

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

จากสภาวะการขาดแคลนน้ำมันเชื้อเพลิงและราคาน้ำมันเชื้อเพลิงที่สูงขึ้นมีผลกระทบต่อสภาวะเศรษฐกิจและสังคมของประเทศไทย โดยต้องนำเข้าน้ำมันเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ เป็นเหตุผลสำคัญที่ต้องมีการสำรวจแหล่งพลังงานชนิดอื่นมาทดแทนพลังงานน้ำมันเชื้อเพลิง แหล่งพลังงานทดแทนหนึ่งที่ได้ได้รับความสนใจอย่างสูงในประเทศไทย คือ เมทิลเอสเทอร์ หรือ ไบโอดีเซล ซึ่งได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันที่ได้จากพืชและแอลกอฮอล์

งานวิจัยเกี่ยวกับการผลิตไบโอดีเซลในปัจจุบัน ส่วนใหญ่จะเป็นในแนวทางการพัฒนากระบวนการผลิตแบบกะ เนื่องจากสามารถทำการทดลองในปริมาณที่น้อยกว่าการทำแบบต่อเนื่องได้ อย่างไรก็ตามถ้าหากเป็นการผลิตในระดับอุตสาหกรรม การผลิตแบบกะจะมีอัตราการผลิตต่ำกว่าแต่มีต้นทุนแปรผัน (Variable cost) ต่อหน่วยผลิตภัณฑ์สูงกว่าเมื่อเทียบกับถึงปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง โดยทั่วไปกระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์ประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลัก คือ การทำปฏิกิริยา การแยกกลีเซอรอล การล้างสิ่งปนเปื้อน และการกำจัดน้ำ งานวิจัยนี้ได้สนใจในการทำปฏิกิริยาและการแยกกลีเซอรอล โดยได้แบ่งหัวข้อของการศึกษา คือ การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเมทิลเอสเทอร์ในถังปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง (CSTR) แทนการผลิตแบบกะ และการหาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีผลต่อการแยกชั้นของกลีเซอรอล ในงานวิจัยส่วนแรกได้ประยุกต์ใช้ข้อมูลแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบกะของ Leevijit (2004) เพื่อสร้างและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเมทิลเอสเทอร์ในถังปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง โดยตัวแปรที่มีผลต่อสภาวะที่เหมาะสมที่สนใจ คือ อัตราส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม อุณหภูมิของปฏิกิริยา และเวลาที่สารอยู่ในถังปฏิกรณ์ สำหรับงานวิจัยส่วนหลังเป็นการหาความสัมพันธ์ของการแยกชั้นระหว่างเมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอล โดยพิจารณาจากอัตราส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มและอัตราส่วนของความสูงของสารผสมต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของถังตกจม (H/D) ว่ามีผลอย่างไรกับเวลาในการแยกชั้นระหว่างกลีเซอรอลและเมทิลเอสเทอร์

## 1.2 ตรวจสอบเอกสาร

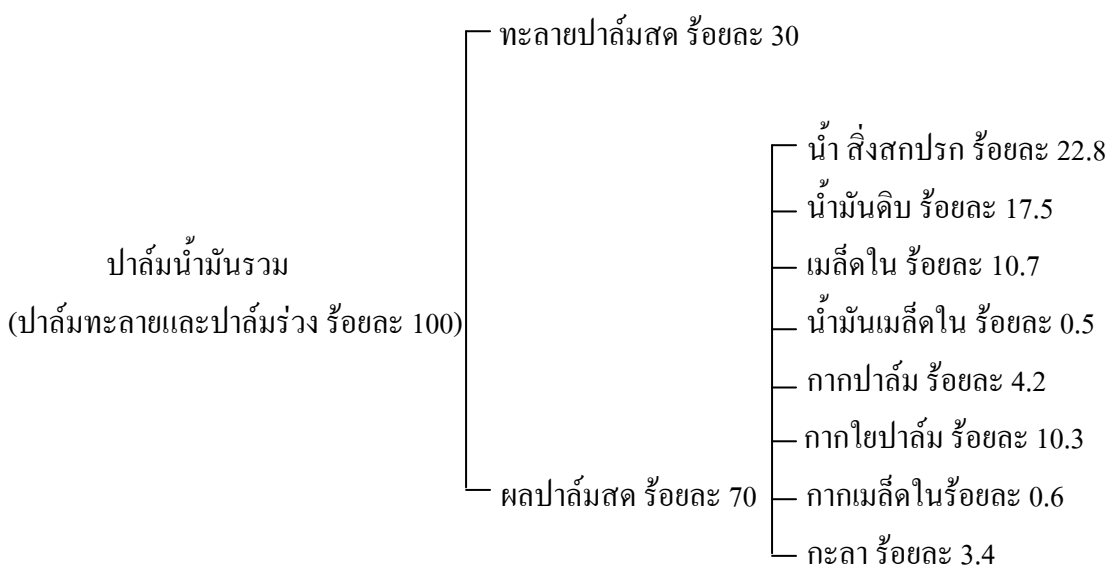
### 1.2.1 ความสำคัญทางเศรษฐกิจของปาล์มน้ำมัน

จากการศึกษาของมูทิตา ยันบูรพา และคณะ (2545) พบว่าน้ำมันปาล์มมีศักยภาพสูงที่จะนำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตเมทิลเอสเทอร์ กล่าวคือร้อยละของผลได้เมทิลเอสเทอร์สูงสุดจากน้ำมันละหุ่ง น้ำมันเมล็ดในปาล์มและน้ำมันเมล็ดฝ้ายเท่ากับร้อยละ 83.6 92.1 และ 94.9 ตามลำดับ ที่สัดส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 1:6.67 น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นร้อยละ 0.5 ของน้ำหนักน้ำมันและอุณหภูมิของปฏิกิริยา 60 °C

ปัจจุบันได้มีการพัฒนากระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์ให้เข้าสู่ระดับโรงงานอุตสาหกรรม นอกจากนี้ น้ำมันปาล์มสามารถนำไปเปลี่ยนเป็นอนุพันธ์อื่นอีกหลายชนิด เช่น กลีเซอรอลของกรดไขมัน ซึ่งใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตสบู่ Fatty acid และ Fatty alcohol ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตผงซักฟอก Fatty acid amides ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตสารลดแรงตึงผิวสำหรับอุตสาหกรรมสิ่งทอ การผลิตเยื่อกระดาษและไม้อัด Fatty amines ใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตโพลีเมอร์ น้ำมันหล่อลื่น กลีเซอรอล ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตเครื่องสำอาง เป็นต้น

### 1.2.2 ส่วนประกอบของน้ำมันปาล์มดิบ (Crude palm oil)

วัสดุส่วนต่างๆที่ได้จากการสกัดปาล์มน้ำมันรวม (ปาล์มทะเลและปาล์มร่วง) แสดงดังภาพประกอบที่ 1.1 ซึ่งน้ำมันปาล์มดิบประกอบด้วยไตรกลีเซอไรด์มากกว่าร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก กรดไขมันร้อยละ 3-5 โดยน้ำหนัก และกลีเซอไรด์ชนิดอื่น



ภาพประกอบที่ 1.1 วัสดุส่วนต่างๆที่ได้จากการสกัดน้ำมันปาล์มจากโรงงานอุตสาหกรรม  
ที่มา <http://www.dede.go.th>

### 1.2.3 การผลิตเมทิลเอสเทอร์หรือไบโอดีเซล

เมทิลเอสเทอร์หรือไบโอดีเซล คือ เชื้อเพลิงใดๆ ที่ได้จากชีวมวล ที่สามารถใช้แทนน้ำมันดีเซลหรืออีกความหมายหนึ่งตามมาตรฐาน ASTM ก็คือ Mono alkyl ester ของกรดไขมัน (Fatty acid) ที่ได้จากน้ำมันจากเมล็ดพืชและไขมันสัตว์ น้ำมันที่ผลิตจากน้ำมันพืช ไขมันจากสัตว์หรือแม้แต่ไขมันที่เหลือใช้นำมาเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซล

#### 1.2.3.1 วิธีการนำน้ำมันพืชมาใช้แทนน้ำมันดีเซล

##### 1.2.3.1.1 การใช้น้ำมันพืชเสมือนเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลโดยตรง

การใช้ไขมันและน้ำมันที่ได้จากพืชหรือสัตว์เป็นแหล่งทดแทนน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลโดยตรงมักจะใช้น้ำมันพืชเท่านั้น เนื่องจากมีคุณสมบัติที่สัมพันธ์กับการเป็นแหล่งเชื้อเพลิงที่ดีและเหมาะสมกว่าไขมันสัตว์ มีประสิทธิภาพการใช้งานทดแทนสูงกว่า นอกจากนี้แล้วไขมันสัตว์มีจุดหลอมเหลวสูงกว่าและมีลักษณะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งเป็นอุปสรรคสำคัญในการนำมาใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล เพราะจะทำให้เกิดความยุ่งยากในการเตรียมไขมันสัตว์สำหรับการใช้งานโดยตรง

##### 1.2.3.1.2 การเจือจางหรือการผสมตามส่วน

การเจือจางหรือการผสมตามส่วนของน้ำมันพืชสามารถนำมาละลายเข้ากันได้ อย่างบริบูรณ์ในวัตถุเหลวบางชนิดเท่านั้น เช่น น้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล ตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอน และแอลกอฮอล์ที่มีสายโซ่คาร์บอนสั้นๆ ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการเจือจางของน้ำมันเมล็ดทานตะวัน โดยใช้น้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลเป็นตัวทำละลายในอัตราส่วน 1 ต่อ 3 โดยปริมาตร และผ่านการทดสอบโดยใช้น้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลได้สำเร็จ แต่สารผสมนี้ไม่เหมาะในการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลประเภท Direct injection ในช่วงระยะเวลายาวเพราะว่าเกิดปัญหาเกี่ยวกับการเกิดโค้กที่ปลายกระบอกของระบบหัวฉีดอย่างรุนแรง

##### 1.2.3.1.3 วิธีไมโครอิมัลชัน (Microemulsion)

ไมโครอิมัลชันเป็นกระบวนการที่ทำให้ของเหลวมีสารแขวนลอยกระจายอยู่ เช่น การผสมน้ำมันพืชกับแอลกอฮอล์ ซึ่งจะมีสภาพเป็นอิมัลชันและเมื่อนำไปใช้สามารถคิดให้เป็นฝอยได้

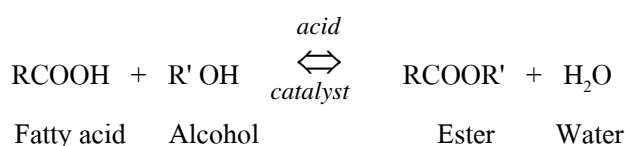
##### 1.2.3.1.4 วิธีการแตกตัวด้วยความร้อน (Thermal cracking)

วิธีการแตกตัวด้วยความร้อนเป็นการให้ความร้อนกับน้ำมันพืชในสภาวะไร้ออกซิเจนเพื่อให้ไขมันแตกตัวเป็น โมเลกุลที่เล็กลงให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติเหมาะสมหรือใกล้เคียงสำหรับนำมาใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบและโครงสร้างเนื่องจาก

ความร้อนของไตรกลีเซอไรด์จะให้สารประกอบเคมีอินทรีย์หลายประเภท เช่น อัลเคน อัลคีน อัลคาไดอิน แอโรเมติก และกรดคาร์บอกซิลิก เป็นต้น

### 1.2.3.1.5 เอสเตอริฟิเคชัน (Esterification)

เป็นปฏิกิริยาของกรดไขมันกับแอลกอฮอล์โดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้กลายเป็นเอสเทอร์มีกลไกการเกิดปฏิกิริยาทั่วไปดังนี้



โดยทั่วไปจะใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันซึ่งเป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ ดังนั้นต้องมีการดึงน้ำออกเพื่อให้ปฏิกิริยาดำเนินไปทางด้านขวา เพื่อเพิ่มร้อยละของผลได้ (%yield) เมทิลเอสเทอร์โดยทั่วไปจะใช้อยู่ 2 วิธีคือ กระบวนการแบบกะ (Batch process) และ กระบวนการแบบต่อเนื่อง (Continuous process) โดยกระบวนการแบบกะจะทำภายใต้ความดัน เมื่อปฏิกิริยาถึงสมดุลจะดึงน้ำออกเพื่อให้ร้อยละของผลได้เมทิลเอสเทอร์สูงๆ

### 1.2.3.1.6 ทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน (Transesterification)

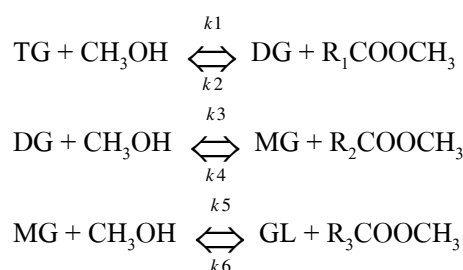
เป็นกระบวนการเปลี่ยนกลีเซอไรด์ของน้ำมันพืชเป็น Mono alkyl ester ด้วยแอลกอฮอล์และมีเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ประโยชน์ของการเปลี่ยนน้ำมันพืชให้เป็น Mono alkyl ester ก็คือ Mono alkyl ester มีความหนืดต่ำกว่าน้ำมันพืช เมื่อเผาแล้วจะเกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์กว่า น้ำมันดีเซลและลดปฏิกิริยา Polymerization ของน้ำมันดีเซลลง ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ และอันดับของปฏิกิริยาขึ้นกับสัดส่วนเชิงโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน

จากการศึกษาของ Darnoko1 et al. (2000) ศึกษาเกี่ยวกับกลไกจลนพลศาสตร์ ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มในถังปฏิกรณ์แบบกะ (Kinetics of Palm Oil Transesterification in a batch reactor) เมทิลเอสเทอร์ผลิตได้จากกระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มกับเมทานอล โดยมีโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยอัตราของปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันในเตาปฏิกรณ์แบบกะ ช่วงอุณหภูมิของปฏิกิริยา 50-65 °C (ที่อุณหภูมิสูงกว่า 60 °C จะไม่ลดระยะเวลาในการที่จะให้ได้คอนเวอร์ชันสูงสุด) คอนเวอร์ชัน (Conversion) ของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์และโมโนกลีเซอไรด์ จะปรากฏเป็นปฏิกิริยาอันดับที่สอง ใช้เวลา 30 นาทีในการทำปฏิกิริยาค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์และโมโนกลีเซอไรด์ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส อยู่ระหว่าง  $0.018-0.191 \text{ (wt\%min)}^{-1}$  โดย

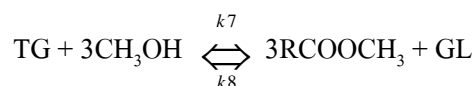
ค่าคงที่อัตราจะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและค่าคงที่ปฏิกิริยาของโมโนกลีเซอไรด์ จะมีค่าสูงกว่าค่าคงที่ของปฏิกิริยาของไตรกลีเซอไรด์ โดยมีพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาของไตรกลีเซอไรด์ ไคกลีเซอไรด์และโมโนกลีเซอไรด์ มีค่าเท่ากับ 14.7 14.2 และ 6.4 kcal/mol ตามลำดับ โดยความเข้มข้นของคะตาลิสต์ที่เหมาะสมคือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1 ในการทำปฏิกิริยานิยมใช้เมทานอลสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์มากที่สุดด้วยเหตุผลหลายประการ คือเมทานอลมีราคาถูกกว่าแอลกอฮอล์ประเภทอื่นๆ หาซื้อได้ง่ายและมีคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีที่เหมาะสม คือ เป็นแอลกอฮอล์ที่มีสายโซ่สั้นที่สุดและเป็นของเหลวมีจุดเดือดสูง ซึ่งช่วยเพิ่มอัตราในการทำปฏิกิริยากับไตรกลีเซอไรด์ได้มากที่สุด ส่วนตัวเร่งนี้นอกจากเบสแล้วยังใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ด้วย แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาช้ากว่าใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การผลิตไบโอดีเซลที่ใช้ในปัจจุบันนิยมใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเหตุผลอื่นๆ ดังนี้

- อุณหภูมิและความดันต่ำ
- ได้ผลิตภัณฑ์ปริมาณมาก ผลข้างเคียงและเวลาการผลิตน้อย
- เปลี่ยนเป็นเมทิลเอสเทอร์โดยไม่จำเป็นต้องใช้กระบวนการอื่นเสริม
- ไม่จำเป็นต้องใช้สารอื่นร่วมกระบวนการ

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เนื่องจากสารทั้ง 2 ชนิดนี้ จะเข้ากับเมทานอลโดยไม่เกิดผลข้างเคียงต่อกระบวนการ ดังนั้นปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันของน้ำมันพืชจึงนิยมใช้แอลกอฮอล์ คือ เมทานอล และ โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา มีกลไกการเกิดปฏิกิริยาทั่วไปดังนี้



สมการรวมของปฏิกิริยา



## 1.2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน

### 1.2.4.1 กรดไขมันอิสระ (Free fatty acid)

วัตถุประสงค์เริ่มต้นใช้น้ำมันที่ได้จากพืชทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์มีค่าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งน้ำมันที่ใช้ต้องมีปริมาณกรดไขมันอิสระต่ำกว่าร้อยละ 1 หากปริมาณกรดไขมันอิสระมากกว่าร้อยละ 1 จำเป็นต้องลดปริมาณกรดไขมันอิสระก่อน เพราะปริมาณกรดไขมันอิสระที่มากจะทำให้เกิดสบู่ขึ้นมากด้วย จากงานวิจัยของชาคริต ทองอุไร และคณะ (2544) พบว่ากรดไขมันอิสระที่มากส่งผลต่อการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งมีผลดังนี้

- ลดประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น
- เพิ่มค่าความหนืดและทำให้เกิดเจล
- การแยกกลีเซอรอลยากขึ้น
- เสียเวลาในการกำจัดสบู่ออกจากผลิตภัณฑ์

### 1.2.4.2 สัดส่วนเชิงโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน (Molar ratio)

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันจะเป็นไปตามปริมาณสัมพันธ์โดยใช้แอลกอฮอล์ 3 โมล ทำปฏิกิริยากับไตรกลีเซอไรด์ 1 โมล เพื่อให้เกิดผลได้ คือ เอสเตอร์กรดไขมัน 3 โมล และกลีเซอรอล 1 โมล สัดส่วนเชิงโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันขึ้นกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ เช่น ในกรณีใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาต้องใช้สัดส่วนเชิงโมลของบิวทานอลต่อน้ำมันถั่วเหลือง เท่ากับ 30:1 แต่ในกรณีใช้ด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาใช้สัดส่วนเชิงโมลของบิวทานอลต่อน้ำมันถั่วเหลือง เท่ากับ 6:1 ผลได้ของเอสเตอร์ไม่แตกต่างกัน

จากงานวิจัยของ Ghadge et al. (2005) พบว่าสัดส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 6:1 เกิดการเปลี่ยนเป็นเอสเตอร์ดีที่สุด แต่ปริมาณกรดไขมันในน้ำมันที่มากขึ้นจำเป็นต้องเพิ่มสัดส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 15:1 และใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

### 1.2.4.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst)

ตัวเร่งปฏิกิริยา สำหรับปฏิกิริยาแบบทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน ประกอบด้วย

- ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทด่าง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมเมทอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมเมทอกไซด์ โพแทสเซียมเอไมด์ และโพแทสเซียมไฮโดรไซด์
- ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทกรด เช่น กรดซัลฟิวริก กรดฟอสฟอริก และกรดไฮโดรคลอริก
- ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทเอนไซม์ (Enzyme) เช่น เอนไซม์ไลเปส

จากงานวิจัยของ Ma และ Hanna (1999) พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทต่าง ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน จะเกิดผลได้เร็วกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทกรด แต่หาก น้ำมันที่ใช้มีปริมาณกรดไขมันอิสระและปริมาณน้ำสูง การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทกรดจะเหมาะสมกว่า

#### 1.2.4.4 เวลาการทำปฏิกิริยา (Reaction time)

อัตราการเปลี่ยนแปลงของสารจะเพิ่มขึ้นตามเวลาการทำปฏิกิริยา เช่น ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันของน้ำมันเมล็ดถั่วลิสง เมล็ดฝ้าย เมล็ดดอกทานตะวัน และเมล็ดถั่วเหลือง โดยใช้สัดส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 6:1 ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของน้ำมัน อุณหภูมิของปฏิกิริยา 60 °C พบว่าร้อยละของผลได้ (%yield) ที่ได้จากน้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวันเท่ากับ 80 หลังจาก 1 นาที แต่หลังจาก 1 ชั่วโมง การเปลี่ยนแปลงของน้ำมันทั้ง 4 ชนิด เหมือนกันซึ่งมีค่าร้อยละของผลได้เท่ากับ 93 – 98

Galen et al. (2003) ศึกษาปัจจัยเวลาการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันจากไขมันวัวทำปฏิกิริยากับเมทานอลในถังปฏิกรณ์แบบกะ พบว่าปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นช้ามากในช่วงนาทีแรกเพื่อที่จะเกิดการผสมและละลายของเมทานอลเข้าไปใน Beef tallow แต่หลังจากนาทีแรกผ่านไปถึง 5 นาทีปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเร็วมากและจะเสร็จสมบูรณ์ภายใน 15 นาที ในช่วงการเริ่มต้นการเกิดปฏิกิริยาจะมีไดกลีเซอไรด์และโมโนกลีเซอไรด์อยู่ในปริมาณมาก จากนั้นจะค่อยลดลงเมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้น จนสิ้นสุดกระบวนการจะมีปริมาณของโมโนกลีเซอไรด์สูงกว่าไดกลีเซอไรด์

#### 1.2.4.5 อุณหภูมิของปฏิกิริยา (Reaction temperature)

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันใช้อุณหภูมิของปฏิกิริยาแตกต่างกันขึ้นกับชนิดน้ำมันที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เช่น น้ำมันละหุ่งกับ Methyl ricinoleate อุณหภูมิของปฏิกิริยาที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 20 – 35 °C สัดส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อน้ำมันละหุ่ง เท่ากับ 6:1-12:1 ตัวเร่งปฏิกิริยาใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาณร้อยละ 0.005 – 0.35 โดยน้ำหนักน้ำมัน

Ma และ Hanna (1999) ศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันของน้ำมันถั่วเหลืองบริสุทธิ์กับเมทานอล อัตราส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อน้ำมันถั่วเหลืองเท่ากับ 6:1 ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนักน้ำมันถั่วเหลือง ที่อุณหภูมิของปฏิกิริยาแตกต่างกัน 3 อุณหภูมิ คือ 32 45 และ 60 °C ร้อยละของผลได้ เท่ากับ 64 87 และ 94 ตามลำดับ

### 1.2.5 ชนิดและองค์ประกอบของกรดไขมัน

จากการใช้น้ำมันปาล์มเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล พบว่าน้ำมันดังกล่าวมีกรดไขมันหลัก ๆ คือ กรดปาล์มติก (Palmitic acid) และ กรดโอเลอิก (Oleic acid) ดังแสดงในตารางที่ 1.1 และ 1.2 โดยตารางที่ 1.1 แสดงสูตรโครงสร้างและชื่อทางวิทยาศาสตร์ของกรดไขมันทั่วไป ตารางที่ 1.2 แสดงส่วนประกอบทางเคมีของน้ำมันพืช ซึ่งแสดงผลเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของกรดไขมัน

ตารางที่ 1.1 สูตรโครงสร้างของกรดไขมัน

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

<sup>a</sup> x:y x แทนด้วยจำนวนคาร์บอนในกรดไขมัน

y แทนด้วยจำนวนพันธะคู่ในกรดไขมัน

ที่มา กิตติภูมิ ศุภลักษณ์ปัญญา (2548)



ตารางที่ 1.2 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันพืช แสดงผลเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของกรดไขมัน

ชนิดกรด	Myristic	Palmitic	Stearic	Arachidic	Behenic	Lignoceri	Oleic	Linoleic	Linolenic	Erucic
	14:0	16:0	18:0	20:0	22:0	24:0	18:1	22:1	18:2	18:3
ไขมันน้ำมัน	ร้อยละโดยน้ำหนักของกรดไขมัน									
น้ำมันปาล์ม	0.2	45	4.5	0	0	0	40.2	0	10.1	0
น้ำมันข้าวโพด	0	12	2	0	0	0	45	0	41	0
น้ำมันเมล็ดฝ้าย	0	28	1	0	0	0	13	0	58	0
น้ำมันลินซีด	0	5	2	0	0	0	20	0	18	55
น้ำมันถั่วลิสง	0	11	2	1	2	1	48	0	32	1
น้ำมันเมล็ดเรพ	0	3	1	0	0	0	64	0	22	8
น้ำมันเมล็ดทานตะวัน	0	6	3	0	0	0	17	0	74	0
น้ำมันงา	0	9	2	0	0	0	53	0	39	0
น้ำมันถั่วเหลือง	0	12	3	0	0	0	23	0	55	6

x:y x แทนด้วยจำนวนคาร์บอนในกรดไขมัน

y แทนด้วยจำนวนพันธะคู่ในกรดไขมัน

ที่มา Barnwal และ Sharma (2004)

จากตารางที่ 1.2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันพืช พบว่าองค์ประกอบหลักของน้ำมันปาล์ม คือ Palmitic acid ร้อยละ 45 Oleic acid ร้อยละ 40.2 และ Linolenic acid ร้อยละ 10.1 โดยน้ำหนัก โดยองค์ประกอบของกรดไขมันที่แตกต่างกันทำให้น้ำมันพืชแต่ละชนิดมีคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงแตกต่างกัน คุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันพืช ได้แก่ ค่าความหนืด ความหนาแน่น ค่าจุดชุน ค่าจุดไหลเท ค่าจุดวาบไฟ และค่าความของน้ำมันพืชทั่วไป แสดงดังตารางที่

1.3

ตารางที่ 1.3 คุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันพืช

น้ำมันพืช	kinematic Viscosity at 38°C (mm <sup>2</sup> /s)	Cetane no. (°C)	Heating value (MJ/kg)	Cloud point (°C)	Pour point (°C)	Flash point (°C)	Density (kg/l)
น้ำมันปาล์ม	39.6	42.0	-	31.0	-	267	0.9180
น้ำมันข้าวโพด	34.9	37.6	39.5	-1.1	-40.0	277	0.9095
น้ำมันเมล็ดฝ้าย	33.5	41.8	39.5	1.7	-15.0	234	0.9148
น้ำมันลินซีด	27.2	34.6	39.3	1.7	-15.0	241	0.9236
น้ำมันถั่วลิสง	39.6	41.8	39.8	12.8	-6.7	271	0.9026
น้ำมันเมล็ดเรพ	37.0	37.6	39.7	-3.9	-31.7	246	0.9115
น้ำมันเมล็ด ทานตะวัน	33.9	37.1	39.6	7.2	-15.0	274	0.9161
น้ำมันงา	35.5	40.2	39.3	-3.9	-9.4	260	0.9144
น้ำมันถั่วเหลือง	32.6	37.9	39.6	-3.9	-12.2	254	0.9138

ที่มา กิตติภูมิ ศุภลักษณ์ปัญญา (2548)

เมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้ต้องทำการทดสอบตามมาตรฐานที่กำหนด ดังตารางที่ 1.4

ตารางที่ 1.4 มาตรฐานเมทิลเอสเทอร์ตามมาตรฐาน ASTM D 6751

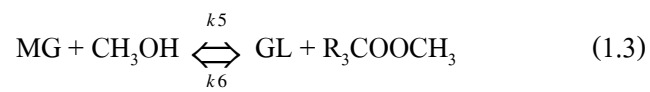
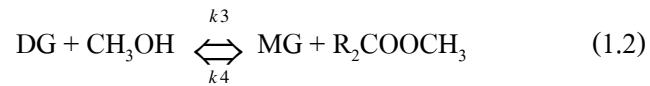
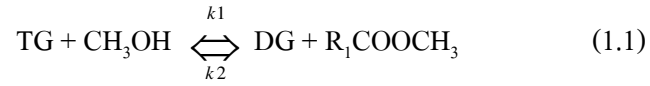
คุณสมบัติน้ำมัน เชื้อเพลิง	หน่วย	วิธีทดสอบ	เกณฑ์ต่ำสุด	เกณฑ์สูงสุด
จุดวาบไฟ	°C	ASTM D 93	130	-
น้ำและตะกอน	%v	ASTM D 2709	-	0.05
ค่าความหนืดที่ 40 °C	mm <sup>2</sup> /s	ASTM D 445	1.9	6.0
เถ้าซิลิเกต	%wt	ASTM D 874	-	0.02
ปริมาณกำมะถัน	%wt	ASTM D 5453	-	0.05
การกัดกร่อนทองแดง		ASTM D 130	-	No.3
ค่าซีเทน		ASTM D 613	-	-
จุดขุ่น	°C	ASTM D 2500	รายงานผล	
กากถ่าน (ร้อยละ100 ตัวอย่าง)	%wt	ASTM D 4530	-	0.005
ค่าของกรด	mg KOH/g Oil	ASTM D 664	-	0.8
กลีเซอรอลอิสระ	%wt	ASTM D 6584	-	0.02
กลีเซอรอลทั้งหมด	%wt	ASTM D 6584	-	0.24
ปริมาณฟอสฟอรัส	%wt	ASTM D 4591	-	0.001
อุณหภูมิการกลั่น เทียบเท่าที่ความดัน บรรยากาศ กลั่นได้ ร้อยละ 90	°C	ASTM D 1180	-	360

ที่มา กิตติภูมิ ศุภลักษณ์ปัญญา (2548)

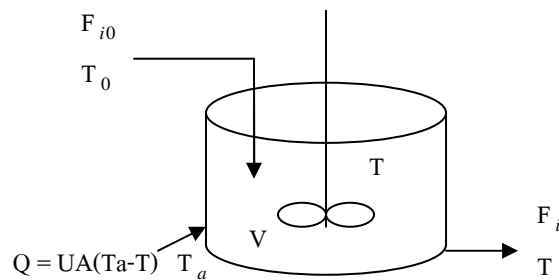
### 1.3 ทฤษฎีและหลักการ

#### 1.3.1 กลไกการทำปฏิกิริยาแบบทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาผันกลับได้



งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารต่างๆภายในถังปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ดังแสดงในภาพประกอบที่ 1.2



ภาพประกอบที่ 1.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่อง (CSTR)

โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาของสาร ( $r_i$ ) ต่างๆ เป็นปฏิกิริยาอันดับที่สอง ดังนี้

$$r_{\text{TG}} = -k_1[\text{TG}][\text{A}] + k_2[\text{DG}][\text{ME}] \quad (1.4)$$

$$r_{\text{DG}} = k_1[\text{TG}][\text{A}] - k_2[\text{DG}][\text{ME}] - k_3[\text{DG}][\text{A}] + k_4[\text{MG}][\text{ME}] \quad (1.5)$$

$$r_{\text{MG}} = k_3[\text{DG}][\text{A}] - k_4[\text{MG}][\text{ME}] - k_5[\text{MG}][\text{A}] + k_6[\text{GL}][\text{ME}] \quad (1.6)$$

$$r_{\text{ME}} = k_1[\text{TG}][\text{A}] - k_2[\text{DG}][\text{ME}] + k_3[\text{DG}][\text{A}] - k_4[\text{MG}][\text{ME}] + k_5[\text{MG}][\text{A}] - k_6[\text{GL}][\text{ME}] \quad (1.7)$$

$$r_{\text{A}} = -r_{\text{E}} \quad (1.8)$$

$$r_{\text{GL}} = k_5[\text{MG}][\text{A}] - k_6[\text{GL}][\text{ME}] \quad (1.9)$$

โดยที่ TG คือ ความเข้มข้นของไตรกลีเซอไรด์ (mol/L)

DG คือ ความเข้มข้นของไดกลีเซอไรด์ (mol/L)

MG คือ ความเข้มข้นของโมโนกลีเซอรอล (mol/L)

GL คือ ความเข้มข้นของกลีเซอรอล (mol/L)

ME คือ ความเข้มข้นของเมทิลเอสเทอร์ (mol/L)

A คือ ความเข้มข้นของเมทานอล (mol/L)

$k_i$  คือ ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา (L/mol.s)

จากการศึกษาของ Nouredini และ Zhu (1997) พบว่ากลไกการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน อุณหภูมิของปฏิกิริยาจะมีผลต่ออัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา สามารถเขียนให้อยู่ในรูปฟังก์ชันอุณหภูมิ ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้รูปแบบของสมการ โมดิฟายอาร์เรเนียส (Modified Arrhenius equation) แสดงดังสมการที่ 1.10

$$k = A \cdot T \cdot \exp^{-E_a/RT} \quad (1.10)$$

โดยที่ A คือ แฟกเตอร์ความถี่

T คือ อุณหภูมิของปฏิกิริยา (K)

$E_a$  คือ พลังงานก่อกัมมันต์ (cal/mol)

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (cal/mol.K)

โดยค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา (k) ของสารที่อุณหภูมิของปฏิกิริยา 60 °C แสดงดังตารางที่ 1.5

ตารางที่ 1.5 ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาของสารที่อุณหภูมิของปฏิกิริยา 60 °C

ปฏิกิริยา	ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา (k), (L/mol.sec)
TG->DG	$k_1 = 1.057 \times 10^{-2}$
DG->TG	$k_2 = 0.000$
DG->MG	$k_3 = 1.184 \times 10^{-1}$
MG->DG	$k_4 = 8.187 \times 10^{-2}$
MG->GL	$k_5 = 1.310 \times 10^{-1}$
GL->MG	$k_6 = 2.011 \times 10^{-3}$

ที่มา Leevijit (2004)

### 1.3.2 ดุลมวลสาร (Mass balance)

ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่เวลาใดๆ ในถังปฏิกรณ์

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{(F_{i0} - F_i)}{V} + r_i \quad (1.11)$$

โดยที่  $C_i$  คือ ความเข้มข้นของสารชนิด  $i$  (mol/L)

$F_{i0}$  คือ อัตราการไหลเชิงโมลของสารชนิด  $i$  เข้าสู่ถังปฏิกรณ์ (mol/s)

$F_i$  คือ อัตราการไหลเชิงโมลของสารชนิด  $i$  ออกจากถังปฏิกรณ์ (mol/s)

$r_i$  คือ อัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยา (mol/L.s)

$V$  คือ ปริมาตรของถังปฏิกรณ์ (L)

ค่าความเข้มข้นของเมทิลเอสเทอร์ นำมาใช้คำนวณค่าร้อยละความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ ดังสมการที่ 1.12 และ 1.13

$$\text{ร้อยละความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์} = \frac{\text{น้ำหนักของเมทิลเอสเทอร์}}{\text{น้ำหนักของไบโอดีเซล}} \times 100 \quad (1.12)$$

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักของไบโอดีเซล} = & \text{น้ำหนักของไตรกลีเซอไรด์} + \text{น้ำหนักของไดกลีเซอไรด์} + \\ & \text{น้ำหนักของโมนอกลิเซอไรด์} + \text{น้ำหนักของเมทิลเอสเทอร์} \end{aligned} \quad (1.13)$$

### 1.3.3 ดุลพลังงาน (Energy balance)

ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เวลาใดๆ ในถังปฏิกรณ์และคำนวณพลังงานในการควบคุมอุณหภูมิของปฏิกิริยา ซึ่งอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารและความดันภายในถังปฏิกรณ์ ในงานวิจัยนี้ไม่คิดความร้อนที่สูญเสียในถังปฏิกรณ์ ( $\dot{Q} = 0$ ) และอัตราการถ่ายโอนงานที่เกิดขึ้นจากไบกวน ขณะทำปฏิกิริยา ( $\dot{W} = 0$ )

$$\frac{dE_{sys}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} - F_{i0} \sum_{i=1}^n \int_{T_0}^T \Theta_i C_{pi} dT - \Delta H_{Rx} (-r_A V) \quad (1.14)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\dot{Q} - \dot{W} - F_{i0} \sum_{i=1}^n \int_{T_0}^T \Theta_i C_{pi} dT - \Delta H_{Rx} (-r_A V)}{\sum_{i=1}^n m_i C_{pi}} \quad (1.15)$$

$$\Delta H_{Rx} = \sum \Theta_i \Delta H_{f(\text{products})}^{298} - \sum \Theta_i \Delta H_{f(\text{reactants})}^{298} + \int_{T_{298}}^T \Theta_i \Delta C_p dT \quad (1.16)$$

โดยที่  $\Delta H_f$  คือ ค่าความร้อนการก่อเกิดของสาร (cal/mol)

$\Delta H_{Rx}$  คือ ค่าความร้อนการเกิดปฏิกิริยา (cal/mol)

$C_p$  คือ ค่าความจุความร้อนของสาร (cal/mol.K)

$E_{sys}$  คือ พลังงานของระบบ (cal)

$\dot{Q}$  คือ อัตราการถ่ายโอนพลังงานความร้อน (cal/min)

$\dot{W}$  คือ อัตราการถ่ายโอนงาน (cal/min)

$\Theta_i$  คือ อัตราส่วนเชิงโมล

$F_{i0}$  คือ อัตราการไหลเชิงโมลของสารเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ (mol/min)

$m$  คือ จำนวน โมลของสาร (mol)

ที่มา Fogler and Vennema (2001)

### 1.3.4 การหาค่าพารามิเตอร์ที่ไม่มีในเอกสารอ้างอิง

น้ำมันที่สกัดได้จากเนื้อปาล์มมีองค์ประกอบความเข้มข้นของกรดไขมัน (FAs)

แสดงดังตารางที่ 1.6

ตารางที่ 1.6 สูตรอย่างง่ายของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันปาล์ม

ชนิดของกรดไขมัน	สูตรอย่างง่าย (R-COOH)	ปริมาณร้อยละ
กรดปาล์มมิติก	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COOH}$	44.3
กรดโอเลอิก	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$	38.7
กรดไลโนเลอิก	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_4-(\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2)_2-(\text{CH}_2)_6-\text{COOH}$	10.5
กรดสเตียริก	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$	4.6
กรดไมริสติก	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{COOH}$	1.0

ที่มา <http://en.wikipedia.org/wiki>

โครงสร้างของสารต่างๆ คือ ไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ เมทิลเอสเทอร์ เมทานอลและกลีเซอรอล แสดงดังตารางที่ 1.7

ตารางที่ 1.7 สูตรโครงสร้างของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ เมทิลเอสเทอร์ กลีเซอรอลและเมทานอล

ชนิดของสาร	สูตรโครงสร้าง
ไตรกลีเซอไรด์	$\begin{array}{c} \text{CH}_2\text{-COO-R} \\   \\ \text{CH-COO-R} \\   \\ \text{CH}_2\text{-COO-R} \end{array}$
ไดกลีเซอไรด์	$\begin{array}{c} \text{CH}_2\text{-OH} \\   \\ \text{CH-COO-R} \\   \\ \text{CH}_2\text{-COO-R} \end{array}$
โมโนกลีเซอไรด์	$\begin{array}{c} \text{CH}_2\text{-OH} \\   \\ \text{CH-OH} \\   \\ \text{CH}_2\text{-COO-R} \end{array}$
เมทานอล	$[\text{CH}_3\text{OH}] \rightarrow [\text{R}'\text{-OH}]$
เมทิลเอสเทอร์	$\text{R}'\text{-COO-R}$
กลีเซอรอล	$\begin{array}{c} \text{CH}_2\text{-OH} \\   \\ \text{CH-OH} \\   \\ \text{CH}_2\text{-OH} \end{array}$

จากสมการที่ 1.14-1.16 พบว่าต้องใช้ค่าความจุความร้อน ( $C_p$ ) และค่าความร้อนของการก่อเกิด ( $\Delta H_f$ ) ของสารต่างๆ แต่เนื่องจากค่าเหล่านี้ของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ และเมทิลเอสเทอร์ไม่มีในเอกสารอ้างอิง ดังนั้นจึงใช้วิธีการประมาณค่าจากสูตรโครงสร้าง



ตารางที่ 1.8 ค่าความจุความร้อน ที่อุณหภูมิ 20 °C และค่าความร้อนการก่อเกิดของสาร ที่อุณหภูมิ 25 °C (วิธีการคำนวณ แสดงในภาคผนวก ค)

ชนิดสาร	ชนิดกรดไขมัน	ความร้อนการก่อเกิด (cal/mol)x10 <sup>-3</sup>	ความจุความร้อน (cal/mol.K)
ไตรกลีเซอไรด์	ปาล์มิติก	-427.30	506.34
	โอเลอิก	-373.42	550.44
	สเตียริก	-496.54	564.90
	ไมริสติก	-397.66	447.78
	ไลโนเลอิก	-255.32	535.98
ไดกลีเซอไรด์	ปาล์มิติก	-329.79	357.10
	โอเลอิก	-293.87	386.50
	สเตียริก	349.55	396.14
	ไมริสติก	-310.03	318.06
	ไลโนเลอิก	-238.19	376.86
โมนอกลิเซอไรด์	ปาล์มิติก	-232.28	207.86
	โอเลอิก	-214.32	222.56
	สเตียริก	242.16	227.38
	ไมริสติก	-222.40	188.34
	ไลโนเลอิก	-186.48	217.74
เมทิลเอสเทอร์	ปาล์มิติก	-128.46	168.74
	โอเลอิก	-110.50	183.44
	สเตียริก	-138.34	188.26
	ไมริสติก	-118.58	149.22
	ไลโนเลอิก	-82.66	178.62

หมายเหตุ : ค่าความร้อนการก่อเกิดประมาณค่าจากวิธีของ Verma-Doraiswamy (1965)

ค่าความจุความร้อนประมาณค่าจากวิธีของ Sterning และ Brown (1972)

ระหว่างการเกิดปฏิกิริยาจะมีความดันเกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์ซึ่งความดันภายในถังปฏิกรณ์เกิดจากความดันไอของเมทานอลสามารถคำนวณจากสมการอังตวน (Antoine equation) ดังสมการที่ 1.17

$$\ln(P) = A - \frac{B}{T+C} \quad (1.17)$$

โดยที่ T คือ อุณหภูมิของปฏิกิริยา (K)

P คือ ความดันไอของเมทานอล (mmHg)

A = 18.5875, B = 3626.55, C = -34.29

ที่มา Kyle (1992)

### 1.3.5 การแก้สมการอนุพันธ์สามัญ (Ordinary differential equations)

การแก้สมการอนุพันธ์สามัญมีหลายวิธี เช่น วิธีของออยเลอร์ (Euler's method) วิธีของฮวน (Heun's method) และวิธีของรุงเงคุดตา (Runge-Kutta method) เป็นต้น แต่ละวิธีแสดงดังสมการที่ 1.18-1.20

**1.3.5.1 วิธีของออยเลอร์** เป็นวิธีที่ใช้เป็นลักษณะทีละขั้น (One step method) โดยที่ h (step size) เป็นตัวเลขที่แน่นอน

$$y_{i+1} = y_i + f(x_i, y_i) * h \quad (1.18)$$

**1.3.5.2 วิธีของฮวน** เป็นวิธีที่พัฒนาต่อจากวิธีของออยเลอร์ต่างกันตรงที่วิธีนี้จะประมาณ step ทีละครึ่งช่วง ในแต่ละช่วงของ h

$$y_{i+1} = y_i + \frac{f(x_i, y_i) + f(x_{i+1}, y_{i+1})}{2} * h \quad (1.19)$$

**1.3.5.3 วิธีของรุงเง-คุดตา** เป็นทฤษฎีที่มีพื้นฐานมาจากวิธีของออยเลอร์และวิธีของฮวน คือ สามารถใช้กำลังของ h (Step size) ตั้งแต่กำลัง 3, 4, 5 ... ถ้าใช้ h จนถึงกำลัง 4 จะถูกเรียกว่า fourth order วิธีนี้ให้ผลลัพธ์การประมาณที่แม่นยำกว่าวิธีของออยเลอร์และวิธีของฮวน โดยงานวิจัยนี้ใช้วิธีของรุงเง-คุดตา (ของกำลังสี่) สำหรับการแก้สมการอนุพันธ์สามัญ

$$k_1 = f(x_i, y_i)$$

$$k_2 = f(x_i + 0.5h, y_i + 0.5k_1 h)$$

$$\begin{aligned}
 k_3 &= f(x_i + 0.5h, y_i + 0.5k_2 h) \\
 k_4 &= f(x_i + h, y_i + k_3 h) \\
 y_{i+1} &= y_i + (1/6) * (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) * h \quad (1.20)
 \end{aligned}$$

ที่มา Chapra และ Canale (2003)

### 1.3.6 ศึกษาหาปริมาณเมทานอลและพลังงานที่ใช้สำหรับการแยกกลับเมทานอล

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากถังปฏิกรณ์จะถูกป้อนเข้าสู่ถังแยกกลีเซอรอลหรือถังตกจม (Settling tank) ทำการแยกระหว่างกลีเซอรอลกับเมทิลเอสเทอร์ และเพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดสมบูรณ์ใช้เวลาประมาณ 180 นาที ซึ่งผลิตภัณฑ์จะแยกเป็น 2 ชั้น โดยกลีเซอรอลที่มีความหนาแน่นมากกว่าจะอยู่ชั้นล่างของถังตกจมและเมทิลเอสเทอร์จะอยู่ชั้นบน จากนั้นทำการปล่อยกลีเซอรอลที่อยู่ด้านล่างออกจากถังตกจมแล้วนำเมทิลเอสเทอร์ที่ได้ไปทำการแยกกลับเมทานอลที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาเพื่อนำกลับมาเป็นวัตถุดิบในถังปฏิกรณ์ต่อไป (<http://biodiesel.eng.psu.ac.th/index.php>)

เมทิลเอสเทอร์ที่ผ่านการแยกกลีเซอรอลจะมีปริมาณเมทานอลประมาณครึ่งหนึ่งของเมทานอลที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา เนื่องจากเมทานอลอีกครึ่งหนึ่งจะละลายอยู่ในชั้นของกลีเซอรอลที่ถูกปล่อยออกไปจากระบวนการแยกกลีเซอรอล ซึ่งการแยกกลับเมทานอลทำโดยการนำเมทิลเอสเทอร์ที่ผ่านการแยกกลีเซอรอลมาให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิ 80-90 °C เพื่อให้เมทานอลที่มีจุดเดือดประมาณ 64.7 °C กลายเป็นไอระเหยออกมาผ่านเครื่องควบแน่น (Condenser) เพื่อทำให้อไอของเมทานอลควบแน่นกลายเป็นของเหลวที่อุณหภูมิ 30 °C เพื่อนำกลับไปเป็นวัตถุดิบในถังปฏิกรณ์ต่อไป โดยกระบวนการแยกกลับเมทานอลจะทำตามเงื่อนไขของกรมธุรกิจพลังงาน คือ ปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาร้อยละ 15 โดยน้ำหนักน้ำมันปาล์ม จะใช้ในการทำปฏิกิริยาร้อยละ 11 และเกิดการสูญเสียเมทานอลร้อยละ 4 โดยพลังงานความร้อนที่ใช้สำหรับกระบวนการแยกกลับเมทานอล สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 1.21 และ 1.22

$$Q = mC_p \Delta T \quad (1.21)$$

โดยที่  $Q$  คือ พลังงานความร้อนของสารทั้งหมด (cal)

$m$  คือ จำนวนโมลของสาร (mol)

$C_p$  คือ ค่าความจุความร้อนของสาร (cal/mol.K)

$\Delta T$  คือ ผลต่างของอุณหภูมิ (K)

$$Q_v = mL_v \quad (1.22)$$

โดยที่  $Q_v$  คือ พลังงานความร้อนของสารในการเปลี่ยนสถานะ (cal)

$m$  คือ ปริมาณของเมทานอล (g)

$L_v$  คือ ความร้อนแฝงการกลายเป็นไอของเมทานอล (cal/g)

ที่มา ชาคริต ทองอุไร (2542)

### 1.3.7 การคำนวณต้นทุนการผลิตเมทิลเอสเทอร์

1.3.7.1 การคำนวณต้นทุนการผลิตเมทิลเอสเทอร์ สามารถคำนวณดังสมการ 1.23-1.25 โดยต้นทุนการผลิตเมทิลเอสเทอร์

$$\begin{aligned} \text{ต้นทุนการผลิตรวม} = & \text{ราคาวัตถุดิบที่ใช้ (น้ำมันปาล์ม, เมทานอล และ โซเดียมไฮดรอกไซด์)} \\ & + \text{พลังงานไฟฟ้า (พลังงานในการอุ่นสารตั้งต้นและกระบวนการแยก} \\ & \text{กลับเมทานอล)} \end{aligned} \quad (1.23)$$

$$\begin{aligned} \text{ต้นทุนการผลิตเมทิลเอสเทอร์} = & \frac{\text{ต้นทุนการผลิตรวม}}{\text{ต่อหน่วย}} \\ & \text{ปริมาณไบโอดีเซลที่ผลิตได้} \end{aligned} \quad (1.24)$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณไบโอดีเซลที่ผลิตได้} = & \text{ความเข้มข้นของเมทิลเอสเทอร์} \times \text{อัตราการไหลของสารออกจาก} \\ & \text{ถังปฏิกรณ์} \times \text{น้ำหนักโมเลกุลของเมทิลเอสเทอร์} \end{aligned} \quad (1.25)$$

1.3.7.2 การคำนวณราคาต้นทุนการผลิตเมทิลเอสเทอร์ (B100) ของกระทรวงพลังงาน แสดงดังสมการที่ 1.26

$$\begin{aligned} \text{ต้นทุนการผลิตเมทิลเอสเทอร์ (บาทต่อลิตร)} = & 0.97 * \text{ราคาน้ำมันปาล์มดิบ, CPO (บาทต่อ} \\ & \text{กิโลกรัม)} + 0.15 * \text{ราคาเมทานอล (บาทต่อลิตร)} + 2.97 \end{aligned} \quad (1.26)$$

2.97 คือ ค่าพลังงาน แรงงาน โสหุ้ย ค่าเสื่อมสภาพ กำไร และค่าการจัดการ

โดยราคาค่าวัตถุดิบและค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการคำนวณต้นทุนการผลิตเมทิลเอสเทอร์ แสดงดังตารางที่ 1.9

ตารางที่ 1.9 ราคาวัตถุดิบและค่าไฟฟ้า

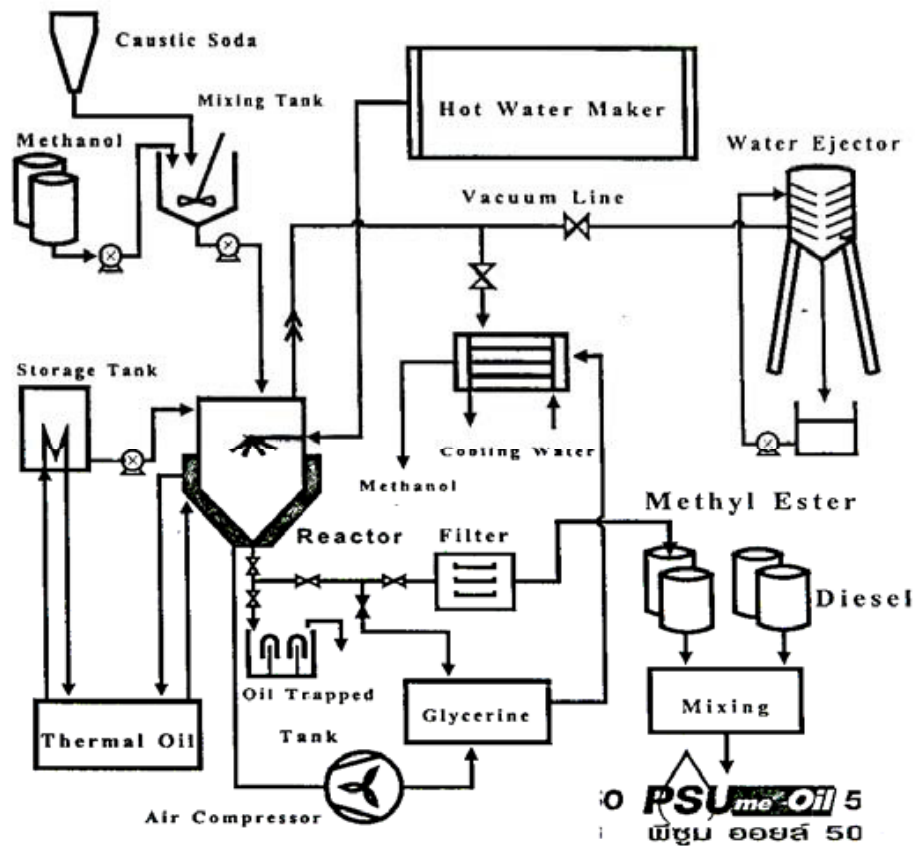
ต้นทุนการผลิต	ราคา
น้ำมันปาล์ม	21.1 บาทต่อลิตร (23.0 บาทต่อกิโลกรัม)
เมทานอล	19.8 บาทต่อลิตร (25.0 บาทต่อกิโลกรัม)
โซเดียมไฮดรอกไซด์	32.0 บาทต่อกิโลกรัม
ค่าไฟฟ้า	3.3 บาทต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง

ที่มา A & A reagent LTD., part

### 1.3.8 กระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์ระดับโรงงานนำร่อง

#### 1.3.8.1 แผนผังกระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์ด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน

ชาคริต ทองอุไร และคณะ (2544) ทำการศึกษากระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากผลิตผลปาล์มน้ำมัน ได้แก่ น้ำมันทอดใช้แล้ว น้ำมันปาล์มดิบเกรดบี (หีบสกัดแบบรวมน้ำมันเปลือกและน้ำมันเมล็ดใน) ที่ผ่านกระบวนการแยกยางเหนียวและลดกรด น้ำมันปาล์มรีไฟน์ไฮปาล์มสเตียรีนทั้งชนิดปกติ (Iodine value 38) และชนิด Super hard (Iodine value 26) กระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์แสดงดังภาพประกอบที่ 1.3



ภาพประกอบที่ 1.3 กระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์ด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน  
ที่มา : ชาคริต ทองอุไร และคณะ (2544)

### 1.3.8.2 ขั้นตอนการผลิตเมทิลเอสเทอร์มีดังนี้

#### 1.3.8.2.1 การเตรียมน้ำมันก่อนทำปฏิกิริยา

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตจะถูกเตรียมให้เหมาะสมก่อนเข้าทำปฏิกิริยา โดยหากเป็นน้ำมันปาล์มดิบจำเป็นต้องผ่านกระบวนการแยกขางเหนียว และลดกรดให้มีปริมาณกรดไขมันอิสระต่ำกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ส่วนวัตถุดิบจากน้ำมันที่ใช้ทอดแล้วจะถูกนำมาจัดโปรตีนออกโดยการทำปฏิกิริยากับกรดไนตริกและล้างด้วยน้ำ วัตถุดิบที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระต่ำกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนักแล้ว จะถูกนำไปจัดน้ำออกโดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 120 °C ประมาณ 20 นาที โดยมีกรวนเพื่อให้การระเหยของน้ำเป็นไปได้ทั่วถึงยิ่งขึ้น สำหรับไขปาล์มสเตียรีนชนิด Superhard ซึ่งผลิตที่โครงการส่งเสริมอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มขนาดเล็ก ได้ถูกขจัดน้ำออกที่อุณหภูมิ 80 °C ภายใต้สภาวะสุญญากาศ 600 – 700 มิลลิเมตรปรอท (mmHg)

### 1.3.8.2.2 การเตรียมสารละลายแอลกอฮอล์

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน โดยใช้เมทิลแอลกอฮอล์หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เมทานอลทำปฏิกิริยา มีโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเหตุผลที่เลือกใช้เมทานอลและโซเดียมไฮดรอกไซด์เพราะมีราคาถูก โดยเมทานอลต้องไม่มีน้ำเจือปนเกินกว่าร้อยละ 1 การเตรียมสารละลาย ทำโดยการนำโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2.5 – 5 ส่วนละลายในเมทานอล 100 ส่วนโดยน้ำหนัก ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เตรียมเป็นไปตามปริมาณกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในวัตถุดิบ หากกรดไขมันอิสระมีปริมาณสูงก็ต้องใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในสัดส่วนที่สูงขึ้น

### 1.3.8.2.3 การทำปฏิกิริยา

น้ำมันที่ถูกขจัดน้ำแล้วถูกทำให้เย็นลงจนมีอุณหภูมิประมาณ 80 °C จากนั้นจึงเติมสารละลายแอลกอฮอล์ลงไปอย่างช้าๆ (เติมให้หมดภายใน 10 นาที) สัดส่วนน้ำมันต่อสารละลายแอลกอฮอล์โดยน้ำหนักเท่ากับ 5 ต่อ 1 ทำการกวนเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาอย่างทั่วถึง เป็นเวลาประมาณ 15 นาที ด้วยอัตราการกวนปานกลาง (500 รอบ/นาที) อุณหภูมิในช่วงนี้ลดลงเหลือประมาณ 65 °C การเกิดปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วได้เมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอล แต่ปฏิกิริยานี้ผันกลับได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหยุดกวนเพื่อแยกผลผลิตตัวใดตัวหนึ่งออก เมื่อหยุดกวนกลีเซอรอลซึ่งมีความหนาแน่นสูงกว่า (ประมาณ 1.26 กรัมต่อมิลลิกรัม) จะแยกชั้นออกจากชั้นเมทิลเอสเทอร์ โดยแยกตัวตกลงมาที่ก้นถัง ดังนั้นในชั้นเมทิลเอสเทอร์จะเหลือกลีเซอรอลอยู่น้อยปฏิกิริยาการเกิดเมทิลเอสเทอร์จะสามารถดำเนินต่อไปอย่างช้าๆ เมื่อทิ้งให้เกิดปฏิกิริยาเป็นเวลา 3 – 4 ชั่วโมง น้ำมันก็จะทำปฏิกิริยาไปมากกว่าร้อยละ 95

### 1.3.8.2.4 การแยกกลีเซอริน

กลีเซอรินจะถูกถ่ายออกไปใส่ภาชนะ โดยการถ่ายออกทางด้านล่างของถังปฏิกรณ์ ในขณะที่ยังร้อนอยู่เพราะหากทิ้งไว้ให้เย็น ชั้นกลีเซอรินจะกลายเป็นของแข็ง

### 1.3.8.2.5 การล้างสิ่งปนเปื้อนออก

เมทิลเอสเทอร์ที่ได้ยังปนเปื้อนด้วยสารอื่นๆ เช่น สบู่ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดไขมันอิสระหรือน้ำมัน กลีเซอรอลที่ละลายอยู่ในชั้นเมทิลเอสเทอร์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ เมทานอลที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาและน้ำมันที่ทำปฏิกิริยาไม่หมด ดังนั้นจึงต้องทำการขจัดออกด้วยการล้างด้วยน้ำอุ่นหลายๆ ครั้ง ปริมาณน้ำที่ใช้แต่ละครั้งประมาณ 1 ต่อ 4 ของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ เมื่อเติมน้ำเพียงพอแล้วรอให้น้ำแยกชั้นจากเมทิลเอสเทอร์เป็นเวลาพอสมควร (ประมาณ 5 – 10 นาที) ก็ถ่ายน้ำออกด้านล่าง เติมน้ำอุ่นเพื่อล้างใหม่ การล้างจะกระทำ 4–5 ครั้ง และเพิ่มการกวนในการล้างครั้งหลัง ๆ

### 1.3.8.2.6 การขจัดน้ำออกขั้นสุดท้าย

เมื่อล้างสิ่งปนเปื้อนออกหมดแล้ว ขั้นตอนสุดท้าย คือ การขจัดน้ำที่หลงเหลือในชั้นเมทิลเอสเทอร์ออก ซึ่งกระทำโดยการให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลาอย่างน้อย 20 นาที เมื่อทิ้งไว้ให้เย็นก็สามารถนำไปเก็บเพื่อใช้งานต่อไป

เมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้จากผลิตผลปาล์มน้ำมันต่างๆ เช่น น้ำมันทอดใช้แล้ว น้ำมันปาล์มดิบ (เกรดบี) น้ำมันปาล์มรีไฟน์ ไชปาล์มสเตียริน และ Superhard stearin ด้วยกระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน โดยใช้เมทานอลเป็นสารเข้าทำปฏิกิริยาและมีโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยกรรมวิธีการผลิต 6 ขั้นตอน คือ การเตรียมน้ำมัน การเตรียมน้ำมันละลาย การทำปฏิกิริยา การแยกกลีเซอริน การล้าง และการขจัดน้ำ พบว่าเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้มีความบริสุทธิ์เกือบร้อยละ 100 เมื่อทดสอบด้วยเทคนิค Thin layer chromatography (TLC) สถานะการผลิตที่เหมาะสม คือ สัดส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม คือ 6:1 หรือเมทานอลประมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5–1 ร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม อุณหภูมิของปฏิกิริยา 60–80 °C โดยมีการกวนประมาณ 15–30 นาที และปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาต่อมานาน 3–4 ชั่วโมง เมทิลเอสเทอร์ที่ได้มีสมบัติหลายประการใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลหมุนเร็ว เช่น ความหนาแน่น ความหนืด ค่าความร้อน และช่วงอุณหภูมิการกลั่น แต่จุดไหลเทมีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล เนื่องจากมีสัดส่วนเมทิลเอสเทอร์ที่อิ่มตัวซึ่งมีจุดหลอมเหลวสูงในปริมาณที่สูง (ชาคริต ทองอุไร และคณะ, 2544)

### 1.3.9 การวิเคราะห์ต้นทุนทางวิศวกรรม

การวิเคราะห์ต้นทุนทางวิศวกรรมส่วนใหญ่จะเน้น โครงการที่มีการลงทุนในทรัพย์สินจริงซึ่งแตกต่างจากการลงทุนทางการเงิน โครงการประเภทนี้จะมีอายุโครงการนาน มีตัวเลือกของโครงการจำกัด ดังนั้นการตัดสินใจลงทุนในทรัพย์สินจริง จึงต้องพิจารณาให้รอบคอบทั้งในส่วนค่าเงินที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ความเสี่ยงและความไม่แน่นอนในอนาคต การวิเคราะห์ต้นทุนและการวิเคราะห์ผลกำไรที่ถูกต้องแม่นยำจะช่วยให้การตัดสินใจเป็นไปอย่างรอบคอบ (นวลศรี เอิบกมล, 2546)

#### 1.3.9.1 ประเภทของต้นทุนที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์

##### 1.3.9.1.1 เงินลงทุนเบื้องต้นและต้นทุนดำเนินการ

- เงินลงทุนเบื้องต้น (Initial investment) เป็นค่าใช้จ่ายเพื่อซื้อที่ดินสิ่งปลูกสร้าง เช่น โรงงาน คลังสินค้า อาคารสำนักงาน เครื่องจักรอุปกรณ์ และเครื่องมือสนับสนุนการผลิต ผู้ลงทุนอาจพิจารณาเลือกซื้อถือกรรมสิทธิ์หรือเช่าเพื่อลดวงเงินที่ต้องใช้ลงทุน



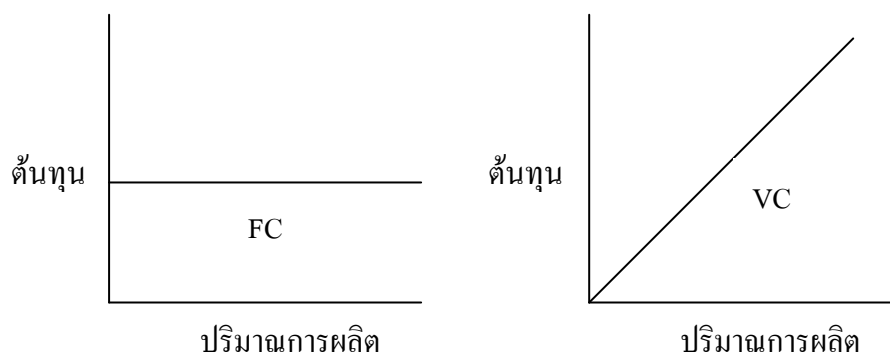
- **ต้นทุนดำเนินการ (Operating cost)** เป็นรายจ่ายที่นำไปหักจากรายได้เหลือเป็นกำไรจากการดำเนินการ เช่น ค่าวัตถุดิบ ค่าแรงงาน ค่าโสหุ้ยโรงงาน ต้นทุนส่วนนี้จะปรากฏอยู่ในงบกำไรขาดทุนของบริษัท

- **ต้นทุนรวม (Total cost)** เป็นผลรวมของเงินลงทุนเบื้องต้นและต้นทุนดำเนินการ

### 1.3.9.1.2 ต้นทุนคงที่และต้นทุนแปรผัน

- **ต้นทุนคงที่ (Fixed cost, FC)** คือ ต้นทุนส่วนที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณงาน ปริมาณงานที่ทำหรือผลิตอาจจะอยู่ในรูปใดรูปหนึ่ง เช่น จำนวนชั่วโมงแรงงาน จำนวนหน่วยที่ผลิต น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ จำนวนวัตถุดิบที่ใช้ แม้ปริมาณงานจะน้อยหรือมาก ต้นทุนส่วนนี้จะเท่ากัน จึงเรียกว่า ต้นทุนคงที่ ได้แก่ ค่าเช่า ดอกเบี้ยจ่าย ค่าเสื่อมราคา (โรงงาน อาคาร เครื่องจักร) เงินเดือนของฝ่ายบริหารและฝ่ายวิจัย แสดงดังภาพประกอบที่ 1.4

- **ต้นทุนแปรผัน (Variable cost, VC)** คือ ต้นทุนส่วนที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณงานผลิต เช่น ค่าจ้างแรงงาน ค่าวัตถุดิบ ค่าพลังงาน โดยงานวิจัยนี้ใช้ต้นทุนแปรผันในการคำนวณต้นทุนการผลิตไบโอดีเซล แสดงดังภาพประกอบที่ 1.4



ภาพประกอบที่ 1.4 ความสัมพันธ์ต้นทุนคงที่และต้นทุนแปรผันกับปริมาณการผลิต  
ที่มา : นवलศรี เอิบกมล (2546)

### 1.3.9.2 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตไบโอดีเซล

การศึกษาทางเศรษฐศาสตร์สำหรับการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันชนิดต่างๆได้รวบรวมโดย Zhang et al. (2003) เช่น ต้นทุนการผลิต หรือจุดคุ้มทุน แสดงดังตารางที่ 1.10

ตารางที่ 1.10 การประเมินต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์สำหรับการผลิตไบโอดีเซล

	Nelson et al., (1994)	Noordam and Withers(1996)	Bender(1999)
Plant capacity	100,000 ton/year	7,800 ton/year	10,560 ton/year
Process type	Alkaline-catalyzed continuous process	Alkaline-catalyzed batch process	Alkaline-catalyzed continuous process
Raw material	Beef tallow	Canola seed oil	Animal fats
Total capital cost	\$12 million	Not reported	\$3.12 million
Total manufacturing cost	\$34 million	\$5.95 million	Not reported
Biodiesel break even price	\$340/ton	\$763/ton	\$420/ton
Glycerin credit	\$6 million (\$600/ton)	\$0.9 million (\$1,450/ton glycerin)	\$0.72 million for crude glycerin (\$660/ton)

ที่มา : Zhang et al. (2003)

Zhang et al. (2003) อ้างจาก Nelson et al. (1994) พิจารณาการประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ของการผลิตไบโอดีเซลจากไขมันวัวทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันกับเมทานอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทต่าง กำลังการผลิตประมาณ 1,000 ตันต่อปี พบว่าปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อต้นทุนไบโอดีเซล คือ ราคาวัตถุดิบ กำลังปริมาณการผลิต และราคากลิเซอรอลซึ่งเป็นผลพลอยได้

Zhang et al. (2003) อ้างจาก Noordam and Withers (1996) พิจารณาการประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ของการผลิตไบโอดีเซลจาก Canola seed กำลังการผลิตประมาณ 7,800 ตันต่อปี พบว่า ต้นทุนของวัตถุดิบ (ราคา Canola seed และราคา Canola meal) และราคาผลพลอยได้ (กลีเซอรอล) ที่เปลี่ยนแปลงไปมีผลต่อจุดคุ้มทุนไบโอดีเซล โดยเฉลี่ยราคา Canola seed ที่เพิ่มขึ้น 0.01 ดอลลาร์ต่อกิโลกรัม ทำให้มีผลต่อต้นทุนไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น 0.03 ดอลลาร์ต่อกิโลกรัม แต่เมื่อราคากลิเซอรอลเพิ่มขึ้น 0.11 ดอลลาร์ต่อกิโลกรัม ทำให้ต้นทุนไบโอดีเซลลดลงประมาณ 0.01 ดอลลาร์ต่อกิโลกรัม

#### 1.4 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อช่วยในการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเมทิลเอสเทอร์ในถังปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง โดยตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อร้อยละของผลได้เมทิลเอสเทอร์และต้นทุนการผลิตเมทิลเอสเทอร์ที่ศึกษา คือ อัตราส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม อุณหภูมิของปฏิกิริยา และเวลาที่สารอยู่ในถังปฏิกรณ์

2. หาสมการความสัมพันธ์การแยกชั้นของกลีเซอรอลและเมทิลเอสเทอร์ โดยตัวแปรที่มีผลต่อเวลาในการแยกชั้นที่ศึกษา คือ อัตราส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม และอัตราส่วนของสารผสม (ปริมาตร 250 มิลลิลิตร) ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถังตกจม

#### 1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเมทิลเอสเทอร์ในถังปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ขนาดอัตราการผลิต 6 ลิตรต่อนาที

2. ตัวแปรที่ส่งผลต่ออัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยา คือ

- อัตราส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มที่ 6:1 8:1 10:1 12:1 และ 15:1

- ช่วงอุณหภูมิของปฏิกิริยา 50-70 °C

- เวลาที่สารอยู่ในถังปฏิกรณ์ 10 20 30 40 และ 50 นาที

3. หาความสัมพันธ์การแยกชั้นของกลีเซอรอลและเมทิลเอสเทอร์ในถังตกจม โดยใช้สารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันปริมาตร 250 มิลลิลิตร

4. ตัวแปรที่มีผลต่อเวลาในการแยกชั้นที่ทำการศึกษา คือ

- อัตราส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มที่ 6:1 10:1 และ 15:1

- อัตราส่วนของส่วนสูงสารผสมต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถังตกจมที่ 6.3 2.7

และ 1.4

#### 1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการโครงการวิจัย

1. ทราบผลของตัวแปรต่างๆ คือ อัตราส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม อุณหภูมิของปฏิกิริยา และเวลาที่สารอยู่ในถังปฏิกรณ์ ส่งผลอย่างไรต่อความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ และต้นทุนการผลิตเมทิลเอสเทอร์ในถังปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

2. มีแนวทางและสามารถทำนายสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเมทิลเอสเทอร์ในถังปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

3. ทราบผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลเวลาในการแยกชั้นของกลีเซอรอลและเมทิลเอสเทอร์ คือ อัตราส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มและอัตราส่วนระหว่างส่วนสูงของสารผสม (ปริมาตร 250 มิลลิลิตร) ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถังตกจม

4. เป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการออกแบบกระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์ ในถึงปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องในระดับโรงงานอุตสาหกรรม