

บทที่ 2

การทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความหมายของน้ำมันดีเซลชีวภาพ

น้ำมันดีเซลชีวภาพ (Biodiesel) คือ น้ำมันดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันพืช หรือไขมันสัตว์ ด้วยปฏิกิริยา Transesterification โดยปฏิกิริยา Transesterification คือ ปฏิกิริยาที่เกิดจากการนำน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์มาทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ ได้แก่ เมทานอล หรือ เอทานอล โดยมีกรดหรือด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และได้ผลิตภัณฑ์เป็นเอสเทอร์ซึ่งก็คือน้ำมันดีเซลชีวภาพที่เราต้องการ และมีกลีเซอรอลเป็นผลพลอยได้ โดยหากแอลกอฮอล์ที่ใช้เป็นเมทานอล ผลิตภัณฑ์เอสเทอร์นั้นจะเรียกว่า เมทิลเอสเทอร์ (methyl ester) โดยปฏิกิริยา Transesterification ที่นิยมใช้ คือการทำปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบส ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

น้ำมันดีเซลชีวภาพแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ด้วยกัน (กลุ่มสื่อส่งเสริมการเกษตร, 2547) ได้แก่

- 1.) ไบโอดีเซลแบบน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ คือ การนำน้ำมันจากพืช หรือน้ำมันจากไขมันสัตว์มาใช้เติมเครื่องยนต์เลย
- 2.) ไบโอดีเซลแบบลูกผสม คือ การนำน้ำมันจากพืช (หรือสัตว์) มาผสมกับน้ำมันดีเซลเพื่อให้ได้น้ำมันดีเซลชีวภาพที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลมากที่สุด
- 3.) ไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์ น้ำมันดีเซลชีวภาพชนิดนี้ได้มาจากระบวนการแปรรูปทางเคมี เป็นเอสเทอร์ซึ่งคุณสมบัติที่ได้จะเหมือนกับน้ำมันดีเซลมากที่สุด

ในงานวิจัยนี้เรามุ่งเน้นศึกษาน้ำมันดีเซลชีวภาพแบบเอสเทอร์

2.2 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ

ในประเทศไทยมีพืชน้ำมันที่มีศักยภาพในการผลิตนำไปใช้ผลิตไบโอดีเซลอยู่หลายชนิดด้วยกัน ได้แก่ ปาล์มน้ำมัน มะพร้าว ถั่วเหลือง ถั่วลิสง ละหุ่ง งา เมล็ดทานตะวัน และเมล็ดสบู่ดำ ซึ่งพืชแต่ละชนิดก็มีคุณสมบัติ และค่าความร้อนแตกต่างกันออกไปรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 2.1 โดยในที่นี้จะขอกล่าวถึงรายละเอียดของพืชที่สนใจในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ปาล์มน้ำมัน และสบู่ดำ

2.2.1 ปาล์มน้ำมัน (กลุ่มสื่อส่งเสริมการเกษตร, 2547)

ปาล์มน้ำมันมีชื่อทางพฤกษศาสตร์ว่า *Elaeis Guineensis Jacq.* ผลปาล์มประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่ให้น้ำมัน (Pericarp) และส่วนที่เป็นเมล็ด (kernel) ซึ่งจะให้น้ำมันที่เรียกว่า kernel oil น้ำมันปาล์มส่วนใหญ่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น มาการีน เนยเหลว ครีม สบู่ และใช้ในการปรุงอาหาร ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำมัน เช่น ใช้เป็นส่วนผสมของน้ำมันหล่อลื่น น้ำมันเครื่อง ยาขัดรองเท้า ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตกรดไขมันอิสระ และใช้ในอุตสาหกรรมผลิตดินสอสีและเทียน นอกจากนี้ น้ำมันปาล์มยังใช้ในการทำเครื่องสำอาง เพราะสามารถแทรกซึมเข้าไปในผิวหนังได้ดีกว่าน้ำมันชนิดอื่น

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติและค่าความร้อนของพืชที่สามารถใช้ผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ

ชนิด	ความถ่วงจำเพาะ (g/ml)	ความหนืด (cSt)	ค่าความร้อน(kJ/kg)
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
เมล็ดในสบู่ดำ	0.915	36.9	39,000
น้ำมันดีเซล	0.845	3.8	46,800

2.2.2 สบู่ดำ (วิเชียร เหลืองชมพู, 2548)

สบู่ดำ (Jatropha หรือ Physic nut) เป็นพืชน้ำมันชนิดหนึ่งที่มีแหล่งกำเนิดในอเมริกากลาง คาดว่าเข้ามาในประเทศไทย ในสมัยปลายกรุงศรีอยุธยา โดยชาวโปรตุเกสเพื่อนำมาบีบน้ำมันสำหรับทำสบู่ สบู่ดำมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Jatropha Curcas* Linn เป็นไม้ผลยืนต้นอยู่ในวงศ์ไม้ยางพารา ในการเพาะเมล็ด เมล็ดสบู่ดำไม่มีระยะพักตัว สามารถเพาะในถุงเพาะหรือกระบะทรายก็ได้ อายุประมาณ 2 เดือนจึงนำไปปลูก จะให้ผลผลิตได้ประมาณ 8 – 10 เดือนหลังปลูก ความสูง 2-7 เมตร เจริญเติบโตง่าย ทนต่อสภาพแห้งแล้งได้ สามารถปลูกได้ในทุกภาคของประเทศไทย ลำต้น ผล และเมล็ดของสบู่ดำมีกรดไซยาไนด์ (Hydrocyanic) ซึ่งมีความเป็นพิษและมีกลิ่นเหม็นเขียว แต่เมื่อถูกความร้อนก็จะสลายตัวไป จึงนิยมใช้ปลูกเป็นแนวรั้วเพื่อป้องกันสัตว์เลื้อยเข้าทำลายผลผลิต ลักษณะลำต้น และภาพเปรียบเทียบผลของสบู่ดำเป็นดังภาพที่ 2.1 นอกจากนี้ เมล็ดสบู่ดำมีสาร Curcin ซึ่งหากรับประทานเข้าไปทำให้เกิดอาการท้องเดินคล้ายสลด น้ำมันที่ได้จากเมล็ดสบู่ดำ สามารถใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลที่เกษตรกรใช้อยู่ได้ โดยไม่ต้องใช้น้ำมันชนิดอื่นผสมอีก สบู่ดำจึงเป็นพืชที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่งในสภาวะที่ราคาน้ำมันดีเซลมีราคาสูงอย่างในปัจจุบัน โดยเมล็ดสบู่ดำจำนวน 4 กิโลกรัม สกัดเป็นน้ำมันสบู่ดำได้ 1 กิโลกรัม (ประมาณ 1 ลิตร) เหลือเป็นกากสบู่ดำ 3 กิโลกรัม

ภาพที่ 2.1 ลักษณะลำต้น และภาพเปรียบเทียบผลของสบู่ดำ

(วิเชียร เหลืองชมพู, 2548)



การวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำมันสบูดำ (วิชัย กนกพิทยาพร และอุดมชัย จินะดิษฐ์, 2549)

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำมันสบูดำที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ทำการวิเคราะห์เมื่อมกราคม 2549 ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของน้ำมันสบูดำ น้ำมันดีเซล และมาตรฐานน้ำมันดีเซลหมุนช้า
(วิชัย กนกพิทยาพร และอุดมชัย จินะดิษฐ์, 2549)

ข้อกำหนด	น้ำมันดีเซล	น้ำมันสบูดำ	มาตรฐานน้ำมันดีเซลหมุนช้า *
1. ความหนาแน่นที่ 30 °C	0.845 g/cc	0.94 g/cc	-
2. ดัชนีซีเทน	53	41	> 45
3. ความหนืด (cst) ที่ 40 °C	3.5	35.46	< 8
4. จุดวาบไฟ (°C)	65	270	> 52
5. จุดติดไฟ (°C)	74	320	-
6. ค่าความร้อนเชื้อเพลิง (kj/kg)	45200	40080	-

หมายเหตุ * ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน เรื่องกำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล
(ฉบับที่ 2) พ. ศ. 2547

2.3 โครงสร้างของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพแบบเอสเทอร์

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพแบบเอสเทอร์ โดยมากเป็นน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ ซึ่งมีไตรกลีเซอไรด์ของกรดไขมันชนิดต่าง ๆ เป็นองค์ประกอบ โดยคุณสมบัติของน้ำมันแต่ละชนิดทั้งทางเคมีและกายภาพแตกต่างกันไป ตามคุณสมบัติของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบอยู่

2.3.1 กรดไขมัน (Fatty Acid)

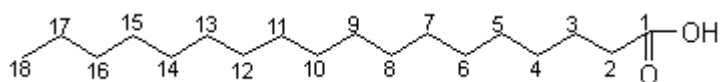
คือ โครงสร้างของกรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic acid) ซึ่งมีสายโซ่เป็นแบบโซ่ตรงหรือแตกกิ่ง (aliphatic hydrocarbon) โดยกรดไขมันที่เสถียรจะมีคาร์บอนเป็นเลขคู่ และมักจะประกอบด้วยคาร์บอนตั้งแต่ 12 ถึง 26 อะตอม แต่ที่พบมากทั้งในชนิดอิ่มตัว และไม่อิ่มตัว คือ คาร์บอน 16 และ 18 อะตอม โดยตัวอย่างโครงสร้างโมเลกุลของกรดไขมันเป็นดังภาพที่ 2.2 โดยทั่วไปแล้ว กรดไขมันสามารถสร้างพันธะกับโมเลกุลอื่น ๆ ได้ ตัวอย่างเช่น โมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ แต่เมื่อใดก็ตามที่โมเลกุลของกรดไขมันนั้น ๆ ไม่ได้ไปทำปฏิกิริยา หรือเชื่อมต่อกับโมเลกุลอื่น เมื่อนั้นมันจะถูกเรียกว่า กรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid)

2.3.2 ไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride)

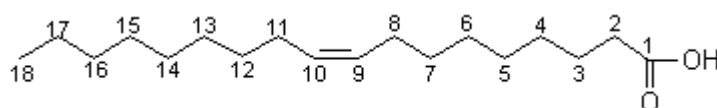
คือ หมู่กลีเซอไรด์ที่ทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันกับกรดไขมันจำนวน 3 สายด้วยกัน ไตรกลีเซอไรด์จัดเป็นองค์ประกอบหลักในน้ำมันพืช และไขมันสัตว์ มีโครงสร้างดังภาพที่ 2.3

ภาพที่ 2.2 ตัวอย่างโครงสร้างโมเลกุลของกรดไขมันชนิดต่าง ๆ ทั้งประเภทอิ่มตัว และไม่อิ่มตัวที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมในโมเลกุล 18 ตัว

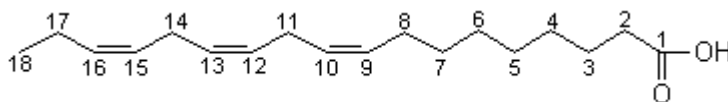
(www.public.iastate.edu)



Stearic acid C 18:0

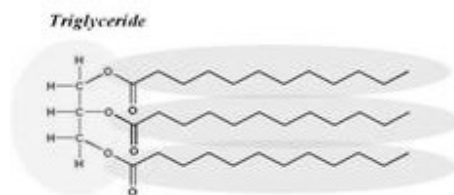


Oleic acid C 18:1



Linolenic acid C 18:3

ภาพที่ 2.3 โครงสร้างทั่วไปของไตรกลีเซอไรด์ [$\text{CH}_2\text{COOR}-\text{CHCOOR}'-\text{CH}_2-\text{COOR}''$]
(www.oliveoilsource.com/images/triglyceride.jpg)



โดยส่วนประกอบของ Triglyceride ในน้ำมันชนิดต่างๆ หลายชนิดได้สรุปไว้ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบของกรดไขมันหลักในน้ำมันชนิดต่าง ๆ
(www.dede.go.th)

น้ำมันชนิดดิบ	ค่าไอโอดีน	องค์ประกอบของกรดไขมันหลัก						
		C 12 : 0	C 14 : 0	C 16 : 0	C 18 : 0	C 18 : 1	C 18 : 2	C 18 : 3
		Lauric	Myristic	Palmitic	Stearic	Oleic	Linoleic	Linolenic
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
ปาล์มโอดีน	≥ 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
ปาล์มสเตียรีน	≤ 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 – 53.2	16.8 – 21.0	7.5 – 10.2	2.0 – 4.0	5.0 – 10.0	1.0 – 2.5	ND
ถั่วลิสง	56 – 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
เมล็ดสบู่ดำ	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

กรดไขมันที่เป็นส่วนประกอบของไตรกลีเซอไรด์ โดยทั่วไปมีทั้งประเภทที่อิ่มตัว และไม่อิ่มตัวมีรายละเอียดดังนี้

a.) ไตรกลีเซอไรด์ของกรดไขมันอิ่มตัว (Saturated Fatty acid) ประกอบไปด้วยโมเลกุลของกรดไขมันที่ภายในสายโซ่มีแต่พันธะเดี่ยวระหว่างคาร์บอนกับไฮโดรเจน มักจะมีลักษณะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง ได้แก่

<u>Caprylic</u>	(octanoic acid):	$\text{CH}_3 (\text{CH}_2)_6 \text{COOH}$	or <u>C8:0</u>
<u>Capric</u>	(decanoic acid):	$\text{CH}_3 (\text{CH}_2)_8 \text{COOH}$	or <u>C10:0</u>
<u>Lauric</u>	(dodecanoic acid):	$\text{CH}_3 (\text{CH}_2)_{10} \text{COOH}$	or <u>C12:0</u>
<u>Myristic</u>	(tetradecanoic acid):	$\text{CH}_3 (\text{CH}_2)_{12} \text{COOH}$	or <u>C14:0</u>
<u>Palmitic</u>	(hexadecanoic acid):	$\text{CH}_3 (\text{CH}_2)_{14} \text{COOH}$	or <u>C16:0</u>
<u>Stearic</u>	(octadecanoic acid):	$\text{CH}_3 (\text{CH}_2)_{16} \text{COOH}$	or <u>C18:0</u>

b.) ไตรกลีเซอไรด์ของกรดไขมันไม่อิ่มตัว (Unsaturated Fatty acid) ประกอบไปด้วยโมเลกุลของกรดไขมันภายในสายโซ่มีพันธะคู่ระหว่างคาร์บอนกับไฮโดรเจน มักมีลักษณะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง

- กรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยว (Monounsaturated Fatty acid) โมเลกุลของกรดไขมันที่ภายในสายโซ่ มีพันธะคู่ระหว่างคาร์บอนกับไฮโดรเจนอยู่ 1 ตำแหน่ง ตัวอย่างเช่น
Oleic acid (Cis-9-octadecanoic acid): $\text{CH}_3 (\text{CH}_2)_7 \text{CH}=\text{CH} (\text{CH}_2)_7 \text{COOH}$
 or cis- Δ^9 C18:1

- กรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อน (Polyunsaturated Fatty acid) โมเลกุลของกรดไขมันที่ภายในสายโซ่ มีพันธะคู่ระหว่างคาร์บอนกับไฮโดรเจนอยู่มากกว่า 1 ตำแหน่ง ตัวอย่างเช่น

Linoleic acid: $\text{CH}_3 (\text{CH}_2)_4 \text{CH}=\text{CHCH}_2 \text{CH}=\text{CH} (\text{CH}_2)_7 \text{COOH}$ or C18:2

Alpha-linolenic acid: $\text{CH}_3 \text{CH}_2 \text{CH}=\text{CHCH}_2 \text{CH}=\text{CHCH}_2 \text{CH}=\text{CH} (\text{CH}_2)_7 \text{COOH}$
 or C18:3

ไตรกลีเซอไรด์ของกรดไขมันที่พบมากบางชนิด มีคุณสมบัติเป็นดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของกรดไขมันซึ่งเป็นองค์ประกอบของไตรกลีเซอไรด์ที่พบมากบางชนิด (Duangkamol Yujaroen, 2006)

Fatty Acid	Myristic Acid	Palmitic Acid	Stearic Acid	Oleic Acid	linoleic Acid	linolenic Acid
	C 14 : 0	C 16 : 0	C 18 : 0	C 18 : 1	C 18 : 2	C 18 : 3
Scientific name	Tetradecanoic	Hexadecanoic	Octadecanoic	9-Octadecenoic	9,12Octadecadienoic	9,12,15Octadecatrienoic
Molecular formula	$C_{14}H_{28}O_2$	$C_{16}H_{32}O_2$	$C_{18}H_{36}O_2$	$C_{18}H_{34}O_2$	$C_{18}H_{32}O_2$	$C_{18}H_{30}O_2$
Molecular weight	228.36	256.50	284.50	282.47	278.44	280.46
Melting point (°C)	58.8	61 – 64	67-69	13	-11	-5
Boiling point(°C)	250.5	352.0	355.2	360.0	230.0	230.0
Density (g cm ⁻³)	0.8622	0.84	0.84	0.89	0.92	0.90

2.4 การผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพแบบเอสเทอร์

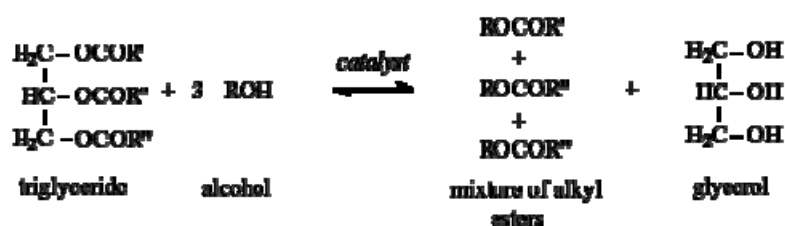
การผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพโดยใช้คะตะลิสต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีอยู่ 2 วิธีหลัก ๆ ด้วยกัน คือ การทำปฏิกิริยา Transesterification แบบขั้นตอนเดียว (Straight Transesterification) ซึ่งเหมาะสำหรับวัตถุดิบที่มีปริมาณ FFA ≤ 5.0 % (Van Gerpen, Clements, Knothe, Pruszko, and Shanks, 2004) และการทำปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน (Two-step reaction) การทำปฏิกิริยาดังวิธีนี้จะใช้กับวัตถุดิบที่มีปริมาณ FFA > 5.0 % ในงานวิจัยของเรา มีการควบคุมการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพโดยใช้ปฏิกิริยาแบบขั้นตอนเดียวเท่านั้น

โดยรายละเอียดของปฏิกิริยาที่กล่าวถึงข้างต้น เป็นดังต่อไปนี้

2.4.1 ปฏิกิริยา Transesterification แบบขั้นตอนเดียว

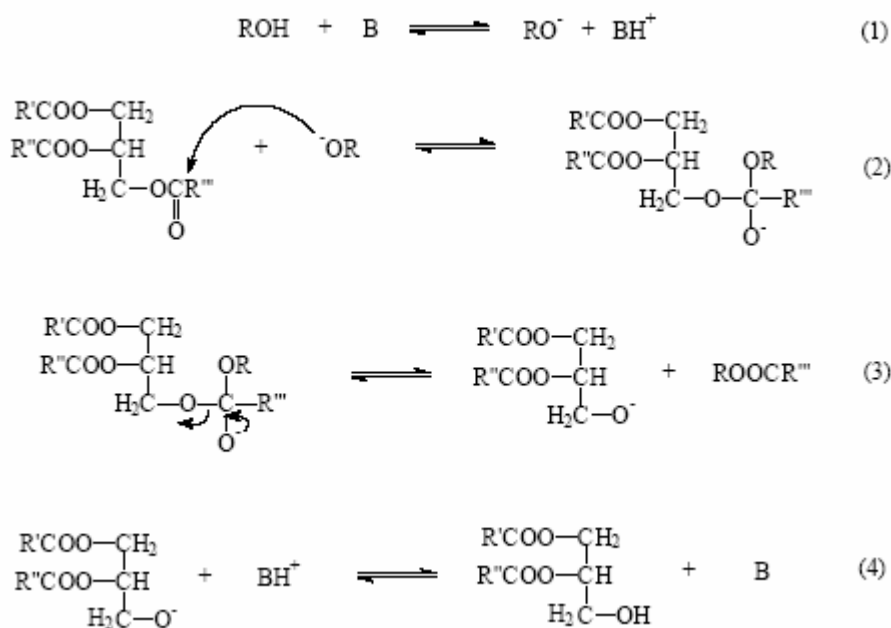
ปฏิกิริยา Transesterification คือ ปฏิกิริยาระหว่างหมู่แอลคอกซี (Alkoxy group) ของสารประกอบเอสเทอร์ กับหมู่แอลคอกซีของแอลกอฮอล์ (Alkoxy group = R - O) ดังภาพที่ 2.4 โดยในเชิงพาณิชย์แล้วคะตะลิสต์ที่นิยมใช้คือ คะตะลิสต์เบส

ภาพที่ 2.4 ปฏิกิริยา Transesterification



โดยคะตะลิสต์เบส (Base – catalyzed) ที่นิยมใช้ ได้แก่ สารประกอบจำพวก alkaline metal alkoxides & hydroxides & carbonates. เช่น NaOH, KOH เป็นต้น โดยกลไกการเกิดปฏิกิริยา transesterification โดยใช้คะตะลิสต์ที่เป็นเบสของน้ำมันพืชเป็นไปตามภาพที่ 2.5 (Schuchardt, Sercheli, and Vargas, 1998) ขั้นตอนแรก (สมการที่ 1) เป็นปฏิกิริยาระหว่างเบสกับแอลกอฮอล์ ได้เป็นสารประกอบ alkoxide และคะตะลิสต์ที่จ่ายโปรตอนไปแล้ว (protonated catalyst) ขั้นตอนที่สองเป็นการชนกันระหว่างโมเลกุลของ alkoxide กับไตรกลีเซอไรด์ที่มีหมู่คาร์บอนิลได้สารตัวกลางที่มีรูปทรงสี่หน้า (tetrahedral intermediate) ซึ่งสารตัวกลางนี้จะแตกตัวเป็น alkyl ester และ diglyceride anion ดังขั้นตอนที่สาม ในขั้นตอนสุดท้าย diglyceride anion จะรับโปรตอนมาจากคะตะลิสต์ ได้เป็นสารประกอบไตรกลีเซอไรด์ และคะตะลิสต์ที่พร้อมจะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่นของแอลกอฮอล์ เพื่อเริ่มวัฏจักรการเร่งปฏิกิริยาต่อไป ในส่วนกลไกการเกิดปฏิกิริยาของ diglyceride และ monoglyceride เป็น alkyl ester และกลีเซอรอลก็มีลักษณะเช่นเดียวกันนี้

ภาพที่ 2.5 กลไกการเกิดปฏิกิริยา Base – catalyzed Transesterification
(Schuchardt *et al.*, 1998)



ตัวอย่างของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่

ดาร์โนโกะ และคณะ (Darnoko *et al.*, 2000) ศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อกลไกการดำเนินปฏิกิริยา transesterification ของน้ำมันปาล์มทำปฏิกิริยากับเมทานอล โดยใช้คะตะลิสต์โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ทำปฏิกิริยาใน reactor แบบ Batch ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาถึง 60 องศาเซลเซียส พบว่า ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้น และมีอันดับการเกิดปฏิกิริยาเป็นอันดับสอง ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที และปริมาณคะตะลิสต์โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมเท่ากับ 1 %

เฟอริซาโด และคณะ (Felizardo *et al.*, 2006) ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้คะตะลิสต์เป็นเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ ใช้เมทานอลทำปฏิกิริยากับน้ำมันพืชใช้แล้ว (ที่ได้มาจากเมล็ดทานตะวัน) ที่เวลา 1 ชั่วโมง จนกระทั่งได้สภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันอยู่ระหว่าง 3.6 ถึง 5.4 และใช้อัตราส่วนระหว่างคะตะลิสต์ต่อน้ำมันอยู่ระหว่าง 0.2 ถึง 1.0 โดยน้ำหนัก

2.4.2 ปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอน

สำหรับน้ำมันวัตถุดิบที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ ($\text{FFA} \geq 5\%$) (Van Gerpen *et al.*, 2004) จะต้องทำปฏิกิริยา 2 ขั้นตอน คือทำปฏิกิริยา Esterification เพื่อทำการเปลี่ยน Fatty acid ให้เป็น Fatty acid alkyl ester ก่อน จึงค่อยนำไปทำปฏิกิริยา Transesterification ในขั้นตอนต่อไปได้ เพราะ FFA เหล่านี้จะไปขัดขวางการเกิดปฏิกิริยา Transesterification ของน้ำมันดีเซลชีวภาพ ทำให้เกิดกระบวนการ Saponification หรือกระบวนการเกิดสบู่ขึ้นแทน

ปฏิกิริยา Esterification คือ ปฏิกิริยาระหว่างกรดไขมัน หรือกรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic acid) กับแอลกอฮอล์ โดยการให้ความร้อนและใช้คะตะลิสต์ที่เป็นกรด โดยกรดที่นิยมใช้ก็คือ กรดซัลฟิวริก

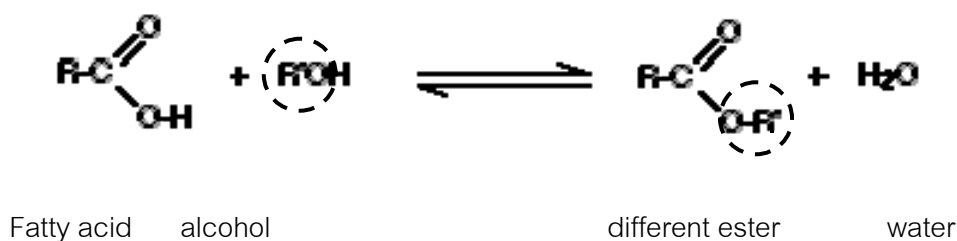
ดังที่ได้กล่าวแล้วข้างต้น ปฏิกิริยา Esterification สำหรับกรดไขมันนั้น ไม่สามารถใช้คะตะลิสต์ที่เป็นเบสในการทำปฏิกิริยาได้ เนื่องจากจะทำให้เกิด side reaction ซึ่งก็คือ Saponification ได้เป็นสบู่แทนที่เอสเทอร์ที่เราต้องการ นอกจากนั้น ปฏิกิริยา Esterification ยังได้

น้ำเป็น by product ด้วย ทำให้ต้องมีการระมัดระวังเพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำที่เกิดขึ้นนี้อาจไปทำปฏิกิริยากับเอสเทอร์ได้เป็น Fatty acid เพิ่มกลับมาอีก

กลไกของปฏิกิริยา Esterification สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.6

ภาพที่ 2.6 ปฏิกิริยา Esterification (โดยที่ R และ R' อาจเป็นหมู่ฟังก์ชันที่เหมือนหรือต่างกันได้)

(<http://www.chemguide.co.uk/organicprops/alcohols/esterification.html>)



การผลิตไบโอดีเซล ไม่ว่าจะด้วยวิธีใด จะต้องได้คุณภาพของไบโอดีเซลตามมาตรฐาน ซึ่งแต่ละประเทศจะกำหนดมาตรฐานไว้คล้ายคลึงกัน เพียงแต่บางมาตรฐานจะมีความเข้มงวดกว่า โดยรายละเอียดของเกณฑ์ชี้วัดคุณภาพไบโอดีเซล และเกณฑ์มาตรฐานต่าง ๆ รวมถึงเกณฑ์ของกรมธุรกิจพลังงาน ได้แนบไว้ในภาคผนวก ค

2.5 การเสื่อมสภาพของน้ำมันวัตถุดิบ

เนื่องจากน้ำมันพืชซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลนั้นเป็นสารที่ไม่อยู่ตัว เมื่อสัมผัสกับอากาศจะถูกออกซิไดส์ได้ง่าย และสามารถเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรส์ได้ที่อุณหภูมิสูง เมื่อเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรส์แล้ว น้ำมันจะมีสภาพเป็นสารเหนียว ดัชนีที่บ่งชี้ถึงความยากง่ายในการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรส์ของน้ำมันพืชคือปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัว ซึ่งสามารถวัดได้จากค่า

ไอโอดีน (Iodine Number) โดยเมื่อน้ำมันมีค่าไอโอดีนสูง จะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรส์ได้ง่าย ฉะนั้น การเลือกใช้น้ำมันพืชที่มีค่าไอโอดีนต่ำเป็นเชื้อเพลิง จะเป็นการป้องกันการเกิดสารเหนียวที่เกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรส์ได้ในเบื้องต้น (กลุ่มสื่อส่งเสริมการเกษตร, 2547)

ในแง่ปริมาณกรดไขมันอิสระนั้น น้ำมันพืชที่เหมาะสมแก่การนำมาใช้ผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพควรมีปริมาณกรดไขมันอิสระในปริมาณน้อย โดยเฉพาะกรดไขมันไม่อิ่มตัวเพราะกรดไขมันไม่อิ่มตัวไม่เสถียร มีพันธะคู่หรือพันธะสาม สามารถทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนหรือออกซิเจนได้อีก (กลุ่มสื่อส่งเสริมการเกษตร, 2547) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาในกลุ่มวิจัยของเรา พบว่า น้ำมันพืชใช้แล้วที่เก่ามาก ๆ ไม่สามารถผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพได้แม้ค่า FFA จะไม่สูงมาก จึงเป็นจุดเริ่มต้นให้เกิดความสนใจถึงปัจจัยด้านการเสื่อมสภาพของน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วและน้ำมันสุญ์ดำ

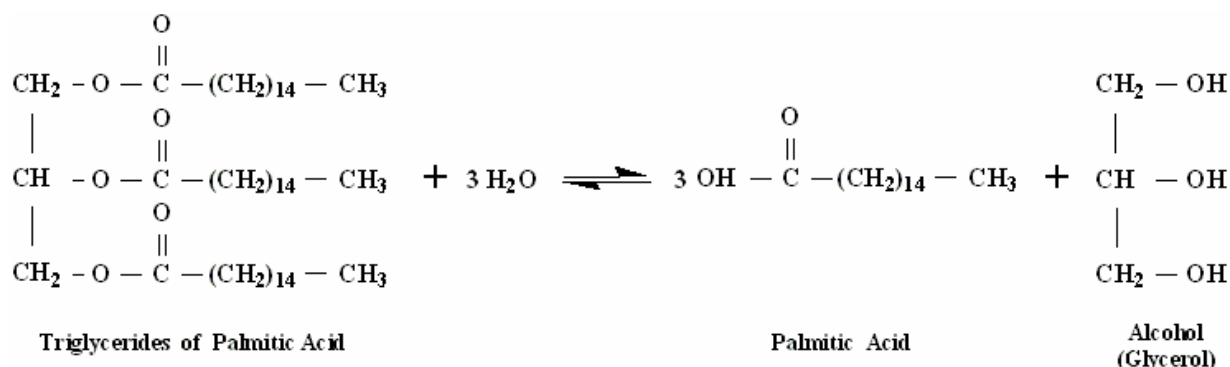
2.5.1 การเสื่อมสภาพของน้ำมันวัตถุดิบ

พฤติกรรมของการเสื่อมสภาพ (Degradation) ของน้ำมันวัตถุดิบและเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้อาจมีสาเหตุมาจากหลายประการด้วยกัน ไม่ว่าจะเป็นอากาศ ความชื้น หรือแม้แต่แสงแดด ซึ่งสามารถอธิบายได้จากปฏิกิริยาต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

A. Formation of Free Fatty Acid (Hydrolysis of Alkyl Ester)

ปฏิกิริยา Hydrolysis คือปฏิกิริยาการแยกสายโซ่ของกรดไขมันออกจาก glycerol backbone ในโมเลกุลของกลีเซอไรด์ ได้เป็นกรดไขมันอิสระ ซึ่งจะ去做ปฏิกิริยา Auto – Oxidation ต่อไป น้ำมันพืชและไขมันสัตว์โดยทั่วไปจะมีปริมาณของ Free Fatty Acid (FFA) หรือ กรด carboxylic ($R-COOH$) อยู่ในปริมาณน้อย แต่สำหรับน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ที่ใช้แล้วจะมีปริมาณของ FFA อยู่เป็นปริมาณมาก ซึ่ง FFA เหล่านี้เกิดขึ้นจากการที่น้ำมันโดนความร้อนในสภาวะที่มีน้ำ (เกิดการให้ไฮโดรเจนแก่น้ำมันขึ้น) ทำให้เกิด FFA ได้ ตัวอย่างการเกิดปฏิกิริยา Hydrolysis เป็นดังภาพที่ 2.7

ภาพที่ 2.7 ปฏิกิริยา Hydrolysis ของไตรกลีเซอไรด์ของ Palmitic Acid



B. Oxidation (www.oliveoilsource.com/olive_oil_storage.htm)

ปฏิกิริยา Oxidation เกิดจากการทำปฏิกิริยาของกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวในน้ำมันกับออกซิเจน แล้วแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระในรูปต่าง ๆ กลไกการเกิดปฏิกิริยา Oxidation มีหลายรูปแบบด้วยกัน ได้แก่

1. Auto-oxidation คือ ปฏิกิริยา Oxidation ที่เกิดในสภาวะบรรยากาศทั่วไป โดยกรดไขมันทำปฏิกิริยากับออกซิเจนหรืออนุมูลอิสระอื่น ๆ ได้เป็นสารประกอบพวกเปอร์ออกไซด์ และไฮโดรเปอร์ออกไซด์
2. Photo-oxidation คือ เกิดโดยพันธะคู่ในกรดไขมันไม่อิ่มตัวทำปฏิกิริยากับอะตอมของออกซิเจนที่ได้มาจากการปล่อยแสงผ่าน ปฏิกิริยานี้เกิดได้เร็วกว่า Auto-oxidation ถึง 30,000 เท่า (Frenkel *et al.*, 1979)
3. Enzymatic-peroxidation ปฏิกิริยานี้สามารถเกิดได้ด้วยเอนไซม์ชนิด lipoxygenase และ cyclooxygenase ซึ่งพบได้ในพืชทั่วไปในธรรมชาติ เข้าไปเร่งปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนกับกรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อนทั้งหลาย

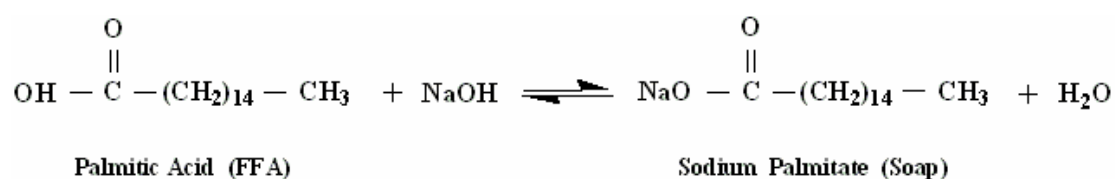
ปฏิกิริยาการสลายตัวของน้ำมันหรือกรดไขมัน ด้วยการ Hydrolysis หรือ oxidation นั้นเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Rancidification กระบวนการดังกล่าวนี้เมื่อเกิดขึ้นแล้ว จะทำให้เกิดการเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็วในน้ำมัน การป้องกันอาจทำได้โดยการเก็บน้ำมันเหล่านี้ไว้ในที่ที่ไม่สัมผัสกับออกซิเจนหรืออนุมูลอิสระอื่น ๆ อุณหภูมิในการเก็บรักษาต่ำ ๆ และไม่มีแสงส่องผ่าน เนื่องจาก

ทั้งแสงและความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ีระหว่างน้ำมันกับออกซิเจน (<http://en.wikipedia.org/wiki/Rancidification>)

C. Saponification

จากปฏิกิริยา Hydrolysis ที่กล่าวถึงไว้ข้างต้น จะเห็นว่ามีกรดไขมันอิสระ (FFA) เกิดขึ้น โดย FFA เหล่านี้จะเข้าไปขัดขวางกระบวนการเกิดปฏิกิริยา Transesterification ของน้ำมันดีเซลชีวภาพ ก่อให้เกิดกระบวนการ Saponification หรือกระบวนการเกิดสบู่ขึ้นแทน ดังตัวอย่างการเกิดสบู่ของ Palmitic acid ในภาพที่ 2.8

ภาพที่ 2.8 ปฏิกิริยา Saponification ของ Palmitic Acid



2.5.2 กลไกการเกิดการเสื่อมสภาพ (Degradation) ในน้ำมันด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน

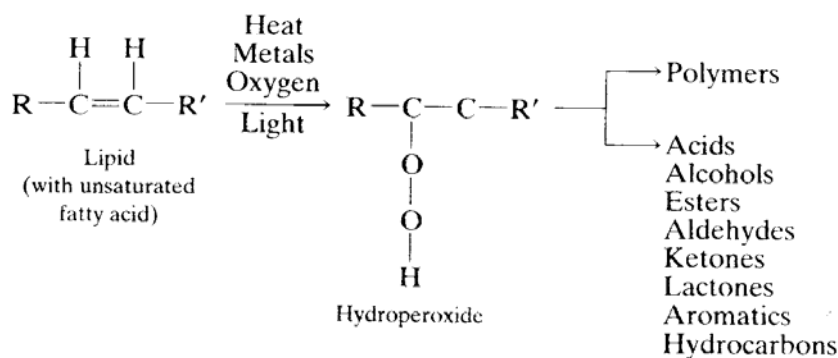
(Bailey, 1951)

ขั้นตอนแรกในการเสื่อมสภาพของน้ำมันหรือเมทิลเอสเทอร์ในสภาวะที่มีออกซิเจน คือ การเกิดปฏิกิริยาการเติมออกซิเจน (ปฏิกิริยาออกซิเดชัน) เข้าไปที่ตำแหน่งพันธะคู่ของสายโซ่กรดไขมัน ได้เป็นสารประกอบที่ไม่อยู่ตัว เช่นสารประกอบเปอร์ออกไซด์ (ดังภาพที่ 2.9) และสามารถวัดปริมาณสารประกอบเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นได้ อาจเรียกว่าการหาค่า Peroxide Value เมื่อพิจารณาควบคู่ไปกับภาพที่ 2.10 ในช่วงแรกที่เริ่มเกิดสารเปอร์ออกไซด์ขึ้นนี้ เราเรียกว่าเป็นขั้นเหนี่ยวนำ (induction phase) ซึ่งปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดด้วยอัตราที่ค่อนข้างช้า และไม่มี ความ

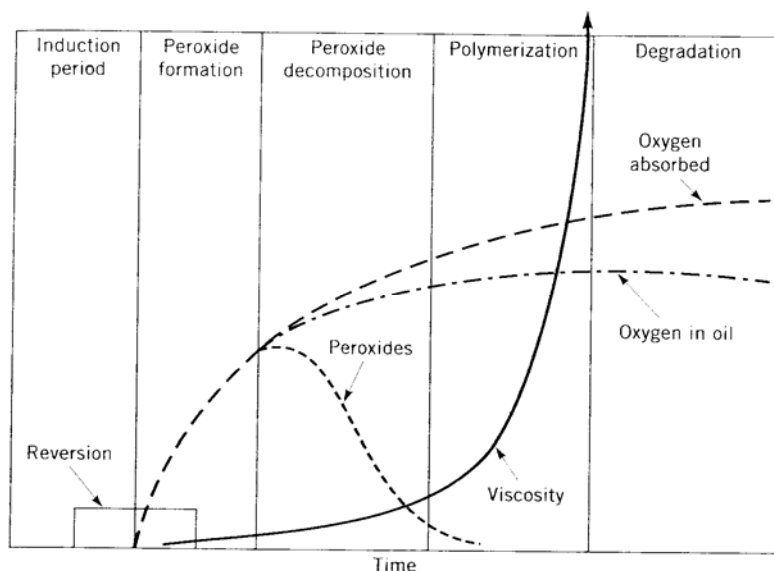
สม่ำเสมอ ช่วงต่อมาคือช่วง peroxide formation ในช่วงนี้จะมีการดูดซับออกซิเจนเข้าไปทำปฏิกิริยาเกิดเป็นสารประกอบจำพวกเปอร์ออกไซด์ด้วยอัตราที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงจุดสูงสุด หลังจากจุดนี้ปฏิกิริยาจะเข้าสู่เฟสต่อไป ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดการสลายตัวของสารประกอบจำพวกเปอร์ออกไซด์ กลายเป็นสารประกอบจำพวกโพลิเมอร์ (Polymerization) หรือสารประกอบที่ระเหยได้ และไม่ได้ ก่อให้เกิดสี และกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ ทั้งนี้จะเกิดเป็นหมู่ฟังก์ชันใดขึ้นอยู่กับตำแหน่งพันธะคู่เดิมของกรดไขมันไม่อิ่มตัวนั้น ๆ (Knothe, 2007) ซึ่งหลังจากนี้ปฏิกิริยาจะเข้าสู่ขั้นตอนสุดท้ายของการเกิดออกซิเดชัน คือเกิดการเสื่อมสภาพ (Degradation) หากการเสื่อมสภาพอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมเป็นสารประกอบพอลิเมอร์ จะสังเกตได้จากค่าความหนืดของน้ำมันที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้ระยะเวลาของปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของน้ำมัน การเติมหรือไม่เติม antioxidants และสภาวะในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยานี้จะขึ้นอยู่กับปริมาณออกซิเจนที่ถูกดูดซับว่ามีมากน้อยเพียงใด

ภาพที่ 2.9 Oxidation of Fats and Oils

(Bailey, 1951)



ภาพที่ 2.10 ขั้นตอนการเสื่อมสภาพของน้ำมันผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน และ
ปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน
(Perkins, 1967)



2.6 งานวิจัยเกี่ยวกับการเสื่อมสภาพของน้ำมันดีเซลชีวภาพ

ในแง่ของสภาวะที่ใช้ในการเก็บรักษาน้ำมันดีเซลชีวภาพ ได้มีการกล่าวถึงในงานวิจัยที่ผ่านมา เกี่ยวกับการเสื่อมสภาพของน้ำมันดีเซลชีวภาพดังต่อไปนี้

ดู เฟลซีส และคณะ (Du Plessis *et al.*, 1985) ทำการศึกษาถึงเสถียรภาพของเมทิลเอสเทอร์ และเอทิลเอสเทอร์ที่ผลิตจากน้ำมันของเมล็ดดอกทานตะวัน ในสภาวะการเก็บรักษาที่แตกต่างกัน เช่น อุณหภูมิสูงกว่า 30 องศาเซลเซียส หรือ ให้สัมผัสกับน้ำและอากาศ เป็นต้น จากนั้นจึงทำการ ตรวจวัดคุณสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ Peroxide Value, Ultraviolet Absorption, Free Fatty Acid, และ Viscosity ผลการศึกษาพบว่า คุณสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในสภาวะการเก็บรักษาที่ สัมผัสกับอากาศ และที่อุณหภูมิสูงกว่า 30 องศาเซลเซียส นอกจากนั้น ผลการศึกษายังพบอีกว่า สภาวะการเก็บรักษาที่อุณหภูมิใด ๆ ก็ตามที่ไม่ต้องสัมผัสกับอากาศ จะมีผลให้ปฏิกิริยาออกซิเดชัน ของเอสเทอร์เกิดได้ช้าลงด้วย

ทอมสัน และคณะ (Thompson *et al.*, 1998) ทำการศึกษาการเสื่อมสภาพของทั้งเมทิลเอสเทอร์ และเอทิลเอสเทอร์ที่ผลิตจากน้ำมันเมล็ดเรป แล้วทำการแยกการเก็บรักษาในภาชนะชนิดต่างกัน และสภาวะอุณหภูมิต่าง ๆ (ภายในห้องปกติ เปรียบเทียบกับบรรยากาศภายนอก) เป็นเวลา 2 ปี แล้วจึงทำการตรวจวัดคุณสมบัติต่าง ๆ (Peroxide Value, Acid Value, Density, Viscosity, และ Heat of Combustion) พบว่า โดยเฉลี่ยแล้ว คุณสมบัติต่าง ๆ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเก็บนานขึ้น ยกเว้นแต่เพียงค่า Heat of Combustion และเมื่อทำการทดสอบการใช้งานก็พบว่า กำลังของเครื่องยนต์มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 2% สำหรับเอสเทอร์ทั้งสองชนิด ในขณะที่เมื่อตรวจวัดปริมาณเขม่าควัน ก็พบว่า มีแนวโน้มลดลง 3.2% และเพิ่มขึ้น 17.5% สำหรับ Rapeseed Methyl Ester และ Rapeseed Ethyl Ester ตามลำดับ

มอนเยม และคณะ (Monyem *et al.*, 2001) ทำการศึกษาถึงผลของปฏิกิริยา Oxidation ของไบโอดีเซลที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์ และการปลดปล่อยก๊าซมลพิษ โดยศึกษาเปรียบเทียบกันระหว่างไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันถั่วเหลือง แบ่งเป็นความเข้มข้น 100 % และ ความเข้มข้น 20 % ผสมกับดีเซล 80 % และ base fuel (No. 2 diesel) ซึ่งคือ น้ำมันดีเซล 100 % ผลการศึกษาพบว่า ไบโอดีเซลความเข้มข้น 100 % และ 20 % ให้ประสิทธิภาพในทางความร้อนที่ เทียบเท่ากับน้ำมันดีเซล แต่มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่สูงกว่า และเมื่อทำการเปรียบเทียบกัน ระหว่างไบโอดีเซลที่ถูกออกซิไดซ์ และไม่ถูกออกซิไดซ์ พบว่า ไบโอดีเซลความเข้มข้น 100% ที่ถูก ออกซิไดซ์จะทำให้การปลดปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรคาร์บอนลดปริมาณลง 15 % และ 16 % ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจนและปริมาณควันที่เกิดขึ้นก็พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันระหว่างไบโอดีเซลที่ถูกออกซิไดซ์ และไม่ถูกออกซิไดซ์

ดันน์ และคณะ (Dunn *et al.*, 2005) ทำการศึกษาถึงเสถียรภาพของไบโอดีเซลที่ผลิตจาก น้ำมันถั่วเหลืองด้วยการวัดค่าดัชนี oil stability index (OSI) หรือ oxidative stability index โดยการวัดค่า induction period ผลการศึกษาพบว่า ดัชนี OSI สามารถใช้วัดค่าเสถียรภาพเมื่อถูก ออกซิไดซ์ของไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันถั่วเหลืองได้ ทั้งยังพบว่า ดัชนี OSI มีความสามารถ มากกว่า Iodine Value ในการตรวจวัดผลของการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ของ Soybean Methyl Ester ในช่วงเริ่มต้นของการทดสอบ

เหลียง และคณะ (Leung *et al.*, 2006) ทำการศึกษาเกี่ยวกับคุณภาพของน้ำมันดีเซลชีวภาพ ที่ผลิตจากน้ำมันเมล็ดเรป และทำการเก็บรักษาภายใต้อุณหภูมิและสภาวะที่แตกต่างกัน

ตัวอย่างเช่น ที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ในภาชนะที่ปิดมิดชิดหรือสภาพที่สัมผัสกับอากาศ หรือในสภาพที่มีและไม่มีควมชื้น โดยระบุคุณภาพของน้ำมันดีเซลชีวภาพด้วยปริมาณกรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid) และจากการหาความบริสุทธิ์ของน้ำมัน (test of purity) ตามมาตรฐานของ ASTM 6751 และ DIN EN 14214 พบว่า ถ้าอุณหภูมิของการเก็บรักษายิ่งสูง ประกอบกับสภาพที่สัมผัสกับอากาศจะยิ่งทำให้อัตราการเสื่อมสภาพของน้ำมันเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามก็ดี อุณหภูมิหรือการสัมผัสกับอากาศอย่างใดอย่างหนึ่งเพียงอย่างเดียวส่งผลน้อยมากต่อการเสื่อมสภาพของน้ำมัน ซึ่งปัจจัยอื่นๆ รวมไปถึงปริมาณน้ำภายในน้ำมันดีเซลชีวภาพ เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ช่วยเร่งอัตราการเสื่อมสภาพของน้ำมันอันเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยา Hydrolysis แต่ว่าผลที่เกิดขึ้นจากกรณีนี้ก็น้อยมากเมื่อเทียบกับผลที่มาจากปัจจัยข้างต้นทั้งสองประการ

บูเอด และคณะ (Bouaid *et al.*, 2007) ทำการศึกษาถึงเสถียรภาพของไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันพืชชนิดต่าง ๆ และน้ำมันพืชใช้แล้ว ซึ่งผ่านการเก็บรักษาเป็นระยะเวลานานกว่า 30 เดือน ที่สภาวะในการเก็บแตกต่างกันออกไป เช่น ในที่มืด และที่มีแสงส่องสว่าง ในภาชนะที่อากาศสามารถผ่านได้ และผ่านไม่ได้ โดยอาศัยตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ ค่าความเป็นกรด (acid value: AV) ค่าเปอร์ออกไซด์ (peroxide value: PV) ค่าความหนืด (viscosity: V) ค่าไอโอดีน (iodine value: IV) และสารปนเปื้อนที่ไม่ละลายในไบโอดีเซล (insoluble impurities: II) สำหรับการบ่งชี้ถึงคุณภาพของไบโอดีเซล ผลการทดลองพบว่า ค่าความเป็นกรด ค่าเปอร์ออกไซด์ ค่าความหนืด และปริมาณสารปนเปื้อนที่ไม่ละลายในไบโอดีเซลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาการเก็บรักษาผ่านไป ในทางตรงกันข้าม ค่าไอโอดีนกลับมีแนวโน้มลดลง อย่างไรก็ตามก็ดี ในช่วงระยะเวลา 0 ถึง 12 เดือน ก็ไม่พบการเปลี่ยนแปลงมากนัก ระหว่างตัวอย่างที่ทำการเก็บที่มีแสงส่องผ่านกับไม่มีแสงส่องผ่าน แต่หลังจากนั้น การเปลี่ยนแปลงก็สังเกตได้ชัดเจนขึ้น

จากงานวิจัยเรื่องการเสื่อมสภาพในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการผลิตไบโอดีเซลนั้น ในอดีตพบว่าเป็นการเน้นศึกษาถึงการเสื่อมสภาพของตัวน้ำมันไบโอดีเซล และผลต่อการทำงานของเครื่องยนต์เป็นหลัก ดังนั้น ในงานวิจัยนี้เราจะเน้นศึกษาถึงการเสื่อมสภาพของน้ำมันวัตถุดิบและผลต่อการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล จากการรวบรวมวารสารปริทัศน์ทั้งในเรื่องการเสื่อมสภาพของน้ำมันพืชและในเรื่องการเสื่อมสภาพของน้ำมันไบโอดีเซลดังที่กล่าวมาแล้ว เราจึงนำมาประมวลผลเป็นรูปแบบการทดลองเพื่อวิจัยถึงลักษณะเฉพาะของการเสื่อมสภาพของน้ำมันวัตถุดิบ และผลต่อประสิทธิภาพในการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพในงานวิจัยนี้ในบทต่อไป