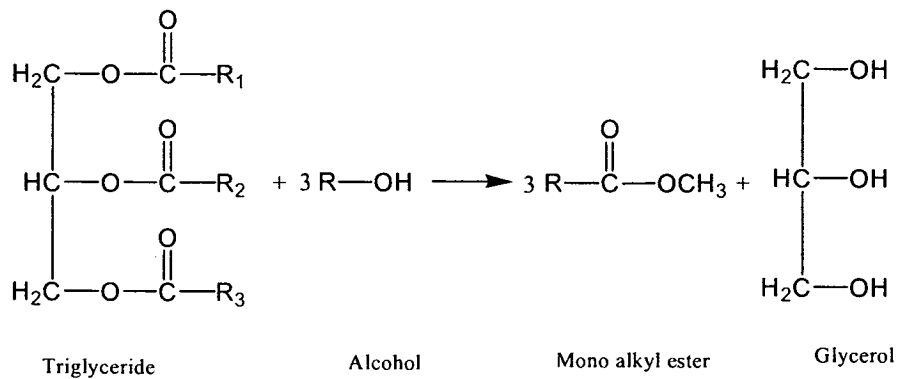


บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไบโอดีเซล

ไบโอดีเซล หมายถึง เชื้อเพลิงที่ได้จากน้ำมันพืชและไขมันสัตว์ที่ผ่านกระบวนการทางเคมี เกิดเป็นสารที่เรียกว่ามอนอแอลคิลเอสเทอร์ (monoalkyl ester) กระบวนการทางเคมีที่เรียกว่า "ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน" ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

2.2 กรดไขมัน

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันหรือแอลกอฮอล์ไลซิส (Alcoholysis) เป็นกระบวนการเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์ของน้ำมันพืชให้เป็นมอนอแอลคิลเอสเทอร์ด้วยแอลกอฮอล์ ประโยชน์ของการเปลี่ยนแปลงน้ำมันพืชให้เป็นมอนอแอลคิลเอสเทอร์ คือ มอนอแอลคิลเอสเทอร์มีความหนืดต่ำกว่าน้ำมันพืช เมื่อเผาไหม้แล้วเกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์กว่าน้ำมันดีเซลและลดปฏิกิริยาพอลิเมอไรซชันของไตรกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์ประกอบด้วยกลีเซอรอล 1 โมลกับกรดไขมันอิสระ 3 โมล กรดไขมันอิสระแบ่งได้เป็น 2 ชนิดดังต่อไปนี้ คือ

ตารางที่ 2.1 ชื่อและโครงสร้างของกรดไขมัน

ชื่อ	จำนวนคาร์บอน	โครงสร้าง
กรดไขมันอิ่มตัว		
กรดลอริก	12	$CH_3(CH_2)_{10}COOH$
กรดไมริสติก	14	$CH_3(CH_2)_{12}COOH$
กรดปาล์มิติก	16	$CH_3(CH_2)_{14}COOH$
กรดสเตียริก	18	$CH_3(CH_2)_{16}COOH$
กรดอาราซิก	20	$CH_3(CH_2)_{18}COOH$
กรดไขมันไม่อิ่มตัว		
กรดปาล์มิโทเลอิก	16	$CH_3(CH_2)_5CH=CH(CH_2)_7COOH$
กรดโอเลอิก	18	$CH_3(CH_2)_7CH=CH(CH_2)_7COOH$
กรดไลโนเลอิก	18	$CH_3(CH_2)_4(CH=CHCH_2)_2(CH_2)_6COOH$
กรดอาราซิดินิก	20	$CH_3(CH_2CH=CHCH_2)_4(CH_2)_2COOH$

2.2.1 กรดไขมันอิ่มตัว (Saturated fatty acid) คือ กรดไขมันที่มีการยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมคาร์บอนด้วยพันธะเดี่ยวทั้งหมด มีสูตรทั่วไปเป็น $C_nH_{2n+1}COOH$ หรือมีสูตรโครงสร้างเป็น $CH_3(CH_2)_nCOOH$ เช่น กรดไขมันอิ่มตัวที่มีจำนวนอะตอมคาร์บอนเท่ากับ 14 มีสูตรทั่วไปเป็น $C_{14}H_{29}COOH$ และมีสูตรโครงสร้างเป็น $CH_3(CH_2)_{13}COOH$ เป็นต้น กรดไขมันอิ่มตัวที่สำคัญ คือ กรดปาล์มิติก (Palmitic acid) และ กรดสเตียริก (Stearic acid)

2.2.2 กรดไขมันที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated fatty acid) คือ กรดไขมันที่มีการยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมคาร์บอนด้วยพันธะคู่อย่างน้อย 1 พันธะ สูตรทั่วไปเป็น $C_nH_{2n-2}COOH$ หรือมีสูตรโครงสร้างเป็น $CH_3(CH_2)_xCH=CH(CH_2)_yCOOH$ เช่น กรดโอเลอิกมีจำนวนคาร์บอนเท่ากับ 18 มีสูตรโครงสร้างเป็น $CH_3(CH_2)_7CH=CH(CH_2)_7COOH$ และสูตรโดยทั่วไปเป็น $C_{17}H_{33}COOH$ เป็นต้น กรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวที่สำคัญคือ กรดโอเลอิก (Oleic acid) กรดไลโนเลอิก (Linoleic acid) และกรดไลโนเลนิก (Linolenic acid)

2.3 วัตถุดิบสำหรับการผลิตไบโอดีเซล

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลแบ่งได้เป็นสองประเภท คือ น้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ ได้แก่ น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันมะพร้าวและน้ำมันเมล็ดสบู่ดำ เป็นต้น และ แอลกอฮอล์ ได้แก่ เมทานอล เอทานอลและโพรพานอล เป็นต้น น้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์หรือน้ำมันมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลที่เหมาะสมจะต้องพิจารณาสมบัติของน้ำมัน เช่น ปริมาณกรดไขมันอิสระต่ำกว่าร้อยละ 2.5 ถ้าหากปริมาณกรดไขมันอิสระมากกว่าร้อยละ 2.5 จะต้องนำน้ำมันไปผ่านกระบวนการเอสเทอริฟิเคชันเพื่อลดปริมาณกรดไขมันอิสระให้น้อยลง ทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น โดยทั่วไปน้ำมันพืชดิบ เช่น น้ำมันปาล์มดิบ น้ำมันมะพร้าวและน้ำมันเมล็ดสบู่ดำ เป็นต้น มีปริมาณกรดไขมันอิสระอยู่ในช่วงร้อยละ 0.5-5 น้ำมันพืชผ่านการกลั่นสำหรับประกอบอาหาร เช่น น้ำมันปาล์มโอเลอินและน้ำมันถั่วเหลือง เป็นต้น มีปริมาณกรดไขมันอิสระน้อยกว่าร้อยละ 0.05 น้ำมันพืชที่ผ่านการประกอบอาหารมีปริมาณกรดไขมันอิสระอยู่ในช่วงร้อยละ 2-7 ส่วนน้ำมันจากไขมันสัตว์ที่ผลิตในชุมชนปริมาณกรดไขมันอิสระอยู่ในช่วงร้อยละ 5-30 ขึ้นอยู่กับชนิดของไขมันสัตว์ เช่น ไขมันหมูที่นำมาเจียวและยังไม่ผ่านการใช้งานมีปริมาณกรดไขมันอิสระต่ำกว่าร้อยละ 10 และน้ำมันวัวปริมาณกรดไขมันอิสระอยู่ในช่วงร้อยละ 10-15 เป็นต้น

ตารางที่ 2.2 สมบัติและค่าความร้อนของน้ำมันพืชชนิดต่างๆ

น้ำมัน	ค่าไอโอดีน (กรัมไอโอดีน/100กรัม)	ความถ่วงจำเพาะที่ 21 °C(g /ml)	ความหนืดที่ 21 °C (cP)	ค่าความร้อน (kJ/kg)
ถั่วเหลือง	124-139	0.918	57.8	39,350
มะพร้าว	6-11	0.915	51.9	37,540
ถั่วลิสง	66-107	0.914	67.1	39,470
ปาล์ม	14-21	0.898	88.6	39,55
เมล็ดในปาล์ม	50-55	0.904	65.9	39,720
เมล็ดสบู่ดำ	101	0.915	36.9 ที่ 38 °C	39,000
น้ำมันดีเซล	ND	0.845	3.8	46,600

2.3.1 น้ำมันพืชและไขมันสัตว์

น้ำมันพืชได้รับความนิยมมากกว่าไขมันสัตว์ในการใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากน้ำมันพืชเป็นของเหลวจึงเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายและผลผลิตของน้ำมันพืชมีปริมาณที่สูง น้ำมันพืชที่สำคัญ ได้แก่ น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันมะพร้าว น้ำมันเมล็ดทานตะวัน น้ำมันเมล็ดสบู่ดำและน้ำมันพืชใช้แล้ว เป็นต้น

2.3.1.1 น้ำมันปาล์ม

ปาล์มน้ำมันปลูกมากในแถบเขตร้อน เป็นพืชเศรษฐกิจชนิดหนึ่งของประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2552 ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมัน 4.5 ล้านไร่ ผลผลิตของผลปาล์มสด 11.33 ล้านตันและผลิตเป็นน้ำมันปาล์มดิบได้ 1.93 ล้านตัน คิดเป็นอันดับที่ 4 ของโลก รองลงมาจาก มาเลเซีย อินโดนีเซียและไนจีเรีย จังหวัดที่มีการผลิตน้ำมันปาล์มได้มากที่สุดคือ กระบี่ สุราษฎร์ธานีและชุมพร ตามลำดับ

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันพืชและไขมันสัตว์หลายชนิด [แหล่งที่มา : <http://www.intechopen.com>]

กรดไขมัน	น้ำมัน ปาล์ม	น้ำมัน ถั่วเหลือง	น้ำมัน มะพร้าว	น้ำมัน เมล็ดสบู่ดำ	ไขมันไก่	ไขมันวัว
กรดคาพริลิก	0	0	6.3	0	0	0
กรดคาพริก	0	0	6.0	0	0	0
กรดลอริก	0.2	0.1	46.5	0.0	0	0
กรดไมริสติก	0.5	0.1	19.2	0.0	0	0
กรดปาล์มิติก	42.8	10.2	9.8	12.7	21.00	27.4
กรดปาล์มิโทเลอิก	0.1	0	0	0.7	7.7	0
กรดสเตียริก	4.5	3.7	3.0	5.5	5.5	14.1
กรดโอเลอิก	40.5	22.8	6.9	39.1	48.5	49.6
กรดไลโนเลอิก	10.1	53.7	2.2	41.6	17.3	2.5
กรดไลโนเลนิก	0.2	8.6	0.0	0.5	0	0

น้ำมันปาล์มจากเนื้อปาล์ม คือ น้ำมันปาล์มที่สกัดได้จากเนื้อของผลปาล์มน้ำมันและน้ำมันเมล็ดในปาล์ม น้ำมันปาล์มที่สกัดได้จากเนื้อของผลปาล์มน้ำมันเรียกว่า น้ำมันปาล์มดิบ คือ น้ำมันที่สกัดได้จากเนื้อของผลปาล์ม มีลักษณะเป็นของเหลวข้นสีเหลืองส้มดังรูปที่ 2.2 ภายในประกอบด้วยของเหลวและของแข็ง เมื่อนำน้ำมันปาล์มดิบผ่านกระบวนการกำจัดกรด กำจัดสี และกลั่นแล้ว หลังจากนั้นทำการแยกของแข็งและของเหลวออกจากกัน ส่วนที่เป็นของเหลวเรียกว่า น้ำมันปาล์มโอเลอิน มีลักษณะเป็นของเหลว สีเหลืองใส ใช้ในการบริโภคภายในครัวเรือนและอุตสาหกรรม ส่วนที่เป็นของแข็งจะถูกเรียกว่า ไชสเตียร์นหรือปาล์มสเตียร์น สามารถนำไปใช้ในการทำเนยเทียม ครีมเทียม และสบู่ โดยทั่วไปน้ำมันปาล์มโอเลอินต่อปาล์มสเตียร์นมีปริมาณเป็นสัดส่วนระหว่างร้อยละ 65-70 ต่อร้อยละ 30-35 ขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตของแต่ละโรงงาน น้ำมันเมล็ดในปาล์ม คือ น้ำมันปาล์มที่สกัดได้จากเมล็ดในของผลปาล์มน้ำมัน สามารถนำไปใช้ในเครื่องสำอางและสบู่ น้ำมันปาล์มและน้ำมันเมล็ดในปาล์มมีสมบัติที่แตกต่างกันมาก น้ำมันปาล์มที่ได้จากเนื้อปาล์มมีกรดไขมันที่มีคาร์บอน 16 ตัว (กรดปาล์มิติก) เป็นองค์ประกอบหลักแต่น้ำมันเมล็ดในปาล์มมีกรดไขมันที่มีคาร์บอน 12 ตัว (กรดลอริก) เป็นองค์ประกอบหลักเหมือนกับน้ำมันมะพร้าว

การผลิตไบโอดีเซล สามารถใช้น้ำมันทุกส่วนที่ได้จากผลปาล์มน้ำมัน ได้แก่ น้ำมันปาล์มโอเลอิน ไชสเตียร์น กรดไขมันปาล์มกลั่นและน้ำมันเมล็ดในปาล์ม เป็นต้น แต่ในเชิงเศรษฐศาสตร์แล้วต้องพิจารณาถึงจุดคุ้มทุน ดังนั้นจึงนิยมนำไชสเตียร์นและน้ำมันปาล์มดิบซึ่งยังมีการใช้ประโยชน์มาเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล และไม่นิยมนำน้ำมันปาล์มโอเลอินและน้ำมันเมล็ดในปาล์มมาเป็นวัตถุดิบ เนื่องจากน้ำมันปาล์มโอเลอินเป็นสินค้าบริโภคและราคาแพงซึ่งไม่คุ้มทุนต่อการผลิต

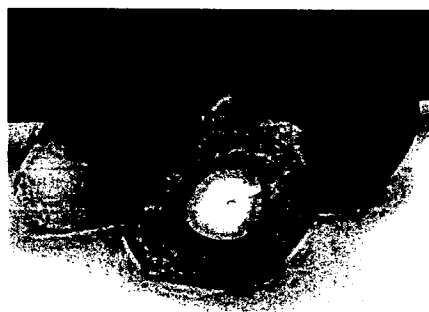
2.3.1.2 น้ำมันพืชใช้แล้ว

สำหรับประเทศไทยในภาคอุตสาหกรรมและครัวเรือนนิยมน้ำมันปาล์มในการบริโภค น้ำมันพืชใช้แล้วส่วนใหญ่จึงเป็นน้ำมันปาล์มใช้แล้ว น้ำมันพืชใช้แล้วเกิดจากน้ำมันพืชที่ผ่านการทอดอาหาร แต่ก็ยังมีการใช้ไขมันจากสัตว์ในการทอดอาหารเช่นกัน จากการศึกษาปริมาณของน้ำมันพืชใช้แล้วในปัจจุบันพบว่า มีปริมาณน้ำมันพืชใช้แล้วที่เหลือจากอุตสาหกรรมประมาณ 16.5 ล้านลิตรต่อปีและมีปริมาณน้ำมันพืชใช้แล้วที่เหลือจากครัวเรือนประมาณ 74 ล้านลิตรต่อปี [ไบโอดีเซล, 2550] จากการศึกษาการนำน้ำมันพืชใช้แล้วมาทำเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลพบว่า น้ำมันพืชใช้แล้วมีศักยภาพในการผลิตไบโอดีเซล ราคาของน้ำมันพืชใหม่แพงกว่าน้ำมัน

ใช้แล้วมากกว่า 2 เท่า ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตไบโอดีเซลลดลงอย่างมาก แต่เนื่องจากน้ำมันพืชใช้แล้วมีกรดไขมันอิสระปริมาณสูง ถ้าหากว่าน้ำมันพืชผ่านการประกอบอาหารซ้ำมากกว่าหนึ่งครั้งทำให้กรดไขมันอิสระมีปริมาณสูงขึ้น การนำน้ำมันพืชใช้แล้วผลิตไบโอดีเซลจำเป็นจะต้องตรวจวัดปริมาณของกรดไขมันอิสระและกำจัดกรดไขมันอิสระก่อนด้วยกระบวนการเอสเทอริฟิเคชันก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตไบโอดีเซล



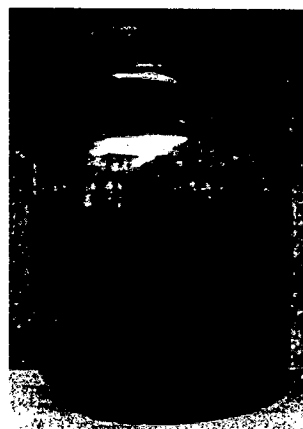
ทะลายปาล์ม



ผลปาล์ม



ต้นปาล์ม



น้ำมันปาล์มดิบ

รูปที่ 2.2 ทะลายปาล์ม ผลปาล์ม ต้นปาล์มและน้ำมันดิบ

ตารางที่ 2.4 ราคาน้ำมันพืช [มีนาคม, 2556]

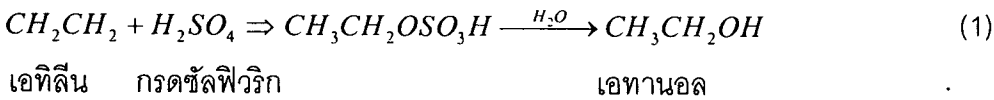
ชื่อ	ราคา(บาทต่อลิตร)
น้ำมันถั่วเหลือง	50
น้ำมันเมล็ดทานตะวัน	72
น้ำมันปาล์ม	40
น้ำมันพืชใช้แล้ว	12

2.3.2 เอทานอล

เอทานอลเป็นสารประกอบอินทรีย์ในกลุ่มแอลกอฮอล์ชนิดหนึ่งที่มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า เอทิลแอลกอฮอล์ มีสูตรเคมี คือ C₂H₅OH เป็นของเหลวใสไม่มีสี ติดไฟได้ง่ายและค่าออกเทนสูง โมเลกุลของเอทานอลประกอบด้วยหมู่เอทิล (CH₂-) กับหมู่ไฮดรอกไซด์ (-OH)

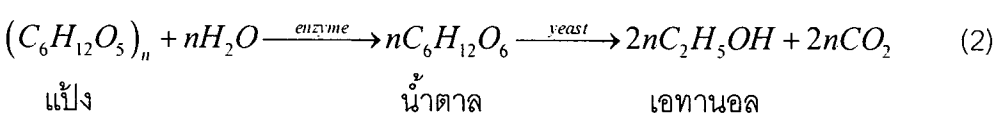
เอทานอลมีจุดหลอมเหลวอยู่ที่อุณหภูมิ -114 องศาเซลเซียส มีจุดเดือดอยู่ที่อุณหภูมิ 78.15 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่นอยู่ที่ 0.785 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เอทานอลสามารถนำไปใช้ประโยชน์หลากหลายประเภท ได้แก่ ใช้เป็นเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ เช่น เหล้า เบียร์และไวน์ เป็นต้น ใช้เป็นตัวทำละลายในผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เช่น สี ยาเคลือบน้ำมันและซีเมนต์ เป็นต้น ใช้ในทางการแพทย์และอื่นๆกระบวนการผลิตเอทานอลจะถูกแบ่งได้เป็น 2 ประเภทดังต่อไปนี้

การผลิตเอทานอลจากกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมี คือ การผลิตที่ใช้สารตั้งต้นจากสารอนุพันธ์ปิโตรเลียม เช่น การผลิตเอทานอลจากเอทิลีนด้วยปฏิกิริยาการระเหยน้ำ เริ่มต้นจากเอทิลีนถูกเปลี่ยนด้วยกรดซัลฟิวริกกลายเป็นแอลกอฮอล์แล้วต่อด้วยน้ำ เอทานอลที่ได้ เรียกว่าเอทานอลสังเคราะห์ดังสมการที่ (1)



การผลิตเอทานอลจากการหมัก ปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตเอทานอลประมาณร้อยละ 93 ใช้กระบวนการหมัก วัตถุดิบที่ใช้จะเป็นสารประกอบคาร์โบไฮเดรตที่มีน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเป็นองค์ประกอบอยู่ในโครงสร้างของโมเลกุล ยีสต์ที่ใช้ในการหมักเอทานอลส่วนมากจะใช้สายพันธุ์ *saccharomyces cerevisiae* ซึ่งสามารถทนต่อสภาพแวดล้อมที่มีเอทานอลได้ดีกว่าสายพันธุ์อื่น

และผลิตเอทานอลได้ปริมาณสูง การเปลี่ยนน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเป็นเอทานอลของยีสต์เกิดขึ้นในระดับของเซลล์และปล่อยออกมานอกเซลล์ ยีสต์จะเปลี่ยนน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเป็นเอทานอลได้ร้อยละ 51.1 ส่วนที่เหลือร้อยละ 48.9 เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เอทานอลที่ได้ถูกเรียกว่า ไบโอเอทานอล ดังสมการที่ 2



- วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเอทานอลแบ่งได้เป็น 3 ชนิด ได้แก่
- ก) วัตถุดิบประเภทน้ำตาล ได้แก่ ข้าวฟ่างหวาน อ้อยและกากน้ำตาล เป็นต้น
 - ข) วัตถุดิบประเภทแป้ง ได้แก่ ข้าวเจ้า ข้าวสาลี ข้าวโพด ข้าวบาร์เลย์ มันสำปะหลังและมันเทศ เป็นต้น
 - ค) วัตถุดิบประเภทเส้นใย ได้แก่ ฟางข้าว ชังข้าวโพด รำข้าว ชายอ้อย เศษไม้และเศษกระดาษ เป็นต้น

ตารางที่ 2.5 พืชชนิดต่างๆที่ใช้ผลิตเอทานอลในประเทศไทย [สุภาพร, 2549]

พืช (น้ำหนัก 1 ตัน)	ปริมาณเอทานอลที่ได้ (ลิตร)
กากน้ำตาล	260
มันสำปะหลังสด	200
อ้อย	70
ข้าวฟ่าง	76
ธัญพืช (ข้าว, ข้าวโพด)	385
น้ำมะพร้าว	83

2.4 มาตรฐานน้ำมันไบโอดีเซล

ปัจจุบันประเทศไทยได้ส่งเสริมให้มีการผลิตไบโอดีเซลในเชิงอุตสาหกรรมและพัฒนารูปแบบการผลิตไบโอดีเซลชนิดเมทิลเอสเทอร์อย่างกว้างขวาง ดังนั้นกรมธุรกิจพลังงานจึงได้ประกาศ เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน เพื่อให้กำหนดคุณภาพของไบโอดีเซลที่จำหน่ายอยู่ในปัจจุบันตามแหล่งบริการต่างๆ ข้อกำหนดของกรมธุรกิจพลังงานจะบอกถึงค่ามาตรฐานของข้อกำหนดต่างๆ วิธีการทดสอบ กำหนดเครื่องมือที่ใช้ ทั้งขนาดและรูปร่าง โดยกรมธุรกิจพลังงานได้ประกาศข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน เมื่อวันที่ 13 กรกฎาคม 2552 ดังแสดงในตารางที่ 2.6

2.4.1 เมทิลเอสเทอร์ คือ ค่าที่แสดงถึงปริมาณหรือความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ ถ้าหากมีค่าของเมทิลเอสเทอร์ต่ำกว่าที่กำหนด แสดงถึงปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และมอนอกลิเซอไรด์สูงกว่าที่กำหนด เป็นสาเหตุให้ไบโอดีเซลมีความหนืดสูง ส่งผลให้เกิดการอุดตันในหัวฉีดของเครื่องยนต์

2.4.2 ความหนาแน่น ที่ 15 องศาเซลเซียส เป็นการวัดมวลของสารต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ความหนาแน่นมีผลต่อค่าความร้อน (Heating value) และการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (Fuel consumption) ถ้าความหนาแน่นมากส่งผลให้ค่าความร้อนมากขึ้นและการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงน้อยลง ไบโอดีเซลที่ได้จากน้ำมันพืชและไขมันสัตว์แต่ละชนิดมีค่าความหนาแน่นแตกต่างกัน นอกจากนี้แอลกอฮอล์ที่ตกค้างอยู่ในไบโอดีเซลส่งผลให้ความหนาแน่นของสารมีค่าต่ำอีกด้วย

2.4.3 ความหนืด ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นสมบัติที่ด้านทานการไหล ความหนืดของไบโอดีเซลสัมพันธ์กับส่วนประกอบของกรดไขมันในไบโอดีเซล สายโซ่ของกรดไขมันที่ยาวขึ้นและกลุ่มแอลกอฮอล์ที่ใหญ่ขึ้นทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น ดังนั้นเมทิลเอสเทอร์จะมีความหนืดต่ำกว่าเอทิลเอสเทอร์เล็กน้อย นอกจากนั้นค่าความหนื่อยังสัมพันธ์แบบผกผันกับจำนวนของพันธะคู่ ความหนืดต่ำสำหรับไบโอดีเซลที่เกิดกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูงและความหนืดสูงสำหรับไบโอดีเซลที่เกิดกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูง

ตารางที่ 2.6 มาตรฐานไบโอดีเซลของประเทศไทย พ.ศ. 2552 [กรมธุรกิจพลังงาน, 2552]

ข้อกำหนด		อัตราสูง-ต่ำ		วิธีทดสอบ
เมทิลเอสเทอร์ (Methyl ester)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่ต่ำกว่า	96.5	EN 14103
ความหนาแน่น ที่ 15 °C (Density at 15 °C)	กิโลกรัม/ลูกบาศก์ เมตร	ไม่ต่ำกว่า ไม่สูงกว่า	860 900	ASTM D 1298
ความหนืด ที่ 40 °C (Viscosity at 40 °C)	เซนติสโตกส์	ไม่ต่ำกว่า ไม่สูงกว่า	3.5 5.0	ASTM D 445
จุดวาบไฟ (Flash point)	องศาเซลเซียส	ไม่ต่ำกว่า	120	ASTM D 93
กำมะถัน (Sulphur)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.0010	ASTM D 2622
กากถ่าน (ร้อยละ 10 ของกากที่เหลือจาก การกลั่น) (Carbon residue)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.30	ASTM D 4530
จำนวนซีเทน (Cetane number)		ไม่ต่ำกว่า	51	ASTM D 613
เถ้าซัลเฟต (Sulfated ash)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.02	ASTM D 874
น้ำ (Water)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.050	ASTM D 2709
สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด (Total contaminate)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.0024	ASTM D 5452
การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (Copper stripe corrosion)		ไม่สูงกว่า	หมายเลข 1	ASTM D 130

ตารางที่ 2.6 มาตรฐานน้ำมันไบโอดีเซลของประเทศไทย พ.ศ. 2552 (ต่อ)

ข้อกำหนด		อัตราสูง-ต่ำ		วิธีทดสอบ
เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ 110°C (Oxidation stability at 110°C)	ชั่วโมง	ไม่ต่ำกว่า	6	EN 14112
ค่าความเป็นกรด (Acidic value)	Mg KOH/g	ไม่สูงกว่า	0.50	ASTM D 664
ค่าไอโอดีน (Iodin value)	กรัมไอโอดีน/100 กรัม	ไม่สูงกว่า	120	EN 14111
กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์ (Linoleic methyl ester)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	12.0	EN 14103
เมทานอล (Methanol)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14110
มอนอกลิเซอไรด์ (Monoglyceride)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.80	EN 14105
ไดกลีเซอไรด์ (Diglyceride)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14105
ไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14105
กลีเซอรินอิสระ (Free glycerin)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.02	EN 14105
กลีเซอรินทั้งหมด (Total glycerin)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.25	EN 14105
โลหะกลุ่ม 1 (Na+K) (Group I metal (Na+K))	มิลลิกรัม/กิโลกรัม	ไม่สูงกว่า	5.0	EN 14108
โลหะกลุ่ม 2 (Ca+Mg) (Group II metal (Ca+Mg))	มิลลิกรัม/กิโลกรัม	ไม่สูงกว่า	5.0	และ EN 14109 prEN 14538
ฟอสฟอรัส(Phosphorus)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.0010	ASTM D 4951

2.4.4 กำมะถัน ไบโอดีเซลมีกำมะถันที่ปนเปื้อนอยู่ในปริมาณต่ำกว่า 15 ส่วนในล้านส่วนซึ่งถือว่าเป็นเชื้อเพลิงที่มีปริมาณกำมะถันต่ำ กำมะถันที่ปนเปื้อนในน้ำมันจะเปลี่ยนเป็นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เมื่อถูกเผาไหม้ เมื่อถูกปล่อยออกมาจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

2.4.5 กากถ่าน (ร้อยละ 10 ของกากที่เหลือจากการกลั่น) เป็นกากที่เหลือจากการเผาไหม้ในภาวะที่กำหนดไว้ แม้ว่าจะไม่ใช่สารประกอบคาร์บอนอย่างเดียวกก็ตาม ปริมาณของกากถ่านเป็นตัวบ่งบอกถึงแนวโน้มของการเกิดเขม่าจุดตันสะสมที่ปลายหัวฉีดและภายในห้องเผาไหม้ นอกจากนี้กากถ่านยังบ่งชี้ถึงปริมาณกลีเซอรอล กรดไขมันอิสระ สบู่และตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหลืออยู่ การมีปริมาณของกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวสูงและสารพอลิเมอร์มีผลให้ค่ากากถ่านสูงขึ้น

2.4.6 เถ้าซัลเฟต เป็นค่าที่วัดที่บ่งบอกปริมาณของโลหะที่ปนเปื้อนมาจากสารเติมแต่งและอื่นๆ การวิเคราะห์หาเถ้าซัลเฟตในไบโอดีเซลโดยการเติมกรดซัลฟิวริกลงในสารตัวอย่างที่ผ่านการเผาจนเหลือเถ้าและคาร์บอน คาร์บอนเกิดออกซิเดชันจนหมดและเหลือเพียงเถ้าซัลเฟต

2.4.7 น้ำ โดยปกติไม่ควรมีน้ำเจือปนอยู่ในน้ำมันเชื้อเพลิง เนื่องจากน้ำเป็นสาเหตุให้เกิดสนิมของอุปกรณ์ที่เป็นเหล็กทำให้เกิดการรั่วได้ น้ำยังเป็นตัวเร่งที่ทำให้จุลินทรีย์ในถังน้ำมันเจริญเติบโตทำให้เกิดการอุดตันของหัวฉีดได้ นอกจากนี้น้ำทำให้การเผาไหม้ของน้ำมันไม่ดีและน้ำสามารถทำปฏิกิริยากับเอสเทอร์ทำให้เกิดกรดไขมันอิสระทำให้เกิดการกัดกร่อนในเครื่องยนต์

2.4.8 สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด สำหรับน้ำมันไบโอดีเซลสิ่งปนเปื้อนทั้งหมดเกิดจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันและปฏิกิริยาข้างเคียง เช่น สบู่ กรดไขมันอิสระ ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส แอลกอฮอล์ชนิดแข็งและสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เป็นต้น สิ่งเหล่านี้จะก่อให้เกิดผลเสียต่อเครื่องยนต์ เช่น ใต้กรองและหัวฉีดเกิดการอุดตันเนื่องจากสบู่ เกิดผลเสียต่อเสถียรภาพของไบโอดีเซล เป็นต้น โดยทั่วไปขั้นตอนการล้างไบโอดีเซลจะกำจัดสิ่งปนเปื้อนทั้งหมด

2.4.9 การกัดกร่อนแผ่นทองแดง เป็นค่าที่แสดงการกัดกร่อนของน้ำมันต่อเครื่องยนต์ดีเซลในส่วนที่เป็นโลหะ สาเหตุมาจากกรดและสารประกอบกำมะถันบางชนิด

2.4.10 ค่าความเป็นกรด เป็นค่าที่แสดงการความเป็นกรดของน้ำมันไบโอดีเซล ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดและกรดไขมันอิสระ

2.4.11 กรดไลโนเลอิกเมทิลเอสเทอร์ เป็นค่าที่แสดงถึงความไม่อิ่มตัวและพันธะคู่ของไบโอดีเซล เนื่องจากความไม่อิ่มตัวและพันธะคู่ของไบโอดีเซลทำให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ (Polymerization) ในเครื่องยนต์เป็นผลทำให้เกิดการอุดตัน นอกจากนี้พันธะคู่ของไบโอดีเซลมีผลต่อเสถียรภาพของไบโอดีเซลเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

2.4.12 ค่าไอโอดีน คือ การวัดความไม่อิ่มตัวของน้ำมันหรือไขมันที่ใช้เป็นวัตถุดิบผลิตไบโอดีเซล ค่าไอโอดีนสูงมีแนวโน้มที่จะเกิดพอลิเมอร์เรซินและออกซิเดชัน นอกจากนี้ค่าไอโอดีนยังมีความสัมพันธ์กับค่าซีเทนและค่าความหนืด ค่าซีเทนและค่าความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อความไม่อิ่มตัวลดลง

2.4.13 เมทานอล เป็นค่าที่แสดงถึงปริมาณเมทานอลที่ปนอยู่ในไบโอดีเซล ปริมาณเมทานอลมีความสัมพันธ์กับจุดวาบไฟ เมทานอลมีจุดวาบไฟต่ำ เมทานอลที่ปนอยู่ในไบโอดีเซลส่งผลให้จุดวาบไฟต่ำลง จุดวาบไฟต่ำมีความเสี่ยงในการขนส่งและการเก็บรักษาไบโอดีเซล

2.4.14 มอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์และไตรกลีเซอไรด์ เป็นค่าที่แสดงถึงปริมาณของโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์และไตรกลีเซอไรด์ในไบโอดีเซล สารทั้ง 3 ชนิดนี้แสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้วาล์ว กระบอกสูบและหัวฉีดภายในเครื่องยนต์อุดตัน

2.4.15 กลีเซอรินอิสระและกลีเซอรินทั้งหมด กลีเซอรินอิสระคือปริมาณกลีเซอรินที่ปนอยู่ในไบโอดีเซลที่เกิดจากการแยกชั้นไม่สมบูรณ์ กลีเซอรินทั้งหมด คือ ผลรวมปริมาณทั้งหมดของกลีเซอรินอิสระกับกลีเซอรินที่อยู่ในรูปของมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์และไตรกลีเซอไรด์ที่ปนอยู่ในไบโอดีเซล สารเหล่านี้ทำให้ระบบลำเลียงน้ำมัน ได้กรองและหัวฉีดภายในเครื่องยนต์อุดตัน

2.4.16 โลหะกลุ่ม 1 (โซเดียมและโพแทสเซียม) และ โลหะกลุ่ม 2 (แคลเซียมและแมกนีเซียม) เป็นค่าที่แสดงถึงความเข้มข้นของปริมาณของโลหะแอลคาไลน์ (โซเดียมและโพแทสเซียม) และโลหะแอลคาไลน์เอิร์ธ (แคลเซียมและแมกนีเซียม) โลหะแอลคาไลน์มาจากตัวเร่งปฏิกิริยาและโลหะแอลคาไลน์เอิร์ธมาจากตัวเร่งปฏิกิริยาหรือการล้างด้วยน้ำกระด้าง

2.4.17 ฟอสฟอรัส โดยส่วนใหญ่สารฟอสฟอรัสเป็นสิ่งปนเปื้อนที่มากับน้ำมันพืชซึ่งอยู่ในรูปของฟอสโฟลิพิด (Phospholipids) และเกิดขึ้นในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลถ้าใช้กรดฟอสฟอริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ถ้าหากปริมาณฟอสฟอรัสมีเกินกว่าจะเป็นอันตรายต่ออุปกรณ์ควบคุมการปล่อยมลพิษหรือคัตาลิติกคอนเวอร์เตอร์ (Catalytic convertor)

2.5 การผลิตไบโอดีเซลจากกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน

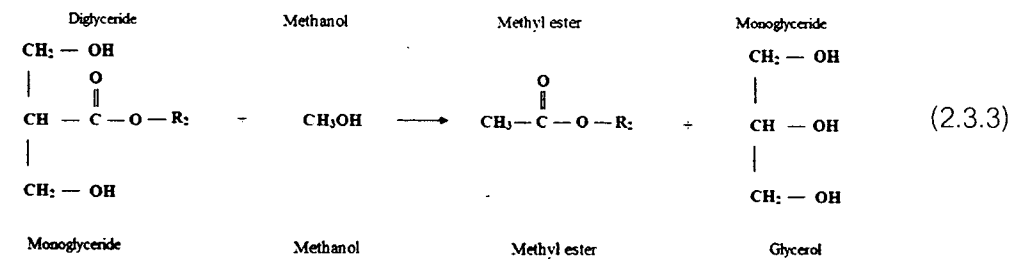
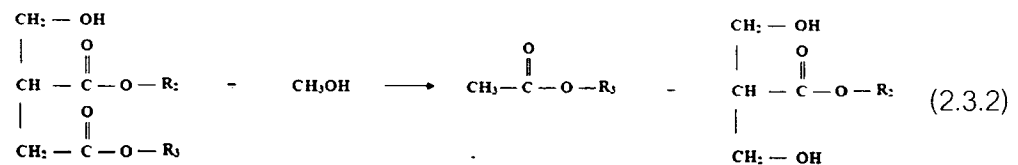
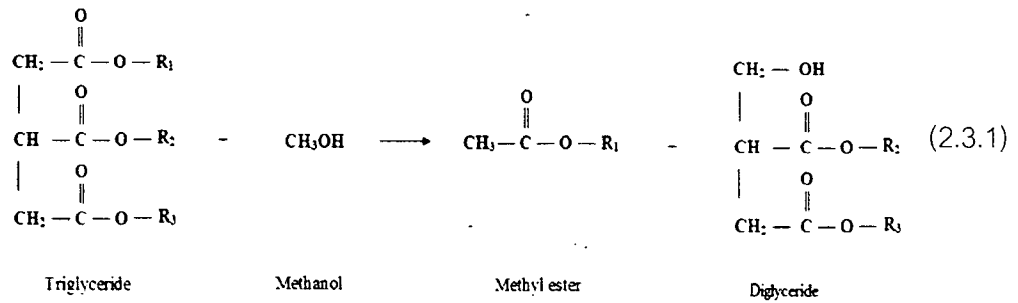
จากที่กล่าวมาแล้วน้ำมันพืชถูกนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันดีเซลโดยตรง หลังจากนั้นพัฒนาเป็นการผสมระหว่างน้ำมันพืชกับน้ำมันดีเซลตามอัตราส่วนต่างๆ ปัจจุบันไบโอดีเซลคือน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ที่ทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์แล้วได้ผลิตภัณฑ์ที่ชื่อว่ามีมอนอแอลคิลเอสเทอร์หรือไบโอดีเซล ปฏิกิริยาดังกล่าวเรียกว่า ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน (Transesterification reaction) หรืออาจจะเรียกว่า ปฏิกิริยาการแยกสลายด้วยแอลกอฮอล์ (Alcoholysis reaction) เป็นปฏิกิริยาที่แอลกอฮอล์เปลี่ยนหมู่แอลคอกซิล (RO-) ให้กลายเป็นเอสเทอร์และมีกลีเซอรอลเป็นผลพลอยได้

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันเกิดจากไตรกลีเซอไรด์ทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนย่อย ขั้นตอนที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 2.3.1 ไตรกลีเซอไรด์ทำปฏิกิริยากับเมทานอลได้ผลิตภัณฑ์เป็นไดกลีเซอไรด์กับเมทิลเอสเทอร์ ขั้นตอนที่ 2 เป็นขั้นตอนควบคุมปฏิกิริยาเนื่องจากเกิดช้าที่สุดดังแสดงในรูปที่ 2.3.2 ไดกลีเซอไรด์จากขั้นตอนที่ 1 ทำปฏิกิริยากับเมทานอลได้ผลิตภัณฑ์เป็นมอนอกลิเซอไรด์กับเมทิลเอสเทอร์ ขั้นตอนที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 2.3.3 มอนอกลิเซอไรด์จากขั้นตอนที่ 2 ทำปฏิกิริยากับเมทานอลได้ผลิตภัณฑ์เป็นกลีเซอรอลกับเมทิลเอสเทอร์

กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันได้รับความนิยมมากในปัจจุบัน เพื่อปรับปรุงคุณภาพทางเชื้อเพลิงของน้ำมันพืชและไขมันสัตว์ แอลกอฮอล์ที่ใช้ในกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน ได้แก่ เมทานอล เอทานอล โพรพานอลและบิวทานอล แต่ที่ได้รับความนิยมมากคือ เมทานอลและเอทานอลตามลำดับ เนื่องจากเมทานอลมีโมเลกุลขนาดเล็กจึงเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายและเร็ว รูปแบบของกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันที่ใช้กันในปัจจุบันแบ่งได้ 2 รูปแบบ คือ

2.5.1 กระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic process)

ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสารเคมีที่เติมลงไปในการปฏิกิริยาเคมีเพื่อเพิ่มอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาเคมีและทำให้ภาวะของการเกิดปฏิกิริยาดำลง เช่น อุณหภูมิ เป็นต้น โดยที่ตัวเร่งปฏิกิริยายังคงสภาพเป็นสารเดิมและจะไม่เกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนเป็นสารผลิตภัณฑ์เมื่อเสร็จสิ้นปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ

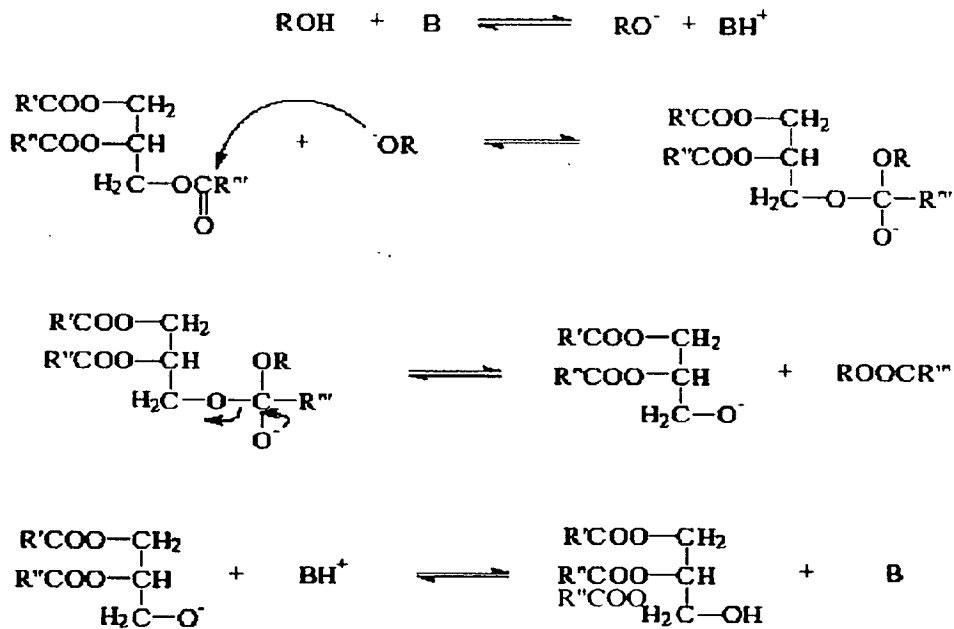


รูปที่ 2.3 ลำดับของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน [Lakshmi et al., 2011]

ก) ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส (Alkaline catalyst)

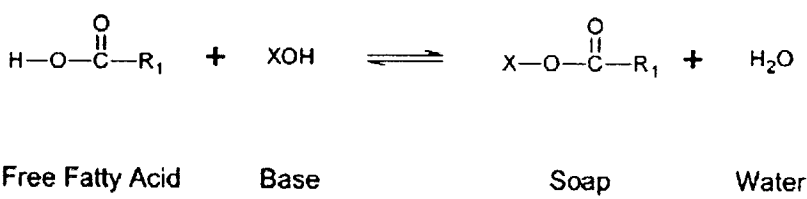
กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถูกแบ่งได้เป็น 2 รูปแบบตามสถานะของสารตั้งต้นและตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ (Homogeneous catalyst) และการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous catalyst)

การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ (Homogeneous catalyst) ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเป็นรูปแบบที่สารตั้งต้นและตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในสถานะของเหลวเหมือนกัน ตัวเร่งปฏิกิริยาของรูปแบบนี้ที่ได้รับความนิยมได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ กลไกของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันแสดงดังรูปที่ 2.4 รูปแบบนี้ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ใช้ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิต่ำส่งผลให้มีต้นทุนการผลิตต่ำ ไบโอดีเซลที่ได้มีคุณภาพดีและกลีเซอรอลที่ได้มีคุณภาพดีเป็นที่ต้องการของโรงงาน

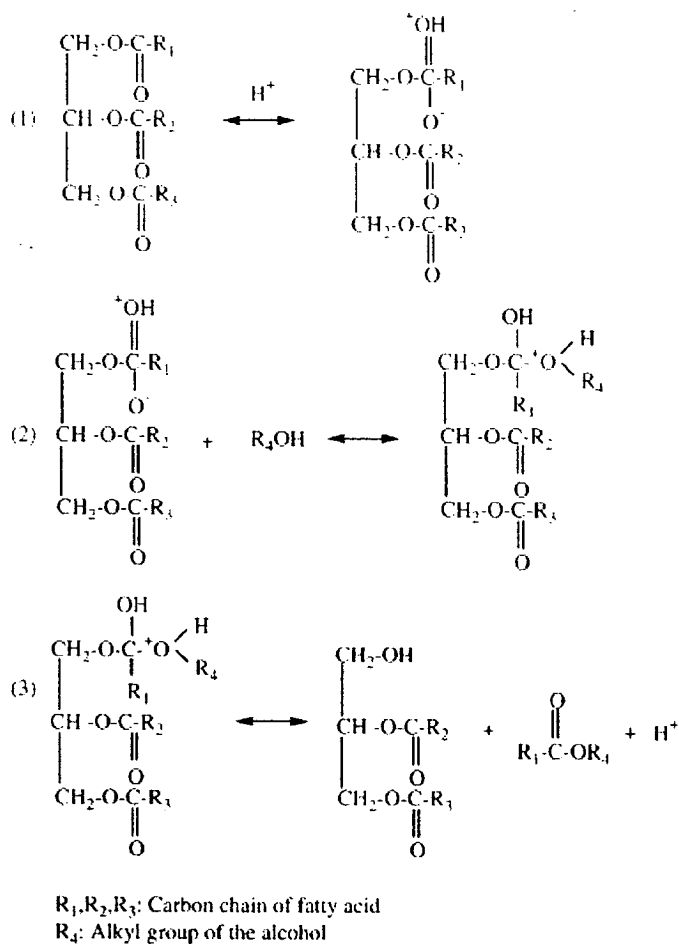


รูปที่ 2.4 กลไกของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบส
[Schuchardt et al., 1998]

รูปแบบนี้มีข้อเสียดังต่อไปนี้คือ ใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยานาน ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ น้ำมันพืชหรือที่ใช้เป็นสารตั้งต้นจะต้องมีลักษณะที่เหมาะสมคือต้องมีปริมาณของกรดไขมันอิสระน้อยกว่าร้อยละ 1 เนื่องจากกรดไขมันกับเบสเกิดปฏิกิริยาแซพอนิฟิเคชัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือสบู่กับน้ำดังแสดงในรูป 2.5 สบู่เป็นสารอิมัลซิฟายเออร์ (emulsifier) ที่ทำให้กลีเซอรอลกับเมทานอลแยกชั้นออกจากกันยาก



รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาแซพอนิฟิเคชัน



รูปที่ 2.6 กลไกของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบกรด

[Lam et al., 2010]

การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous catalyst) ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเป็นรูปแบบที่สารตั้งต้นอยู่ในสถานะของเหลวและตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในสถานะของแข็ง รูปแบบนี้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อแก้ปัญหาข้อด้อยของรูปแบบตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธุ์ คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

๒) ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด (Acid catalyst)

กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันรูปแบบนี้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ได้แก่ กรดซัลฟิวริก กรดไฮโดรคลอริก ซีโอไลต์และ La/zeolite เป็นต้น ข้อดีของวิธีนี้คือสามารถแก้ปัญหการเกิดสบู่จากกรดไขมันอิสระได้จึงเหมาะสมสำหรับน้ำมันพืชที่มีกรดไขมันอิสระปริมาณมาก ข้อเสียของวิธีนี้คือเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยานาน เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาแบบกรดมีความชอบน้ำจึงทำ

ให้ปริมาณน้ำส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาลดลง กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบกรดดังแสดงในรูปที่ 2.5

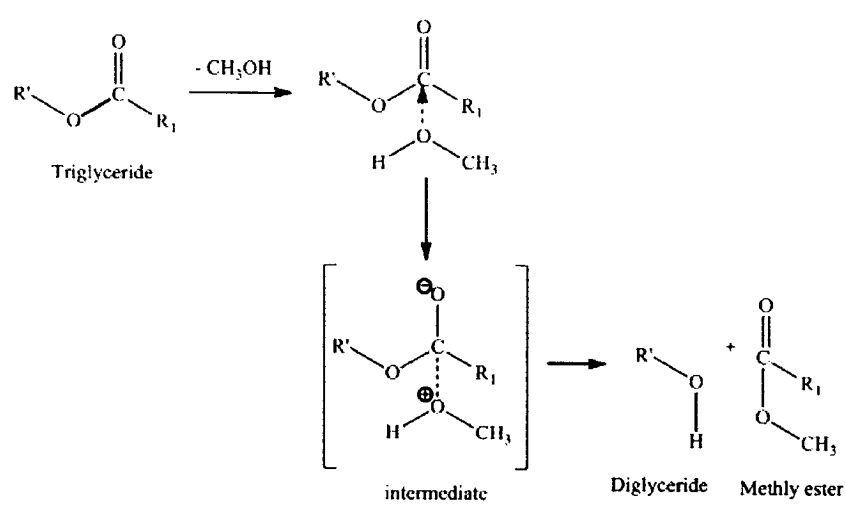
ค) ตัวเร่งปฏิกิริยาคอนเดนซิม

เอนไซม์ตัวเร่งปฏิกิริยาคอนเดนซิมที่ใช้ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ซึ่งมีหลายชนิดแต่ที่ได้รับความนิยมคือเอนไซม์ไลเปส เอนไซม์ไลเปสยังสามารถใช้เป็นตัวเร่งในปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันและปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้ โดยเอนไซม์ไลเปสไฮโดรไลซิโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์บริเวณพันธะเอสเทอร์แล้วเกิดเป็นไดกลีเซอไรด์ มอนอกลิเซอไรด์ กรดไขมันอิสระและกลีเซอรอล เอนไซม์ไลเปสพบได้ในสิ่งมีชีวิตแต่ส่วนมากแล้วนิยมใช้เอนไซม์ไลเปสที่ผลิตมาจากจุลินทรีย์ เอนไซม์ไลเปสไม่สามารถนำมาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้โดยตรงแต่ต้องผ่านกระบวนการตรึงเอนไซม์บนตัวรองรับก่อน ตัวเร่งปฏิกิริยาคอนเดนซิมไลเปสสามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันและทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยไม่ต้องใช้น้ำ ภาวะที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาต่ำได้กลีเซอรอลคุณภาพสูง สามารถใช้ได้กับวัตถุดิบที่มีน้ำหรือกรดไขมันอิสระปริมาณมากที่สำคัญยังมีขั้นตอนการดำเนินการน้อย ใช้พลังงานน้อยและไม่มีน้ำเสีย แต่อย่างไรก็ตามข้อเสียของตัวเร่งปฏิกิริยาคอนเดนซิมไลเปสได้แก่ ใช้เวลาในการผลิตนาน เอนไซม์มีราคาแพง และต้องใช้ความเข้มข้นของเอนไซม์สูงเพื่อให้ได้ปฏิกิริยาที่สมบูรณ์

2.5.2 กระบวนการที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Non-catalytic process)

กระบวนการที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นรูปแบบใหม่ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันรูปแบบนี้ใช้อุณหภูมิและความดันสูงเพื่อให้แอลกอฮอล์อยู่ในภาวะเหนือวิกฤต การทำให้แอลกอฮอล์อยู่ในภาวะเหนือวิกฤตทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้นในเวลาอันสั้น แอลกอฮอล์ที่สามารถใช้ได้กับรูปแบบนี้ได้แก่ เมทานอล เอทานอล 1-โพรพานอล 1-บิวทานอลและ 1-ออกทานอล ข้อดีของแอลกอฮอล์ภาวะเหนือวิกฤตได้แก่ ได้ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลสูงในเวลาสั้นทำให้ไบโอดีเซลที่ได้มีคุณภาพดี รูปแบบนี้ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและมีเพียงสารตั้งต้น 2 ชนิดเท่านั้นจึงส่งผลให้แยกผลิตภัณฑ์ออกมาได้ง่าย ปริมาณกรดไขมันอิสระกับน้ำในสารตั้งต้นมีผลต่อรูปแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ส่งผลดีต่อรูปแบบแอลกอฮอล์ภาวะเหนือวิกฤต น้ำเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับไตรกลีเซอไรด์ได้เป็นกรดไขมันอิสระกับกลีเซอรอลและกรดไขมันอิสระเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันกับแอลกอฮอล์ได้เป็นไบโอดีเซลกับน้ำ

กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในแอลกอฮอล์ภาวะเหนือวิกฤตของไตรกลีเซอไรด์ เริ่มต้นด้วยหมู่คาร์บอนิลของไตรกลีเซอไรด์ทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของแอลกอฮอล์ที่อยู่ในภาวะเหนือวิกฤตทำให้เกิดเป็นไดกลีเซอไรด์กับแอลคิลเอสเทอร์ ขั้นตอนต่อมาไดกลีเซอไรด์กับโมเลกุลของแอลกอฮอล์ที่อยู่ในภาวะเหนือวิกฤตทำให้เกิดเป็นมอนอกลิเซอไรด์กับแอลคิลเอสเทอร์ ขั้นตอนสุดท้ายมอนอกลิเซอไรด์กับโมเลกุลของแอลกอฮอล์ที่อยู่ในภาวะเหนือวิกฤตทำให้เกิดเป็นแอลคิลเอสเทอร์กับกลีเซอรอล ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 กลไกของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในแอลกอฮอล์ภาวะเหนือวิกฤต
[Sawangkeaw et al., 2011]

ตารางที่ 2.7 อุณหภูมิและความดันวิกฤตของแอลกอฮอล์ [Balat, 2008]

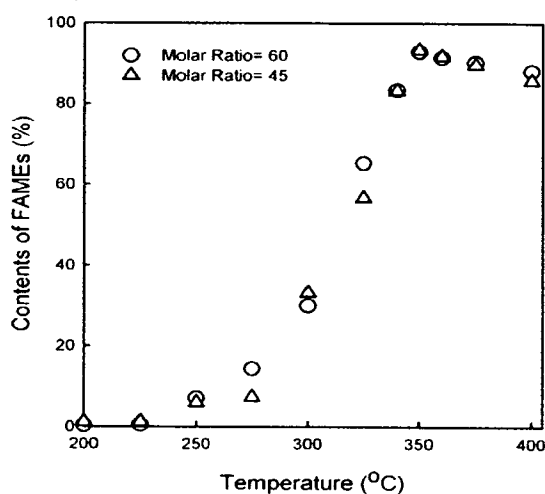
ชื่อ	อุณหภูมิวิกฤต (องศาเซลเซียส)	ความดันวิกฤต (เมกะพาสคาล)
เมทานอล	239.05	8.1
เอทานอล	243.05	6.4
1-โพรพานอล	264.05	5.1
1-บิวทานอล	287.05	4.9

2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไบโอดีเซลในแอลกอฮอล์ภาวะเหนือวิกฤต

กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันในแอลกอฮอล์ภาวะเหนือวิกฤตเป็นวิธีการผลิตไบโอดีเซลแบบใหม่ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีนี้มีหลายชนิด ได้แก่

2.6.1 อุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากในการผลิตไบโอดีเซลในแอลกอฮอล์ภาวะเหนือวิกฤต แอลกอฮอล์แต่ละชนิดมีอุณหภูมิและความดันวิกฤตแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.7 Song และคณะ (2008) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มที่ผ่านการกลั่นในเมทานอลภาวะเหนือวิกฤต จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของปฏิกิริยาที่อยู่ในช่วงของแอลกอฮอล์ภาวะเหนือวิกฤต ทำให้ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นตามไปด้วยดังแสดงในรูปที่ 2.8 แต่อุณหภูมิที่สูงมากกลับส่งผลเสียต่อปริมาณของไบโอดีเซล เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 350 องศาเซลเซียสร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลลดลง เนื่องจากไบโอดีเซลเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า 350 องศาเซลเซียส

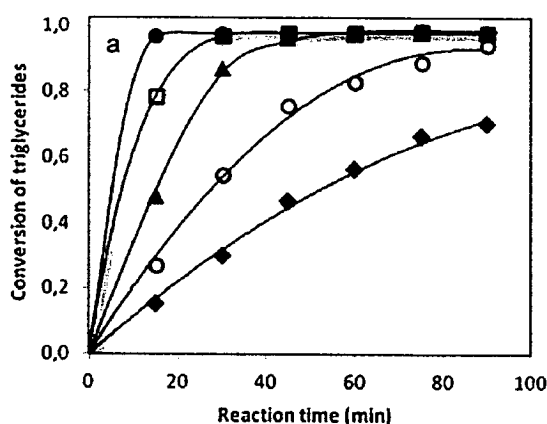


รูปที่ 2.8 ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ความดันเท่ากับ 30 MPa เวลาของการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 5 นาที อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มเท่ากับ 45:1 และ 60:1 [Song et al., 2008]

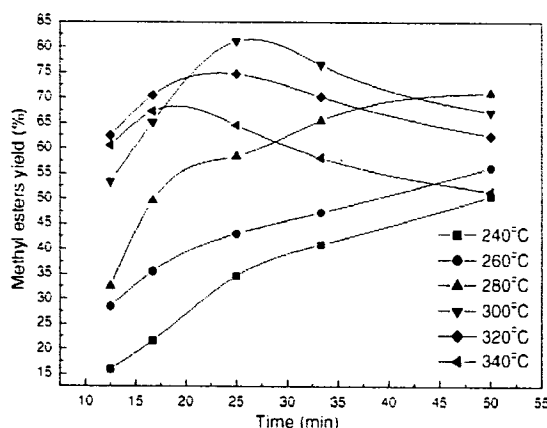
2.6.2 เวลาที่ใช้ในปฏิกิริยา

เวลาที่ใช้ในปฏิกิริยาเป็นหนึ่งในปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล จากการศึกษาของ Quesada-Medina และคณะ (2011) พบว่า การใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้นส่งผลให้การเปลี่ยน (conversion) ของไตรกลีเซอไรด์สมบูรณ์มากขึ้น โดยที่อุณหภูมิสูงจะใช้เวลาน้อยกว่าเพื่อให้การเปลี่ยนของไตรกลีเซอไรด์สมบูรณ์ดังรูปที่ 2.9

He และคณะ (2007) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องในเมทานอลภาวะเหนือวิกฤตจากน้ำมันถั่วเหลืองโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ จากรูปที่ 2.10 พบว่า ที่อุณหภูมิต่างๆ ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อให้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น แต่เมื่อให้เวลาของการเกิดปฏิกิริยามากกว่า 25 นาทีที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสมีผลทำให้ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์ลดลง เนื่องจากการสลายตัวด้วยความร้อนของเมทิลเอสเทอร์ (thermal decomposition) และมีแนวโน้มเดียวกันเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในปฏิกิริยากับค่าการเปลี่ยนแปลงของไตรกลีเซอไรด์ (● 350°C, □ 325°C, ▲ 300°C, ○ 275°C, □ 250°C) [Quesada-Medina et al., 2011]



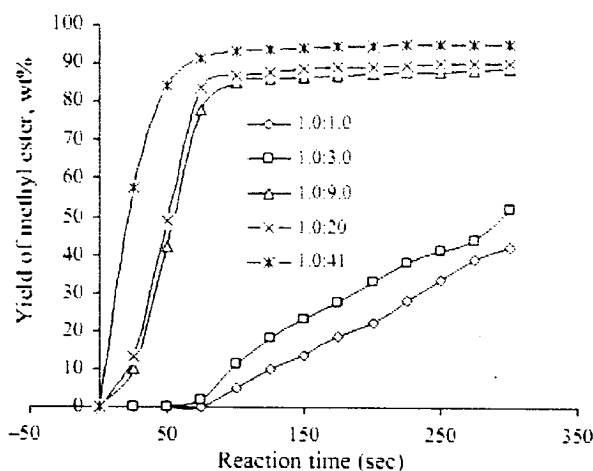
รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์กับเวลาที่ใช้ในปฏิกิริยา
[He et al., 2007]

2.6.3 อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันพืช

อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันพืชเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน เนื่องจากการผลิตไบโอดีเซลในแอลกอฮอล์ภาวะเหนือวิกฤตนั้นไม่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา จึงจำเป็นต้องใช้แอลกอฮอล์ปริมาณมากเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส (Surface area) และทำให้น้ำมันพืชรวมตัวกับแอลกอฮอล์ภาวะวิกฤตได้ดีขึ้นในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างแอลกอฮอล์กับน้ำมันพืชเป็นผลให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้น จากรูปที่ 2.11 พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชส่งผลให้ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นด้วย ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชเท่ากับ 41:1 ให้ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์สูงสุด

2.6.4 ความดัน

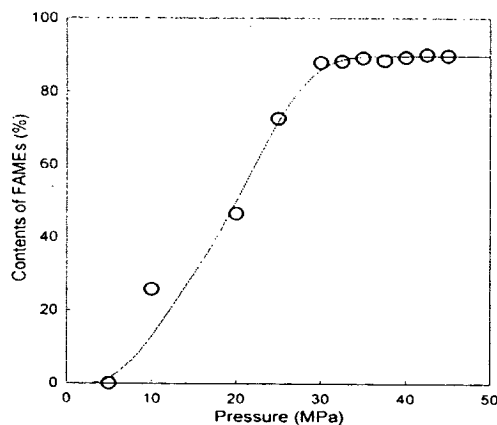
ความดันเป็นปัจจัยที่สำคัญสำหรับภาวะเหนือวิกฤตของแอลกอฮอล์และการผลิตไบโอดีเซล Song และคณะ (2008) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มที่ผ่านการกลั่นในเมทานอลภาวะเหนือวิกฤต จากการศึกษาพบว่า เมื่อความดันเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากการเพิ่มความดันทำให้ความหนาแน่นของเมทานอลเพิ่มขึ้นและทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้น แต่เมื่อความดันมากกว่า 30 เมกะพาสคัลทำให้ปริมาณของเมทิลเอสเทอร์คงที่ ดังรูปที่ 2.12



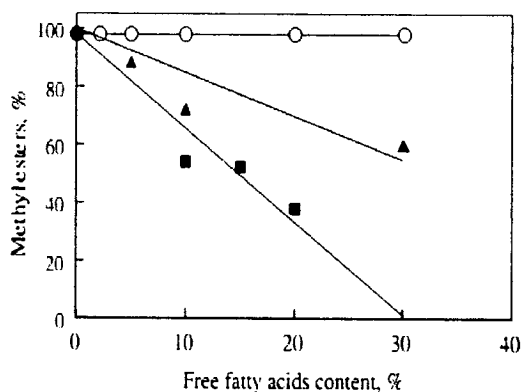
รูปที่ 2.11 ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากอัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันพืชกับเมทานอลต่างๆ อุณหภูมิเท่ากับ 513 องศาเซลเซียส [Demirbas, 2002]

2.6.5 ปริมาณกรดไขมันอิสระ

ปริมาณกรดไขมันอิสระเป็นปัจจัยที่สำคัญมากที่มีผลต่อการผลิตไบโอดีเซลที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสเกิดปฏิกิริยาแซพอนิฟิเคชันเกิดเป็นสบู่ แต่กรดไขมันอิสระจะส่งผลดีต่อการผลิตไบโอดีเซลแบบการใช้แอลกอฮอล์ภาวะเหนือวิกฤต เนื่องจากกรดไขมันอิสระเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันกับแอลกอฮอล์เกิดเป็นแอลคิลเอสเทอร์กับน้ำ จากรูปที่ 2.13 Kusdiana และคณะ (2004) ศึกษาผลของปริมาณของกรดไขมันอิสระและน้ำในน้ำมันพืชต่อการผลิตไบโอดีเซล พบว่ากรดไขมันอิสระไม่มีผลเสียต่อการผลิตไบโอดีเซลแบบแอลกอฮอล์ภาวะเหนือวิกฤตแต่มีผลเสียต่อการผลิตไบโอดีเซลที่ใช้เบสและกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



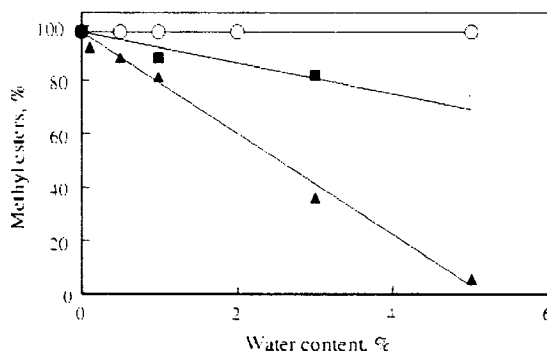
รูปที่ 2.12 ผลของความดันต่อร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เวลา 40 นาทีและอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล 40:1 [Song et al., 2008]



รูปที่ 2.13 ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์ต่อปริมาณของกรดไขมันอิสระ
(■ ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบส, ▲ ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบกรด, O แอลกอฮอล์ภาวะเหนือวิกฤต)
[Kusdiana et al., 2004]

2.6.6 ปริมาณน้ำ

ปริมาณน้ำในสารตั้งต้นเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการผลิตไบโอดีเซลทุกรูปแบบยกเว้นแบบการใช้แอลกอฮอล์ภาวะเหนือวิกฤต จากรูปที่ 2.14 Kusdiana และคณะ (2004) ศึกษาผลของปริมาณของกรดไขมันอิสระและน้ำในน้ำมันพืชต่อการผลิตไบโอดีเซล พบว่าน้ำไม่มีผลเสียต่อการผลิตไบโอดีเซลแบบแอลกอฮอล์ภาวะเหนือวิกฤตแต่มีผลเสียต่อการผลิตไบโอดีเซลที่ใช้เบสและกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณน้ำในสารตั้งต้นมากขึ้นทำให้ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์ลดลง



รูปที่ 2.13 ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์ต่อปริมาณของน้ำ (■ ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบส, ▲ ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบกรด, O แอลกอฮอล์ภาวะเหนือวิกฤต) [Kusdiana et al., 2004]

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Saka และคณะ (2001) ศึกษาการเตรียมน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดเรพ (rapeseed) ในเมทานอลภาวะเหนือวิกฤต โดยกระบวนการแบบแบตช์ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 5 มิลลิลิตร ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ อุณหภูมิเท่ากับ 350 และ 400 องศาเซลเซียส ความดันเท่ากับ 45-65 เมกะพาสคัล และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลกับน้ำมันเมล็ดเรพเท่ากับ 42:1 จากผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในปฏิกิริยา 240 วินาทีและอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลกับน้ำมันเมล็ดเรพเท่ากับ 42:1 ได้ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์ 95 โดยน้ำหนัก

สุกัญญาและคณะ (2545) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยวิธีเมทานอลภาวะเหนือวิกฤตจากน้ำมันมะพร้าวและน้ำมันเมล็ดในปาล์มโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล การทดลองศึกษาที่อุณหภูมิ 270 300 และ 350 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันพืชกับเมทานอล 6:1- 42:1 ความดัน 10 และ 19 เมกะพาสคัล จากการทดลองพบว่าภาวะที่ดีที่สุดสำหรับการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวและน้ำมันเมล็ดในปาล์มอยู่ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความดัน 19 เมกะพาสคัล อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันพืชกับเมทานอล 42:1 และเวลา 400 วินาที ได้ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์ 95 โดยน้ำหนักจากน้ำมันมะพร้าว และ 96 โดยน้ำหนักจากน้ำมันเมล็ดในปาล์ม สมบัติของไบโอดีเซลที่ได้รับเป็นไปตามมาตรฐานของส่วนกำหนดมาตรฐานของ ASTM

Silva และคณะ (2007) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องในเอทานอลภาวะเหนือวิกฤตจากน้ำมันถั่วเหลืองโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล ทดลองที่อุณหภูมิ 473-648 องศาเซลเซียส ความดัน 7-20 เมกะพาสคัลและอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลกับน้ำมันถั่วเหลือง 10:1-100:1 จากผลการทดลองพบว่า การใช้อุณหภูมิและความดันที่ต่ำกว่าภาวะวิกฤตของเอทานอลทำให้เกิดปฏิกิริยาน้อยมากและได้ปริมาณเอทิลเอสเทอร์น้อย แต่ในขณะที่การใช้เอทานอลภาวะเหนือวิกฤตเกิดปฏิกิริยาได้สูงกว่า ภาวะดีที่สุดคืออุณหภูมิ 623 องศาเซลเซียส ความดัน 20 เมกะพาสคัล อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันถั่วเหลืองกับเอทานอล 40:1 และเวลาที่ใช้ในปฏิกิริยา 15 นาที ได้รับปริมาณของเอทิลเอสเทอร์ร้อยละ 80

He และคณะ (2007) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลในเมทานอลภาวะเหนือวิกฤตจากน้ำมันถั่วเหลือง โดยใช้กระบวนการแบบต่อเนื่องและเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล การทดลองใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 5:1-40:1 อุณหภูมิ 240-340 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 12.5-50 นาทีและความดัน 10-40 เมกะพาสคัล จากผลการทดลองพบว่า ภาวะดีที่สุดสำหรับการใช้อุณหภูมิของปฏิกิริยาอยู่ที่อุณหภูมิ 310 องศาเซลเซียส ความดัน 35 เมกะพาสคัล อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 40:1 และเวลา 25 นาที ได้รับร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์เพียง 77 เท่านั้น เนื่องจากเกิดการสลายตัวด้วยความร้อนของเมทิลเอสเทอร์ อย่างไรก็ตามการเพิ่มอุณหภูมิของปฏิกิริยาเป็นลำดับขั้น (gradual heating) สามารถแก้ปัญหาการสลายตัวด้วยความร้อนของเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันไม่อิ่มตัวได้ โดยจากการทดลองพบว่าภาวะดีที่สุดได้รับร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 96 ภาวะนี้เป็นการใช้อุณหภูมิเป็นลำดับขั้นที่เริ่มต้นจาก 100 องศาเซลเซียสไปจนถึง 320 องศาเซลเซียส

Imahara และคณะ (2008) ศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของเมทิลเอสเทอร์ที่เกิดจากกรดไขมันอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวในเมทานอลภาวะเหนือวิกฤต ใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ขนาด 5 มิลลิลิตร การทดลองเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 270-350 องศาเซลเซียสเวลา 5-60 นาทีและความดันมากกว่า 8.09 เมกะพาสคัล พบว่า เมทิลเอสเทอร์เสถียรที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียสและความดัน 17 เมกะพาสคัล ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสและความดัน 43 เมกะพาสคัล เมทิลเอสเทอร์บางส่วนเกิดการสลายตัวส่งผลให้ปริมาณของเมทิลเอสเทอร์ลดลงและเวลาที่เพิ่มขึ้นทำให้การสลายตัวมีการสลายตัวเพิ่มขึ้นเช่นกัน สำหรับเมทิลเอสเทอร์ที่เกิดจากกรดไขมันไม่อิ่มตัวอันได้แก่เมทิลโอลิเอต (methyl oleate) และเมทิลไลโนเลอเต (methyl linoleate) สลายตัว

เนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300 องศาเซลเซียส นอกจากนี้แล้วจำนวนพันธะคู่ที่เพิ่มขึ้นในกรดไขมันไม่อิ่มตัวทำให้การสลายตัวด้วยความร้อนเพิ่มขึ้นด้วย

Quesada-Medina และคณะ (2011) ศึกษาการสลายตัวทางความร้อน (thermal decomposition) ของเมทิลเอสเทอร์ในระหว่างการผลิตไบโอดีเซลในเมทานอลภาวะเหนือวิกฤตจากน้ำมันถั่วเหลืองโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบแบดซ์ขนาด 83 มิลลิลิตร การทดลองเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 250-350 องศาเซลเซียส ความดัน 12-43 เมกะพาสคัล เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา 15-90 นาทีและอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันถั่วเหลือง 43:1 จากการทดลองพบว่าการสลายตัวด้วยความร้อนของเมทิลเอสเทอร์ที่เกิดจากกรดไขมันไม่อิ่มตัวเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส(ความดัน 26 เมกะพาสคัล)และการสลายตัวรุนแรงมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นสำหรับเมทิลเอสเทอร์ที่เกิดจากกรดไขมันอิ่มตัวมีการสลายตัวด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส(ความดัน 43 เมกะพาสคัล)

Olivares-Carrillo และคณะ(2011) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลืองโดยใช้เมทานอลภาวะเหนือวิกฤตโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบแบดซ์ขนาด 83 มิลลิลิตร การทดลองใช้อุณหภูมิ 250-350 (12-43 เมกะพาสคัล) เวลาที่ใช้ในปฏิกิริยา 15-90 นาทีและอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันถั่วเหลือง 43:1 ภาวะดีที่สุดที่ทำให้การเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์เป็นเมทิลเอสเทอร์มากที่สุดอยู่ที่อุณหภูมิ 325 องศาเซลเซียส ความดัน 35 เมกะพาสคัลและเวลา 60 นาที ได้รับปริมาณเมทิลเอสเทอร์ 84 เปอร์เซ็นต์และมีมอนอกลิเซอไรด์และไดกลีเซอไรด์เหลืออยู่อย่างละ 8.1 เปอร์เซ็นต์ แม้ว่าอุณหภูมิและเวลาเพิ่มขึ้นและทำให้ปริมาณของกลีเซอไรด์ลดลงแต่ปริมาณของเมทิลเอสเทอร์ไม่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการสลายตัวทางความร้อนของเมทิลเอสเทอร์