

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1. แนวคิดและทฤษฎี

ปัจจุบันทั่วโลกประสบปัญหาด้านราคาน้ำมันที่สูงขึ้น จึงเป็นสาเหตุให้มีการศึกษาแหล่งเชื้อเพลิงอื่นๆ เพื่อทดแทนน้ำมันปิโตรเลียม ซึ่งเชื้อเพลิงจากแหล่งไม่รู้หมด (Renewable sources) เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่มีความสนใจนำไปใช้กับเครื่องยนต์ประเภทต่างๆ ทั้งเครื่องยนต์ทางการเกษตร และเครื่องยนต์ดีเซลซึ่งการใช้ น้ำมันพืชเป็นเชื้อเพลิงโดยไม่ก่อให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับเครื่องยนต์ และสิ่งแวดล้อมสามารถทำได้หากน้ำมันพืชมีสมบัติตรงตามมาตรฐานที่กำหนดไว้สำหรับน้ำมันดีเซล ดังนั้นจะขอกล่าวถึงลักษณะทางเชื้อเพลิงของน้ำมันดีเซลก่อน

2.1.1. น้ำมันดีเซล [1]

เครื่องยนต์ดีเซลเป็นเครื่องยนต์แรงอัดสูงและจุดระเบิดเอง (High Compression, Self Ignition Engine) ซึ่งการจุดระเบิดของเชื้อเพลิงเกิดขึ้นจากความร้อน จากแรงอัดสูงของอากาศในกระบอกสูบโดยไม่ต้องใช้หัวเทียน

เครื่องยนต์ดีเซลมีหลายขนาดเช่น อาจมีกำลังเพียงไม่กี่แรงม้าไปจนถึงกำลังหลายพันแรงม้า ความเร็วรอบเริ่มจาก 100 รอบต่อวินาที ไปจนถึง 4000 รอบต่อนาที ซึ่งเป็นเครื่องยนต์ที่พัฒนาแล้วอย่างสมบูรณ์ ทั้งในแง่การขนส่ง การผลิตกำลังไฟฟ้าและอื่นๆ จึงอาจแบ่งได้เป็น

ชนิดรอบต่ำ คือน้อยกว่า 300 รอบต่อนาที ใช้สำหรับงานหนักต่อเนื่องโดยมีรอบคงที่ เช่น การขับเคลื่อนเรือเดินทะเล การผลิตกำลังไฟฟ้า เป็นต้น

ชนิดรอบปานกลาง คือระหว่าง 300 – 1000 รอบต่อนาที ใช้สำหรับงานที่ค่อนข้างหนัก และรอบค่อนข้างคงที่ เช่น สถานีผลิตไฟฟ้า สถานีสูบน้ำ เป็นต้น

ชนิดรอบสูง คือตั้งแต่ 1000 รอบต่อนาทีขึ้นไป ใช้สำหรับงานที่มีความเปลี่ยนแปลงบ่อยๆ และความเร็วรอบเปลี่ยนแปลงมากเช่น รถขนส่ง รถบรรทุก และรถไฟ

น้ำมันดีเซลจึงมีทั้งประเภทน้ำมันดีเซลหมุนเร็ว (Automotive Diesel หรือ Gas Industrial Diesel Oil) และน้ำมันดีเซลหมุนช้า ซึ่งบางครั้งเรียกว่า น้ำมันซีได้ หรือ IDO

2.1.2. ลักษณะเฉพาะทางเชื้อเพลิงของน้ำมันดีเซล [1]

การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันดีเซลแสดงดังตารางที่ 2.1 ซึ่งค่าที่แสดงในตารางมีความหมายและผลกระทบต่อพฤติกรรมเผาไหม้ของเชื้อเพลิงซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

ตารางที่ 2.1 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันดีเซล [2]

Property	Standard method	Unit
Cetane number	ASTM D613	-
Density	ASTM D4052-91	g/ml
Higher heating value	ASTM D2015-85	MJ/kg
Kinematics viscosity	ASTM D445	mm ² /s at 40 °C
Cloud point	ASTM D2500-91	°C
Pour point	ASTM D97-93	°C
Flash point	ASTM D93-94	°C
Sulfur content	ASTM D5453-93	wt. %
Carbon content	ASTM D524	wt. %
Ash content	ASTM D482-91	wt. %

- ค่าซีเทน (Cetane number) ค่าซีเทนของน้ำมันดีเซลหมุนเร็วคือตัวเลขที่บอกถึง Ignition delay ของน้ำมันที่ได้จากการทดสอบ จากเครื่องยนต์ทดสอบมาตรฐาน CFR โดยวิธีการทดสอบมาตรฐาน ASTM D613 หรือ IP 41 ซึ่งค่าซีเทนก็คือตัวเลขจำนวนเต็มที่คำนวณจากอัตราส่วนผสมเป็นเปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตรของนอร์มัลซีเทนกับเฮปตาเมทิลโนเนน ที่มีคุณสมบัติการติดไฟเทียบเท่ากับน้ำมันตัวอย่างที่ต้องการหาค่าซีเทน โดยใช้เครื่องทดสอบมาตรฐาน โดยใช้สมการคำนวณดังสมการ 2.1

$$\text{ค่าซีเทน} = \% \text{ของนอร์มัลซีเทน} + 0.15(\% \text{ของเฮปตาเมทิลโนเนน}) \quad (2.1)$$

- ดัชนีซีเทน (Calculated cetane index) ค่าดัชนีซีเทนเป็นคุณสมบัติของน้ำมันดีเซล ได้จากการคำนวณ โดยใช้คุณสมบัติการกลั่นที่ 50% และค่าความถ่วง API ค่าดัชนีซีเทนใช้ในการประมาณค่า เลขซีเทน เมื่อไม่สามารถทดสอบค่าซีเทน ของน้ำมันดีเซลโดยใช้เครื่องยนต์ทดสอบ

ได้ ซึ่งค่าดัชนีซีเทนจะสามารถใช้ประมาณค่าซีเทนได้ใกล้เคียงค่าซีเทน ในกรณีที่น้ำมันดีเซลไม่ได้มีการเติมสารเพิ่มค่าซีเทน (Cetane improver) ซึ่งการคำนวณดังสมการ 2.2 และ 2.3

$$\begin{aligned} CI = & 45.2 + 0.0892(T_{10}-215) + 0.131(T_{50}-260) + (0.0523(T_{90}-310) \\ & + 0.901B(T_{50}-260) - 0.420B(T_{90}-310) + 0.0049(T_{10}-215)^2 \\ & - 0.0049(T_{90}-310)^2 + 107.0B + 60.0B^2 \end{aligned} \quad (2.2)$$

โดย $B = e^{[-3.5(D-0.85)]} - 1$

T_{10} , T_{50} , T_{90} คือ ค่าอุณหภูมิการกลั่นที่ร้อยละ 10, 50, 90 ($^{\circ}\text{C}$) ตามลำดับ

D คือ ความหนาแน่นตามมาตรฐาน ASTM D1298 (กิโลกรัมต่อลิตร ที่ 15°C)

$$CI = -420.34 + 0.016G^2 + 0.192G\log T_{50} + 65.01(\log T_{50})^2 - 1.809 \times 10^{-4} T_{50}^2 \quad (2.3)$$

โดย T_{50} คือ ค่าอุณหภูมิการกลั่นที่ร้อยละ 50 ($^{\circ}\text{F}$)

G คือ ค่าความถ่วงจำเพาะ API

- สมบัติการระเหย (Distillation and vapor pressure) ความสามารถในการระเหยมีผลต่อการทำงานของน้ำมันเป็นอย่างมาก เพื่อสตาร์ทง่าย อุ่นเครื่องเร็ว มีการกระจายของน้ำมันไปยังกระบอกสูบทุกอันได้เท่าๆ กัน น้ำมันต้องไม่ระเหยมากเกินไป จนเป็นไอระเหยระหว่างส่งเข้าตามท่อ ทำให้น้ำมันเข้าสู่คาร์บิวเรเตอร์ไม่ได้ และเครื่องสะดุดหยุดลง ที่เราเรียกว่า Vapor lock และต้องไม่หนักเกินไปจนเกิดการละลายลงในน้ำมันเครื่องได้ ดังนั้นจึงต้องมีข้อกำหนดเรื่อง Distillation และ Vapor pressure ไว้กล่าวคือ

- RVP น้ำมันที่ระเหยตัวได้ง่ายจะมีค่า RVP สูงช่วยให้เครื่องยนต์ติดง่าย โดยเฉพาะในบริเวณอากาศหนาว แต่ถ้ามาใช้ในแถบร้อนจะมีไอน้ำมันมากเกินไปจนเกิด Vapor lock ได้ ค่ากำหนด RVP จะต้องขึ้นอยู่กับบริเวณที่จะนำน้ำมันไปใช้ สำหรับประเทศไทยซึ่งอากาศร้อน จึงมีข้อกำหนด RVP สูงสุดไว้กับ Vapor lock
- 10% Distillation เป็นจุดที่จะทำให้การติดเครื่องยนต์ยากหรือง่าย ถ้าสูงเกินไปจะทำให้เครื่องยนต์ติดยาก จึงต้องมีข้อกำหนดจุดสูงสุดไว้และถ้าต่ำมากไปก็ทำให้เกิด Vapor lock ได้ง่ายเช่นกัน
- 50% Distillation เป็นจุดที่จะทำให้การอุ่นเครื่องยนต์ทำได้เร็ว การกระจายไอน้ำมันไปยังกระบอกสูบต่างๆ เป็นไปอย่างสม่ำเสมอ และปรับส่วนผสมของน้ำมันกับอากาศ ได้ถูกต้องตลอดเวลาทำให้แรงเครื่องได้ดี เครื่องยนต์มีพลังงานสูงข้อ กำหนดสำหรับจุด 50% นี้ต้องมีค่าทั้งต่ำสุดและสูงสุด เพื่อควบคุมให้กำลังพอดี
- 90% Distillation ได้กำหนดจุดสูงสุดไว้เพื่อความเหมาะสมกับการใช้งานให้ได้พลังงานสูงสุดและประหยัดเชื้อเพลิง

- จุดสุดท้าย (End point) และส่วนที่เหลือจากการกลั่น มีการกำหนดจุดสูงสุดไว้ เพื่อ
กันมิให้น้ำมันที่ไม่เผาไหม้ละลายลงในน้ำมันเครื่องมากเกินไปทำให้เกิดการสูญเสีย
และน้ำมันเครื่องเสื่อมประสิทธิภาพ
 - จุดวาบไฟ (Flash point) คืออุณหภูมิต่ำสุดของน้ำมันที่ทำให้เกิดไอน้ำมันเป็นปริมาณ
มากพอ และเมื่อสัมผัสเปลวไฟจะทำให้ลุกไหม้ทันที การหาจุดวาบไฟมักใช้วิธี ASTM D 93 ซึ่งเป็น
เครื่องมือพิเศษเรียกว่า Pensky Martin Closed Cup (PMCC) ซึ่งใช้สำหรับน้ำมันดีเซลและน้ำมัน
เตา ซึ่งจุดวาบไฟจะไม่มีผลต่อคุณภาพ หรือการใช้งานโดยตรง แต่เป็นข้อกำหนดทางกฎหมาย
เพื่อความปลอดภัยจากการเกิดอัคคีภัยในการเก็บรักษา และการขนถ่าย เพราะถ้าเลยอุณหภูมิจุด
นี้ไปแล้วก็จะเป็นจุดติดไฟ
 - จุดติดไฟ (Fire point) คือจุดที่อุณหภูมิต่ำสุดของน้ำมันที่จะเกิดไอน้ำมันขึ้น และทำ
ให้มีเปลวไฟลุกขึ้นอย่างต่อเนื่องอย่างน้อยไม่ต่ำกว่า 5 วินาที โดยทั่วไปจุดติดไฟจะสูงกว่าจุดวาบ
ไฟประมาณ 5 – 35 °C
 - ความหนาแน่น (Density) เป็นค่าที่บอกถึงน้ำหนักของเชื้อเพลิงต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร
ที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งจะมีผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องยนต์โดยตรง กล่าวคือการฉีดเชื้อเพลิง
ในแต่ละครั้งเครื่องยนต์จะวัดค่าในรูปปริมาตร ดังนั้นเครื่องยนต์ที่ใช้้ำมันที่มีความหนาแน่นมาก
กว่าจะให้กำลังและควันทันทีมากกว่าเนื่องจากมีมวลของเชื้อเพลิงที่เผาไหม้มากกว่า นอกจากนี้ความ
หนาแน่นอาจอยู่ในรูปความถ่วงจำเพาะ API ตามสมการที่ 2.4

$$\text{API Gravity} = \frac{141.5}{\text{Sp.Gr. } 60/60^\circ} - 131.5 \quad (2.4)$$

สำหรับน้ำซึ่งมีความหนาแน่นเท่ากับ 1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรจะมีองศา API เท่ากับ 10.0° ซึ่งจะเห็นว่าหากค่าความถ่วงจำเพาะมีค่าสูงจะทำให้ความถ่วงจำเพาะ API มีค่าต่ำ ทำให้ความถ่วงจำเพาะ API นิยมใช้วัดความหนาแน่นของของเหลวที่เบากว่าน้ำ

- ความหนืด (Viscosity) การทดสอบความหนืดของผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม หรือผลิต
ภัณฑ์ที่ไม่ใช่ปิโตรเลียม เป็นการทดสอบเพื่อแบ่งประเภทของผลิตภัณฑ์ให้เหมาะสมกับการใช้งาน
กับเครื่องจักร นอกจากนั้นยังสามารถใช้เป็นเงื่อนไขในการจัดเก็บ การขนถ่าย เป็นต้น ซึ่งค่า
ความหนืดนิยมนิยามงานเป็นเซนติพอยส์ (cP) และ เซนติสโตก (cSt) ในหน่วย SI ดังสมการที่ 2.5

$$\text{cP} = \text{cSt} \times \text{Density of the fluid} \quad (2.5)$$

- จุดไหลเท (Pour point) คือ อุณหภูมิต่ำสุดที่น้ำมันยังเป็นของเหลวพอที่จะไหลได้ การ
ทดสอบทำตามวิธี ASTM D97 กล่าวคือน้ำมันใส่หลอดแก้วแล้วแช่เย็นลงเรื่อยๆ และคอยเอาน้ำมัน
มาตรวจดูจนถึงจุดที่น้ำมันเริ่มแข็งตัว และไม่ไหล เมื่อถือหลอดตามแนวนอนเป็นเวลา 5 วินาที
จุดไหลเทหรือจุดเริ่มไหล จะเป็นอุณหภูมิสูงกว่านี้ 3 °C จุดไหลเทที่วัดได้บอกให้ทราบว่าใช้น้ำ

มันที่มีอุณหภูมิต่ำขนาดนั้นไม่ได้ เพราะน้ำมันจะไม่ไหล ไชที่มีอยู่ในน้ำมันจะแยกตัวออกมาอุดตันทางเดิน และหม้อกรอง ทำให้อุปกรณ์ทำงานไม่ได้ จุดไหลเทจะสูง หรือต่ำขึ้นอยู่กับปริมาณ และลักษณะของไชที่มีอยู่ในน้ำมัน น้ำมันที่มีปริมาณไชสูงก็จะมีจุดไหลเทสูง

- จุดเกิดหมอก (Cloud point) คือ อุณหภูมิที่ไชเริ่มตกผลึกเห็นเป็นฝ้าตาม ASTM D 2500 จุดน้ำมันเป็นฝ้ามักจะสูงกว่าจุดไหลเทเล็กน้อย หรือเท่ากันเลยก็ได้ จุดนี้มีความสำคัญพิเศษสำหรับน้ำมันดีเซลเพราะการที่ไชเริ่มตกผลึกออกมานั้น อาจทำให้หม้อกรองตันได้อย่างรวดเร็วทำให้สูบน้ำมันไม่ได้ แม้ว่าตัวน้ำมันเองยังไหลก็ตาม

- สี (Color) การวัดสีของผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมใช้สำหรับการควบคุมการผลิต เนื่องจากสีเป็นลักษณะที่สำคัญในการบ่งชี้ถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์สำหรับผู้ใช้งานในบางกรณี สีอาจเป็นตัวบ่งบอกถึงความสะอาดของผลิตภัณฑ์ได้ เมื่อผู้ใช้งานรู้จักเฉดสีของผลิตภัณฑ์นั้นๆ เป็นอย่างดี อยากรู้ก็ตามสีจะไม่สามารถบ่งบอกถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมได้เสมอไป ควรใช้คุณสมบัติอื่นๆ ประกอบในการตัดสินคุณภาพของผลิตภัณฑ์นั้นๆ ด้วย

- กากคาร์บอน (Carbon residue) กากคาร์บอนที่เหลือจากการเผาไหม้ ซึ่งจะมีผลต่อความสกปรกของห้องเผาไหม้ เนื่องจากการเกาะติดของกากคาร์บอนในห้องเผาไหม้ ซึ่งถ้าเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้กับรถยนต์จะเป็นตัวบ่งบอกถึงการก่อตัวของถั่ว เนื่องจากสารเพิ่มคุณภาพซึ่งจะทำให้มีกากคาร์บอนในปริมาณสูง

- ปริมาณกำมะถัน (Sulfur content) กำมะถันสามารถทำให้เกิดการกัดกร่อนซึ่งเกิดจากการกัดกร่อนของสารประกอบที่เกิดจากการเผาไหม้ของกำมะถัน เมื่อรวมตัวกับน้ำจะกลายเป็นสารละลายที่มีฤทธิ์เป็นกรด ทำให้สามารถกัดกร่อนชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ได้ อยากรู้ก็ตามสำหรับเครื่องยนต์ที่ใช้กำลังสูง อันตรายจากการกัดกร่อนจะน้อยกว่า เนื่องจากอุณหภูมิทำงานของเครื่องยนต์สูง ตรงข้ามกับเครื่องยนต์ที่ใช้กำลังงานต่ำ อาจเกิดการหยุดและติดเครื่องบ่อยครั้งหรือเครื่องยนต์ที่มีเครื่องรอบต่ำ ใอน้ำมีโอกาสล้นตัวเป็นหยดน้ำในเครื่องยนต์ได้มาก

- ปริมาณเถ้า (Ash content) ปริมาณเถ้า หรือกากที่เหลือจากการเผาไหม้ของน้ำมันในการรายงานปริมาณของเถ้าจะต้องระบุวิธีการทดสอบที่ชัดเจน เนื่องจากมีวิธีการทดสอบอยู่หลากหลายวิธี ปริมาณเถ้า อาจไม่สามารถบ่งบอกถึงส่วนประกอบ หรือปริมาณสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำมันก่อนการเผาไหม้ได้แต่ปริมาณเถ้าสามารถใช้บ่งบอกถึงความเหมาะสมในการใช้งานของผลิตภัณฑ์นั้นๆ ซึ่งปริมาณเถ้าอาจมาจากสารประกอบโลหะที่ละลายน้ำได้ หรือ เกิดจากสิ่งปนเปื้อนที่เป็นของแข็งหรือสนิมเป็นต้น

- ค่าความร้อนขั้นสูง (Higher heating value) คือ ปริมาณความร้อนที่เชื้อเพลิงปลดปล่อยออกมาเมื่อมีการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งค่าความร้อนสูงจะรวมความร้อนจากการควบแน่นไอน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาและความชื้นของเชื้อเพลิงด้วย ค่านี้แสดงถึงพลังงานสูงสุดของ

เครื่องยนต์ที่สามารถเป็นไปได้ในทางทฤษฎี เนื่องจากในเครื่องยนต์จริงต้องมีการสูญเสียไม่ว่าจากแรงเสียดทาน การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ หรืออื่นๆ โดยทั่วไปค่านี้จะนิยามวัดด้วยมาตรฐาน ASTM D4809 สำหรับน้ำมันดีเซลที่ใช้ในการขนส่งและตามมาตรฐาน ASTM D4868 สำหรับน้ำมันดีเซลที่ใช้กับเครื่องจักรในโรงงาน แต่จะมีค่าประมาณ 13400 Btu/gal ถึง 14800 Btu/gal

2.2. ไขมันและน้ำมัน [3]

ไขมันเป็นเอสเทอร์ที่เกิดจากกลีเซอรอล ซึ่งเป็นไตรไฮดริกแอลกอฮอล์กับกรดไขมัน ซึ่งมี 3 ชนิด ตามจำนวนกรดไขมัน คือ โมโน- ได- และไตรกลีเซอไรด์ ไขมันเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง มักจะเป็นเอสเทอร์ของกลีเซอรอล กับกรดอินทรีย์ชนิดอิ่มตัวที่มีคาร์บอนตั้งแต่ 10 อะตอมขึ้นไป เช่น กรดปาล์มิติก (palmitic) และกรดสเตียริก (stearic) ส่วนไขมันที่เป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้องเรียกว่า น้ำมัน เช่น น้ำมันหมู น้ำมันมะพร้าว น้ำมันบัว อาจเป็นเอสเทอร์ที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมน้อยกว่า 10 อะตอม หรือเป็นเอสเทอร์ของกลีเซอรอล กับกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว เช่น กรดโอเลอิก (oleic) และกรดลิโนเลอิก (linoleic) เป็นส่วนมาก ตามตัวอย่างในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างกรดไขมันสามัญที่พบในไขมัน [3]

โครงสร้าง	จำนวนคาร์บอน	ชื่อ	จุดหลอมเหลว °C	มีอยู่ใน
$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{COOH}$	14	กรดไมริสติก	53.9	น้ำมันมะพร้าว
$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COOH}$	16	กรดปาล์มิติก	63.1	น้ำมันปาล์ม
$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$	18	กรดสเตียริก	69.6	ไขสัตว์
$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$	18	กรดโอเลอิก	13.4	น้ำมันมะกอก
$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$	18	กรดลิโนเลอิก	-5	น้ำมันถั่วลิสง

กรดไขมันอิ่มตัวที่มีมากในธรรมชาติ คือ กรดปาล์มิติก ซึ่งมีอยู่ในไขมันและน้ำมันเกือบทุกชนิด ส่วนกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่มีมากคือกรดโอเลอิก ตามตัวอย่างในตารางที่ 2.2 มีกรดไขมันไม่อิ่มตัวบางชนิดที่ร่างกายคนสร้างไม่ได้ หรือสร้างได้ก็ไม่เพียงพอกับความต้องการ จำเป็นต้องรับจากอาหารภายนอกร่างกาย เช่น กรดลิโนเลอิก จึงเรียกรวมกันว่ากรดไขมันจำเป็น (essential fatty

acid) และปัจจุบันมีหลักฐานพบว่าการรับประทานไขมันอิ่มตัวมากเกินไปอาจเป็นสาเหตุทำให้เส้นเลือดหัวใจอุดตันได้ ดังนั้นจึงนิยมใช้น้ำมันดอกคำฝอย และน้ำมันพืชชนิดอื่นๆ ที่เป็นกลีเซอไรด์ไม่อิ่มตัว สำหรับปรุงอาหาร องค์ประกอบของกรดไขมันของน้ำมันพืชชนิดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบกรดไขมันของน้ำมันพืชชนิดต่างๆ [4]

น้ำมันชนิด ดิบ	ค่า ไอโอดีน	องค์ประกอบกรดไขมันหลัก						
		C12:0	C14:0	C16:0	C18:0	C18:1	C18:2	C18:3
ปาล์ม	14.1-21.0	ND-0.5	0.5-2.0	39.3-47.5	3.5-6.0	36.0-44.0	9.0-12.0	ND-0.5
ปาล์มโอสลิน	≥ 56	0.1-0.5	0.5-1.5	38.0-43.5	3.5-5.0	39.8-46.0	10.0-13.5	ND-0.6
ปาล์มเสดีย์วิน	≤ 48	0.1-0.5	1.0-2.0	48.0-74.0	3.9-6.0	15.5-36.0	3.0-10.0	0.5
เมล็ดในปาล์ม	50.0-55.0	45.0-55.0	14.0-18.0	6.5-10.0	1.0-3.0	12.0-19.0	1.0-3.5	ND-0.2
มะพร้าว	6.3-10.6	45.1-153.2	16.8-21.0	7.5-10.2	2.0-4.0	5.0-10.0	1.0-2.5	ND
ถั่วลิสง	86-107	ND-0.1	ND-0.1	8.0-14.0	1.0-4.5	35.0-67.0	13.0-43.0	ND-0.3
เมล็ดสนบูดา	101	ND	ND	14.9	6.0	41.2	37.4	ND
เมล็ดเรพ	94-120	ND	ND-0.2	1.5-6.0	0.5-3.1	8.0-60.0	11.0-23.0	5.0-13.0
ถั่วเหลือง	124-139	ND-0.1	ND-0.2	8.0-13.5	2.0-5.4	17.7-28.0	49.8-59.0	5.0-11.0

ND = ไม่พบ

Cx:y = x คือ จำนวนคาร์บอน และ y คือ จำนวนของพันธะคู่

จากตารางที่ 2.3 พบว่าองค์ประกอบของน้ำมันพืชต่างๆ ประกอบด้วยกรดไขมันอิ่มตัว และกรดไขมันไม่อิ่มตัว ซึ่งกรดไขมันอิ่มตัวจะมีพันธะเดี่ยวอยู่ในอนุกรมที่เรียกว่า อนุกรมแอซีติก (acetic series) มีสูตรทางเคมีคือ $C_nH_{2n}O_2$ ซึ่งมีโมเลกุลยาวมาก จึงมีจุดหลอมเหลวสูง ทำให้มีลักษณะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง ส่วนกรดไขมันไม่อิ่มตัวจะมีพันธะคู่อยู่ ถ้ามี 1 พันธะคู่ เรียกว่า อนุกรมโอเลอิก (oleic series) มีสูตรทางเคมีคือ $C_nH_{2n-2}O_2$ ถ้ามี 2 พันธะคู่เรียกว่า อนุกรมไลโนเลอิก (linoleic series) มีสูตรทางเคมีคือ $C_nH_{2n-4}O_2$ ถ้ามี 3 พันธะคู่เรียกว่า อนุกรมไลโนเลนิก (linolenic series) มีสูตรทางเคมีคือ $C_nH_{2n-6}O_2$ และถ้ามี 4 พันธะคู่เรียกว่า อนุกรมคลูพานโดนิค (clupanodonic series) มีสูตรทางเคมีคือ $C_nH_{2n-8}O_2$ ซึ่งกรดไขมันไม่อิ่มตัวจะมีโมเลกุลสั้นกว่า กรดไขมันอิ่มตัว จึงมีจุดหลอมเหลวต่ำ ทำให้มีลักษณะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง [5]

2.2.1. การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของน้ำมันพืช [6]

การวิเคราะห์น้ำมันพืชที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงนั้น อาจกระทำได้โดยวิธีเช่นเดียวกับน้ำมันดีเซล (แต่ไม่ทุกรายการ) สมบัติทางเคมีของน้ำมันพืชแสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของน้ำมันพืช [6]

Property	Standard method	Unit
Iodine value	AOCS Cd 1-25	g I/g oil
Saponification value	AOCS Cd 3b-76	mg KOH/g oil
Acid value	AOCS Cd 3-63	mg KOH/g oil

ค่าต่างๆ มีความหมายดังนี้

- ค่าไอโอดีน (iodine value) หมายถึง จำนวนกรัมของไอโอดีนที่ถูกดูดซึมโดยน้ำมัน 100 กรัม ค่าไอโอดีนจะบ่งชี้ให้ทราบถึงความไม่อิ่มตัวของกรดไขมันที่มีในน้ำมันพืช ซึ่งน้ำมันที่มีความไม่อิ่มตัวสูงจะสามารถเกิดปฏิกิริยาที่ตำแหน่งพันธะคู่ได้ เช่น ปฏิกิริยาการรวมตัว หรือ ถูกออกซิไดส์ ได้จากออกซิเจนในอากาศ ซึ่งเป็นปัญหาในการเก็บรักษาและการใช้เป็นเชื้อเพลิง
- ค่าสะพอนิฟิเคชัน (saponification value) หมายถึง จำนวนมิลลิกรัมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์กับน้ำมันหรือไขมัน 1 กรัม เป็นตัวบ่งชี้ให้ทราบถึงขนาดหรือน้ำหนักของโมเลกุลของกรดไขมันที่เป็นส่วนประกอบอยู่ในโมเลกุลของน้ำมันพืช โดยน้ำมันที่โมเลกุลประกอบด้วยกรดไขมันที่มีขนาดของโมเลกุลเล็กจะมีค่านี้สูง
- ค่าของกรด (acid value) เป็นจำนวนมิลลิกรัมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ทำให้กรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในไขมัน 1 กรัม สะเทินพอลิ กรดไขมันอิสระที่มีในน้ำมันก็เนื่องมาจากการสลายตัวของกลีเซอไรด์ ซึ่งกรดไขมันจะมีความว่องไวกว่าโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์

2.2.2. สมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันพืช [4]

สมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันพืชสามารถสรุปสาระสำคัญดังนี้

- 1) ค่าความร้อนของน้ำมันพืชมีค่าประมาณร้อยละ 83-85 ของน้ำมันดีเซล
- 2) น้ำมันพืชและน้ำมันสัตว์มีความหนืดสูงกว่าน้ำมันดีเซลเป็น 10-20 เท่า ถ้าอุณหภูมิ ต่ำลงน้ำมันพืชจะยังมีความหนืดสูงขึ้นจนเกิดเป็นไข เช่น น้ำมันปาล์มและน้ำมันมะพร้าวการที่น้ำ

มันพืชมีความหนืดสูงกว่าน้ำมันดีเซล ทำให้หัวฉีดน้ำมันเป็นฝอยได้ยาก และเป็นอุปสรรคต่อการป้อนน้ำมันเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาและการเผาไหม้จะไม่สมบูรณ์

3) น้ำมันพืชมีสมบัติที่ระเหยตัวได้น้อยมาก (low volatility) ทำให้เมื่อป้อนเข้าสู่ห้องเผาจะจุดระเบิดได้ช้ากว่า และมีกาการบอณหงเหลือหลังการเผาไหม้มากกว่าน้ำมันดีเซล ซึ่งตารางที่ 2.5 แสดงสมบัติและค่าความร้อนของน้ำมันพืชต่างๆ เปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล

ตารางที่ 2.5 สมบัติและค่าความร้อนของน้ำมันพืชต่างๆ เปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล [4]

น้ำมัน	ความถ่วงจำเพาะ (ที่ 21 °C) (กรัม/มิลลิลิตร)	ความหนืด (ที่ 21 °C) (เซนติพอยส์)	ค่าความร้อน (กิโลจูล/กิโลกรัม)
ถั่วเหลือง	0.918	57.2	39,350
ทานตะวัน	0.918	60.0	39,490
มะพร้าว	0.915	51.9	37,540
ถั่วลิสง	0.914	67.1	39,470
ปาล์ม	0.898	88.6	39,550
เมล็ดในปาล์ม	0.904	66.3	39,720
เมล็ดสบู่ดำ	0.915	36.9 (ที่ 38 °C)	39,000
น้ำมันดีเซล	0.845	3.8	46,800

2.3. การใช้น้ำมันพืชเป็นเชื้อเพลิงทดแทน

น้ำมันพืชดิบนอกจากจะมีองค์ประกอบหลักเป็นไตรกลีเซอไรด์แล้วยังประกอบด้วยกรดไขมันอิสระ น้ำ สเตอรอยด์ ยาง กลิ่น ฟอสโฟลิปิด และสิ่งปลอมปนอื่นๆ นอกจากนี้ น้ำมันพืชแต่ละชนิดยังมีปริมาณกรดไขมันที่มีความไม่อิ่มตัวต่างกัน โดยสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันพืชบางชนิดแสดงดังตารางที่ 2.6 และการใช้น้ำมันพืชเป็นเชื้อเพลิงทดแทนสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

ตารางที่ 2.6 สมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันพืชบางชนิด [6, 7, 11]

Vegetable oil	น้ำมันพืช	Kinematic Viscosity at 38 °C mm ² /s	Cetane Number	Heating Value MJ/kg	Cloud Point °C	Pour Point °C	Flash Point °C	Density Kg/L	Carbon Residue wt.%	Ash wt.%	Sulphur wt.%	Iodine Value	Saponification Number
Almond kernel	น้ำมันเมล็ดอัลมอนด์	34	34.5	39.8	-	-	-	-	0.22	0.01	0.01	102.35	197.56
Babassu	น้ำมันเมล็ดในปาล์มของประเทศบราซิล	30.3	38	-	20	-	150	0.946	-	-	-	-	-
Bay laurel leaf	น้ำมันใบเบย์ลอเรล	23.2	33.6	39.3	-	-	-	-	0.2	0.03	0.02	105.15	220.62
Castor	น้ำมันละหุ่ง	29.7	42.3	37.4	-	-	-	-	0.21	0.01	0.01	88.72	202.62
Coconut	น้ำมันมะพร้าว	29.8	-	37.5	-	-	-	0.9226	-	-	-	7.5-10.5	250-264
Corn	น้ำมันข้าวโพด	34.9	37.6	39.5	-1.1	-40	277	0.9095	0.24	0.01	0.01	113.2	207.71
Corn marrow	น้ำมันขังข้าวโพด	35.1	37.5	39.6	-	-	-	-	0.22	0.01	0.01	119.41	194.14
Cotton seed	น้ำมันเมล็ดฝ้าย	33.5-33.7	33.7-41.8	39.4-39.5	1.7	-15	234	0.9148	0.24-0.25	0.01-0.02	0.01	113.2	-
Crambe	น้ำมันต้นแครมบี	53.6	44.6	40.5	10	-12.2	274	0.0944	0.23	0.05	0.01	-	-
Hazelnut Kernel	น้ำมันเมล็ดในถั่วเฮเซล	24	52.9	39.8	-	-	-	-	0.21	0.01	0.02	98.62	197.63

ตารางที่ 2.6 สมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันพืชบางชนิด (ต่อ) [6, 7, 11]

Vegetable oil	น้ำมันพืช	Kinematic Viscosity at 38 °C mm ² /s	Cetane Number	Heating Value MJ/kg	Cloud Point °C	Pour Point °C	Flash Point °C	Density Kg/L	Carbon Residue wt.%	Ash wt.%	Sulphur wt.%	Iodine Value	Saponification Number
H.O. Safflower	น้ำมันดอกทานตะวันที่มีโอเลอิกสูง	41.2	49.1	39.5	-12.2	-20.6	293	0.9021	0.24	<0.001	0.02	-	-
Linseed	น้ำมันเมล็ดของต้นแฟลกซ์	27.2-28.0	27.6-34.6	39.3	1.7	-15	241	0.9236	0.22-0.24	<0.010	0.01	156.74	188.71
Olive kernel	น้ำมันเมล็ดในมะกอก	29.4	49.3	39.7	-	-	-	-	0.23	0.008	0.01	100.16	196.83
Palm	น้ำมันปาล์ม	39.6	42	39.6	31	-	267	0.9180	-	-	-	-	-
Palm kernel	น้ำมันเมล็ดในปาล์ม	30.92	-	39.7	-	-	-	0.9190	-	-	-	14-22	245-255
Palm stearin	ไขปาล์มสเตียอริน	-	-	39.4	-	-	380	-	-	-	-	36.03	193.43
Peanut	น้ำมันถั่วลิสง	39.6	41.8	39.8	12.8	-6.7	271	0.9026	0.24	0.005	0.01	-	-
Peanut kernel	น้ำมันเมล็ดในถั่วลิสง	40	34.6	39.5	-	-	-	-	0.22	0.02	0.01	119.55	199.8
Poppy seed	น้ำมันเมล็ดฝิ่น	42.4	36.7	39.6	-	-	-	-	0.25	0.02	0.01	116.83	196.82

ตารางที่ 2.6 สมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันพืชบางชนิด (ต่อ) [6, 7, 11]

Vegetable oil	น้ำมันพืช	Kinematic Viscosity at 38 °C mm ² /s	Cetane Number	Heating Value MJ/kg	Cloud Point °C	Pour Point °C	Flash Point °C	Density Kg/L	Carbon Residue wt.%	Ash wt.%	Sulphur wt.%	Iodine Value	Saponification Number
Rape seed	น้ำมันเมล็ดเรป	37.3	37.5-37.6	39.7	-3.9	-31.7	246	0.9115	0.30-0.31	0.054-0.006	0.01	108.05	197.07
Safflower seed	น้ำมันเมล็ดดอกคำฝอย	31.3-31.6	41.3-42.0	39.5	18.3	-6.7	260	0.9144	0.25-0.26	0.006-0.007	0.01	139.83	190.23
Sesame seed	น้ำมันเมล็ดงา	36.5-36.6	40.2-40.4	39.3-39.4	-3.9	-9.4	260	0.9133	0.25	0.002	0.01	91.76	210.34
Soya bean	น้ำมันถั่วเหลือง	32.6-33.1	37.9-38.1	39.6	-3.9	-12.2	254	0.9138	0.24-0.27	0.006	0.01	69.82	220.78
Sunflower seed	น้ำมันเมล็ดดอกทานตะวัน	33.9-34.4	36.7-37.1	39.6	7.2	-15	274	0.9161	0.23-0.28	<0.010	0.01	132.32	191.7
Tallow	ไขมันสัตว์	-	-	40	-	-	201	-	6.21	-	-	-	-
Walnut kernel	น้ำมันเมล็ดในผลวอลนัท	36.8	33.6	36.9	-	-	-	-	0.24	0.02	0.02	135.24	190.82
Wheat grain	น้ำมันข้าวสาลี	32.6	35.2	39.3	-	-	-	-	0.23	0.02	0.02	120.96	205.68

2.3.1. การใช้น้ำมันพืชโดยตรง [7-9]

การใช้น้ำมันพืชเป็นเชื้อเพลิงทดแทนโดยตรงเมื่อประมาณ 20 ปีมาแล้ว พบว่าการใช้น้ำมันพืชโดยตรงก่อให้เกิดปัญหาแก่เครื่องยนต์ เนื่องจากน้ำมันพืชมีความสามารถในการระเหยต่ำ ทำให้การจุดระเบิดต้องใช้อุณหภูมิสูงในตอนเริ่มเดินเครื่อง และความหนืดสูงของน้ำมันพืชทำให้ระบบหัวฉีดของเครื่องยนต์ทำงานหนัก และได้หยดของน้ำมันขนาดใหญ่ไม่สามารถเผาไหม้ได้หมดในการจุดระเบิดแต่ละครั้ง ซึ่งจะเกิดการสะสมจนเป็นคราบเขม่าที่ลูกสูบ นอกจากนี้ระหว่างการเผาไหม้จะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันระหว่างพันธะคู่ในโมเลกุลของน้ำมันพืชทำให้เกิดยางเหนียวจนทำให้ลูกสูบเกิดความเสียหายได้

2.3.2. การใช้น้ำมันพืชโดยปรับปรุงคุณภาพ [7, 10]

ปัญหาหลักของการใช้น้ำมันพืชเป็นเชื้อเพลิงโดยตรงคือ ความหนืดซึ่งโดยทั่วไปจะมีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซลประมาณ 10 – 20 เท่า ซึ่งการแก้ปัญหาดังกล่าวอาจทำได้โดยวิธีการดังต่อไปนี้

1) การผสมน้ำมันพืช [10]

เป็นการนำน้ำมันพืชมาผสมกับน้ำมันดีเซลโดยตรง ในอัตราส่วนโดยมวลต่างๆ เพื่อให้ความหนืดของน้ำมันพืชลดลง สามารถผสมน้ำมันพืชได้ตั้งแต่ 10 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นไปตามความเหมาะสมของน้ำมันพืชที่ใช้ แต่ถ้าผสมมากเกินไปจะมีข้อเสียคือ การกลายเป็นไอต่ำ เกิดยางเหนียวที่หัวฉีดของเครื่องยนต์

2) การทำให้เป็นของผสมไมโครอิมัลชัน [10]

การทำไมโครอิมัลชัน เป็นการกระจายของอนุภาคของเหลวที่แขวนลอยในตัวกลางของเหลวอีกชนิดหนึ่งอย่างสมดุล ด้วยการผสมน้ำมันพืชกับแอลกอฮอล์ที่มีไซส์สั้น เช่น เมทานอล หรือ เอทานอล ซึ่งของเหลวทั้งสองชนิดไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน แต่จะกระจายตัวอยู่ได้ด้วยสารลดแรงตึงผิว วิธีนี้สามารถปรับปรุงลักษณะที่เป็นละอองฝอยจากหัวฉีด เนื่องจากตัวทำละลายมีจุดเดือดต่ำเมื่อเทียบกับน้ำมันพืช

3) การแตกตัวของน้ำมันพืชด้วยความร้อน [10]

การแตกตัวของน้ำมันพืชด้วยความร้อน เป็นการเปลี่ยนสารหนึ่งไปเป็นสารอื่นๆ มากกว่าหนึ่งสาร โดยให้ความร้อนเพียงอย่างเดียว หรือมีตัวเร่งปฏิกิริยาช่วย เพื่อให้ได้น้ำมันที่มีโมเลกุล

ใหญ่แตกตัวเป็นโมเลกุลที่เล็กลง โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ (ซีโอไลต์ , Na_2CO_3) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

4) การแตกตัวของน้ำมันพืชด้วยความร้อน [7]

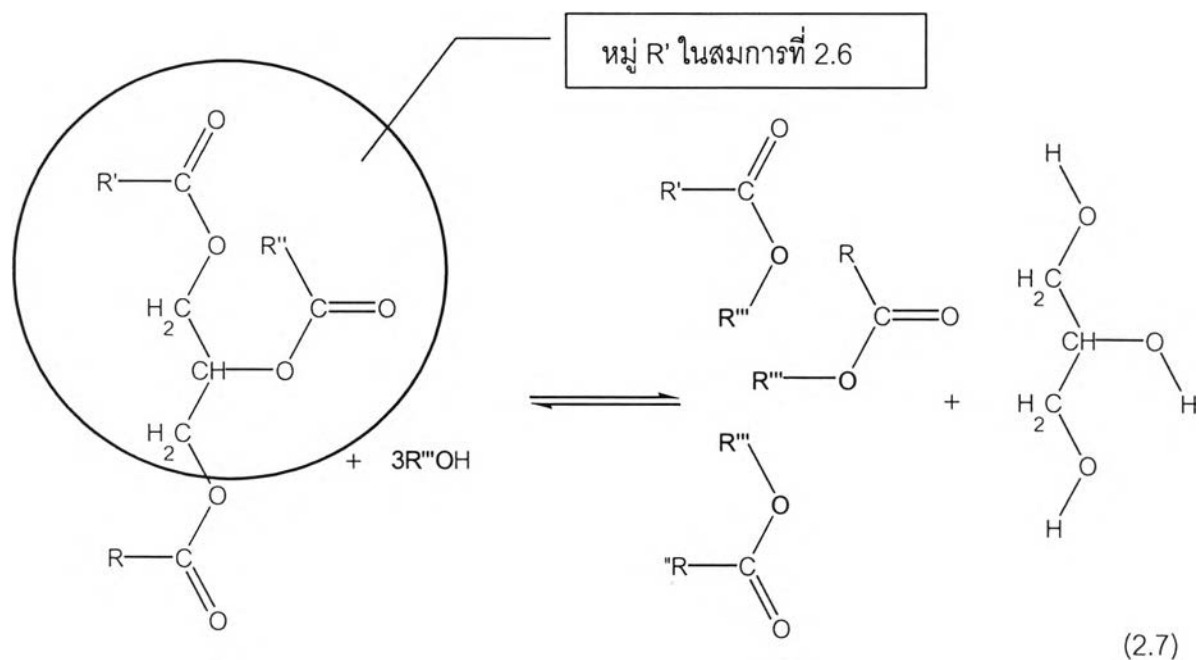
การทำน้ำมันพืชให้เป็นสบู่ก่อนแตกโมเลกุลด้วยความร้อนจะช่วยลดขนาดของโมเลกุลน้ำมันพืชลง ซึ่งส่งผลให้พลังงานที่ใช้ในการแตกตัวน้อยกว่าการแตกตัวของน้ำมันพืชโดยตรงเนื่องจากปฏิกิริยาการเกิดสบู่สามารถเกิดได้ที่อุณหภูมิและความดันไม่สูง พบว่าการแตกตัวของสบู่ 68 กิโลกรัมจะให้ผลิตภัณฑ์เหลวประมาณ 50 ลิตร ซึ่งเมื่อนำไปกลั่นแยกแล้วจะได้ผลิตภัณฑ์หลักเป็นน้ำมันดีเซล และน้ำมันก๊าดรวมกับน้ำมันเบนซินอีกเล็กน้อย

2.3.3. การผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน [7, 10, 12, 13]

จากที่กล่าวมาในขั้นต้นจะเห็นว่าการใช้ไขมันพืชเป็นเชื้อเพลิงโดยตรงหรือการปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการต่างๆ ทำให้เชื้อเพลิงที่ได้มีสมบัติคล้ายกับน้ำมันดีเซลบางส่วน สำหรับวิธีการที่สามารถทำให้ได้เชื้อเพลิงทดแทนจากน้ำมันพืชที่มีสมบัติตรงกับค่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐานมากที่สุด คือการนำน้ำมันพืชมาผลิตเป็นไบโอดีเซลโดยทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวเรียกว่า ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน (transesterification reaction) มีความหมายในเชิงเคมีคือ ปฏิกิริยาการเปลี่ยนหมู่แอลคอกซิล (alkoxyl group, RO-) ของแอลกอฮอล์ (alcoholysis reaction) ดังสมการที่ 2.6 [10]



ปฏิกิริยานี้จะใช้เตรียมเอสเทอร์ในกรณีที่ไม่สามารถเตรียมได้ด้วยการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ิฟิเคชัน (esterification reaction) โดยตรงได้ จึงถูกนำมาใช้เตรียมเอสเทอร์ของกรดไขมันของน้ำมันพืชเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนตามสมการที่ 2.7 โดยใช้หมู่ R , R' และ R'' เป็นกรดไขมันของน้ำมันพืช ซึ่งแตกต่างกันตามชนิดของน้ำมันพืช สำหรับแอลกอฮอล์ที่สามารถใช้ได้จะมีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่ 1 ถึง 8 อะตอมแต่ส่วนมากจะเป็นเมทานอลและเอทานอล เมทานอลมีข้อได้เปรียบเรื่องราคาและการทำปฏิกิริยาเนื่องจากมีขนาดเล็กที่สุด ส่วนเอทานอลได้เปรียบที่สามารถผลิตได้จากการเกษตร และย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ประกอบกับมีอันตรายน้อยกว่าเมทานอล



ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเกิดได้ดีเมื่อมีแอลกอฮอล์มากเกินไป และสามารถเกิดขึ้นได้ที่มีความดันบรรยากาศและอุณหภูมิไม่สูงกว่าจุดเดือดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ ที่จะนำมากล่าว ณ ที่นี้มีเพียง 3 ชนิด คือ กรด, เบส และเอนไซม์ ซึ่งมีการศึกษากันมาก นอกจากนี้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันยังเกิดขึ้นได้โดยไม่ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ความดันและอุณหภูมิวิกฤตสูงกว่าจุดของแอลกอฮอล์ที่ใช้

1) กระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา [12, 13]

- ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทกรด [12]

ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดแรกที่มีการศึกษาได้แก่กรด H_2SO_4 ผลการศึกษาพบว่าสามารถเร่งปฏิกิริยาได้ร้อยละผลิตภัณฑ์ที่สูงมาก (>99%) ที่อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันพืชต่อแอลกอฮอล์เท่ากับ 1 ต่อ 30 สำหรับแอลกอฮอล์ 3 ชนิด ข้อมูลดังตารางที่ 2.7 แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทกรดจะเกิดปฏิกิริยาช้ากว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทเบส และต้องใช้อุณหภูมิที่สูง ต้องใช้เวลานาน จึงจะเกิดปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์และเหมาะสมกับกลีเซอไรด์ที่มีส่วนประกอบของกรดไขมันอิสระและน้ำอยู่มาก กรดที่ใช้ควรเป็นกรดซัลฟิวริก กรดฟอสฟอริก กรดไฮโดรคลอริก หรือกรดซัลฟอนิกของสารอินทรีย์

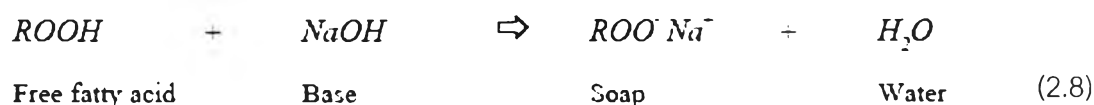
ตารางที่ 2.7 ภาวะการทดลองของตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทกรด [12]

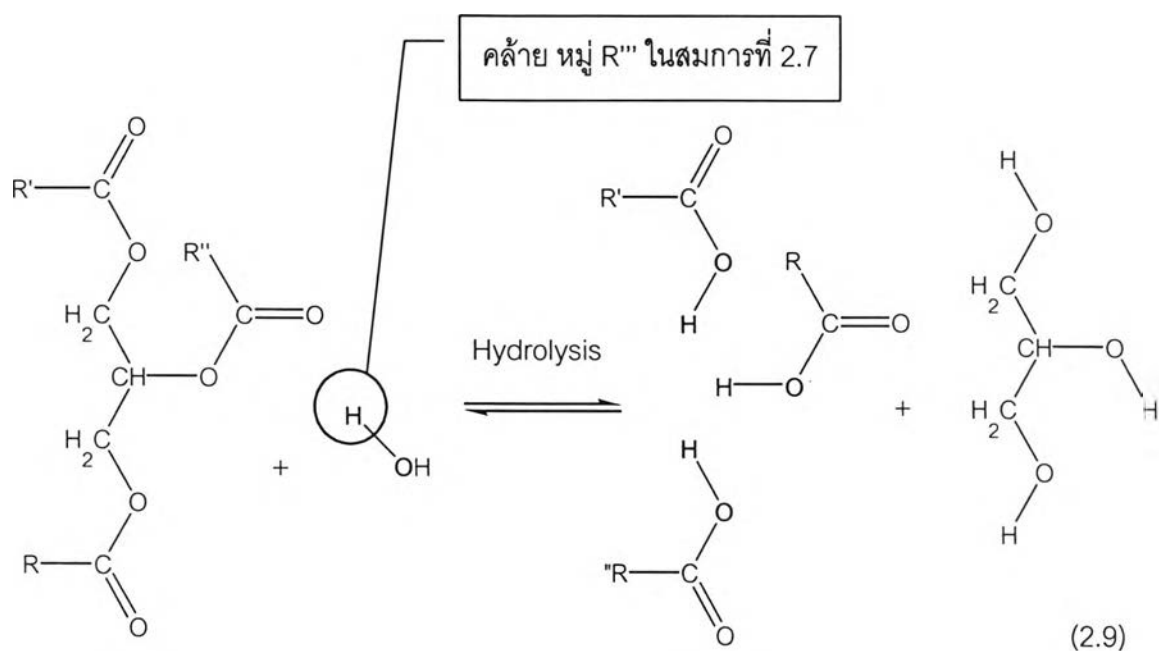
Acidic catalyst	Alcohol	Temperature (C°)	Reaction Time (hr)
1% H ₂ SO ₄	Methanol	50	50
1% H ₂ SO ₄	Ethanol	78	18
1% H ₂ SO ₄	Butanol	117	3

- ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทเบส [12]

ตัวเร่งปฏิกิริยาคอนดิชันใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทกรดมาก และได้ร้อยละผลิตภัณฑ์ต่ำกว่าเพียงเล็กน้อยในตัวเร่งปฏิกิริยาสองชนิดแรกดังแสดงในตารางที่ 2.8 คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโซเดียมเมทอกไซด์ (CH₃ONa) ซึ่งถือเป็นเบสแก่และมีความเฉพาะเจาะจงในการทำปฏิกิริยา (selectivity) ต่ำทำให้เกิดปฏิกิริยาสะพอนิฟิเคชัน (saponification reaction) หรือปฏิกิริยาการเปลี่ยนเป็นสบู่ขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาในขั้นตอนการทำผลิตภัณฑ์ให้บริสุทธิ์ เนื่องจากการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกนิยมใช้น้ำล้างซึ่งสบู่ที่เกิดทำให้เสียเวลาเพิ่มขึ้น

การเปลี่ยนเป็นสบู่สำหรับเบสไฮดรอกไซด์เริ่มจาก ปฏิกิริยาระหว่างเบสและกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชดังสมการที่ 2.8 ทำให้ได้สบู่และน้ำ จากนั้นน้ำจะเกิดปฏิกิริยาการแยกสลายด้วยน้ำ (hydrolysis reaction) กับน้ำมันพืชดังสมการที่ 2.9 ซึ่งคล้ายกับปฏิกิริยาการแยกสลายด้วยแอลกอฮอล์ในสมการที่ 2.7 แต่น้ำสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่า เนื่องจากขนาดโมเลกุลเล็กกว่าซึ่งทำให้ได้กรดไขมันอิสระกลับมาทำปฏิกิริยากับเบสและเกิดเป็นสบู่อีกครั้ง นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนเป็นสบู่ทำให้ความเข้มข้นของเบสลดลงอีกด้วย

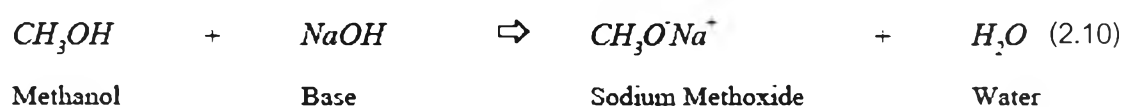




ตารางที่ 2.8 ภาวะและผลการทดลองของตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทเบส [12]

Basic catalyst	Alcohol	Oil : Alcohol	Temperature (°C)	Reaction Time (hr)	% Yield
1%NaOH	Methanol and Ethanol	1:3 - 1:6	<65 and <78	0.5 - 1	>98
0.5%CH ₃ ONa	Methanol	1:3 - 1:6	<65	0.5 - 1	>98
1 - 3%K ₂ CO ₃	Methanol	1:3	70	1	84 - 92.4
1 - 3%MTBE	Methanol	1:3	70	1	47
1 - 3%TBE	Methanol	1:3	70	1	89 - 93

นอกจากน้ำที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาแล้ว น้ำที่ปนเปื้อนมากับน้ำมันพืชและแอลกอฮอล์สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาการแยกสลายด้วยน้ำได้ รวมถึงน้ำที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการละลายเบสในแอลกอฮอล์ก่อนผสมกับน้ำมันพืชดังแสดงในสมการที่ 2.10



จากที่กล่าวมาทั้งหมดจะเห็นได้ว่าการทำให้ระบบปราศจากน้ำจะช่วยป้องกันการเกิดสปู
 ได้ อย่างไรก็ตามการใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไม่สามารถหลีกเลี่ยงน้ำที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการ
 ละลายตัวเร่งปฏิกิริยาตามสมการที่ 2.10

- ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทเอนไซม์ [13]

เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเฉพาะเจาะจงในการทำปฏิกิริยาสูงถึงแม้มีน้ำอยู่ใน
 สารตั้งต้น ปัญหาการเกิดสปูจะไม่เกิดขึ้น เอนไซม์ที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน
 คือเอนไซม์ไลเปส ซึ่งมีหลายชนิดตามสายพันธุ์ของจุลินทรีย์ที่ทำการศึกษาได้ดัง
 แสดงในตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 ภาวะและผลการทดลองของตัวเร่งปฏิกิริยาและประเภทเอนไซม์ [13]

Lipase	Process operation		% Methyl ester	Reaction time (hours)
	Batch	continuous		
C. antarctica (Novozym435)	✓	✓	87 - 98	3.5 - 48
C. rugosa, P. Cepcia, P. fluorescens	✓		80 - 100	80 - 90
R. Oryzae (F-AP15)	✓		80 - 90	70.0
R. Oryzae (1F04897)	✓		70 - 90	72.0

จากตารางที่ 2.8 ไลเปสสองชนิดแรกจะตัดพันธะของไตรกลีเซอไรด์ทั้งสามตำแหน่งซึ่ง
 เรียกว่า Extracellular lipase สำหรับสองชนิดหลังจะไม่ได้ตัดพันธะตรงกลาง เรียกว่า
 Intracellular lipase ซึ่งการใช้เอนไซม์เร่งปฏิกิริยาแม้ว่าจะใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานานกว่ากรด
 และเบสมาก แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทนี้ยังเป็นที่น่าสนใจ เนื่องจากการไม่เกิดสปูและไม่ต้องแยก
 ตัวเร่งปฏิกิริยาออกทำให้เกิดของเสียจากกระบวนการน้อยกว่าการใช้กรดหรือเบส อย่างไรก็ตาม
 ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ต้องการฟื้นฟูสภาพเพื่อให้มีประสิทธิภาพใกล้เคียงค่าเริ่มต้นเมื่อมีการใช้เป็น
 เวลานาน [14] เนื่องจากแอลกอฮอล์สามารถทำให้โปรตีนในเอนไซม์เสื่อมสภาพ นอกจากนี้ยังพบ
 ว่ากลีเซอรอลยังเป็นสารยับยั้งการเร่งปฏิกิริยาเนื่องจากมีสูตรโครงสร้างคล้ายกับแอลกอฮอล์ซึ่ง
 เป็นสารตั้งต้น [15]

2) กระบวนการที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา [16]

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันสามารถเกิดขึ้นได้ในภาวะเหนือวิกฤต (supercritical condition) ของแอลกอฮอล์โดยไม่ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา แต่กลไกการเกิดปฏิกิริยายังไม่เป็นที่เข้าใจอย่างชัดเจน ซึ่งปัจจุบันแอลกอฮอล์ที่มีรายงานว่าสามารถเกิดปฏิกิริยากับน้ำมันพืชได้ คือ เมทานอล (methanol), เอทานอล (ethanol), 1-โพรพานอล (1-propanol), 1-บิวทานอล (1-butanol) และ 1-ออกทานอล (1-octanol) ซึ่งได้ผลสรุปว่าการเพิ่มอุณหภูมิและปริมาณแอลกอฮอล์จะช่วยให้ได้ร้อยละเมทิลเอสเทอร์ที่สูงขึ้นในเวลาอันสั้น ส่วนปริมาณน้ำและกรดไขมันอิสระไม่มีผลต่อผลได้ซึ่งต่างจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาดังที่กล่าวมาแล้ว นอกจากนี้กลีเซอรอลที่เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการนี้จะบริสุทธิ์กว่ากระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

งานวิจัยที่ได้มีการเริ่มต้นศึกษา เช่น Saka และคณะ [17] ศึกษาการเตรียมไบโอดีเซลในภาวะเหนือวิกฤตของเมทานอลโดยกระบวนการแบบกะ โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 5 มิลลิลิตร ทำจากโลหะผสม Inconel-625 โดยการเติมน้ำมันเมล็ดเรปและเมทานอลลงในเครื่องปฏิกรณ์ที่อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันพืชต่อเมทานอลคงที่เท่ากับ 1 ต่อ 42 จากนั้นปิดฝาซึ่งติดตั้งอุปกรณ์วัดความดันและอุณหภูมิ เขย่าและจุ่มเครื่องปฏิกรณ์ลงในอ่างตีบุกล้อมเหลวทันที โดยให้ความร้อนที่ 350 หรือ 400 °C ตามเวลาที่กำหนดในช่วง 10 ถึง 240 วินาที เมื่อได้เวลาตามที่ต้องการ นำเครื่องปฏิกรณ์จุ่มในอ่างน้ำเย็นทันทีเพื่อหยุดปฏิกิริยา จากผลการทดลองพบว่า อัตราส่วนโดยโมล 1 ต่อ 42 ที่อุณหภูมิ 350 °C ความดัน 19 MPa เวลา 240 วินาที ได้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ 95 โดยน้ำหนัก ต่อมา Saka และคณะ [18] ยังได้ศึกษาถึงจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเหนือวิกฤตของเมทานอลโดยกระบวนการแบบกะ สำหรับการหาค่าคงที่อัตราเร็ว ได้กำหนดให้อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันพืชต่อเมทานอลเป็น 1 ต่อ 42 และหาค่าคงที่อัตราเร็วโดยติดตามการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบที่ไม่ใช่เมทิลเอสเทอร์ช่วงเวลาต่างๆ พบว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง โดยค่าคงที่อัตราเร็วเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ

สำหรับงานวิจัยอื่นๆ เช่น Demirbas [19] ศึกษาการเตรียมไบโอดีเซลในภาวะเหนือวิกฤตโดยใช้น้ำมันพืช 4 ชนิด คือ น้ำมันเมล็ดฝ้าย น้ำมันเมล็ดในถั่วเฮเซล น้ำมันเมล็ดดอกคำฝอย และเมล็ดดอกทานตะวัน ในกระบวนการแบบกะด้วยเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 100 มิลลิลิตร และให้ความร้อนด้วยไฟฟ้า ผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันพืชต่อเมทานอลคือ 1 ต่อ 41 อุณหภูมิ 250 °C เวลา 300 วินาที ได้ร้อยละเมทิลเอสเทอร์ 95 โดยน้ำหนัก

2.4. กระบวนการผลิต [20]

สามารถแบ่งออกเป็น 2 กระบวนการ คือ กระบวนการผลิตแบบไม่ต่อเนื่อง และกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง ซึ่งแต่ละกระบวนการผลิตจะใช้เครื่องปฏิกรณ์ที่แตกต่างกัน รายละเอียดของเครื่องปฏิกรณ์แต่ละกระบวนการผลิตเป็นดังนี้

2.4.1. กระบวนการผลิตแบบไม่ต่อเนื่อง

1) เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ [20]

เครื่องปฏิกรณ์แบบนี้ อาจเป็นภาชนะรูปถังแบบง่าย ๆ ที่สามารถรองรับสารตั้งต้นและให้เกิดปฏิกิริยาในอัตราที่เร็วพอสมควรกลายเป็นสารผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ภาชนะดังกล่าวอาจมีฝาปิดแบบง่าย ๆ เพื่อกันฝุ่นละอองลงไป เรียกว่า หม้อปฏิกิริยา (reaction kettle) ฝาปิดอาจทำอย่างแข็งแรงยึดแน่นติดกับตัวเครื่องปฏิกรณ์ ถ้าหากว่าปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นที่ความดันสูงหรือต่ำกว่าบรรยากาศ ในกรณีนี้เรียกภาชนะดังกล่าวว่า หม้อนิ่ง (autoclave)

เครื่องปฏิกรณ์แบบกะส่วนใหญ่มักมีเครื่องกวนอยู่ด้วย ชนิดของเครื่องกวนขึ้นอยู่กับความหนืดของของผสม

ปฏิกิริยาเคมีมักเกิดขึ้นควบคู่ไปกับการดูดหรือคายความร้อนออกมา ดังนั้นจะต้องมีวิธีการให้ความร้อนหรือความเย็นกับตัวหม้อปฏิกรณ์หรือหม้อนิ่ง เพื่อควบคุมอุณหภูมิของของผสมที่ระดับที่ต้องการ การให้ความร้อนกับของผสมในกรณีที่เป็นปฏิกิริยาชนิดดูดความร้อนอาจทำได้โดยการให้ความร้อนผ่านแผ่นความร้อนไฟฟ้า (electrical heating pads) หรือเครื่องให้ความร้อนแบบจุ่มลงในของผสม หรือโดยการให้ผ่านแจคเก็ตไอน้ำ (steam jacket) หรือขดไอน้ำ (steam coil) การให้ความเย็นกับของผสมก็อาจทำได้โดยวิธีคล้ายคลึงกัน

2.4.2. กระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง

1) เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล [20]

เครื่องปฏิกรณ์แบบนี้มีลักษณะเป็นท่อมีการทำงานอย่างต่อเนื่อง สารตั้งต้นไหลเข้าทางด้านหนึ่งของเครื่องและสารผลิตภัณฑ์ไหลออกทางปลายอีกด้านหนึ่ง ลักษณะการไหลเป็นไปในทิศทางเดียวไม่มีการผสมกันระหว่างของผสมที่ไหลตามกัน ในสถานะคงตัวองค์ประกอบของของผสม

ณ จุดใดๆ ตามความยาวของท่อจะมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับเวลา เครื่องปฏิกรณ์อาจมีความยาวมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน เช่น สำหรับปฏิกิริยาที่มีอัตราเร็วต่ำ อาจต้องใช้เครื่องปฏิกรณ์ยาวมาก เพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดได้สมบูรณ์ขึ้น เครื่องปฏิกรณ์ลักษณะเช่นนี้จึงเหมาะสำหรับปฏิกิริยาในวัฏภาคแก๊สด้วย ปฏิกิริยาที่มีจำนวนโมลของสารผลิตภัณฑ์ต่างไปจากสารตั้งต้นหรือมีความหนาแน่นไม่คงที่ก็เหมาะที่จะใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบนี้ การให้ความร้อนหรือดึงความร้อนออกจากปฏิกิริยาทำได้โดยให้ผ่านทางผนังท่อ ซึ่งสามารถทำได้ง่ายสำหรับปฏิกิริยาที่ต้องการถ่ายโอนความร้อนที่ตำแหน่งต่างๆ ของเครื่องปฏิกรณ์ไม่เท่ากัน

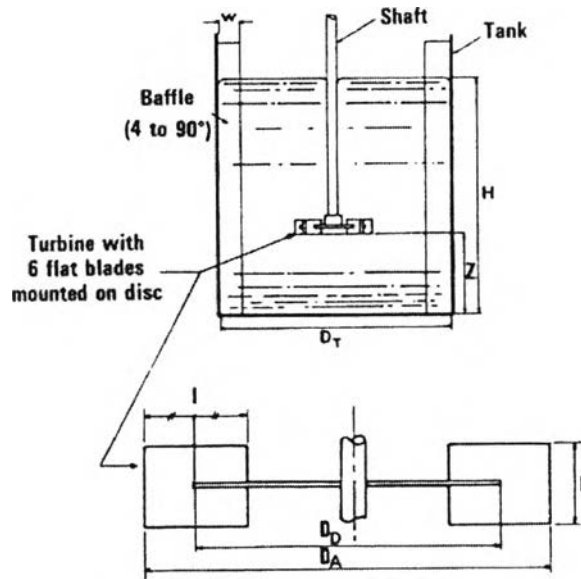
2) เครื่องปฏิกรณ์แบบไหลผสม [20]

เครื่องปฏิกรณ์แบบนี้มีรูปร่างเป็นถังทรงกระบอก มีเครื่องกวนติดอยู่ด้านบนโดยแกนของใบพัดกวนทะลุฝาปิด นอกจากนี้อาจมีอุปกรณ์ช่วยควบคุมอุณหภูมิและความดันด้วย นิยมใช้สำหรับปฏิกิริยาในวัฏภาคของเหลว ในการใช้งานโดยทั่วไปสารตั้งต้นถูกสูบผ่านเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์อย่างต่อเนื่อง ส่วนสารผลิตภัณฑ์จะไหลล้นออกมาทางท่อด้านข้างของเครื่องปฏิกรณ์ ถ้าเครื่องกวนมีประสิทธิภาพดีจะทำให้องค์ประกอบของสารผสมในเครื่องปฏิกรณ์เท่ากันทุกๆ จุดซึ่งก็หมายความว่าองค์ประกอบของส่วนที่ไหลล้นออกมามีค่าเท่ากับที่อยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์ด้วย

2.5. การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เคมี

2.5.1. ถังกวน [21-23]

ถังกวนมีรูปร่างหลายแบบขึ้นอยู่กับความเหมาะสมกับการใช้งาน เช่น ถังทรงกระบอก ถังรูปกรวย ถังกลม ตั้งแต่รูปร่างก็มีขอบเขตการใช้งานและการออกแบบแตกต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น ถังทรงกระบอกแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 รูปแบบถังกวนตามมาตรฐาน [22]

การคำนวณสำหรับการออกแบบถังกวนและใบพัดกวนตามมาตรฐานเป็นดังนี้ [21, 23]

- 1) ใบพัดกวนแบบกังหันชนิดใบตรง 6 ใบแบบติดบนจาน
 - 2) เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด $D_A = 1/3$ ของเส้นผ่านศูนย์กลางถัง D_T
 - 3) ความสูงของใบพัดจากก้นถึง $Z = 1.0$ ของเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด
 - 4) ความกว้างของใบพัด $b = 1/5$ ของเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด
 - 5) ความยาวของใบพัด $l = 1/4$ ของเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด
 - 6) เส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นกลางใบสำหรับติดใบพัด $D_D = 3/4$ ของเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด
 - 7) ความสูงของระดับน้ำ $H = 1.0$ ของเส้นผ่านศูนย์กลางถัง
 - 8) จำนวนแผ่นกั้น = 4 ตั้งอยู่ในแนวตรงติดอยู่ที่ผนังของถัง และติดจากก้นถึงจนเหนือพื้นผิวของเหลว
 - 9) ความกว้างของแผ่นกั้น $W = 1/10$ ของเส้นผ่านศูนย์กลางถัง
- ซึ่งรูปร่างถังกวนมาตรฐานนี้อาจจะใช้กับใบพัดกวนชนิดอื่นๆได้

2.5.2. ชนิดของใบพัดกวน [21, 22, 24]

ใบพัดกวนมีหลายชนิดและมีรูปร่างแตกต่างกันตามการใช้งานแต่ละกรณี รูปแบบส่วนใหญ่ของใบพัดกวนแบ่งได้เป็น 4 ประเภทดังนี้ [24]

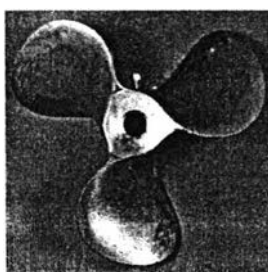
1) ใบพัดกวนแบบใบพัด (propeller) เป็นใบพัดกวนที่ทำให้เกิดพฤติกรรมกวนไหลตามแนวแกน (axial flow) มีประสิทธิภาพสูงเมื่อกวนที่ความเร็วสูง ใช้งานได้ดีในของเหลวที่มีความหนืดต่ำที่นิยมใช้คือใบพัดแบบสมอเรือ 3 ใบพัด

2) ใบพัดกวนแบบกังหัน (turbine) เป็นใบพัดกวนที่ทำให้เกิดพฤติกรรมกวนไหลตามแนวรัศมี (radial flow) และเป็นใบพัดที่มีแรงเฉือนสูง ความเร็วในการกวนจะช้ากว่าใบพัดกวนแบบใบพัด สามารถใช้กับของเหลวทุกชนิด

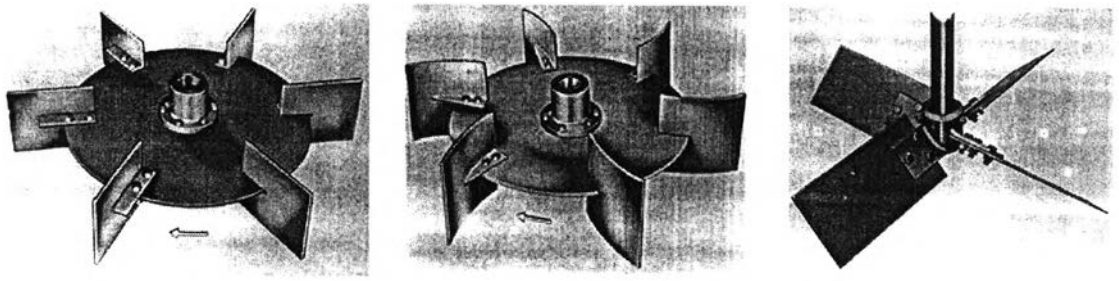
3) ใบพัดกวนแบบใบพาย (paddle) เป็นใบพัดกวนที่ใช้แพร่หลายในอุตสาหกรรม โดยปกติจะประกอบด้วย 2 ใบ มีทั้งในแนวตั้งและแนวขนาน ใช้งานในช่วงการไหลแบบราบเรียบไปยังการไหลแบบปั่นป่วน โดยไม่ใช้แผ่นกัน นอกจากนี้ใบพัดกวนแบบใบพายยังใช้ได้กับของเหลวที่มีความหนืดสูง

4) ใบพัดกวนแบบใบเกลียว (Archimedes screw) เป็นใบพัดกวนแบบใบพายชนิดพิเศษที่ทำให้ประสิทธิภาพในการกวนของเหลวสูง แต่ราคาแพงและค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาสูง ใบพัดกวนชนิดนี้ที่ของเหลวความหนืดสูงมากๆ จะให้ประสิทธิภาพสูงกว่าใบพัดชนิดอื่นๆ

ลักษณะของใบพัดกวนเหล่านี้แสดงดังรูปที่ 2.2, 2.3, 2.4 และ 2.5 ตามลำดับ การเลือกใช้ชนิดของใบพัดกวนขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการทำงาน แต่ควรคำนึงถึงความหนืดของเหลวเป็นหลักดังรูปที่ 2.6 แสดงถึงความสัมพันธ์ของการทำงานใบพัดกวนแต่ละชนิดกับความหนืดของเหลว สำหรับการเปรียบเทียบส่วนประกอบของใบพัดกวนแต่ละชนิดแสดงดังตารางที่ 2.10

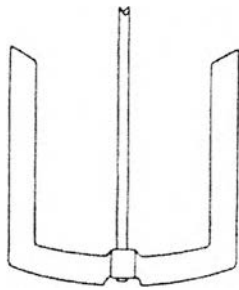


รูปที่ 2.2 ใบพัดกวนแบบใบพัด [21]

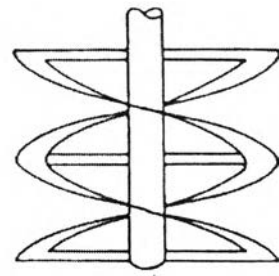


(ก) กังหัน 6 ใบแบบติดบนจาน (ข) กังหันใบโค้ง 6 ใบแบบติดบนจาน (ค) กังหัน 4 ใบแบบเอียง 45°

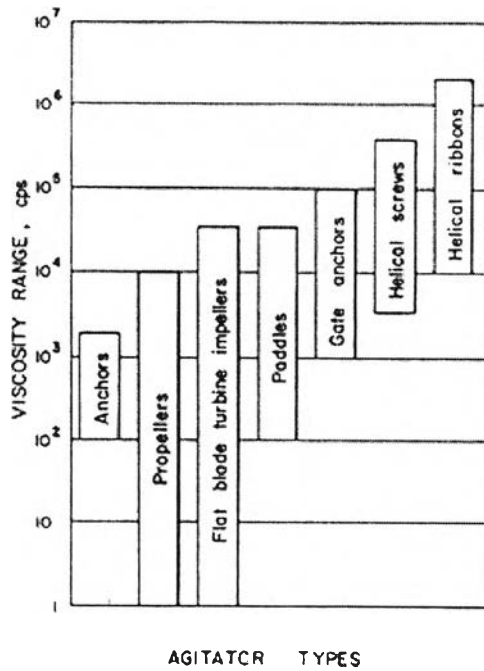
รูปที่ 2.3 ใบพัดกวนแบบกังหัน [21]



รูปที่ 2.4 ใบพัดกวนแบบใบพาย [21]

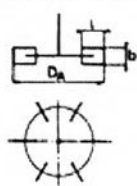
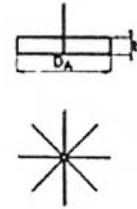

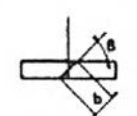


รูปที่ 2.5 ใบพัดกวนแบบใบเกลียว [22]



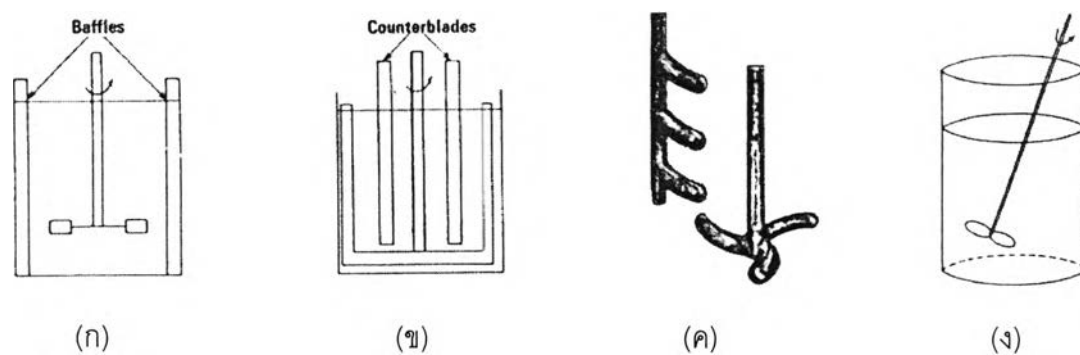
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ของการใช้งานใบพัดกวนแต่ละชนิดกับความหนืดของเหลว [21]

ตารางที่ 2.10 การเปรียบเทียบส่วนประกอบของใบพัดกวนแต่ละชนิด [22]

Agitator type	n_p	D_A/D_T	b/D_A	H/D_T	Z/D_T	α	β	Baffles		
								n_B	W/D_T	
Turbine with flat blades mounted on disc: $l = 1.25b$; $n_p =$ number of blades (1) $l = D_A/2$.		4	0.166	0.2	1.33	0.5	—	—	4	
		3	0.166	0.2	1.33	0.5	—	—	4	
		4	0.35	0.2	1.04	0.5	—	—	4	
		6	0.50	0.2	1	0.30	—	—	4	
		6	0.33	0.2	1	0.3	—	—	4	0.1
		6 ⁽¹⁾	0.33	0.125	1		—	—	4	0.08
		8	0.51	0.1			—	—	0	—
Turbines with flat blades		6	0.33	0.125	1	0.3	—	—	4	0.08
		4	0.33	0.2	1	0.3	—	—	4	0.08
		6	0.166	0.2	1.33	0.45	—	—	4	
		3	0.166	0.2	1.33	0.45	—	—	4	
		4	0.35	0.2	1.04	0.25	—	—	4	
		6	0.50	0.2	1	0.50	—	—	4	
		8	0.3	0.1			—	—	8	
		8	0.5	0.1			—	—	8	
		8	0.8	0.1			—	—	8	
Turbine with curved blades: (1) Rotation in reverse direction (2) Pfaudler type		6	0.33	0.125		0.3	—	90°	4	0.08
		8	0.5	0.1			10°	90°	8	
		8 ⁽¹⁾	0.5	0.1			10°	90°	8	
		3 ⁽²⁾	0.5	0.05			40°	80°	2	
		8	0.51	0.2	1	0.5	30°	90°	8	
Turbines with inclined flat blades or propeller ⁽¹⁾ ; p : propeller pitch (2) coaxial guide cylinder		8	0.5	0.2	1	0.50	—	45°	8	
		3 ⁽¹⁾	0.2 – 0.6		0.7 – 1.1	0.4 – 0.8	—	$p = D_A$	3	
		3 ⁽¹⁾	0.5						8	
		3 ⁽¹⁾	0.17 – 0.6						4	
		3 ⁽¹⁾	0.5						4	(2)

2.5.3. แผ่นกั้น (baffle) [21, 22, 24]

เป็นส่วนประกอบภายในถัง การติดแผ่นกั้นในตำแหน่งที่เหมาะสมกับลักษณะของใบพัดกวนและชนิดของของเหลว ทำให้การกวนมีประสิทธิภาพดีขึ้น คือช่วยป้องกันไม่ให้ของเหลวมีพฤติกรรมกรวมการไหลแบบวอร์เทกซ์ (vortex) เกิดขึ้น ซึ่งมักจะเกิดขึ้นในการกวนของเหลวความหนืดต่ำ ในถังกวนทรงกระบอกที่ติดตั้งใบพัดกวนตรงกลางถัง [24] จึงควรติดตั้งแผ่นกั้นเพื่อเป็นการลดพฤติกรรมกรวมการไหลแบบวอร์เทกซ์ โดยการติดตั้งแผ่นกั้นมีหลายแบบ คือ ติดตั้งใบพัดกวนที่หมุนตรงข้าม (counterblade) กับใบพัดกวนหลักหรือติดตั้งแผ่นกั้นที่ผนังของถังหรือการเลื่อนใบพัดกวนออกจากตำแหน่งกลางของถังและทำการเอียงใบพัดกวนดังรูปที่ 2.7 จากการศึกษาพบว่าการติดตั้งแผ่นกั้น 4 แผ่นติดกับผนังของถังโดยมีระยะห่างเท่าๆ กันจะให้ผลดีสำหรับการผสมของเหลวในกระบวนการเบลินดิง การผสมของเหลวโดยใช้ใบพัดกวนแบบใบพัดและใบพัดกวนแบบก้านเมื่อความหนืดของเหลวมากกว่า 20,000 เซนติพอยท์ [21] ไม่จำเป็นต้องติดตั้งแผ่นกั้น เพราะว่าของเหลวมีความต้านทานการเกิดพฤติกรรมกรวมการไหลแบบวอร์เทกซ์ในตัวเอง

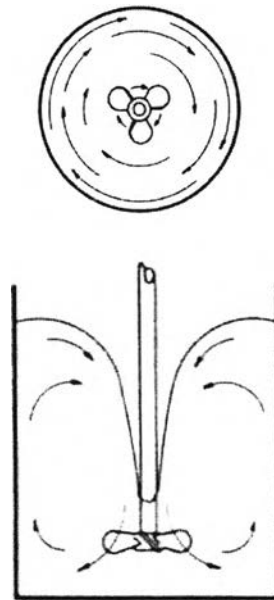


- (ก) ติดตั้งแผ่นกั้นที่ผนังถังจนเหมาะสมในการใช้กับใบพัดกวนแบบใบพัดและก้าน
 (ข) ติดตั้งใบพัดกวนที่หมุนตรงข้ามสำหรับใบพัดกวนแบบใบพาย
 (ค) ใบพัดกวนและใบพัดกวนที่หมุนตรงข้ามใช้ในถังกวนที่มีการเคลือบพื้นผิว
 (ง) การเลื่อนใบพัดกวนออกจากตำแหน่งกลางของถังและทำการเอียงใบพัดกวน

รูปที่ 2.7 ระบบที่มีการป้องกันการเกิดพฤติกรรมกาวไหลแบบวอร์เท็กซ์ [22]

2.5.4. พฤติกรรมกาวไหลแบบวอร์เท็กซ์ (vortex) [21, 23]

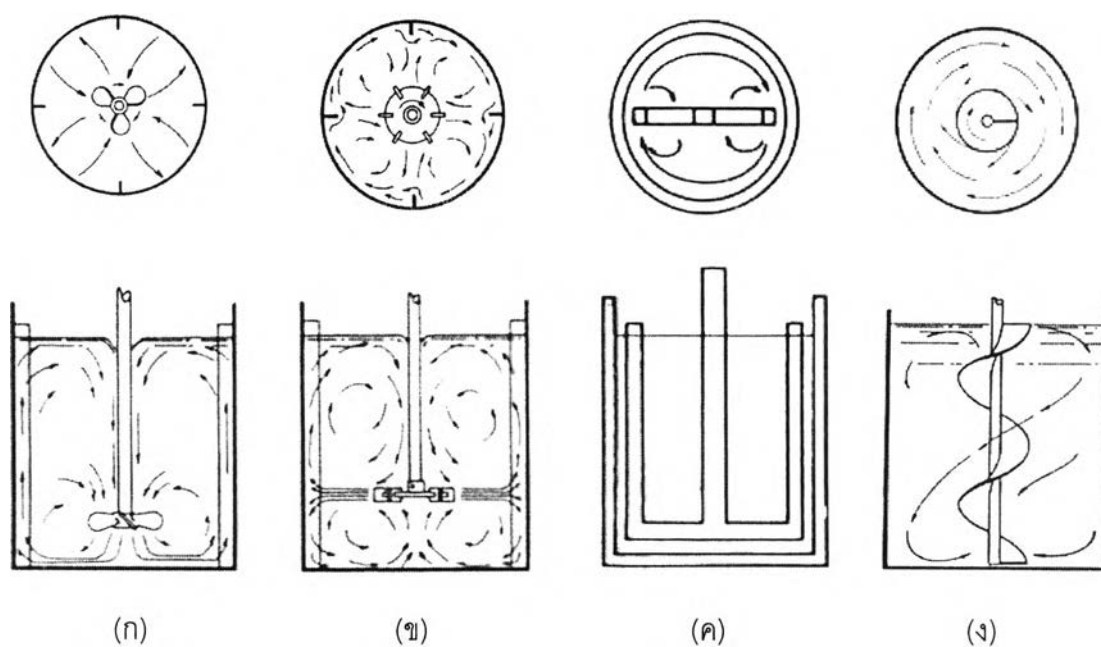
การใช้ใบพัดกวนแบบใบพัดหรือการใช้ใบพัดกวนแบบอื่นๆ ปราศจากการติดตั้งแผ่นกั้นในถัง การกวนของเหลวที่มีความหนืดต่ำจะทำให้เกิดพฤติกรรมกาวไหลแบบวอร์เท็กซ์ขึ้น ของเหลวหมุนวนในทิศทางเดียวกับทิศทางของใบพัดกวน เป็นสาเหตุให้ระดับของเหลวลดลงรอบแกนของใบพัดกวน พฤติกรรมกาวไหลแบบวอร์เท็กซ์แสดงดังรูปที่ 2.8 ซึ่งวอร์เท็กซ์มีการเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบของใบพัดกวน จนกระทั่งเกิดวอร์เท็กซ์ถึงตัวใบพัดกวน ประสิทธิภาพของการผสมในระบบที่เกิดพฤติกรรมกาวไหลแบบวอร์เท็กซ์ โดยปกติแล้วจะมีประสิทธิภาพน้อยกว่าในระบบที่ไม่มีพฤติกรรมกาวไหลแบบวอร์เท็กซ์ [23]



รูปที่ 2.8 การเกิดพฤติกรรมการไหลแบบวอร์เทกซ์ในระบบที่ไม่ได้ติดตั้งแผ่นกัน [21]

2.5.5. พฤติกรรมการไหล [21, 22]

การใช้ใบพัดกวนทำให้เกิดการไหลและเกิดการปั่นป่วนในของเหลว ซึ่งใบพัดกวนแต่ละชนิดทำให้เกิดความเร็วและพฤติกรรมการไหลของของเหลวแตกต่างกัน ผลกระทบที่สำคัญที่สุดของใบพัดกวนแต่ละชนิดคือพฤติกรรมการไหลของของเหลวภายในถังดังรูปที่ 2.9 พฤติกรรมการไหลเหล่านี้อาจเป็นแบบพฤติกรรมการไหลตามแนวแกน (axial flow) เช่น ใบพัดกวนแบบใบพัด หรือ ใบพัดกวนแบบใบเกลียว หรือพฤติกรรมการไหลตามแนวรัศมี (radial flow) เช่น ใบพัดกวนแบบกังหัน หรือพฤติกรรมการไหลอยู่ที่เส้นรอบวงของใบพัด เช่น ใบพัดกวนแบบใบพายสมอเรือ โดยพฤติกรรมการไหลแนวแกนมีประสิทธิภาพมากในการกวนในถังทรงกระบอกดังรูปที่ 2.9



- (ก) ใบพัดกวนแบบใบพัดและถังกวนติดตั้งแผ่นกัน (พฤติกรรมการไหลตามแนวแกน)
- (ข) ใบพัดกวนแบบกังหันและถังกวนติดตั้งแผ่นกัน (พฤติกรรมการไหลตามแนวรัศมี)
- (ค) ใบพัดกวนแบบใบพายและถังกวนไม่ติดตั้งแผ่นกัน (พฤติกรรมการไหลอยู่ที่เส้นรอบวงของใบพัด)
- (ง) ใบพัดกวนแบบใบเกลียวและถังกวนไม่ติดตั้งแผ่นกัน (พฤติกรรมการไหลตามแนวแกน)

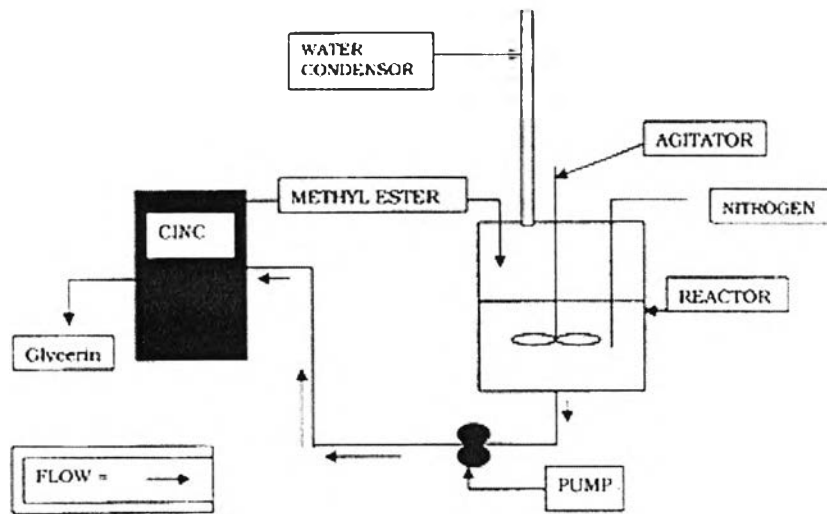
รูปที่ 2.9 พฤติกรรมการไหลภายในถังกวนของใบพัดกวนแต่ละชนิด [21, 22]

2.6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1. งานวิจัยและสิทธิบัตรเกี่ยวกับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

Barnhorst และคณะ [25] ประดิษฐ์เครื่องปฏิกรณ์สำหรับศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันแบบไม่ต่อเนื่อง โดยมีการติดตั้งเครื่องเหวี่ยงแยกเพื่อแยกกลีเซอรอลออกจากกระบวนการ ทำให้ปฏิกิริยาเข้าสู่จุดสมบรูณ์เร็วขึ้น ดังรูปที่ 2.10 โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันถั่วเหลือง คือ 6 ต่อ 1 ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยาคือโซเดียมเมทอกไซด์ โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (batch reactor) ต่อกับเครื่องเหวี่ยงแยก เมื่อเริ่มปฏิกิริยาเติมเมทานอลและตัวเร่งปฏิกิริยาลงไปร้อยละ 0.08 โดยน้ำหนักในเครื่องปฏิกรณ์ที่มีน้ำมันอยู่ หลังจากเวลาผ่าน

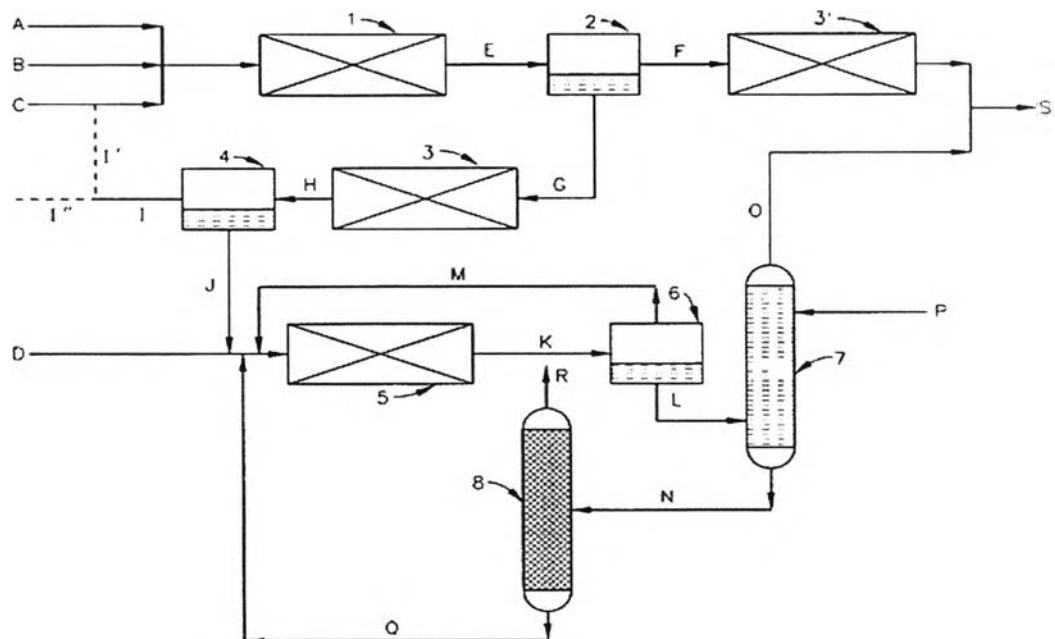
ไป 5 นาที ทำการเปิดปั๊มเพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์เข้าไปยังเครื่องเหวี่ยงแยก 2000 รอบต่อนาที เพื่อแยกผลิตภัณฑ์เป็นสองเฟส คือ เมทิลเอสเทอร์เป็นเฟสที่เบา และ กลีเซอรอลเป็นเฟสที่หนัก โดยเมทิลเอสเทอร์ปล่อยกลับไปยังเครื่องปฏิกรณ์ ส่วนกลีเซอรอล ปล่อยใส่บีกเกอร์ที่เตรียมไว้ เมื่อเวลาผ่านไป 20 นาที เติมนีโกลีเซอไรด์และตัวเร่งปฏิกิริยาอีกครั้งที่ ความเข้มข้น 0.07 ร้อยละโดยน้ำหนัก หลังจากนั้นเวลา 25 นาที หรือ 45 นาที หลังจากเริ่ม ปฏิกริยาจึงปิดปั๊ม ผลิตภัณฑ์ที่ได้ประกอบด้วย เมทิลเอสเทอร์ 98.5 เปอร์เซ็นต์, โมโนกลีเซอไรด์ 1.2 เปอร์เซ็นต์ และ ไดกลีเซอไรด์ 0.3 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี



รูปที่ 2.10 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่ประดิษฐ์ขึ้นโดย Barnhorst และคณะ [25]

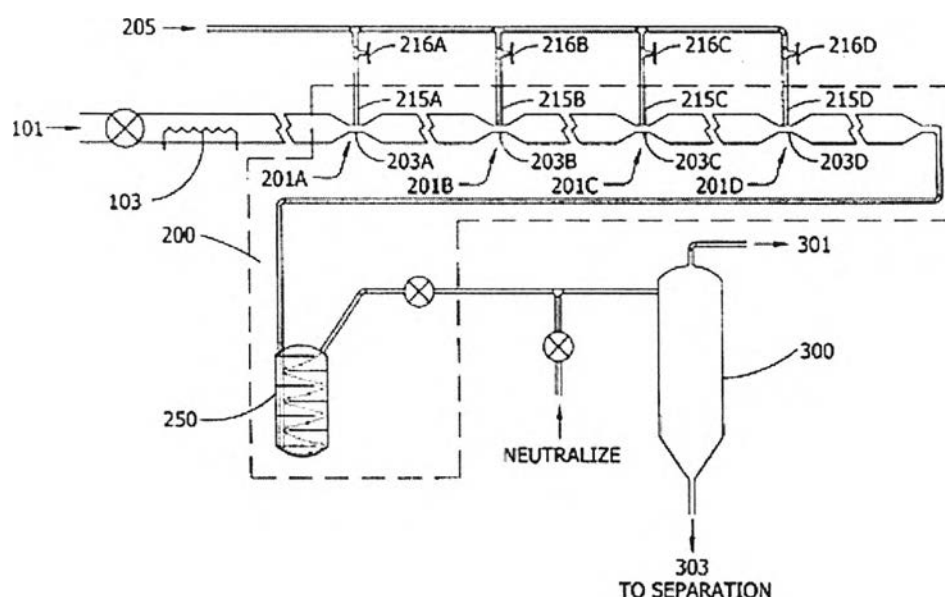
Noureddini และคณะ [26] ประดิษฐ์กระบวนการผลิตไบโอดีเซลอย่างต่อเนื่องขนาดนำร่อง ซึ่งกระบวนการนี้สามารถผลิตไบโอดีเซลที่มีความหนืดต่ำและจุดเกิดหมอกต่ำกว่า 32 องศาฟาเรนไฮต์ ดังรูปที่ 2.11 โดยการป้อนสารตั้งต้น ไตรกลีเซอไรด์ (A) ตัวเร่งปฏิกิริยา (B) เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และเมทานอล (C) โดยป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน (continuous stirred-tank reactor, CSTR) (1) ที่อุณหภูมิ 70-80 องศาเซลเซียสความดัน 1-2 บรรยากาศ อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันถั่วเหลือง 3 ต่อ 1 ถึง 10 ต่อ 1 และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1-1.0 โดยน้ำหนัก ผลิตภัณฑ์รวมที่ได้ (E) ถูกป้อนเข้าสู่หน่วยแยก (2) เพื่อแยกชั้นระหว่างเมทิลเอสเทอร์ซึ่งมีประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ และกลีเซอรอล 20 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นเมทิลเอสเทอร์ (F) ถูกป้อนเข้าสู่หน่วยทำให้เป็นกลาง (3) ซึ่งจะได้เมทิลเอสเทอร์ที่บริสุทธิ์ (S) ส่วนกลีเซอรอล (G) ป้อนเข้าสู่หน่วยเพื่อกำจัดไอออนลบทำให้เป็นกลาง (3) จากนั้นกลีเซอรอล (H) จะเข้าสู่หน่วยแยกเมทานอล (4) เพื่อนำกลับไปที่ใหม่เป็นสารตั้งต้น (I)

จากนั้นกลีเซอรอลซึ่งมีเมทิลเอสเทอร์บางส่วนปนอยู่ (J) ถูกป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์แบบไหลผสม (5) พร้อมกับการป้อน isobutylene (D) กับส่วน isobutylene ที่นำกลับมาใช้ใหม่ (M) และกลีเซอรอลและโมโนเอสเทอร์ที่นำกลับมาใช้ใหม่ (Q) ในอัตราส่วน isobutylene ต่อกลีเซอรอล 1 ถึง 3 ในเครื่องปฏิกรณ์ (5) กลีเซอรอลและ isobutylene จะทำปฏิกิริยาในส่วนที่เป็นของเหลวที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นกรดอยู่ จากนั้นผลิตภัณฑ์ (K) ประกอบด้วยกลีเซอรอลอีเทอร์ (mono-tertiary butyl ether, di-tertiary butyl ether, tri-tertiary butyl ether) กลีเซอรอล เมทิลเอสเทอร์ส่วนที่เหลือ และ isobutylene ถูกป้อนเข้าสู่หน่วยแยก isobutylene (6) เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ส่วนที่เหลือ (L) ถูกป้อนเข้าสู่หน่วยสกัด (7) โดยน้ำ (P) ซึ่งทางออกผลิตภัณฑ์ทางด้านล่างของสกัด (N) ประกอบด้วยน้ำ โมโนอีเทอร์ และกลีเซอรอล ถูกป้อนเข้าสู่หอกลั่น (8) เพื่อกำจัดน้ำออกทางด้านบนของหอกลั่น (R) ส่วนผลิตภัณฑ์ทางด้านล่างของหอกลั่นประกอบด้วย โมโนอีเทอร์ และกลีเซอรอล ถูกป้อนกลับไปใช้ใหม่ (Q) ส่วนทางออกผลิตภัณฑ์ทางด้านบนของสกัด (O) คือ กลีเซอรอลอีเทอร์ โดยจะไปรวมกับเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้ในตอนแรกจะช่วยให้ไขมันไบโอดีเซลที่ได้มีความหนืดและจุดเกิดหมอกต่ำ ส่วน (N) ถูกป้อนเข้าสู่หอกลั่น (8) เพื่อกำจัดน้ำออกทางด้านบนของหอกลั่น (R) ส่วนผลิตภัณฑ์ทางด้านล่างของหอกลั่นประกอบด้วย โมโนอีเทอร์ และกลีเซอรอล ถูกป้อนกลับไปใช้ใหม่ ซึ่งกระบวนการผลิตนี้ผลิตผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสัดส่วนของ กลีเซอรอลอีเทอร์ร้อยละ 12 และเมทิลเอสเทอร์ร้อยละ 88



รูปที่ 2.11 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่ประดิษฐ์ขึ้นโดย Nouredini และคณะ [26]

Hanna และคณะ [27] ประดิษฐ์กระบวนการผลิตไบโอดีเซลอย่างต่อเนื่อง โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลขนาดนาร่องโดยใช้หลักการ venturi ที่มีภาวะความปั่นป่วนและอุณหภูมิสูง ดังรูปที่ 2.12 โดยสามารถใช้อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันถั่วเหลืองในช่วง 3 ต่อ 1 ถึง 6 ต่อ 1 และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์สามารถใช้ได้ในช่วงร้อยละ 0.1 ถึง 1 โดยน้ำหนัก เริ่มต้นการผลิตโดยให้ความร้อนน้ำมันพืช (101) ที่อุณหภูมิ 70 ถึง 200 องศาเซลเซียส จากนั้นป้อนเข้าไปยังเครื่องปฏิกรณ์ที่มีอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส จากนั้นเมทานอลที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาละลายอยู่ถูกฉีดเข้าเครื่องปฏิกรณ์ที่ตำแหน่งต่างๆ (215A-215D) ภายในเครื่องปฏิกรณ์จะมีความปั่นป่วนสูงมีค่า Reynold number (Re) ในช่วง 2100 ถึง 4000 ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาขึ้นได้ผลิตภัณฑ์คือ เมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอลเป็นผลิตภัณฑ์รวม จากนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้ถูกผ่านไปยังถังที่มีแผ่นกั้นติดอยู่เพื่อเป็นการหยุดปฏิกิริยา ต่อจากนั้นผลิตภัณฑ์ถูกทำให้เป็นกลาง ซึ่งจะผ่านเข้าไปยังส่วนแยกชั้นและทำการกลั่นเพื่อกำจัดเมทานอลที่เหลือจากปฏิกิริยา (301) นำกลับไปใช้ใหม่ จากนั้นนำเมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอลที่ได้ (303) ทำการแยกชั้น โดยนำชั้นเมทิลเอสเทอร์ที่ได้มาล้างน้ำและทำให้แห้ง ซึ่งกระบวนการผลิตนี้ได้เมทิลเอสเทอร์ความบริสุทธิ์อยู่ในช่วงร้อยละ 80 ถึง 97

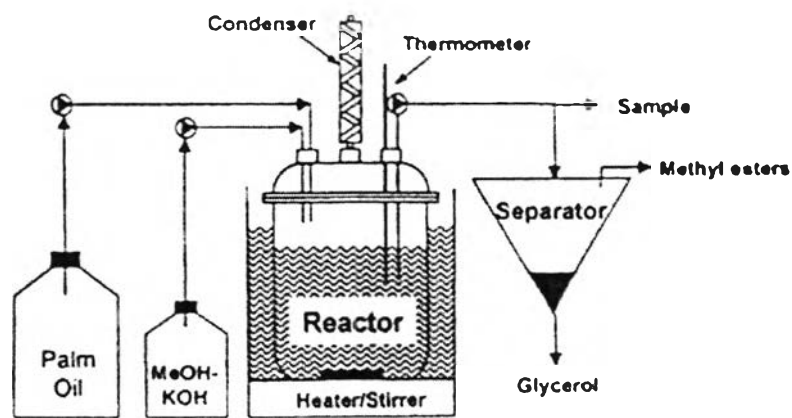


รูปที่ 2.12 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่ประดิษฐ์ขึ้นโดย Hanna และคณะ [27]

Darnoko และคณะ [28] มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องงานแรก คือ ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ระหว่างน้ำมันปาล์มกับเมทานอลโดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (batch reactor) ที่อุณหภูมิ 50 ถึง 60 องศา

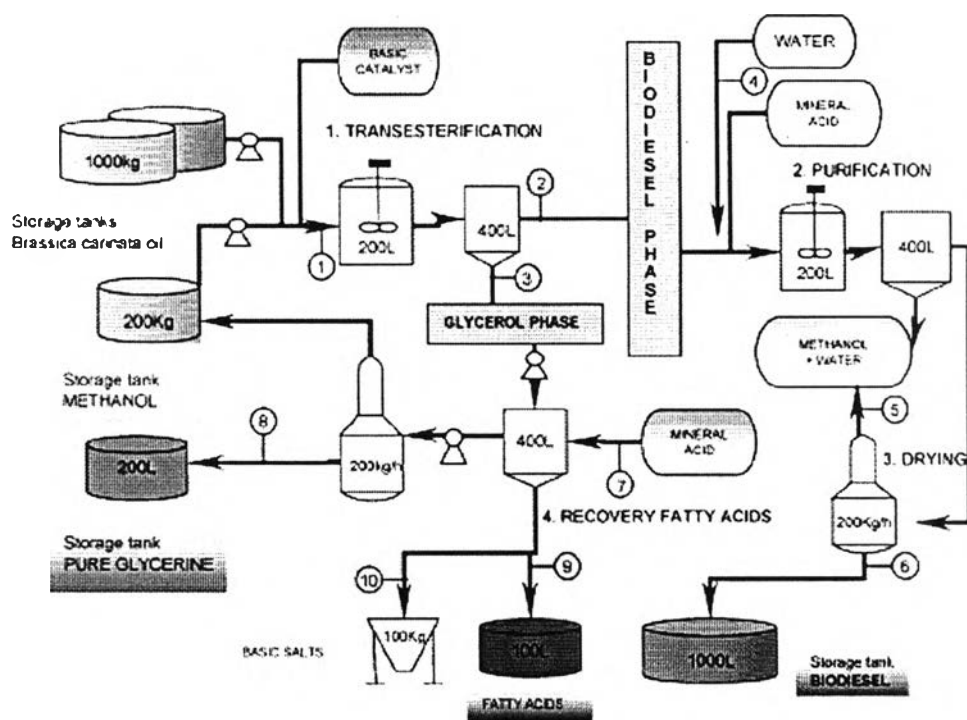
เซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มเป็น 6 ต่อ 1 ผลการทดลองพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิไม่มีผลต่อเวลาในการเกิดค่าการเปลี่ยน (conversion) สูงสุด การเปลี่ยนของไตรกลีเซอไรด์ (TG), ไดกลีเซอไรด์ (DG) และโมโนกลีเซอไรด์ (MG) การเปลี่ยนของไตรกลีเซอไรด์เกิดขึ้นเมื่อเป็นปฏิกิริยาอันดับสอง เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และ โมโนกลีเซอไรด์ อยู่ในช่วง 0.018-0.191 (ร้อยละโดยน้ำหนัก.น้ำหนัก)⁻¹ โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของโมโนกลีเซอไรด์เกิดเร็วกว่าปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์ พิจารณาได้จากค่าพลังงานกระตุ้น (activation energy) ของปฏิกิริยา จากการทดลองได้ค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และ โมโนกลีเซอไรด์ เป็น 14.7, 14.2 และ 6.4 กิโลแคลอรีต่อโมล ตามลำดับ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมคือร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

งานวิจัยอีกชิ้นหนึ่งโดยผู้วิจัยเดียวกัน (Darnoko) [29] คือ ศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันแบบต่อเนื่องขนาดห้องปฏิบัติการ จากน้ำมันปาล์มโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน (continuous stirred-tank reactor, CSTR) ขนาด 1 ลิตร ดังรูปที่ 2.13 โดยการใช้ปั๊มในการส่งน้ำมัน ตัวเร่งปฏิกิริยา รวมถึงผลิตภัณฑ์ที่ได้อย่างต่อเนื่อง ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มคือ 6 ต่อ 1 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ผลได้ (yield) ของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นจาก 58.8 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลาเฉลี่ยที่สารอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ (residence time) 40 นาที เป็น 97.3 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเวลาเฉลี่ยที่สารอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 60 นาที อย่างไรก็ตามถ้าเวลาในการทำปฏิกิริยาสูงเกินไปเป็นผลให้อัตราการเกิดผลิตภัณฑ์กลับลดลง เพราะวากซีเทอร์อลจะทำปฏิกิริยากับเมทิลเอสเทอร์กลายเป็นกลีเซอไรด์



รูปที่ 2.13 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่ประดิษฐ์ขึ้นโดย Darnoko และคณะ [29]

Bouaid และคณะ [30] ประดิษฐ์กระบวนการผลิตไบโอดีเซลอย่างต่อเนื่องขนาดนำร่องจากน้ำมัน Brassica carinata โดยเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน (continuous stirred-tank reactor, CSTR) ขนาด 200 ลิตร ดังรูปที่ 2.14 โดยใช้ภาวะการผลิตที่อัตราส่วนโดยโมเลกุลของน้ำมัน Brassica carinata 6 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และเวลาทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ 60 นาที ซึ่งกระบวนการผลิตแบ่งเป็น 4 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์ ในขั้นนี้จะได้ผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอลเป็นผลิตภัณฑ์รวม ซึ่งจะปล่อยให้แยกชั้นในถังปริมาตร 400 ลิตร ขั้นตอนที่สองการทำให้เมทิลเอสเทอร์บริสุทธิ์ โดยนำชั้นเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากการแยกชั้นมาเติมกรดฟอสฟอริกเพื่อทำให้เป็นกลางและทำการล้างด้วยน้ำ จากนั้นผ่านไปยังขั้นตอนที่สามเพื่อทำการกลั่นเพื่อแยกน้ำและเมทานอลออก ซึ่งจะได้เมทิลเอสเทอร์บริสุทธิ์ร้อยละ 98 และขั้นตอนสุดท้ายการทำให้กลีเซอรอลบริสุทธิ์ โดยนำกลีเซอรอลที่ได้จากการทำปฏิกิริยามาเติมด้วยกรดฟอสฟอริกเพื่อทำให้เป็นกลางเพื่อกำจัดกรดไขมัน และเกลือซึ่งสามารถใช้เป็นปุ๋ยได้ จากนั้นทำการกลั่นเพื่อแยกเมทานอลที่เหลืออยู่จำนวนมากกลับไปใช้ใหม่ ซึ่งทำให้ได้กลีเซอรอลบริสุทธิ์



รูปที่ 2.14 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่ประดิษฐ์ขึ้นโดย Bouaid และคณะ [30]

2.6.2. งานวิจัยศึกษาพฤติกรรมการกวน

ธีรยุทธ หล่อภูมิพันธ์ [23] ศึกษาภาวะที่มีผลต่อการผสมในถังกวนแบบต่อเนื่องที่มีสัดส่วนมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 20, 25 และ 30 เซนติเมตร ตามลำดับ และมีน้ำบรรจุอยู่สูงเท่ากับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในตั้งแต่ละใบ โดยภาวะที่ใช้ในการทดลองเป็นแบบต่อเนื่องที่มีการป้อนที่ตำแหน่งใบพัด และจุดออกที่ระดับน้ำและติดตั้งจุดวัด 2 จุด คือ ที่ระดับใบพัดและที่จุดออก งานวิจัยนี้ศึกษาตัวแปร คือ ชนิดของใบกวน ซึ่งเป็นใบกวนชนิดก้นแบนที่มีใบกวน 6 ใบ 3 ชนิด คือ แบบเปิด แบบติดบนจาน และแบบใบพัดเอียง 45 องศา ความเร็วรอบของการกวน ในช่วง 264.87-618.27 รอบต่อนาที ตำแหน่งของใบพัดกวนที่ระยะความสูงจากก้นถึง $1/2$ และ $1/3$ ของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในถัง ขนาดของถัง ทิศทางการหมุนของใบพัดเอียง 45 องศา อัตราการป้อนสาร และนอกจากนี้ยังได้ทำการทดลองศึกษาผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัดที่มีผลต่อระบบ โดยการวิเคราะห์เป็น 2 ส่วน เวลาที่สารอยู่ในถัง และเวลาที่ระบบเป็นเนื้อเดียว ผลการศึกษาพบว่า ใบกวน 6 ใบแบบติดบนจานที่ตำแหน่งความสูงจากก้นถึง $1/3$ ของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของถังจะให้ค่าเวลาที่สารอยู่ในถังและเวลาที่สารเป็นเนื้อเดียวยาวที่สุด สำหรับถังใบใหญ่จะให้เวลาที่สารอยู่ในถังนานกว่าถังใบเล็ก โดยความเร็วรอบของใบพัดที่สูงจะให้ค่าเวลาที่สารอยู่ในถังนานแต่เวลาในการผสมสั้นกว่าถังใบเล็ก ในระบบที่ใช้ใบพัดขนาดใหญ่กว่ามาตรฐานจะให้ค่าเวลาที่สารอยู่ในถัง และเวลาที่สารเป็นเนื้อเดียวเร็วกว่าใบพัดมาตรฐานแต่จะเกิดความปั่นป่วนสูงกว่าทำให้ควบคุมยากกว่าระบบที่ใช้ใบพัดมาตรฐาน ทิศทางการหมุนของใบพัดเอียง 45 องศา ในทิศที่ก่อให้เกิดกระแสขึ้นไปที่มีผิวหน้าของเหลวจะให้ค่าเวลาที่สารอยู่ในถังนานกว่า แต่เวลาที่ระบบเป็นเนื้อเดียวกันสั้นกว่าทิศทางตรงกันข้ามและอัตราการไหลเข้าที่เร็วกว่าจะทำให้เวลาที่สารอยู่ในถังนานแต่เวลาในการผสมสั้นกว่าอัตราการไหลเข้าที่ช้ากว่า

2.6.3. การเปรียบเทียบงานวิจัยและสิทธิบัตรเกี่ยวกับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

จากงานวิจัยและสิทธิบัตรเกี่ยวกับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่ได้อ้างอิงสามารถเปรียบเทียบกระบวนการและภาวะของการผลิตได้ดังตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.11 การเปรียบเทียบงานวิจัยและสิทธิบัตรเกี่ยวกับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล [25, 26, 27, 29, 30]

ผู้วิจัย	เครื่อง ปฏิกรณ์	กระบวนการผลิต	ขนาดการผลิต	ภาวะการผลิต	ร้อยละ เมทิลเอสเทอร์
Barnhorst และคณะ	ถังกวน	แบบไม่ต่อเนื่อง	ขนาดห้องปฏิบัติการ	อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันถั่วเหลือง 6 ต่อ 1 โซเดียมเมทอกไซด์ร้อยละ 0.08 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส	98.5
Noureddini และคณะ	ถังกวน	แบบต่อเนื่อง	ขนาดนำร่อง	อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันถั่วเหลือง 6 ต่อ 1 ถึง 10 ต่อ 1 โซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.1- 1.0 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 70-80 องศาเซลเซียส	88.0
Hanna และคณะ	ท่อไหล	แบบต่อเนื่อง	ขนาดนำร่อง	อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6 ต่อ 1 โซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.1-1.0 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส	80.0-97.0
Darnoko และคณะ	ถังกวน	แบบต่อเนื่อง	ขนาดห้องปฏิบัติการ	อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันถั่วเหลือง 6 ต่อ 1 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส	97.3
Bouaid และคณะ	ถังกวน	แบบต่อเนื่อง	ขนาดนำร่อง	อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมัน Brassica carinata 6 ต่อ 1 ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1.5 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	98.0

จากงานวิจัยของ Barnhorst ศึกษากระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบไม่ต่อเนื่อง โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบถังกวน งานวิจัยนี้มีจุดเด่นอยู่ที่การประยุกต์นำเครื่องเหวี่ยงแยกมาเชื่อมต่อกับถังปฏิกรณ์ เพื่อแยกกลีเซอรอลออกจากกระบวนการผลิต เป็นผลให้เวลาการเกิดปฏิกิริยาไปสู่จุดสมบูรณ์ลดลง จึงควรมีการพัฒนากระบวนการผลิตเป็นแบบต่อเนื่องเพื่อเป็นการเพิ่มกำลังการผลิตไบโอดีเซล ส่วนงานวิจัยของ Hanna ศึกษากระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบท่อผสมซึ่งมีอุณหภูมิสูงถึง 200 องศาเซลเซียส จึงเป็นผลให้มีภาวะการเกิดปฏิกิริยาที่รุนแรงกว่างานวิจัยอื่น ส่วนงานวิจัยของ Darnoko ศึกษากระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนขนาดห้องปฏิบัติการ ซึ่งมีการศึกษาแต่ขั้นตอนการทำปฏิกิริยา จึงควรมีการพัฒนากระบวนการถึงขั้นตอนการล้างตัวเร่งปฏิกิริยาในผลิตภัณฑ์เพื่อให้ได้เมทิลเอสเทอร์ที่บริสุทธิ์ ส่วนงานวิจัยของ Nouredдини และ Bouaid ศึกษากระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนขนาดนำร่องเหมือนกัน ซึ่งมีกระบวนการผลิตบางขั้นตอนต่างกันคือ งานวิจัยของ Nouredдини ได้มีการพัฒนากระบวนการนำกลีเซอรอลซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมที่ได้จากปฏิกิริยามาทำปฏิกิริยากับ isobutylene เกิดเป็นอีเทอร์ของกลีเซอรอล จากนั้นจึงนำอีเทอร์ที่ผลิตได้ไปรวมกับเมทิลเอสเทอร์ ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสัดส่วนของเมทิลเอสเทอร์ร้อยละ 88 และอีเทอร์ร้อยละ 12 ทำให้ได้ไบโอดีเซลที่มีความหนืดและจุดเกิดหมอกต่ำ ซึ่งเป็นจุดเด่นของงานวิจัยนี้ ส่วนงานวิจัยของ Bouaid ได้มีการพัฒนากระบวนการนำกลีเซอรอลซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมผ่านกระบวนการต่างๆ ทำให้ได้กลีเซอรอลบริสุทธิ์ ซึ่งสามารถนำกลีเซอรอลบริสุทธิ์ไปใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตอื่นๆ ต่อไปได้