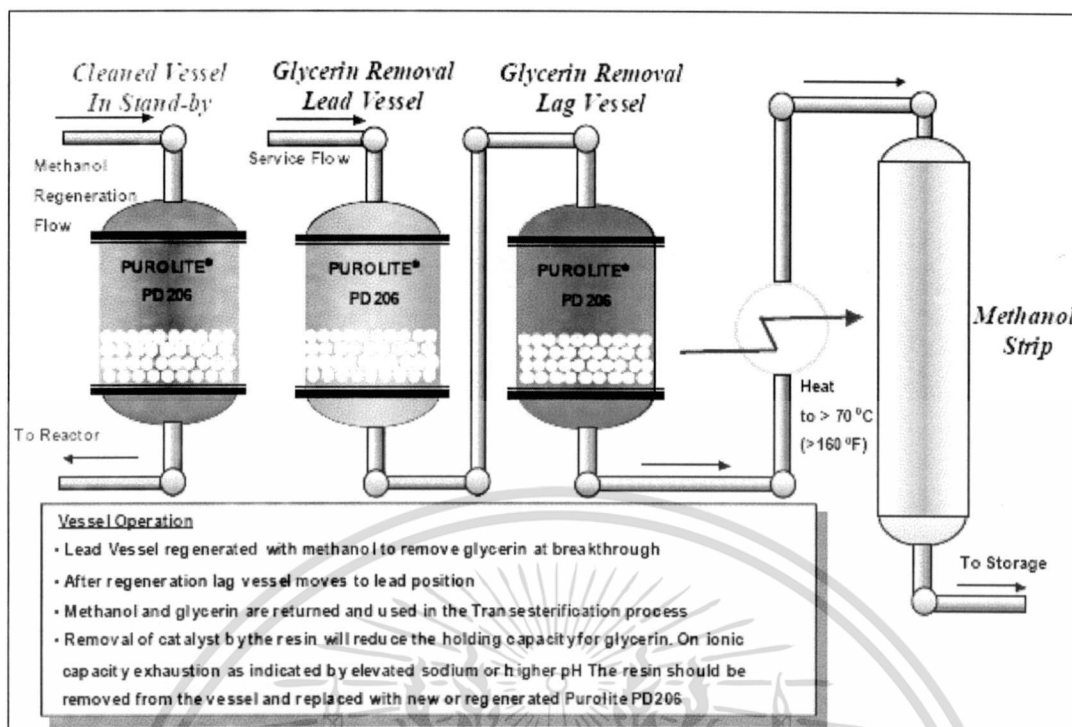
Temperature: 30°C - 40°C  
LHSV: 1.5 - 2 BV\*biodiesel/hr  
Bed height: 1 - 2 m  
Op. Capacity: 250 g glycerine/litre  
Regeneration: MeOH @ 20-35°C  
Reg. volume: 2-4 BV to transesterification  
5-10 BV to MeOH storage  
Resin life: 4-5 years (average)

\*BV = bed volumes

refined biodiesel  
glycerine: <10 ppm  
soap: <5 ppm

รูปที่ 3.14 การใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนของบริษัท LANXESS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 การใช้เมทานอลล้างเรซินที่จับไอออนของกลีเซอรอลของบริษัท Purolite

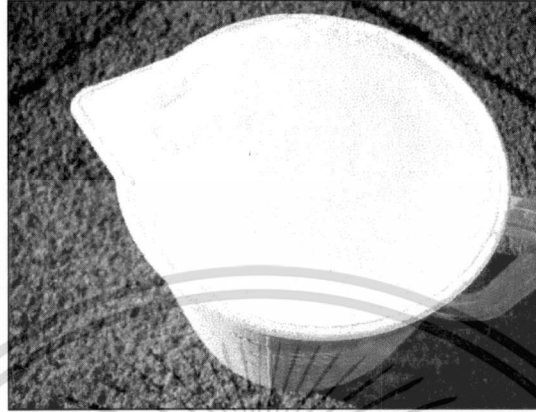
ปัจจุบันได้มีการใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนอย่างกว้างขวางในด้านอุตสาหกรรมบำบัดน้ำเสีย ซึ่งน้ำที่ผ่านขั้นตอนการบำบัดแล้วจะถูกนำไปใช้ต่อไปในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น น้ำที่ใช้ปฏิบัติการภายในโรงงานผลิตพลังงาน น้ำที่ใช้สำหรับผสมเพื่อเจือจางในอุตสาหกรรมเคมี น้ำสำหรับใช้ล้างในอุตสาหกรรมผลิตเหล็ก ตลอดจนการผลิตน้ำอุตสาหกรรมเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ การฟอกสีในน้ำตาลเหลว และการกลั่นของเหลวที่มีส่วนประกอบของสารที่มีมูลค่าสูง เช่น เกล็ดดินและกลีเซอริน นอกจากนี้สารเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ยังทำหน้าที่เป็น ตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาเคมีสำหรับอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมผลิตพลาสติกชนิดโพลีคาร์บอเนต และไบโอดีเซล เป็นต้น

### 3.13.2.2 แมกนีซอล (Magnesol)

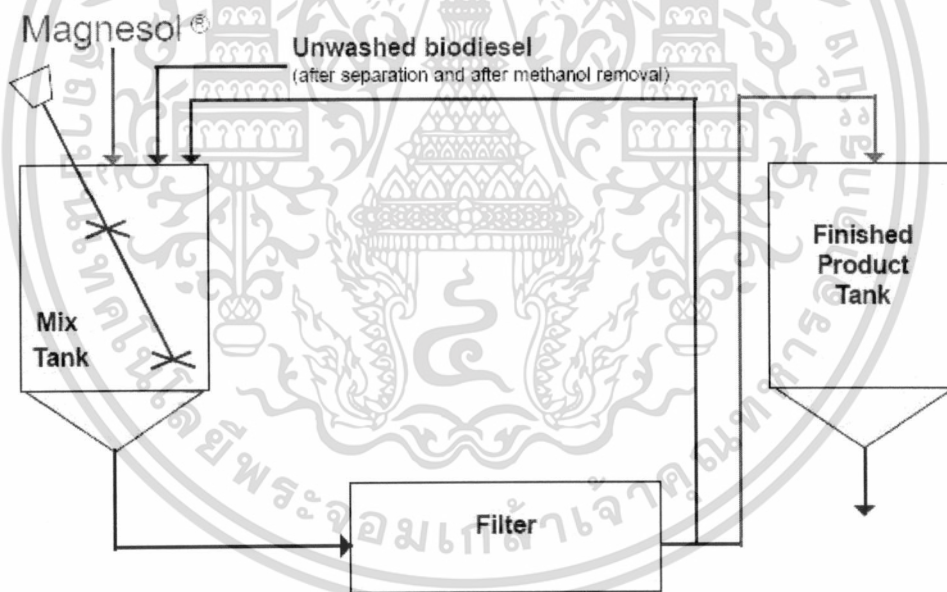
แมกนีซอล หรือ Synthetic Magnesium Silicate ดังแสดงในรูปที่ 3.16 นำใช้ล้างไบโอดีเซลแบบแห้ง เริ่มต้นจากบริษัท Dallas Group of America เป็นผู้ผลิตแมกนีซอล ซึ่งมีขนาดอนุภาคเท่ากับ 60 ไมครอน เพื่อนำมากำจัดสิ่งเจือปนในไบโอดีเซลหลังจากผ่านกระบวนการผลิต เช่น ไตรกลีเซอไรด์, ไดกลีเซอไรด์, โมโนกลีเซอไรด์ เมทานอล กลีเซอริน โลหะ และสบู่ ขั้นตอนในการล้างด้วยแมกนีซอล เริ่มจากอุ่นไบโอดีเซลที่แยกกลีเซอรอล ออกแล้ว ที่อุณหภูมิ  $77^{\circ}\text{C}$  จากนั้นนำใส่แมกนีซอล ลงไปผสมกับไบโอดีเซล แล้วกวนให้เข้ากันประมาณ 20-30 นาที จากนั้นนำไบโอดีเซลที่ได้ไปผ่านเครื่องกรองขนาด 1 ไมครอน ในลักษณะไหลวนช้าๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.17 จนเมื่อน้ำมันที่ได้จะมีสีใส ไม่ขุ่น และนำมาตรวจวัดค่า pH ซึ่งจะต้องได้เท่ากับ 7 ทางบริษัท Dallas Group of America ได้โฆษณาสินค้าของตัวเองโดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การนำน้ำมันถั่วเหลืองมาผลิตเป็นไบโอดีเซล แล้วทำการเปรียบเทียบคุณภาพของไบโอดีเซลที่ล้างด้วยน้ำ แล้วนำไปให้ความร้อน กับน้ำมันที่ผ่านแมกนิซอล 1 % โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 77°C เป็นเวลา 20 นาที ดังแสดงผลในตารางที่ 3.4



รูปที่ 3.16 แมกนิซอล (Magnisol)



รูปที่ 3.17 กระบวนการล้างไบโอดีเซลแบบแห้งด้วยแมกนิซอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 เปรียบเทียบคุณสมบัติของไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลืองหลังจากผ่านกระบวนการล้างระหว่างการล้างด้วยน้ำแล้วให้ความร้อนกับการใช้เมกนีซอล [6]

Parameter	Specification	Unwashed, Untreated	1% Magnesol (77°C/20 min.)	Washed And Dried
<b>ASTM 6751</b>				
Free Glycerin, %	0.020 max	0.033	0.005	0.002
Total Glycerin, %	0.240 max	0.209	0.191	0.196
Flash Point, °C	130 min	>190	200	163
Water and sediment, vol. %	0.050 max	0.1	0.04	0
Carbon Residue, %	0.050 max	<0.010	<0.010	0.05
Sulfated Ash, mass %	0.020 max	0	0	0.005
Kinematic Viscosity, <i>cSt</i> @40°C	1.9-6.0	4.127	4.097	4.207
Total Sulfur, mass%	0.05 max	0.00006	0.00002	0.00007
Cetane Number	47 min	51	51.3	55.9
Cloud Point, °C	Report	0	0	0
Copper Corrosion	No. 3 max	1a	1a	1a
Acid Number, mg KOH/gram	0.80 max	0.32	0.27	0.31
Phosphorus, mass %	0.001 max	0.0007	0.0005	0.0006
<b>EN 14214</b>				
Viscosity at 40°C, <i>mm</i> <sup>2</sup> / <i>sec</i>	3.5 min-5.0 max	4.1	4.1	4.2
Oxidation stability at 110 °C, hours	6.0 min	0.5	3.7	0.2
Methanol content, %	0.2 max	0.113	0.011	<0.001
Metals I Na+K, <i>mg/kg</i>	5.0 max	3	<1	5
Metals II Ca+Mg, <i>mg/kg</i>	5.0 max	0	0	0
Phosphorus content, <i>mg/kg</i>	10.0 max	<1	<1	<1
Soap, <i>mg/kg</i>	None	651	4	13

### 3.13.2.3 เกลือ [10]

น้ำและเกลือเป็นสารที่มีโมเลกุลมีขั้ว เนื่องจากอิเล็คตรอนในโมเลกุลไม่ได้ถูก แบ่งไปอย่างเท่าๆ กันระหว่างอะตอมโมเลกุล ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกลือประจุบางส่วนในน้ำ ที่ประกอบด้วยสองอะตอมของไฮโดรเจนและหนึ่งอะตอมของออกซิเจน โดยที่อิเล็คตรอนจะใช้เวลาอยู่รอบๆ อะตอมของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกซิเจนซึ่งมากกว่าอะตอมของไฮโดรเจน อะตอมของไฮโดรเจนจะมีประจุบวก อะตอมของออกซิเจนจะมีประจุลบ เกิดประกอบด้วยโซเดียมและคลอไรด์ การใช้อิเล็กตรอนร่วมกันส่วนใหญ่อิเล็กตรอนจะใช้เวลาเกือบทั้งหมดอยู่ที่ด้านของคลอไรด์ ทำให้คลอไรด์มีประจุลบและใช้เวลาน้อยมากที่ด้านโซเดียมทำให้โซเดียมมีประจุบวก เมื่อใส่เกลือลงไปใต้น้ำประจุบวกของน้ำจะจับกับประจุลบของเกลือ เมื่อเปรียบเทียบปรากฏการณ์คล้ายกันของการดูดซับของการละลายน้ำด้วยเกลือจะเห็นได้ว่าเปรียบเกลือเป็นวัสดุดูดซับ และน้ำเป็นองค์ประกอบในสารละลายที่ทำการแยกออกด้วยความแรงของขั้วที่กระทำต่อเกลือ ซึ่งเกิดจากความไม่สมดุลของการกระจายของอิเล็กตรอนทำให้ปรากฏการณ์จับกันระหว่างเกลือกับน้ำคล้ายกับการดูดซับทางกายภาพ ส่วนความแตกต่างที่ชัดเจน คือปรากฏการณ์การจับกันระหว่างน้ำกับเกลือไม่มีขั้นตอนการคายกลับและการนำกลับมาใช้ใหม่

#### 3.13.2.4 น้ำล้างผสมกรด

น้ำล้างผสมกรดในการล้างน้ำแรก เพื่อให้ชะล้างตัวเร่งปฏิกิริยาเบสได้เร็วขึ้น โดยจะต้องตรวจสอบดูก่อนว่าไบโอดีเซลมีค่า pH เท่าใด แล้วจึงผสมน้ำกับกรดเพื่อให้ pH เป็นกลาง เช่น pH เริ่มต้นของ ไบโอดีเซลมีค่าเท่ากับ 10 ดังนั้นจะต้องผสมน้ำให้ได้ pH เท่ากับ 4 เพื่อไปหักล้างกับค่าความเป็นเบส จะทำให้ไบโอดีเซลสะอาดเร็วขึ้นกว่าการใช้ น้ำปกติ (pH = 7) อาจจะใช้ น้ำอุ่นอุณหภูมิประมาณ 80°C เพื่อช่วยลดการเกิดอิมัลชัน

### 3.14 ไมโครเวฟ

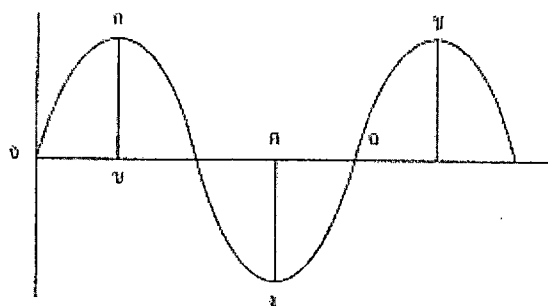
ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ซึ่งมีอยู่แล้วในธรรมชาติ ดวงอาทิตย์เป็นผู้ส่งคลื่นนี้ออกมา คลื่นไมโครเวฟมีความถี่ตั้งแต่ 100 MHz - 10 GHz

### 3.15 คลื่น

คลื่น (WAVE) เป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติชนิดหนึ่งซึ่งจะเกิดขึ้นได้ต้องมีแหล่งกำเนิดคลื่น แล้วค่อยแผ่กระจายคลื่นออกจากแหล่งกำเนิดออกไปเป็นวงกว้าง โดยจะมีขนาดลดลงไปเรื่อยๆ ยิ่งห่างจากแหล่งกำเนิดมากขนาดจะยิ่งเล็กลง ในที่สุดจะหายไป

คลื่นทุกชนิด ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ

1. ความสูงของคลื่น
2. ความยาวของคลื่น



รูปที่ 3.18 ความสูงของคลื่น

### 3.15.1 ความสูงของคลื่น (AMPLITUDE) $\lambda$

ปกติเวลาเราเขียนเส้นแทนรูปคลื่น เราจะเขียนได้ดังรูปที่ 2.1 โยจะมีเส้นแบ่งกึ่งกลางคลื่น ความสูงของคลื่นจะวัดจากระดับกึ่งกลางคลื่นขึ้นไปหาหรือลงไปหายอดคลื่นในรูปคือ ระยะ ก ไป ข และ ค ไป ง

### 3.15.2 ความยาวของคลื่น (WAVE LENGTH)

คือ ระยะห่างระหว่างยอดคลื่นหนึ่งไปยังอีกยอดคลื่นหนึ่ง ในรูปที่ 3.1 คือ ระยะจาก ก ไป ข แต่ในทางปฏิบัติ เรามักวัดจากระดับกึ่งกลางของคลื่นที่จุดเริ่มต้นของคลื่นซึ่งบวกไปจนจุดกึ่งกลางที่คลื่นซึ่งลบไปบรรจบ ในรูปที่ 3.18 คือ ระยะจาก ง ถึง ค ระยะนี้เราเรียกว่าเป็นความยาวคลื่น เนื่องจากสะดวกในการพิจารณา และวัดคำนวณระยะจาก ง ถึง ค เราให้คำจำกัดความว่า เป็น 1 ลูกคลื่น หรือ 1 ความยาวคลื่น หรือ 1 รอบคลื่น (CYCLE) “  $\lambda$  ” อ่านว่า แลมด้า (LAMBDA)

ยังมีคำที่เกี่ยวข้องกับคลื่นอีกอย่างคือ ความถี่ (FREQUENCY) เป็นความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่นเทียบกับเวลา โยกำหนดหน่วยของความถี่เป็น เฮิรตซ์ (HERTZ) ตัวย่อเขียนเป็น “Hz” โดยให้คำจำกัดความไว้ว่า “ 1 เฮิรตซ์ (HZ) คือการที่คลื่น 1 ลูก หรือ 1 รอบ เคลื่อนที่ผ่านจุดอ้างอิงโดยใช้เวลา 1 วินาที ” ฉะนั้นถ้าบอกว่าความถี่ 1,000 เฮิรตซ์ ( Hz ) หมายความว่า มีลูกคลื่น 1,000 ลูกเคลื่อนที่ผ่านจุดอ้างอิงได้ภายในเวลา 1 วินาที เมื่อนำส่วนต่างๆ ของคลื่น และความถี่มาสัมพันธ์กัน สร้างสมการสูตรดังนี้

$$F = \frac{V}{\lambda}$$

เมื่อ  $F$  = ความถี่ (FREQUENCY) มีหน่วยเป็น เฮิรตซ์ (Hz)

$V$  = ความเร็วของคลื่นวิทยุในอวกาศ ( VELOCITY ) ซึ่งเท่ากับความเร็วแสงคือ  $3 \times 10^8$  เมตรต่อวินาที (m/s)

$\lambda$  = แลมด้า เท่ากับความยาวคลื่น (WAVE LENGTH) มีหน่วยเป็นเมตร (m)

ดังนั้นถ้าเราทราบความถี่ของคลื่นก็สามารถหาความยาวของคลื่นได้ ในทางกลับกัน ถ้าเราทราบความยาวคลื่น ก็สามารถหาความถี่ของคลื่นได้เช่นกัน เช่น เราทราบว่าความถี่ของคลื่นไมโครเวฟที่ใช้ในเตาไมโครเวฟเท่ากับ 2,450 เมกะเฮิร์ตซ์ (MHz) เราสามารถหาความยาวคลื่นได้ตามสูตร

$$F = \frac{V}{\lambda}$$

เมื่อ  $V = 3 \times 10^8$  (300,000,000) เมตรต่อวินาที (m/s)

$F = 2,450$  เมกะเฮิร์ตซ์ (MHz) = (2,450,000,000)

$$\text{แทนค่า} \quad \lambda = \frac{3 \times 10^8 (m/s)}{2,450 (MHz)} = \frac{300,000,000}{2,450,000,000}$$

ฉะนั้นความยาวคลื่น

$$(\lambda) = 0.1224 \text{ เมตร หรือ } 12.24 \text{ เซนติเมตร}$$

### 3.16 การแผ่รังสีของคลื่น

เราสามารถแบ่งการแผ่รังสีของคลื่นตามความถี่ได้เป็น 2 แบบ

#### 3.16.1 การแผ่รังสีแบบไม่ทำให้อะตอมภายในสสารแตกตัว

อันได้แก่ คลื่นวิทยุ ทีวี ไมโครเวฟ เรดาร์ อินฟราเรดและแสงที่ตามองเห็น ซึ่งคลื่นเหล่านี้เป็นอันตรายกับสิ่งมีชีวิตน้อย

#### 3.16.2 การแผ่รังสีแบบทำให้อะตอมของสสารแตกตัว

อันได้แก่ แสงอัลตราไวโอเล็ต รังสีเอกซ์ รังสีแกมมา ซึ่งคลื่นเหล่านี้ทำอันตรายกับสิ่งมีชีวิตได้ถ้ารับรังสีในปริมาณมากๆ เช่น การฉายรังสีแกมมาเพื่อกำจัดเซลล์มะเร็ง จะทำให้เซลล์ของสิ่งมีชีวิตเปลี่ยนแปลงหรือตายไป

คลื่นไมโครเวฟจัดเป็นคลื่นที่ปลอดภัย ไม่มีสารกัมมันตภาพรังสีตกค้างอยู่บนอาหารหรือคนที่ได้รับคลื่นไมโครเวฟ แต่อย่างไรก็ดี แม้ว่าคลื่นไมโครเวฟจะไม่มีสารกัมมันตภาพรังสีตกค้างอยู่ คลื่นไมโครเวฟก็ยังมีอันตราย หากได้รับคลื่นไมโครเวฟปริมาณมากๆ และนานๆ อยุ่จะต่างๆ อาจจะถูกและใช้การไม่ได้ ถ้าโดนดวงตา ตาอาจบอดได้ หากได้รับคลื่นไมโครเวฟที่มากกว่า  $5 \text{ mW/cm}^2$

### 3.17 ลักษณะของคลื่นไมโครเวฟ

คลื่นไมโครเวฟมีลักษณะประจำอยู่ 3 ลักษณะ คือ

3.17.1 การสะท้อนของคลื่น ( Reflection ) คลื่นไมโครเวฟเมื่อส่งไปโดนโลหะจะสะท้อนออก คลื่นไม่สามารถทะลุผ่านโลหะไปได้

3.17.2 การทะลุผ่านของคลื่น ( Penetration ) คลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุผ่านวัสดุบางชนิดคล้ายกระจกส่องหน้าต่างที่ยอมให้แสงธรรมดาส่องผ่านตัวมันได้ วัสดุที่รู้จักกันแพร่หลายของการทะลุผ่านของคลื่น คือ แก้วทั่วไป แก้วทนความร้อน เครื่องกระเบื้องเคลือบ เครื่องถ้วยชามเคลือบ กระจก และพลาสติก เป็นต้น ดังนั้นเมื่อนำวัสดุเหล่านี้มาทำเป็นวัสดุบรรจุอาหาร ตัววัสดุเองจะไม่ร้อนจะร้อนเฉพาะอาหารเท่านั้น

3.17.3 การดูดกลืนของคลื่น ( Absorption ) คลื่นไมโครเวฟสามารถดูดกลืนไว้โดยอาหารหรือวัสดุที่มีส่วนผสมของน้ำอยู่ ทำให้กำลังงานของคลื่นลดลงไป ซึ่งกำลังที่ถูกดูดกลืนไว้จะเปลี่ยนสภาพทำให้วัตถุร้อนขึ้น วัตถุที่ดูดกลืนคลื่น นอกจากจะเป็นอาหารและน้ำยังประกอบด้วยพวกเครื่องปั้นดินเผาที่ไม่ได้เคลือบทั้งหมด เนื่องจากเหตุที่ว่าเครื่องปั้นดินเผาที่ไม่ได้เคลือบ จะมีรูพรุนมากมาย ทำให้มีความชื้นหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ มีละอองน้ำแทรกเข้าไปอยู่ในรูพรุนเหล่านั้น เมื่อนำมาใช้ในเตาไมโครเวฟ ตัวละอองน้ำจะร้อนส่งผลให้วัสดุร้อนไปด้วย

### 3.18 กลไกการระเหยของน้ำออกจากวัสดุที่อบแห้งด้วยไมโครเวฟ

ความเร็วในการระเหยน้ำออกจากวัสดุที่อบแห้งจะขึ้นอยู่กับ ความแตกต่างของความดันระหว่างน้ำหรือความชื้นภายในวัสดุที่อบแห้งกับภายนอก กล่าวคือ ถ้าความดันของน้ำภายในวัสดุสูงกว่าความดันภายนอกวัสดุ การระเหยก็จะขึ้นอย่างรวดเร็ว ด้วยเหตุนี้ไมโครเวฟซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่ค่อนข้างสูง จะทะลุทะลวงเข้าไปในเนื้อวัสดุที่อบแห้งไปสั่นโมเลกุลของน้ำอย่างรุนแรงด้วยความถี่เท่ากับความถี่ไมโครเวฟ เมื่อสสารกลับตัวไปมาตามความถี่ของคลื่นไมโครเวฟที่ใช้ 2450 MHz โมเลกุลจะกลับตัวในช่วงคลื่นไมโครเวฟช่วงบวกเข้ามา 2450 ล้านครั้งต่อวินาที และเมื่อช่วงลบของคลื่นไมโครเวฟเข้ามาโมเลกุลจะกลับตัวอีกครั้งเป็นจำนวน 2450 ล้านครั้งต่อวินาที ซึ่งส่งผลก็คือ เกิดการสั่นสะเทือนอย่างรวดเร็วของโมเลกุลของน้ำ ทำให้ได้รับความร้อน เนื่องจากการเสียดสีชนของโมเลกุลของน้ำ ส่งผลให้น้ำมีอุณหภูมิและความดันสูงขึ้น และเมื่อมีความดันสูงกว่าภายนอก เป็นเหตุให้เกิดการระเหยของน้ำอย่างรวดเร็ว

### 3.19 แหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ

ในธรรมชาติแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟมาจากดวงอาทิตย์ ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานขนาดใหญ่ แต่มนุษย์เองยังไม่สามารถควบคุมกำลังงานไมโครเวฟที่ส่งมาจากดวงอาทิตย์ อันจะนำไปสู่การนำเอาพลังงานไมโครเวฟทางธรรมชาตินี้ไปใช้ได้ ดังนั้นหากจะนำพลังงานไมโครเวฟไปใช้ประโยชน์ มนุษย์จึงต้องสร้างคลื่นไมโครเวฟมาใช้เอง ตัวกำเนิดคลื่นไมโครเวฟถูกสร้างมาจากอุปกรณ์ 2 แบบ คือ

3.19.1 แบบหลอดสุญญากาศ ( Microwave Tube ) แหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟแบบสุญญากาศนี้ให้กำลังงานคลื่นไมโครเวฟออกมาสูงมากกว่าแบบโซลิดสเตต แม้ว่าจะใช้วงจรความถี่สูงๆ กำลังงานที่ได้จะตกลงไปไม่มาก สามารถแบ่งหลอดกำเนิดคลื่นไมโครเวฟออกเป็น 3 แบบ คือ

3.19.1.1 หลอดไคลสตรอน ( Klystron ) เป็นหลอดแบบแรกที่ผลิตขึ้นเพื่อใช้งานในย่านความถี่ไมโครเวฟมีการใช้งานอยู่ 2 แบบ คือ ใช้เป็นตัวกำเนิดคลื่นไมโครเวฟและเป็นตัวขยายคลื่นใช้ในย่านความถี่ 300 MHz ถึง 30 GHz จะใช้หลอดนี้ในภาคขยายสุดท้ายส่งออกอากาศของสถานีภาคพื้นดินของดาวเทียม

3.19.1.2 หลอดแตรเวลลิ่งเวฟ ( Travelling Wave Tube ) เป็นหลอดที่พัฒนาขึ้นมาจากหลอดไคลสตรอน อันเนื่องมาจากว่า ในหลอดไคลสตรอน มีแบนด์วิธ ของคลื่นแคบประมาณ 1 – 8 % เท่านั้นเมื่อพัฒนามาเป็นหลอดแตรเวลลิ่งเวฟ มีแบนด์วิธกว้างขึ้นคือ ตั้งแต่ความถี่ 500 MHz ถึง 16 GHz ในเครื่องรับไมโครเวฟในย่านเอ็กซ์แบนด์ ใช้ขยายสัญญาณในสถานีทวนสัญญาณของระบบโทรคมนาคมแระเภทเอ็กซ์แบนด์ ใช้ขยายกำลังภาคสุดท้ายในระบบสื่อสารดาวเทียมและเรดาร์

3.19.1.3 หลอดแม็กนีตรอน ( Magnetron tubes ) เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟอีกชนิดหนึ่งที่ทำให้กำลังงานออกมาสูงสุด ปัจจุบันหลอดแม็กนีตรอนสามารถให้กำลังงานเอาท์พุทได้สูงสุดถึง 40 เมกะวัตต์ ที่ระดับความต่างศักย์ 50 กิโลโวลต์ ณ ความถี่ 10 GHz เนื่องจากแม็กนีตรอนมีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา เมื่อเทียบกับประสิทธิภาพที่สูง เช่น ใช้ในเตาไมโครเวฟ และใช้เป็นตัวส่งคลื่นเรดาร์ออกไป

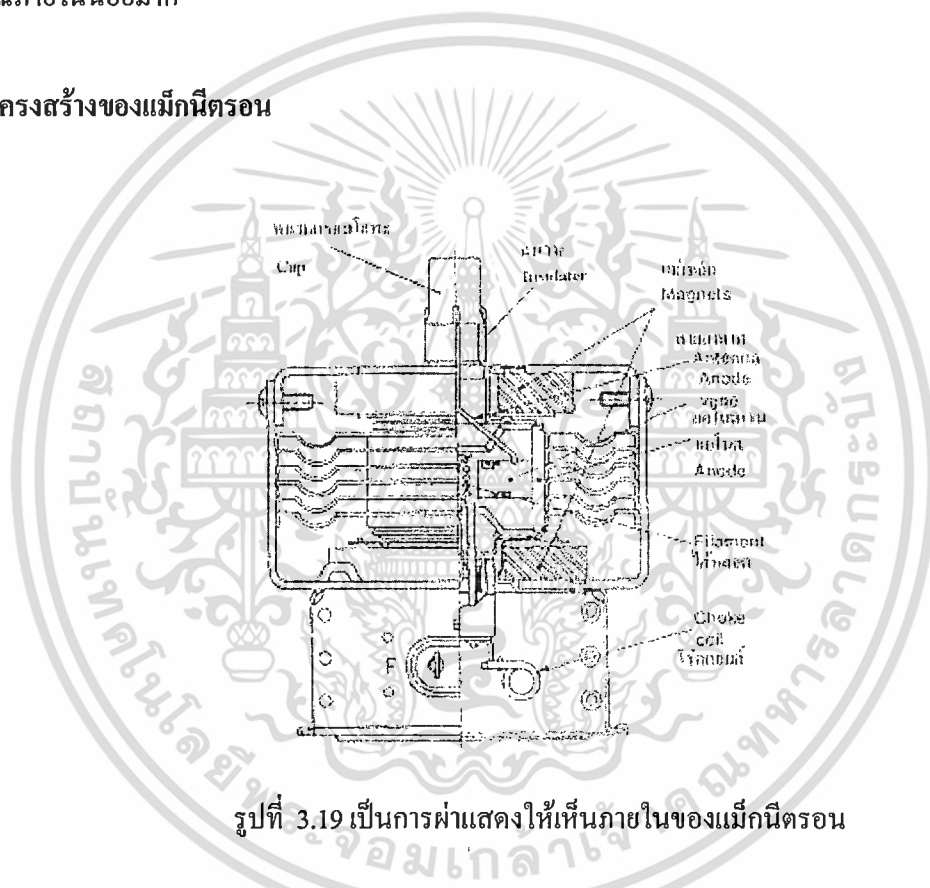
3.19.2 แบบโซลิดสเตต ( Solid State Microwave Sources ) เนื่องจากสารกึ่งตัวนำมีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา เมื่อมีการพัฒนาจนสามารถใช้งานได้ดีที่ความถี่ไมโครเวฟแล้ว สารกึ่งตัวนำเหล่านี้จึงถูกนำไปแทนที่หลอดไมโครเวฟ ในส่วนที่ใช้กับกำลังงานต่ำจนถึงกำลังงานปานกลาง เช่น ใช้กันนัไดโอด ( Gunn Diode ) เป็นตัวกำเนิดความถี่ไมโครเวฟแทนหลอดไคลสตรอน แต่ให้กำลังออกมาต่ำประมาณ 10 MW – 1 W ขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง กันนัไดโอดถูกนำไปประยุกต์ใช้เป็นวงจรถ่ายความถี่ไมโครเวฟ ในการส่งรับคลื่นไมโครเวฟกำลังงานต่ำ เช่น เรดาร์ของตำรวจเนื่องจากกันนัไดโอดมีประสิทธิภาพต่ำ ใช้ในงานที่ต้องการเอาท์พุทสูงไม่ได้ จึงมีการพัฒนาขึ้นมาเป็น อิมแพทไดโอด ( Impart Diode ) ทำให้ได้เอาท์พุทสูงถึง 4 – 5 W ในย่านความถี่เอ็กซ์แบนด์ หลังจากการพัฒนาไดโอดก็มาสู่การพัฒนาทรานซิสเตอร์ที่ใช้งานในย่านไมโครเวฟ ทำให้มีการขยายกำลังงาน ทางด้านเอาท์พุทออกไปได้สูงขึ้นไปใช้ในวงจรอื่นๆ ในย่านความถี่ไมโครเวฟได้มากขึ้นเช่น นำไปใช้ในวงจรมอดูเลเตอร์ ( Modulator ) วงจรดีมอดูเลเตอร์ ( Demodulator ) วงจรมิกเซอร์ ( Mixer ) วงจรดีเทคเตอร์ ( Detector )

[1]

### 3.20 แม็กนีตรอน ( Magnetron )

แม็กนีตรอนเป็นตัวกำเนิดคลื่นไมโครเวฟชนิดหนึ่ง นิยมใช้อยู่ในเตาไมโครเวฟ และ เรดาร์ การที่ผู้ผลิตเตาไมโครเวฟทุกยี่ห้อเลือกใช้ แม็กนีตรอนเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ เนื่องจาก คุณสมบัติที่ดีหลายประการคือ มีขนาดเล็ก แต่ให้ประสิทธิภาพสูง มีเสถียรภาพในการทำงานที่ความถี่ที่ต้องการดี ในปัจจุบันเตาไมโครเวฟทุกยี่ห้อ ตัวแม็กนีตรอนจะสร้างควมถี่  $2450 \pm 50$  MHz เมื่อโหลดมีการดึงกระแสสูงหรือดึงกระแสต่ำมาก ตัวแม็กนีตรอนยังคงสร้างควมถี่ค่อนข้างคงที่ จะเห็นได้ว่าการเกิดคลื่นผิดพลาดน้อยมาก เมื่อเทียบกับส่วนควมถี่หลักที่สร้างขึ้นผิดพลาดเพียง  $\pm 50$  MHz เท่านั้น ซึ่งการผิดพลาดของควมถี่นี้มีผลน้อยมากต่อการปรุงอาหาร ข้อดีแม็กนีตรอนคือ สร้างง่าย ราคาถูก อันเนื่องมาจาก อุปกรณ์ภายในน้อยมาก

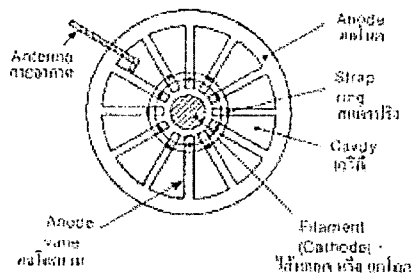
### 3.21 โครงสร้างของแม็กนีตรอน



รูปที่ 3.19 เป็นการผ่าแสดงให้เห็นภายในของแม็กนีตรอน

จากรูปที่ 3.19 เป็นการผ่าแสดงให้เห็นภายในของแม็กนีตรอนเบอร์ 2M157 ซึ่งแม็กนีตรอนอีกหลายหลายเบอร์ในปัจจุบัน ก็มีโครงสร้างเหมือนกันหรือคล้ายกับเบอร์นี้

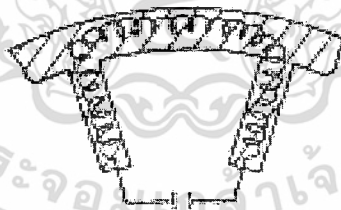
ภายในของแม็กนีตรอน มีโครงสร้างคล้ายหลอดไดโอดประกอบไปด้วยไส้หลอด ซึ่งทำหน้าที่เป็น แคโทดด้วย นอกจากนี้ยังมีแอโนด และส่วนแพร่กระจายคลื่นที่เรียกว่า สายอากาศ



รูปที่ 3.20 แสดงขั้วแอดโนด

รูปที่ 3.20 แสดงขั้วแอดโนด ซึ่งทำเป็นครีบลโลหะต่อกับขั้วแอดโนดด้านนอกพุ่งไปหาแคโทดในตรงกลาง เราเรียกครีบลนี้ว่า แอดโนดเวเน (Anode Vane) ปกติมักจะมีจำนวนครีบลเป็นจำนวนเลขคู่ โดยมีช่องระหว่างครีบลเรียกว่า เควิตตี้ (Cavity) ภายในหลอดแมกนีตรอนนี้เป็นสุญญากาศ ตัวสายอากาศถูกต่ออยู่ที่ครีบลส่วนใดส่วนหนึ่ง และออกสู่ภายนอกโดยผ่านยอดกลม (Dome) ซึ่งทำเป็นแนวกันสายอากาศช้อดกับตัวถังของแมกนีตรอน ในที่นี้ก็คือขั้วแอดโนด ฉนวนตัวนี้มักทำด้วยเซรามิคต่อจากปลายของสายอากาศเหนือแนวขึ้นไป จะทำเป็นหมวกทรงกระบอกมาครอบอีกครึ่งหนึ่ง

ไส้หลอด ( Filament ) จะเห็นว่าขั้วขาไส้หลอดด้านนอกต่อผ่าน ไข้คคอยล์ ( Choke Coil ) และระหว่างขั้วขาไส้หลอด ทั้ง 2 ขา จะมีสายต่อผ่านคอนเดนเซอร์ชนิด ฟีดทรู ( Feed Through ) ค่าประมาณ 470 – 500 PF ทั้งคอนเดนเซอร์และไข้คคอยล์ มีหน้าที่ป้องกันคลื่นไมโครเวฟจากวิทยุ และทีวี ซึ่งอาจมีปะปนมากับไฟฟ้าเอซี ( AC ) เข้ามารบกวนแมกนีตรอนให้ทำงานผิดพลาดได้



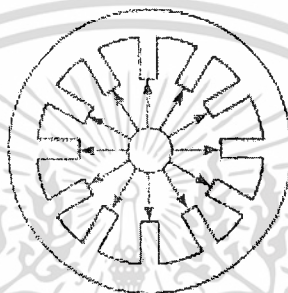
รูปที่ 3.21 เมื่อมีกระแสผ่านเควิตตี้ ( Cavity )

รูปที่ 3.21 เมื่อมีกระแสผ่านเควิตตี้ ( Cavity ) ตัวครีบลจะทำตัวคล้ายเป็นขดลวดและช่องเปิดระหว่างครีบล 2 ครีบล จะทำคล้ายคอนเดนเซอร์ เมื่อจับทั้งขดลวด ( L ) ต่อขนานกับคอนเดนเซอร์ ( C ) ทำให้เกิดวงจรแท็งก์ ( Tank Circuit ) ซึ่งสร้างความถี่ตามที่ต้องการได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

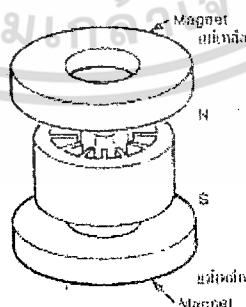
### 3.22 หลักการทำงานของแมกนีตรอน

การทำงานของแมกนีตรอนเริ่มจากไส้หลอด (Filament) ซึ่งอยู่ตรงกลางของแมกนีตรอนได้รับแรงไฟฟ้าประมาณ 3.3 โวลต์เอซี ทำให้ไส้หลอดหรือแคโทด (Cathode) นั้นเองร้อนขึ้น ส่งผลให้อิเล็กตรอนอิสระหลุดออกจากแคโทด เนื่องจากขั้วแคโทดต่อกับขั้วลบของแรงดันประมาณ 4000 V และขั้วบวกของแรงดัน 4000 V ต่อไว้กับแอนโนด (Anode) ของแมกนีตรอน ตัวอิเล็กตรอนเองมีประจุเป็นลบ ดังนั้นเมื่อต่อขั้วลบที่แคโทด จะเกิดการผลักขั้วเหมือนกันออกไป อิเล็กตรอนที่ถูกผลักออกมาจะถูกดูดเข้าหาขั้วบวกที่แอนโนด ดังรูปที่ 3.22, 3.23, 3.24



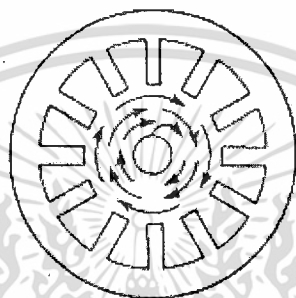
รูปที่ 3.22 แสดงทางเดินของอิเล็กตรอนจากแคโทดไปยังแอนโนด

จากรูปที่ 3.22 หัวลูกศรแสดงอิเล็กตรอนซึ่งปกติจะวิ่งออกจากแคโทดเป็นเส้นตรงไปหาขั้วแอนโนด เมื่อมีแรงดันไฟฟ้าประมาณ 5600 V ก่อให้เกิดความต่างศักย์ไว้ แต่ในตัวหลอดไดโอดของแมกนีตรอนยังมีสนามแม่เหล็กมาเกี่ยวข้อง โดยโรงงานจะใส่แม่เหล็กเป็นรูปวงกลมแบนวางที่ด้านบนและล่างร่วมแกนกับหลอดไดโอดดังรูปที่ 3.23



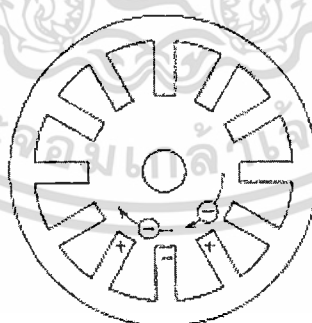
รูปที่ 3.23 แสดงการวางแม่เหล็กร่วมกับแกนไดโอด

โดยขั้วแม่เหล็กระหว่างตัวบนและตัวล่างตรงข้ามกัน เพราะมีสนามแม่เหล็กมาเกี่ยวข้อง อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากแคโทดที่จะวิ่งตรงไปหาแอโนดกลับโดนสนามแม่เหล็กเบี่ยงเบนไปในทิศทางขวาตามกฎของเฟลมมิ่ง คือ กำมือขวาแล้วยกหัวแม่มือขึ้น ถ้าทิศทางของนิ้วชี้ นิ้วกลาง นิ้วนาง นิ้วก้อย ที่ชี้ไปเป็นทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กเมื่ออิเล็กตรอนวิ่งผ่านจะถูกเบี่ยงเบนไปในทิศที่นิ้วหัวแม่มือชี้ไป ดังนั้นอิเล็กตรอนในแม่กนีตรอนจึงวิ่งไปทางขวา ดังรูปที่ 3.24 ในที่สุดอิเล็กตรอนก็จะวิ่งไปถึงแอโนด



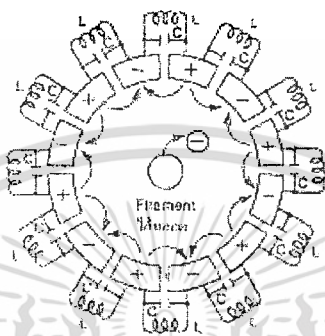
รูปที่ 3.24 แสดงการวิ่งของอิเล็กตรอนที่โดนสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้เบี่ยงเบน

การหมุนวนเป็นวงกลมของอิเล็กตรอนก่อให้เกิดกระแสกลับขึ้นในโพรง Cavity ของแอโนดเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนตัวเข้าใกล้ส่วนใดส่วนหนึ่งระหว่าง 2 Cavity อิเล็กตรอนจะเหนี่ยวนำเอาประจุบวกจากแอโนดเวน (Anode vane) ดังแสดงในรูปที่ 3.25



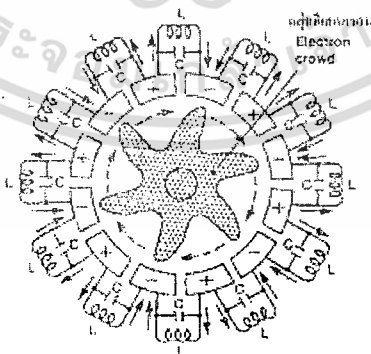
รูปที่ 3.25 แสดงการเหนี่ยวนำเอาประจุบวกของอิเล็กตรอน

เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ห่างออกไปประจุบวกบนแอโนดเวนจะลดลง ในขณะที่เดียวกับที่อิเล็กตรอนกำลังเหนี่ยวนำประจุบวกในแอโนดเวนอันถัดไปทำให้เกิดขั้วบวกและขั้วลบสลับกันไปและเกิดเป็นกระแสสลับขึ้นการเหนี่ยวนำของกระแสสลับในระหว่างแอโนดเควิตี้ สามารถอธิบายด้วยการแสดงในรูปวงจรแท็งก์ ( Tank Circuit ) หรือเรียกว่าวงจรเรโซแนนท์ ( Resonant Circuit ) ที่ความถี่ 2450 MHz ตามรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 การเหนี่ยวนำของกระแสสลับในระหว่าง Anode Cavities

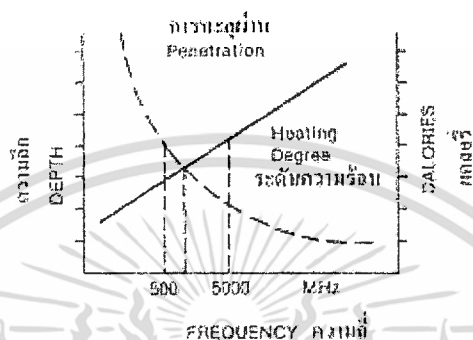
ในการทำงานจริงๆ ของแมกนีตรอน อิเล็กตรอนไม่ได้เคลื่อนที่เพียงตัวเดียวแต่เคลื่อนที่เป็นกลุ่มเป็นรูปลักษณะการหมุนเป็นวงคล้ายวงจักรดังรูปที่ 3.26 ด้วยอิทธิพลจากความต่างศักย์สูงระหว่างแคโทดและแอโนด และสนามแม่เหล็กกำลังสูง เมื่อกลุ่มอิเล็กตรอนเคลื่อนที่หมุนวนรอบๆ แอโนดเวนและในที่สุดก็ถึงตัวเควิตี้ส่งผลให้เกิดการกำเนิดความถี่ตามวงจรเรโซแนนท์ ซึ่งความถี่ที่ได้มีกำลังงานสูงถูกนำส่งออกไปจากเควิตี้ภายในแมกนีตรอน โดยสายอากาศส่งออกสู่ภายนอก แล้วส่งต่อให้เวฟไกด์ ( Wave Guide ) หรือนำคลื่นไปสู่ห้องปรุงอาหารหรือภายในตู้



รูปที่ 3.27 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเป็นกลุ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นไมโครเวฟเป็นคลื่นที่มีความถี่ตั้งแต่ 300 – 10000 MHz ซึ่งเป็นย่านที่กว้างมาก จากการวิจัยคลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่ตั้งแต่ 500 – 5000 MHz มีประสิทธิภาพเหมาะสมในการนำมาใช้กำเนิดความร้อน แต่ในเครื่องไมโครเวฟใช้ความถี่ 2450 MHz เนื่องจากการวิจัยความถี่นี้สามารถทำให้อาหารส่วนใหญ่สุกได้รวดเร็วและสุกเข้าไปถึงภายในระดับความลึกพอดี ( Penetration Depth ) ดังนั้นในเครื่องไมโครเวฟทั่วไปจึงสร้างให้มีความถี่ 2450 MHz ดังรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Depth, Heating, Degree, Frequency

จากรูปที่ 3.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของการทะลุผ่านระดับของอุณหภูมิ ความร้อนและความถี่จะพบว่าความถี่ต่ำกว่าจะมีการทะลุผ่านของคลื่นได้ลึกกว่าแต่เวลาปรุงอาหารจะเพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากความถี่ต่ำกว่าที่ความสูงกว่าเวลาที่ใช้ในการปรุงอาหารจะเร็วกว่าเนื่องจากได้รับความร้อนมากกว่าแต่การทะลุผ่านจะสั้น [5]

### 3.23 ข้อควรระวังในการใช้เตาไมโครเวฟ

- อย่างนำสิ่งของที่ติดไฟได้ง่ายวางไว้ใกล้ๆหรือข้างในเตาไมโครเวฟโดยเด็ดขาดเพราะอาจจะทำให้เกิดการระเบิดได้ง่าย
- ควรใช้ประโยชน์จากเตาไมโครเวฟภายในขอบเขตที่ระบุไว้ในคู่มือเท่านั้นห้ามนำวัตถุเคมีที่สามารถเผาผลาญได้มาใช้กับไมโครเวฟ, ห้ามนำเตาไมโครเวฟไปใช้ในงานอุตสาหกรรมและห้องแล็บโดยเด็ดขาด
- อย่างนำกระดาษ, ดอกไม้แห้ง, ผ้า, หรือวัสดุติดไฟอบในเตาไมโครเวฟโดยเด็ดขาดไม่ควรให้เครื่องทำงานตามลำพัง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีกระดาษพลาสติกหรือวัสดุติดไฟง่ายเป็นส่วนประกอบในการทำอาหาร
- ผู้ปกครองไม่ควรปล่อยให้เด็กใช้เตาไมโครเวฟโดยลำพังทั้งนี้คุณควรคอยให้คำแนะนำและดูแลอย่างใกล้ชิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ไม่ควรนำวัตถุที่เป็นโลหะทุกชนิดเข้าไปในเตาไมโครเวฟ
- ถ้าวัตถุที่อยู่ภายในเตาไมโครเวฟติดไฟครั้งแรกควรรีบปิดสวิทช์เครื่องและห้ามเปิด ฝาเครื่อง จากนั้นให้ดับสะพานไฟเพื่อไม่ให้กระแสไฟฟ้าวิ่งไปตามไมโครเวฟ
- ข้อควรระวังในการปรุงของเหลวคือของเหลวนั้นๆจะไม่เดือดให้เห็นถึงแม้ว่าของเหลวนั้นจะเดือดเกินจุดเดือดแล้วก็ตามซึ่งควรปฏิบัติตามข้อแนะนำ ดังต่อไปนี้
  - หลีกเลี่ยงการใช้ภาชนะปากแคบ
  - คนของเหลวก่อนนำเข้าเตาไมโครเวฟและไม่ควรทิ้งช้อนไว้ในเตาไมโครเวฟ
  - หลังจากการปรุงอาหารทิ้งไว้พักหนึ่งแล้วควรคนอีกครั้งหนึ่งก่อนนำภาชนะออกจากเตาไมโครเวฟ
  - ไม่ควรนำเอาไข่ดิบทั้งฟองปรุงในเตาไมโครเวฟ
  - ย่อยนำอาหารที่ถูกบรรจุในภาชนะออกจากเตาไมโครเวฟซึ่งอาจจะเกิดการระเบิดได้
  - ไม่ควรปรุงอาหารที่มีความหนาแน่นของน้ำน้อย อาทิเช่น น้ำมัน ช็อกโกแลต และขนมพายต่างๆ
  - ไม่ควรตั้งเวลาปรุงอาหารเกินเวลาที่ระบุไว้ในคู่มือ
  - ควรอ่านคู่มือเตาไมโครเวฟก่อนใช้งาน
  - หลังจากการอุ่นอาหารสำหรับเด็กแล้วคุณควรคนทิ้งไว้ให้หายร้อนก่อนจึงให้เด็กรับประทาน
  - ย่อยนำฝาจากนมเด็กเข้าไปในเตาไมโครเวฟเพราะอาจละลายได้
  - ควรใส่ถุงมือทุกครั้งเมื่อนำเอาภาชนะออกจากเตาไมโครเวฟ

### 3.24 วิธีป้องกันโดยใช้ระบบ Child lock

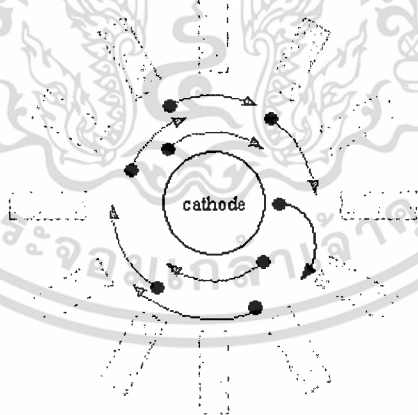
- ระบบ Child lock จะทำงานเมื่อเตาไมโครเวฟอยู่ในระบบ Standby เกิน 1 นาที ซึ่งเมื่อระบบ Child lock ทำงานแต่เตาไมโครเวฟไม่สามารถทำงานได้โดยวิธีการยกเลิกนี้ คุณจะต้องเปิดฝา แล้วปิดฝาอีกครั้งหนึ่งเพื่อยกเลิกคำสั่ง
- ในกรณีที่คุณพยายามจะเปิดเครื่องในขณะที่ Child lock ยังงานอยู่ เตือนโดยส่งเสียงฮือฮ่า และมีคำว่า door ปราบกฏที่หน้าจอขึ้นประมาณ 2 นาที

### 3.25 คลื่นไมโครเวฟ (microwave)

เป็นพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เคลื่อนที่ด้วยความเร็วแสง (ประมาณสามแสนกิโลเมตรต่อวินาที) ลักษณะการเดินทางของคลื่นอธิบายได้ง่ายๆ จากการโยนก้อนหินลงในสระน้ำ จะเห็น ผิวหน้านั้นมีการเคลื่อนที่ออกจากจุดที่โยนก้อนหิน โดยมีการกระเพื่อมขึ้นและลงในรูประลอกคลื่นที่แผ่ขยายออกไป ในลักษณะเป็นรูปวงกลมออกจากจุดศูนย์กลาง คลื่นที่กระเพื่อมขึ้นและลงในแนวตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ เราเรียกว่า คลื่นตามขวาง โดยมีโมเลกุลของน้ำเป็นตัวกลางของคลื่น แต่ในการเคลื่อนที่ของคลื่นไมโครเวฟไปในอากาศนั้น ตัวกลางของคลื่น ก็คือ โมเลกุลของอากาศ นอกจากนี้ยังสามารถเคลื่อนที่ไปในสุญญากาศได้เนื่องจากมันมีพลังงานอยู่ในตัวเอง

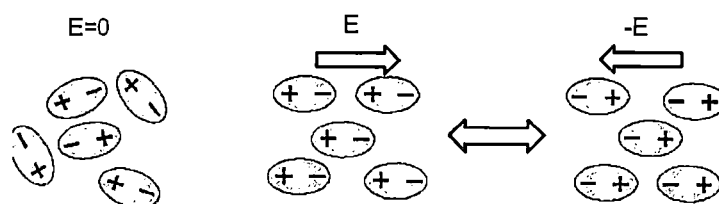
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นไมโครเวฟหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ดังแสดงในรูปที่ 3.29 ด้วยความเร่ง ทำให้เกิดสนามพลังงานขึ้นในบริเวณรอบๆ สนามพลังงานดังกล่าวนี้ประกอบด้วย สนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก ตั้งฉากซึ่งกันและกัน คลื่นไมโครเวฟนำมาใช้กับอุปกรณ์หลายชนิด เช่น เตาอบ ไมโครเวฟเรดาร์ การสื่อสารของ วิทยุ โทรทัศน์ เป็นต้น สสารโดยทั่วไป เช่น น้ำ เป็นต้น จะประกอบด้วยโมเลกุลซึ่งเป็นการเกาะตัวกันของอะตอมของธาตุต่างๆ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วโมเลกุลของสสารต่างๆ จะเป็นโมเลกุลแบบมีขั้วบวกขั้วลบ ดังนั้นเมื่อมีสนามไฟฟ้าตกกระทบบนวัสดุจึงทำให้โมเลกุลเหล่านี้ที่มีขั้วเรียกว่าไดโพล เกิดการจัดเรียงตัวเพื่อให้ขั้วบวกของไดโพลอยู่ใกล้ขั้วลบของสนามไฟฟ้า และขั้วลบของไดโพลอยู่ใกล้ขั้วบวกของสนามไฟฟ้า แต่เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟที่ตกกระทบนั้นมีความถี่ 2450 M ดังนั้นไดโพลจะกลับตัวไปมาในช่วงคลื่นไมโครเวฟ เมื่อสนามไฟฟ้าสลับขั้วไปมาดังแสดงในรูปที่ 3.19 ขง ทำให้ไดโพลชนกันและเสียดสีกันจนเกิดแรงเสียดทานและเกิดความร้อนขึ้นเนื่องจากโมเลกุลภายในของสสารนั้นเกิดการเคลื่อนที่ และคลื่นไมโครเวฟ มีลักษณะเด่น 3 ประการคือ การสะท้อนกลับ (reflection) คลื่นไมโครเวฟเมื่อไปกระทบกับภาชนะที่เป็นโลหะหรือมีส่วนผสมของโลหะคลื่นไมโครเวฟไม่สามารถทะลุผ่านภาชนะดังกล่าวได้จะสะท้อนกลับหมด ดังนั้นสารที่ใส่ในภาชนะที่เป็นโลหะก็จะไม่เกิดความร้อน, การส่งผ่าน (transmission) คลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุผ่านภาชนะที่ทำด้วยแก้ว กระจก ไม้ เซรามิก และพลาสติกได้เพราะภาชนะดังกล่าวไม่มีส่วนผสมของโลหะจึงเป็นภาชนะที่ใช้ได้ดีในเตาไมโครเวฟ และการดูดซึม (absorption) ปกติอาหาร โดยทั่วไปจะประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำในอาหารซึ่งจะดูดซึมคลื่นไมโครเวฟทำให้อาหารร้อนอย่างรวดเร็วและอีกนัยหนึ่งเมื่อโมเลกุลของน้ำดูดซึมคลื่นไมโครเวฟแล้วจะสลายตัวในทันทีไม่สะสมในอาหาร



รูปที่ 3.29 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.30 การกลับขั้วของไดโพลซึ่งทำให้เกิดความร้อน

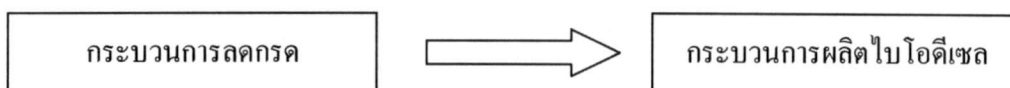


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบ แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้



#### 4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

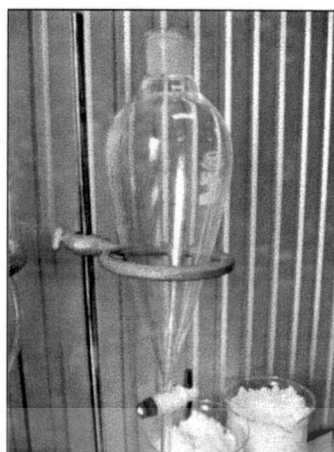
- 4.1.1 เตาไมโครเวฟขนาด 800 วัตต์ (microwave oven)
- 4.1.2 ชุดกรวยแยกพร้อมขาตั้ง 1 ชุด (separating funnel)
- 4.1.3 บีกเกอร์
- 4.1.4 Laboratory Bottle 500 ml
- 4.1.5 บิวเรต ขนาด 100 ml พร้อมขาตั้ง
- 4.1.6 ปิเปต ขนาด 5 ml
- 4.1.7 Erlenmeyer Flask ขนาด 100 ml
- 4.1.8 กระจกตวง ขนาด 250 ml
- 4.1.9 Hotplate stirrer
- 4.1.10 Magnetic stirrer
- 4.1.11 เครื่องชั่งไฟฟ้า 2 ตำแหน่ง (Electrical balance)
- 4.1.12 เทอร์โมมิเตอร์ (ช่วงอุณหภูมิ 0°C ถึง 100°C)

รูปเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองแสดงในรูปที่ 4.1-4.12

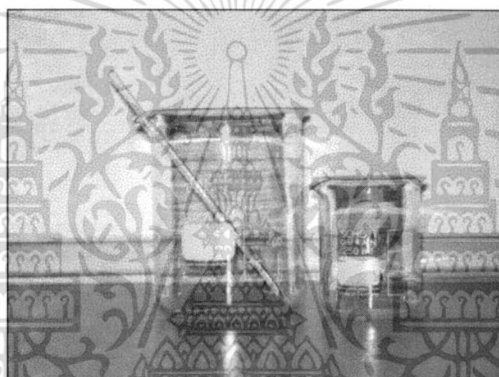


รูปที่ 4.1 เตาไมโครเวฟขนาด 800 วัตต์

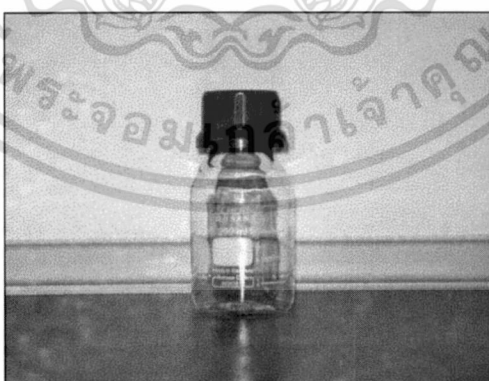
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ชุดกรวยแยกพร้อมขาตั้ง

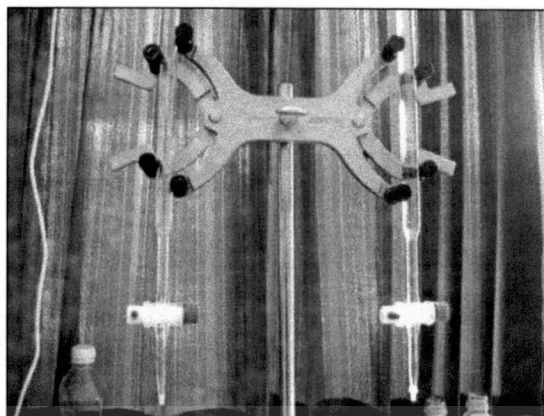


รูปที่ 4.3 ปีกเกอร์

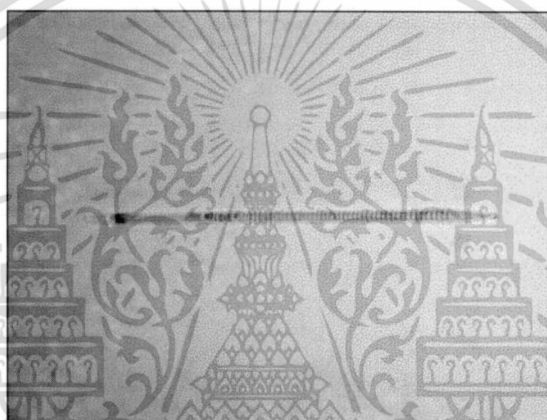


รูปที่ 4.4 Laboratory Bottle

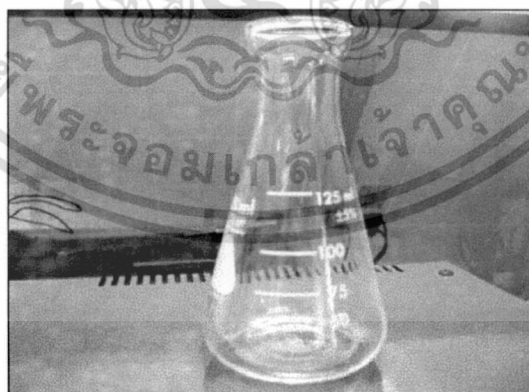
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 บีเวอร์พร้อมขาตั้ง

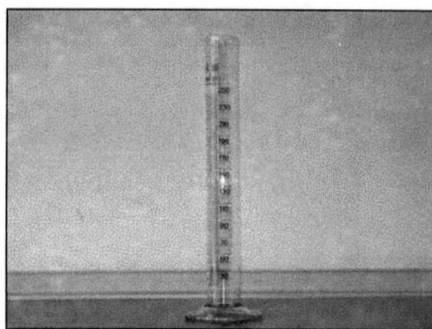


รูปที่ 4.6 บีเปต ขนาด 5 ml

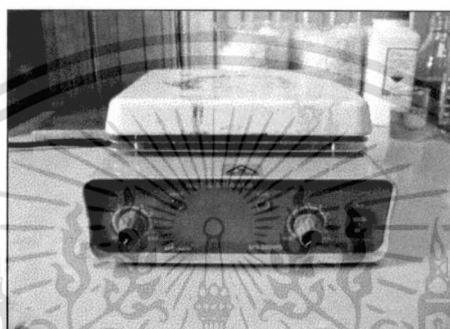


รูปที่ 4.7 Erlenmeyer flask

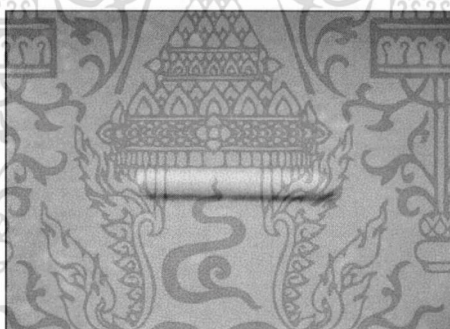
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 กระจกบอกดวง



รูปที่ 4.9 Hotplate stirrer

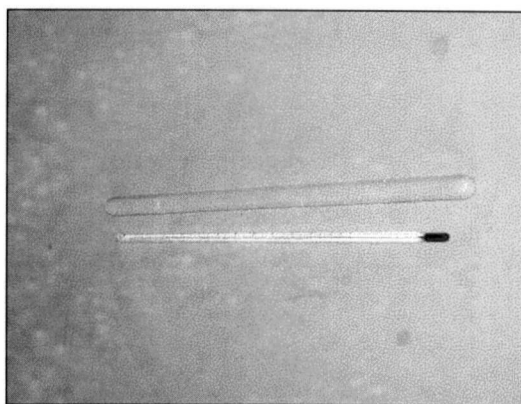


รูปที่ 4.10 Magnetic stirrers



รูปที่ 4.11 เครื่องชั่งไฟฟ้า 2 ตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 เทอร์โมมิเตอร์

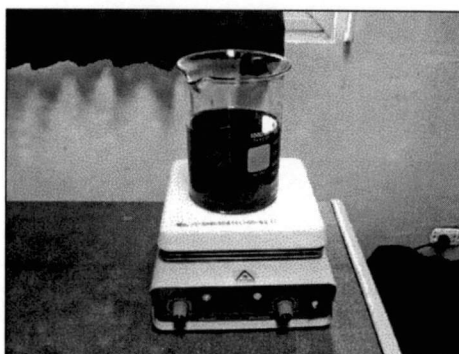
## 4.2 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 4.2.1 น้ำมันปาล์มดิบหีบแยก (มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 4-8 % โดยน้ำหนัก)
- 4.2.2 เมทานอล (commercial grade 99%)
- 4.2.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (commercial grade 98%)
- 4.2.4 กรดซัลฟิวริก (commercial grade 98%)
- 4.2.5 ฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์
- 4.2.6 ไอโซโพรพานอล
- 4.2.7 โซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1 M

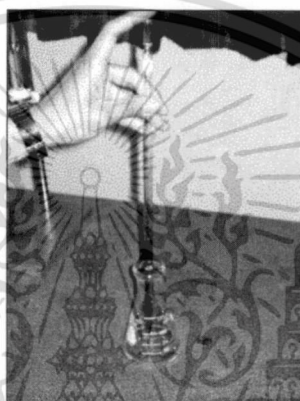
## 4.3 วิธีการทดลอง

### 4.3.1 การไตเตรท

ทำการอุ่นน้ำมันให้ได้ประมาณ 60 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.13 หลังจากนั้นตวงน้ำมันปาล์มดิบใส่ลงในขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ปริมาณ 4 มิลลิลิตร เติมไอโซโพรพานอล พอประมาณ เพื่อลดความหนืดของน้ำมันปาล์มดิบ เติมสารละลายฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์ ประมาณ 3-5 หยด เตรียมโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 M ลงในบิวเรต ทำการไตเตรทเพื่อหาค่ากรดไขมันอิสระ สังเกตการเปลี่ยนสีของสารในขวดโดยน้ำมันปาล์มดิบจะเปลี่ยนเป็นสีส้มแดงแสดงว่าถึงจุดยุติ อ่านค่าที่ได้ พร้อมบันทึกผลการทดลอง



รูปที่ 4.13 การอุ่นน้ำมันปาล์มดิบ

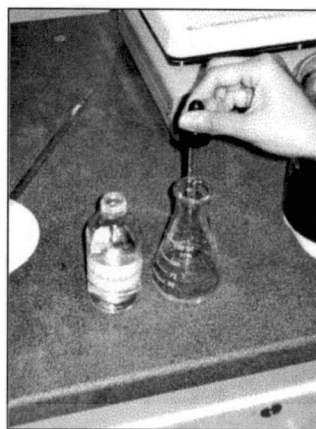


รูปที่ 4.14 น้ำมันปาล์มดิบใส่ลงในขวดรูปชมพู่

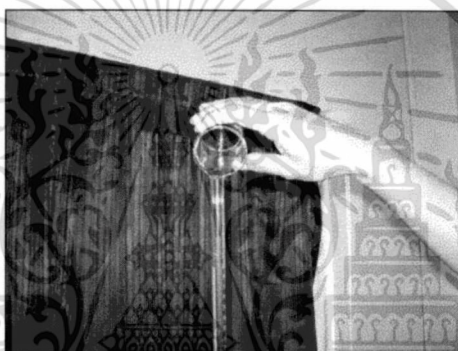


รูปที่ 4.15 การเติม Isopropanol

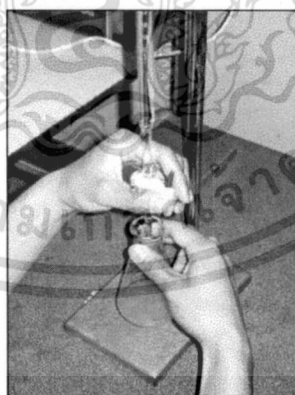
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 เติมสารละลายฟีนอล์ฟทาลินอินดิเคเตอร์



รูปที่ 4.17 การเติม NaOH 0.1 M ลงในบิวเรต

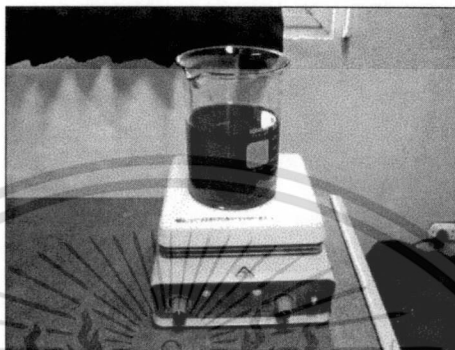


รูปที่ 4.18 การไตเตรท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 การหาสถานะในการลดค่าความเป็นกรดของน้ำมันปาล์มดิบ

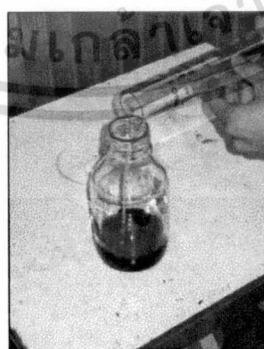
การทดลองเริ่มจากนำน้ำมันปาล์มดิบมาให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิประมาณ  $60^{\circ}\text{C}$  หลังจากนั้นนำน้ำมันปาล์มดิบปริมาณ 100 มิลลิลิตร ใส่ในขวด Scott Duran ขนาด 500 มิลลิลิตร และนำเมทานอลตามปริมาณที่กำหนดใส่ในขวด แล้วจึงเขย่าให้เข้ากัน เติมกรดซัลฟิวริกตามปริมาณที่กำหนดแล้วจึงเขย่าให้เข้ากันอีกครั้ง ปิดฝาขวดให้สนิทแล้วนำขวดเข้าเครื่องไมโครเวฟ เปิดสวิตซ์ให้เครื่องไมโครเวฟทำงานตามเวลาที่กำหนด



รูปที่ 4.19 การอุ่นน้ำมันปาล์มดิบ



รูปที่ 4.20 นำน้ำมันดิบใส่ขวด

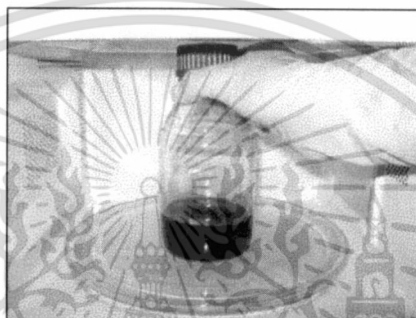


รูปที่ 4.21 การเทเมทานอลผสมกับน้ำมันปาล์มดิบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 การเติมกรดซัลฟิวริก



รูปที่ 4.23 นำเข้าเครื่องไมโครเวฟ



รูปที่ 4.24 การแยกชั้นของกรดกับน้ำมันปาล์ม

#### 4.5 การวางแผนการทดลอง

เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการลดปริมาณค่าความเป็นกรดจากน้ำมันปาล์มดิบให้มีค่าน้อยกว่า 6 mg KOH/g ด้วยกระบวนการเอสเตอร์ริฟิเคชันแบบต่อเนื่อง โดยการใช้วิธี response surface methodology, RSM และออกแบบการทดลองแบบ central composite design, CCD เพื่อนำไปวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด และรูปแบบสมการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ คือ เมทานอล, กรดซัลฟิวริก, ความเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอบของใบกวน และเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่มีอิทธิพลต่อค่าผลตอบสนอง คือ กรดไขมันอิสระ ซึ่งอยู่ในรูปความสัมพันธ์ ดังแสดงในสมการที่ 4.1

$$AV = f(M, S, T) \quad (4.1)$$

โดยที่  $AV$  คือ ค่าความเป็นกรด,  $M$  คือเมทานอล,  $S$  คือกรดซัลฟิวริก และ  $T$  คือเวลาในการทำปฏิกิริยาภายในเครื่องไมโครเวฟ

การออกแบบแผนการทดลองแบบ central composite design (CCD) เป็นเทคนิคหนึ่งในวิธีการวิเคราะห์ห้าพื้นผิวตอบสนอง โดยทั่วไปการวางแผนการทดลองแบบ CCD ประกอบด้วย  $2^k$  factorial ในแนวแกนหรือในแนวรูปดาว ในกรณีที่มีการทดลองมีตัวแปรอิสระ 2 ตัวแปร  $2^k$  factorial จะประกอบด้วย  $(-1, -1)$ ,  $(+1, -1)$ ,  $(-1, +1)$ ,  $(+1, +1)$  แต่  $2^k$  factorial ในแนวแกนหรือในแนวรูปดาวจะประกอบด้วย  $(-\alpha, 0)$ ,  $(+\alpha, 0)$ ,  $(0, -\alpha)$ ,  $(0, +\alpha)$  และที่จุดศูนย์กลางจะมีการกระทำซ้ำ 4-6 การทดลอง ของแต่ละตัวแปรอิสระ ในงานวิจัยนี้มีตัวแปรอิสระ 4 ตัวแปร ดังนั้นจะประกอบด้วย 5 ระดับของแต่ละปัจจัย คือ  $(-2, -1, 0, +1, +2)$  การออกแบบแผนการทดลองแบบ central composite design, CCD 4 ตัวแปรอิสระมี 5 ระดับของ code ตัวแปร โดยการใช้โปรแกรม essential experimental design and essential regression version 2.209 จะต้องทำการทดลองทั้งหมด 18 การทดลอง เพื่อนำไปใช้วิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมของการลดค่าความเป็นกรดจากน้ำมันปาล์มดิบ และหารูปแบบสมการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระที่สนใจ คือ เมทานอล, กรดซัลฟิวริก และเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่ส่งผลต่อค่าความเป็นกรด ซึ่งได้สรุปช่วงและระดับของตัวแปรอิสระที่จะทำการศึกษหาสภาวะที่เหมาะสมในการลดค่าความเป็นกรด ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แผนการทดลองที่สภาวะต่างๆ

การทดลองที่	กรดซัลฟิวริก, S (% โดยน้ำหนัก)	เมทานอล, M (% โดยน้ำหนัก)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (วินาที)
1	4.0	35.0	60
2	5.5	30.0	90
3	4.0	22.5	60
4	2.5	15.0	90
5	4.0	10.0	60
6	5.5	15.0	30
7	5.5	30.0	30
8	4.0	22.5	60
9	2.5	30.0	90
10	6.5	22.5	60
11	4.0	22.5	10
12	4.0	22.5	110
13	2.5	15.0	30
14	2.5	30.0	30
15	4.0	22.5	60
16	5.5	15.0	90
17	1.5	22.5	60
18	4.0	22.5	60

#### 4.6 การหารูปแบบสมการทำนายความสัมพันธ์

วิธี response surface methodology, RSM เป็นวิธีหนึ่งในการหารูปแบบสมการของความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองกับตัวแปรอิสระ โดยใช้วิธี multiple regression ในการวิเคราะห์หารูปแบบ second-order model ดังแสดงในสมการที่ 4.2

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j=1}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (4.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $y$  คือค่าผลตอบสนอง,  $k$  คือจำนวนตัวแปรอิสระ,  $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$  คือค่าคงที่, สัมประสิทธิ์ของพจน์ตัวแปรกำลังหนึ่ง, ตัวแปรกำลังสอง และตัวแปรร่วม ตามลำดับ

ผลการทดลองที่ได้ สามารถนำไปหารูปแบบสมการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองกับตัวแปรอิสระที่ศึกษา ซึ่งสมการทำนายความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระทั้ง 3 ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี multiple regression ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หลังจากได้สมการทำนายความสัมพันธ์แล้ว จึงพิจารณาสมการ โดยตัดพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญออก ซึ่งสังเกตได้จากค่า  $P$ -value ถ้า  $P$ -value มีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าพจน์ดังกล่าวไม่มีนัยสำคัญต่อสมการ ให้เหลือเพียงพจน์ที่มีค่า  $P$ -value น้อยกว่า 0.05 ซึ่งแสดงว่าพจน์ดังกล่าวมีนัยสำคัญต่อสมการทำนายความสัมพันธ์ และรูปแบบสมการที่ได้จะนำไปสร้างกราฟพื้นผิวผลตอบสนอง (response surface) และกราฟ contour ของผลตอบสนองกับเงื่อนไขการทดลองในช่วงการแปรค่าตัวแปรอิสระ

#### 4.7 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการลดปริมาณกรดไขมันอิสระ

สภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการลดกรดไขมันอิสระจากน้ำมันปาล์มดิบชนิดหีบรวมให้มีค่าน้อยกว่า 6 mg KOH/g สำหรับกระบวนการเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบต่อเนื่อง ขึ้นอยู่กับรูปแบบของสมการทำนายความสัมพันธ์ที่ได้ สภาวะที่เหมาะสมที่สุดได้จากการแก้สมการทำนายความสัมพันธ์ ภายใต้เงื่อนไขขอบเขตของตัวแปรอิสระ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และใช้โปรแกรม excel solver ทำการแก้สมการทำนายความสัมพันธ์ เพื่อหาปริมาณกรดไขมันอิสระที่ต่ำที่สุด ภายใต้เงื่อนไขขอบเขตที่กำหนด

ตารางที่ 4.2 เงื่อนไขขอบเขตของตัวแปรอิสระ

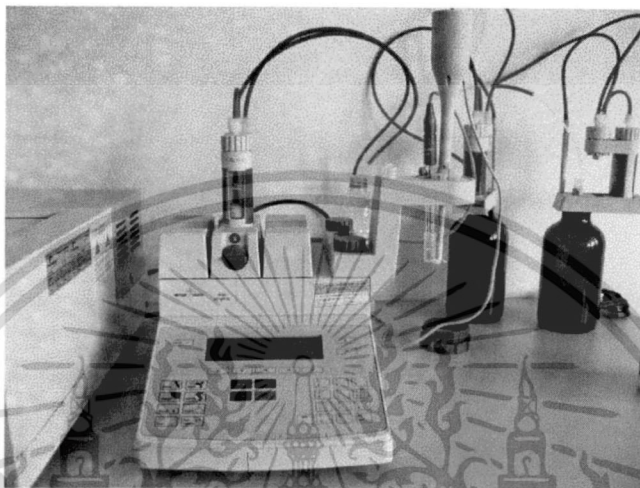
ตัวแปรอิสระ	ช่วงการแปรค่า	หน่วย
เมทานอล	$10 \leq M \leq 35$	%โดยน้ำหนัก
กรดซัลฟิวริก	$1.5 \leq S \leq 6.5$	%โดยน้ำหนัก
เวลาในการทำปฏิกิริยา	$10 \leq T \leq 110$	วินาที

#### 4.8 การวิเคราะห์ปริมาณค่าความเป็นกรด

การวิเคราะห์ปริมาณค่าความเป็นกรด (acid value, AV) สามารถบอกได้ว่ามีลิกนินของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่สามารถทำให้ตัวอย่างจำนวน 1 กรัม เป็นกลาง (mg KOH/g) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ค่าความเป็นกรดด้วยเครื่อง Metter Toledo excellence titrators T50 ตามมาตรฐาน ASTM D 664 โดยเตรียมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.1 โมล/ลิตร เพื่อใช้ในการไตเตรทหาค่าความเป็นกรดของตัวอย่าง การเตรียมสารละลายดังกล่าวทำได้โดยนำโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 6 กรัม มาละลายในไอโซโพรพานอล 1 ลิตร นำสารละลายดังกล่าวมาวัดความเข้มข้นที่มีอยู่จริงในสารละลาย ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

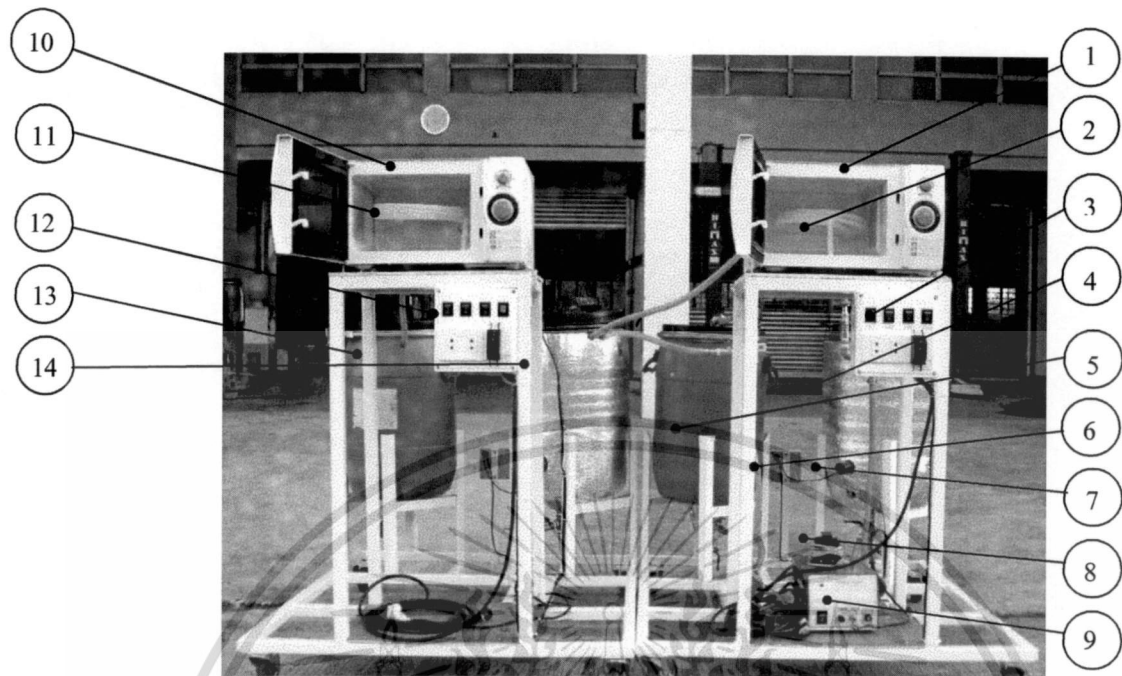
การนำสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.1 โมล/ลิตร ประมาณ 3 มิลลิลิตร มาผสมกับ titration solvent ประมาณ 50 มิลลิลิตร ซึ่งเตรียมจากโทลูอีน 500 มิลลิลิตร, ไอโซโพรพานอล, 495 มิลลิลิตร และ น้ำ 5 มิลลิลิตร หลังจากนั้นนำไปวัดความเข้มข้นที่มีอยู่จริงในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ด้วยวิธี automatic titration เครื่องจะบันทึกค่าที่ได้เพื่อนำไปคำนวณต่อไป หลังจากนั้นนำตัวอย่างมาผสมกับ titration solvent ประมาณ 50 มิลลิลิตร แล้วนำไปวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดด้วยวิธี automatic titration



รูปที่ 4.25 เครื่อง auto titrator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.9 ชุดทดสอบกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยคลื่นไมโครเวฟ



รูปที่ 4.26 ชุดทดสอบกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยคลื่นไมโครเวฟ(ด้านหน้า)



รูปที่ 4.27 ชุดทดสอบกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยคลื่นไมโครเวฟ(ด้านข้าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

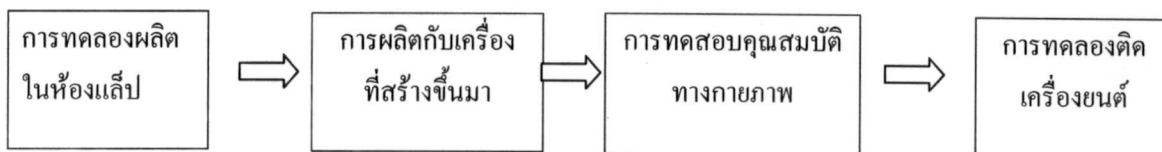
ตารางที่ 4.3 ชุดทดสอบกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยคลื่นไมโครเวฟ

หมายเลข	รายการ
1	ไมโครเวฟ ขนาด 800 วัตต์ (กระบวนการลดกรด)
2	เครื่องปฏิกรณ์ (ท่อเทปเลื่อน) (กระบวนการลดกรด)
3	แผงควบคุม (กระบวนการลดกรด)
4	ถังกวน (กระบวนการลดกรด)
5	ถังเมทานอลไซค์ (กระบวนการผลิตไบโอดีเซล)
6	เทอร์โมสแตท (กระบวนการลดกรด)
7	ฮีตเตอร์ (กระบวนการลดกรด)
8	หม้อแปลง 110 โวลต์ (สำหรับปั๊ม)
9	หม้อแปลง 12 โวลต์ (สำหรับมอเตอร์กวนน้ำมัน)
10	ไมโครเวฟ ขนาด 800 วัตต์ (กระบวนการผลิตไบโอดีเซล)
11	เครื่องปฏิกรณ์ (ท่อเทปเลื่อน) (กระบวนการผลิตไบโอดีเซล)
12	แผงควบคุม (กระบวนการผลิตไบโอดีเซล)
13	ถังผลิตก๊าซ (ไบโอดีเซล)
14	ถังกวน (กระบวนการผลิตไบโอดีเซล)
15	วาล์วปรับอัตราการไหล
16	ปั๊ม (กระบวนการผลิตไบโอดีเซล)
17	ปั๊ม (สำหรับถังเมทานอล)
18	ปั๊ม (กระบวนการลดกรด)
19	มอเตอร์กวน

#### 4.10 ขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซลด้วยคลื่นไมโครเวฟแบบต่อเนื่อง

การทดลองเริ่มจากนำน้ำมันปาล์มดิบที่ได้ทำการลดกรดแล้วปริมาณ 10000 มิลลิลิตร เทใส่ลงในถังทำการเปิดฮีตเตอร์เพื่อให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิประมาณ 60°C ซังโซเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาณ 50 กรัม (กรดไขมันอิสระเริ่มต้น = 1%, ตัวเร่งปฏิกิริยา = 4%) และเมทานอล 2000 มิลลิลิตร (20 % โดยปริมาตร) ลงในถังผสม เปิดปั๊มเพื่อละลายเมทานอลและโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้เข้ากัน จากนั้นปั๊มเข้าไปผสมกับน้ำมันปาล์มดิบในถังที่เตรียมไว้และกวนให้เข้ากัน ทำการเปิดปั๊มและไมโครเวฟน้ำมันจะถูกดูดเข้าไปในไมโครเวฟเพื่อทำปฏิกิริยาและไหลออกมายังถังพัก

ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบ่งเป็น 4 ขั้นตอนใหญ่



รูปที่ 4.28 ขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซล

### หลักการผลิตไบโอดีเซล

ในการผลิตไบโอดีเซลแต่ละครั้งจะต้องทำการทดลองผลิตในห้องแล็บก่อน จึงจะไปผลิตในเครื่องผลิตไบโอดีเซลที่ทำการสร้างขึ้นมาก่อนนำไปทดลองกับเครื่องยนต์ต้องนำไปทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพเพื่อที่จะหาค่าความบริสุทธิ์ (pH) กับค่าความหนืด

### การทดลองผลิตในห้องแล็บ

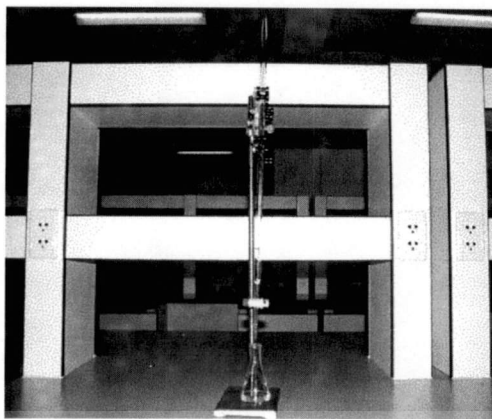
4.2.1 การไตเตรต เป็นการหาค่าความเป็นกรด ในน้ำมันพืชใช้แล้ว ว่ามีเปอร์เซ็นต์ความเป็นกรดอยู่ในน้ำมันเท่าไร



รูปที่ 4.29 การไตเตรต

- บิวเรตปริมาตรความจุ 50 ml เป็นที่ใส่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่ออ่านค่าปริมาตรในการใช้สารละลายโซเดียมในการไตเตรตโดยมีความเข้มข้น 0.025 molar ก็คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ 1g ต่อปริมาตรน้ำกลั่น 1000 ml

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



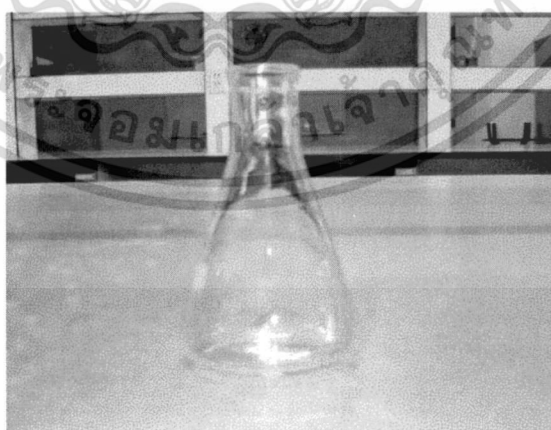
รูปที่ 4.30 บิวเรต

- ขาบีคบิวเรต เป็นอุปกรณ์จับบีคบิวเรตสามารถปรับระดับความสูงได้ตามต้องการ



รูปที่ 4.31 ขาบีคบิวเรต

- ขวดรูปชมพู่ เป็นขวดไว้ใส่น้ำมันเพื่อทำการไตเตรท



รูปที่ 4.32 ขวดรูปชมพู่

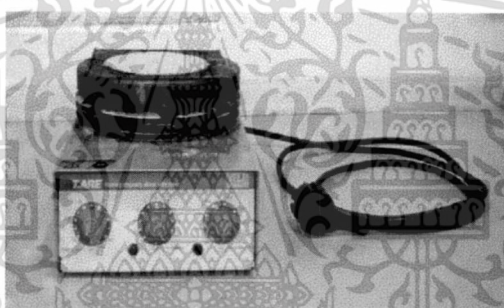
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เครื่องชั่งความละเอียด 2 ตำแหน่ง เป็นเครื่องชั่งสารเพื่อใช้ในการชั่งสารโซเดียมไฮดรอกไซด์



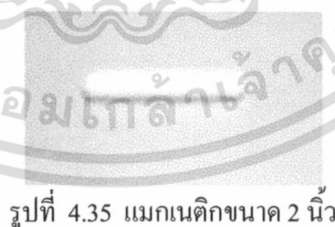
รูปที่ 4.33 เครื่องชั่งความละเอียด 2 ตำแหน่ง

- แมกเนติกสโตเตอร์แบบมีฮีตเตอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ให้ความร้อนของน้ำมันพร้อมทั้งปรับความเร็วรอบของการกวนและตั้งเวลาในการกวนด้วย



รูปที่ 4.34 แมกเนติกสโตเตอร์แบบมีฮีตเตอร์

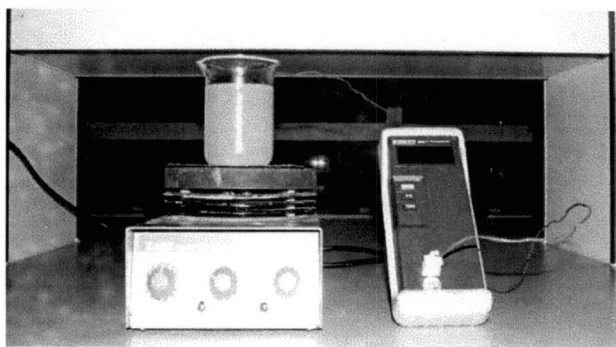
- แมกเนติกขนาด 2 นิ้ว ทำหน้าที่เป็นตัวกวน



รูปที่ 4.35 แมกเนติกขนาด 2 นิ้ว

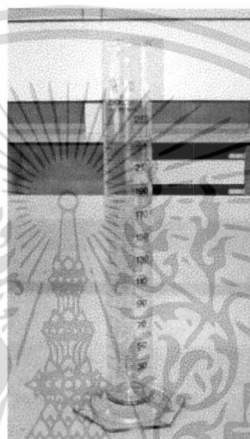
- เทอร์โมมิเตอร์ ใช้วัดอุณหภูมิของน้ำมันพีชใช้แล้ว เพื่อรักษาอุณหภูมิให้อยู่ที่ประมาณ  $50-60^{\circ}\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.36 เทอร์โมมิเตอร์แบบดิจิทัล

- กรวยตวงสาร ทำหน้าที่ตวงสารเมทานอล (แอลกอฮอล์)



รูปที่ 4.37 กรวยตวงสาร

น้ำมันที่ใช้ในการทดลอง

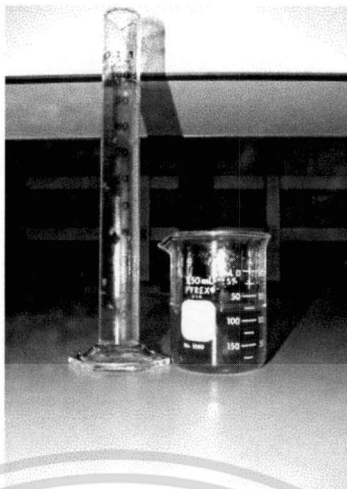
- น้ำมันพืชที่ใช้แล้วที่ได้จากการทอดทุเรียน



รูปที่ 4.38 น้ำมันพืชที่ใช้แล้วที่ได้จากการทอดทุเรียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- น้ำมันพืชที่ใช้แล้วที่ได้จากการทอดกล้วย



รูปที่ 4.39 น้ำมันพืชที่ใช้แล้วที่ได้จากการทอดกล้วย

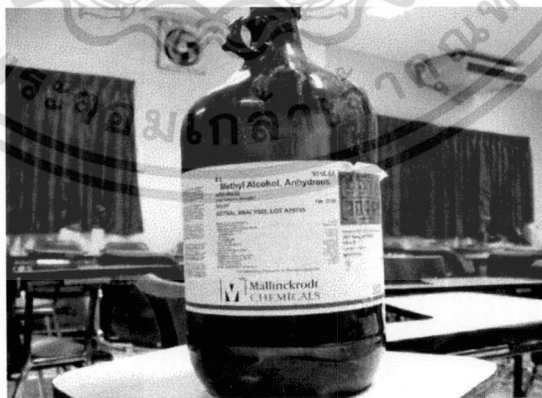
สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- โซเดียมไฮดรอกไซด์ (โซดาไฟ: Sodium Hydroxide : NaOH)



รูปที่ 4.40 สารโซเดียมไฮดรอกไซด์

- เมทานอลเกรดอุตสาหกรรมความบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่า 99 %



รูปที่ 4.41 สารเมทานอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ไอโซโพรพานอล เติมในน้ำมันก่อนทำการ ไตเทรตเพื่อละลายความเข้มข้นของน้ำมันให้น้อยลง



รูปที่ 4.42 ไอโซโพรพานอล

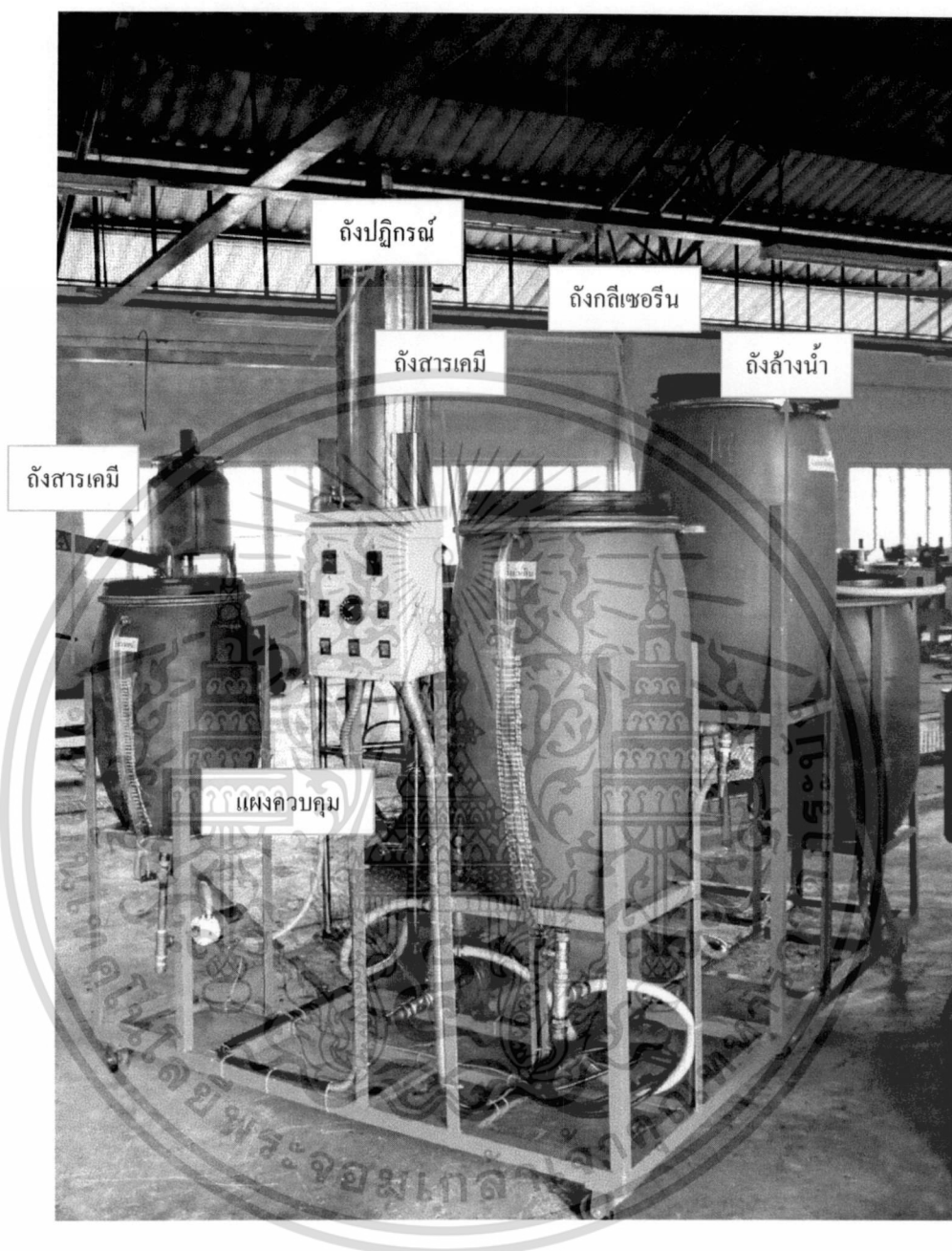
- ฟีนอล์ฟทาไลน์อินดิเคเตอร์ ( Phenolphthalein Indicator ) เติมในน้ำมันก่อนการไตเทรตประมาณ 1-2 หยด เพื่อจุดจุดติของน้ำมันจะเห็นเป็นสีชมพูอ่อน



รูปที่ 4.43 ฟีนอล์ฟทาไลน์อินดิเคเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.11 การผลิตไบโอดีเซลแบบกะ



รูปที่ 4.44 เครื่องผลิตไบโอดีเซลแบบกะ

##### หลักการการทำงานของเครื่องผลิตไบโอดีเซล

นำน้ำมันปาล์มดิบมาใส่ลงในถังที่ 1 (ถังน้ำมันดิบ) จากนั้นก็เปิดวาล์วให้น้ำมันไหลไป ถังปฏิกิริยา และให้ความร้อนที่ 60-62°C พร้อมเปิดมอเตอร์กวน จากนั้นทำการเปิดวาล์ว ถังสารเคมี ซึ่งเป็นถังของสารเมทิลแอลกอฮอล์ ที่ละลายกับโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยปริมาณตามสัดส่วนที่คำนวณไว้เข้าสู่ ถังปฏิกิริยาโดยกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทิ้งไว้ประมาณ 20 นาทีจากนั้นก็เปิดวาล์วถ่ายไปยัง ถังแยกกลีเซอริน แล้วก็ปล่อยให้มีการแยกชั้นกันระหว่างเอสเทอร์กับกลีเซอรินและกัม โดยใช้เวลาประมาณ 25-30 นาที โดยกลีเซอรินและกัมจะตกอยู่ด้านล่างซึ่งจะเปิดวาล์วเพื่อถ่ายออก จนเหลือเฉพาะเอสเทอร์ จากนั้นก็เปิดวาล์วถ่ายเอสเทอร์ไปยัง ถังล้าง โดยใช้ น้ำล้าง เพื่อดึงเอา โซเดียมไฮดรอกไซด์ออก แล้วทิ้งไว้ประมาณ 5-10 นาที แล้วก็ถ่ายน้ำทิ้งจนเหลือเฉพาะน้ำมันไบโอดีเซลจริงๆ โดยล้างประมาณ 3-4 ครั้ง เมื่อครบแล้วน้ำมันที่ได้ในขั้นตอนนี้สามารถนำไปใช้กับเครื่องยนต์ได้เลย

#### การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ

-เครื่องวัด ความบริสุทธิ์ (pH) ของน้ำมัน ใช้ในการวัดค่า (pH) ของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้ให้ได้ค่าอยู่ในช่วง 6-7 pH



รูปที่ 4.45 เครื่องวัดความบริสุทธิ์ (pH)

-เครื่องวัดความหนืดแบบ saybolt



รูปที่ 4.46 เครื่องวัดความหนืดแบบ saybolt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.12 หลักการผลิตไบโอดีเซล

ในการผลิตไบโอดีเซลแต่ละครั้งจะต้องทำการทดลองในห้องปฏิบัติการก่อน จึงจะไปผลิตในเครื่องผลิตไบโอดีเซลที่ทำการสร้างขึ้นมา และก่อนนำไปทดลองกับเครื่องยนต์ต้องนำไปทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพเพื่อที่จะหาค่า pH กับความหนืด

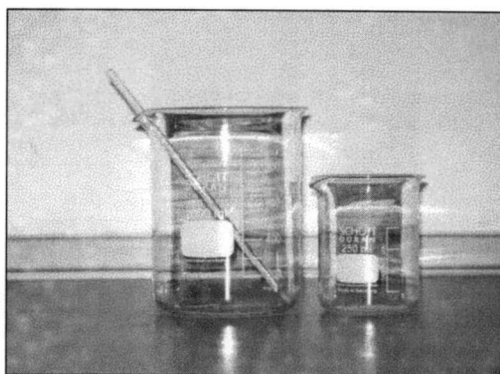
#### เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- ชุดกรวยแยกพร้อมขาตั้ง 1 ชุด (separating funnel)
- บีกเกอร์
- บิวเรต ขนาด 100 ml พร้อมขาตั้ง
- ปิเปต ขนาด 5 ml
- Erlenmeyer Flask ขนาด 100 ml
- กระจกบด ขนาด 250 ml
- Hotplate stirrer
- Magnetic stirrer
- เครื่องชั่งไฟฟ้า 2 ตำแหน่ง (Electrical balance)
- เทอร์โมมิเตอร์ (ช่วงอุณหภูมิ 0-100 °C)
- บั้มอากาศ
- เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง
- กระดาษวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง

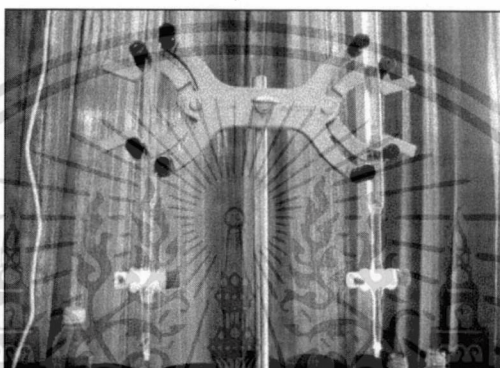


รูปที่ 4.47 ชุดกรวยแยกพร้อมขาตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.48 Becker



รูปที่ 4.49 บิวเรตพร้อมขาตั้ง 1 ชุด

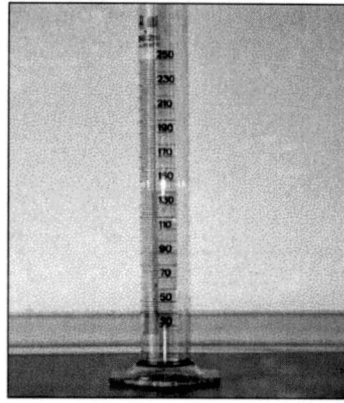


รูปที่ 4.50 ปิเปต ขนาด 5 ml

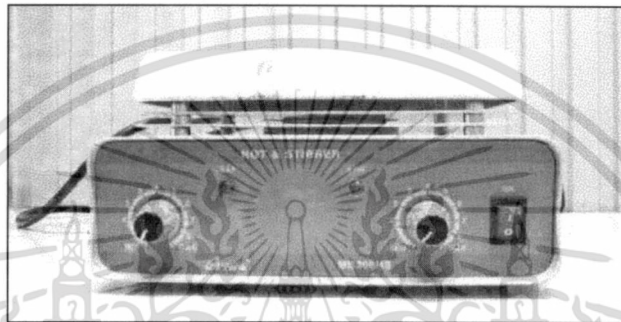


รูปที่ 4.51 Erlenmeyer flask

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.52 กระจกบอกดวง



รูปที่ 4.53 Hotplate stirrer

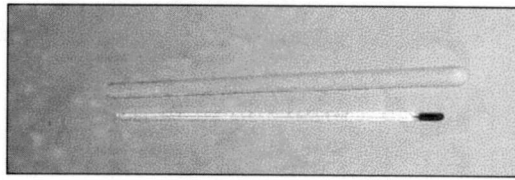


รูปที่ 4.54 Magnetic stirrer

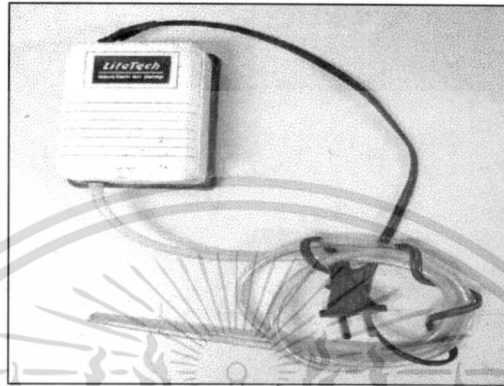


รูปที่ 4.55 เครื่องชั่งไฟฟ้า 2 ตำแหน่ง

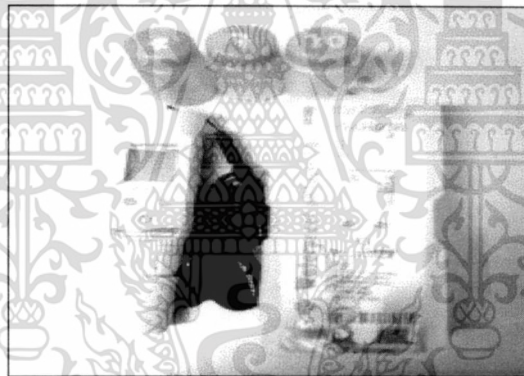
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.56 เทอร์โมมิเตอร์



รูปที่ 4.57 ป้อนอากาศ



รูปที่ 4.58 เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

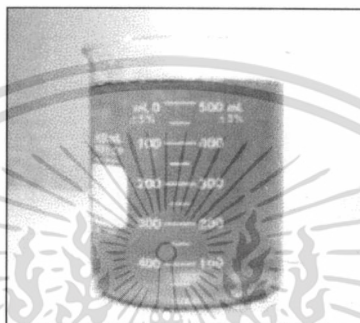


รูปที่ 4.59 กระดาษวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.13 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

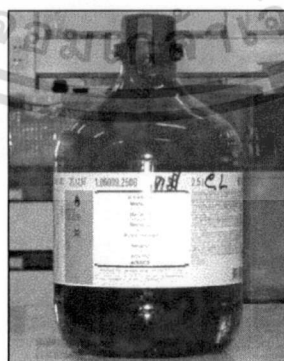
- 4.3.1 น้ำมันพืชที่ใช้แล้วที่ได้จากการทอดทุเรียน
- 4.3.2 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (โซดาไฟ: Sodium Hydroxide: NaOH commercial grade 99%)
- 4.3.3 เมทานอล (MeOH commercial grade 99%)
- 4.3.4 ไอโซโพรพานอล เติมในน้ำมันก่อนการไตเตรตเพื่อละลายความเข้มข้นของน้ำมันให้น้อย
- 4.3.5 ฟีนอล์ฟทาลินอินดิเคเตอร์ เติมในน้ำมันก่อนการไตเตรตประมาณ 1-2 หยด เพื่อดูจุดยุติของน้ำมันจะเห็นเป็นสีชมพูอ่อน
- 4.3.6 เกลือ



รูปที่ 4.60 น้ำมันพืชที่ใช้แล้ว



รูปที่ 4.61 โซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.62 สารเมทานอล

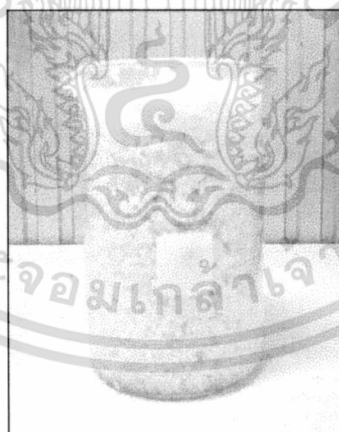
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.63 ไอโซโพรพานอล



รูปที่ 4.64 ฟีนอล์ฟทาไลน์อินดิเคเตอร์



รูปที่ 4.65 เกลือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### - การไตรเตรท

ทำการอุ่นน้ำมันพืชใช้แล้วให้ได้ประมาณ  $60^{\circ}\text{C}$  ดังแสดงในรูปที่ 4.66 หลังจากนั้นตวงน้ำมันพืชที่ใช้แล้วใส่ลงในขวดรูปชมพู่ 4 มิลลิลิตร เติมไอโซโพรพานอลพอประมาณเพื่อลดความหนืดของน้ำมันปาล์มดิบ เติมสารละลายฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์ประมาณ 3-5 หยด เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 M (NaOH 4 กรัม: น้ำกลั่น 1000 มิลลิลิตร) ลงใน บิวเรต ทำการไตรเตรทเพื่อหาค่ากรดไขมันอิสระ โดยสังเกตการเปลี่ยนสีของสารละลายในขวด ซึ่งเมื่อถึงจุดยุติน้ำมันพืชใช้แล้วจะเปลี่ยนเป็นสีชมพู อ่านค่าที่ได้พร้อมบันทึกผลการทดลอง

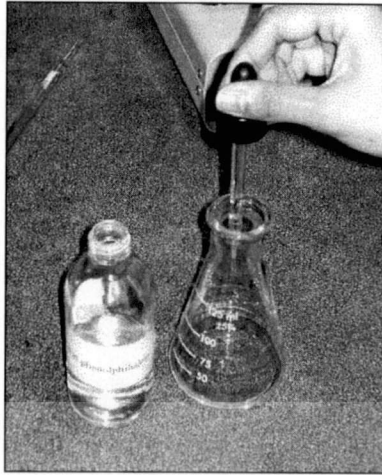


รูปที่ 4.66 การอุ่นน้ำมัน



รูปที่ 4.67 ปีปนน้ำมันพืชใช้แล้วใส่ลงในขวดรูปชมพู่

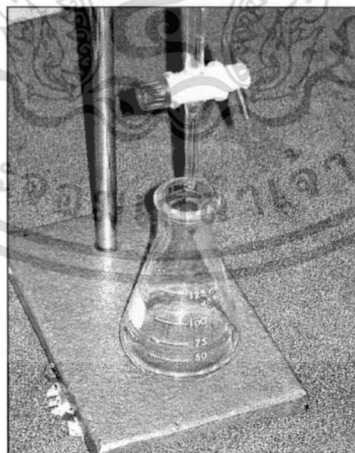
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.68 เติมสารละลายฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์

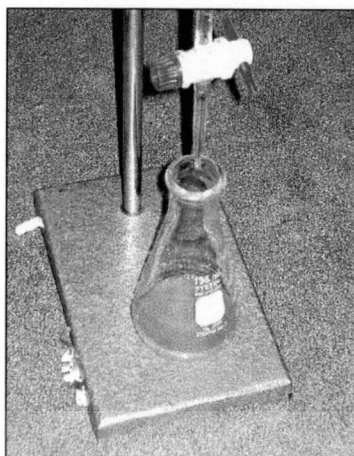


รูปที่ 4.69 การเติมไอโซโพรพานอล



รูปที่ 4.70 การไตเตรท

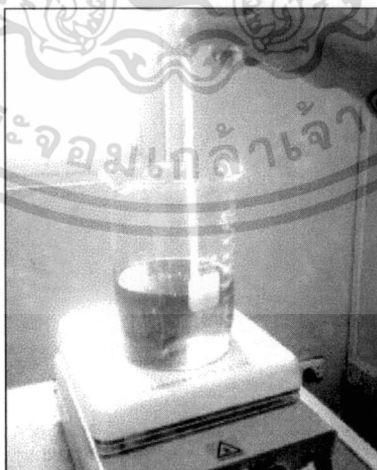
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



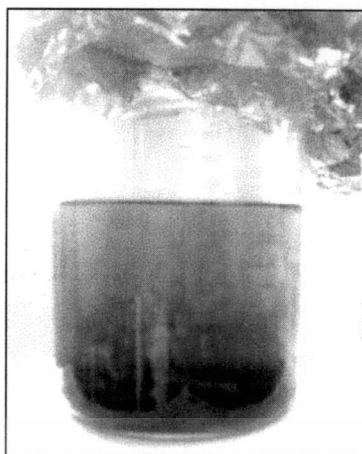
รูปที่ 4.71 การไตรเตรทเมื่อถึงจุดยุติ

#### - การผลิตไบโอดีเซลในห้องปฏิบัติการ

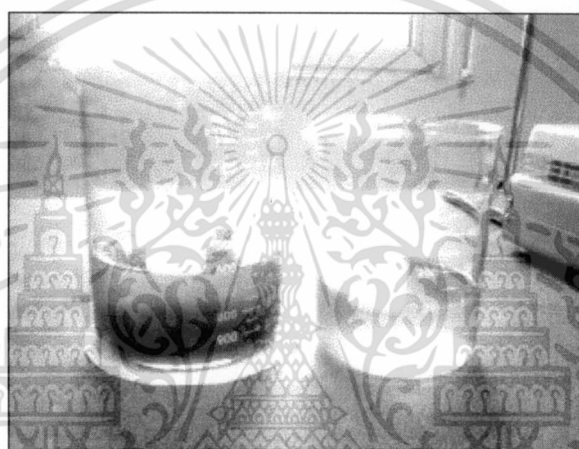
ทำการอุ่นน้ำมันพืชที่ใช้แล้วปริมาตร 500 มิลลิลิตร ให้ได้อุณหภูมิประมาณ  $60^{\circ}\text{C}$  แล้วเติมสารละลายเมทอกไซด์ที่ได้จากการผสมระหว่าง โซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ ค่ากรดไขมันอิสระของน้ำมัน + ตัวเร่งปฏิกิริยา (4% โดยน้ำหนัก) และเมทานอลปริมาณ 23% โดยปริมาตร ปิดบีกเกอร์ให้มิดชิดเพื่อไม่ให้เมทานอลระเหยออก พร้อมทั้งกวนทิ้งไว้ด้วยแท่งแมกเนติก ใช้เวลาประมาณ 90 นาที แล้วนำไบโอดีเซลไปพัก เพื่อให้กลีเซอรอลแยกชั้นจากไบโอดีเซลแล้วตักนอนก้น ใช้เวลาประมาณ 30-60 นาที แล้วถ่ายกลีเซอรอลทิ้ง หลังจากนั้นเติมน้ำที่วัดค่า pH ของน้ำ ใช้ปริมาตร 1:1 กับ ไบโอดีเซล กวนด้วยมือเบาๆ 15 นาที แล้วปล่อยน้ำทิ้งแล้ววัดค่า pH ของน้ำ แล้วเติมน้ำใส่อีก ปริมาตร 1:1 เท่าเดิม กวนด้วยมือทิ้งไว้ 15 นาที ปล่อยน้ำออกแล้ววัดค่า pH ของน้ำ หลังจากนั้นเติมน้ำอีกครั้งปริมาตร 1:1 ใช้เครื่องฟอกอากาศระหว่างน้ำกับไบโอดีเซลทิ้งไว้ 15 นาที หลังจากนั้น วัดค่า pH ของน้ำ นำไบโอดีเซลที่ได้ไปผ่านเกลือ แล้วให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $80^{\circ}\text{C}$  เพื่อกำจัดน้ำออกจากไบโอดีเซล แล้ววัดค่าต่างๆ

รูปที่ 4.72 การอุ่นน้ำมันได้ที่  $60^{\circ}\text{C}$ 

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.73 การผสมน้ำมันกับแมกทอกไซด์



รูปที่ 4.74 ไบโอดีเซลและกลีเซอ



รูปที่ 4.75 การวัดค่า pH ของน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



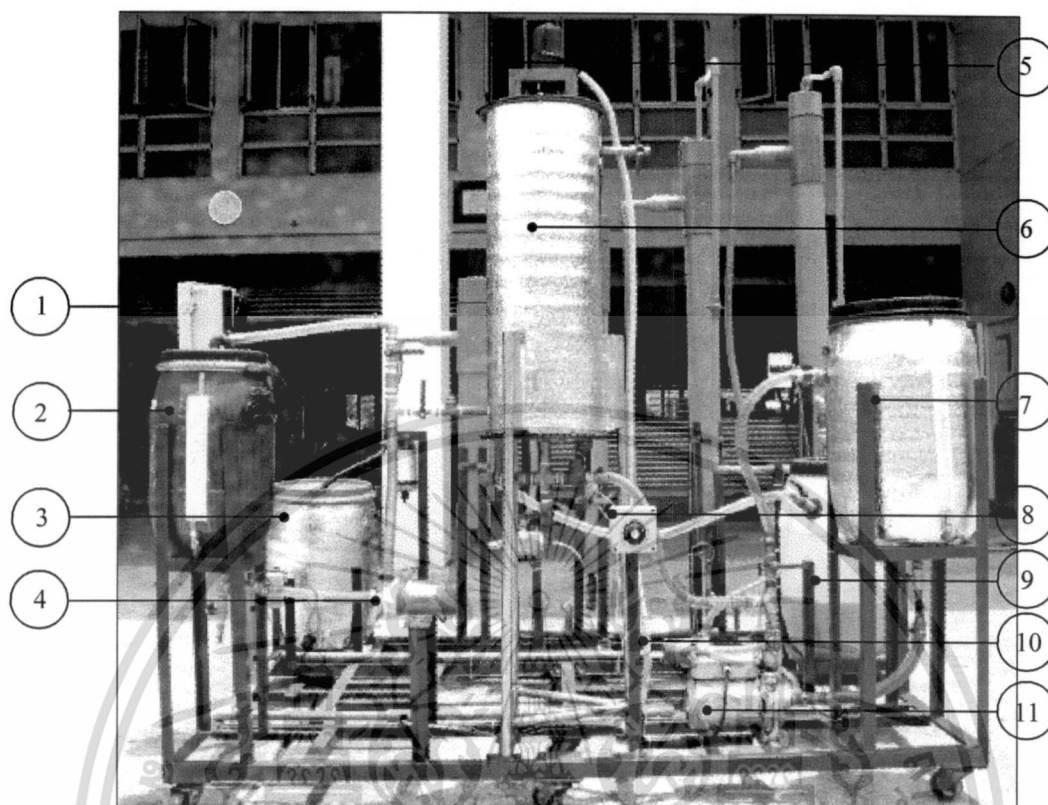
รูปที่ 4.76 การกวนด้วยมือ



รูปที่ 4.77 ขั้นตอนการล้างไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.14 เครื่องล้างไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วแบบต่อเนื่อง



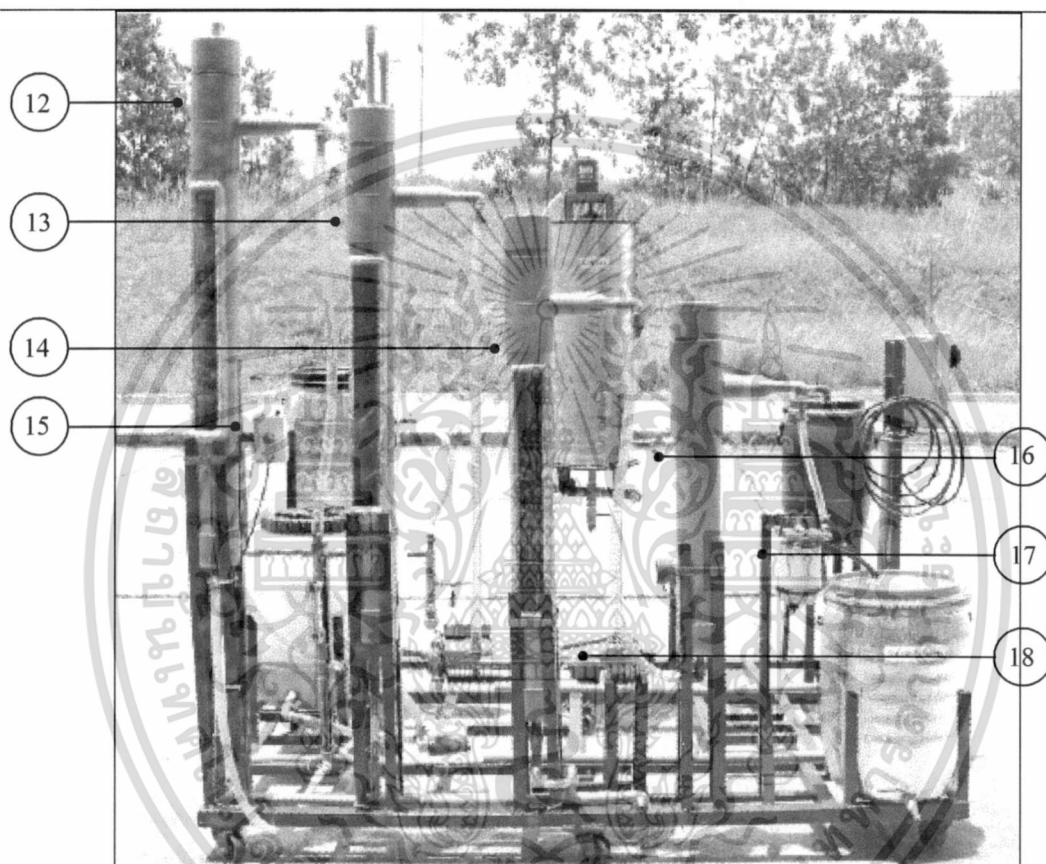
รูปที่ 4.78 เครื่องผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วและเครื่องล้างแบบต่อเนื่อง (ด้านหน้า)

ตารางที่ 4.4 อุปกรณ์ของเครื่องล้างไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วแบบต่อเนื่อง

หมายเลข	รายการ
1	กล่องควบคุม
2	ถังเมทรอกไซด์
3	ถังผลิตภัณฑ์ (ไบโอดีเซลที่ล้างสะอาดแล้ว)
4	ปั๊มเมทรอกไซด์
5	มอเตอร์กวน
6	ถังปฏิกรณ์
7	ถังน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว
8	เทอร์โมสตรัท
9	ถังแยกกลีเซอรอล
10	ปั๊มไบโอดีเซลเข้าคอลัมน์สเปรย์
11	ปั๊มน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12	คอลัมน์สเปรย์
13	คอลัมน์ป้อนอากาศ
14	คอลัมน์พักแยก
15	ตัวปรับอัตราการไหลของป้อนไบโอดีเซลเข้าคอลัมน์สเปรย์
16	คอลัมน์เกลือ
17	ตัวกรองน้ำ
18	ป้อนอากาศ



รูปที่ 4.79 เครื่องผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วและเครื่องล้างแบบต่อเนื่อง (ด้านหลัง)

- ขั้นตอนการทำงานของเครื่องล้างไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วแบบต่อเนื่อง

นำน้ำมันพืชใช้แล้วมาใส่ในถังที่ 1 ซึ่งติดตั้งฮีตเตอร์แล้วเปิดปั๊มวน เพื่อให้ไล่ความชื้นในน้ำมัน ดังแสดงในรูปที่ 4.80 จากนั้นก็เปิดวาล์วให้น้ำมันไหลเข้าสู่ถังปฏิกรณ์และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $60^{\circ}\text{C}$  พร้อมเปิดมอเตอร์กวนที่ความเร็วรอบ 150 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.81 จากนั้นเปิดวาล์วของถังสารละลายเมทรอกไซด์ (ถังที่ 2 ที่ใช้ปั๊มเคมีดูดเมทานอลมาละลายกับโซเดียม-ไฮดรอกไซด์แบบหมุนวน) เพื่อให้สารละลายเมทรอกไซด์เข้าสู่ถังปฏิกรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.82 เริ่มจับเวลาตั้งแต่สารละลายเมทรอกไซด์เข้าสู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึงปฏิบัติการเป็นเวลา 105 นาที เมื่อถึงเวลาเปิดวาล์วถ่าย ไปยังถังแยกกลีเซอรอล แล้วปล่อยให้มีการแยกชั้นกันระหว่างไบโอดีเซลกับกลีเซอรอลใช้ เวลาประมาณ 30-60 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.83 เมื่อถึงเวลาปล่อยกลีเซอรอลที่ตกอยู่ทางด้านล่างออกจากถังเหลือไว้แต่ไบโอดีเซล จากนั้นเปิดปั๊มเคมีเพื่อปั๊มไบโอดีเซลจากถังแยกเข้าสู่คอลัมน์สเปร์ย์ (หมายเลข 12) ปรับอัตราการไหลของไบโอดีเซลกับน้ำให้ได้อัตราส่วน 1:1 แล้วปล่อยให้ไบโอดีเซลไหลล้นไปสู่คอลัมน์ป้อนอากาศ (หมายเลข 13) ซึ่งเป็นกระบวนการเพิ่มการสัมผัสกันระหว่างน้ำ กับไบโอดีเซลให้มากขึ้น ด้วยการใช้ฟองอากาศ จากนั้นไบโอดีเซลจะไหลล้นเข้าสู่คอลัมน์พักแยก (หมายเลข 14) ซึ่งเป็นคอลัมน์พักเพื่อให้ไบโอดีเซลแยกชั้นออกจากสบู่ ไบโอดีเซลที่แยกชั้นแล้วจะไหลล้นไปยังคอลัมน์เกลือ (หมายเลข 16) คือคอลัมน์ที่บรรจุเกลือไว้เพื่อดูดซับน้ำออกบางส่วน จากนั้นน้ำมันจะไหลล้นเข้าสู่ตัวกรองน้ำแล้วจึงไหลไปยังถังผลิตก๊าซต่อไป แล้วจึงทำการไล่น้ำ ซึ่งแขวนลอยอยู่ในน้ำมันออกอีกครั้งหนึ่ง ด้วยการใช้ความร้อนจากฮีตเตอร์โดยควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 80 °C เป็นเวลา 30 นาที แล้วทิ้งไว้จนน้ำมันเย็นตัวลงถึงอุณหภูมิห้อง แล้วจึงนำไปใช้งานได้

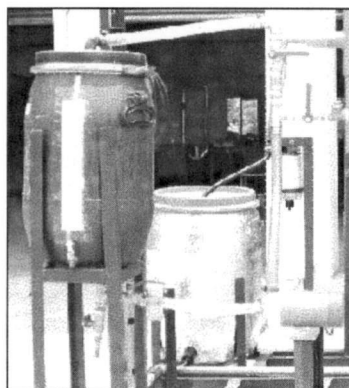


รูปที่ 4.80 ถึงน้ำมันพืชใช้แล้ว

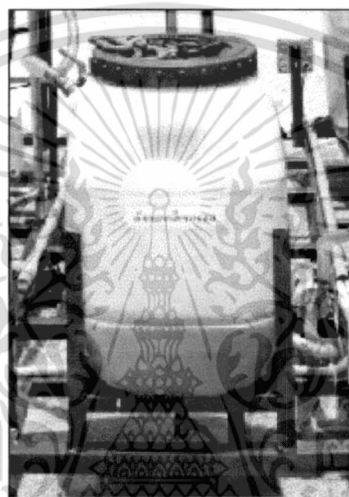


รูปที่ 4.81 ถึงปฏิบัติการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



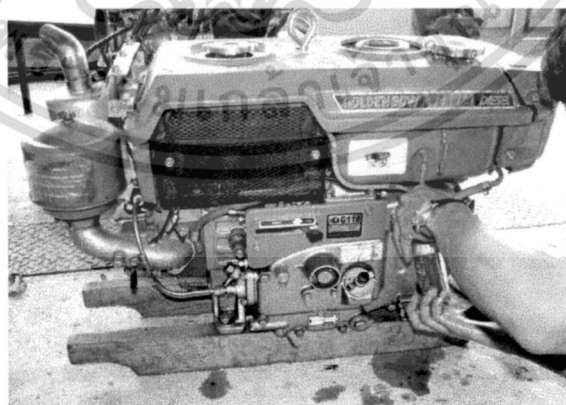
รูปที่ 4.82 ถังเมทรอกไซด์



รูปที่ 4.83 ถังแยกกลีเซอรอล

#### 4.15 การทดลองติดเครื่องยนต์

การติดเครื่องยนต์ เพื่อที่จะทดสอบว่าน้ำมันไบโอดีเซลที่ทำการผลิตขึ้นมาสามารถทำให้เครื่องยนต์ติดได้ และดูอัตราการเร่งของเครื่องยนต์เมื่อเทียบกับการใช้น้ำมันดีเซลทั่วไป



รูปที่ 4.84 แสดงรูปเครื่องที่ใช้ในการติด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.85 แสดงการใช้น้ำมันไบโอดีเซล



รูปที่ 4.86 รูปแสดงการใช้น้ำมันไบโอดีเซลติดเครื่องทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### ผลการทดลอง

#### 5.1 ผลการลดกรดไขมันอิสระน้ำมันปาล์มดิบด้วยตัวกลั่นไม่โกรเวฟแบบกะ

ผลจากการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดตามแผนการทดลอง จะได้สมการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณค่าความเป็นกรดกับตัวแปรอิสระได้สมการในรูปแบบ quadratic polynomial โดยใช้วิธี multiple regression แต่สมการดังกล่าวจะต้องพิจารณานัยสำคัญของแต่ละพจน์ก่อน โดยตัดพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญออก ซึ่งสังเกตได้จากค่า  $P$ -value ถ้า  $P$ -value มีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าพจน์ดังกล่าวไม่มีนัยสำคัญต่อสมการ ให้เหลือเพียงพจน์ที่มีค่า  $P$ -value น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าพจน์ดังกล่าวมีนัยสำคัญต่อสมการทำนายความสัมพันธ์ หลังจากพิจารณาค่า  $P$ -value จะได้สมการความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 5.1 และได้แสดงค่าสัมประสิทธิ์กับค่าทางสถิติของสมการในตารางที่ 5.2 โดยสมการทำนายค่าความเป็นกรดมีค่า coefficient of multiple determination,  $R^2 = 0.880$  และมีค่า  $R^2_{\text{adjusted}} = 0.814$  และเมื่อนำสมการทำนายความสัมพันธ์ของค่าความเป็นกรดกับตัวแปรอิสระที่ศึกษา ไปสร้างพื้นผิวผลตอบสนอง (response surface) และกราฟ contour ซึ่งได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง เมทานอลกับกรดซัลฟิวริก, เมทานอลกับเวลาในการทำปฏิกิริยา และกรดซัลฟิวริกกับเวลาในการทำปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 5.1ก, 5.2ก และ 5.3ก ตามลำดับ

$$AV = \beta_0 + \beta_1(M) + \beta_2(S) + \beta_3(T) + \beta_4(M^2) + \beta_5(S^2) + \beta_6(T^2) \quad (5.1)$$

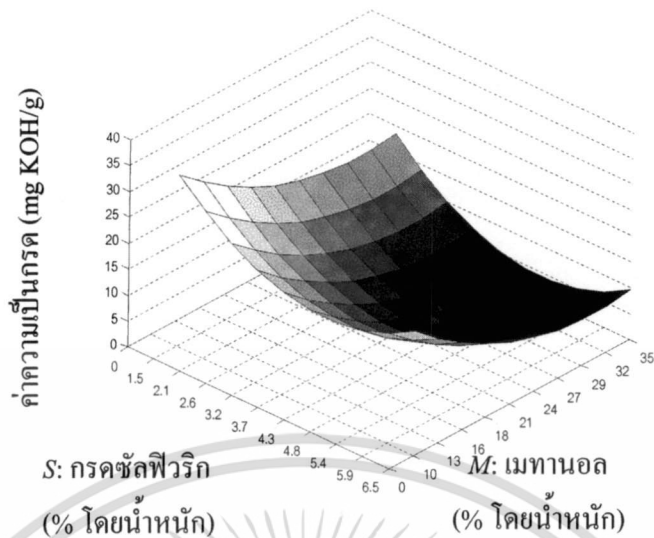
ตารางที่ 5.1 ข้อมูลในการลดปริมาณกรดไขมันอิสระตามแผนการทดลองที่สภาวะต่างๆ

การทดลอง ที่	กรดซัลฟิวริก	เมทานอล	เวลาในการทำปฏิกิริยา	ค่าความเป็นกรด
	<i>S</i> (% โดยน้ำหนัก)	<i>M</i> (% โดยน้ำหนัก)	<i>T</i> (วินาที)	AV (mg KOH/g)
1	4.0	35.0	60	4.832
2	5.5	30.0	90	5.354
3	4.0	22.5	60	5.812
4	2.5	15.0	90	18.995
5	4.0	10.0	60	16.811
6	5.5	15.0	30	25.309
7	5.5	30.0	30	16.811
8	4.0	22.5	60	7.835
9	2.5	30.0	90	3.909
10	6.5	22.5	60	4.672
11	4.0	22.5	10	25.309
12	4.0	22.5	110	4.751
13	2.5	15.0	30	24.353
14	2.5	30.0	30	18.360
15	4.0	22.5	60	5.812
16	5.5	15.0	90	14.412
17	1.5	22.5	60	24.353
18	4.0	22.5	60	5.929

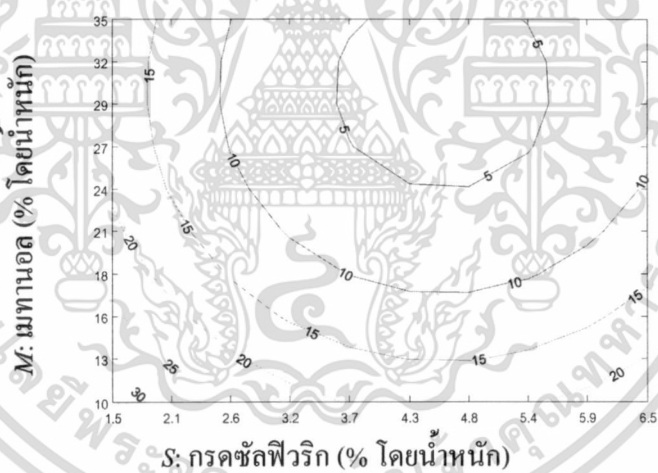
ตารางที่ 5. 2 ค่าสัมประสิทธิ์และค่าทางสถิติของสมการทำนายความสัมพันธ์

Terms	Regression coefficients	Standard error	<i>P</i> -value
$\beta_0$	94.2000	13.65000	0.000025
$\beta_1$	-2.2090	0.82900	0.022000
$\beta_2$	-13.7800	3.69600	0.003340
$\beta_3$	-0.66200	0.14000	0.000629
$\beta_4$	0.03627	0.01819	0.071530
$\beta_5$	1.49700	0.45500	0.007170
$\beta_6$	0.00395	0.00114	0.005200

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



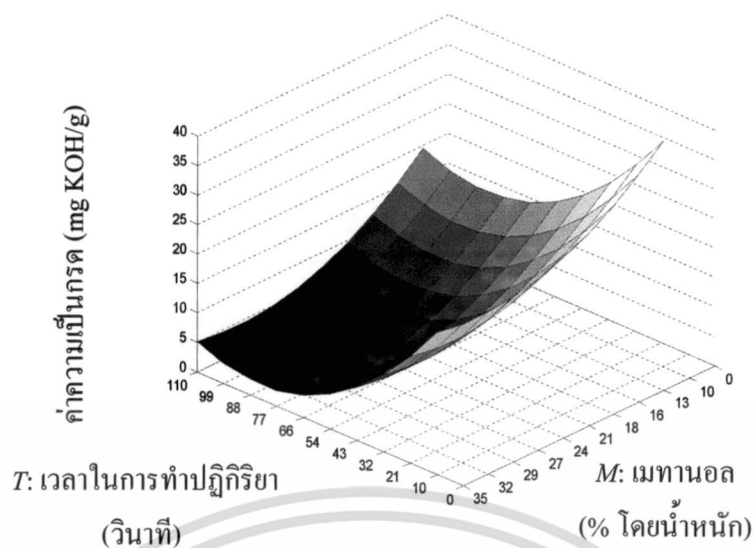
(5.1 - ก)



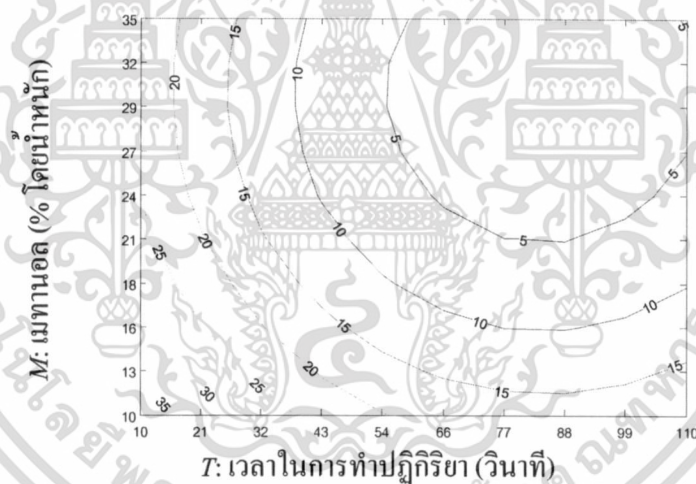
(5.1 - ข)

- รูปที่ 5.1 (ก) พื้นผิวตอบสนอง ของค่าความเป็นกรดที่ค่าเมทานอลกับกรดซัลฟิวริกต่างๆ กัน  
 (ข) กราฟ contour ของค่าความเป็นกรด (mg KOH/g) ที่ค่าเมทานอลกับกรดซัลฟิวริกต่างๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



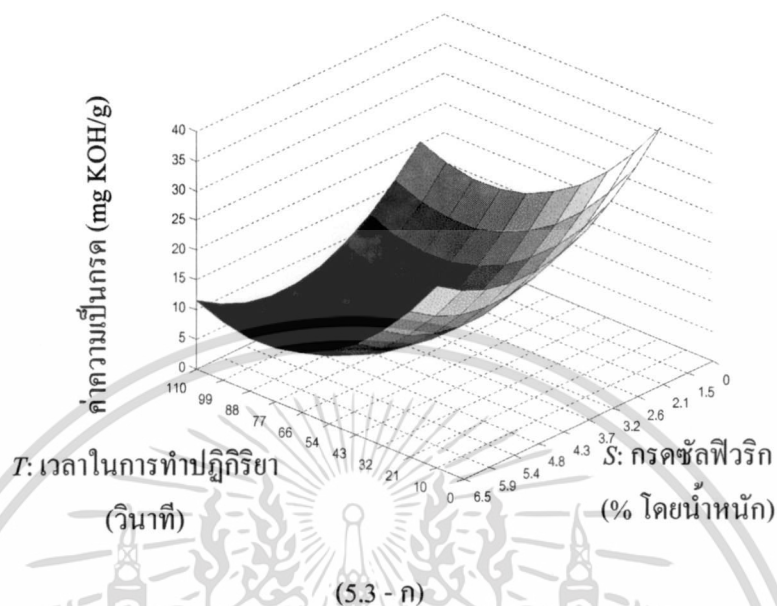
(5.2 - ก)



(5.2 - ข)

รูปที่ 5.2 (ก) พื้นผิวตอบสนอง ของค่าความเป็นกรดที่ค่าเมทานอลและเวลาในการทำปฏิกิริยาต่างๆ-  
กัน (ข) กราฟ contour ของค่าความเป็นกรด (mg KOH/g) ที่ค่าเมทานอลและเวลาในการ  
ทำปฏิกิริยาต่างๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 (ก) พื้นผิวตอบสนอง ของค่าความเป็นกรดที่ค่ากรดซัลฟิวริกและเวลาในการทำปฏิกิริยา  
 ต่างๆ กัน (ข) กราฟ contour ของค่าความเป็นกรด (mg KOH/g) ที่ค่ากรดซัลฟิวริกและเวลา  
 ในการทำปฏิกิริยาต่างๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

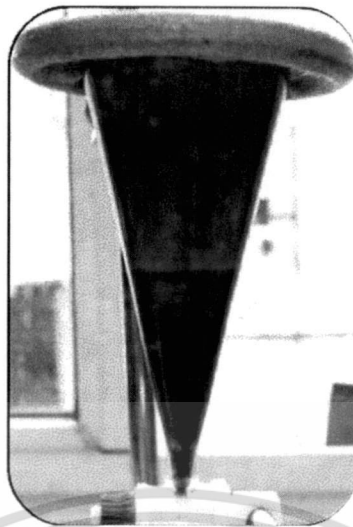
## 5.2 สรุปผลการลดกรดไขมันอิสระน้ำมันปาล์มดิบด้วยด้วยคลื่นไมโครเวฟแบบกะ

สภาวะที่เหมาะสมของการลดค่าความเป็นกรดจากน้ำมันปาล์มดิบให้มีค่าน้อยกว่า 6 mg KOH/g สำหรับกระบวนการเอสเทอร์ริฟิเคชัน ขึ้นอยู่กับสมการทำนายความสัมพันธ์ ซึ่งมีรูปแบบสมการเป็นแบบ quadratic polynomial และเมื่อนำสมการไปสร้างพื้นผิวผลตอบสนอง (response surface) และกราฟ contour พบว่าที่สภาวะปริมาณของเมทานอล 30.4 % โดยน้ำหนัก, กรดซัลฟิวริก 4.6 % โดยน้ำหนัก และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาภายในเครื่องไมโครเวฟขนาด 800 วัตต์ เป็นเวลา 84 วินาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการลดค่าความเป็นกรดจากน้ำมันปาล์มดิบ ซึ่งสภาวะดังกล่าวได้จากการแก้สมการทำนายความสัมพันธ์ ภายใต้เงื่อนไขขอบเขตของตัวแปรอิสระ คือ เมทานอล ( $10 \leq M \leq 35$  % โดยน้ำหนัก), กรดซัลฟิวริก ( $1.5 \leq S \leq 6.5$  % โดยน้ำหนัก) และเวลาในการทำปฏิกิริยาภายในเครื่องไมโครเวฟขนาด 800 วัตต์ ( $10 \leq T \leq 110$  วินาที) โดยใช้โปรแกรม excel solver โปรแกรมจะทำการแก้สมการทำนายความสัมพันธ์ เพื่อหาปริมาณกรดไขมันอิสระที่ต่ำที่สุด ภายใต้เงื่อนไขขอบเขตที่กำหนด

## 5.3 ผลการลดกรดไขมันอิสระน้ำมันปาล์มดิบด้วยด้วยคลื่นไมโครเวฟแบบต่อเนื่อง

เมื่อนำสภาวะที่เหมาะสมในการลดค่าความเป็นกรดแบบกะมาทำการทดลองในกระบวนการแบบต่อเนื่อง โดยทำการแปลงหน่วยจาก % โดยน้ำหนัก เป็น % โดยปริมาตร ได้ปริมาณเมทานอลจาก 30.4 % โดยน้ำหนัก เป็น 34.5 % โดยปริมาตร และปริมาณกรดซัลฟิวริกจาก 4.6 % โดยน้ำหนัก เป็น 8.28 % โดยปริมาตร และป้อนสารผสมระหว่าง น้ำมันปาล์มดิบ เมทานอล และกรดซัลฟิวริก ด้วยอัตราการไหล 110 มิลลิลิตร/นาที่ หรือ 6.6 ลิตร/ชั่วโมง เข้าเครื่องปฏิกรณ์ (ชุดท่อเทปเลื่อน) ภายในเครื่องไมโครเวฟเป็นเวลา 84 วินาที

จากการทดลองปรากฏว่าสามารถลดค่าความเป็นกรดเริ่มต้นของน้ำมันปาล์มดิบจาก 15-24 mg KOH/g ลดลงได้ประมาณ 4 mg KOH/g และเมื่อนำน้ำมันปาล์มดิบ และน้ำมันปาล์มดิบลดกรดแล้ว มาทำการวิเคราะห์หาองค์ประกอบในน้ำมันด้วยเทคนิค thin layer chromatography - flame ionization detection (TLC/FID) ดังแสดงในรูปที่ 5.5 และรูปที่ 5.6 ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน 2 จุด คือ ปริมาณของเอสเทอร์ (พีคที่ 1) ของน้ำมันปาล์มดิบที่ลดกรดไขมันอิสระแล้วมีค่าเพิ่มมากขึ้นจากน้ำมันปาล์มเริ่มต้น และปริมาณของกรดไขมันอิสระ (พีคที่ 3) ของน้ำมันปาล์มดิบที่ลดกรดไขมันอิสระแล้วมีค่าลดลง ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน และจากรูปที่ 5.4 ผลลัพธ์ที่ได้จะแบ่งแยกเป็นสองชั้น คือ น้ำมันปาล์มดิบลดกรดไขมันอิสระแล้วจะอยู่ด้านบนและมีน้ำกับกรดซัลฟิวริกจะอยู่ด้านล่าง และจากการทดลองได้เปอร์เซ็นต์ผลได้ของน้ำมันลดกรดแล้วเท่ากับ 125.4 % โดยปริมาตร และมีคุณสมบัติต่างๆ ดังนี้ ค่าความหนืด ณ อุณหภูมิ 40°C เท่ากับ 6.47 cSt และความหนาแน่นเท่ากับ 884.67 kg/m<sup>3</sup>

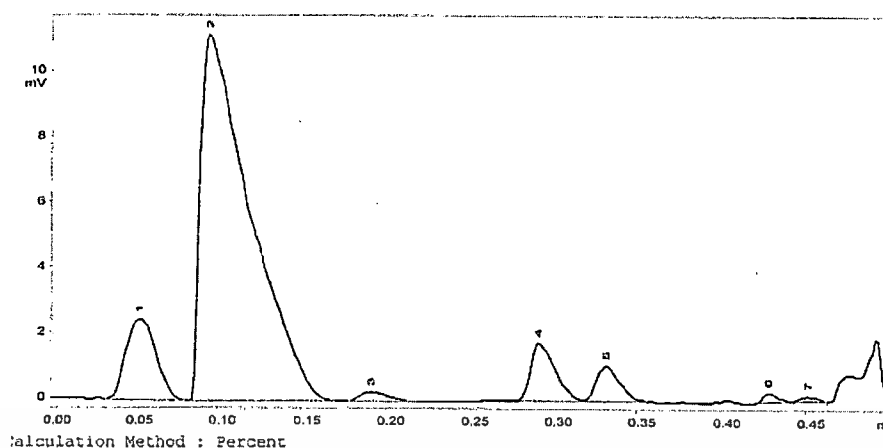


รูปที่ 5.4 การสกัดกรดไขมันอิสระด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน



รูปที่ 5.5 น้ำมันปาล์มดิบที่ก่อนสกัดไขมันอิสระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

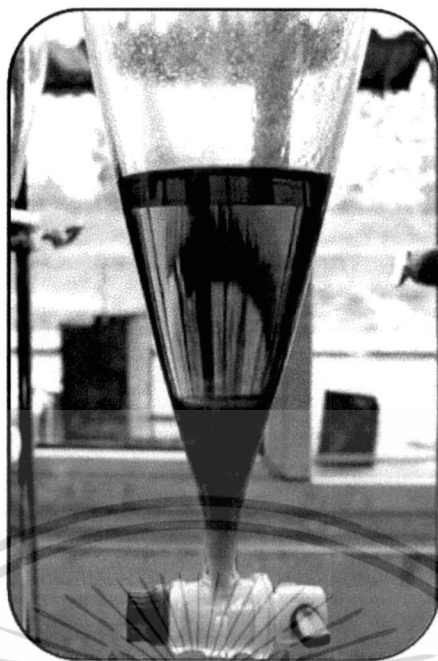


Peak- No	Ret.Time (min)	Pk.Start (min)	Pk.End (min)	Area	Height (mV)	Area%
1	0.053	0.033	0.080	1600	2.43	10.427
2	0.095	0.083	0.170	11977	11.16	78.037
3	0.192	0.178	0.218	170	0.29	1.109
4	0.292	0.280	0.318	916	1.75	5.968
5	0.332	0.318	0.357	539	1.07	3.514
6	0.428	0.422	0.442	91	0.28	0.595
7	0.452	0.443	0.463	54	0.16	0.350
				15347	17.13	100.000

รูปที่ 5.6 น้ำมันปาล์มดิบที่ลดกรดไขมันอิสระแล้ว

#### 5.4 ผลการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบด้วยคลื่นไมโครเวฟแบบต่อเนื่อง

เมื่อนำน้ำมันปาล์มดิบลดกรดไขมันอิสระมาผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยใช้ปริมาณเมทานอล 20 % โดยปริมาตร, โซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับค่ากรดไขมันอิสระ + 4 กรัมต่อน้ำมัน 1 ลิตร และป้อนสารผสมระหว่าง น้ำมันปาล์มดิบลดกรดไขมันอิสระและเมทรอกไซด์ (โซเดียมไฮดรอกไซด์ + เมทานอล) ด้วยอัตราการไหล 110 มิลลิลิตร/นาที หรือ 6.6 ลิตร/ชั่วโมง เข้าเครื่องปฏิกรณ์ (ขนาดท่อเทป ลอน) ภายในเครื่องไมโครเวฟเป็นเวลา 84 วินาที ได้ไบโอดีเซลที่มีความบริสุทธิ์ 83 % โดยน้ำหนัก จากรูปที่ 5.7 ผลึกภัณฑ์ที่ได้จะแบ่งแยกเป็นสองชั้นคือ ไบโอดีเซลจะอยู่ด้านบนและกลีเซอรอลจะอยู่ด้านล่าง และจากการทดลองได้เปอร์เซ็นต์ผลได้ของไบโอดีเซลเท่ากับ 90.38 % โดยปริมาตร และมีคุณสมบัติต่างๆ ดังนี้ ค่าความหนืด ณ อุณหภูมิ 40°C เท่ากับ 6.15 cSt และความหนาแน่นเท่ากับ 865 kg/m<sup>3</sup>



รูปที่ 5.7 การลดกรดไขมันอิสระด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์รีเฟชัน

#### 5.5 วิธีการทดลองหาค่าเวลาเซโบลต์ของน้ำมัน

1. อุดจุก (Cock) ตรงรู Orifice
2. ใส่ น้ำมันไบโอดีเซลลงใน Bath ให้พอดีกับความสูงของกระบอกด้านนอก
3. เปิดสวิทช์ Stiner และ Heater เพื่อกวนและให้ความร้อน
4. เมื่อได้อุณหภูมิที่ต้องการแล้วใช้ Saybolt Flask รองใต้ Bath ให้ตรงกับรู Orifice ดึงจุก

(Cock)

ออกแล้วจับเวลาจนน้ำมันตัวอย่างการไหลลงถึงขีดกำหนด (60 ml) ของ Flask

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 เครื่องหาค่าเวลาเซตโบลย์

### 5.6 วิธีการทดลองหาค่า pH

1. เอน้ำมันตัวอย่างใส่บีกเกอร์
2. เปิดเครื่องวัดค่า pH
3. ปรับ Mode ไปที่วัดค่า pH
4. เอาหัวที่ใช้วัดจุ่มในน้ำมันตัวอย่าง โดยจุ่มไว้หนึ่งๆ
5. อ่านค่า แล้วจดบันทึก



รูปที่ 5.9 เครื่องวัดค่า pH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลการทดลอง

ตารางที่ 5.3 แสดงเวลาที่ใช้ในการกวนที่แตกต่างกัน โดยใช้ไขมันพืชที่ใช้แล้วจากการทอด  
 ทูเรียนในห้องแลป 100 ml กับ โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.62 g และเมทานอล 21 ml  
 ใช้ความเร็วรอบที่ 240 rpm

เวลาที่ใช้ในการกวน (min)	ปริมาณเอสเทอร์ (เฉลี่ย) (%)
1	87.5
2	87.5
5	87.5
10	87.5
20	87.5
30	87.5
40	87.5

ตารางที่ 5.4 แสดงความเร็วรอบของการกวนที่แตกต่างกัน โดยของน้ำมันพืชที่ใช้แล้วจากการ  
 ทอดทูเรียนในห้องแลป 100 ml กับ โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.62 g และเมทานอล 21 ml  
 ที่เวลากวน 20 min

ความเร็วรอบของการ กวน (rpm)	ระยะเวลาของการ ตกตะกอนของกลีเซอริน และกัม(ค่าเฉลี่ย) (min)	ปริมาณเอสเทอร์ (ค่าเฉลี่ย) (%)
50	-	ไม่เกิด
100	9	87.5
150	5	87.5
200	4	87.5
250	6	87.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณโซเดียมต่าง ๆ โดยใช้ไขมันพืชที่ใช้แล้วจากการทอด  
ทุเรียน ปริมาณ 100 ml และเมทานอล 21 ml ที่ความเร็วรอบ 100 rpm

ปริมาณโซเดียม (g)	ค่า pH (ค่าเฉลี่ย)	ปริมาณเอสเทอร์ (ค่าเฉลี่ย) %
1.5	6.19	87.5
2.5	6.30	87.5
3.5	6.50	87.5
4.5	7.08	87.5
5.5	7.17	87.5

ตารางที่ 5.6 แสดงปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่แตกต่างกัน โดยใช้ไขมันพืชที่ใช้แล้วจากการ  
ทอดทุเรียนปริมาณ 100 ml กับเมทานอล 21 ml ใช้ความเร็วรอบที่ 240 rpm เวลาในการกวน 20 min

ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ (g)	เวลาเซย์โบลต์เฉลี่ย (sec)	
	ที่ 37.7°C	ที่ 98.8°C
1.5	41.38	31.35
2.5	41.83	30.56
3.5	39.99	30.10
4.5	40.36	30.79
5.5	40.48	30.61

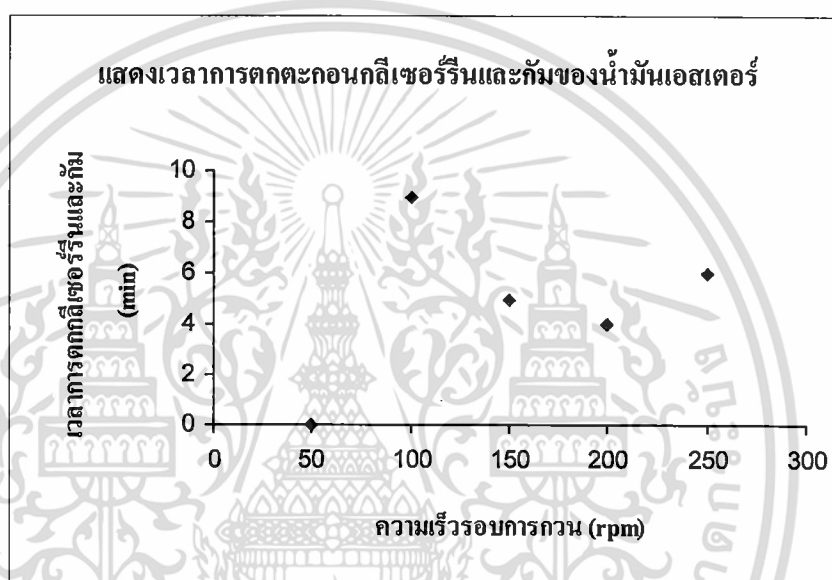
ตารางที่ 5.7 แสดงเวลาเซย์โบลต์ของน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองในแล็บกับที่ผลิตได้  
จากเครื่องผลิตเทียบกับน้ำมันดีเซล

ชนิดน้ำมัน	เวลาเซย์โบลต์	
	ที่ 37.8 °C	98.8 °C
น้ำมันไบโอดีเซลจากการทอดกล้วย	39.22	29.23
น้ำมันไบโอดีเซลจากเครื่องผลิตที่ได้จากการทอดทุเรียน	40.55	29.71
น้ำมันดีเซล	32.80	29.47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

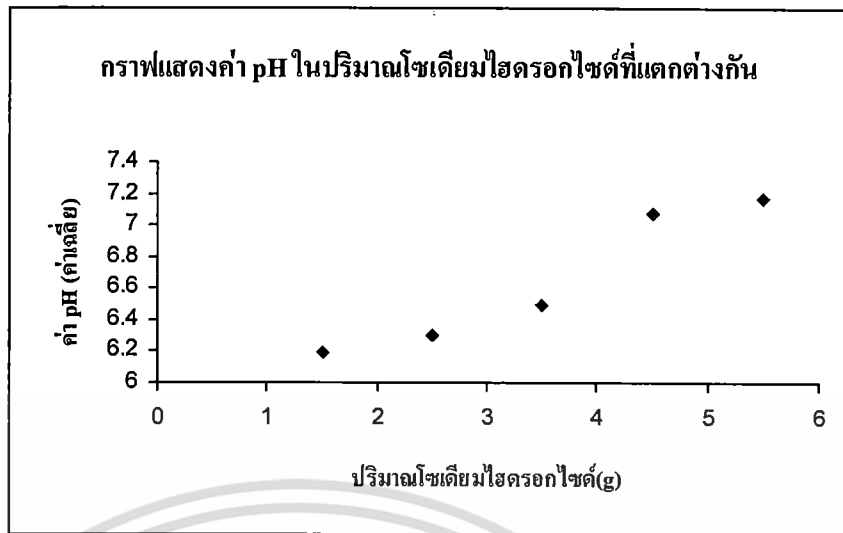
ตารางที่ 5.8 แสดงค่า pH ของน้ำมันไบโอดีเซลจากเครื่องผลิตไบโอดีเซล

ชนิด	ค่า pH
น้ำมันที่ได้จากเครื่องผลิตไบโอดีเซล	6.9

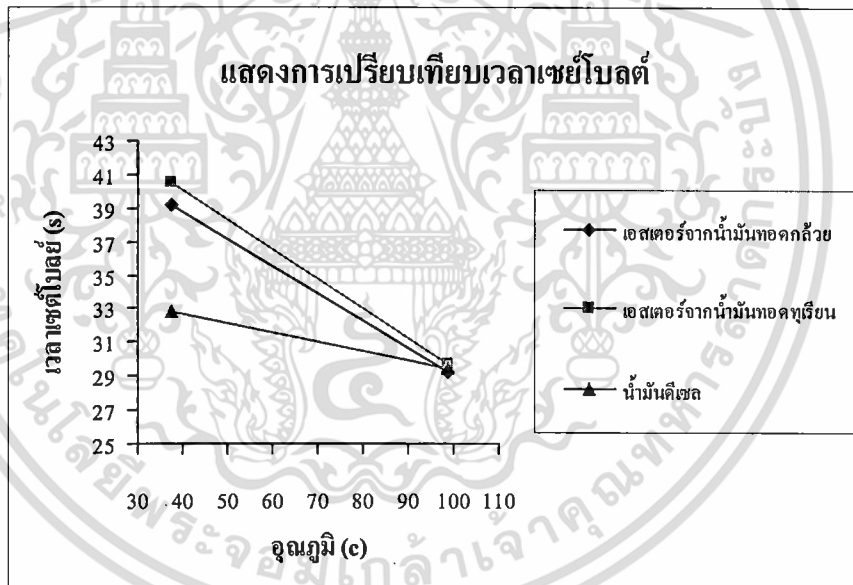


รูปที่ 5.10 การเปรียบเทียบความเร็วรอบในการกวนกับระยะเวลาการตกตะกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.11 การเปรียบเทียบปริมาณ โซเดียมไฮดรอกไซด์กับค่า pH



รูปที่ 5.12 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเวลาเซย์โบลต์กับอุณหภูมิ

5.7 วิธีการทดลอง

5.7.1 วิธีการวัดค่า pH ของน้ำแบบกะ

5.7.1.1 ตวงไบโอดีเซลปริมาตร 500 ml

5.7.1.2 ตวงน้ำไว้สำหรับล้างไบโอดีเซลปริมาตร 1:1 กับไบโอดีเซล

5.7.1.3 วัดค่า pH ของน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 5.7.1.4 ใส่น้ำลงกับไบโอดีเซล ทำการล้างไบโอดีเซลครั้งที่ 1 แล้ววัดค่า pH ของน้ำ
- 5.7.1.5 ใส่น้ำลงกับไบโอดีเซล ทำการล้างไบโอดีเซลครั้งที่ 2 แล้ววัดค่า pH ของน้ำ
- 5.7.1.6 ใส่น้ำลงกับไบโอดีเซล ทำการล้างไบโอดีเซลครั้งที่ 3 แล้ววัดค่า pH ของน้ำ
- 5.7.1.7 ใส่น้ำลงกับไบโอดีเซล ทำการล้างไบโอดีเซลครั้งที่ 4 แล้ววัดค่า pH ของน้ำ
- 5.7.1.8 ใส่น้ำลงกับไบโอดีเซล ทำการล้างไบโอดีเซลครั้งที่ 5 แล้ววัดค่า pH ของน้ำ

### 5.7.2 ผลการทดลองการวัดค่า pH ของน้ำแบบกะ

ตารางที่ 5.9 ค่า pH ของน้ำแบบกะ

ครั้งที่	ค่า pH ของน้ำล้าง			ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	
1	9.5	9.3	9.5	9.4
2	8.1	8.2	7.9	8.1
3	7.0	7.0	7.0	7.0
4	7.0	7.0	7.0	7.0
5	7.0	7.0	7.0	7.0

### 5.7.3 วิธีการทดลองหาจำนวนคอสมันน์

- 5.1.3.1 ตวงไบโอดีเซลปริมาตร 500 ml
- 5.1.3.2 ตวงน้ำไว้สำหรับล้างไบโอดีเซลปริมาตร 1:1 กับไบโอดีเซล
- 5.1.3.3 วัดค่า pH ของน้ำ
- 5.1.3.4 ทำการล้างไบโอดีเซลและวัดค่า pH ของน้ำล้างแต่ละครั้ง

### 5.7.4 ผลการทดลองการหาจำนวนคอสมันน์

ตารางที่ 5.10 ผลการหาจำนวนคอสมันน์สเปรย์

จำนวนคอสมันน์	ค่า pH ของน้ำล้าง			ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	
1	7.5	7.7	7.6	7.6
2	7.1	7.3	7.2	7.2
3	7.0	7.0	7.0	7.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.7.5 วิธีการทดลองและวัดค่า pH ของน้ำแบบต่อเนื่อง

5.1.4.1 เอน้ำมันตัวอย่างใส่บีกเกอร์

5.1.4.2 เปิดเครื่องวัดค่า pH

5.1.4.3 ปรับ Mode ไปที่วัดค่า pH

5.1.4.4 เอาหัวที่ใช้วัดจุ่มในน้ำมันตัวอย่างโดยจุ่มไว้นิ่งๆ

5.1.4.5 อ่านค่า แล้วจดบันทึก

### 5.7.6 ผลการทดลองการวัดค่า pH ของน้ำแบบต่อเนื่อง

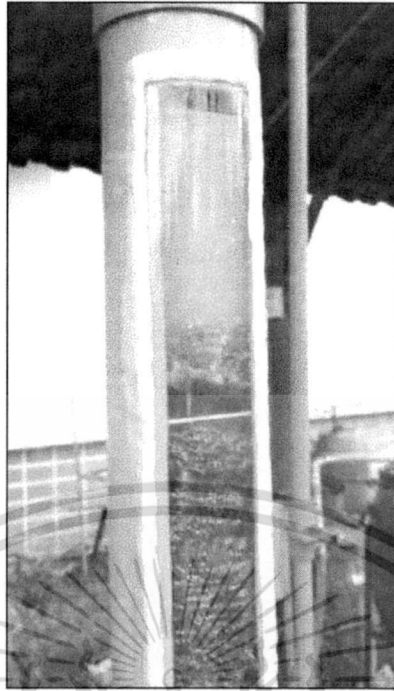
ตารางที่ 5.11 ผลการทดลองวัดค่า pH ของน้ำแบบต่อเนื่อง

ครั้งที่	ค่า pH ของน้ำล้าง			ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	
1	9.3	9.5	9.4	9.4
2	8.1	8.2	8.0	8.1
3	7.0	7.0	7.0	7.0

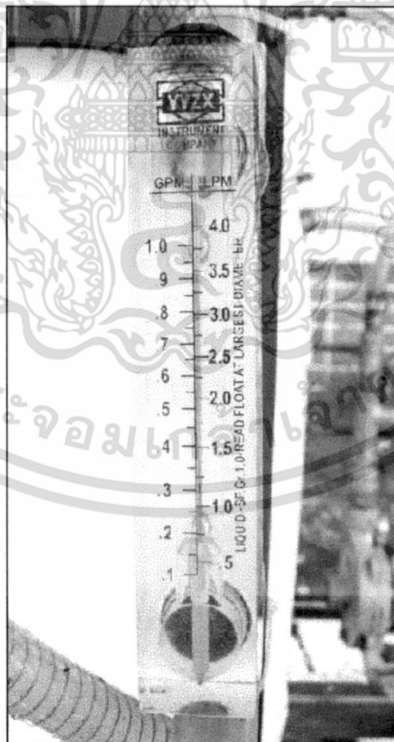
### 5.8 ผลการทดลองแต่ละคอลัมน์

#### 5.8.1 คอลัมน์สเปรย์

เป็นคอลัมน์แรก โดยทำน้ำที่ชะล้างโซเดียมไฮดรอกไซด์ออกก่อน ข้อดีของการล้างแบบนี้คือน้ำจะสัมผัสกับไบโอดีเซลไม่รุนแรงมากนัก ถ้าเกิดการสัมผัสที่รุนแรงจะทำให้เกิดสบู่มาก เพราะคอลัมน์นี้โซเดียมไฮดรอกไซด์ยังมีปริมาณมาก ดังนั้นจะต้องวัดค่า pH ของน้ำล้างซึ่งผ่านทางด้านล้างของคอลัมน์ให้มีค่าเท่ากับน้ำที่ใช้ล้าง หรือมีค่า pH เท่ากับ 7 ในการทดลองจะต้องปรับอัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 3.5 ลิตร/นาที่ โดยปรับที่มาตรวัดอัตราการไหล ดังแสดงในรูปที่ 5.2 และปรับอัตราการไหลของไบโอดีเซลเท่ากับ 3.5 ลิตร/นาที่ ดังแสดงในรูปที่ 5.3 หรือที่อัตราส่วนของน้ำต่อไบโอดีเซล 1:1

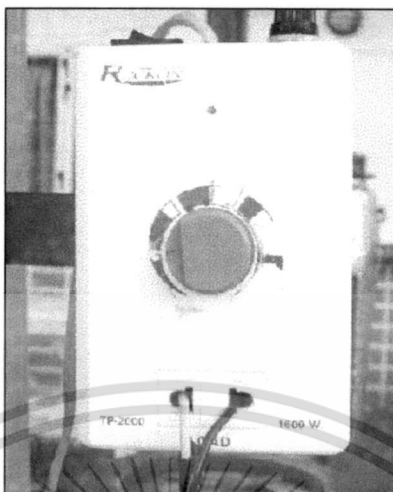


รูปที่ 5.13 คอลัมน์สเตรย์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

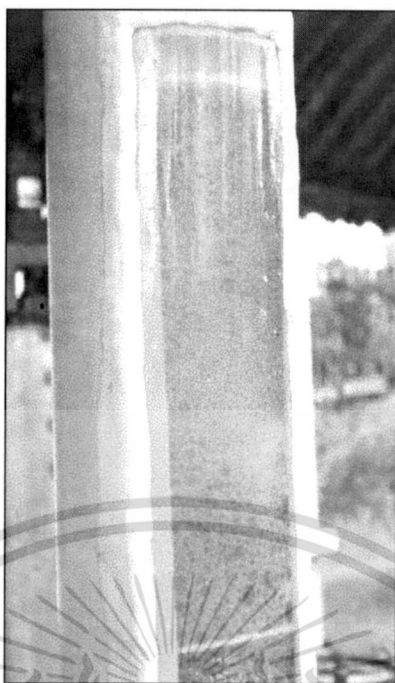
รูปที่ 5.14 มาตรฐานวัดอัตราการไหลของน้ำ



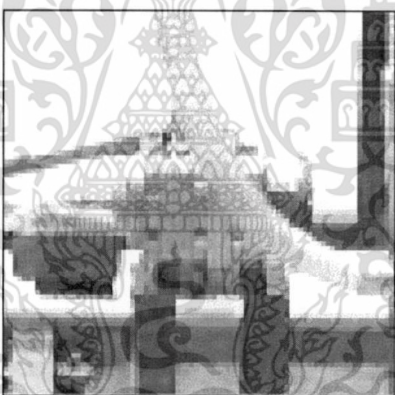
รูปที่ 5.15 ตัวปรับอัตราการไหลของไบโอดีเซล

### 5.8.2 คอลัมน์ป้อนอากาศ

เป็นคอลัมน์ที่สอง โดยทำหน้าที่ชะล้างโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่แขวนลอยอยู่ในไบโอดีเซล การล้างด้วยวิธีนี้จะใช้ฟองอากาศ เพื่อทำให้น้ำที่บรรจุไว้ประมาณครึ่งคอลัมน์กับไบโอดีเซลที่ไหลมาจากคอลัมน์สเปรย์สัมผัสกันมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะส่งผลต่อความสะอาดของไบโอดีเซล แต่ข้อเสียคือ อาจจะมีน้ำปนไปกับฟองอากาศและไบโอดีเซลที่อยู่ทางด้านบนของคอลัมน์ไปสู่คอลัมน์ถัดไป และเนื่องจากน้ำกับน้ำมันสัมผัสกันมากจะทำให้ต้องใช้เวลาประมาณ 30-45 นาที เพื่อที่น้ำสบู่จะแยกชั้นกับไบโอดีเซล ข้อควรระวังในคอลัมน์นี้คือ จะเปลี่ยนน้ำเมื่อค่า pH ของน้ำที่ได้มีค่าเท่ากับ 9 ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับค่า pH ของไบโอดีเซลที่ยังไม่ได้ล้าง แสดงว่าน้ำล้างมีปริมาณความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้น ทำให้ล้างไบโอดีเซลไม่สะอาด



รูปที่ 5.16 คอลัมน์ปี้มอากาศ



รูปที่ 5.17 ปี้มอากาศ

### 5.8.3 คอลัมน์พักแยก

เป็นคอลัมน์ที่สาม โดยทำหน้าที่พักแยกน้ำสบู่และไบโอดีเซลที่ไหลมาจากคอลัมน์ปี้มอากาศ เมื่อนำไบโอดีเซลไปวัดค่าต่างๆ ได้ดังนี้

- กลีเซอรินอิสระ	0.009	%โดยน้ำหนัก
- ปริมาณน้ำ	0.17	%โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.18 คอลัมน์พักแยก

#### 5.8.4 คอลัมน์เกลือ

เป็นคอลัมน์ที่สี่ โดยทำหน้าที่ใช้เกลือดูดปริมาณน้ำในไบโอดีเซลที่ผ่านมาจากคอลัมน์พักแยก เนื่องจากปริมาณน้ำยังไม่ผ่านค่ามาตรฐาน และเมื่อนำไบโอดีเซลไปวัดค่าต่างๆ ได้ดังนี้

- กลิเซอรินอิสระ 0.009 % โดยน้ำหนัก
- ปริมาณน้ำ 0.13 % โดยน้ำหนัก



รูปที่ 5.19 คอลัมน์เกลือ

#### 5.8.5 ถังผลิตภัณฑ์

เป็นถังผลิตภัณฑ์ที่ติดตั้งตัวช่วยไล่ตัวของไบโอดีเซลที่ไหลผ่านมาจากคอลัมน์เกลือ เนื่องจากเกลือยังไม่สามารถดูดซับน้ำจากไบโอดีเซลเพื่อให้ผ่านค่ามาตรฐาน แต่เกลืออาจใช้เป็นทางเลือกหนึ่งในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลดพลังงานในการใช้ฮีตเตอร์ โดยควบคุมถึงผลิตภัณฑ์จะอุ่นน้ำมันที่อุณหภูมิประมาณ 80°C เพื่อให้ น้ำ  
ระเหยออก และเมื่อนำไปโอดีเซลไปวัดค่าต่างๆ ได้ดังนี้

- กลีเซอรินอิสระ	0.009	% โดยน้ำหนัก
- ปริมาณน้ำ	0.07	% โดยน้ำหนัก
- ความหนาแน่น	885	kg/m <sup>3</sup>
- เมทิลเอสเทอร์	97	% โดยน้ำหนัก
- ความหนืด	5.83	cSt (อุณหภูมิ 40 °C)



รูปที่ 5.20 ถึงผลิตภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### สรุปผลการทดลอง

การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบด้วยคลื่นไมโครเวฟแบบต่อเนื่อง ในขั้นตอนแรกคือการลดกรดไขมันอิสระด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยทำการลดกรดไขมันอิสระเริ่มต้นของน้ำมันปาล์มดิบเท่ากับ 5-8 % โดยน้ำหนัก หรือค่าความเป็นกรดเท่ากับ 15-24 mg KOH/g ให้มีค่าน้อยกว่า 6 mg KOH/g ที่สภาวะการลดกรดไขมันอิสระแบบต่อเนื่องคือ ปริมาณเมทานอล 34.5 % โดยปริมาตร, ปริมาณกรดซัลฟิวริก 9.2 % โดยปริมาตร และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์ 84 วินาที ที่กำลังคลื่นสูงสุด 800 วัตต์ มีค่าสารเคมีเท่ากับ 6.21 บาท/ลิตร และปั๊มสารผสมทั้งหมดเข้าเครื่องปฏิกรณ์ด้วยอัตราการไหล 6.6 ลิตร/ชั่วโมง และนำไปผลิตเป็นไบโอดีเซลด้วยคลื่นไมโครเวฟแบบต่อเนื่องได้ความบริสุทธิ์ 83% โดยน้ำหนัก ที่สภาวะ ปริมาณเมทานอล 20 % โดยปริมาตร, ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ ค่ากรดไขมันอิสระ+4 กรัมต่อน้ำมัน 1 ลิตร และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์ 84 วินาที ที่กำลังคลื่นสูงสุด 800 วัตต์ มีค่าสารเคมีเท่ากับ 4.56 บาท/ลิตร และปั๊มสารผสมทั้งหมดเข้าเครื่องปฏิกรณ์ด้วยอัตราการไหล 6.6 ลิตร/ชั่วโมง ในแต่ละกระบวนการจะใช้ค่าไฟฟ้าประมาณ 1.669 หน่วย/ชั่วโมง หรือเท่ากับ 4.172 บาท/ชั่วโมง (หน่วยละ 2.50 บาท)

จากผลการทดลองในห้องแล็บ โดยใช้ น้ำมันพืชที่ใช้แล้วจากการทอดทุเรียนของกลุ่มเกษตรกรและทอดกล้วยจากท่าแซะปริมาณ 1000 ml กับเมทานอลปริมาณ 21 ml เทียบกับความเร็วรอบในการกวน เวลา กวน และปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ โดยในการทดลองคือ อุณหภูมิที่ใช้แล้วให้มีอุณหภูมิอยู่ที่ 60-62 ° ซ หลังจากนั้นก็ใส่โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ละลายกับเมทานอลลงไปทำการผสมกับ น้ำมันพืชที่ใช้แล้วคงอุณหภูมิให้ได้ 60-62 ° ซ พบว่าปริมาณ โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ดี และสมบูรณ์ที่สุด คือการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ปริมาณ 3.5 g ต่อน้ำมัน 1000 ml โดยใช้ความเร็วรอบในการกวนที่ 240 rpm เป็นเวลา 20 นาที จะทำให้เกิดปฏิกิริยากันเสร็จสิ้นสมบูรณ์ และใช้เวลาการตกตะกอนของกลีเซอรินและกัมไม่นาน ประมาณ 10-15 นาที ก็สามารถตกตะกอนลงสู่ก้นภาชนะได้หมด และผลการทดลองยังพบอีกว่าค่า pH ที่ได้ออกมามีค่าเท่ากับ 6.50 ซึ่งแสดงว่าเอสเตอร์ ที่ได้ออกมานั้นมีค่าความเป็นกรดอ่อนๆ เหมาะสำหรับนำไปทดสอบกับเครื่องยนต์ และเรายังพบอีกว่าที่ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น คือการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์มากกว่า 3.5 g ต่อน้ำมัน 1000 ml จะทำให้ค่า pH ที่ได้มีค่าสูงขึ้น เอสเตอร์ที่ได้ออกมาจะมีค่าความเป็นด่างไม่เหมาะสมสำหรับไปทดสอบกับเครื่องยนต์ นอกจากนั้นยังนำเอสเตอร์ที่ได้ไปหาเวลาเซย์โบลต์เทียบกับมาตรฐานน้ำมันดีเซล พบว่าค่าเอสเตอร์ที่ได้ออกมาใช้เวลามากกว่ามาตรฐานน้ำมันดีเซล แสดงว่าเอสเตอร์ที่ได้ออกมานั้นมีค่าความหนืดมากกว่า แต่เมื่อเราให้อุณหภูมิสูงขึ้นที่ 99.8 ° ซ พบว่าเวลาเซย์โบลต์ที่ใช้ใกล้เคียงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ปริมาณต่างๆและความเร็วรอบในการกวน รวมถึงเวลากวน พบว่าให้ปริมาณเอสเทอร์เท่ากันหมด และสำหรับการทดลองที่ดีที่สุดคือการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ปริมาณ 3.5 g ค่อน้ำมัน 1000 ml โดยใช้ความเร็วรอบในการกวนที่ 240 rpm เป็นเวลา 20 นาที

จากการศึกษาการล้างไบโอดีเซลและทดลองเครื่องล้างไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วแบบต่อเนื่อง และได้พัฒนากระบวนการล้างไบโอดีเซลจากแบบกะมาเป็นแบบต่อเนื่องโดยใช้น้ำ รวมทั้งได้สร้างคอลัมน์จำลองตามขนาดที่ต้องการเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเลือกจำนวนคอลัมน์ ใช้หลักการการไหลต่างระดับ คอลัมน์แรกเป็นการสเปรย์จากความหนาแน่นของน้ำและน้ำมันที่มีค่าต่างกันส่งผลให้น้ำและไบโอดีเซลแยกตัวออกจากกัน แล้วไหลต่อเนื่องไปสู่คอลัมน์ ที่ 2 ซึ่งใช้ฟองอากาศเพื่อทำให้น้ำสัมผัสกับน้ำมัน ไบโอดีเซลที่อยู่ด้านบนจะไหลไปสู่คอลัมน์ที่แยกเพื่อการแยกชั้นกันระหว่างน้ำกับไบโอดีเซล จากนั้นไบโอดีเซลจะไหลเข้าสู่คอลัมน์ที่บรรจุเกลืออยู่ด้านบน คุณสมบัติของเกลือสามารถดูดซับน้ำได้ เกลือจะช่วยประหยัดการใช้พลังงานในการใช้ฮีตเตอร์กำจัดน้ำได้ 30 % ของน้ำที่อยู่ในไบโอดีเซล หลังจากนั้นไบโอดีเซลจะผ่านตัวกรองเพื่อกรองเกลือ แล้วเข้าสู่ถังผลิตภัณฑ์ถึงนี้จะติดตั้งฮีตเตอร์เพื่อไล่ไอน้ำ ผลที่ได้จากการทดลองล้างไบโอดีเซลจากเครื่องล้างไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วแบบต่อเนื่องคือ ค่ากลีเซอรินอิสระเท่ากับ 0.009 % โดยน้ำหนัก, ปริมาณน้ำเท่ากับ 0.07 % โดยน้ำหนัก, ความหนาแน่นเท่ากับ  $885 \text{ kg/m}^3$ , ความหนืด ณ อุณหภูมิ  $40^\circ\text{C}$  เท่ากับ 5.83 cSt และเมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 97 % โดยน้ำหนัก

## บรรณานุกรม

- [1] วีรัชย์ เลิศสภาพรสุข และคณะ. การใช้รังสีไมโครเวฟเร่งการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง และผลกระทบของการใช้ไบโอดีเซลในเครื่องยนต์ดีเซลกำเนิดไฟฟ้า ขนาด 100 kW. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ. 2006.
- [2] ทรงพล และพิภพ. การผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชันโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา. 2006.
- [3] Saifuddin, N. and K.H. Chua, “Production of Ethyl Ester (Biodiesel) from used Frying Oil: Optimization of Transesterification Process using Microwave Irradiation Introduction”. University of Tenaga Nasional. 2004.
- [4] สราญกร. [http://news.buddyjob.com/technology/show\\_news-2585-8.html](http://news.buddyjob.com/technology/show_news-2585-8.html) [18 ม.ค.2552]
- [5] Azcan and Danisman. Alkali catalyzed transesterification of cottonseed oil by microwave irradiation. Anadolu University, 26555 Eskisehir, Turkey. 2007.
- [6] Azcan and Danisman. Microwave assisted transesterification of rapeseed oil. Anadolu University, 26555 Eskisehir, Turkey. 2008.
- [7] Lertsathapornsuk และคณะ. Microwave assisted in continuous biodiesel production from waste frying palm oil and its performance in a 100 kW diesel generator. King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok. 2008.
- [8] ทรงยศ ตันพิพัฒน์. 2529. พืชน้ำมัน. หน้า 436-531 พิมพ์ ครั้งที่ 1 คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [9] วิชาการ หมั่นทำการ. “การผลิตและการทดสอบน้ำมันไบโอดีเซล” มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปี 2545
- [10] สมิตร โฉมเฉลา รัตพงษ์ วงศ์พิมพ์รัสมิ พ.ศ. 2525 การ “ศึกษาเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันดีเซล”; ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร.
- [11] Esposito, A., Fluid power with application 3<sup>rd</sup> ed., Prentice Hall, New Jersey, 1994
- [12] พิสมัย เจนวนิชปัญญากุล สุมาลัย ศรีกำไลทอง และสราวุธ วรสุมันต์. 2424 “การใช้น้ำมันพืชทดแทนน้ำมันดีเซลเครื่องยนต์ดีเซล.” สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. [13] ศ.ดร.ปริดา วิบูลย์สวัสดิ์. “ไบโอดีเซลพลังงานเพื่อทางเลือกของชาติ”, หน้า 112 วิศวกรรมสาร ปี 2544

- [14] ศ.ดร. กำพล ประทีปชัยกูร .“ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน” ภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [15] Robert B. Freedman, Jeremy Mead, Christopher Oldfield, Brian H. Robinson and Paul D. I. Fletcher. “Reactivity of  $\alpha$ -chymotrypsin in water-in-oil microemulsions.” Colloids and Surfaces., 10(1984): 193-203
- [16] Cvengros and Povazanec. “Production and treatment of rapeseed oil methyl esters as alternative fuels for diesel engines.” Bioresource Technology., 55(1996): 145-150.
- [17] Dawei Ma, Zhaochun Ma, Alan P. Kozikowski, Sergey Pshenichkin and Jarda T. Wroblewski. “Synthesis and biological evaluation of two analogues of (S)- $\alpha$ -methyl-3-carboxyphenylalanine.” Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters., 8(1998): 2447-2450
- [18] ชاکริต ทองอุไร และ คณะ . คู่มือการผลิตไบโอดีเซล (เมทิลเอสเทอร์)., 2544.
- [19] มุขิตา ชันบูรพา และ วิชาการ หมั่นทำการ. “การผลิตและการทดสอบไบโอดีเซล.” มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์., 2545.
- [20] Berriosa and Skeltonb.“Comparison of purification methods for biodiesel.”Chemical Engineering Journal., 144 (2008): 459–465.
- [21] กำพล ประทีปชัยกูร. “ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน.” ภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [22] พิสมัย เจนวนิชปัญญานุกูล สุมาลัย ศรีกำไลทอง และ สราวุธ วรสุมนต์. “การใช้น้ำมันพืชทดแทนน้ำมันดีเซลเครื่องยนต์.” สภาวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2524.
- [23] ปรีดา วิบูลย์สวัสดิ์. “ไบโอดีเซลพลังงานเพื่อทางเลือกของชาติ.” วิศวกรรมสาร (2544): 122
- [24] ชวริน โปยมรัตน์ ชีรวัฒน์ อุดตะโมท และ จันทพร ผลากรกุล. “การประยุกต์ใช้หลักการดูดซับในการออกแบบ Salt Filter สำหรับกำจัดน้ำที่แขวนลอยในน้ำมันดีเซล.” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 16 (กรกฎาคม – กันยายน 2549).
- [25] สมิตร โจนเมลา และ รัตพงษ์ วงศ์พิมพ์รัศมี. “การศึกษาเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันดีเซล.”, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, 2525.
- [26] โกวิทช์ ชนะดี นิรุติ โตะแอะ และ ณัฐพร ช่อเรืองศักดิ์. “เครื่องผลิตไบโอดีเซลโดยใช้น้ำมันพืชใช้แล้ว.” ปริญญาานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2548.
- [27] Esposito, A., Fluid power with application. 3<sup>rd</sup> ed., Prentice Hall, New Jersey, 1994.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1. การคำนวณค่าไฟฟ้า

### สูตรการคำนวณ

$$\text{พลังงานไฟฟ้า (ยูนิท)} = \frac{\text{กำลังไฟฟ้า (วัตต์)} \times \text{เวลาที่ใช้งาน (ชั่วโมง)}}{1000}$$

เช่น ในกระบวนการลดกรดไขมันอิสระมีการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าดังนี้

- เตอบไมโครเวฟขนาด	800	วัตต์
- ฮีตเตอร์ขนาด	2000	วัตต์
- บิ๊มเคมีขนาด	35	วัตต์

(ค่าไฟฟ้ายูนิทละ 2.50 บาท)

ถ้ากำหนดให้อุปกรณ์ไฟฟ้าเปิดใช้งานเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ดังนั้นภายใน 1 ชั่วโมง การใช้พลังงานไฟฟ้ามีดังนี้

$$\begin{aligned} \text{พลังงานไฟฟ้า (ยูนิท)} &= \frac{\text{กำลังไฟฟ้า (วัตต์)} \times \text{เวลาที่ใช้งาน (ชั่วโมง)}}{1000} \\ &= \frac{(800 \times 1) + (2000 \times 1) + (35 \times 1)}{1000} \end{aligned}$$

$$\text{พลังงานไฟฟ้า (ยูนิท)} = 2.835 \text{ kW.hr หรือ } = 2.835 \text{ หน่วย}$$

$$\text{ดังนั้น จะต้องเสียค่าไฟฟ้า} = 2.835 \times 2.50 = 7.088 \text{ บาท/ชั่วโมง}$$

แต่จากการทดลองฮีตเตอร์จะใช้เวลาประมาณ 25 นาที เพื่อทำให้น้ำมันปริมาณ 50 ลิตร (เต็มถัง) มีอุณหภูมิ 60°C และจะทำงานอีกครั้งหลังจากผ่านไป 35 นาที ดังนั้นการใช้พลังงานไฟฟ้ามีดังนี้

$$\begin{aligned} \text{พลังงานไฟฟ้า (ยูนิท)} &= \frac{\text{กำลังไฟฟ้า (วัตต์)} \times \text{เวลาที่ใช้งาน (ชั่วโมง)}}{1000} \\ &= \frac{(800 \times 1) + (2000 \times 0.417) + (35 \times 1)}{1000} \end{aligned}$$

$$\text{พลังงานไฟฟ้า (ยูนิท)} = 1.669 \text{ kW.hr หรือ } = 1.669 \text{ หน่วย}$$

$$\text{ดังนั้น จะต้องเสียค่าไฟฟ้า} = 1.669 \times 2.50 = 4.172 \text{ บาท/ชั่วโมง}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. การคำนวณค่าสารเคมี

ราคาเมทานอล	3000 บาท/200 ลิตร	เท่ากับ 0.015 บาท/ลิตร
ราคากรดซัลฟูริก	500 บาท/40 ลิตร	เท่ากับ 0.0125 บาท/ลิตร
ราคาโซเดียมไฮดรอกไซด์	780 บาท/25 กิโลกรัม	เท่ากับ 0.0312 บาท/กรัม

### 2.1 ค่าสารเคมีในกระบวนการลดกรดไขมันอิสระ

จากสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการลดกรดไขมันอิสระ

- ปริมาณเมทานอล 34.5 % โดยปริมาตร
- ปริมาณกรดซัลฟูริก 8.28 % โดยปริมาตร

ดังนั้น จะมีค่าสารเคมีเพื่อลดกรดไขมันอิสระของน้ำมันปาล์มดิบปริมาณ 100 มิลลิลิตร เท่ากับ

$$(34.5 \times 0.015) + (8.28 \times 0.0125) = 0.621 \text{ บาท หรือ } 6.21 \text{ บาท/ลิตร}$$

### 2.2 ค่าสารเคมีในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

จากสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

- ปริมาณเมทานอล 20.0 % โดยปริมาตร
- ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาณกรดไขมันอิสระ+4 (กรัม)

ดังนั้น จะมีค่าสารเคมีเพื่อผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มลดกรดปริมาณ 100 มิลลิลิตร (กรดไขมันอิสระ 1 % โดยปริมาตร เท่ากับ

$$(20.0 \times 0.015) + ((4 + 1) \times 0.0312) = 0.456 \text{ บาท หรือ } 4.56 \text{ บาท/ลิตร}$$

### 2.3 สรุปค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับสารเคมี

ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยคลื่นไมโครเวฟจะใช้ค่าสารเคมีดังนี้

- กระบวนการลดกรดไขมันอิสระ 6.21 บาท ต่อ น้ำมันปาล์มดิบ 1 ลิตร
- กระบวนการผลิตไบโอดีเซล 4.56 บาท ต่อ น้ำมันลดกรดไขมันอิสระ 1 ลิตร

รวม 10.77 บาท

## การคำนวณค่าไฟฟ้า สำหรับขั้นตอนการล้าง

ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วมีการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าดังนี้

- ฮีตเตอร์ขนาด 1500 วัตต์
- ฮีตเตอร์ขนาด 1500 วัตต์

- ปุ่มเคมีขนาด	341	วัตต์
- ปุ่มเคมีขนาด	45	วัตต์
- ปุ่มเคมีขนาด	35	วัตต์
- มอเตอร์	25	วัตต์
- ปุ่มอากาศ	25	วัตต์

ถ้ากำหนดให้อุปกรณ์ไฟฟ้าเปิดใช้งานเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ดังนั้นภายใน 1 ชั่วโมง การใช้พลังงานไฟฟ้ามีดังนี้ (กำหนดให้ค่าไฟฟ้ายูนิตละ 2.50 บาท)

$$\begin{aligned}
 \text{พลังงานไฟฟ้า (ยูนิต)} &= \frac{\text{กำลังไฟฟ้า (วัตต์)} \times \text{เวลาที่ใช้งาน (ชั่วโมง)}}{1000} \\
 &= \frac{(1500 \times 0.24) + (1500 \times 1.5) + (341 \times 0.16) + (45 \times 0.16)}{1000} \\
 &\quad + \frac{(35 \times 1) + (25 \times 1.5) + (25 \times 1)}{1000} \\
 &= 2.77
 \end{aligned}$$

พลังงานไฟฟ้า (ยูนิต) 2.77 kW.hr หรือ 2.77 หน่วย

ดังนั้น จะต้องเสียค่าไฟฟ้า =  $2.77 \times 2.50 = 6.92$  บาท/ชั่วโมง

## 2. การคำนวณค่าสารเคมี

ราคามทานอล	3000 บาท/200 ลิตร	เท่ากับ 0.015 บาท/ลิตร
ราคาโซเดียมไฮดรอกไซด์	780 บาท/25 กิโลกรัม	เท่ากับ 0.0312 บาท/กรัม
ราคาน้ำมันพืชใช้แล้ว	200 บาท/18 ลิตร	เท่ากับ 11.111 บาท/ลิตร

### 2.1 ค่าสารเคมีในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

จากสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ปริมาณเมทานอล 23.0 % โดยปริมาตร
- ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาณกรดไขมันอิสระ + 4 กรัม

ดังนั้น จะมีค่าสารเคมีเพื่อผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้ว เท่ากับ

$$(23.0 \times 0.015) + ((4 + 0.2) \times 0.0312) = 0.476 \text{ บาท หรือ } 4.76 \text{ บาท/ลิตร}$$

## 2.2 คำนวณในกระบวนการล้างไบโอดีเซล

จากสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการล้างไบโอดีเซล คือ 1: 1 ของไบโอดีเซลและน้ำทำการล้างทั้งหมด 3 ครั้ง

- ไบโอดีเซล 1 ลิตร

- น้ำ 3 ลิตร

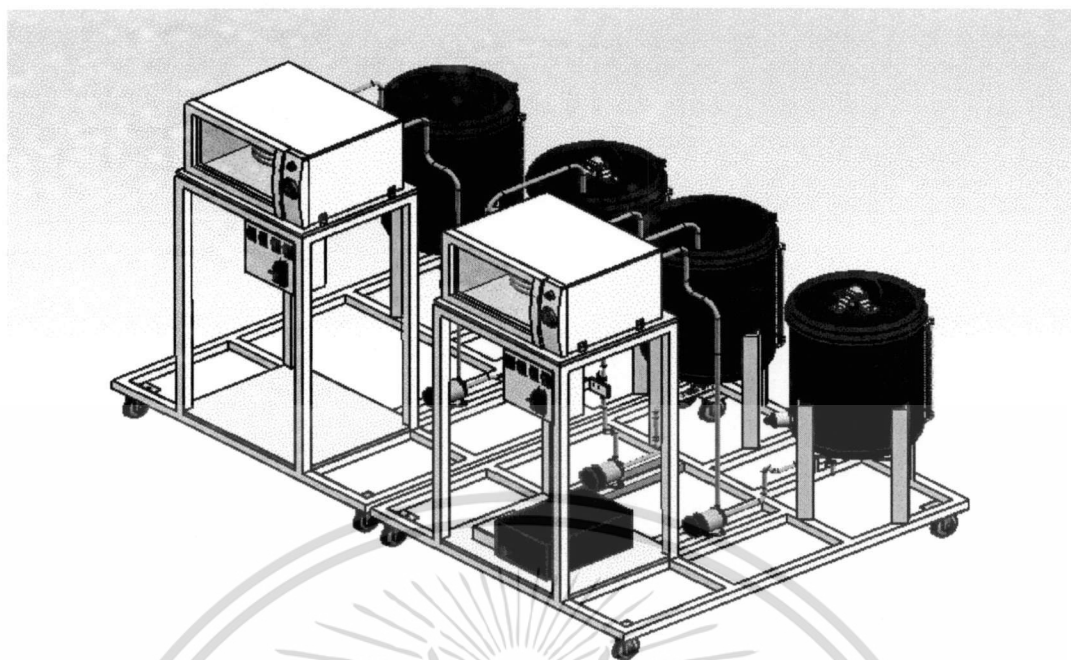
(กำหนดให้น้ำ 1000 ลิตร เท่ากับ 16 บาท จะได้ค่าน้ำเท่ากับ 0.016/ลิตร)

ดังนั้นค่าน้ำที่ใช้ในกระบวนการล้างไบโอดีเซล เท่ากับ

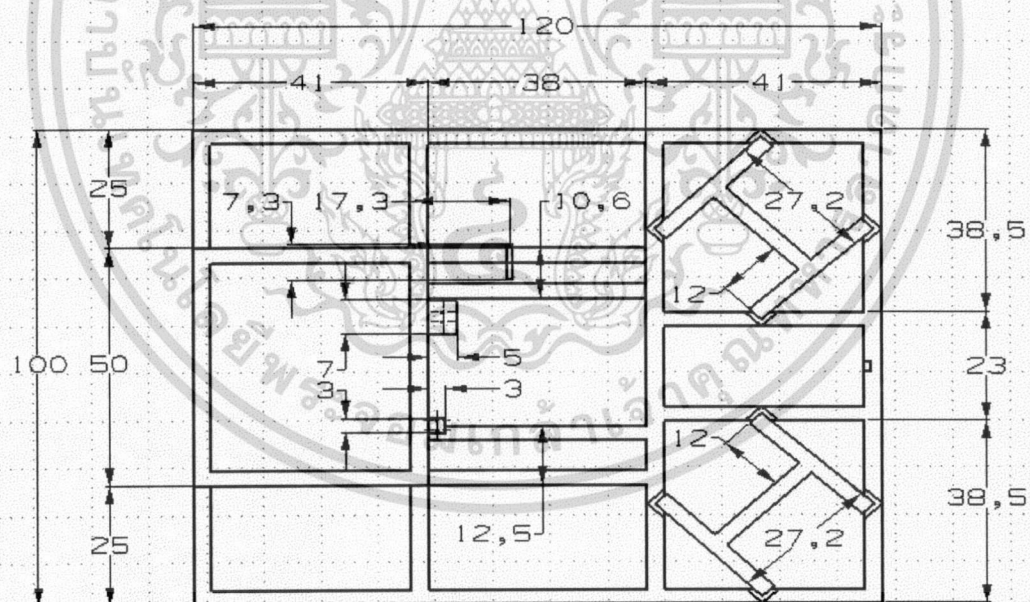
$$0.016 \times 3 = 0.048 \text{ บาท / ไบโอดีเซล 1 ลิตร}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



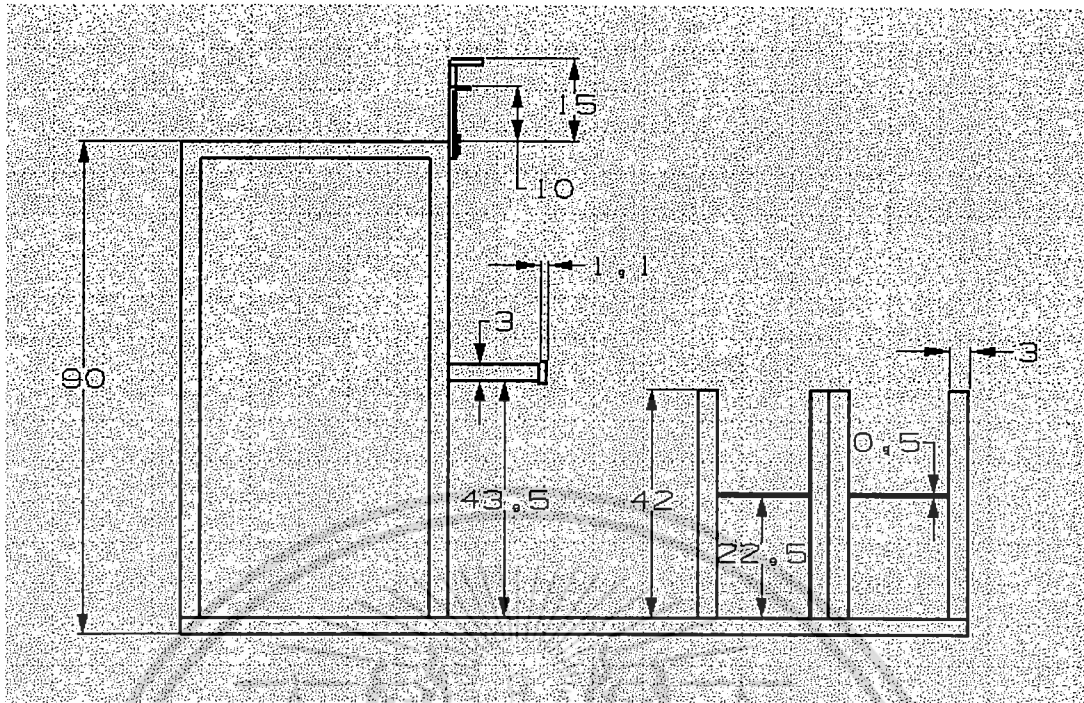
รูปที่ ผ.ข.1 โครงสร้างโดยรวมเครื่องผลิตไบโอดีเซล



มาตราส่วน 1:1 ซม.

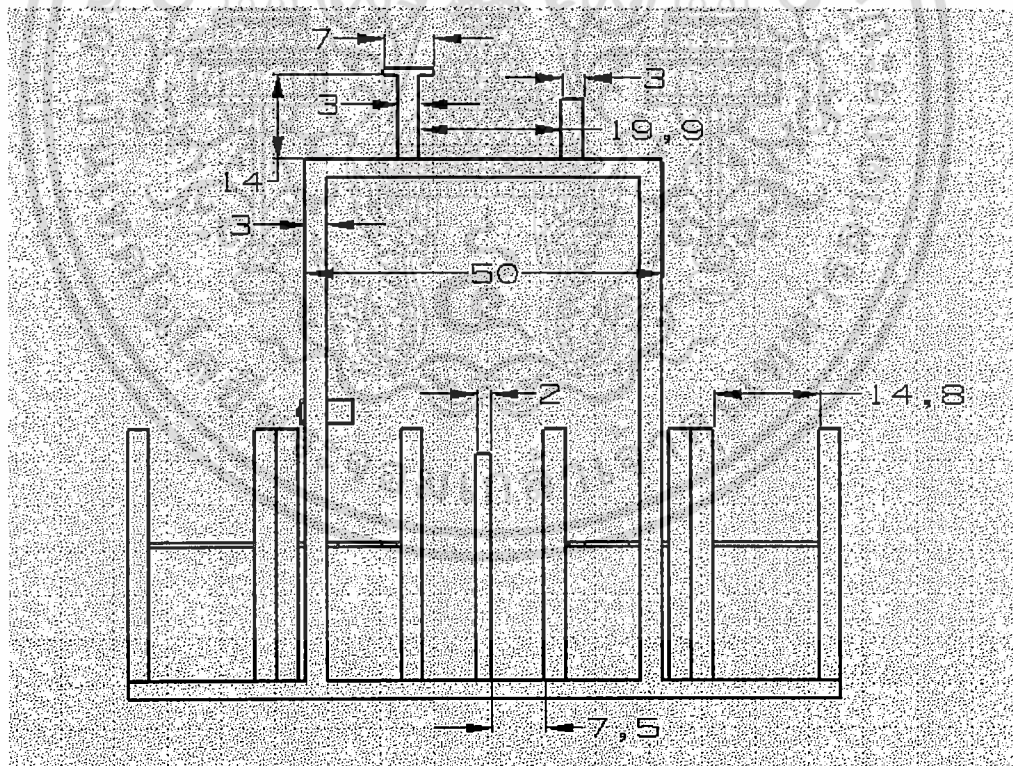
รูปที่ ผ.ข.2 โครงสร้างมองด้านบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



มาตราส่วน 1:1 ซม.

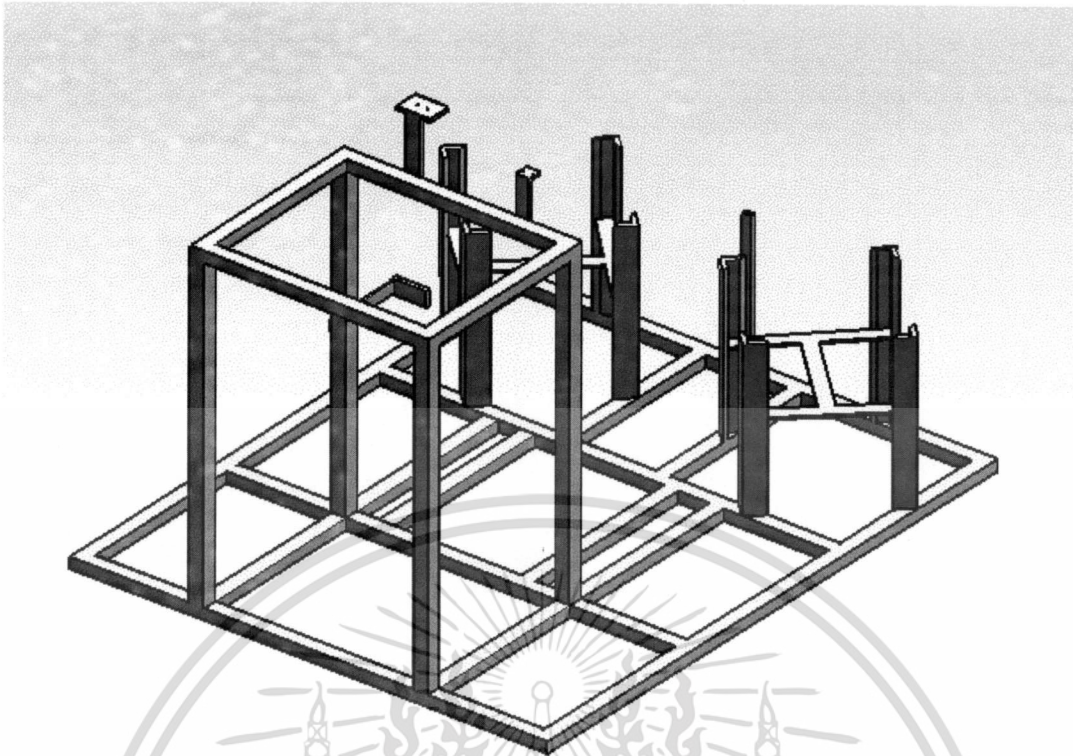
รูปที่ ผ.ข.3 โครงสร้างมองด้านข้าง



มาตราส่วน 1:1 ซม.

รูปที่ ผ.ข.4 โครงสร้างมองด้านหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



มาตราส่วน 1: 1 ซม.

รูปที่ ผ.ข.5 โครงยึดตัวถังต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.ข.1 รายการชิ้นส่วนอุปกรณ์ของชุดทดลอง

รายการ	จำนวน	หน่วย	ขนาด
<b>ชุดกระบวนการลดกรด</b>			
-ไมโครเวฟ	1	เครื่อง	800 W
-ท่อเทปล่อน	2	เมตร	10×12 mm
-เข็มฉีครัดท่อ	4	ตัว	12-16 mm
-บอลวาล์ว STL	1	ตัว	½
-ข้อต่อตรง STL	1	ตัว	¼
-หางปลาไหลทองเหลือง	4	ตัว	¼
-ลดเหลี่ยมทองเหลือง	1	ตัว	½
-สายยางใสมีลวด	4	ตัว	12×18 mm
<b>ถังกวน (กระบวนการลดกรด)</b>			
-มอเตอร์ปั้มน้ำฝน	1	ตัว	DC 12 V
-Heater	1	ตัว	2000 W
-เทอร์โมสตัท	1	ตัว	30-110°C
-ถังพลาสติก	1	ถัง	50 L
-สายยางใสวัดระดับน้ำ	1	เส้น	0.5 m
-ข้อง STL	3	ตัว	½
-บอลวาล์วหุบ AZUMA	4	ตัว	½
-หางปลาไหล	7	ตัว	½
-สามทาง STEEL	2	ตัว	½
-นipple STEEL	6	ตัว	½
-ต่อตรงทองเหลือง	2	ตัว	½
-ลดเหลี่ยม	1	ตัว	½
-สายยางใสมีลวด	1	เมตร	12×18 mm
-ปั้มน้เคมี SANSO	1	ตัว	35 W
-นipple STL	1	ตัว	¼
-เข็มฉีครัดสายยาง	7	ตัว	16-22 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.ข.1 รายการชิ้นส่วนอุปกรณ์ของชุดทดลอง (ต่อ)

รายการ	จำนวน	หน่วย	ขนาด
<b>ถังเมทรอกไซด์</b>			
-ถังพลาสติก	1	ถัง	50 L
-วาล์วซูป AZUMA	4	ตัว	½
-สามทาง STEEL	2	ตัว	½
-หางปลาไหล	7	ตัว	½
-ข้องอ	2	ตัว	½
-สายยางใสมีลวด	1	เมตร	12×18 mm
-น๊อปเป็ล STEEL	6	ตัว	½
-ต่อตรง STEEL	1	ตัว	½
-เข็มขัดรัดสายยาง	7	ตัว	16-22 mm
-กรวยกรอง	1	ตัว	
-ปั๊มเคมี SANSO	1	ตัว	35 W
<b>ระบบไฟฟ้า (กระบวนกรลดกรด)</b>			
-กล่องควบคุม	1	กล่อง	8"×8"
-เบรกเกอร์	1	ตัว	20 A
-สวิต ON-OFF	4	ตัว	220 W
-ปลั๊กไฟ	1	ตัว	220 V
-หม้อแปลง	1	ตัว	110 W
-หม้อแปลง	1	ตัว	12 W
<b>กระบวนกรผลิตไบโอดีเซล</b>			
-ไมโครเวฟ	1	เครื่อง	800 W
-ท่อเทปลอน PTFA	2	เมตร	10×12 mm
-เข็มขัดรัดสายยาง	2	ตัว	9-13 mm
-เข็มขัดรัดสายยาง	2	ตัว	16-22 mm
-บอลวาล์ว STL	1	ตัว	½
-ข้อต่อตรง STL	1	ตัว	¼
-หางปลาไหลทองเหลือง	4	ตัว	¼
-ลดเหลี่ยมทองเหลือง	2	ตัว	½
-สายยางใสมีลวด	1	เมตร	12×18 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.ข.1 รายการชิ้นส่วนอุปกรณ์ของชุดทดลอง (ต่อ)

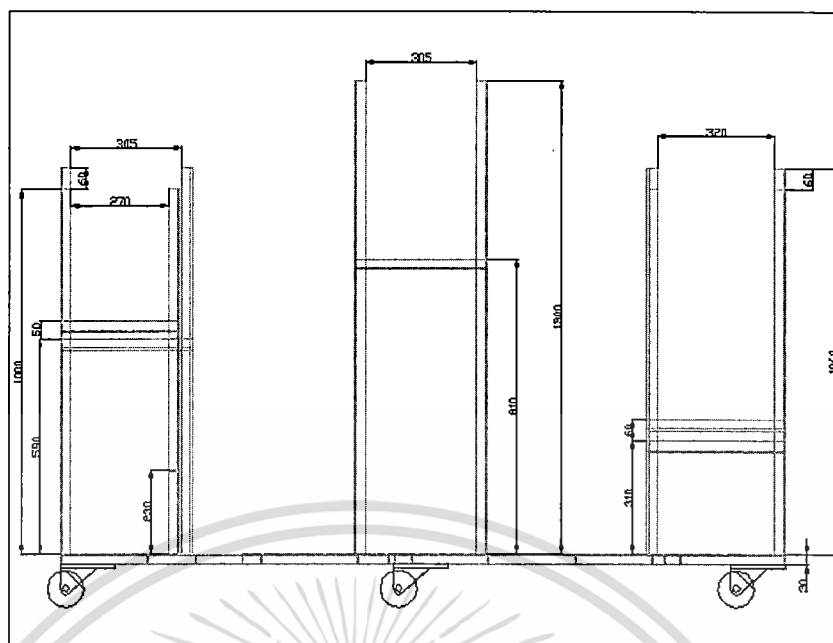
รายการ	จำนวน	หน่วย	ขนาด
<b>ถังกวน (กระบวนการผลิตไบโอดีเซล)</b>			
-มอเตอร์ปั้มน้ำฝน	1	ตัว	DC 12V
-Heater	1	ตัว	2000 W
-เทอร์โมสแตท	1	ตัว	30-110oC
-ถังพลาสติก	1	ถัง	50 L
-สายยางใสวัดระดับน้ำ	1	เส้น	0.5 m
-ข้องอ STL	3	ตัว	½
-บอลวาล์วซูป AZUMA	4	ตัว	½
-หางปลาไหล	7	ตัว	½
-สามทาง STEEL	2	ตัว	½
-นิปเปิ้ล STEEL	7	ตัว	½
-ข้อต่อตรง STEEL	2	ตัว	½
-ลดเหลี่ยม	1	ตัว	½
-สายยางใสมีลวด	1	เมตร	12×18 mm
-ปั้มเคมี SANSO	1	ตัว	35 W
-เข็มฉีครัดสายยาง	7	ตัว	16-22 mm.
-เข็มฉีครัดสายยาง	1	ตัว	9-13 mm.
<b>ถังพักไบโอดีเซล</b>			
-ถังพลาสติก	1	ถัง	50 L
-บอลวาล์วซูป AZUMA	1	ตัว	½
-ลดเหลี่ยม	1	ตัว	½
-สายยางใสมีลวด	1	เมตร	12×18 mm
-นิปเปิ้ล STEEL	1	ตัว	½
-ข้อต่อตรง STEEL	1	ตัว	½

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

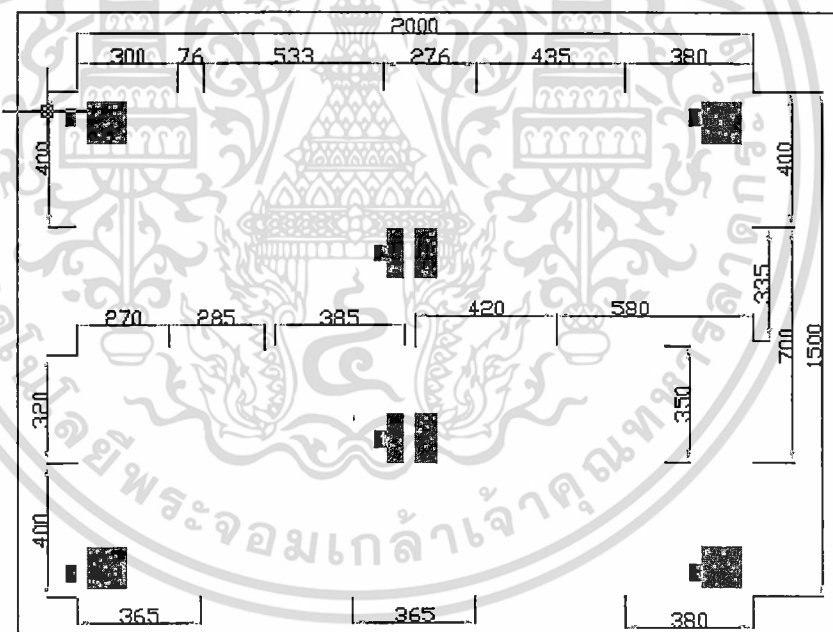
ตารางที่ ผ.ข.1 รายการชิ้นส่วนอุปกรณ์ของชุดทดลอง (ต่อ)

รายการ	จำนวน	หน่วย	ขนาด
<b>ระบบไฟฟ้า (กระบวนการผลิตไบโอดีเซล)</b>			
-กล่องควบคุม	1	กล่อง	8×8 นิ้ว
-เบรกเกอร์	1	ตัว	20 A
-สวิตช์ ON-OFF	4	ตัว	220 V
-ปลั๊กไฟ	1	ตัว	220 V
-หม้อแปลง	1	ตัว	110 W
-หม้อแปลง	1	ตัว	12 W
เหล็กกล่อง	3	เส้น	25×25×1 mm
เหล็กฉาก	1	เส้น	25×25×1 mm
ลวดเป็นยาง	8	ตัว	mm 3 นิ้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

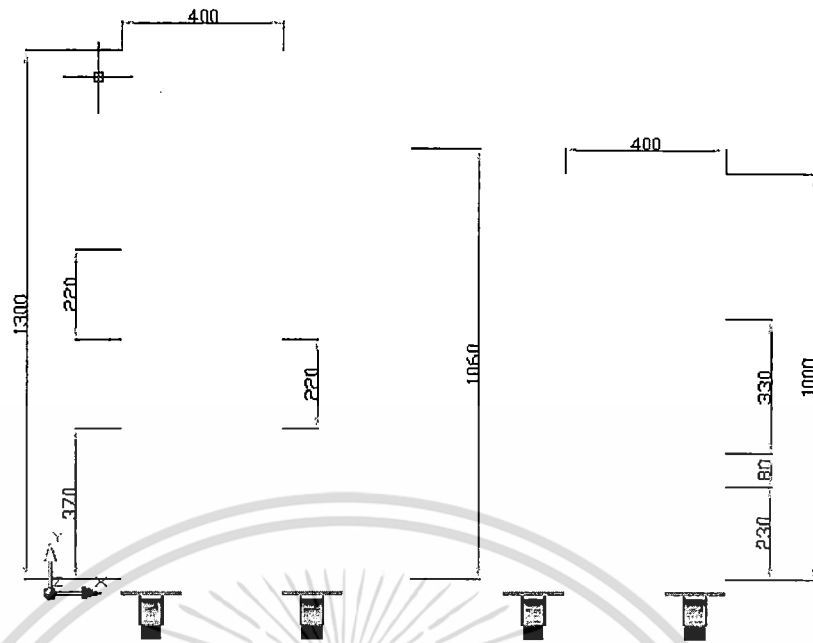


รูปที่ ผ.ข.6 โครงสร้างมองด้านข้าง

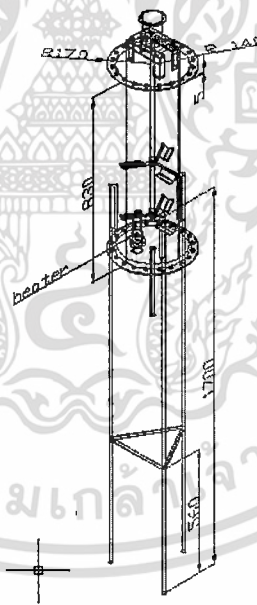


รูปที่ ผ.ข.7 โครงสร้างมองด้านบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

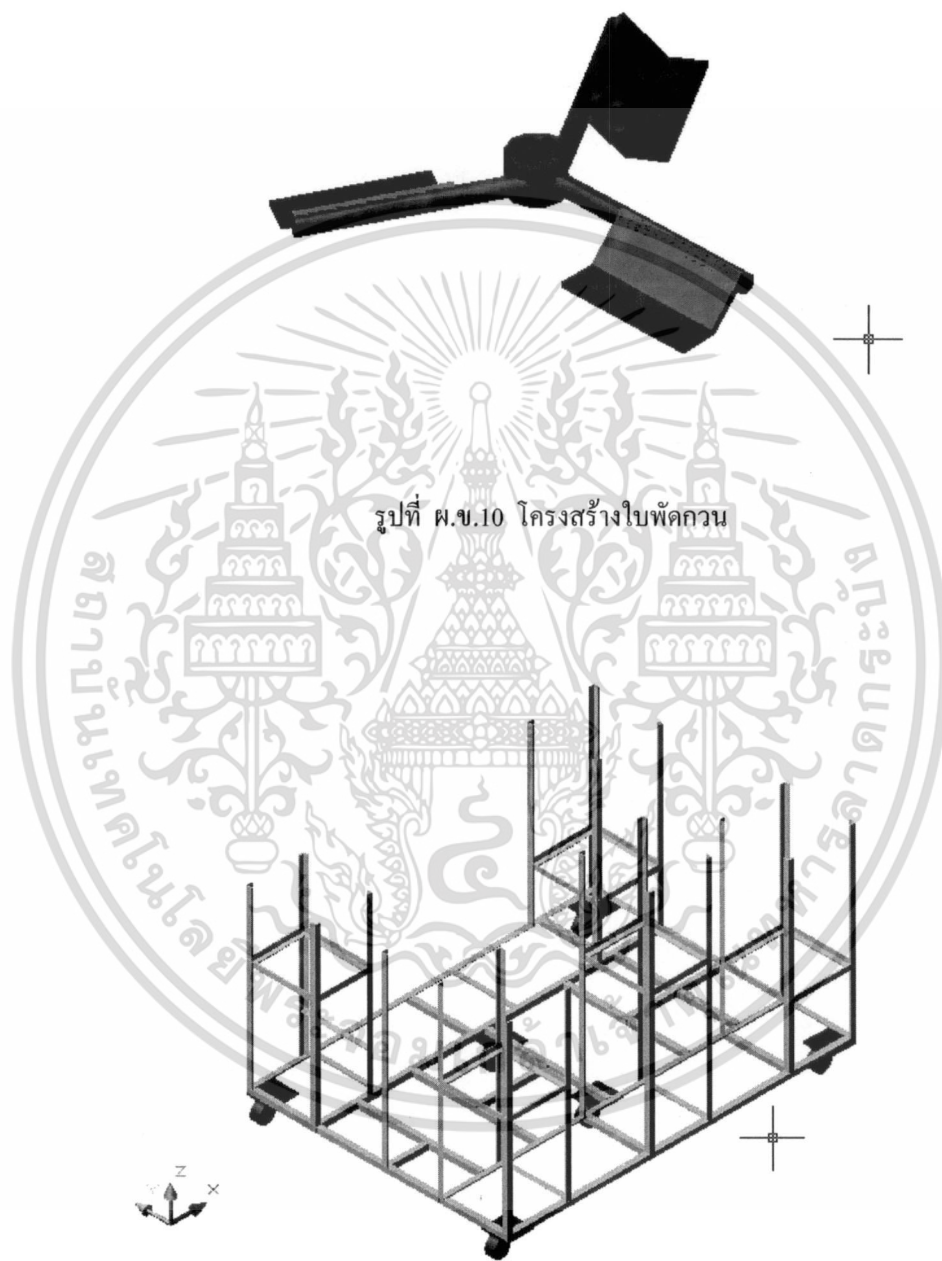


รูปที่ ผ.ข.8 โครงสร้างมองด้านหน้า

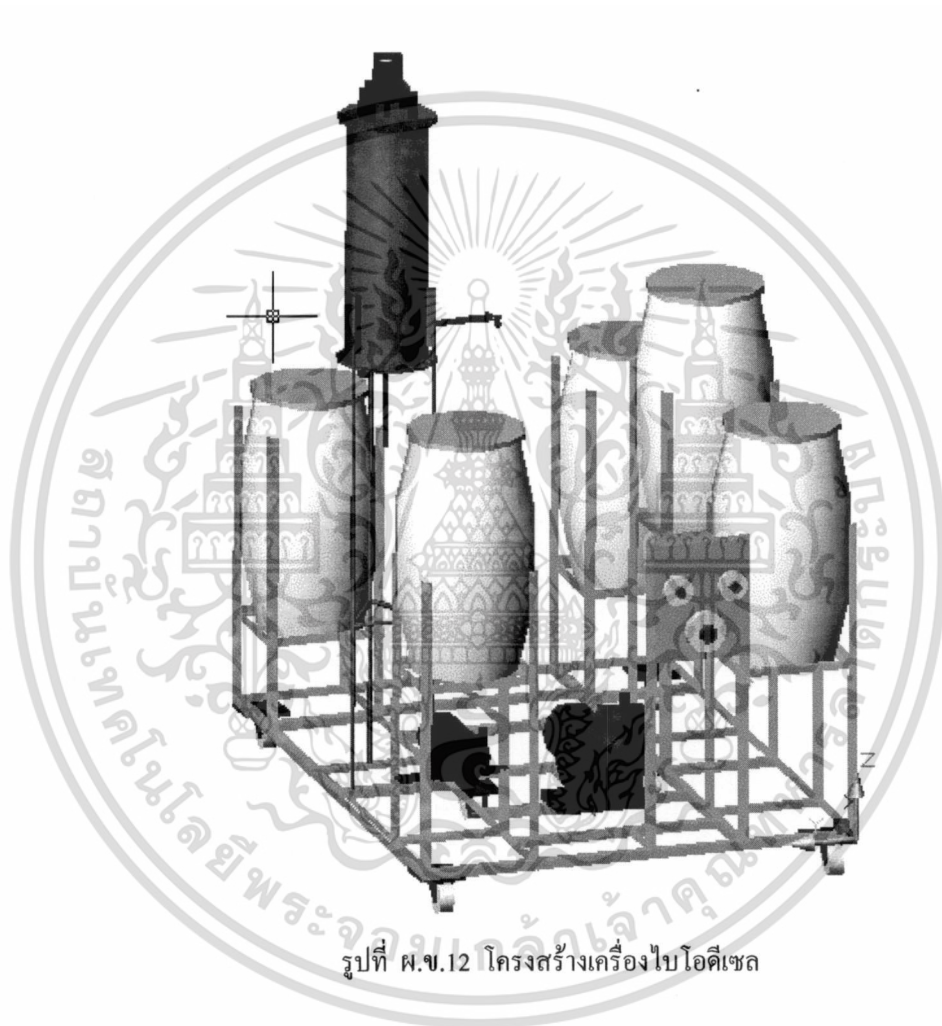


รูปที่ ผ.ข.9 โครงสร้างถึงปฏิกรณ์และใบพัดคววน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

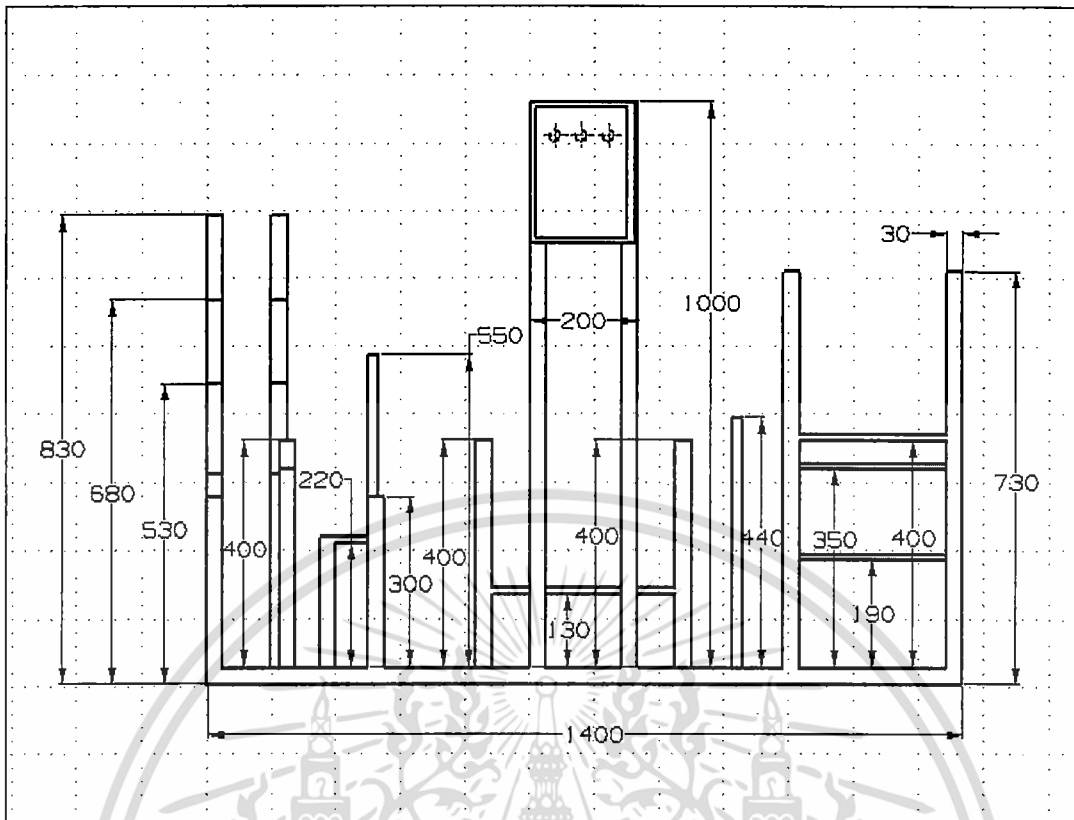


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



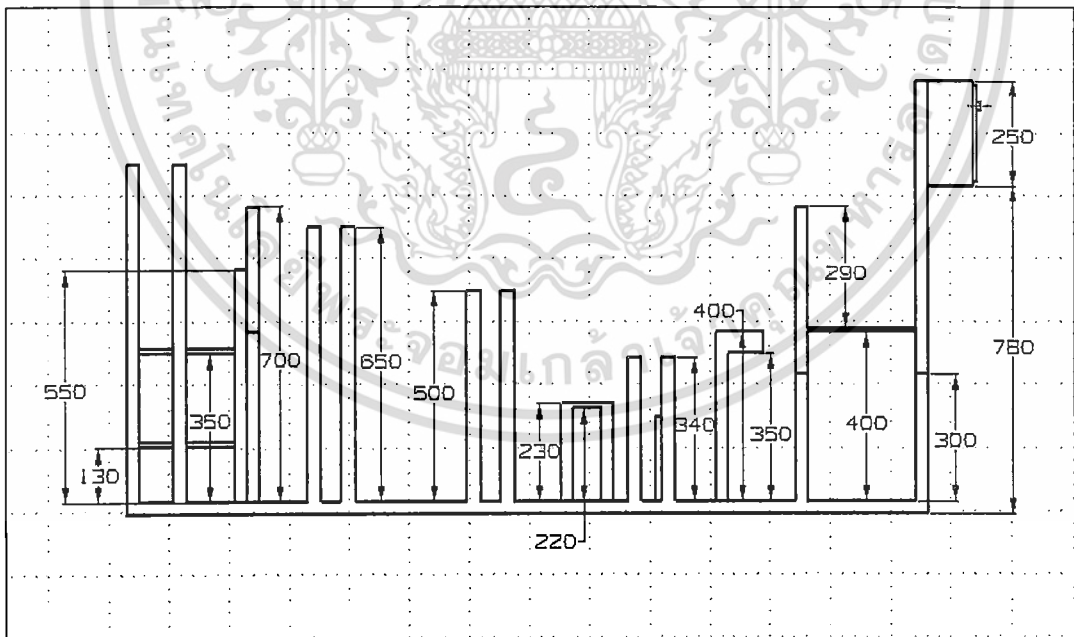
รูปที่ ผ.ข.12 โครงสร้างเครื่องไอน้ำไอซีเซล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



มาตราส่วน 1:1 มิลลิเมตร

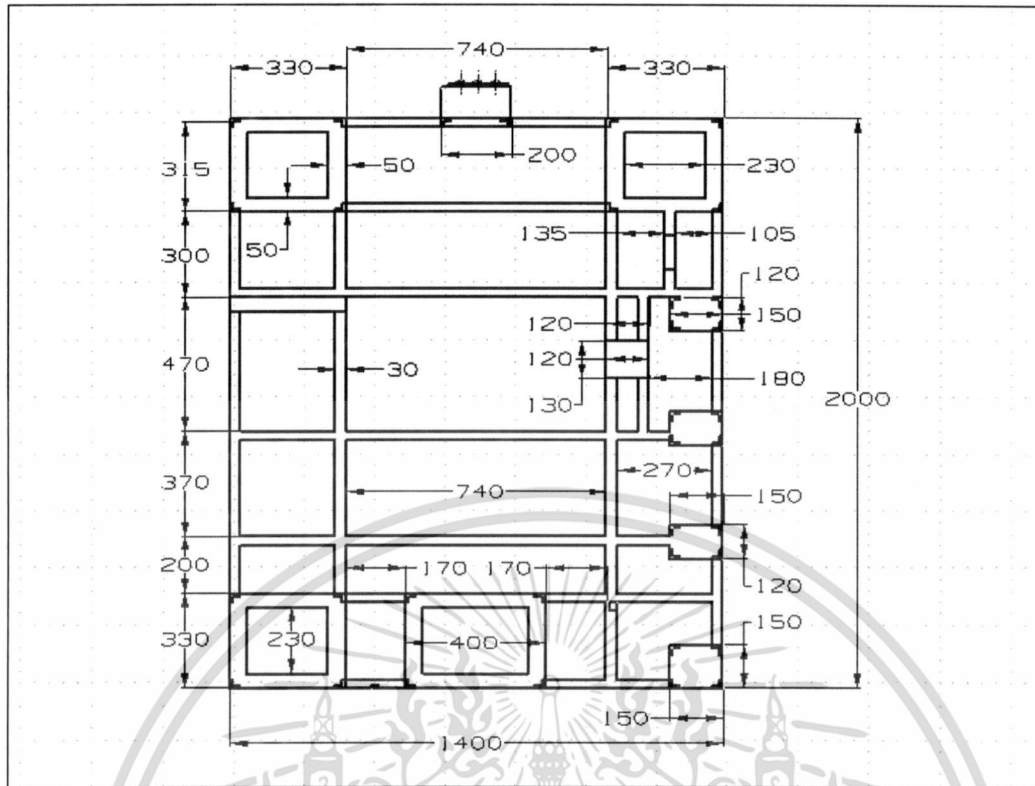
รูปที่ ผ.ข.13 โครงสร้างมองด้านหน้า



มาตราส่วน 1:1 มิลลิเมตร

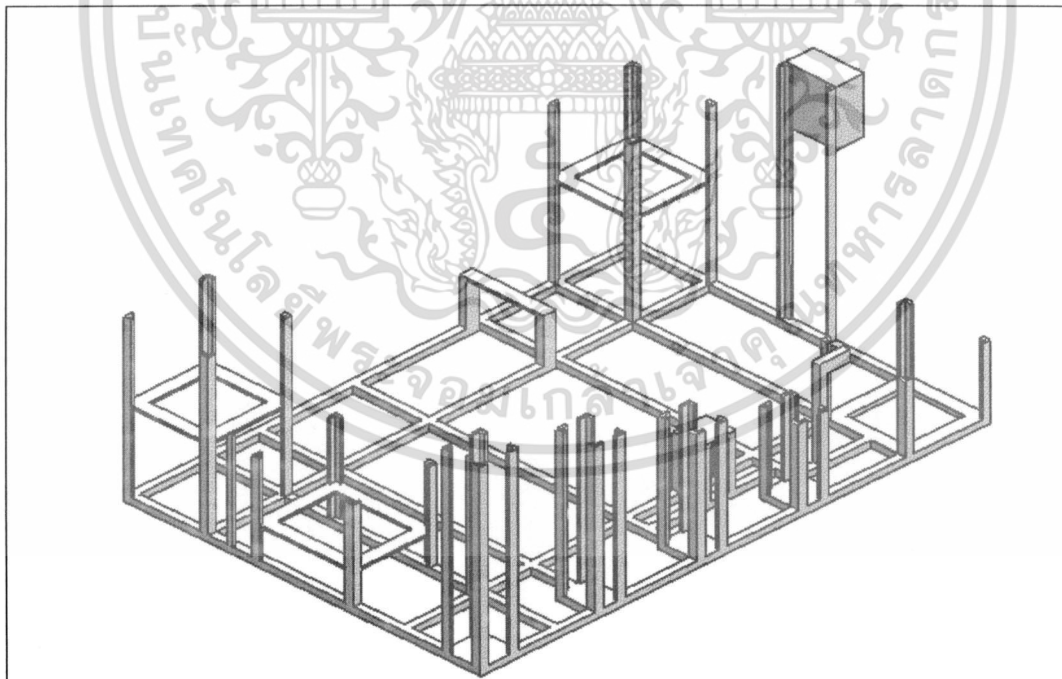
รูปที่ ผ.ข.14 โครงสร้างมองด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



มาตราส่วน 1:1 มิลลิเมตร

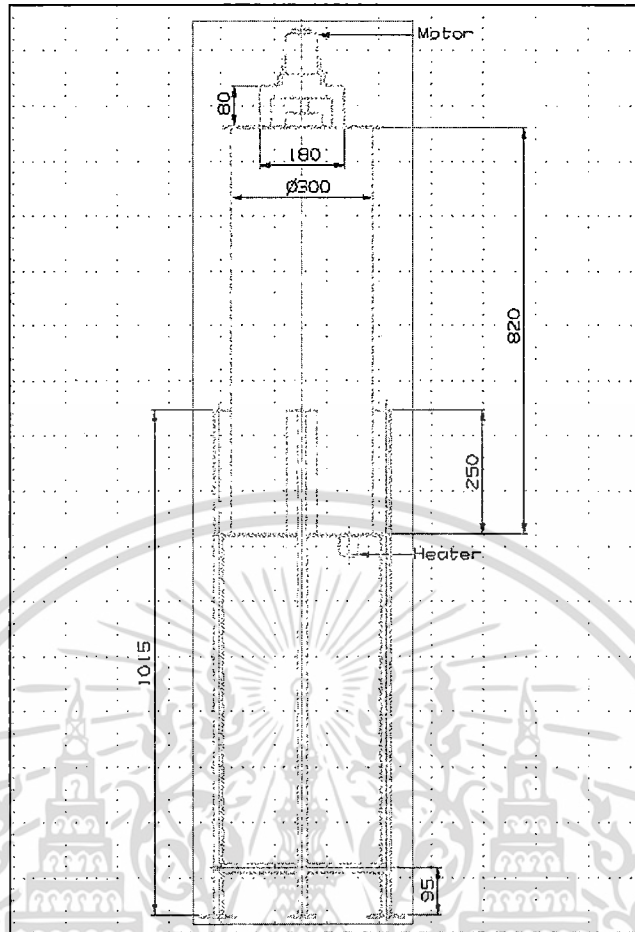
รูปที่ ผ.ข.15 โครงสร้างมอด้านบน



มาตราส่วน 1:1 มิลลิเมตร

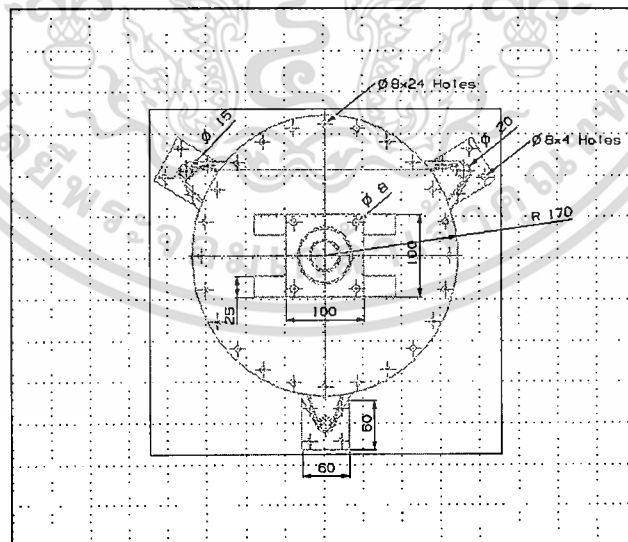
รูปที่ ผ.ข.16 โครงยึดตัวถังต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



มาตราส่วน 1:1 มิลลิเมตร

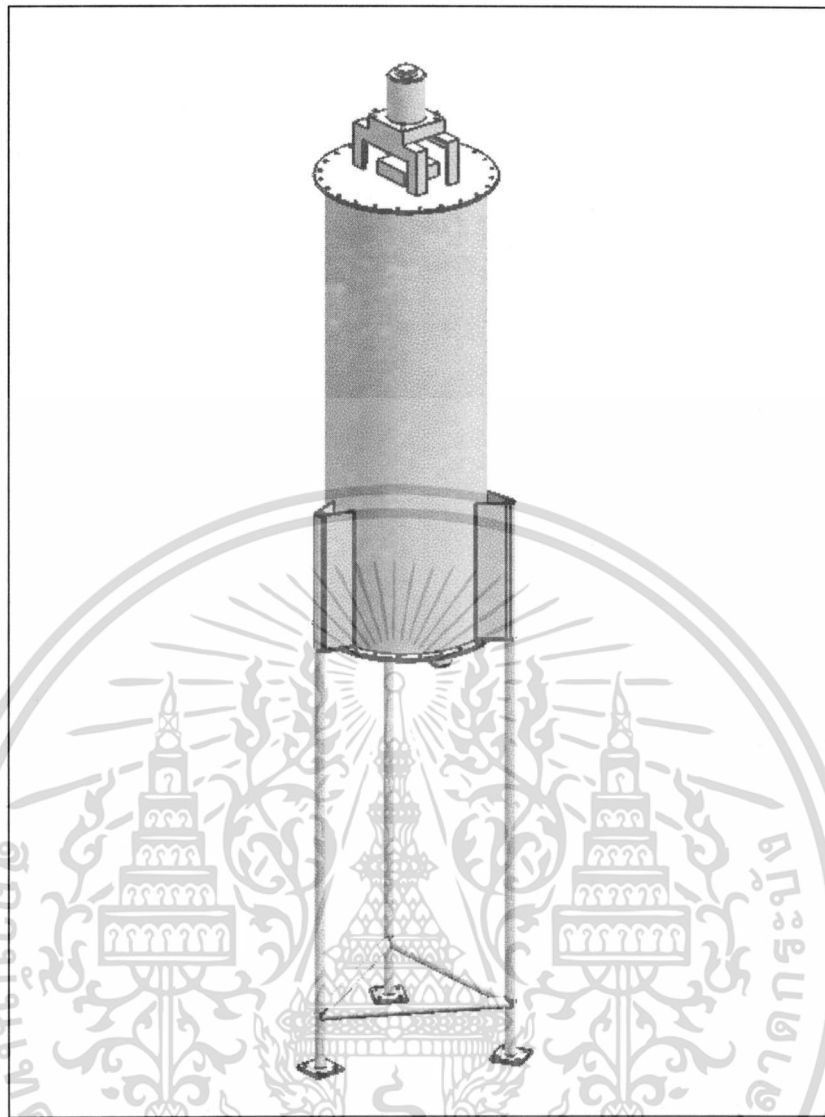
รูปที่ ผ.ข.17 ถึงปฏิบัติการด้านหน้า



มาตราส่วน 1:1 มิลลิเมตร

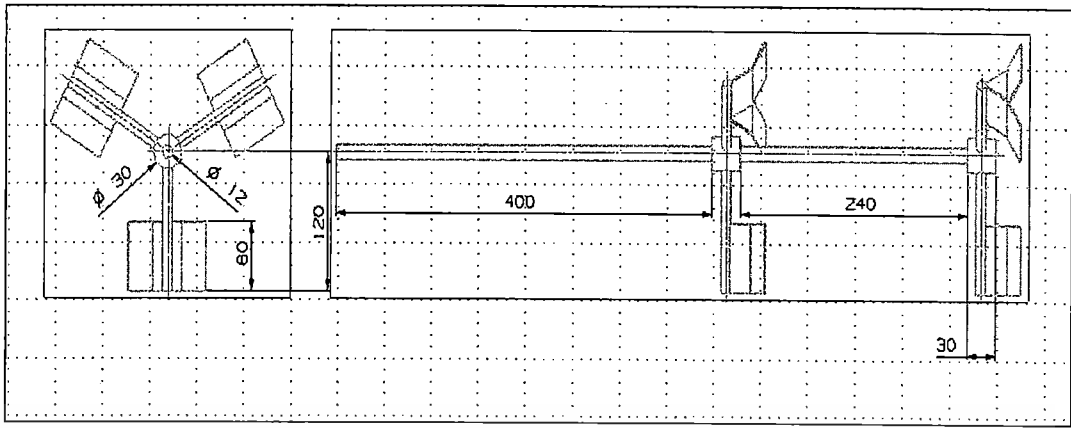
รูปที่ ผ.ข.18 ถึงปฏิบัติการด้านบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



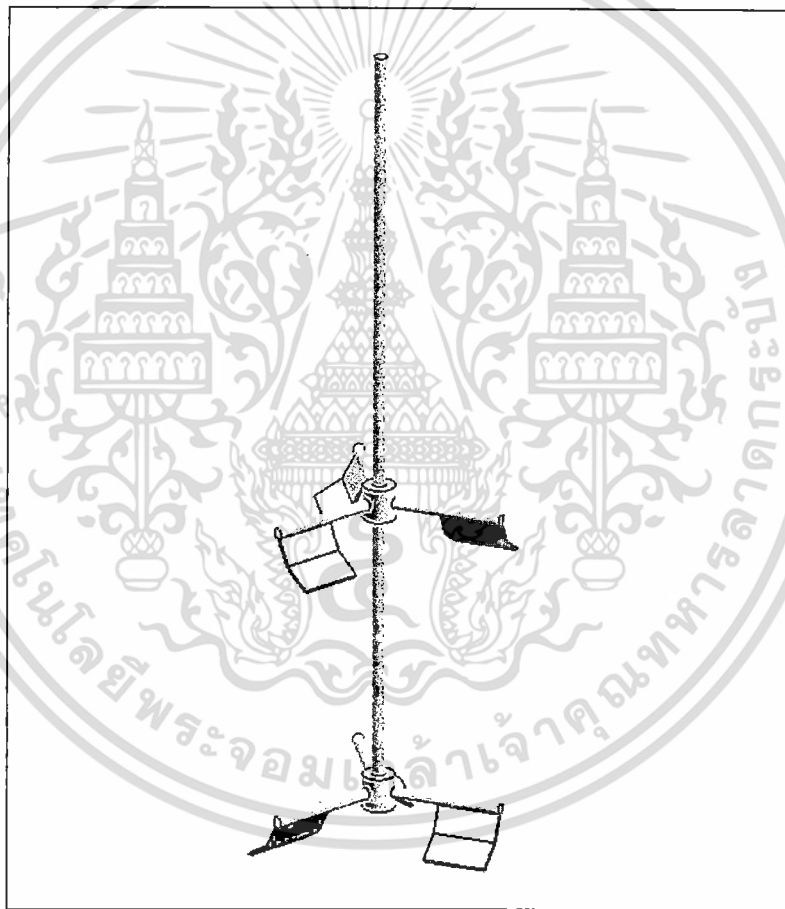
รูปที่ ผ.ข.19 ถึงปฏิกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



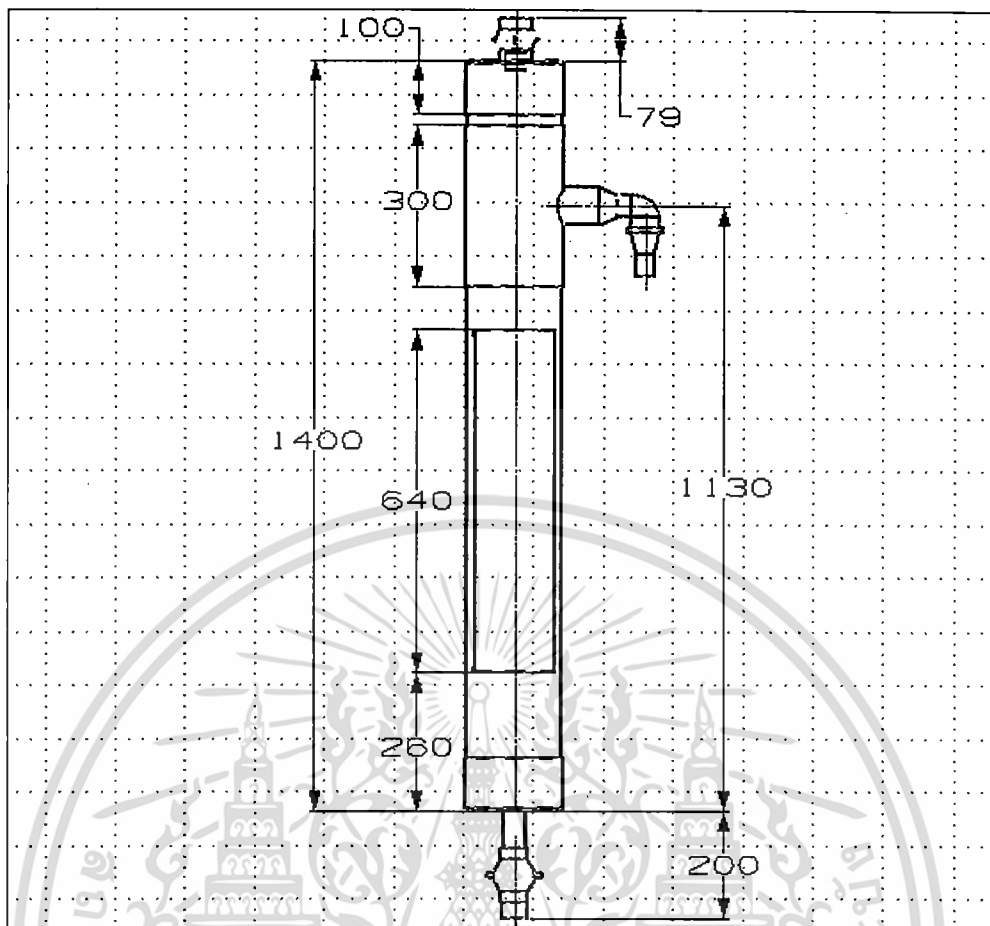
มาตราส่วน 1:1 มิลลิเมตร

รูปที่ ผ.ข.20 ไบควอน



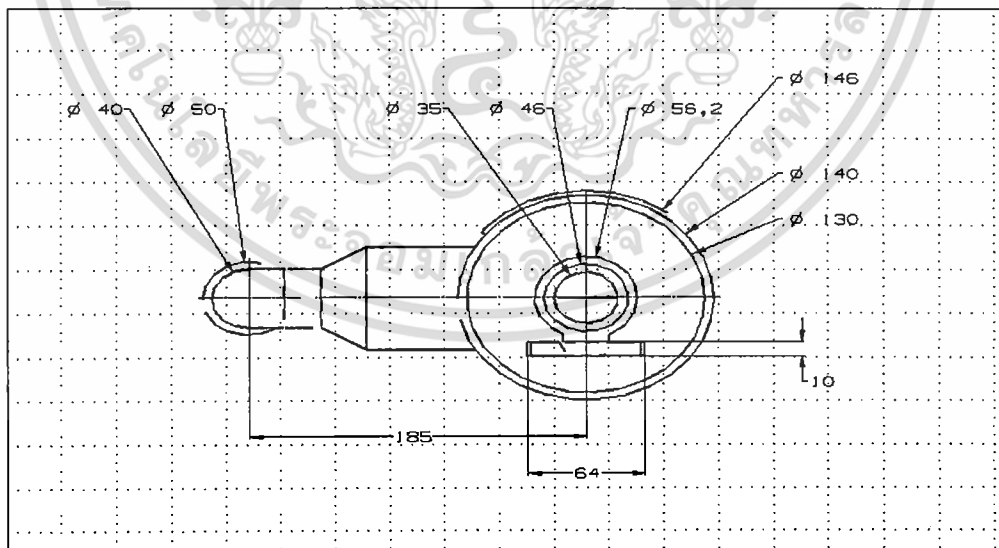
รูปที่ ผ.ข.21 ไบควอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



มาตราส่วน 1:1 มิลลิเมตร

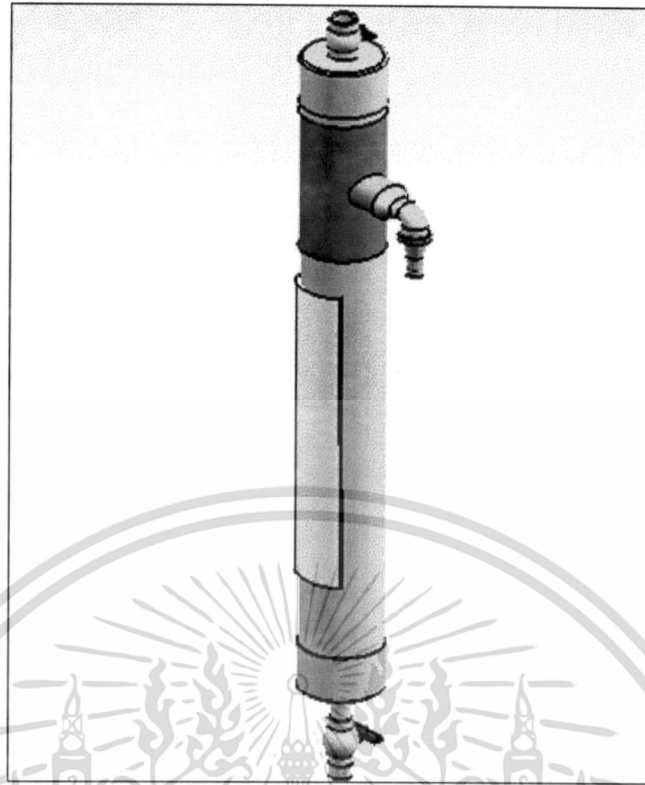
รูปที่ ผ.ข.22 คอลัมน์มองด้านหน้า



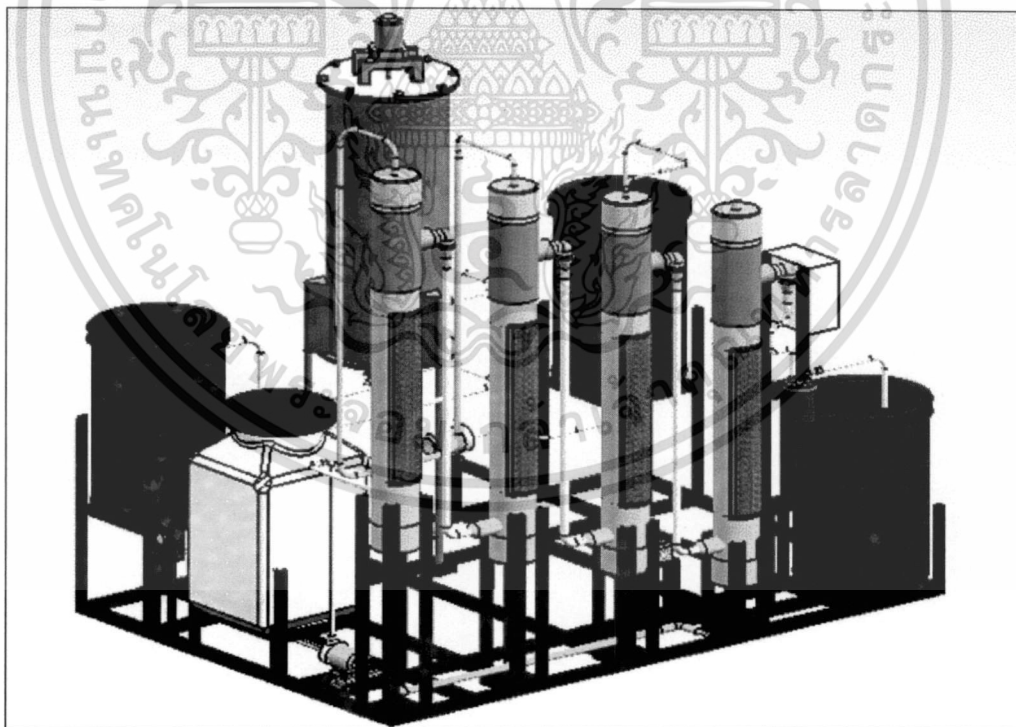
มาตราส่วน 1:1 มิลลิเมตร

รูปที่ ผ.ข.23 คอลัมน์มองด้านบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผ.ข.24 คอลัมน์ทำความสะอาดไบโอดีเซล



รูปที่ ผ.ข.25 โครงสร้างเครื่องทำความสะอาดไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.ข.2 รายการชิ้นส่วนอุปกรณ์ของชุดทดลอง

รายการ	จำนวน	หน่วย	ขนาด
ข้องอ	25	ตัว	½ นิ้ว
ท่อสามทาง	5	ตัว	½ นิ้ว
ท่อสามทางลดจาก 4 นิ้วเป็น 1 นิ้ว	4	ตัว	½ นิ้ว
บอลวาล์ว	6	ตัว	½ นิ้ว
ท่อลด	7	ตัว	½ นิ้ว
ฝาปิด	8	ตัว	4 นิ้ว
ท่อ PVC	3	เมตร	3 เมตร
ท่อ PVC	4	เมตร	4 เมตร
ถัง 50 ลิตร	3	ถัง	50 ลิตร
ถัง 30 ลิตร	1	ถัง	30 ลิตร
ปั๊มเคมี	3	ตัว	35 วัตต์
เครื่องฟอกอากาศ	1	เครื่อง	36 วัตต์
มาตรวัดอัตราการไหลของน้ำ	1	ตัว	0-4 ลิตร
ฮีตเตอร์	3	ตัว	1500 วัตต์
เทอร์โมสตัท	3	ตัว	30-110 °C
วาล์วกันกลับ	4	ตัว	½ นิ้ว
วาล์วกันกลับ	1	ตัว	¾ นิ้ว
ตัวปรับความเร็วรอบมอเตอร์	1	ตัว	35 วัตต์
สายยางใสมีลวด	7	เมตร	¾ นิ้ว
สายยางใสมีลวด	1	เมตร	½ นิ้ว
ปลอกครอบสายไฟ	5	เมตร	½ นิ้ว
กรองน้ำมัน	1	ตัว	
มอเตอร์	1	ตัว	25 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก  
คุณสมบัติของไบโอดีเซล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.ค. 1 กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซล  
ชุมชน) พ.ศ. 2549

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงต่ำ		วิธีทดสอบ
1	ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 <sup>o</sup> ซ กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร (Density at 15 <sup>o</sup> C $kg/m^3$ )	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	860 900	ASTM D 1298
2	ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 <sup>o</sup> ซ เซนติสโตกส์ (Viscosity at 40 <sup>o</sup> C, $cSt$ )	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	1.9 8.0	ASTM D 445
3	จุดวาบไฟ องศาเซลเซียส (Flash point, $^{\circ}C$ )	ไม่ต่ำกว่า	120	ASTM D 93
4	กำมะถัน ร้อยละ โดยน้ำหนัก (Sulphur, %wz.)	ไม่สูงกว่า	0.0015	ASTM D 2622
5	จำนวนซีเทน (Cetane Number)	ไม่ต่ำกว่า	47	ASTM D 613
6	เถ้าซัลเฟต ร้อยละ โดยน้ำหนัก (Sulphated Ash, %wz.)	ไม่สูงกว่า	0.02	ASTM D 874
7	น้ำและตะกอน ร้อยละ โดยปริมาตร (Water and Sediment, %vol.)	ไม่สูงกว่า	0.2	ASTM D 2709
8	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (Copper Strip Corrosion)	ไม่สูงกว่า	No.3	ASTM D 130
9	ค่าความเป็นกรด มิลลิกรัม โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัม (Acid Number, mg KOH/g)	ไม่สูงกว่า	0.8	ASTM D 664
10	กลีเซอรินอิสระ ร้อยละ โดยน้ำหนัก (Free glycerin, %wz.)	ไม่สูงกว่า	0.02	ASTM D 6584
11	กลีเซอรินทั้งหมด ร้อยละ โดยน้ำหนัก (Total glycerin, %wz.)	ไม่สูงกว่า	1.5	ASTM D 6584
12	สี (Color)		ม่วง	ตรวจพินิจด้วย สายตา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.ก. 1 (ต่อ) กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน) พ.ศ. 2549

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงต่ำ	วิธีทดสอบ
13	สารเติมแต่ง (ถ้ามี) (Additive)		ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบ จากอธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.ศ. 2 กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมัน

พ.ศ. 2550

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงต่ำ	วิธีทดสอบ	
1	เมทิลเอสเตอร์ (Methyl Ester, ร้อยละโดยน้ำหนัก (%wz.)	ไม่ต่ำกว่า	96.5	EN 14103
2	ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 <sup>o</sup> ซ (Density at 15 <sup>o</sup> C กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร <i>kg/m<sup>3</sup></i> )	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	860 900	ASTM D 1298
3	ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 <sup>o</sup> ซ (Viscosity at 40 <sup>o</sup> C, เซนติสโตกส์ <i>cSt</i> )	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	1.9 8.0	ASTM D 445
4	จุดวาบไฟ (Flash point, องศาเซลเซียส <i>°C</i> )	ไม่ต่ำกว่า	120	ASTM D 93
5	กำมะถัน (Sulphur, ร้อยละโดยน้ำหนัก (%wz.)	ไม่สูงกว่า	0.001	ASTM D 2622
6	กากถ่าน (ร้อยละ 10 ของกากที่เหลือจากการกลั่น) (Carbon Residue, on 10% distillation residue, %wz.)	ไม่สูงกว่า	0.3	ASTM D 4530
7	จำนวนซีเทน (Cetane Number)	ไม่ต่ำกว่า	51	ASTM D 613
8	เถ้าซัลเฟต (Sulphated Ash, ร้อยละโดยน้ำหนัก (%wz.)	ไม่สูงกว่า	0.02	ASTM D 874
9	น้ำ (Water, ร้อยละโดยปริมาตร (%vol.)	ไม่สูงกว่า	0.05	EN ISO 12937
10	สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด (Total Contaminate, ร้อยละโดยปริมาตร (%wz.)	ไม่สูงกว่า	0.0024	EN 12662
11	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (Copper Strip Corrosion)	ไม่สูงกว่า	No. 1	ASTM D 130
12	เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยา ออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ชั่วโมง	ไม่ต่ำกว่า	6	EN 14112

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.ค. 2 (ต่อ) กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ.

2550

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงต่ำ		วิธีทดสอบ
13	ค่าความเป็นกรด มิลลิกรัมโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัม (Acid Value, <i>mg KOH/g</i> )	ไม่สูงกว่า	0.5	ASTM D 664
14	ค่าไอโอดีน กรัมไอโอดีน/100กรัม (Iodine Value, <i>g Iodine/100g</i> )	ไม่สูงกว่า	120	EN 14111
15	กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์ ร้อยละโดยน้ำหนัก (Linolenic Acid Methyl Ester, %wz.)	ไม่สูงกว่า	12.0	EN 14103
16	เมทานอล ร้อยละโดยน้ำหนัก (Methanol, %wz.)	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14110
17	โมนอกลิเซอไรด์ ร้อยละโดยน้ำหนัก (Monoglyceride, %wz.)	ไม่สูงกว่า	0.80	EN 14105
18	ไดกลิเซอไรด์ ร้อยละโดยน้ำหนัก (Diglyceride, %wz.)	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14105
19	ไตรกลิเซอไรด์ ร้อยละโดยน้ำหนัก (Triglyceride, %wz.)	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14105
20	กลีเซอรินอิสระ ร้อยละโดยน้ำหนัก (Free glycerin, %wz.)	ไม่สูงกว่า	0.02	EN 14105
21	กลีเซอรินทั้งหมด ร้อยละโดยน้ำหนัก (Total glycerin, %wz.)	ไม่สูงกว่า	0.25	EN 14105
22	โลหะกลุ่ม 1 (โซเดียมและโปแตสเซียม) มิลลิกรัม/กิโลกรัม (Group I metals (Na +K), <i>mg/kg</i> )	ไม่สูงกว่า	5.0	EN 14108 และ EN 14109
	โลหะกลุ่ม 2 (แคลเซียมและแมกนีเซียม) มิลลิกรัม/กิโลกรัม (Group II metals (Ca +Mg), <i>mg/kg</i> )	ไม่สูงกว่า	5.0	pr EN 14538
23	ฟอสฟอรัส ร้อยละโดยน้ำหนัก (Phosphorus, %wz.)	ไม่สูงกว่า	0.001	ASTM D 4951
24	สารเติมแต่ง (ถ้ามี) (Additive)	ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบ จากอธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้