



วิทยานิพนธ์

การปรับปรุงความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสม
ระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสับปะรดและจากน้ำมันมะพร้าว

**OXIDATION STABILITY IMPROVEMENT OF
JATROPHA-COCONUT BIODIESEL BLENDS**

นางสาวชวีดา ปัญญาสุรยุทธ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2551



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)
ปริญญา

วิศวกรรมเคมี

สาขา

วิศวกรรมเคมี

ภาควิชา

เรื่อง การปรับปรุงความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่าง
ไบโอดีเซลจากน้ำมันสับุด้าและจากน้ำมันมะพร้าว

Oxidation Stability Improvement of Jatropha-coconut Biodiesel blends

นามผู้วิจัย นางสาวชวีดา ปัญญาสุรยุทธ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์เพ็ญจิตร ศรีนพคุณ, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์จรูญ จักรมานพ, วศ.ค.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ไพศาล คงคาอุบลาย, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์วินัย อาจคงหาญ, M.A.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 21 เดือน เมษายน พ.ศ. 2551

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การปรับปรุงความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสม
ระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสับุดำและจากน้ำมันมะพร้าว

Oxidation Stability Improvement of Jatropha-coconut Biodiesel blends

โดย

นางสาวชวิตา ปัญญาสุรยุทธ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

พ.ศ. 2551

ชวิตา ปัญญาสุรยุทธ 2551: การปรับปรุงความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าว ปริณญานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี) สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์เพ็ญจิตร ศรีนพคุณ, Ph.D. 141 หน้า

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการปรับปรุงความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ โดยการผสมไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำด้วยไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละ 100:0, 80:20, 60:40, 50:50, 40:60, 20:80 และ 0:100 ซึ่งพบว่า ที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 50:50 ช่วยเพิ่มค่าความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำจาก 3.7 ชั่วโมง เป็น 7.3 ชั่วโมง และส่งผลให้จุดหมอกควันและจุดไหลเทเพิ่มขึ้นจาก 3 องศาเซลเซียส เป็น 9 องศาเซลเซียส และจาก -8 องศาเซลเซียส เป็น 0 องศาเซลเซียส ตามลำดับ นอกจากนี้ยังศึกษาการปรับปรุงความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ โดยการเติมสารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) ลงไป 3 ชนิด คือ BHA (Butylated hydroxyanisole), BHT (Butylated hydroxytoluene) และ Kerobit[®] TP 26 ตามลำดับ โดยพบว่า BHA นั้นเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่ใช้ปริมาณน้อยสุด คือ 200 พีพีเอ็ม ที่ทำให้ไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำมีค่าความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันเป็นไปตามมาตรฐาน EN 14112 และยังพบว่าผลของการเติมสาร BHA ลงในไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวในปริมาณ 150 พีพีเอ็ม และ 50 พีพีเอ็ม ช่วยให้ไบโอดีเซลผสมที่อัตราส่วนร้อยละ 80:20 และ 60:40 มีค่าความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันเป็นไปตามมาตรฐาน EN 14112 และมีจุดหมอกควันเท่ากับ 5 และ 8 องศาเซลเซียส และมีจุดไหลเทเท่ากับ -5 และ -2 องศาเซลเซียส ตามลำดับ หลังจากจัดเก็บไบโอดีเซลเป็นระยะเวลา 10 สัปดาห์ พบว่า ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลลดลงตามระยะเวลาการจัดเก็บ โดยไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร BHA ปริมาณความเข้มข้น 200 พีพีเอ็ม และไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละ 60:40 ที่เติมสาร BHA ปริมาณความเข้มข้น 50 พีพีเอ็ม มีความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันลดลง 21.46 เปอร์เซ็นต์ และ 9.27 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และการผสมไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำด้วยไบโอดีเซลจากมะพร้าว รวมทั้งการเติมสารต้านอนุมูลอิสระลงในไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำไม่ส่งผลต่อลักษณะสมบัติอื่น ๆ นอกจากทำให้จุดหมอกควันและจุดไหลเทเพิ่มขึ้น และปรับปรุงความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลตามมาตรฐานยุโรป EN 14112

ชวิตา ปัญญาสุรยุทธ

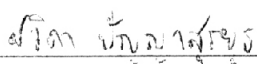
ลายมือชื่อนิพนธ์

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

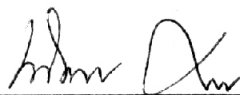
8 มี.ค. 151

Chawida Panyasurayut 2008: Oxidation Stability Improvement of Jatropha-coconut Biodiesel blends. Master of Engineering (Chemical Engineering), Major Field: Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Penjit Srinophakun, Ph.D. 141 pages.

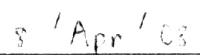
This research studied the oxidation stability improvement of Jatropha biodiesel by mixing with coconut biodiesel at different weight ratios of Jatropha biodiesel and coconut biodiesel of 100:0, 80:20, 60:40, 50:50, 40:60, 20:80 and 0:100. The results showed that the biodiesel from the 50:50 of Jatropha biodiesel and coconut biodiesel prolonged the oxidation stability from 3.7 to 7.3 h and the cloud and pour points of the mixed biodiesel are increased from 3 to 9 °C and -8 to 0 °C respectively. Nevertheless, three types of antioxidants namely BHA (Butylated hydroxyanisole), BHT (Butylated hydroxytoluene) and Kerobit[®] TP 26 were mixed to the Jatropha biodiesel at different concentration and the oxidation stability of the samples were tested according to EN 14112 standard. It was found that the minimum BHA antioxidant applied to 100% Jatropha biodiesel was 200 ppm. In addition the 150 and 50 ppm of BHA were the minimum concentration for mixed biodiesel of Jatropha and coconut at the ratios of 80:20 and 60:40 resulting the cloud points of 5 and 8 °C and the pour points of -5 and -2 °C respectively. To investigate long term stability of biodiesel, the samples were kept in the dark at room temperature for a period of 10 weeks. Increasing storage time showed the decreasing of oxidation stability of biodiesel samples. After the storage for 10 weeks, the oxidation stability of Jatropha biodiesel with 200 ppm of BHA, and biodiesel from Jatropha and coconut biodiesel blending at the ratios of 60:40 with 50 ppm of BHA decreased by 21.46% and 9.27% respectively. Furthermore, mixing Jatropha biodiesel with coconut biodiesel and adding antioxidant to Jatropha biodiesel has not affect on other properties of biodiesel according to EN 14214 standard.



Student's signature



Thesis Advisor's signature



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือ และความกรุณาจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญจิตร ศรีนพคุณ ประธานกรรมการที่ปรึกษา และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จรัญ ฉัตรมานพ กรรมการร่วม ที่กรุณาให้ความดูแลเอาใจใส่และให้คำปรึกษา และแนะแนวทางต่าง ๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความถูกต้องสมบูรณ์ ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ชำรงรัตน์ มุ่งเจริญ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สีนสุภา จุ้ยจุลเจิม ที่ได้กรุณาสละเวลาในการตรวจแก้ไข และให้คำแนะนำเพิ่มเติมในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ บริษัท เมทโรทรม์ สยาม จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือทดสอบความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน (Rancimat model 743) และขอขอบคุณ บริษัท บีเอเอสเอฟ (ไทย) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สารต้านอนุมูลอิสระ คือ Kerobit® TP 26 ในการทดสอบหาชนิดของสารต้านอนุมูลอิสระที่มีความเหมาะสมต่อไปโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ

ขอขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ วิศวกรรมเคมี และบุคคลรอบข้างทุกคนที่เป็นกำลังใจ ให้ความช่วยเหลือ และมิตรภาพที่ดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัวที่คอยห่วงใย เป็นกำลังใจ ให้การสนับสนุนในทุก ๆ ด้าน และคอยอยู่เคียงข้างข้าพเจ้าเสมอมา

ประโยชน์อันใดอันจะเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบแด่ คุณพ่อ คุณแม่ และคณาจารย์ทุกท่าน ที่กรุณาเมตตาอบรมสั่งสอน และให้คำแนะนำต่าง ๆ จนถึงปัจจุบัน

ชวิดา ปัญญาสุรยุทธ
มีนาคม 2551

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	41
อุปกรณ์	41
วิธีการ	43
ผลและวิจารณ์	51
สรุปและข้อเสนอแนะ	68
สรุป	68
ข้อเสนอแนะ	70
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	71
ภาคผนวก	76
ภาคผนวก ก มาตรฐานไบโอดีเซล	77
ภาคผนวก ข การคำนวณอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน	82
ภาคผนวก ค การคำนวณปริมาณเมทิลเอสเทอร์	83
ภาคผนวก ง การคำนวณค่าความเป็นกรด	86
ภาคผนวก จ ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Rancimat	87
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	141

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ชื่อ จำนวนคาร์บอน และสูตรโมเลกุลของกรดไขมันชนิดต่าง ๆ	5
2	องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันพืชชนิดต่าง ๆ	6
3	ลักษณะสมบัติทางกายภาพและทางความร้อนของน้ำมันพืชชนิดต่าง ๆ	7
4	เปรียบเทียบธาตุอาหารหลักของกากสบู่ดำ ปุ๋ยคอก และปุ๋ยหมัก คิดเป็นร้อยละ	8
5	ลักษณะสมบัติและค่าความร้อนของน้ำมันพืชชนิดต่าง ๆ เปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล	20
6	ปริมาณกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันสบู่ดำและน้ำมันมะพร้าว	53
7	จุดหมอกควันและจุดไหลเทของไบโอดีเซล	63
8	ลักษณะสมบัติของไบโอดีเซล	67
ตารางผนวกที่		
ก1	มาตรฐานไบโอดีเซลตามมาตรฐาน ASTM D6751 ของประเทศสหรัฐอเมริกา	77
ก2	มาตรฐานไบโอดีเซลตามมาตรฐาน DIN EN 14214 ของสหภาพยุโรป	78
ก3	ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2548	79
ก4	มาตรฐานไบโอดีเซลตามมาตรฐาน DIN E51606 ของประเทศเยอรมนี	81

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	โครงสร้างโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์	4
2	เมล็ด เปลือกผล และน้ำมันสบู่ดำ	8
3	เครื่องสกัดน้ำมันสบู่ดำโดยใช้แรงงานจากคน	10
4	เครื่องหีบน้ำมันสบู่ดำด้วยระบบไฮดรอลิก	10
5	ผลและต้นมะพร้าว	12
6	ไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าว	12
7	แผนภาพแสดงการสกัดน้ำมันมะพร้าวดิบโดยวิธีบีบอัด	15
8	แผนภาพแสดงการสกัดน้ำมันมะพร้าวดิบโดยวิธีใช้ตัวทำละลาย	17
9	แผนภาพแสดงการกลั่นน้ำมันมะพร้าวให้บริสุทธิ์	19
10	ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์	23
11	ปฏิกิริยาสaponิฟิเคชันจากกรดไขมันอิสระ	23
12	ปฏิกิริยาสaponิฟิเคชันจากเอสเทอร์	24
13	ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน	24
14	ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์	25
15	ปฏิกิริยาอะมิโนไลซิสของไตรกลีเซอไรด์	25
16	ปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซล	33
17	กลไกของสารต้านอนุมูลอิสระ	34
18	เครื่อง Rancimat	45
19	เครื่องมือที่ใช้ทดสอบจุดหมอกควันและจุดไหลเทของไบโอดีเซล	47
20	แสดงวิธีการทดสอบจุดไหลเทของไบโอดีเซล	48
21	เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี	49
22	วิธีการทดสอบค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซล	50
23	ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าว	52

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
24	จุดหมอกควันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าว	55
25	จุดไหลเทของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าว	56
26	ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำเมื่อเติมสาร BHA ในปริมาณความเข้มข้น 50-350 พีพีเอ็ม	58
27	ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำเมื่อเติมสาร Kerobit® TP ในปริมาณความเข้มข้น 50-350 พีพีเอ็ม	58
28	ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำเมื่อเติมสาร BHT ในปริมาณความเข้มข้น 50-350 พีพีเอ็ม	59
29	ผลของปริมาณสาร BHA ต่อความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 80:20	61
30	ผลของปริมาณสาร BHA ต่อความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 60:40	61
31	ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร BHA ปริมาณความเข้มข้น 200 พีพีเอ็ม ระหว่างจัดเก็บเป็นระยะเวลา 10 สัปดาห์	65
32	ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 60:40 ที่เติมสาร BHA 50 พีพีเอ็ม ระหว่างจัดเก็บเป็นระยะเวลา 10 สัปดาห์	65

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ค1	ตัวอย่างโครมาโทแกรมของสารตัวอย่าง	84
จ1	ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ	87
จ2	ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 80:20	88
จ3	ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 60:40	89
จ4	ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 50:50	90
จ5	ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 40:60	91
จ6	ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 20:80	92
จ7	ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าว	93
จ8	ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร BHA ความเข้มข้น 50 พีพีเอ็ม	94
จ9	ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร BHA ความเข้มข้น 100 พีพีเอ็ม	95
จ10	ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร BHA ความเข้มข้น 150 พีพีเอ็ม	96
จ11	ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร BHA ความเข้มข้น 200 พีพีเอ็ม	97

สารบัญญานาพ (ต่อ)

[illegible]

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
จ25	ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่ เติมสาร BHT ความเข้มข้น 200 พีพีเอ็ม	111
จ26	ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่ เติมสาร BHT ความเข้มข้น 250 พีพีเอ็ม	112
จ27	ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่ เติมสาร BHT ความเข้มข้น 300 พีพีเอ็ม	113
จ28	ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่ เติมสาร BHT ความเข้มข้น 350 พีพีเอ็ม	114
จ29	ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่าง ไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสม ร้อยละเท่ากับ 80:20 และเติมสาร BHA 50 พีพีเอ็ม	115
จ30	ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่าง ไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสม ร้อยละเท่ากับ และเติมสาร BHA 100 พีพีเอ็ม	116
จ31	ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่าง ไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสม ร้อยละเท่ากับ 80:20 และเติมสาร BHA 150 พีพีเอ็ม	117
จ32	ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่าง ไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสม ร้อยละเท่ากับ 80:20 และเติมสาร BHA 200 พีพีเอ็ม	118
จ33	ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่าง ไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสม ร้อยละเท่ากับ 80:20 และเติมสาร BHA 250 พีพีเอ็ม	119
จ34	ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่าง ไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสม ร้อยละเท่ากับ 80:20 และเติมสาร BHA 300 พีพีเอ็ม	120

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
จ35	ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 80:20 และเติมสาร BHA 350 พีพีเอ็ม	121
จ36	ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 60:40 และเติมสาร BHA 50 พีพีเอ็ม	122
จ37	ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 60:40 และเติมสาร BHA100 พีพีเอ็ม	123
จ38	ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 60:40 และเติมสาร BHA 150 พีพีเอ็ม	124
จ39	ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 60:40 และเติมสาร BHA 200 พีพีเอ็ม	125
จ40	ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 60:40 และเติมสาร BHA 250 พีพีเอ็ม	126
จ41	ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 60:40 และเติมสาร BHA 300 พีพีเอ็ม	127
จ42	ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 60:40 และเติมสาร BHA 350 พีพีเอ็ม	128
จ43	ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร BHA 200 พีพีเอ็ม ก่อนจัดเก็บเป็นระยะเวลา 10 สัปดาห์	129

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
จ44	ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร BHA 200 พีพีเอ็ม หลังจัดเก็บเป็นระยะเวลา 2 สัปดาห์130
จ45	ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร BHA 200 พีพีเอ็ม หลังจัดเก็บเป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์131
จ46	ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร BHA 200 พีพีเอ็ม หลังจัดเก็บเป็นระยะเวลา 6 สัปดาห์132
จ47	ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร BHA 200 พีพีเอ็ม หลังจัดเก็บเป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์133
จ48	ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร BHA 200 พีพีเอ็ม หลังจัดเก็บเป็นระยะเวลา 10 สัปดาห์134
จ49	ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 60:40 และเติมสาร BHA 50 พีพีเอ็ม ก่อนจัดเก็บเป็นระยะเวลา 10 สัปดาห์135
จ50	ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 60:40 และเติมสาร BHA 50 พีพีเอ็ม หลังจัดเก็บเป็นระยะเวลา 2 สัปดาห์136
จ51	ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 60:40 และเติมสาร BHA 50 พีพีเอ็ม หลังจัดเก็บเป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์137

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
จ52 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 60:40 และเติมสาร BHA 50 พีพีเอ็ม หลังจัดเก็บเป็นระยะเวลา 6 สัปดาห์	138
จ53 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 60:40 และเติมสาร BHA 50 พีพีเอ็ม หลังจัดเก็บเป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์	139
จ54 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 60:40 และเติมสาร BHA 50 พีพีเอ็ม หลังจัดเก็บเป็นระยะเวลา 10 สัปดาห์	140

การปรับปรุงความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสม ระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าว

Oxidation Stability Improvement of Jatropha-coconut Biodiesel blends

คำนำ

ในปัจจุบัน เป็นที่ทราบกันดีว่าราคาน้ำมันในตลาดโลกได้ปรับตัวสูงขึ้นมากและอาจปรับตัวสูงขึ้นอีกในอนาคต วิกฤตการณ์ดังกล่าวทำให้ประเทศไทยต้องมุ่งหาพลังงานทดแทนเพื่อลดการพึ่งพาการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ ซึ่งมีสัดส่วนสูงถึงร้อยละ 59 ของพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในประเทศ โดยร้อยละ 51 เป็นพลังงานน้ำมันที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ โดยมีปริมาณการใช้ น้ำมันดีเซลเป็นสัดส่วนสูงที่สุด คือ ร้อยละ 45 หรือประมาณ 16,000 ล้านลิตรต่อปี คิดเป็นมูลค่ามากกว่า 300,000 ล้านบาท ดังนั้น การแสวงหาแหล่งวัตถุดิบเพื่อทดแทนการใช้ น้ำมันดีเซลในรูปของน้ำมันไบโอดีเซลหรือน้ำมันดีเซลชีวภาพจึงเป็นทางเลือกของประเทศไทยที่ควรรับดำเนินการ ทั้งนี้ น้ำมันไบโอดีเซลเป็นน้ำมันที่ผลิตได้จากพืช เช่น ถั่ว มะพร้าว เมล็ดเรพ (Rape seed) สบู่ดำ และปาล์มน้ำมัน (วิเชียร, 2549)

ไบโอดีเซลเป็นคำที่ใช้เรียกสารเอสเทอร์ที่ผลิตจากน้ำมันพืชชนิดต่าง ๆ หรือน้ำมันสัตว์ที่ผ่านกระบวนการทางเคมี ซึ่งกระบวนการที่เป็นที่นิยมและให้ผลผลิตสูง คือ กระบวนการใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันและแอลกอฮอล์ โดยใช้เบสหรือกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยสารอัลคิลเอสเทอร์หรือไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์เป็นเชื้อเพลิงที่ปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม มีความปลอดภัยสูงกว่าน้ำมันดีเซลในการขนส่งและเก็บรักษา เนื่องจากมีจุดวาบไฟ ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่น้ำมันเริ่มติดไฟสูงกว่าน้ำมันดีเซล สามารถเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์ และไอเสียก็มีมลพิษต่ำกว่ากรณีใช้น้ำมันดีเซลในเครื่องยนต์ดีเซล (คณะกรรมการพลังงาน, 2545)

สำหรับประเทศไทยมีการเพาะปลูกพืชน้ำมันหลายชนิด เช่น ถั่วเหลือง ปาล์มน้ำมัน สบู่ดำ ถั่วลิสง มะพร้าว ละหุ่ง และงา นอกเหนือจากพืชน้ำมันเหล่านี้ที่เกษตรกรทำการเพาะปลูกแล้ว ยังมีแหล่งน้ำมันอื่น ๆ เช่น น้ำมันสัตว์ และน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลได้ทั้งสิ้น โดยเฉพาะสบู่ดำนั้นเป็นพืชน้ำมันที่กำลังได้รับความสนใจนอกเหนือจาก

ปาล์มน้ำมัน เนื่องจากสบู่น้ำมันพืชที่ไม่ใช่บริโภคนั้นมีความเหมาะสมในการนำมาผลิตไบโอดีเซล โดยไม่เกิดผลกระทบด้านห่วงโซ่อาหารของน้ำมันบริโภค (วิเชียร, 2549)

สบู่น้ำมันพืชมีคุณสมบัติขนาดกลางสูงประมาณ 2-7 เมตร ผลสบู่น้ำมันพืชหนึ่งผลนั้นมีเมล็ด 2-3 เมล็ด ในเมล็ดสบู่น้ำมันพืชมีน้ำมันประมาณ 30-35 เปอร์เซ็นต์ การสกัดน้ำมันสบู่น้ำมันพืชทำได้โดยสกัดด้วยตัวทำละลาย สกัดด้วยเครื่องสกัดที่ใช้แรงงานคน หรือสกัดโดยใช้เครื่องบีบอัด การสกัดน้ำมันสบู่น้ำมันพืชด้วยเครื่องกลจะต้องนำเมล็ดมาอบหรือตากก่อนเพื่อให้สกัดน้ำมันได้ง่ายขึ้น น้ำมันที่ได้จะนำไปกรองด้วยผ้าขาวบาง 2-3 ชั้น หรือตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนก่อนนำไปใช้งาน โดยน้ำมันสบู่น้ำมันพืชในสภาพพร้อมใช้นั้นจะมีสีเหลืองอ่อนใส (นิสากร, 2549)

ไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่น้ำมันพืชเมื่อโดนความร้อนและอากาศจะมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้สภาพของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่น้ำมันพืชเปลี่ยนไป และอาจเปลี่ยนสภาพเป็นสารอนุมูลอิสระที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาหรือเปลี่ยนสภาพเป็นสารอื่น เช่น อัลดีไฮด์ แอลกอฮอล์ และกรดคาร์บอนิก ทำให้ไบโอดีเซลมีลักษณะสมบัติที่ไม่เป็นไปตามมาตรฐาน EN 14112 แต่ข้อดีของน้ำมันสบู่น้ำมันพืช คือ มีจุดไหลเทและจุดหมอกควันต่ำ ทำให้ไม่เป็นที่น่าพอใจเมื่อนำไปใช้ในสภาพอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำ (Sarin *et al.*, 2007)

ดังนั้น โครงการวิจัยนี้จึงให้ความสนใจในการปรับปรุงความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่น้ำมันพืช และศึกษาความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลหลังจากจัดเก็บเป็นระยะเวลานาน โดยทำการศึกษาในระดับปฏิบัติการเพื่อพัฒนาไปสู่การใช้งานจริงในอนาคตต่อไป

วัตถุประสงค์

เพื่อปรับปรุงความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ และศึกษาความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ และไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวที่เติมสารต้านอนุมูลอิสระหลังจากจัดเก็บเป็นระยะเวลานาน

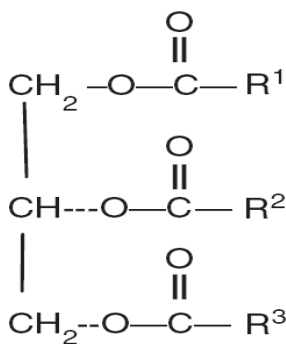
ขอบเขตของงานวิจัย

ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลหรือเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสในระดับห้องปฏิบัติการ และตรวจสอบลักษณะสมบัติของไบโอดีเซลที่ผลิตได้

การตรวจเอกสาร

ไขมันและน้ำมัน

องค์ประกอบหลักของน้ำมัน คือ กรดไขมันซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ กรดไขมันอิ่มตัว (Saturated fatty acid) และกรดไขมันไม่อิ่มตัว (Unsaturated fatty acid) โดยปริมาณสัดส่วนของกรดทั้งสองชนิดจะแตกต่างกัน ทำให้ลักษณะสมบัติของน้ำมันพืชแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน ซึ่งกรดไขมันที่พบในน้ำมันพืชส่วนใหญ่จะเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัว โดยทั่วไปกรดไขมันจะมีจำนวนคาร์บอนเป็นเลขคู่เสมอในโมเลกุล ซึ่งมีความยาวตั้งแต่ 12 ถึง 24 โมเลกุล แต่ที่พบเป็นจำนวนมากจะมีจำนวนคาร์บอน 16 โมเลกุล และ 18 โมเลกุล โดยในธรรมชาติจะพบกรดไขมันในรูปอิสระในปริมาณเพียงเล็กน้อย ส่วนใหญ่จะพบในรูปเอซิลกลีเซอรอล (Acylglycerol) หรือไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ซึ่งเกิดจากการรวมตัวของกรดไขมันกับกลีเซอรอล โดยที่กลีเซอรอลเป็นสารพวกแอลกอฮอล์ที่มีหมู่ฟังก์ชัน OH จำนวน 3 หมู่ ถ้ากรดไขมันเพียงหนึ่งโมเลกุลทำปฏิกิริยากับหมู่ OH ของกลีเซอรอล เรียกว่า โมโนกลีเซอไรด์ (Monoglyceride) ถ้ากรดไขมันสองโมเลกุลทำปฏิกิริยาจะได้ไดกลีเซอไรด์ (Diglyceride) และถ้ากรดไขมันสามโมเลกุลทำปฏิกิริยาจะได้ไตรกลีเซอไรด์ โดยโครงสร้างโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์แสดงดังภาพที่ 1 (บริษัท พาราไซแอนติฟิค จำกัด, 2547)



ภาพที่ 1 โครงสร้างโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์

ที่มา: Agarwal (2007)

โดยทั่วไปน้ำมันพืชสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลได้โดยตรง เนื่องจากมีค่าความร้อนสูง แต่ก็มีข้อจำกัดในด้านกายภาพบางประการ เช่น มีความหนืดสูง ค่าการระเหยตัวต่ำทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ และเกิดปัญหาการอุดตันในเครื่องยนต์ ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาคุณภาพ

น้ำมันพืชให้มีความรู้เกี่ยวกับไขมันดีและไขมันเลวด้วยกระบวนการทางเคมี โดยชื่อ จำนวนคาร์บอน และสูตรโมเลกุลของกรดไขมันชนิดต่าง ๆ และลักษณะสมบัติทางกายภาพและทางความร้อนของน้ำมันพืชชนิดต่าง ๆ รวมทั้งองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันพืชชนิดต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ชื่อ จำนวนคาร์บอน และสูตรโมเลกุลของกรดไขมันชนิดต่าง ๆ

Fatty acid	Systematic name	Carbon atoms	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	<i>cis</i> -9-Octadecenoic	18:1	$C_{18}H_{34}O_2$
Linoleic	<i>cis</i> -9, <i>cis</i> -12-Octadecadienoic	18:2	$C_{18}H_{32}O_2$
Linolenic	<i>cis</i> -9, <i>cis</i> -12, <i>cis</i> -15-Octadecatrienoic	18:3	$C_{18}H_{30}O_2$
Eruic	<i>cis</i> -13-Docosenoic	22:1	$C_{22}H_{42}O_2$

ที่มา: Srivastava and Prasad (2000)

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันพืชชนิดต่าง ๆ

Vegetable oil	Fatty acid composition % by weight									
	14:0	16:0	18:0	20:0	22:0	24:0	18:1	22:1	18:2	18:3
Corn ^a	0	12	2	Tr	0	0	25	0	6	Tr
Cottonseed ^a	0	28	1	0	0	0	13	0	58	0
Crambe ^a	0	2	1	2	1	1	19	59	9	7
Peanut ^a	0	11	2	1	2	1	48	0	32	1
Rapeseed ^a	0	3	1	0	0	0	64	0	22	8
Safflower ^a	0	9	2	0	0	0	12	0	78	0
Sesame ^a	0	13	4	0	0	0	53	0	30	0
Soya bean ^a	0	12	3	0	0	0	23	0	55	6
Sunflower ^a	0	6	3	0	0	0	17	0	74	0
Rice -bran ^a	0.4- 0.6	11.7- 16.5	1.7- 2.5	0.4- 0.6	-	0.4- 0.9	39.2- 43.7	-	26.4- 35.1	-
Sal ^a	-	4.5- 8.6	34.2- 44.8	6.3- 12.2	-	-	34.2- 44.8	-	2.7	-
Mahua ^a	-	16.0- 28.2	20.0- 25.1	0.0- 3.3	-	-	41.0- 51.0	-	8.9- 13.7	-
Neem ^a	0.2- 0.26	13.6- 16.2	14.4- 24.1	0.8- 3.4	-	-	49.1- 61.9	-	2.3- 15.8	-
Karanja ^a	-	3.7- 7.9	2.4- 8.9	-	-	1.1- 3.5	44.5- 71.3	-	10.8- 18.3	-
Jatropha ^b	-	14.9	6.0	-	-	-	41.2	-	37.4	-
Coconut ^b	16.8 - 21.0	7.5- 10.2	2.0- 4.0	-	-	-	5.0- 10.0	-	1.0- 2.5	-

Tr = traces

ที่มา: ^a Srivastava and Prasad (2000)

^b คณะกรรมาธิการพลังงาน (2545)

ตารางที่ 3 ลักษณะสมบัติทางกายภาพ และทางความร้อนของน้ำมันพืชชนิดต่าง ๆ

Vegetable oil	Kinematic viscosity at 40 °C	Cetane number	Heating value (MJ/kg)	Cloud point (°C)	Pour Point (°C)	Flash point (°C)	Density (kg/l)	Carbon residue (wt%)
Corn	34.9	37.60	39.50	-1.1	-40.0	277	0.9095	0.24
Cotton-seed	33.5	41.8	39.5	1.7	-15.0	234	0.9148	0.24
Cramble	53.6	44.6	40.5	10.0	-12.2	274	0.9044	0.23
Linseed	22.2	34.6	39.3	1.7	-15.0	241	0.9236	0.22
Peanut	39.6	41.8	49.8	12.8	-6.7	271	0.9026	0.24
Rapeseed	37.0	37.6	39.7	-3.9	-31.7	246	0.9115	0.30
Safflower	31.3	41.3	39.5	18.3	-6.7	260	0.9144	0.25
Sesame	35.5	40.2	39.3	-3.9	-9.4	260	0.9133	0.25
Soyabean	32.6	37.9	39.6	-3.9	-12.2	254	0.9138	0.27
Sunflower	33.9	37.1	39.6	7.2	-15.0	274	0.9161	0.23
Palm	39.6	42.0	-	31.0	-	267	0.9180	-
Babassu	30.3	38.0	-	20.0	-	150	0.9460	-
Tallow	-	-	40.0	-	-	201	-	6.21

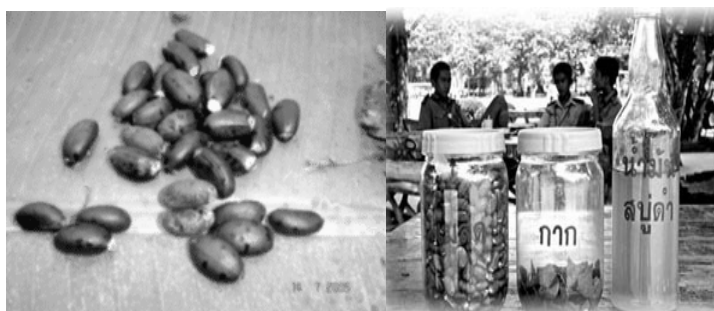
ที่มา: Srivastava and Prasad (2000)

สบู่ดำ

1. ลักษณะทั่วไปของสบู่ดำ

สบู่ดำ (Physic nut หรือ Purging nut) เป็นพืชที่อยู่ในวงศ์ไม้ยางพารา มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Jatropha curcas* Linn. วงศ์ Euphorbiaceae เป็นไม้พุ่มยืนต้นขนาดกลาง สูงประมาณ 2-7 เมตร มีอายุยืนไม่น้อยกว่า 20 ปี ทนต่อความแห้งแล้ง เจริญเติบโตได้ดีทุกสภาพแวดล้อม ยกเว้นพื้นที่ที่มีน้ำขัง ผลสบู่ดำหนึ่งผลมีเมล็ด 3-4 เมล็ด ในเมล็ดสบู่ดำมีน้ำมันประมาณ 30-35 เปอร์เซ็นต์ ผลสบู่ดำเมื่ออ่อนมีสีเขียว แต่เมื่อสุกแก่มีสีเหลืองและดำตามลำดับ เมล็ดมีสีดำซึ่งเป็นส่วนที่ให้น้ำมัน พืชน้ำมันชนิดนี้มีถิ่นกำเนิดในทวีปอเมริกาเขตร้อน เชื่อกันว่าชาวโปรตุเกสเป็นผู้นำเข้ามาปลูกในทวีปเอเชียเมื่อประมาณ 200 ปี มาแล้ว โดยมีการนำเข้ามาในประเทศไทยเมื่อปลายกรุงศรีอยุธยาเพื่อนำ

เมล็ดไปอัดบีบเอาน้ำมันไปทำสบู่และใช้จุดไฟให้แสงสว่างเวลากลางคืน สบู่ดำมีชื่อเรียกแตกต่างกันไปตามท้องถิ่น เช่น ภาคกลาง เรียกว่า "สบู่ดำ" ภาคเหนือ เรียกว่า "มะหุ้งฮั่ว" ภาคอีสาน เรียกว่า "หมากเยาะ" และมีบางแห่ง เรียกว่า "สีหลอด" ภาคใต้ เรียกว่า "หงเทศ" สบู่ดำมีสารพิษจึงนิยมปลูกเป็นแนวเขตหรือรั้วเพื่อป้องกันสัตว์เลื้อย สบู่ดำได้รับการวิจัยแล้วว่าเป็นไบโอดีเซลที่ใช้เป็นพลังงานทดแทนได้ดีและช่วยรักษาฟื้นฟูสภาพป่าและสิ่งแวดล้อม ส่วนเมล็ดสบู่ดำที่เหลือจากการสกัดน้ำมันแล้วนั้น มีธาตุอาหารหลักที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชมากกว่าปุ๋ยหมักและมูลสัตว์หลายชนิด ดังนั้นจึงสามารถใช้ทำปุ๋ยอินทรีย์ได้ โดยเมล็ด เปลือกผล และน้ำมันสบู่ดำแสดงดังภาพที่ 2 และการเปรียบเทียบธาตุอาหารหลักของเปลือกผลสบู่ดำ ปุ๋ยคอก และปุ๋ยหมักแสดงดังตารางที่ 4 (นิสากร, 2549; บุปผา, 2549; สำนักงานอุตสาหกรรมจังหวัดหนองบัวลำภู, 2549)



ภาพที่ 2 เมล็ด เปลือกผล และน้ำมันสบู่ดำ
ที่มา: แสงโสม (2550)

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบธาตุอาหารหลักของเปลือกผลสบู่ดำ ปุ๋ยคอก และปุ๋ยหมัก คิดเป็นร้อยละ

ชนิดของปุ๋ย	ไนโตรเจน	ฟอสฟอรัส	โพแทสเซียม
เปลือกผลสบู่ดำ	4.44	2.09	1.68
มูลกระบือ	0.98	0.69	1.66
มูลไก่	3.04	6.27	2.08
มูลเป็ด	2.37	2.10	1.09
ปุ๋ยหมักผักตบชวา	1.43	0.46	0.48

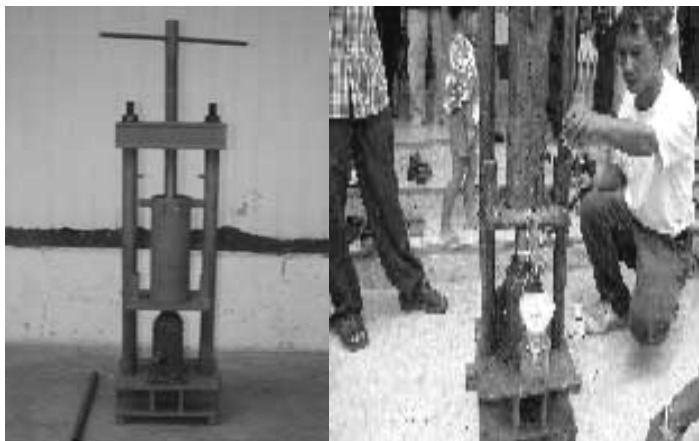
ที่มา: ศูนย์ส่งเสริมและพัฒนาอาชีพการเกษตร (2549)

2. พิษของสบู่ดำ

ยางสบู่ดำมีสารพิษชื่อโฟบอล เอสเทอร์ (Phorbol ester) หากน้ำยางถูกผิวหนังจะเกิดอาการระคายเคือง บวมแดง ปวดแสบปวดร้อนอย่างรุนแรง หากเข้าตาจะทำให้ตาอักเสบ อาจบอดชั่วคราวได้ ส่วนเมล็ดสบู่ดำมีสารเคอร์ซิน (Curcin) ที่มีฤทธิ์ต่อมนุษย์และสัตว์หลายชนิด โดยพบว่า สารพิษเคอร์ซินมีฤทธิ์ยับยั้งการสร้างโปรตีน แต่ในทางกลับกันก็พบว่า ในเมล็ดสบู่ดำมีสารบางชนิดซึ่งมีฤทธิ์ทำให้เซลล์มีอินซูลินผิดปกติ หากรับประทานเมล็ดและน้ำมันเข้าไปประมาณ 30-60 นาที จะทำให้เกิดอาการคลื่นไส้ อาเจียน ปวดท้อง ท้องเสีย ถ่ายเป็นเลือด โดยในรายที่มีอาการรุนแรงอาจมีอาการเกร็งของกล้ามเนื้อที่มือและเท้า หายใจเร็ว หอบ ความดันโลหิตต่ำ หัวใจเต้นผิดปกติ บางรายอาจถึงขั้นเสียชีวิตได้ กรณีที่เป็นสายพันธุ์ที่มีสารเป็นพิษสูงหากรับประทานเพียงแค่ 3 เมล็ด ก็เป็นอันตรายแก่ระบบทางเดินอาหาร การรักษาอาการพิษจากสบู่ดำ คือ ให้ดื่มนมจำนวนมาก ๆ หรือทำให้อาเจียนออกมาและรีบส่งผู้ป่วยพบแพทย์ทันที และหากผิวหนังสัมผัสน้ำยางให้รีบล้างออกด้วยน้ำสะอาดหรือน้ำสบู่ทันที และควรหลีกเลี่ยงการสัมผัสหรือรับประทานเมล็ดสบู่ดำ (บุษบง, 2549; แสงโสม, 2550)

3. การสกัดน้ำมันจากเมล็ดสบู่ดำ การสกัดน้ำมันจากเมล็ดสบู่ดำทำได้ 3 วิธี คือ

3.1 แบบง่าย โดยเก็บผลสบู่ดำแห้ง (ผลสีเหลืองถึงสีดำ) ทุบพอแตกเปลือกออกให้เหลือเฉพาะเมล็ด และนำไปล้างน้ำทำความสะอาด จากนั้นนำมาผึ่งลมให้เมล็ดแห้ง นำไปบดเมล็ดให้แตกโดยการทุบหรือบดหยาบ และนำเมล็ดที่ได้บดแล้วออกตากแดดประมาณ 30 นาที แล้วนำเมล็ดสบู่ดำเข้าเครื่องสกัด (ใช้แรงงานคน) หรือน้ำมันที่ได้ไปกรองเพื่อแยกเศษผงด้วยผ้าขาวบาง 2-3 ชั้น เมล็ดสบู่ดำ 4 กิโลกรัม สกัดน้ำมันได้ 1 ลิตร น้ำมันสบู่ดำเมื่อนำมาเข้ากระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีโดยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน จะได้เมทิลเอสเทอร์ เอทิลเอสเทอร์ หรือบิวทิลเอสเทอร์ ขึ้นอยู่กับชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ซึ่งบางครั้งเรียกว่าไบโอดีเซล ใช้เป็นพลังงานทดแทนน้ำมันดีเซล น้ำมันที่ได้สามารถนำไปใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลรอบต่ำ เช่น เครื่องสูบน้ำ รถตัดหญ้า รถไถนาขนาดเล็ก โดยเครื่องสกัดน้ำมันสบู่ดำโดยใช้แรงงานจากคนแสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 เครื่องสกัดน้ำมันสบูดำโดยใช้แรงงานจากคน
ที่มา: สำนักงานอุตสาหกรรมจังหวัดหนองบัวลำภู (2549)

3.2 แบบใช้เครื่องบีบอัด

เครื่องบีบอัดระบบไฮดรอลิก (Hydraulic press) การสกัดแบบนี้จะได้น้ำมันประมาณ 20-25 เปอร์เซ็นต์ และมีน้ำมันค้างในกากเมล็ดสบูดำ 10-25 เปอร์เซ็นต์ แล้วแต่กำลังของไฮดรอลิก โดยเครื่องหีบน้ำมันสบูดำด้วยระบบไฮดรอลิกแสดงดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 เครื่องหีบน้ำมันสบูดำด้วยระบบไฮดรอลิก
ที่มา: สำนักงานอุตสาหกรรมจังหวัดหนองบัวลำภู (2549)

เครื่องบีบอัดแบบระบบอัดเกลียว (Screw press) ได้น้ำมันประมาณ 25-30 เปอร์เซ็นต์ และมีน้ำมันตกค้างในกากเมล็ดสบู่มากประมาณ 5-10 เปอร์เซ็นต์

3.3 แบบสกัดด้วยตัวทำละลาย การสกัดด้วยสารเคมีปิโตรเลียมอีเทอร์ จะได้น้ำมัน 35-38 เปอร์เซ็นต์ และเมล็ดสบู่มาก 3-4 กิโลกรัม จะได้น้ำมัน 1 ลิตร (นิสากร, 2549; บุญผา, 2549)

มะพร้าว

1. ลักษณะทั่วไปของมะพร้าว

มะพร้าวมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Cocos nucifera* Linn. วงศ์ Palmae เป็นพืชที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจชนิดหนึ่งของประเทศไทย ซึ่งสำนักงานสถิติแห่งชาติได้เคยสำรวจ พบว่า ประชากรไทย 1 คน จะบริโภคเนื้อมะพร้าวประมาณปีละ 8,273.2 กรัม หรือประมาณ 18 ผล/คน/ปี ซึ่งปัจจุบันประเทศไทยมีผลเมืองประมาณ 62 ล้านคน จะใช้ผลมะพร้าวประมาณ 990 ล้านผล หรือประมาณ 65 เปอร์เซ็นต์ของผลผลิตทั้งหมด ส่วนที่เหลือประมาณ 35 เปอร์เซ็นต์ของผลผลิตทั้งหมด หรือ 489 ล้านผล ใช้ในรูปของอุตสาหกรรมหรือส่งออกต่อไป ซึ่งมะพร้าวเป็นพืชยืนต้นชนิดหนึ่งอยู่ในตระกูลปาล์มสูง 7-10 เมตร ใบมีลักษณะเป็นใบประกอบแบบขนนก โดยผลและต้นมะพร้าวแสดงดังภาพที่ 5 มะพร้าวเป็นผลไม้ที่เป็นแหล่งอาหารธรรมชาติที่สำคัญของผู้คนในแถบเอเชียแปซิฟิก แอฟริกา และอเมริกากลางมานานนับพันปี สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ทั้งอาหารและยา สามารถขึ้นได้ในทุกจังหวัดทั่วประเทศไทย แต่ปลูกได้ดีในดินปนทราย ขยายพันธุ์โดยใช้ผลแก่เพาะเป็นต้นอ่อนสูงประมาณครึ่งเมตรถึงหนึ่งเมตร จึงนำไปปลูกในหลุมที่รองก้นด้วยปุ๋ยคอกหรือปุ๋ยหมักบำรุงด้วยปุ๋ยปีละ 2 ครั้ง และในปัจจุบันยังมีการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวอีกด้วย โดยภาพไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวแสดงดังภาพที่ 6 (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2541; ภิรดา, 2550; สุชาติ, 2550)



ภาพที่ 5 ผลและต้นมะพร้าว

ที่มา: ศูนย์เครือข่ายความรู้วัฒนธรรม (2547)



ภาพที่ 6 ไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าว

2. ประเภทของน้ำมันมะพร้าว

ในการผลิตน้ำมันมะพร้าวโดยทั่วไปแล้วนั้น ชาวสวนมะพร้าวจะนำเนื้อมะพร้าวออกจากผลมะพร้าว ทำการตากแห้ง และส่งเนื้อมะพร้าวแห้งไปจำหน่ายยังโรงงานสกัดน้ำมันมะพร้าว เมื่อโรงงานรับซื้อเนื้อมะพร้าวมาแล้วจะทำการผลิตน้ำมันมะพร้าว โดยเริ่มต้นจากการย่อยเนื้อมะพร้าวให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ แล้วสกัดน้ำมันออกจากเครื่องสกัดแบบบีบอัด น้ำมันที่ได้มักจะมีเศษเนื้อมะพร้าวแห้งปะปนมาด้วย ต้องนำไปกรองเพื่อให้ได้น้ำมันมะพร้าวดิบที่ใสปราศจากเศษเจือปน

โดยสามารถแบ่งน้ำมันมะพร้าวออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ ตามกระบวนการผลิต ดังนี้

2.1 น้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีกลั่นให้บริสุทธิ์ สกัดได้จากเนื้อมะพร้าวห้าวโดยการบีบ หรือใช้ตัวทำละลาย ผ่านความร้อนสูง และกระบวนการทางเคมี คือ การทำให้บริสุทธิ์ (Refining) ฟอกสี (Bleaching) และกำจัดกลิ่น (Deodorization) เพื่อให้เหมาะสำหรับการบริโภค ซึ่งจะได้น้ำมัน สีเหลืองอ่อน ไม่มีกลิ่นและรส ปราศจากวิตามินอีเพราะถูกขจัดออกไปโดยกระบวนการทางเคมี มีปริมาณกรดไขมันอิสระ (Free fatty acid) ไม่เกิน 0.1 เปอร์เซ็นต์

2.2 น้ำมันมะพร้าวบีบเย็น (Cold-pressed coconut oil) โดยกระบวนการบีบไม่ผ่านความร้อนสูง ผลิตจากเนื้อมะพร้าวสดเป็นน้ำมันมะพร้าวที่บริสุทธิ์ที่สุด สีใสเหมือนน้ำ มีวิตามินอี และไม่ผ่านกระบวนการเติมออกซิเจน มีค่าเปอร์ออกไซด์และกรดไขมันอิสระต่ำ มีกลิ่นมะพร้าวอย่างอ่อน ๆ ถึงแรง ขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิต มีความชื้นไม่เกิน 0.1 เปอร์เซ็นต์ เรียกน้ำมันมะพร้าวชนิดนี้ว่า น้ำมันมะพร้าวบริสุทธิ์ (Virgin coconut oil) เป็นน้ำมันที่ผลิตโดยอุตสาหกรรมขนาดเล็ก หรือในครัวเรือน (ณรงค์, 2550; ภิรดา, 2550)

3. กรรมวิธีการผลิตน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีกลั่นให้บริสุทธิ์

การผลิตน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีกลั่นให้บริสุทธิ์สามารถแยกได้เป็น 3 ขั้นตอนใหญ่ ๆ ดังนี้

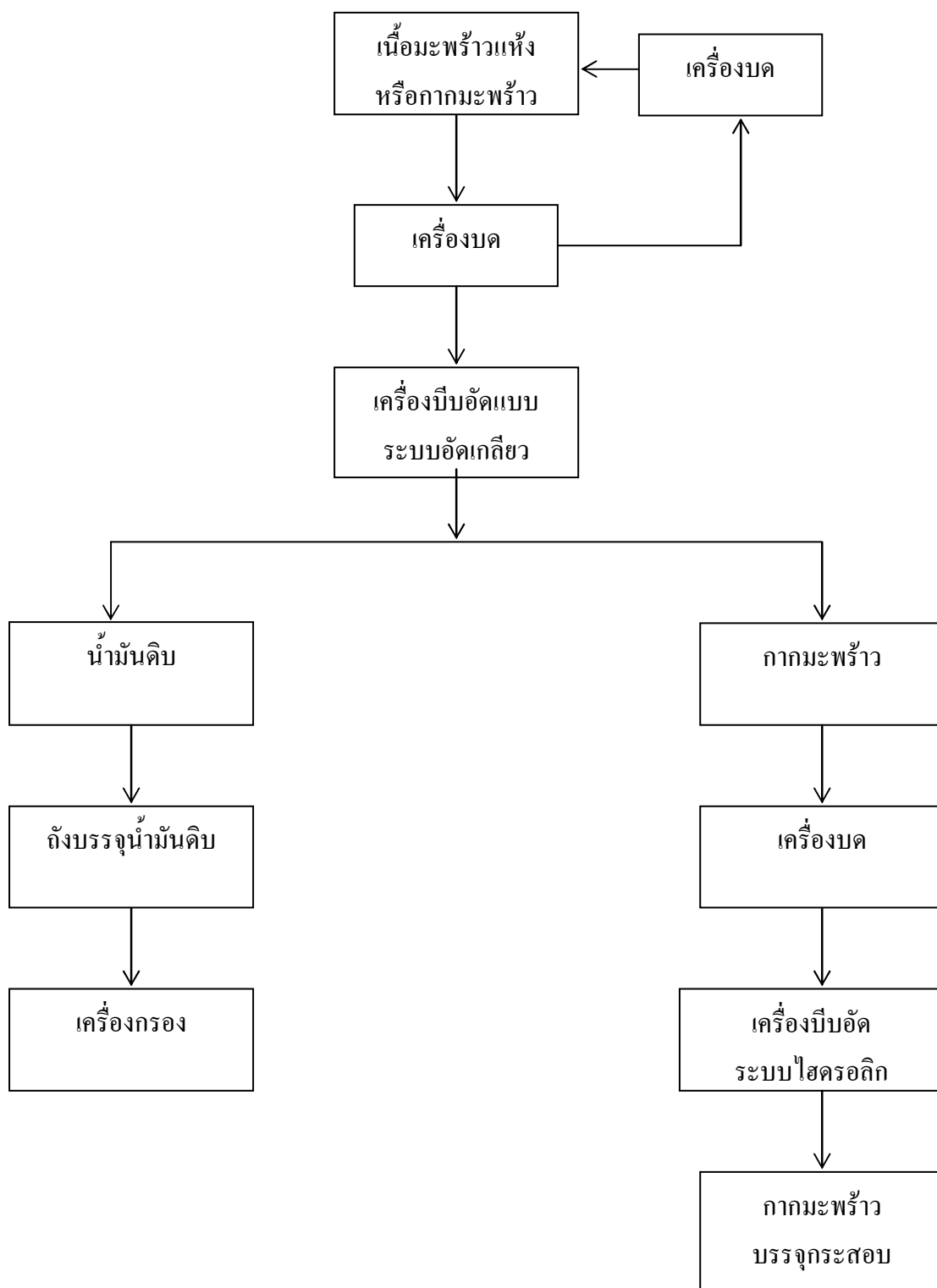
3.1 การเตรียมวัตถุดิบ เนื้อมะพร้าวแห้งหรือกากมะพร้าวก่อนที่จะนำเข้าเครื่องสกัดน้ำมัน นั้น ต้องตรวจสอบความชื้นก่อนว่ามีมากน้อยเพียงใด ถ้ามีความชื้นมากกว่า 6 เปอร์เซ็นต์ จะต้องนำมาตากลมหรืออบให้แห้งก่อน ความชื้นโดยทั่วไปที่เหมาะสมในการบีบหรืออัดจะต้องไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ เพราะถ้าหากมีความชื้นสูงเกินไปจะทำให้ได้น้ำมันน้อยลง จากนั้นจึงนำเข้าเครื่องบด (Hammer mill) ซึ่งจะบดเนื้อมะพร้าวให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ แล้วนำเข้าเครื่องบีบหรืออัดเพื่อสกัดน้ำมันต่อไป

3.2 การสกัดน้ำมันดิบ (Crude oil) การสกัดน้ำมันมะพร้าวทำได้ 3 วิธี คือ

3.2.1 การสกัดโดยใช้เครื่องบีบอัด (Expeller)

นำเนื้อมะพร้าวที่ได้จากการเตรียมวัตถุดิบในขั้นแรกเข้าเครื่องบีบอัดแบบระบบอัดเกลียว ซึ่งมีอย่างน้อย 4 เครื่องติดต่อกัน เพื่อบีบน้ำมันออก ส่วนกากมะพร้าวซึ่งยังมีน้ำมันเหลืออยู่ประมาณ 15-20 เปอร์เซ็นต์ จะถูกนำเข้าเครื่องบีบอัดระบบไฮดรอลิก ซึ่งจะได้กากมะพร้าวออกมาเป็นก้อนกลม ๆ ซึ่งสามารถนำไปจำหน่ายให้แก่โรงงานทำอาหารสัตว์หรือโรงงานทำปุ๋ยได้ โดยแผนภาพแสดงการสกัดน้ำมันมะพร้าวด้วยวิธีบีบอัดแสดงดังภาพที่ 7

การสกัดน้ำมันด้วยวิธีบีบหรืออัดนี้ เป็นวิธีการผลิตแบบเก่าที่ใช้เครื่องจักรบีบอัดเอาน้ำมันออกจากเนื้อมะพร้าวโดยตรง เป็นวิธีที่นิยมกันในแถบเอเชียเพราะสะดวกและเครื่องมือมีราคาถูก สำหรับประเทศไทยนั้นนิยมใช้เครื่องบีบอัดแบบระบบอัดเกลียวเพียงอย่างเดียวเป็นส่วนใหญ่



ภาพที่ 7 แผนภาพแสดงการสั้ดน้ำมันมะพร้าวคิบโดยวิธีปั้บอัด
 ที่มา: นันทนา (2528)

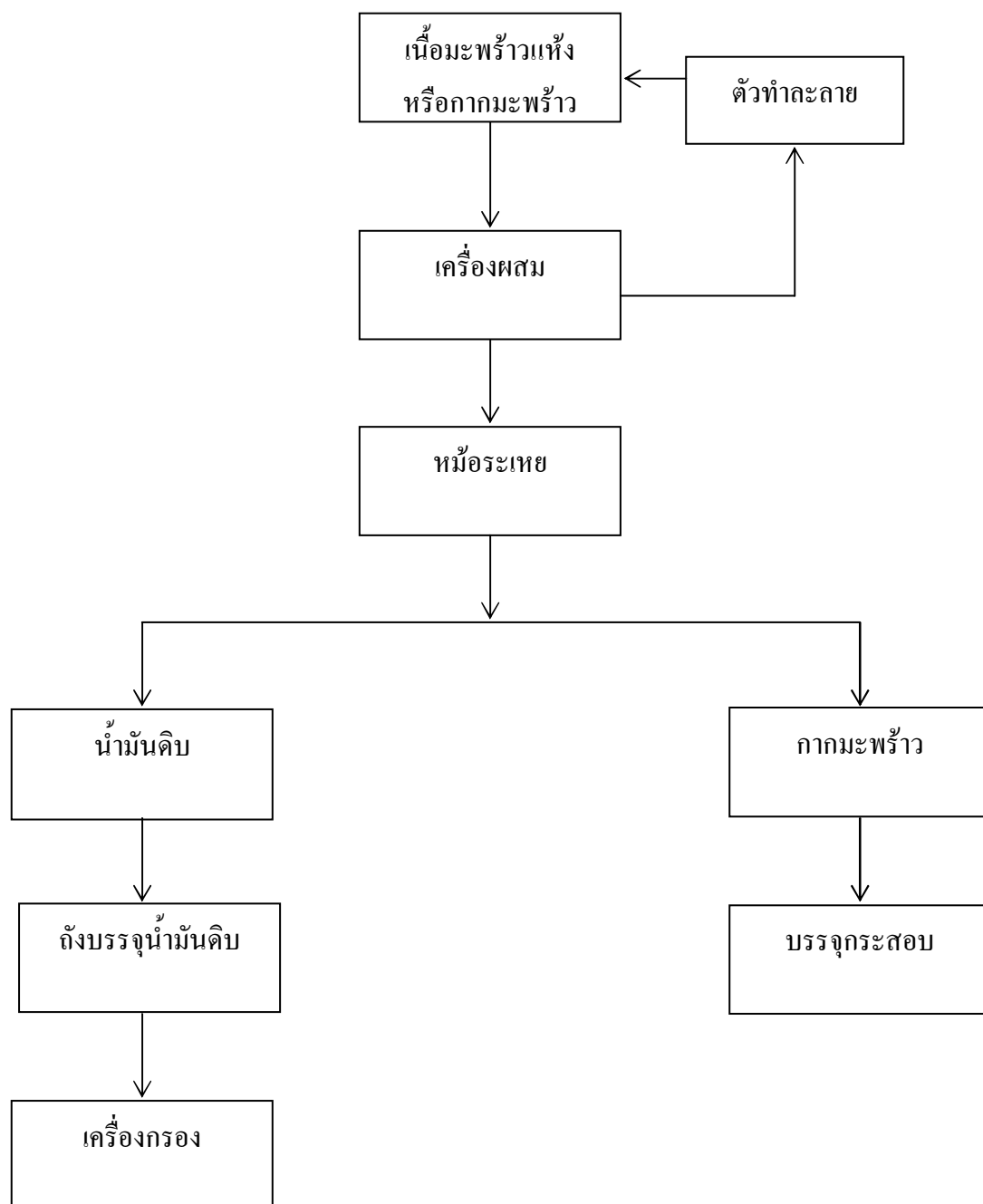
3.2.2 การสกัดโดยใช้ตัวทำละลาย (Solvent extraction)

วิธีนี้เป็นวิธีสกัดที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าการสกัดโดยใช้เครื่องบีบหรืออัด เพราะใช้เฮกเซนซึ่งเป็นเคมีภัณฑ์ปิโตรเลียมเข้าช่วยในการสกัดน้ำมัน จึงทำให้เปอร์เซ็นต์การตกค้างของน้ำมันในกากมะพร้าวมีน้อยมาก โรงงานสกัดมะพร้าวขนาดใหญ่มักนิยมใช้วิธีนี้ เพราะได้ผลผลิตมากกว่า และเครื่องจักรยังสามารถใช้กับพืชน้ำมันได้หลายชนิด แม้จะต้องลงทุนซื้อเครื่องจักรในราคาแพง และต้องเสียค่าจ้างผู้ปฏิบัติงานที่มีความชำนาญให้เหมาะสมกับเทคนิคขั้นสูงในการผลิต ก็ยังนับว่าคุ้มค่า เพราะให้ผลตอบแทนสูง โดยแผนภาพแสดงการสกัดน้ำมันมะพร้าวดิบโดยวิธีตัวทำละลายแสดงดังภาพที่ 8 ซึ่งกรรมวิธีการผลิตโดยวิธีนี้ทำได้หลายวิธี คือ

ก. แบบแช่ (Impresion) เป็นการสกัดโดยนำเนื้อมะพร้าวที่ผ่านขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบแล้วลงแช่ในตัวทำละลายเฮกเซน เมื่อน้ำมันถูกสกัดออกมาจะผสมอยู่กับตัวทำละลาย เมื่อแช่ไว้จนครบระยะเวลาที่กำหนดแล้ว จึงใช้ความร้อนเข้าช่วยเพื่อให้ตัวทำละลายระเหยตัวเหลือแต่น้ำมันดิบไว้

ข. แบบซึมผ่าน (Percolation) วิธีนี้ใช้พ่นตัวทำละลายจนท่วมเนื้อมะพร้าว และปล่อยให้ตามกำหนดเวลาให้ซึมเข้าไปในเนื้อมะพร้าวเพื่อสกัดน้ำมันดิบออกมา

ค. แบบผสมระหว่างการแช่และการซึมผ่าน คือ การพ่นแล้วทิ้งเนื้อมะพร้าวแช่อยู่ในตัวทำละลายตามกำหนดเวลา แล้วแยกน้ำมันดิบออกโดยวิธีระเหยความร้อน



ภาพที่ 8 แผนภาพแสดงการสกัดน้ำมันมะพร้าวดิบโดยวิธีใช้ตัวทำละลาย
ที่มา: นันทนา (2528)

3.2.3 การสกัดโดยใช้เครื่องบีบและตัวทำละลาย

เป็นการสกัดน้ำมันมะพร้าวด้วยเครื่องบีบ แล้วนำกากมะพร้าวที่เหลือมาสกัดด้วยตัวทำละลาย เพื่อเก็บน้ำมันที่เหลืออยู่ในกากมะพร้าวอีกครั้งหนึ่ง

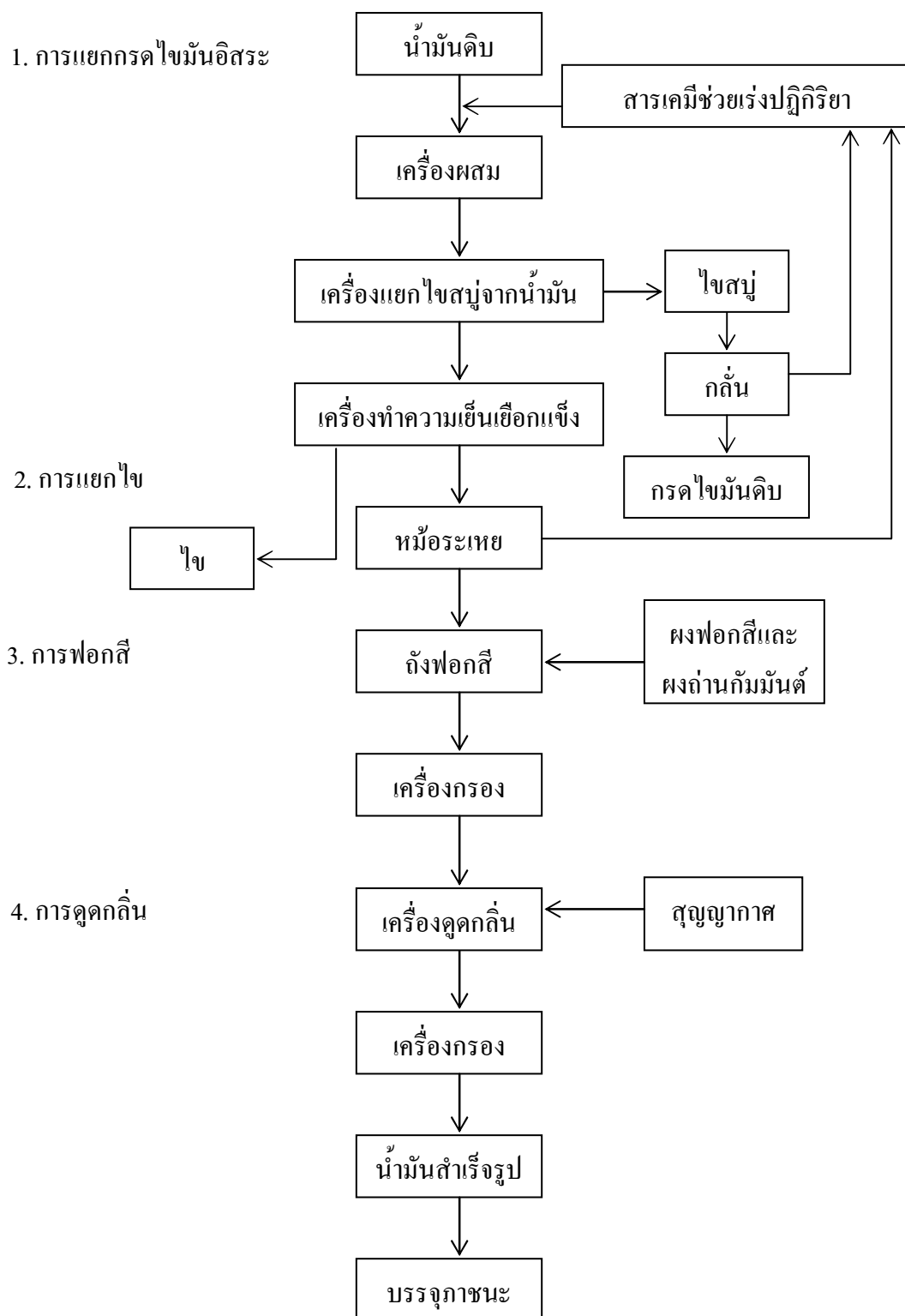
อย่างไรก็ตาม การสกัดน้ำมันมะพร้าวโดยใช้เครื่องบีบอัดหรือใช้ตัวทำละลายในขั้นนี้ จะได้น้ำมันดิบออกมา ซึ่งยังมีสี กลิ่น รส เศษผง กาก ตลอดจนมีสารบางชนิดเจือปนอยู่ ดังนั้น จึงต้องผ่านขั้นตอนการทำน้ำมันให้บริสุทธิ์อีกครั้ง

3.3 การทำน้ำมันให้บริสุทธิ์ คือ การกลั่นน้ำมันดิบโดยใช้วิธีทางเคมี เพื่อปรับสภาพของน้ำมันไม่ให้มีสี กลิ่น รส และกำจัดสารบางชนิดที่เจือปนอยู่ เพื่อให้เหมาะในการใช้บริโภคหรือนำไปใช้เป็นวัตถุดิบขั้นกลางในการผลิตสินค้าอื่นต่อไป โดยแผนภาพแสดงการกลั่นน้ำมันมะพร้าวให้บริสุทธิ์แสดงดังภาพที่ 9 ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

3.3.1 การกำจัดกรดไขมันอิสระ ด้วยโซดาไฟซึ่งจะแยกน้ำมันที่ปราศจากกรดไขมันอิสระออกมา อีกส่วนหนึ่งจะได้สบู่ที่มีสิ่งสกปรก หรือสารบางอย่างที่เจือปนอยู่ในน้ำมันดิบปะปนออกมาด้วย ดังนั้น น้ำมันที่ได้จะสะอาดและไม่มีกรด

3.3.2 การฟอกสี จะใช้ผงฟอกสี (Fuller's earth) และผงถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เป็นตัวฟอก แล้วนำไปกรองโดยเครื่องกรอง (Filter press) ให้หมดสี

3.3.3 การกำจัดกลิ่น โดยการกลั่นด้วยไอน้ำ (Steam distillation) ภายใต้สุญญากาศ อุณหภูมิระหว่าง 140-230 องศาเซลเซียส ใช้เวลาระหว่าง 5-12 ชั่วโมง จะได้น้ำมันมะพร้าวบริสุทธิ์ออกมา (ณรงค์, 2550; นันทนา, 2528)



ภาพที่ 9 แผนภาพการกลั่นน้ำมันมะพร้าวให้บริสุทธิ์
ที่มา: นันทนา (2528)

ไบโอดีเซล

ไบโอดีเซล คือ น้ำมันที่ผลิตจากการนำน้ำมันพืชชนิดต่าง ๆ ไขมันสัตว์ หรือน้ำมันใช้แล้วจากการปรุงอาหารมาแปรรูป โดยผ่านกระบวนการทางเคมีกับแอลกอฮอล์ เช่น เมทานอล หรือเอทานอล และตัวเร่งปฏิกิริยา ภายใต้ภาวะอุณหภูมิสูงเพื่อเปลี่ยนไขมันให้เป็นเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน หรือเอทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน ขึ้นอยู่กับประเภทของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในกระบวนการผลิต ได้เป็นน้ำมันชนิดใหม่ที่อยู่ในรูปของเมทิลเอสเทอร์หรือเอทิลเอสเทอร์ที่สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ได้ ซึ่งคุณภาพของไบโอดีเซลอาจแตกต่างกันขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของกรดไขมันที่มีขนาดเล็กหรือใหญ่และจำนวนพันธะคู่ที่ไม่เท่ากัน ซึ่งจะมีผลต่อค่าสีเทนของน้ำมัน โดยมีกลีเซอรอลเป็นผลพลอยได้ที่สามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรมยาและอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง (บริษัท พาราไซแอนติฟิค จำกัด, 2547) โดยลักษณะสมบัติและค่าความร้อนของน้ำมันพืชชนิดต่างๆ เปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลแสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ลักษณะสมบัติและค่าความร้อนของน้ำมันพืชชนิดต่าง ๆ เปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล

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

ที่มา: คณะกรรมการพลังงาน (2545)

ไบโอดีเซลเหมาะที่จะเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกสำหรับประเทศไทย เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม และมักจะประสบปัญหาเรื่องราคาผลผลิตตกต่ำอยู่เรื่อย ๆ ประเทศไทยมีแหล่งวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลอยู่เป็นจำนวนมาก หากนำผลผลิตทางการเกษตรเหล่านั้นมาแปรรูปเป็นน้ำมันไบโอดีเซลเพื่อใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลในภาคเกษตร อย่างน้อยก็เป็นการลดค่าใช้จ่ายของภาครัฐในการนำเข้าเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ อีกทั้งยังช่วยให้พืชผลทางการเกษตรมีราคาสม่ำเสมออีกด้วย นอกจากเรื่องการลดการนำเข้าน้ำมันจากต่างประเทศแล้ว ไบโอดีเซลยังช่วยลดมลภาวะของอากาศ ช่วยลดมลพิษแม้ว่าจะผสมเข้ากับเชื้อเพลิงปิโตรเลียม และบรรเทาภาวะโลกร้อน (Greenhouse effect) ไบโอดีเซลนับเป็นหนึ่งในเชื้อเพลิงไม่กี่ชนิดที่สามารถทำงานร่วมกับดีเซลธรรมดาได้ ซึ่งนับเป็นข้อดีอีกอย่างหนึ่ง (กระทรวงพลังงาน, 2547; อาภาณี, 2549)

1. กระบวนการผลิตไบโอดีเซล

การผลิตไบโอดีเซลนั้นสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้โดยตรงและการผสม ไมโครอิมัลชัน กระบวนการแตกสลายด้วยความร้อน ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบต่าง ๆ และวิธีที่พัฒนาขึ้นในปัจจุบัน คือ การทำปฏิกิริยากับเมทานอลที่สภาวะเหนือวิกฤต (Khan, 2002)

1.1 การใช้โดยตรงและการผสม (Direct use and Blending)

การใช้โดยตรงและการผสม คือ การนำน้ำมันพืชบริสุทธิ์หรือการผสมน้ำมันพืชบริสุทธิ์กับน้ำมันดีเซลในอัตราส่วนต่าง ๆ ก่อนนำไปใช้กับเครื่องยนต์ดีเซล ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อเครื่องยนต์ เนื่องจากปัญหาจากการที่น้ำมันพืชมีความหนืดสูง อัตราส่วนของกรดและปริมาณกรดไขมัน การเกิดยางเหนียวจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ปฏิกิริยาพอลิเมอร์เซชันระหว่างการเก็บรักษาและการเผาไหม้ แต่จากการวิจัยของ Pramanik (2003) พบว่า การผสมน้ำมันสบู่ดำในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์ ลงในน้ำมันดีเซล สามารถนำไปใช้ในเครื่องยนต์ดีเซล โดยที่ไม่ก่อให้เกิดปัญหา อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังต้องใช้เวลาเพื่อศึกษาปัญหาของเครื่องยนต์ในระยะยาว (Agarwal, 2007)

1.2 ไมโครอิมัลชัน (Microemulsions)

ไมโครอิมัลชันเป็นวิธีที่ช่วยแก้ปัญหาเกี่ยวกับความหนืดสูงของน้ำมันพืช โดยใช้ตัวทำละลาย เช่น เมทานอล เอทานอล และ 1-บิวทานอล เนื่องจากไมโครอิมัลชัน คือ คอลลอยด์ที่กระจายตัวในสภาวะสมดุล โดยอนุภาคในคอลลอยด์ส่วนมากมีขนาดอยู่ในช่วง 1-150 นาโนเมตร ซึ่งเกิดจากการก่อรูปขึ้นเองจากของเหลวสองชนิดที่ไม่ละลายซึ่งกันและกัน ซึ่งน้ำมันที่ผลิตจากวิธีนี้จะมีลักษณะสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล แต่มีค่าสีเทนและค่าความร้อนต่ำกว่า (Srivastava and Prasad, 2000)

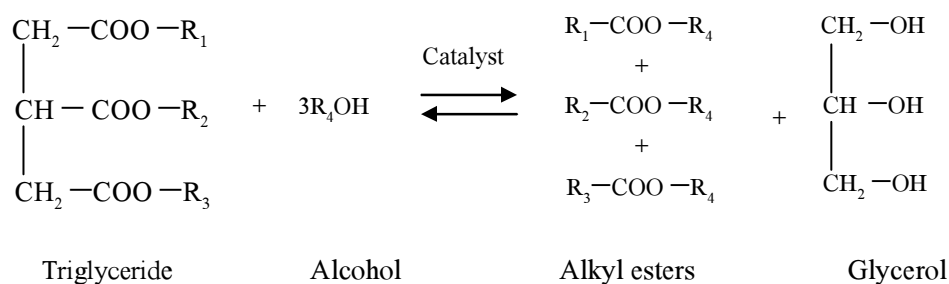
1.3 การแตกสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis หรือ Thermal Cracking)

การแตกสลายด้วยความร้อนเป็นการเปลี่ยนสารประกอบหนึ่งไปเป็นสารประกอบอื่น โดยการใช้ความร้อนหรือการใช้ความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น SiO_2 หรือ Al_2O_3 ที่อุณหภูมิ 450-600 องศาเซลเซียส ซึ่งใช้น้ำมันพืช ไขมันสัตว์ กรดไขมันธรรมชาติ หรือเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันเป็นวัตถุดิบ การนำไขมันมาผ่านกระบวนการแตกสลายด้วยความร้อนนั้นเกิดขึ้นมาเป็นเวลามากกว่า 100 ปี โดยเฉพาะในแหล่งที่ขาดแคลนปิโตรเลียม ซึ่งได้มีการคิดค้นกระบวนการแตกสลายด้วยความร้อนของไตรกลีเซอไรด์ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมกับเครื่องยนต์ดีเซล โดยไตรกลีเซอไรด์ที่ผ่านกระบวนการแตกสลายด้วยความร้อนจะเปลี่ยนเป็นสารประกอบที่มีขนาดเล็กลง เช่น อัลเคน อัลคีน อะโรมาติก และกรดคาร์บอกซิลิก (Agarwal, 2007)

1.4 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน (Transesterification หรือ Alcoholysis)

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันพืชหรือสัตว์และแอลกอฮอล์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งสามารถใช้ได้ทั้งเอนไซม์ กรด และเบส ได้เป็นสารประกอบเอสเทอร์ที่มีลักษณะสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล ซึ่งแอลกอฮอล์ที่สามารถใช้ในปฏิกิริยานี้ได้ คือ เมทานอล เอทานอล โพรพานอล บิวทานอล และเอมิลแอลกอฮอล์ เนื่องจากปฏิกิริยาเป็นแบบย้อนกลับ ดังนั้นการเติมแอลกอฮอล์ที่มากเกินไปจะเป็นการบังคับปฏิกิริยาให้เปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ โดยจะเรียกชนิดของไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์ตามชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ทำปฏิกิริยา เช่น ถ้าใช้เมทานอลจะเรียกเมทิลเอสเทอร์ ถ้าเป็นเอทานอลเรียกเอทิลเอสเทอร์ นอกจากนี้ยังได้กลีเซอรอล

เป็นผลพลอยได้ซึ่งสามารถนำไปทำสบู่และอุตสาหกรรมต่อเนื่องในการผลิตเครื่องสำอาง (Agarwal, 2007; Xie *et al.*, 2007) ปฏิกริยาทั่วไปแสดงดังภาพที่ 10



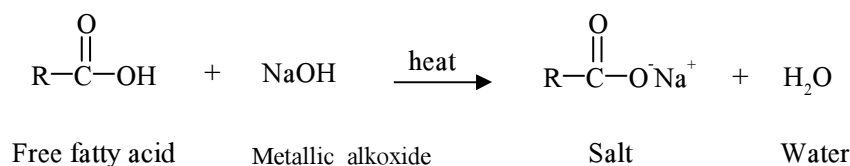
ภาพที่ 10 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์

ที่มา: Agarwal (2007)

ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Khan, 2002) ประกอบด้วยปฏิกริยาย่อย ๆ คือ

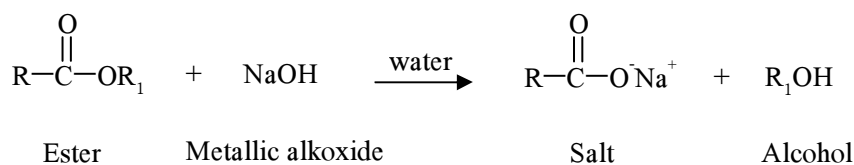
1.4.1 ปฏิกริยาสะปอนิฟิเคชัน (Saponification)

ปฏิกริยาสะปอนิฟิเคชันเป็นปฏิกริยาที่สร้างสบู่ขึ้น บางครั้งเรียกว่าอัลคาไลน์ ไฮโดรไลซิส (Alkaline hydrolysis) โดยมีสารตั้งต้น คือ กรดไขมันอิสระกับสารละลายเบส และให้ความร้อนกับปฏิกริยา หรือเอสเทอร์กับสารละลายเบสโดยมีน้ำร่วมในปฏิกริยา ซึ่งจะทำการเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์ไปเป็นกลีเซอรอลและสารประกอบเกลือของกรดคาร์บอกซิลิก แสดงดังภาพที่ 11 และ 12



ภาพที่ 11 ปฏิกริยาสะปอนิฟิเคชันจากกรดไขมันอิสระ

ที่มา: Khan (2002)

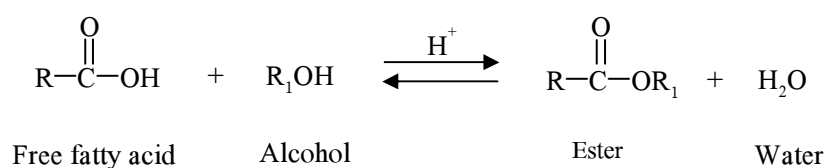


ภาพที่ 12 ปฏิกิริยาสaponification จากเอสเทอร์

ที่มา: Khan (2002)

1.4.2 ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (Esterification)

ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่สร้างเอสเทอร์ มีสารตั้งต้น คือ กรดคาร์บอกซิลิก (กรดไขมันอิสระ) และแอลกอฮอล์ โดยใช้กรดแก่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น กรดซัลฟิวริก กรดฟอสฟอริก และกรดไฮโดรคลอริก ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันแสดงดังภาพที่ 13

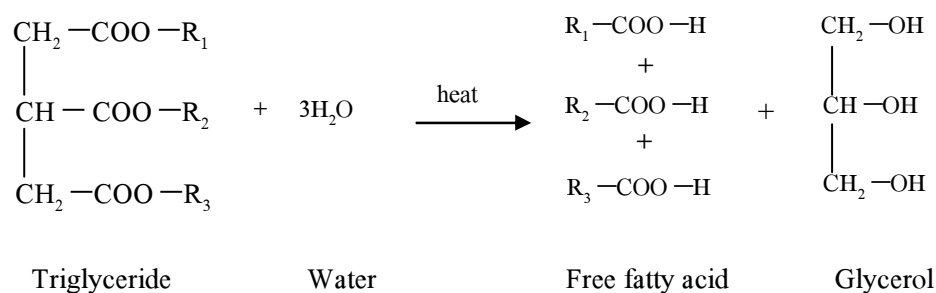


ภาพที่ 13 ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน

ที่มา: Khan (2002)

1.4.3 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเป็นปฏิกิริยาระหว่างกลีเซอไรด์กับน้ำที่อุณหภูมิและความดันสูง ซึ่งในโรงงานบางแห่งจะใช้ความดันระหว่าง 0.6-1.2 เมกะปาสกาล และอุณหภูมิ 21-260 องศาเซลเซียส โดยไม่ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ได้ผลิตภัณฑ์ คือ กรดไขมันอิสระและกลีเซอรอล ดังภาพที่ 14

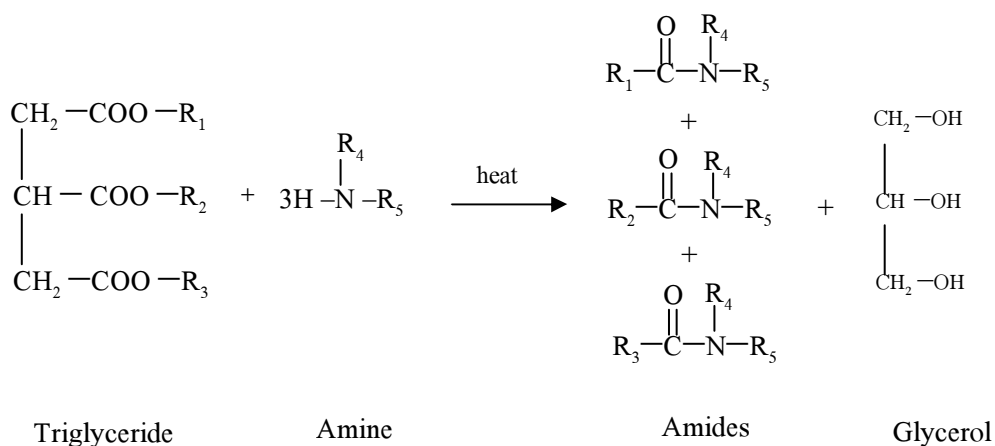


ภาพที่ 14 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์

ที่มา: Khan (2002)

1.4.4 ปฏิกิริยาอะมิโนไลซิส (Aminolysis)

ปฏิกิริยาอะมิโนไลซิสเป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของกลีเซอไรด์และเอมีน ไดเอไมด์และกลีเซอรอล และจากนั้นเอสเทอร์จะเกิดจากการเติมหมู่นิวคลีโอฟิลิกที่ไปแทนที่เอซิลคาร์บอนอะตอมของเอไมด์ ปฏิกิริยานี้จะเป็นไปอย่างช้า ๆ ดังภาพที่ 15



ภาพที่ 15 ปฏิกิริยาอะมิโนไลซิสของไตรกลีเซอไรด์

ที่มา: Khan (2002)

2. ตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

2.1 การใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น กรดซัลฟิวริก กรดฟอสฟอริก กรดไฮโดรคลอริก และกรดซัลโฟนิก เป็นต้น การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ คือ น้ำมันไบโอดีเซลในปริมาณมาก แต่ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานาน ใช้อุณหภูมิสูง และใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันสูง เหมาะสำหรับกลีเซอรอลที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระและน้ำสูง (Xie *et al.*, 2007)

2.2 การใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมเมทอกไซด์ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น โดยจะมีการเร่งปฏิกิริยาที่เร็วกว่าและเกิดการกักต่อน้อยกว่า การใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้นี้ยังให้ผลิตภัณฑ์ คือ น้ำมันไบโอดีเซลในปริมาณที่สูง จึงมักนิยมใช้วิธีการนี้มากในการผลิตไบโอดีเซล แต่การใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาก็มีข้อเสีย คือ ถ้าในน้ำมันมีกรดไขมันอิสระสูง และมีน้ำอยู่ในระบบของการเกิดปฏิกิริยาในปริมาณมาก จะทำให้เกิดปฏิกิริยาสaponification และได้สบู่เป็นผลิตภัณฑ์ซึ่งทำให้การแยกเอสเทอร์และกลีเซอรอลทำได้ยาก (Ma and Hanna, 1999; Xie *et al.*, 2007)

2.3 การใช้เอนไซม์ไลเปสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แม้ว่ากระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยมีกรดหรือเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะมีระดับการเปลี่ยนไขมันเป็นเมทิลเอสเทอร์ที่สูงในระยะเวลาอันสั้น แต่ก็พบว่าข้อเสียหลายประการ เช่น การแยกกลีเซอรอลทำได้ยาก มีการรบกวนของกรดไขมันอิสระและน้ำในปฏิกิริยา และจำเป็นต้องทำการบำบัดน้ำเสียในภายหลัง การใช้เอนไซม์ไลเปสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันนั้นสามารถแก้ปัญหาที่เกิดจากการใช้กรดหรือเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ และสามารถแยกกลีเซอรอลออกมาได้ง่าย รวมทั้งมีการเกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ แต่ในทางกลับกันการใช้เอนไซม์ไลเปสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาก็มีต้นทุนในการผลิตสูงและต้องควบคุมสภาวะในการเกิดปฏิกิริยาเป็นอย่างดีเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (บริษัท พาราไซแอนติฟิค จำกัด, 2547)

2.4 การใช้เมทานอลในสถานะเหนือวิกฤต (Supercritical methanol) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทำให้ความร้อนเริ่มต้นกับน้ำมันที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปทำปฏิกิริยากับเมทานอลในสถานะเหนือวิกฤตเป็นเวลา 4 นาที วิธีนี้มีข้อดี คือ ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เนื่องจากไม่มีของเสียจากกระบวนการผลิต แต่อย่างไรก็ตามต้องใช้

อุณหภูมิและความดันในระดับที่ค่อนข้างสูง เพื่อให้เมทานอลอยู่ในสถานะเหนือวิกฤต (บริษัท พาราไซแอนติฟิค จำกัด, 2547)

2.5 การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิพันธุ์ (Heterogeneous catalyst) ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิพันธุ์ คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในสถานะวัฏภาคที่แตกต่างกันกับสารตั้งต้น โดยส่วนใหญ่ตัวเร่งปฏิกิริยามักอยู่ในสถานะของแข็ง ในขณะที่สารตั้งต้นอยู่ในสถานะของเหลวหรือแก๊ส ตัวอย่างของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิพันธุ์ เช่น CsX zeolites, Anionic clays, Calcium carbonate rock, EST-10, Li/CaO ZrO_2 และ KNO_3/ZrO_2 เป็นต้น การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาศิลินนี้จะช่วยลดปัญหาจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ซึ่งยากต่อการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์นั้นอยู่ในสถานะเดียวกันกับสารที่ทำปฏิกิริยา และการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ในการผลิตไบโอดีเซลนั้นยังต้องใช้น้ำล้างเพื่อแยก และทำความสะอาดตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนให้เกิดน้ำเสียปริมาณมาก ดังนั้น การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิพันธุ์จึงช่วยให้สามารถแยกผลิตภัณฑ์ และสารตั้งต้นออกจากตัวเร่งปฏิกิริยาได้ทันที เป็นการลดต้นทุนในการผลิตและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังช่วยแก้ปัญหาการเกิดสบู่ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ชนิดเบสเป็นตัวเร่งในระบบที่มีน้ำในปฏิกิริยา (สมชัย, 2546; Xie *et al.*, 2007)

3. มาตรฐานไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลที่กล่าวกันโดยทั่วไป หมายถึง ไบโอดีเซลบริสุทธิ์ จะใช้สัญลักษณ์ B100 หมายถึง น้ำมันเชื้อเพลิงที่มีไบโอดีเซลอย่างเดียว แต่ถ้าเป็นไบโอดีเซลผสมจะใช้สัญลักษณ์ BXX หมายถึง น้ำมันเชื้อเพลิงที่ประกอบด้วยไบโอดีเซลร้อยละ XX และดีเซลร้อยละ 100-XX เช่น B 20 จะหมายถึงน้ำมันเชื้อเพลิงที่ประกอบไบโอดีเซล 20 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับน้ำมันดีเซล 80 เปอร์เซ็นต์

คุณภาพของไบโอดีเซลนอกจากจะขึ้นกับกระบวนการผลิตแล้ว ยังขึ้นกับชนิดของน้ำมันพืชและไขมันสัตว์ที่ใช้ เนื่องจากน้ำมันพืชและไขมันสัตว์แต่ละชนิดจะประกอบด้วยกรดไขมันประเภทต่าง ๆ ในปริมาณสัดส่วนที่ต่างกัน โดยทั่วไปกรดไขมันที่พบในไบโอดีเซลจะมีสายโซ่คาร์บอนมากกว่า 10 ชนิด คือ มีคาร์บอน C 12-C 22 และ 90 เปอร์เซ็นต์ จะเป็นกรดไขมันที่มีสายโซ่คาร์บอนซึ่งมีความยาว 16-18 โมเลกุล ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปของกรดไขมันอิ่มตัว กรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยว หรือกรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงพหุ โดยชนิดและปริมาณที่ต่างกันนี้จะมีอิทธิพลต่อลักษณะสมบัติของไบโอดีเซลที่ได้

ดังนั้น ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจะต้องมีการควบคุมลักษณะสมบัติต่าง ๆ ให้เป็นไปตามข้อกำหนดต่าง ๆ ที่ตั้งไว้ เช่น American society for testing and material (ASTM) ดังแสดงในตารางผนวกที่ ก1 The european standard (EN) ดังแสดงในตารางผนวกที่ ก2 ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ.2548 ของกรมธุรกิจพลังงาน ดังแสดงในตารางผนวกที่ ก3 ซึ่งกำหนดตามมาตรฐาน EN 14214 ของสหภาพยุโรป และ The german standard (DIN) ดังแสดงในตารางผนวกที่ ก4 ไม่ว่าข้อกำหนดของประเทศใดก็ตามจะพิจารณาถึงการนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ไม่ก่อให้เกิดความเสียหายในการใช้งาน มีความปลอดภัย และไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งมาตรฐานไบโอดีเซลนั้นประกอบด้วย (ศิริวรรณ, 2550; สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2550; อ่ำพล และสาพันธ์, 2545)

4.1 ปริมาณเมทิลเอสเทอร์และกรดกลีโกลนิเกนเมทิลเอสเทอร์ (สัดส่วนของปริมาณกรดกลีโกลนิเกนเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันทั้งหมด) ซึ่งจะแตกต่างกันไปขึ้นกับชนิดของน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ที่ใช้

4.2 ค่าความหนาแน่น เนื่องจากการฉีดเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์นั้นจะวัดค่าในรูปปริมาตร ดังนั้น ค่าความหนาแน่นจึงเป็นค่าที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ โดยแสดงเป็นน้ำหนักของเชื้อเพลิงต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่อุณหภูมิคงที่

4.3 ค่าความหนืด เป็นค่าที่มีผลต่อการทำงานของปั๊มและหัวฉีดของเครื่องยนต์ ซึ่งถ้าเชื้อเพลิงมีความหนืดน้อยหรือมากเกินไป จะทำให้หัวฉีดนั้นฉีดน้ำมันเป็นฝอยได้ไม่ดีเกิดผลเสียต่อการเผาไหม้ โดยค่านี้จะแสดงถึงความต้านทานการเปลี่ยนรูปร่างจากการเคลื่อนที่ของของไหลอันเกิดจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล

4.4 จุดวาบไฟ เป็นอุณหภูมิต่ำสุดของน้ำมันที่ทำให้เกิดไอน้ำมันเป็นปริมาณมากพอ และเมื่อสัมผัสกับเปลวไฟก็จะทำให้ลุกไหม้ทันที จุดวาบไฟไม่มีผลต่อคุณภาพหรือการใช้งานโดยตรง หากแต่เป็นข้อกำหนดทางกฎหมายเพื่อความปลอดภัยจากการเกิดอัคคีภัยในการเก็บรักษาและการขนส่ง เพราะถ้าเกินอุณหภูมิจุดนี้ไปแล้วจะเป็นจุดติดไฟ

4.5 ปริมาณกำมะถัน ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงที่มีปริมาณกำมะถันต่ำ เนื่องจากน้ำมันพืชดิบที่ใช้ในการผลิตมักมีองค์ประกอบของกำมะถันต่ำกว่า 15 พีพีเอ็ม องค์ประกอบกำมะถันใน

น้ำมันเมื่อถูกเผาไหม้จะเปลี่ยนเป็นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งถูกปล่อยออกมาพร้อมไอเสียจากเครื่องยนต์ และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

4.6 ปริมาณกากถ่าน มีความสัมพันธ์กับปริมาณกลีเซอรอล กรดไขมันอิสระ สบู่ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ยังหลงเหลืออยู่ในไบโอดีเซล หากมีปริมาณกากถ่านสูงกว่าข้อกำหนด ชีบอกลังว่ายังคงมีสารต่าง ๆ ที่กีดขวางชั้นหลงเหลืออยู่ในไบโอดีเซล นอกจากนั้นยังแสดงถึงแนวโน้มของปริมาณกากถ่านที่เหลืออยู่หลังจากการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ กากถ่านมีผลต่อการอุดตันในหัวฉีดหรือที่ลูกสูบทำให้กำลังของเครื่องยนต์ลดลง เครื่องยนต์สกปรกและต้องเปลี่ยนถ่ายน้ำมันเครื่องบ่อยครั้ง

4.7 จำนวนซีเทน เป็นค่าที่บอถึงความสามารถในการจุดระเบิดและการลุกติดไฟได้เร็ว ซึ่งมีผลต่อการสตาร์ทติดของเครื่องยนต์ การเผาไหม้ และปริมาณมลพิษในไอเสีย เชื้อเพลิงที่มีจำนวนซีเทนสูงจะทำให้การติดเครื่องยนต์ง่าย ไม่เกิดการน็อคในเครื่องยนต์ และเป็นการประหยัดการใช้เชื้อเพลิงด้วย ไบโอดีเซลที่ผลิตจากวัตถุดิบที่มีกรดไขมันอิ่มตัวจะให้จำนวนซีเทนสูงถึง 70 แต่ถ้าเป็นเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัว เช่น C 18:2 และ C18:3 จะให้จำนวนซีเทนต่ำ

4.8 ปริมาณเถ้าซัลเฟต เถ้าซัลเฟตเกิดจากการเผาไหม้ของสารปนเปื้อนในไบโอดีเซลเนื่องมาจากการตกค้างของสบู่ และตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณเถ้าซัลเฟตมีผลต่อการอุดตันในเครื่องยนต์

4.9 ปริมาณน้ำ ปริมาณน้ำในน้ำมันทำให้การเผาไหม้ไม่ดี นอกจากนั้นน้ำในไบโอดีเซลยังเป็นสาเหตุให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลติกระหว่างน้ำกับเอสเตอร์ เกิดเป็นกรดไขมันอิสระ ซึ่งส่งผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องยนต์ และเป็นตัวเร่งให้เกิดการเจริญของจุลินทรีย์ในถังเก็บน้ำมัน ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้หัวฉีดอุดตัน

4.10 สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด สารปนเปื้อนในไบโอดีเซลส่วนใหญ่เป็นผลมาจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชันและปฏิกิริยาข้างเคียง เช่น ปฏิกิริยาการเกิดสบู่ของกรดไขมันอิสระและตัวเร่งปฏิกิริยาเบส ได้แก่ ไขมันที่ไม่อยู่ในรูปกลีเซอรอล กรดไขมันอิสระ สารประกอบไฮโดรคาร์บอน แอลกอฮอล์อย่างแข็ง สารประกอบแคโรทีน วิตามิน และอื่น ๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติของวัตถุดิบน้ำมันพืชเริ่มต้น โดยทั่วไปสิ่งปนเปื้อนทั้งหมดจะถูกกำจัดออกจากไบโอดีเซลในขั้นตอนการล้าง สิ่งปนเปื้อนในไบโอดีเซลมีผลเสียต่อเครื่องยนต์หลายด้าน เช่น ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลระหว่างการเก็บรักษา เนื่องจากสารประกอบ

ที่ไม่เสถียรภาพเปลี่ยนสภาพกลายเป็นสารที่มีผลในการลดความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซล

4.11 การกักกร่อนแผ่นทองแดง แสดงการกักกร่อนของน้ำมันต่อโลหะที่ใช้เป็นชิ้นส่วนในเครื่องยนต์ดีเซลเนื่องจากปริมาณกรด เช่น กรดไขมันอิสระ และสารประกอบซัลเฟอร์ในน้ำมัน ซึ่งค่าการกักกร่อนนี้มีผลต่อการทำงานของเครื่องยนต์

4.12 ความเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันถือเป็นปัจจัยสำคัญในการประเมินคุณภาพของน้ำมัน ไขมัน รวมถึงไบโอดีเซล เนื่องจากไบโอดีเซลผลิตจากน้ำมันพืชจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัวกับออกซิเจนในอากาศซึ่งมีผลต่อเสถียรภาพในการเก็บรักษา

4.13 ค่าความเป็นกรด แสดงถึงกรดไขมันอิสระในน้ำมันซึ่งเกิดจากการสลายตัวของไตรกลีเซอไรด์ทางเคมี โดยแสดงเป็นจำนวนของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในหน่วยมิลลิกรัม ที่ทำให้กรดไขมันอิสระในน้ำมันจำนวน 1 กรัมสะเทินพอดี

4.14 ค่าไอโอดีน ค่าไอโอดีนแสดงพันธะคู่ในน้ำมัน ซึ่งเป็นลักษณะสมบัติเฉพาะของน้ำมันพืชที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล ค่าไอโอดีนต่ำแสดงถึงการมีส่วนกรดไขมันอิ่มตัวในโครงสร้างไบโอดีเซลสูง ทำให้ไม่มีแนวโน้มในการเกิดออกซิเดชัน นอกจากนี้ค่าไอโอดีนยังมีความสัมพันธ์กับจุดหมอกควัน ซึ่งแสดงถึงอุณหภูมิที่น้ำมันเริ่มเกิดไขหรือจับตัวเป็นก้อนแข็ง ไบโอดีเซลที่มีค่าไอโอดีนต่ำจะมีจุดหมอกควันสูงซึ่งมีผลต่อการใช้งานสภาพอากาศเย็น

4.15 ปริมาณกรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์ แสดงถึงพันธะคู่ในไบโอดีเซลหรือความไม่อิ่มตัวของไบโอดีเซล ซึ่งมีแนวโน้มทำให้เกิดพอลิเมอร์ในเครื่องยนต์ ทำให้เกิดการอุดตันและการเสื่อมสภาพของน้ำมันเครื่อง ปริมาณกรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์นี้ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันพืชที่เลือกมาใช้เป็นวัตถุดิบ

4.16 ปริมาณเมทานอล เป็นสารตั้งต้นที่เหลือจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งจำเป็นต้องกำจัดออกให้หมดก่อนนำไบโอดีเซลออกจำหน่าย จึงต้องมีปริมาณค่าในผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซล จุลวบน้ำฟ้านค่าของไบโอดีเซล คือ 120 องศาเซลเซียส เมทานอลนั้นมีค่าจุลวบน้ำฟ้านค่า ถ้ายังมี

เมทานอลปะปนอยู่ในไบโอดีเซลจะทำให้ไบโอดีเซลมีจุดวาบไฟต่ำลงด้วย ซึ่งมีผลต่อความปลอดภัยในการเก็บรักษา การขนส่ง และการนำมาใช้ในเครื่องยนต์

4.17 ปริมาณโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ แสดงถึงความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซล ปริมาณโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ที่เหลือจากการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ไม่สมบูรณ์ส่งผลให้เกิดการอุดตันบริเวณหัวฉีด กระบอกสูบ และวาล์วภายในเครื่องยนต์

4.18 กลีเซอรินอิสระ ปริมาณกลีเซอรินที่ยังเหลืออยู่ในไบโอดีเซล เนื่องมาจากการแยกกลีเซอรินไม่สมบูรณ์ ทำให้มีปัญหาการแยกชั้นของกลีเซอรินในการจัดเก็บไบโอดีเซล รวมถึงการสะสมที่บริเวณด้านล่างของถังน้ำมัน กลีเซอรินมีผลต่อการอุดตันที่หัวฉีดและระบบลำเลียงน้ำมัน

4.19 กลีเซอรินทั้งหมด คือ ปริมาณของกลีเซอรินอิสระ และปริมาณกลีเซอรินใน โมเลกุลโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ ที่เจือปนในองค์ประกอบไบโอดีเซล ซึ่งเป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันไม่สมบูรณ์ มีผลก่อให้เกิดการอุดตันที่บริเวณหัวฉีดและไส้กรอง และปัญหาการใช้งานในสภาพอากาศเย็น

4.20 โลหะกลุ่ม 1 (โซเดียมและโพแทสเซียม) และโลหะกลุ่ม 2 (แคลเซียมและแมกนีเซียม) เป็นการวัดปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเบส สบู่ และโลหะหนัก จากน้ำที่ใช้ในขั้นตอนการล้างไบโอดีเซลที่หลงเหลือในผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซล แคลเซียมยังมีคุณสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีสำหรับกระบวนการพอลิเมอไรส์ของเอสเทอร์อีกด้วย

4.21 ฟอสฟอรัส เป็นสารที่ปนเปื้อนอยู่ในวัตถุดิบน้ำมันพืชตั้งแต่เริ่มต้น หากไม่ทำการกำจัดออกจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล จะทำให้ไบโอดีเซลที่ผลิตได้มีฟอสฟอรัสปะปนอยู่ด้วย ซึ่งจะทำให้ความเสียหายให้กับอุปกรณ์ Catalytic converter ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมการแพร่มลพิษ จากการที่มาตรฐานของการแพร่มลพิษเป็นกฎข้อบังคับมากขึ้นอุปกรณ์ Catalytic converter จึงเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญที่ใช้ในเครื่องยนต์ดีเซล

4.22 สารเติมแต่ง สารเติมแต่งนั้นมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน การที่จะใช้สารเติมแต่งชนิดใดบ้างผสมในไบโอดีเซลขึ้นกับคุณภาพของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ และลักษณะสมบัติที่ต้องการเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งาน

นอกจากนี้ข้อกำหนดคุณภาพไบโอดีเซลจะบอกถึงวิธีทดสอบมาตรฐานที่ใช้ทุกข้อกำหนด ซึ่งในวิธีทดสอบจะกำหนดเครื่องมือที่ใช้ ขั้นตอนการทดสอบอย่างละเอียด วิธีการรายงานผล รวมทั้งความแตกต่างระหว่างผลการทดสอบที่ยอมรับได้ เพื่อให้ค่าที่ทดสอบได้มีความละเอียด น่าเชื่อถือ

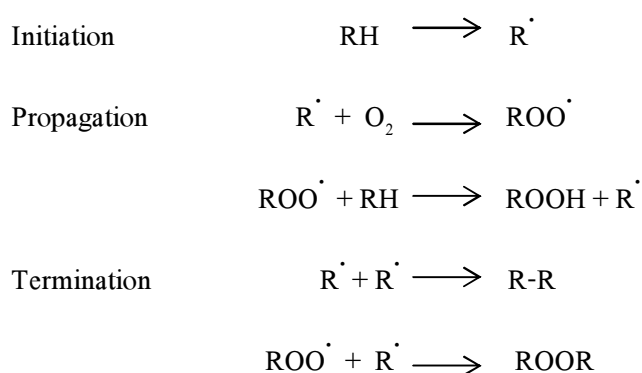
ปฏิกิริยาออกซิเดชัน

1. ปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลเป็นพลังงานทางเลือกที่สามารถนำมาใช้ทดแทนน้ำมันดีเซล และมีลักษณะสมบัติที่สำคัญ คือ สามารถย่อยสลายได้เองตามกระบวนการชีวภาพในธรรมชาติ และสามารถลดมลพิษในอากาศอันเนื่องมาจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์สมบูรณ์ นอกจากนี้การใช้ไบโอดีเซลในเครื่องยนต์ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ เนื่องจากไบโอดีเซลมีออกซิเจนผสมอยู่ประมาณร้อยละ 10 ทำให้การผสมระหว่างอากาศกับน้ำมันมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และเป็นการเพิ่มอัตราส่วนปริมาตรของอากาศต่อน้ำมันได้เป็นอย่างดี แต่ไบโอดีเซลก็มีข้อเสีย คือ มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันมากกว่าน้ำมันดีเซล เนื่องจากไบโอดีเซลผลิตจากน้ำมันพืชที่มีองค์ประกอบเป็นกรดไขมันอิ่มตัวและไม่อิ่มตัว ซึ่งกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวนี้จะมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเมื่อสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ ส่งผลให้สภาพของไบโอดีเซลเปลี่ยนไป เกิดเป็นสารประกอบอื่น ๆ ขึ้น เช่น แอลกอฮอล์ซึ่งทำให้จุดวาบไฟของไบโอดีเซลลดลง กรดซึ่งทำให้ค่าความเป็นกรดในไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น และสารประกอบพอลิเมอร์ที่เป็นยางเหนียวซึ่งทำให้ไบโอดีเซลมีความหนืดมากขึ้น และอุดตันหัวฉีดน้ำมันของเครื่องยนต์ดีเซล (คณะกรรมาธิการพลังงาน, 2545; Sarin *et al.*, 2007)

ปฏิกิริยาออกซิเดชันแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ Initiation, Propagation และ Termination ดังแสดงในภาพที่ 16 โดยในขั้นตอน Initiation นั้นเมื่อไบโอดีเซลสัมผัสกับความร้อนจะทำให้เกิดการแตกตัวของโมเลกุลตรงพันธะคู่ของกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวเกิดเป็นสารอนุมูลอิสระขึ้น จากนั้นในขั้นตอน Propagation อนุมูลอิสระนี้ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน จะเกิดเป็นอนุมูลอิสระที่อยู่ในรูปของเปอร์ออกไซด์ซึ่งจะดึงไฮโดรเจนจากโมเลกุลของกรดไขมันเมื่อทำให้อนุมูลอิสระนี้เสถียร เกิดเป็นไฮโดรเปอร์ออกไซด์และอนุมูลอิสระอีกตัวหนึ่ง และในขั้นตอน Termination อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้น

ใหม่นี้จะสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในขั้นตอน Propagation เกิดเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ของสารต้านอนุมูลอิสระ หรือทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระอื่น ๆ เกิดเป็นสารประกอบ เช่น อัลดีไฮด์ แอลกอฮอล์ กรดคาร์บอนิก และคีโตน เป็นต้น และเมื่อสารประกอบเหล่านี้ทำปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันจะเกิดเป็นสารประกอบโพลิเมอร์ ทำให้ไบโอดีเซลมีลักษณะสมบัติที่ไม่เป็นไปตามมาตรฐาน EN 14214 โดยเฉพาะค่าความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันตามวิธีทดสอบ EN 14112 ที่กำหนดให้มีความมากกว่า 6 ชั่วโมง (Sarin *et al.*, 2007; University of Idaho, 2007)



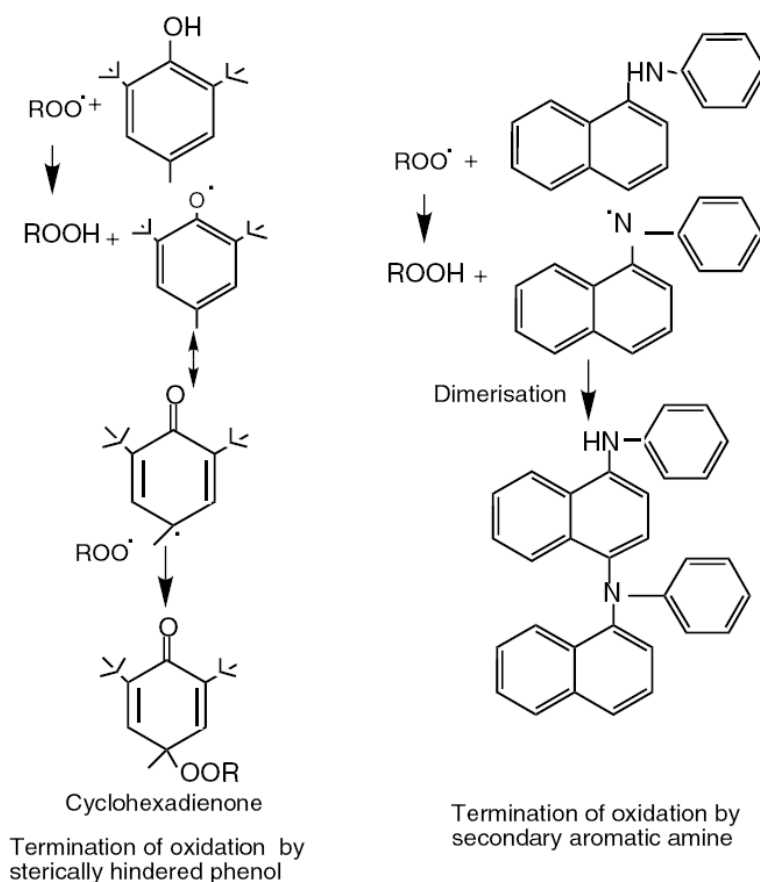
ภาพที่ 16 ปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซล

ที่มา: Sarin *et al.* (2007)

2. สารต้านอนุมูลอิสระ

การเติมสารต้านอนุมูลอิสระเป็นวิธีหนึ่งในการปรับปรุงความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซล ให้มีค่าความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันเป็นไปตามมาตรฐาน EN 14112 ซึ่งสารต้านอนุมูลอิสระนั้นเป็นสารเคมีที่ช่วยป้องกันหรือลดความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซล โดยสามารถแบ่งสารต้านอนุมูลอิสระเป็น 2 ประเภท คือ สารที่ยับยั้งปฏิกิริยาลูกโซ่ของสารอนุมูลอิสระ (Chain breaker) และสารที่ช่วยกำจัดไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide decomposer) ที่ทำการป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยสารต้านอนุมูลอิสระจะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเปอร์ออกไซด์และเปลี่ยนไฮโดรเปอร์ออกไซด์เป็นแอลกอฮอล์ ส่วนสารต้านอนุมูลอิสระที่ถูกออกซิไดส์จะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของโมเลกุลที่ไม่ทำให้ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลลดลง ซึ่งประเภทของสารต้านอนุมูลอิสระที่นิยมใช้ในปัจจุบัน คือ สารที่ยับยั้งปฏิกิริยาลูกโซ่ของสารอนุมูลอิสระ

สารต้านอนุมูลอิสระที่ช่วยยับยั้งปฏิกิริยาลูกโซ่ของสารอนุมูลอิสระแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทฟีนอลิก (Phenolic-type) และประเภทอะมินิก (Aminic-type) ซึ่งสารต้านอนุมูลอิสระประเภทที่นิยมใช้ คือ ประเภทฟีนอลิก โดยกลไกของสารต้านอนุมูลอิสระแสดงดังภาพที่ 17 สารต้านอนุมูลอิสระนั้นประกอบด้วยไฮโดรเจนที่มีความอ่อนไหวในการทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระที่อยู่ในรูปของเปอร์ออกไซด์ได้ดีกว่ากรดไขมันและเอสเทอร์ ทำให้อนุมูลอิสระนั้นเสถียร ส่วนสารต้านอนุมูลอิสระที่สูญเสียไฮโดรเจนจะทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระอีกโมเลกุลหนึ่งเพื่อทำให้เกิดความเสถียร ดังนั้นสารต้านอนุมูลอิสระจึงช่วยยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันลูกโซ่ (Sarim *et al.*, 2007; Waynick, 2005)



ภาพที่ 17 กลไกของสารต้านอนุมูลอิสระ

ที่มา: Sarim *et al.* (2007)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Mittelbach and Gangl (2001) ได้ศึกษาการเสถียรภาพทางกายภาพและทางเคมีของ ไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดเรพและน้ำมันใช้แล้ว หลังจากจัดเก็บเป็นระยะเวลานานในสภาวะที่แตกต่างกัน 6 สภาวะ คือ ตัวอย่างที่ 1-4 จัดเก็บในขวดโพลีเอทิลีน โดยตัวอย่างที่ 1 ขวดไบโอดีเซลจะเปิดฝาและเก็บในที่มืด ตัวอย่างที่ 2 ขวดจะปิดฝาและเก็บในที่มืด ตัวอย่างที่ 3 ขวดจะเปิดฝาและเก็บในที่มืด ส่วนตัวอย่างที่ 4 ขวดจะปิดฝาและเก็บในที่มืด สำหรับตัวอย่างที่ 5 และ 6 นั้นเก็บในกระป๋องตะกั่ว ซึ่งตัวอย่างที่ 5 กระป๋องจะเปิดฝา และตัวอย่างที่ 6 กระป๋องจะปิดฝา โดยจะทำการทดสอบลักษณะสมบัติต่าง ๆ และวัดค่าความเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซล ที่มีหน่วยเป็นชั่วโมง โดยพบว่า ลักษณะสมบัติต่าง ๆ ของไบโอดีเซลเป็นไปตามมาตรฐาน DIN 51606 ยกเว้นความหนาแน่นและปริมาณน้ำของไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้วและน้ำมันใช้แล้วที่ผ่านการกลั่น และความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วมีค่ามากที่สุด คือ 5.90 ชั่วโมง รองลงมา คือ ไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดเรพ และไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วที่ผ่านการกลั่น ที่มีความเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเท่ากับ 5.60 และ 1.20 ชั่วโมง ตามลำดับ และหลังจากการจัดเก็บเป็นระยะเวลานาน พบว่า ค่าความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลนั้นลดลงอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะไบโอดีเซลในขวดที่เปิดฝาและโดนแดด ซึ่งไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดเรพและน้ำมันใช้แล้วที่เก็บในสภาวะนี้จะมีค่าความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันเท่ากับ 0 ชั่วโมง หลังจากจัดเก็บเป็นระยะเวลา 150 วัน ส่วนไบโอดีเซลที่เก็บในขวดที่ปิดฝาหลังจากจัดเก็บเป็นระยะเวลา 200 วัน พบว่า ค่าความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลนั้นลดลงเป็น 1-2 ชั่วโมง สำหรับไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดเรพ และลดลงเป็น 2-3 ชั่วโมง สำหรับไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้ว ส่วนไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้วที่ผ่านการกลั่น แม้ว่าจะจัดเก็บในขวดที่ปิดฝาและเก็บในที่มืด ความเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันก็ยังมีค่าต่ำ เนื่องจากไบโอดีเซลได้สูญเสียสารต้านอนุมูลอิสระจากกระบวนการกลั่น และจากการวัดความหนืด พบว่า ความหนืดของไบโอดีเซลในขวดที่เปิดฝาและโดนแดดเพิ่มขึ้นเร็วกว่าไบโอดีเซลที่เก็บในสภาวะอื่น ๆ เนื่องจากเกิดสารประกอบโพลิเมอร์จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน

Dunn (2005) ได้ศึกษาประสิทธิภาพในการลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลืองของสารต้านอนุมูลอิสระทั้ง 5 ชนิด คือ TBHQ, BHA, BHT, PrG และ Tocopherol โดยพบว่า PrG และ BHA มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการลดการเกิดปฏิกิริยา

ออกซิเดชันในไบโอดีเซล และ Tocopherol มีประสิทธิภาพน้อยที่สุด โดยการเพิ่มความเข้มข้นของสารต้านอนุมูลอิสระลงในไบโอดีเซล จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซล ซึ่งจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามความเข้มข้นของสารต้านอนุมูลอิสระที่ใช้ จนถึงความเข้มข้น 1,000 พีพีเอ็ม และเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นมากกว่า 1,000 พีพีเอ็ม และจากการทดสอบลักษณะสมบัติทางกายภาพของน้ำมันที่ผสมระหว่างน้ำมันดีเซลและไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลืองที่เติมสารต้านอนุมูลอิสระในปริมาณความเข้มข้นต่าง ๆ พบว่า BHA หรือ TBHQ ในปริมาณความเข้มข้นถึง 3,000 พีพีเอ็ม ช่วยป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซลระหว่างการจัดเก็บก่อนนำไปใช้งาน และ BHT จะมีความเหมาะสมเมื่อใช้ที่ความเข้มข้นต่ำ คือ 210 พีพีเอ็ม หลังจากผสมไบโอดีเซลกับน้ำมันดีเซล ส่วน PrG มีปัญหาเรื่องการละลายที่ไม่สมบูรณ์ในไบโอดีเซล เมื่อใช้อัตราส่วนผสมของไบโอดีเซลต่อน้ำมันดีเซลมาก ในขณะที่ Tocopherol นั้นสามารถละลายได้ดีในน้ำมันผสม แต่พบว่ามีประสิทธิภาพต่ำกว่าสารต้านอนุมูลอิสระอื่น ๆ

Ferrari *et al.* (2005) ได้ศึกษาความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซล ที่ผลิตจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันจากน้ำมันถั่วเหลืองแบบต่าง ๆ คือ น้ำมันถั่วเหลืองที่ผ่านการทำให้เป็นกลาง น้ำมันถั่วเหลืองผ่านกรรมวิธีกลั่นให้บริสุทธิ์ และน้ำมันถั่วเหลืองที่ผ่านการใช้แล้ว โดยทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Rancimat model 743 ที่อุณหภูมิ 100 และ 105 องศาเซลเซียส และใช้อัตราการไหลของอากาศ 20 ลิตรต่อชั่วโมง นอกจากนี้ยังทำการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันถั่วเหลือง และไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลืองด้วยวิธีแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas chromatography) โดยพบว่า องค์ประกอบกรดไขมันในน้ำมันถั่วเหลือง และในไบโอดีเซลหลังทำปฏิกิริยามีความใกล้เคียงกัน และไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลืองแบบต่าง ๆ มีความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันแตกต่างกัน โดยไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลืองที่ผ่านการทำให้เป็นกลางจะมีความเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันดีที่สุด รองลงมา คือ ไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลืองผ่านกรรมวิธีกลั่นให้บริสุทธิ์ และไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลืองที่ผ่านการใช้แล้ว ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากในน้ำมันถั่วเหลืองที่ผ่านการทำให้เป็นกลางมีสารต้านอนุมูลอิสระตามธรรมชาติ เช่น Tocopherol อยู่เป็นจำนวนมาก ส่วนน้ำมันถั่วเหลืองผ่านกรรมวิธีกลั่นให้บริสุทธิ์นั้นสูญเสียสารต้านอนุมูลอิสระตามธรรมชาติ คือ วิตามินอี จากกระบวนการกำจัดกลิ่น ในขณะที่ไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลืองที่ผ่านการใช้แล้วนั้นถูกเร่งให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในไบโอดีเซล เนื่องจากการผ่านกระบวนการทางความร้อนและอุณหภูมิสูง

May *et al.* (2006) ศึกษาความเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันปาล์มกลั่น โดยนำตัวอย่างจำนวน 3 กรัม มาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Rancimat model 743 ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส และใช้อัตราการไหลของอากาศ 10 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งพบว่า ไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันปาล์มกลั่นมีองค์ประกอบของกรดไขมัน และลักษณะสมบัติของไบโอดีเซล เช่น ความหนาแน่น ความหนืด จุดวาบไฟ จุดหมอกควัน จำนวนซีเทน และค่าความเป็นกรดที่ใกล้เคียงกัน แต่มีความเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันต่างกัน โดยไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบมีความเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสูง คือ 25.70 ชั่วโมง ในขณะที่ไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มกลั่นมีความเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันต่ำ คือ 3.52 ชั่วโมง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากในน้ำมันปาล์มดิบประกอบไปด้วยวิตามินอี ซึ่งเป็นสารต้านอนุมูลอิสระตามธรรมชาติเป็นจำนวนมากถึง 600 พีพีเอ็ม แต่ในน้ำมันปาล์มกลั่นมีวิตามินอีเป็นส่วนประกอบน้อยกว่า 50 พีพีเอ็ม ด้วยเหตุนี้ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบจึงมีความเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็นไปตามมาตรฐาน EN 14214 ที่กำหนดให้มีความเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันมีค่ามากกว่า 6 ชั่วโมง งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาอิทธิพลของสารต้านอนุมูลอิสระจากธรรมชาติและสังเคราะห์ คือ Tocopherol, BHT และ TBHQ ต่อไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มกลั่น จากการทดลอง พบว่า Tocopherol ปริมาณ 1,000 พีพีเอ็ม และ 3,000 พีพีเอ็ม ช่วยให้ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นจาก 3.52 ชั่วโมงเป็น 6.42 ชั่วโมง และ 11.20 ชั่วโมง ดังนั้น Tocopherol ปริมาณ 0.1 เปอร์เซ็นต์ จึงช่วยให้ความเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันมีค่ามากกว่า 6 ชั่วโมง ส่วนสารต้านอนุมูลอิสระสังเคราะห์ คือ BHT และ TBHQ มีอิทธิพลต่อความเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันดีกว่า Tocopherol ซึ่งเป็นสารต้านอนุมูลอิสระธรรมชาติ โดย BHT และ TBHQ ปริมาณ 50 พีพีเอ็ม ให้ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันเพิ่มขึ้นเป็น 6.17 ชั่วโมง และ 8.85 ชั่วโมง

Mccormick *et al.* (2007) ทำการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันใช้แล้ว และไขมันวัว โดยทำการทดสอบการเกิดสารที่ไม่สามารถละลายได้ตามมาตรฐาน ASTM D2274 และทดสอบความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันด้วยเครื่อง Rancimat model 743 ตามมาตรฐาน EN 14112 โดยพบว่า ผลจากการทดสอบความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลด้วยเครื่อง Rancimat model 743 และผลจากการทดสอบตามวิธีทดสอบ D2274 ไม่ค่อยสัมพันธ์กัน เนื่องจากวิธีทดสอบ D2274 นั้นไบโอดีเซลจะถูกเก็บไว้เป็นระยะเวลาจนปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้เกิดโพลิเมอร์หรือพอลิเมอร์ซึ่งเป็นสารที่ไม่สามารถละลายในไบโอดีเซลขึ้น ในขณะที่วิธีทดสอบด้วยเครื่อง

Rancimat model 743 จะทำการวัดเวลาที่ไบโอดีเซลเริ่มได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส จนเริ่มเกิดสารประกอบที่ระเหยได้ง่ายจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังนั้น วิธีทดสอบด้วยเครื่อง Rancimat model 743 จึงมีความเหมาะสมมากกว่าในการทดสอบความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน ปริมาณโลหะในไบโอดีเซลก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่คณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษา โดยพบว่าไบโอดีเซลที่มีปริมาณโลหะ คือ ทองแดง เหล็ก และสังกะสีมากกว่า 6 พีพีเอ็ม จะมีค่าความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันต่ำ และปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวในไบโอดีเซลมีอิทธิพลมากที่สุดในการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารที่ไม่ละลาย และยังทำให้ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลลดลง อย่างไรก็ตาม ปริมาณของโอเลฟินหรือโพลีเมอร์จะลดลงเมื่อปริมาณของสารต้านอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้น และจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณกลีเซอริน นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระในไบโอดีเซล

Ramos *et al.* (2007) ทำการศึกษาความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลืองผ่านกรรมวิธีกลั่นให้บริสุทธิ์ซึ่งมีค่าต่ำ และศึกษาอิทธิพลของสารต้านอนุมูลอิสระชนิดต่างๆ คือ BHT, BHA และ TBHQ ที่มีต่อการปรับปรุงความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลืองที่ปริมาณความเข้มข้นต่าง ๆ เพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐาน EN 14112 โดยทดสอบลักษณะสมบัติต่าง ๆ ของไบโอดีเซล จากนั้นจึงเติมสารต้านอนุมูลอิสระแต่ละชนิดในปริมาณความเข้มข้นตั้งแต่ 200-8,000 พีพีเอ็ม ลงในไบโอดีเซลปริมาณ 100 กรัม โดยพบว่า ไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลืองมีความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันเท่ากับ 0.16 ชั่วโมง และเมื่อเติมสารต้านอนุมูลอิสระลงไป พบว่า การเติมสาร BHA หรือ BHT ในปริมาณความเข้มข้นถึง 1,500 พีพีเอ็ม ช่วยให้ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 200-7,000 พีพีเอ็ม นั้นสาร BHT มีประสิทธิภาพดีที่สุดเมื่อเทียบกับสารอื่น โดยความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันจะเพิ่มขึ้นเป็น 5.64 ชั่วโมง เมื่อใช้สาร BHT ที่ความเข้มข้น 7,000 พีพีเอ็ม ส่วนสาร TBHQ เมื่อใช้ที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 2,000-7,000 พีพีเอ็ม ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจะเพิ่มขึ้นในแนวโน้มเดียวกันเป็นเส้นตรงจนถึงความเข้มข้น 6,000 พีพีเอ็ม และที่ความเข้มข้น 7,000 พีพีเอ็ม จะเพิ่มขึ้นเป็น 5.32 ชั่วโมง ในขณะที่สาร BHA ช่วยเพิ่มความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันน้อยมาก เมื่อเติมในปริมาณความเข้มข้นมากกว่า 2,000 พีพีเอ็ม และเมื่อเติมสารต้านอนุมูลอิสระความเข้มข้น 8,000 พีพีเอ็ม ลงในไบโอดีเซล พบว่า สาร TBHQ จะมีประสิทธิภาพดีที่สุด รองลงมา คือ สาร BHT โดยช่วยให้ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นเป็น 8.93 ชั่วโมง และ 6.05 ชั่วโมง ตามลำดับ ส่วนสาร BHA จะทำให้ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลลดลงเป็น

0.13 ชั่วโมง นอกจากนี้การผสมสารต้านอนุมูลอิสระแต่ละชนิดเข้าด้วยกันลงในไบโอดีเซล ไม่มีประสิทธิภาพในการลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันมากไปกว่าการเติมสารต้านอนุมูลอิสระเพียงชนิดเดียว

Sarin *et al.* (2007) ได้ศึกษาความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากพืช 5 ชนิด คือ สบู่ดำ เมล็ดทานตะวัน ถั่วเหลือง ปาล์ม และคาเรนเจียร์ (Karanja) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซล และศึกษาหาชนิดและปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระที่เหมาะสม เพื่อให้ไบโอดีเซลที่ผลิตได้มีความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันเป็นไปตามมาตรฐานตามวิธีทดสอบ EN 14112 ที่กำหนดให้ค่าความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันมีค่าไม่ต่ำกว่า 6 ชั่วโมง โดยพบว่า ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มมีความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันดีที่สุด คือ 13.37 ชั่วโมง ในขณะที่ไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดทานตะวันมีความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันต่ำที่สุด คือ 1.73 ชั่วโมง และการผสมไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำด้วยไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มจะช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในไบโอดีเซล และส่งผลให้จุดไหลเท (Pour point) จุดหมอกควัน (Cloud point) และจุดที่ตะแกรงเย็นเริ่มเกิดการอุดตัน (Cold filter plugging point) ของไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น โดยน้ำมันที่นำมาผลิตไบโอดีเซลควรประกอบด้วยกรดไขมันอิ่มตัวและกรดไขมันไม่อิ่มตัวในอัตราส่วนที่เหมาะสม จากการศึกษาประสิทธิภาพของสารต้านอนุมูลอิสระที่เติมในไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ คือ 2,6-Ditertiarybutyl hydroxytoluene, Bis-2,6-ditertiarybutyl phenol derivative, Mixed butylated phenol และ Octylated butylated diphenyl amine พบว่า สารต้านอนุมูลอิสระที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด คือ 2,6-Ditertiarybutyl hydroxytoluene ซึ่งการเติมในปริมาณ 200 พีพีเอ็ม ช่วยให้ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลมีค่ามากกว่า 6 ชั่วโมง โดยไบโอดีเซลที่มีอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและน้ำมันปาล์มจะช่วยลดปริมาณการเติมสารต้านอนุมูลอิสระได้ถึง 80-90 เปอร์เซ็นต์

Lee *et al.* (2008) ได้ศึกษาการปรับปรุงความเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และจุดที่ตะแกรงเย็นเริ่มเกิดการอุดตันของไบโอดีเซล โดยทำการผสมไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม เมล็ดธัญพืช และถั่วเหลืองในอัตราส่วนต่าง ๆ โดยน้ำหนัก จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของกรดไขมันด้วยวิธีแก๊สโครมาโตกราฟี รวมทั้งวิเคราะห์หาความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน และจุดที่ตะแกรงเย็นเริ่มเกิดการอุดตันของไบโอดีเซล เพื่อศึกษาอิทธิพลของกรดไขมันในไบโอดีเซล และหาชนิดของกรดไขมันที่สำคัญอันมีผลต่อความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันและจุด

ที่ตะแกรงเย็นเริ่มเกิดการอุดตัน โดยพบว่า ไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลืองมีความเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเท่ากับ 3.87 ชั่วโมง ซึ่งไม่เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดให้มีค่ามากกว่า 6 ชั่วโมง ในขณะที่ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มมีความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันที่ดี คือ 11 ชั่วโมง แต่มีจุดที่ตะแกรงเย็นเริ่มเกิดการอุดตันสูง ส่วนไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดเรพมีจุดที่ตะแกรงเย็นเริ่มเกิดการอุดตันต่ำ และมีความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันค่อนข้างดี คือ 6.94 ชั่วโมง ดังนั้น การผสมไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลืองด้วยไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มและเมล็ดเรพจึงช่วยปรับปรุงความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน แต่ทำให้จุดที่ตะแกรงเย็นเริ่มเกิดการอุดตันของไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลืองเพิ่มขึ้น จากการศึกษาอิทธิพลของกรดไขมันในไบโอดีเซลพบว่า เมื่อปริมาณกรดไขมันอิ่มตัวในไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น และปริมาณกรดไลโนเลอิกและกรดไลโนเลนิกซึ่งเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัวในไบโอดีเซลลดลง ไบโอดีเซลจะมีความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันดีขึ้น ดังสมการ $Y = 117.9295/X + 2.5905$ ($0 < X < 100$) โดย X คือ ปริมาณกรดไลโนเลอิกและกรดไลโนเลนิก ส่วน Y คือ ความเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และจุดที่ตะแกรงเย็นเริ่มเกิดการอุดตันจะมีค่าต่ำลง เมื่อปริมาณกรดไขมันอิ่มตัวในไบโอดีเซลลดลงและปริมาณกรดไลโนเลอิกและกรดไลโนเลนิกเพิ่มขึ้น ดังสมการ $Y = -0.4880X + 36.0548$ ($0 < X \leq 88$) และ $Y = -2.7043X + 23.0036$ ($88 < X < 100$) โดย X คือ ปริมาณกรดไลโนเลอิกและกรดไลโนเลนิก ส่วน Y คือ จุดที่ตะแกรงเย็นเริ่มเกิดการอุดตัน

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัตถุดิบและสารเคมีสำหรับการผลิตไบโอดีเซล

- 1.1 น้ำมันสบู่ดำ ซึ่งได้จากการนำเมล็ดสบู่ดำมาหีบด้วยเครื่องบีบอัดแบบระบบอัดเกลียว
- 1.2 น้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีกลั่นให้บริสุทธิ์: บริษัท น้ำมันพืชปทุม จำกัด, ประเทศไทย
- 1.3 เมทานอล (ความเข้มข้น 99.99 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก): Analytical grade, J.T. Baker, U.S.A.
- 1.4 แกลีโคลเทสเซียมไฮดรอกไซด์: Analytical grade, Ajax Fine Chem, Australia
- 1.5 น้ำกลั่น
- 1.6 แอนไฮไดรรัสโซเดียมซัลเฟต (Anhydrous Na_2SO_4): Analytical grade, Ajax Fine Chem, Australia

2. สารเคมีสำหรับการวิเคราะห์ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation stability)

- 2.1 BHA (Butylated hydroxyanisole): Analytical grade, Fluka, Switzerland
- 2.2 BHT (Butylated hydroxytoluene): Analytical grade, Fluka, Switzerland
- 2.3 Kerobit[®] TP 26 (2,6-Di-tert.-butyl-phenol): Analytical grade, BASF, Thailand

3. สารเคมีสำหรับการวิเคราะห์เมทิลเอสเทอร์

- 3.1 เมทิลเฮปตะดะคานัวเอท (Methyl heptadecanoate): ค่าความบริสุทธิ์ 95 เปอร์เซ็นต์
- 3.2 นอร์มอลเฮปเทน: Analytical grade, Labscan, Ireland

4. สารเคมีสำหรับการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด (Acid value)

- 4.1 โซเดียมไฮดรอกไซด์: Analytical grade, Merck, Germany

4.2 2-โพรพานอล (ความเข้มข้น 99.99 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก): Analytical grade, J.B. Baker, U.S.A.

4.3 สารละลายฟีนอล์ฟทาไลน์

4.4 น้ำกลั่น

5. อุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล

5.1 เทอร์โมมิเตอร์

5.2 แท่งแม่เหล็ก

5.3 ชุดเครื่องแก้ว

5.4 ชุดอุปกรณ์การกวนด้วยแท่งแม่เหล็กและให้ความร้อน: Chatcharee holding, Thailand

5.5 เครื่องทำน้ำหล่อเย็น: Model CB1D, Bosstech, Thailand

5.6 เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง: Mettler PM 6100, Mettler-toledo, Thailand

5.7 กระดาษลิตมัส

5.8 กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 4

5.9 นาฬิกาจับเวลา

6. อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์เมทิลเอสเทอร์

6.1 เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี: Model CP3800, Variance, France

Carrier gas: He

Column: SPTM-2560, 100 m x 0.25 mm ID

Oven: อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส

Detector: FID, อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส

Injector: split 20:1

6.2 ขวด Vial ขนาด 10 มิลลิลิตร

6.3 เครื่องผสม: Model KMC-1300V, Vision, Korea

6.4 เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง: Model BL210S, Sartorius, Germany

7. อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน

7.1 เครื่อง Rancimat: Model 743, Metrohm, Switzerland

7.2 เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง: Model BL210S, Sartorius, Germany

วิธีการ

1. การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและน้ำมันมะพร้าว

1.1 การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ

ตวงน้ำมันสบู่ดำปริมาณ 240 กรัม ใส่ในขวดสามทาง และให้ความร้อนด้วยเตาให้ความร้อนจนน้ำมันมีอุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส จากนั้นเติมสารละลายที่ได้จากการผสมระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาเบส คือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับเมทานอล โดยใช้อัตราส่วนจำนวนโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 7:1 ลงในน้ำมันสบู่ดำที่อุ่นไว้แล้ว เริ่มจับเวลาพร้อมกับทำการกวนด้วยแท่งกวนแม่เหล็กภายในขวดสามทางที่ติดตั้งเครื่องควบแน่นไว้ที่ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที และต้องควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ในขณะที่ปฏิกิริยาดำเนินอยู่ โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 1.5 ชั่วโมง (ทัศนีย์, 2550) โดยวิธีการคำนวณอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันแสดงในภาคผนวก ข

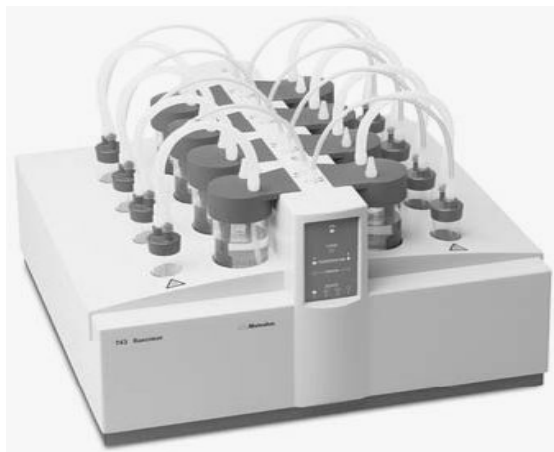
1.2 การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าว

สำหรับน้ำมันมะพร้าวจะทำการให้ความร้อนจนน้ำมันมีอุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงเติมสารละลายระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับเมทานอล โดยใช้อัตราส่วนจำนวนโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 6:1 ลงในน้ำมันมะพร้าวที่อุ่นไว้แล้ว และใช้เวลาทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง (Exconde, 2003) เมื่อครบตามเวลาที่กำหนดจึงนำผลิตภัณฑ์ที่ได้เทลงในกรวยแยก ผลิตภัณฑ์จะแยกเป็น 2 ชั้น โดยชั้นบน คือ เมทิลเอสเทอร์หรือไบโอดีเซล ส่วนชั้นล่าง คือ กลีเซอรอล ทำการไขแยกกลีเซอรอลออกและล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำกลั่นเพื่อกำจัดตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา จากนั้นกักน้ำในไบโอดีเซลด้วยแอนไฮดรัสโซเดียมซัลเฟต และกรองด้วยกระดาษกรองเพื่อแยกแอนไฮดรัสโซเดียมซัลเฟตออกจากไบโอดีเซล

2. การวิเคราะห์หาค่าความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซล

ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันถือเป็นปัจจัยสำคัญในการประเมินคุณภาพของน้ำมัน ไขมัน รวมถึงไบโอดีเซล ในปัจจุบันวิธี Rancimat (Rancimat method) ได้กลายมาเป็นวิธีวิเคราะห์ที่มาแทนที่วิธีวิเคราะห์อื่น ๆ เนื่องจากเป็นวิธีที่ไม่ซับซ้อนและมีประสิทธิภาพ ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถของน้ำมันที่จะเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนแล้วได้อย่างเหนียว และไบโอดีเซลก็มีความไม่เสถียรภาพเช่นเดียวกันกับน้ำมันตามธรรมชาติและไขมันจากสัตว์ ซึ่งเมื่อนำมาจัดเก็บไว้เป็นระยะเวลานานจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้น คือ เกิดการแปรสภาพของน้ำมันอย่างช้า ๆ ด้วยออกซิเจนที่มีอยู่ในบรรยากาศ เกิดเป็นสารซึ่งถูกออกซิไดซ์อยู่ในรูปของอัลดีไฮด์ แอลกอฮอล์ และ กรดคาร์บอนิก ซึ่งมีผลกระทบต่อการเผาไหม้และการเก็บสำรองน้ำมัน

ในการวิเคราะห์ความเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยวิธี Rancimat นั้น อากาศจะถูกพ่นลงบนตัวอย่างปริมาณ 3 กรัม ที่บรรจุอยู่ในหลอดแก้วซึ่งถูกให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส อากาศจะออกซิไดซ์กรดไขมัน โดยกลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดอย่างต่อเนื่องเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ ทำให้เกิดสารประกอบ (Oxidation product) ที่ระเหยได้ง่าย อากาศจะนำพาสารที่เกิดขึ้นนี้ผ่านเข้าไปในกระบอกแก้วที่บรรจุน้ำกลั่น 80 มิลลิลิตร ที่ส่วนฝาของกระบอกแก้วนี้จะมีโพรวัดค่าความนำไฟฟ้า เครื่องมือวิเคราะห์จะวัดค่าสภาพการนำไฟฟ้าของน้ำกลั่นไว้อย่างต่อเนื่อง และการวาดกราฟระหว่างค่าสภาพการนำไฟฟ้าและเวลาจะทำให้ได้เส้นกราฟของปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation curve) ซึ่งจุดโค้งของเส้นกราฟ คือ Induction period ที่มีหน่วยเป็นชั่วโมง ซึ่งเป็นค่าที่บอกความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของตัวอย่างไบโอดีเซล (Ferrari *et al.*, 2005; May *et al.*, 2006; McCormick *et al.*, 2007) โดยเครื่อง Rancimat แสดงดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 เครื่อง Rancimat

ที่มา: สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (2550)

2.1 การศึกษาความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสับดูดำและจากน้ำมันมะพร้าว

การปรับปรุงความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสับดูดำในงานวิจัยนี้ จะทำการผสมไบโอดีเซลจากน้ำมันสับดูดำด้วยไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 100:0, 80:20, 60:40, 50:50, 40:60, 20:80 และ 0:100 ตามลำดับ และนำไปทดสอบค่าความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลด้วยเครื่อง Rancimat model 743

2.2 การศึกษาความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสับดูดำที่เติมสารต้านอนุมูลอิสระลงไป

ในการศึกษาหาชนิดและปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระที่มีความเหมาะสมกับไบโอดีเซลจากน้ำมันสับดูดำนั้น สารต้านอนุมูลอิสระที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ BHA, BHT และ Kerobit® TP 26 โดยจะทำการเติมสารต้านอนุมูลอิสระแต่ละชนิดในปริมาณความเข้มข้น 50-350 พีพีเอ็ม ลงในไบโอดีเซลจากน้ำมันสับดูดำปริมาณ 100 กรัม และนำไปทดสอบค่าความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลด้วยเครื่อง Rancimat model 743

2.3 การศึกษาความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวเมื่อเติมสารต้านอนุมูลอิสระลงไป

ทำการศึกษาหาปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระที่มีความเหมาะสมสำหรับไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าว โดยเติมสารต้านอนุมูลอิสระที่ใช้ในปริมาณน้อยสุดจากการทดลองในหัวข้อ 2.2 เพื่อให้ไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำมีค่าความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันมากกว่า 6 ชั่วโมง ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน EN 14112 โดยเติมในปริมาณความเข้มข้น 50-350 พีพีเอ็ม ลงในไบโอดีเซลที่มีค่าความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันน้อยกว่า 6 ชั่วโมง จากการทดลองในหัวข้อ 2.1 และนำไปทดสอบค่าความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลด้วยเครื่อง Rancimat model 743

2.4 การศึกษาความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลที่เติมสารต้านอนุมูลอิสระหลังจากจัดเก็บไว้เป็นระยะเวลานาน

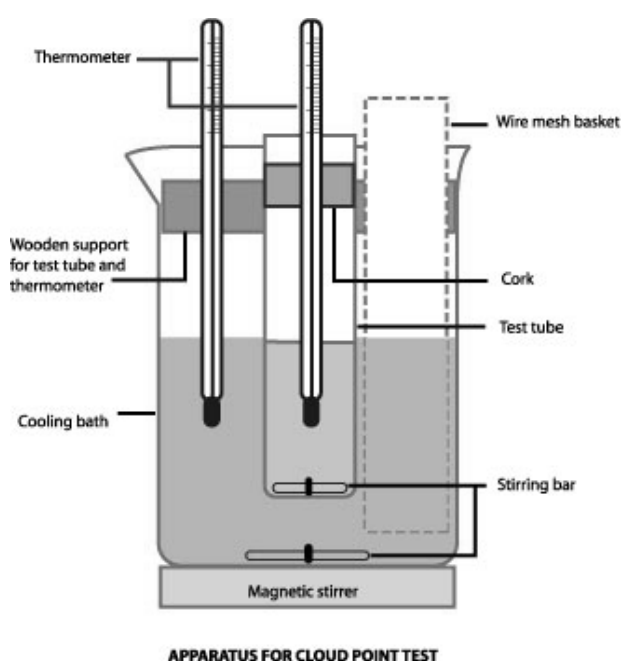
การทดลองในหัวข้อนี้ จะทำการศึกษาความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันที่ลดลงของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวที่เติมสารต้านอนุมูลอิสระ หลังจากจัดเก็บไว้ในที่มืดและอุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลานาน คือ 10 สัปดาห์ โดยวัดค่าความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลทุก 2 สัปดาห์ ด้วยเครื่อง Rancimat model 743

3. การวิเคราะห์หาจุดหมอกควันและจุดไหลเทของไบโอดีเซล

ทำการศึกษาจุดหมอกควันและจุดไหลเทของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 100:0, 80:20, 60:40, 50:50, 40:60, 20:80 และ 0:100 และไบโอดีเซลผสมในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 100:0, 80:20 และ 60:40 ที่เติมสารต้านอนุมูลอิสระ โดยจุดหมอกควันเป็นค่าที่บ่งบอกถึงอุณหภูมิต่ำสุดที่น้ำมันเริ่มเป็นไขและขีดขวางการไหลของน้ำมัน ส่วนจุดไหลเทนั้นเป็นอุณหภูมิ ณ จุดที่น้ำมันแข็งตัวและไม่สามารถไหลได้สะดวก

3.1 การวิเคราะห์หาจุดหมอกควันของไบโอดีเซล

ในการหาจุดหมอกควันของไบโอดีเซลนั้น จะเทตัวอย่างไบโอดีเซลลงในหลอดทดสอบในปริมาตรเท่าขีดบอกระดับ และทำการให้ความเย็นแก่ตัวอย่างไบโอดีเซลตามมาตรฐาน ASTM D 2500 จนถึงอุณหภูมิที่เริ่มปรากฏไขในไบโอดีเซลที่ใสซึ่งขัดขวางการไหลของน้ำมัน ณ อุณหภูมินี้ คือ จุดหมอกควันของไบโอดีเซล โดยเครื่องมือที่ใช้ทดสอบจุดหมอกควันและจุดไหลเทของไบโอดีเซลแสดงดังภาพที่ 19



ภาพที่ 19 เครื่องมือที่ใช้ทดสอบจุดหมอกควันและจุดไหลเทของไบโอดีเซล

ที่มา: The European Oleochemicals and Allied Products Group (2007)

3.2 การวิเคราะห์หาจุดไหลเทของไบโอดีเซล

การวิเคราะห์หาจุดไหลเทของไบโอดีเซลทำได้โดยเทตัวอย่างไบโอดีเซลลงในหลอดทดสอบในปริมาตรเท่าขีดบอกระดับ จากนั้นเสียบเทอร์โมมิเตอร์ผ่านจุกไม้เข้ากับหลอดแก้วทดสอบ โดยให้โคนกระเปาะต่ำกว่าระดับตัวอย่าง 3 มิลลิเมตร ให้ความเย็นแก่ตัวอย่างไบโอดีเซลตามมาตรฐาน ASTM D97 ทุก ๆ อุณหภูมิตัวอย่างไบโอดีเซลที่ลดลง 3 องศาเซลเซียส ให้ยกหลอดแก้วขึ้นจากอ่างทดสอบและเอียงหลอดแก้วในระนาบ ถ้าตัวอย่างเริ่มแข็งตัวไม่มีการไหล

ภายใน 5 วินาที ถือว่าอุณหภูมิ ณ จุดนี้ คือ จุดไหลเทของไบโอดีเซล โดยวิธีการทดสอบจุดไหลเทของไบโอดีเซลแสดงดังภาพที่ 20



ภาพที่ 20 แสดงวิธีการทดสอบจุดไหลเทของไบโอดีเซล

ที่มา: ประเสริฐ และคณะ (2544)

4. การวิเคราะห์หาปริมาณเมทิลเอสเทอร์โดยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี

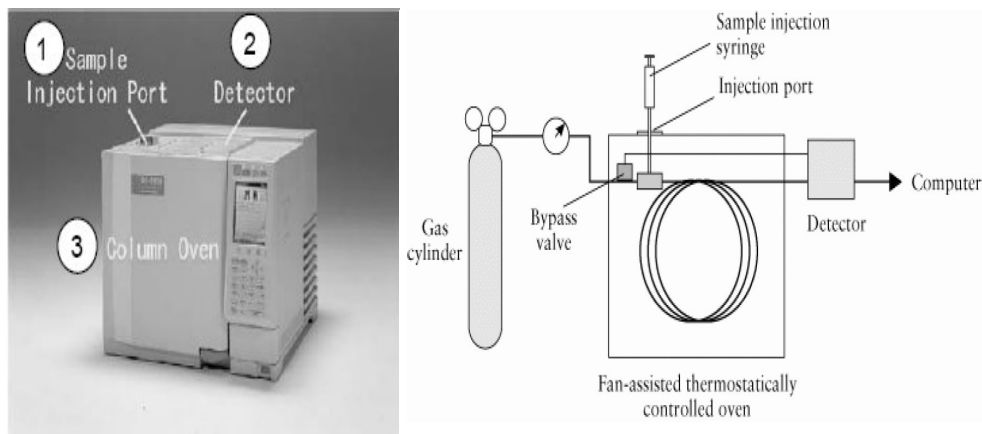
แก๊สโครมาโตกราฟีเป็นเครื่องมือวิเคราะห์สารเคมีที่ใช้เทคนิคการแยกสารผสมที่ระเหยได้ง่ายที่เป็นทั้งของแข็ง ของเหลว และก๊าซ โดยมีก๊าซเฉื่อยเป็นตัวพาเข้าคอลัมน์ ซึ่งสามารถแยกสารผสมมากกว่าหนึ่งชนิดให้ได้มาซึ่งสารประกอบเดี่ยว ๆ ในสถานะที่เหมาะสม และตรวจวัดสารตัวอย่างด้วยตัวตรวจวัด (Detector) ตามลักษณะสมบัติเฉพาะทางเคมี พร้อมทั้งคำนวณหาชนิดและปริมาณของสารตัวอย่างเมื่อเทียบกับสารมาตรฐานโดยอัตโนมัติด้วยระบบคอมพิวเตอร์ โดยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีแสดงดังภาพที่ 21

องค์ประกอบที่สำคัญของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ

4.1 Injector: ส่วนที่สารตัวอย่างจะถูกฉีดเข้าสู่เครื่อง และระเหยเป็นก๊าซก่อนที่จะเข้าสู่คอลัมน์ อุณหภูมิที่เหมาะสมของ Injector ควรเป็นอุณหภูมิที่สูงพอที่จะทำให้สารสามารถระเหยได้ แต่ไม่ทำให้สารสลายตัว

4.2 Detector: ส่วนที่ตรวจวัดองค์ประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง (Flame ionization detector; FID)

4.3 Oven: ส่วนที่ใช้สำหรับบรรจุคอลัมน์และควบคุมอุณหภูมิให้เป็นไปตามที่กำหนด



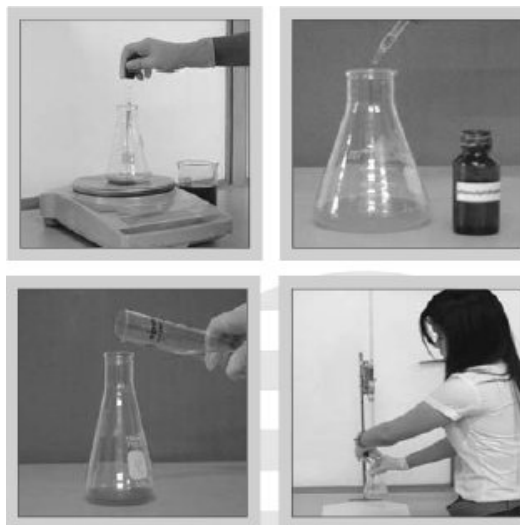
ภาพที่ 21 เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี

ที่มา: สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (2550)

ในการวิเคราะห์หาปริมาณเมทิลเอสเทอร์นั้น จะทำการชั่งตัวอย่างไบโอดีเซลจำนวน 0.050 ± 0.003 กรัม ใส่ลงในขวด Vial ขนาด 10 มิลลิลิตร และเติมสารละลายเมทิลเฮปตะดีคาโนเอทซึ่งเป็นสารมาตรฐานภายในตามมาตรฐาน EN 14103 ในปริมาณความเข้มข้น 0.010 ± 0.0010 กรัมต่อมิลลิลิตร ลงไปในปริมาตร 1 มิลลิลิตร หลังจากนั้นจึงนำไปวิเคราะห์หาปริมาณเมทิลเอสเทอร์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี โดยวิธีการคำนวณสามารถศึกษาได้จากภาคผนวก ค

5. การวิเคราะห์หาค่าความเป็นกรด

การวิเคราะห์หาค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลทำได้โดยชั่งน้ำหนักตัวอย่างไบโอดีเซลที่ต้องการทดสอบจำนวน 3 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ และเติมสาร 2-โพรพานอลปริมาตร 30 มิลลิลิตร ลงไป จากนั้นหยดสารละลายฟีนอล์ฟทาไลน์ 2-3 หยด นำสารละลายที่ได้มาไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ จนสารละลายเปลี่ยนเป็นสีชมพูจาง ๆ คงที่ ประมาณ 30 วินาที จึงถือเป็นจุดยุติ และทำการบันทึกปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เพื่อนำไปคำนวณหาค่าความเป็นกรด โดยวิธีการทดสอบค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลแสดงดังภาพที่ 22 และวิธีการคำนวณสามารถศึกษาได้จากภาคผนวก ง



ภาพที่ 22 วิธีการทดสอบค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซล

ที่มา: สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (2550)

ผลและวิจารณ์

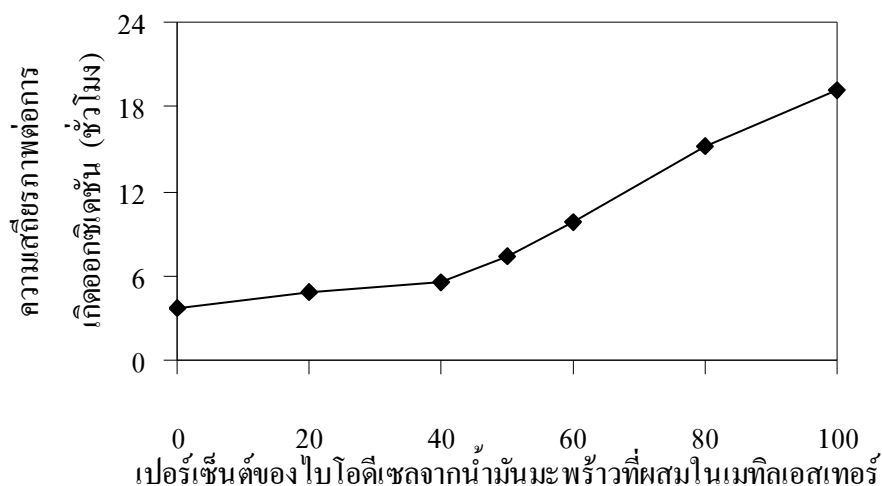
งานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ โดยศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าว และศึกษาหาชนิดและปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระที่มีความเหมาะสมสำหรับไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ คือ BHA, BHT และ Kerobit® TP 26 จากนั้นจึงทำการศึกษาหาปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระที่มีความเหมาะสมสำหรับไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าว ซึ่งงานวิจัยเหล่านี้ใช้วัตถุดิบ คือ น้ำมันสบู่ดำและน้ำมันมะพร้าว ที่มีค่าความเป็นกรด 1.45 และ 0.14 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม ตามลำดับ และศึกษาความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ และไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวที่เติมสารต้านอนุมูลอิสระ หลังจากจัดเก็บไว้เป็นระยะเวลานาน รวมทั้งทำการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของไบโอดีเซล เช่น ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ ความหนืดที่ 40 องศาเซลเซียส จุดหมอกควัน จุดไหลเท และจุดวาบไฟ ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้วัตถุดิบ คือ น้ำมันสบู่ดำที่มีค่าความเป็นกรด 1.39 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม

1. การศึกษาความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าว

ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลเป็นลักษณะสมบัติสำคัญที่ควรพิจารณาในการขนส่ง และเก็บรักษาไบโอดีเซลเป็นระยะเวลานานก่อนนำไปใช้งาน เนื่องจากไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันที่มีส่วนประกอบของกรดไขมันไม่อิ่มตัวสามารถทำปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ เช่น มีกลิ่นหืน และเมื่อโดนความร้อนอาจเปลี่ยนสภาพเป็นสารอนุมูลอิสระที่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาต่อหรือเป็นสารอื่น ทำให้ไบโอดีเซลเสียเสถียรภาพ ดังนั้น เพื่อให้ไบโอดีเซลมีลักษณะสมบัติเป็นไปตามความต้องการของตลาดและมีคุณภาพเป็นไปตามมาตรฐาน EN 14112 การปรับปรุงความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจึงมีความจำเป็น (Mittelbach and Gangl, 2001; Sarin *et al.*, 2007)

การผสมไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำซึ่งประกอบด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัวเป็นจำนวนมาก ด้วยไบโอดีเซลที่ประกอบด้วยกรดไขมันอิ่มตัวเป็นจำนวนมาก เป็นวิธีหนึ่งในการเพิ่มความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ ให้เป็นไปตามมาตรฐานตามวิธี

ทดสอบ EN 14112 ที่กำหนดให้ค่าความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันมีค่าไม่ต่ำกว่า 6 ชั่วโมง (Lee *et al.*, 2008) โดยในการทดลองนี้จะทำการผสมไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำด้วยไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมต่าง ๆ ซึ่งผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 23



ภาพที่ 23 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าว

จากการทดลองพบว่า ไบโอดีเซลมีความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวที่ผสมลงไป โดยไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวมีความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันสูงสุด คือ 19.22 ชั่วโมง และไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำมีความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันต่ำสุด คือ 3.69 ชั่วโมง ส่วนไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่ผสมด้วยไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป มีความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันมากกว่า 6 ชั่วโมง โดยไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 50:50, 40:60 และ 20:80 มีความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันเท่ากับ 7.32, 9.84 และ 15.24 ชั่วโมง ตามลำดับ ในขณะที่ไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่ผสมด้วยไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนน้อยกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ มีความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันน้อยกว่า 6 ชั่วโมง โดยไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 60:40 และ 80:20 มีความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันเท่ากับ 5.56 และ 4.81 ชั่วโมง ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากในน้ำมันมะพร้าวประกอบด้วยกรดไขมันอิ่มตัวเป็นจำนวนมาก จึงมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันน้อย

ส่วนในน้ำมันสบู่ดำประกอบด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัวเป็นจำนวนมาก จึงเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่ายตรงพันธะคู่ของกรดไขมัน ซึ่งองค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันที่เป็นวัตถุดิบและในไบโอดีเซลหลังทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันนั้นจะมีความใกล้เคียงกัน (Ferrari *et al.*, 2005) โดยองค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันสบู่ดำและน้ำมันมะพร้าว ซึ่งประกอบด้วยกรดไขมันอิ่มตัวและไม่อิ่มตัว เช่น กรดคาโปรอิก (C8:0) ซึ่งเป็นกรดไขมันอิ่มตัวที่ประกอบด้วยคาร์บอนจำนวน 8 คาร์บอน กรดไลโนเลอิก (C18:2) ซึ่งเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่ประกอบด้วยคาร์บอนจำนวน 18 คาร์บอน และพันธะคู่จำนวน 2 พันธะ และกรดไลโนเลนิก (C18:3) ซึ่งเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่ประกอบด้วยคาร์บอนจำนวน 18 คาร์บอน และพันธะคู่จำนวน 3 พันธะ เป็นต้น แสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ปริมาณกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันสบู่ดำและน้ำมันมะพร้าว

กรดไขมัน	น้ำมันสบู่ดำ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	น้ำมันมะพร้าว (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)
กรดคาโปรอิก (C8:0)	-	7.42
กรดคาปริก (C10:0)	-	5.78
กรดลอริก (C12:0)	-	49.75
กรดไมริสติก (C14:0)	-	18.75
กรดปาล์มิติก (C16:0)	14.85	8.60
กรดสเตียริก (C18:0)	7.43	2.65
กรดอาราซดิก (C20:0)	0.08	0.18
ปริมาณกรดไขมันอิ่มตัวทั้งหมด	22.36	93.13
กรดโอเลอิก (C18:1)	47.65	5.53
กรดไลโนเลอิก (C18:2)	29.80	1.26
กรดไลโนเลนิก (C18:3)	0.19	0.07
ปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวทั้งหมด	77.64	6.86

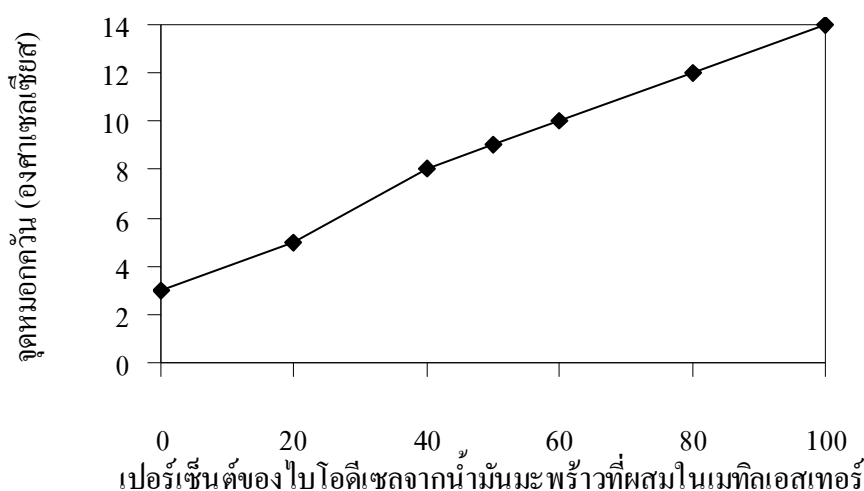
ที่มา: พิสมัย (2550)

ผลการทดลองดังกล่าว พบว่า มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ McCormick *et al.* (2007) ที่ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันใช้แล้ว และไขมันวัว โดยพบว่า ไบโอดีเซลที่มีความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันน้อยที่สุด คือ ไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลืองที่ประกอบด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัวเป็นจำนวนมาก และจากงานวิจัยของ Lee *et al.* (2008) ที่ได้ศึกษาการปรับปรุงความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซล โดยทำการผสมไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม เมล็ดเรพ และถั่วเหลืองในอัตราส่วนต่าง ๆ โดยน้ำหนัก ซึ่งพบว่า การผสมไบโอดีเซลที่มีค่าความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันสูง คือ ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มและน้ำมันเมล็ดเรพ ลงในไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลืองนั้น จะช่วยปรับปรุงความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลืองที่มีค่าต่ำ และจากการศึกษาอิทธิพลของกรดไขมันในไบโอดีเซล พบว่า เมื่อปริมาณกรดไขมันอิ่มตัวในไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น และปริมาณกรดไลโนเลอิกและกรดไลโนเลนิกซึ่งเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัวในไบโอดีเซลลดลง ไบโอดีเซลจะมีความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันดีขึ้น และนอกจากนี้งานวิจัยของ Sarin *et al.* (2007) ซึ่งได้ศึกษาความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากพืชทั้ง 5 ชนิด คือ สนุ่นดำ เมล็ดทานตะวัน ถั่วเหลือง ปาล์ม และคาเรนเจอร์ ยังพบว่า การผสมไบโอดีเซลจากน้ำมันสนุ่นดำด้วยไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม จะช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซล เนื่องจากในน้ำมันปาล์มประกอบด้วยกรดไขมันอิ่มตัวเป็นจำนวนมาก คือ 43.40 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่น้ำมันสนุ่นดำประกอบด้วยกรดไขมันอิ่มตัวเป็นจำนวน 21.10 เปอร์เซ็นต์

2. การศึกษาจุดหมอกควันและจุดไหลเทของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสนุ่นดำและจากน้ำมันมะพร้าว

การผสมไบโอดีเซลจากน้ำมันสนุ่นดำด้วยไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวนั้น ช่วยปรับปรุงค่าความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซล แต่ไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวก็มีข้อเสีย คือ มีจุดหมอกควันและจุดไหลเทสูง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากกรดไขมันอิ่มตัวมีจุดหลอมเหลวสูงกว่ากรดไขมันไม่อิ่มตัว ดังนั้น น้ำมันมะพร้าวซึ่งประกอบด้วยกรดไขมันอิ่มตัวเป็นจำนวนมากจึงเป็นไขได้ง่ายที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งส่งผลกระทบต่อการใช้งานไบโอดีเซลไปใช้ในเครื่องยนต์ที่ต้องขับเคลื่อนในบริเวณที่มีสภาพอากาศหนาวเย็น (Lee *et al.*, 2008)

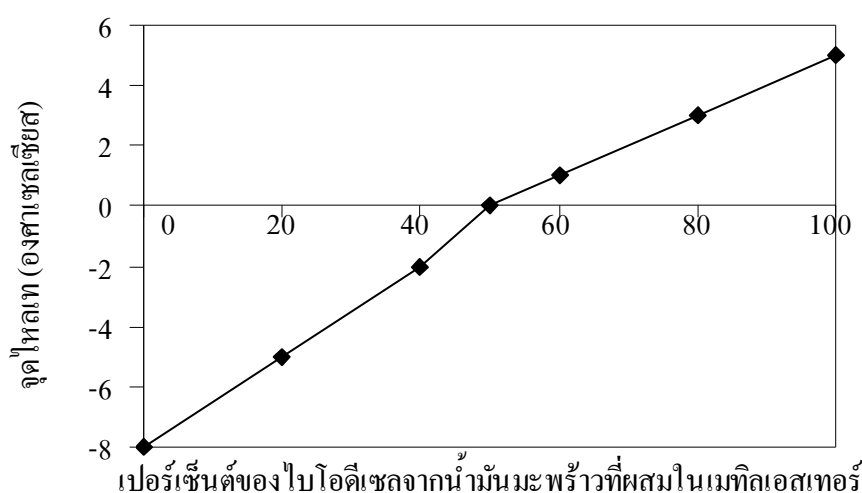
งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาจุดหมอกควันและจุดไหลเทของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสับดูดาและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนต่าง ๆ จากผลการทดลองในภาพที่ 24 และ 25 พบว่า ไบโอดีเซลจากน้ำมันสับดูดามีจุดหมอกควันและจุดไหลเทต่ำที่สุด โดยมีจุดหมอกควันเท่ากับ 3 องศาเซลเซียส และมีจุดไหลเทเท่ากับ -8 องศาเซลเซียส ในขณะที่ไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวมีจุดหมอกควันเท่ากับ 14 องศาเซลเซียส และมีจุดไหลเทเท่ากับ 5 องศาเซลเซียส ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากน้ำมันสับดูดานั้นประกอบด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัวเป็นจำนวนมาก ดังแสดงในตารางที่ 10 ดังนั้น การผสมไบโอดีเซลจากน้ำมันสับดูดากับไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวจึงทำให้จุดหมอกควันและจุดไหลเทของไบโอดีเซลจากน้ำมันสับดูดาเพิ่มขึ้น โดยการผสมไบโอดีเซลจากน้ำมันสับดูดากับไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นไป ทำให้ไบโอดีเซลมีจุดหมอกควันเพิ่มขึ้นเป็น 9-12 องศาเซลเซียส และมีจุดไหลเทเพิ่มขึ้นเป็น 0-3 องศาเซลเซียส ซึ่งถ้าผู้ใช้ให้การยอมรับและนำไปใช้งานกับเครื่องยนต์ดีเซลในสภาพอากาศที่มีอุณหภูมิไม่ต่ำมากนัก ก็คงไม่เกิดปัญหาการอุดตันหัวฉีดน้ำมัน



ภาพที่ 24 จุดหมอกควันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสับดูดาและจากน้ำมันมะพร้าว

จากผลการทดลองข้างต้น พบว่า มีแนวโน้มสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lee *et al.* (2008) ซึ่งทำการศึกษาจุดที่ตะแกรงเย็นเริ่มเกิดการอุดตันของไบโอดีเซลผสม โดยพบว่า เมื่อผสมไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดเรพซึ่งประกอบด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัวเป็นจำนวน 92.88 เปอร์เซ็นต์ ด้วยไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มซึ่งประกอบด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัวเป็นจำนวน 54.26 เปอร์เซ็นต์ ใน

อัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นไป จะทำให้จุดที่ตะแกรงเย็นเริ่มเกิดการอุดตันของไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดเรพเพิ่มขึ้นจาก -20 องศาเซลเซียส เป็นมากกว่า 0 องศาเซลเซียส และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sarin *et al.* (2007) ที่ศึกษาจุดหมอกควัน จุดไหลเท และจุดที่ตะแกรงเย็นเริ่มเกิดการอุดตันของไบโอดีเซลผสม โดยพบว่า การผสมไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำซึ่งประกอบด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัวเป็นจำนวน 78.90 เปอร์เซ็นต์ ด้วยไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มซึ่งประกอบด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัวเป็นจำนวน 56.60 เปอร์เซ็นต์ ในอัตราส่วน 40 เปอร์เซ็นต์ ทำให้จุดหมอกควันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำเพิ่มขึ้น 10 องศาเซลเซียส จุดไหลเทเพิ่มขึ้น 9 องศาเซลเซียส และจุดที่ตะแกรงเย็นเริ่มเกิดการอุดตันเพิ่มขึ้น 3 องศาเซลเซียส



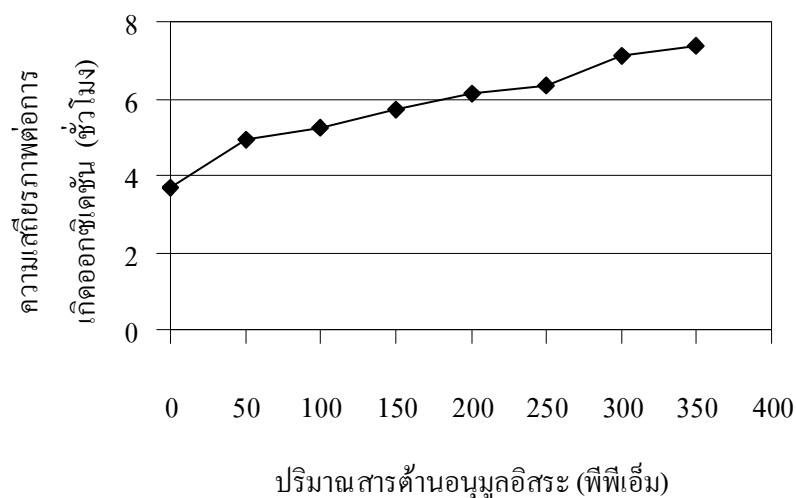
ภาพที่ 25 จุดไหลเทของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าว

3. การศึกษาความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสารต้านอนุมูลอิสระลงไป

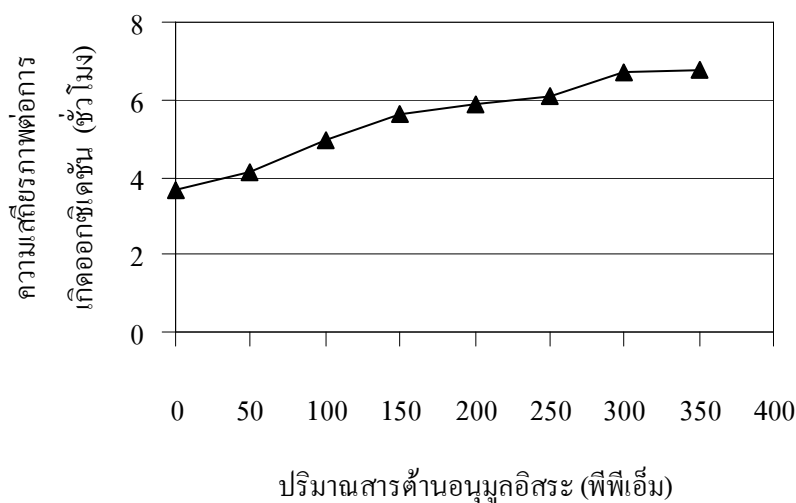
การเติมสารต้านอนุมูลอิสระลงในไบโอดีเซลเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการเพิ่มความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ ให้เป็นไปตามมาตรฐานตามวิธีทดสอบ EN 14112 ซึ่งสารต้านอนุมูลอิสระจะช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยสารต้านอนุมูลอิสระจะให้ไฮโดรเจนจาก Phenolic hydroxyl group ซึ่งเป็นส่วนประกอบของสารต้านอนุมูลอิสระก่อนอนุมูลอิสระที่เกิดจากการแตกตัวของกรดไขมันไม่อิ่มตัวในไบโอดีเซลจากปฏิกิริยา

ออกซิเดชัน ทำให้อนุมูลอิสระนั้นเสถียรและไม่ไปจับกับโมเลกุลอื่น ส่วนสารต้านอนุมูลอิสระที่ให้ไฮโดรเจนแล้วจะไปจับกับอนุมูลอิสระอีกตัวเป็นการป้องกันและลดความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซล (Ramos *et al.*, 2007; Sarin *et al.*, 2007)

จากงานวิจัยของ May *et al.* (2006) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของสารต้านอนุมูลอิสระจากธรรมชาติและสังเคราะห์ คือ Tocopherol, BHT และ TBHQ ที่มีต่อไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มกลั่น พบว่า สาร TBHQ มีประสิทธิภาพดีที่สุด รองลงมา คือ สาร BHT และจากงานวิจัยของ Ramos *et al.* (2007) ซึ่งศึกษาอิทธิพลของสารต้านอนุมูลอิสระชนิดต่าง ๆ คือ BHT, BHA และ TBHQ ที่มีต่อการปรับปรุงความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลือง โดยพบว่า ที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 200-7,000 พีพีเอ็ม นั้น สาร BHT มีประสิทธิภาพดีที่สุดเมื่อเทียบกับสารอื่น นอกจากนี้จากการวิจัยของ Dunn (2005) ที่ศึกษาประสิทธิภาพในการลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลืองของสารต้านอนุมูลอิสระ และทดสอบสมบัติทางกายภาพของน้ำมันที่เกิดจากการผสมระหว่างน้ำมันดีเซลและไบโอดีเซลที่เติมสารต้านอนุมูลอิสระ คือ TBHQ, BHA, BHT, PrG และ Tocopherol ตามลำดับ ซึ่งพบว่า สาร BHA มีประสิทธิภาพดีที่สุดในการลดการเกิดออกซิเดชัน และละลายได้ดีในไบโอดีเซล ส่วนสาร TBHQ เมื่อเติมลงในไบโอดีเซลที่ปริมาณความเข้มข้นสูงและนำไปผสมกับน้ำมันดีเซลในอัตราส่วน 20 เปอร์เซ็นต์ จะเกิดสารประกอบที่เป็นของแข็งขึ้น ส่วนสาร Kerobit[®] TP 26 เป็นสารต้านอนุมูลอิสระซึ่งสังเคราะห์จากสารประกอบฟีนอลหลายชนิด และสามารถละลายได้ดีในสารประกอบไฮโดรคาร์บอน จึงเหมาะสำหรับน้ำมันดีเซล ไบโอดีเซล แก๊สโซลีน และเชื้อเพลิงที่ใช้กับเครื่องบิน ด้วยเหตุนี้จึงได้เลือกสารต้านอนุมูลอิสระ 3 ชนิดมาใช้ในการวิจัยนี้ คือ BHA, BHT และ Kerobit[®] TP 26 โดยจะทำการเติมสารต้านอนุมูลอิสระแต่ละชนิดลงในไบโอดีเซลจากน้ำมันสุรคำในปริมาณความเข้มข้นตั้งแต่ 50-350 พีพีเอ็ม เพื่อศึกษาหาปริมาณและชนิดของสารต้านอนุมูลอิสระที่มีความเหมาะสมกับไบโอดีเซลจากน้ำมันสุรคำ



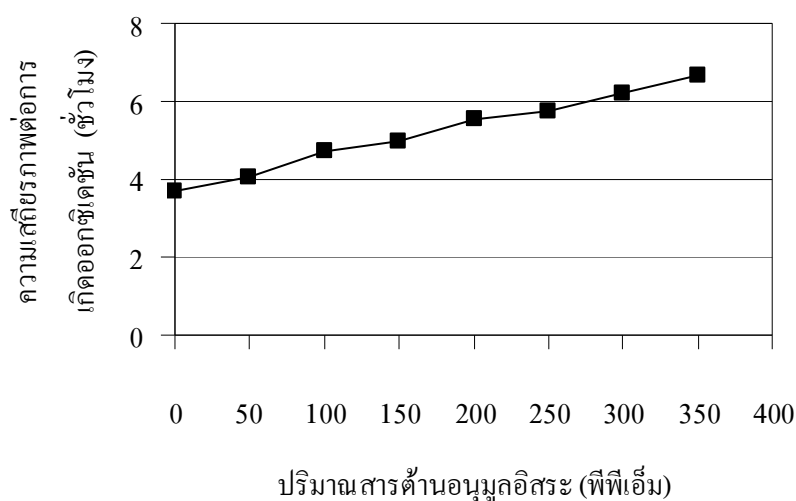
ภาพที่ 26 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำเมื่อเติมสาร BHA ในปริมาณความเข้มข้น 50-350 พีพีเอ็ม



ภาพที่ 27 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำเมื่อเติมสาร Kerobit® TP 26 ในปริมาณความเข้มข้น 50-350 พีพีเอ็ม

จากผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 26, 27 และ 28 พบว่า ไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำมีค่าความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันต่ำกว่ามาตรฐานที่กำหนด คือ 3.69 ชั่วโมง ซึ่งการเติมสารต้านอนุมูลอิสระลงในไบโอดีเซลจะช่วยลดความว่องไวในการเกิดออกซิเดชัน และปรับปรุงความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซล โดยค่าความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันจะ

เพิ่มขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของสารต้านอนุมูลอิสระที่เติมลงไปตั้งแต่ 50-350 พีพีเอ็ม ทั้งนี้เป็นเพราะการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของสารต้านอนุมูลอิสระเท่ากับเป็นการเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนที่จะไปจับกับสารอนุมูลอิสระในไบโอดีเซล (Ramos *et al.*, 2007) โดยสาร BHA เป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่ใช้ในปริมาณน้อยสุด คือ 200 พีพีเอ็ม เพื่อให้ไบโอดีเซลจากน้ำมันสนุดำมีค่าความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันมากกว่า 6 ชั่วโมง โดยไบโอดีเซลมีค่าความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันเพิ่มขึ้นเป็น 6.15 ชั่วโมง และเพิ่มเป็น 7.36 ชั่วโมง เมื่อเติมในปริมาณความเข้มข้น 350 พีพีเอ็ม รองลงมา คือ สาร Kerobit[®] TP 26 ที่เติมในปริมาณความเข้มข้น 250 พีพีเอ็ม จึงจะมีความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน 6.11 ชั่วโมง และเมื่อเติมในปริมาณความเข้มข้น 350 พีพีเอ็ม จะมีความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันเป็น 6.75 ชั่วโมง ส่วนสาร BHT นั้นเพื่อให้มีความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันเท่ากับ 6.22 ชั่วโมง จะต้องเติมลงในไบโอดีเซลจากน้ำมันสนุดำในปริมาณความเข้มข้น 300 พีพีเอ็ม และเมื่อเติมในปริมาณ 350 พีพีเอ็ม ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันก็จะเพิ่มขึ้นเป็น 6.65 ชั่วโมง



ภาพที่ 28 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสนุดำเมื่อเติมสาร BHT ในปริมาณความเข้มข้น 50-350 พีพีเอ็ม

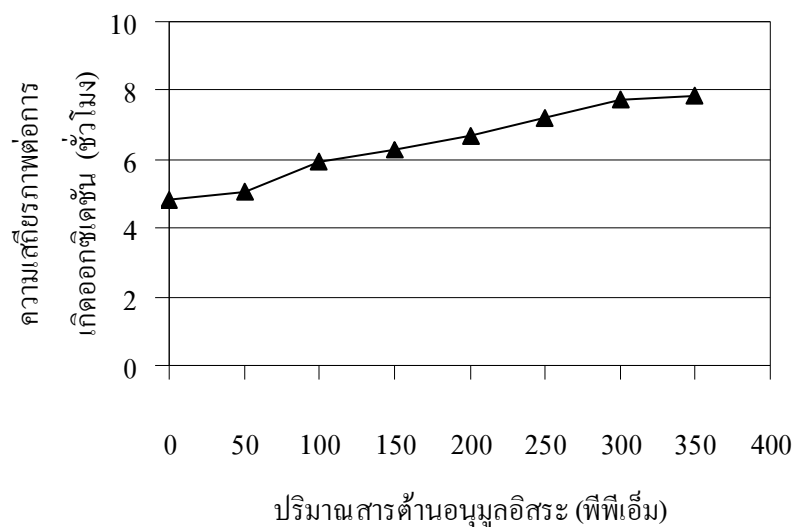
ผลการทดลองข้างต้นพบว่า มีความแนวโน้มเดียวกับงานวิจัยของ Dunn (2005) ซึ่งศึกษาประสิทธิภาพของสารต้านอนุมูลอิสระในการลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลือง โดยพบว่า การเติมสาร BHA และ BHT ทำให้ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลืองเพิ่มขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของสารต้านอนุมูล

อิสระที่ใช้ จนถึงความเข้มข้น 1,000 พีพีเอ็ม และยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ May *et al.* (2006) ที่ศึกษาอิทธิพลของสารต้านอนุมูลอิสระต่อไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มกลั่น โดยพบว่า ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของสาร BHT ที่เติมลงไป

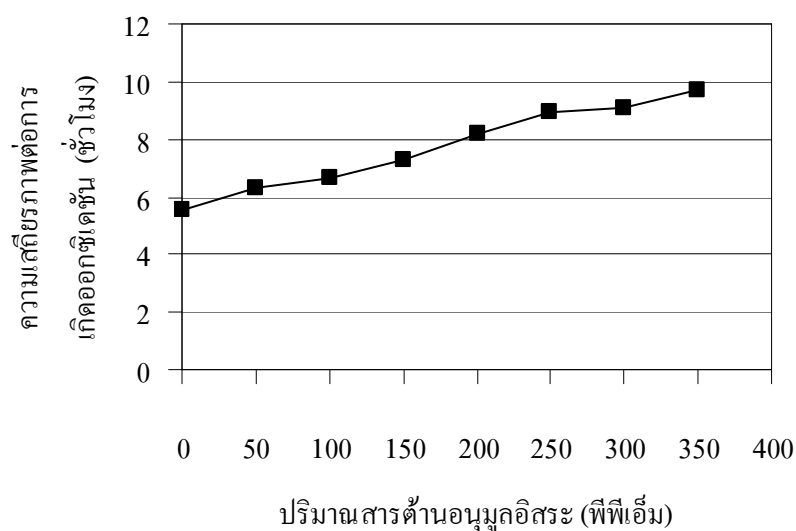
4. การศึกษาความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสนุ่นดำและจากน้ำมันมะพร้าวเมื่อเติมสารต้านอนุมูลอิสระลงไป

เพื่อให้สามารถนำไบโอดีเซลไปใช้งานได้ในสภาพอากาศที่มีอุณหภูมิไม่ต่ำมากจนถึงต่ำ ในขณะที่ไบโอดีเซลยังมีค่าความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันมากกว่า 6 ชั่วโมง การทดลองต่อมาจึงทำการศึกษาหาปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ ที่มีความเหมาะสมสำหรับไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสนุ่นดำและจากน้ำมันมะพร้าว โดยทำการเติมสาร BHA ซึ่งเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่ใช้ในปริมาณความเข้มข้นน้อยสุดจากผลการทดลองในหัวข้อที่ 3. เพื่อให้ไบโอดีเซลจากน้ำมันสนุ่นดำมีค่าความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันเป็นไปตามมาตรฐาน EN 14112 คือ มากกว่า 6 ชั่วโมง โดยเติมสาร BHA ในปริมาณความเข้มข้นตั้งแต่ 50-350 พีพีเอ็ม ลงในไบโอดีเซลที่มีค่าความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันน้อยกว่า 6 ชั่วโมง จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 1. คือ ไบโอดีเซลจากน้ำมันสนุ่นดำที่ผสมด้วยไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วน 20 และ 40 เปอร์เซ็นต์

จากผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 26 พบว่า ค่าความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของสาร BHA ที่เติมลงไป โดยการเติมสาร BHA ในปริมาณตั้งแต่ 200 พีพีเอ็มขึ้นไป ช่วยให้ไบโอดีเซลจากน้ำมันสนุ่นดำมีค่าความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด คือ 6.15 ชั่วโมง ซึ่งมีแนวโน้มเดียวกับงานวิจัยของ Ramos *et al.* (2007) ที่ศึกษาประสิทธิภาพของสารต้านอนุมูลอิสระที่เติมในไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลืองผ่านกรรมวิธีกลั่นให้บริสุทธิ์ โดยพบว่า ค่าความเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของสาร BHA ที่เติมลงในไบโอดีเซลจนถึงปริมาณความเข้มข้น 1,500 พีพีเอ็ม โดยเพิ่มจาก 0.16 ชั่วโมงเป็น 1.39 ชั่วโมง



ภาพที่ 29 ผลของปริมาณสาร BHA ต่อความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 80:20



ภาพที่ 30 ผลของปริมาณสาร BHA ต่อความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 60:40

จากการทดลองแสดงดังภาพที่ 29 และ 30 พบว่า การผสมไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ ด้วยไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าว นั้น ช่วยลดปริมาณการเติมสารต้านอนุมูลอิสระ คือ สาร BHA โดยพบว่า การเติมสาร BHA ปริมาณความเข้มข้น 150 พีพีเอ็ม และ 50 พีพีเอ็ม ลงในไบโอดีเซล จากน้ำมันสบู่ดำที่ผสมด้วยไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วน 20 และ 40 เปอร์เซ็นต์ มีค่า ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันเป็นไปตามมาตรฐาน EN 14112 คือ 6.26 ชั่วโมง และ 6.32 ชั่วโมง ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองในภาพที่ 24 พบว่า การผสมไบโอดีเซล จากน้ำมันสบู่ดำด้วยไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วน 20-40 เปอร์เซ็นต์ จะช่วยลดการใช้ สารต้านอนุมูลอิสระ คือ สาร BHA ลงได้ 25-75 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาณการเติมสารต้านอนุมูล อิสระในไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำจะลดลง เมื่อไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำผสมด้วยไบโอดีเซล จากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น

จากผลการทดลองนี้มีลักษณะคล้ายกับงานวิจัยของ Sarin *et al.* (2007) ซึ่งศึกษาการ ปรับปรุงความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ โดยศึกษาหาชนิด และปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระที่เหมาะสม เพื่อให้ไบโอดีเซลที่ผลิตได้มีความเสถียรภาพต่อการ เกิดออกซิเดชันเป็นไปตามมาตรฐานตามวิธีทดสอบ EN 14112 โดยพบว่า ปริมาณการเติมสารต้าน อนุมูลอิสระ คือ 2,6-Ditertiarybutyl hydroxytoluene ลงในไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำเพื่อให้มี ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันมากกว่า 6 ชั่วโมง จะลดลงถึง 80-90 เปอร์เซ็นต์ เมื่อผสม ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มลงไปในอัตราส่วน 20-40 เปอร์เซ็นต์

นอกจากนี้ยังพบว่า การเติมสารต้านอนุมูลอิสระ คือ สาร BHA ลงในไบโอดีเซลจากน้ำมัน สบู่ดำและไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวนั้น ไม่มี อิทธิพลต่อจุดหมอกควันและจุดไหลเทของไบโอดีเซล ดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 จุดหมอกควันและจุดไหลเทของไบโอดีเซล

ไบโอดีเซล	จุดหมอกควัน (องศาเซลเซียส)	จุดไหลเท (องศาเซลเซียส)
สบู่ดำ	3	-8
สบู่ดำ เดิม BHA 200 พีพีเอ็ม	3	-8
สบู่ดำ:มะพร้าว = 80:20	5	-5
สบู่ดำ:มะพร้าว = 80:20 เดิม BHA 150 พีพีเอ็ม	5	-5
สบู่ดำ:มะพร้าว = 60:40	8	-2
สบู่ดำ:มะพร้าว = 60:40 เดิม BHA 50 พีพีเอ็ม	8	-2

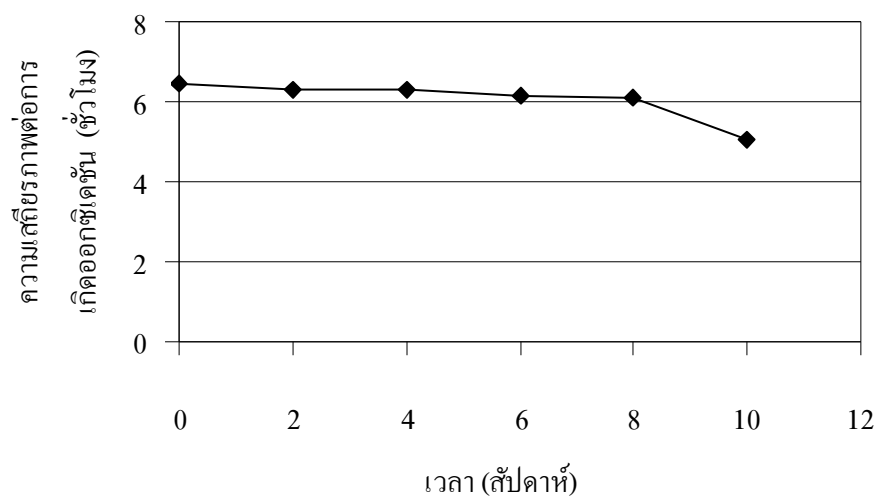
5. การศึกษาความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลที่เติมสารต้านอนุมูลอิสระหลังจากจัดเก็บเป็นระยะเวลานาน

เนื่องจากในน้ำมันสบู่ดำนั้นประกอบด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัวเป็นจำนวนมาก จึงมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเมื่อโดนความร้อนและอากาศ เป็นเหตุให้ไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำมีความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันต่ำกว่ามาตรฐานตามวิธีทดสอบ EN 14112 ซึ่งงานวิจัยในหัวข้อก่อนหน้านี้ ได้ศึกษาการปรับปรุงความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ โดยทำการศึกษาความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าว และศึกษาหาชนิดและปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระที่มีความเหมาะสมสำหรับไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ ปัจจัยสำคัญที่ควรคำนึงถึงคือ ไบโอดีเซลที่ผลิตได้อาจไม่ได้นำไปใช้งานทันที ต้องผ่านการขนส่งและจัดเก็บเป็นระยะเวลานานก่อนนำไปใช้งาน ซึ่งทำให้ไม่อาจแน่ใจได้ว่าไบโอดีเซลที่ทำการปรับปรุงความเสถียรภาพ

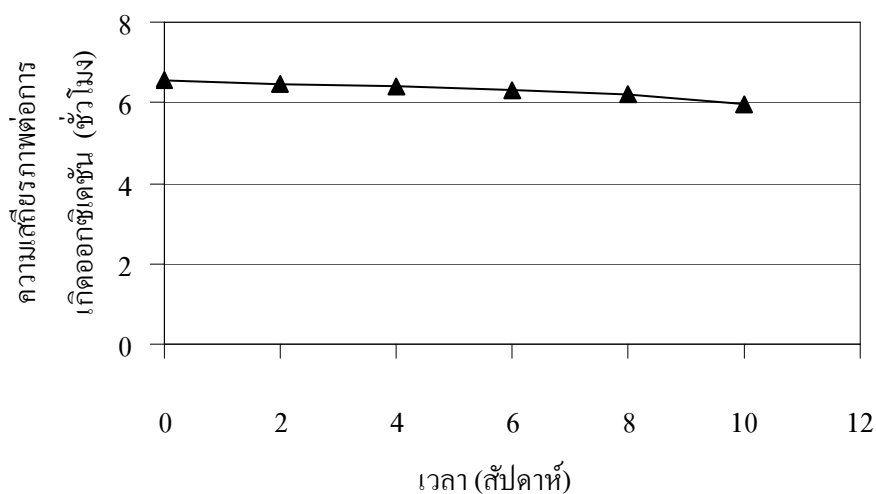
ต่อการเกิดออกซิเดชันแล้วจะยังคงมีความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด คือ มากกว่า 6 ชั่วโมง

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันที่ลดลงของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่ปรับปรุงความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันด้วยการเติมสาร BHA ปริมาณความเข้มข้น 200 พีพีเอ็ม และไบโอดีเซลผสมระหว่าง ไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวที่ปรับปรุงความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันด้วยการเติมสาร BHA ปริมาณความเข้มข้น 50 พีพีเอ็ม หลังจากจัดเก็บไว้ในที่มืดและอุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลานาน คือ 10 สัปดาห์ โดยทำการวัดความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลทุก 2 สัปดาห์

จากผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 31 พบว่า เมื่อเริ่มการทดลองนั้นความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร BHA ในปริมาณความเข้มข้น 200 พีพีเอ็ม มีค่าเป็นไปตามมาตรฐานตามวิธีทดสอบ EN 14112 คือ 6.43 ชั่วโมง และเมื่อจัดเก็บในที่มืดและอุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลานาน 10 สัปดาห์ พบว่า ค่าความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลลดลงเรื่อย ๆ โดยมีค่าเท่ากับ 6.29 ชั่วโมงในสัปดาห์ที่ 4 และลดลงจนมีค่าเท่ากับ 5.05 ชั่วโมง ซึ่งต่ำกว่า 6 ชั่วโมง ในสัปดาห์ที่ 10 ซึ่งมีแนวโน้มเดียวกันกับความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 60:40 ที่เติมสาร BHA ปริมาณความเข้มข้น 50 พีพีเอ็ม ดังแสดงในภาพที่ 32 โดยพบว่า ไบโอดีเซลจะมีความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันเมื่อเริ่มต้นเท่ากับ 6.58 ชั่วโมง และลดลงตามระยะเวลาการจัดเก็บที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 6.39 ชั่วโมงหลังจัดเก็บเป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์ และลดลงจนต่ำกว่า 6 ชั่วโมง คือ 5.97 ชั่วโมง หลังจากจัดเก็บเป็นระยะเวลา 10 สัปดาห์ และเมื่อเปรียบเทียบกับภาพที่ 30 พบว่า ที่ระยะเวลา 10 สัปดาห์นั้น ไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำมีความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันลดลง 21.46 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับตอนเริ่มต้น ซึ่งมีค่ามากกว่าไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 60:40 ที่มีค่าลดลง 9.27 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับตอนเริ่มต้น



ภาพที่ 31 ความสามารถต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสุญต์ที่เติมสาร BHA ปริมาณความเข้มข้น 200 พีพีเอ็ม ระหว่างจัดเก็บเป็นระยะเวลา 10 สัปดาห์



ภาพที่ 32 ความสามารถต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสุญต์และจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 60:40 ที่เติมสาร BHA 50 พีพีเอ็ม ระหว่างจัดเก็บเป็นระยะเวลา 10 สัปดาห์

ผลการทดลองในงานวิจัยนี้มีแนวโน้มสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mittelbach and Gangl (2001) ที่ได้ศึกษาการเสถียรภาพทางกายภาพและทางเคมีของไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดเรพ และน้ำมันใช้แล้ว หลังจากจัดเก็บเป็นระยะเวลานานในสถานะที่แตกต่างกัน ซึ่งพบว่า ไบโอดีเซลที่

จัดเก็บในขวดปิดฝาและเก็บในที่มืดนั้น มีความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันลดลงหลังจากจัดเก็บเป็นระยะเวลา 200 วัน โดยค่าความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดเรพจะลดลงจาก 5.60 ชั่วโมง เป็น 1-2 ชั่วโมง และลดลงจาก 5.90 ชั่วโมงเป็น 2-3 ชั่วโมง สำหรับไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้ว

6. ลักษณะสมบัติของไบโอดีเซล

การทดลองในส่วนนี้จะทำการตรวจสอบลักษณะสมบัติของไบโอดีเซลชนิดต่าง ๆ โดยเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานยุโรป EN 14214 จากผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 8 พบว่าลักษณะสมบัติของไบโอดีเซลชนิดต่าง ๆ เป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด ยกเว้นความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ โดยไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำนั้นมีปริมาณเมทิลเอสเทอร์ ความหนืดที่ 40 องศาเซลเซียส จุลวาล์วไฟ และค่าความเป็นกรดสูงกว่าไบโอดีเซลชนิดอื่น คือ มีปริมาณเมทิลเอสเทอร์ 97.99 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความหนืดที่ 40 องศาเซลเซียส 4.65 มิลลิเมตร²ต่อวินาที จุลวาล์วไฟ 184 องศาเซลเซียส และค่าความเป็นกรด 0.39 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม ส่วนไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวมีความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน และมีจุดหมอกควันและจุดไหลเทสูงกว่าไบโอดีเซลชนิดอื่น คือ มีความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน 19.22 ชั่วโมง จุดหมอกควันเท่ากับ 14 องศาเซลเซียส และจุดไหลเทเท่ากับ 5 องศาเซลเซียส นอกจากนี้การผสมไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำด้วยไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์ และการเติมสารต้านอนุมูลอิสระลงในไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่ผสมด้วยไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วน 60 เปอร์เซ็นต์ ไม่ส่งผลต่อลักษณะสมบัติอื่น ๆ นอกจากการปรับปรุงความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน และทำให้จุดหมอกควันและจุดไหลเทของไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 8 ลักษณะสมบัติของไบโอดีเซล

ลักษณะสมบัติ	มาตรฐาน ไบโอดีเซล EN 14214	สบู่ดำ	สบู่ดำ: มะพร้าว = 60:40 ที่เติม BHA 50 พีพีเอ็ม	สบู่ดำ: มะพร้าว = 50:50	มะพร้าว
เมทิลเอสเทอร์ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	ไม่ต่ำกว่า 96.5	97.99	96.99	96.85	96.59
ความหนืดที่ 40 องศาเซลเซียส (มิลลิเมตร ² ต่อวินาที)	3.5 – 5.0	4.65	4.09	3.95	3.57
จุดหมอกควัน (องศาเซลเซียส)	-	3	8	9	14
จุดไหลเท (องศาเซลเซียส)	-	-8	-2	0	5
จุดวาบไฟ (องศาเซลเซียส)	ไม่ต่ำกว่า 120	184	152	148	132
ค่าความเป็นกรด (มิลลิกรัมโพแทสเซียม- ไฮดรอกไซด์ต่อกรัม)	ไม่สูงกว่า 0.5	0.39	0.26	0.22	0.09
ความเสถียรภาพต่อการ เกิดออกซิเดชันที่ 110 องศาเซลเซียส, EN14112 (ชั่วโมง)	ไม่ต่ำกว่า 6	3.69	6.32	7.32	19.22

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสุญ่ดำและจากน้ำมันมะพร้าว เพื่อปรับปรุงความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน และศึกษาหาชนิดและปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระที่มีความเหมาะสมสำหรับไบโอดีเซลจากน้ำมันสุญ่ดำ รวมทั้งศึกษาความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสุญ่ดำ และไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสุญ่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวที่เติมสารต้านอนุมูลอิสระหลังจากจัดเก็บไว้เป็นระยะเวลานาน และทำการตรวจสอบลักษณะสมบัติของไบโอดีเซล จากการทดลองสามารถสรุปผลได้ ดังนี้

1. ไบโอดีเซลจากน้ำมันสุญ่ดำในการทดลองนี้มีค่าความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลเท่ากับ 3.69 ชั่วโมง ซึ่งไม่เป็นไปตามมาตรฐาน EN 14112 ที่กำหนดให้มีค่ามากกว่า 6 ชั่วโมง ในขณะที่ไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวมีความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันเท่ากับ 19.22 ชั่วโมง ดังนั้น การผสมไบโอดีเซลจากน้ำมันสุญ่ดำด้วยไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวจึงช่วยปรับปรุงความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซล โดยไบโอดีเซลผสมที่ประกอบด้วยไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป จะมีความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันมากกว่า 6 ชั่วโมง

2. เนื่องจากในน้ำมันมะพร้าวประกอบด้วยกรดไขมันอิ่มตัวเป็นจำนวนมาก ซึ่งกรดไขมันอิ่มตัวนั้นมีจุดหลอมเหลวสูงกว่ากรดไขมันไม่อิ่มตัว ด้วยเหตุนี้น้ำมันมะพร้าวจึงมีจุดหมอกควันและจุดไหลเทสูง โดยมีจุดหมอกควันเท่ากับ 14 องศาเซลเซียส และมีจุดไหลเทเท่ากับ 5 องศาเซลเซียส ส่วนไบโอดีเซลจากน้ำมันสุญ่ดำมีจุดหมอกควันเท่ากับ 3 องศาเซลเซียส และมีจุดไหลเทเท่ากับ -8 องศาเซลเซียส ดังนั้น การผสมไบโอดีเซลจากน้ำมันสุญ่ดำด้วยไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าว จึงส่งผลให้ไบโอดีเซลผสมมีจุดหมอกควันและจุดไหลเทเพิ่มขึ้น ซึ่งไบโอดีเซลที่ประกอบด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัวและกรดไขมันอิ่มตัวในอัตราส่วนที่เหมาะสมจะมีความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน รวมทั้งจุดหมอกควันและจุดไหลเทของไบโอดีเซลที่ดี

3. การเติมสารต้านอนุมูลอิสระลงในไบโอดีเซลเป็นวิธีหนึ่ง ในการลดความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำ โดยสาร BHA เป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่ใช้ในปริมาณความเข้มข้นน้อยสุด คือ 200 พีพีเอ็ม เพื่อให้ไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำมีค่าความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันมากกว่า 6 ชั่วโมง คือ 6.22 ชั่วโมง เป็นไปตามมาตรฐาน EN 14112

4 การผสมไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำด้วยไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วน 20-40 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ลดการใช้สารต้านอนุมูลอิสระ คือ สาร BHA ลงได้ 25-75 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาณการเติมสารต้านอนุมูลอิสระลงในไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำจะลดลง เมื่อไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำผสมด้วยไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น

5. การจัดเก็บไบโอดีเซลเป็นระยะเวลานานหลังจากการผลิตนั้น ส่งผลให้ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลลดลง โดยเมื่อเริ่มต้นการทดลองไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำที่เติมสาร BHA ปริมาณความเข้มข้น 200 พีพีเอ็ม มีความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันเท่ากับ 6.43 ชั่วโมง และลดลง 21.46 เปอร์เซ็นต์ หลังจากจัดเก็บในที่มืดและอุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 10 สัปดาห์ ในขณะที่ไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 60:40 ที่เติมสาร BHA ปริมาณความเข้มข้น 50 พีพีเอ็ม มีความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันเมื่อตอนเริ่มต้นเท่ากับ 6.58 ชั่วโมง และหลังจากจัดเก็บเป็นระยะเวลา 10 สัปดาห์ จะมีค่าลดลง 9.27 เปอร์เซ็นต์

6. จากการตรวจสอบลักษณะสมบัติของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำ ไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำที่ผสมด้วยไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 50:50 ไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 60:40 ที่เติมสาร BHA และไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าว พบว่า การผสมไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำด้วยไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์ และการเติมสารต้านอนุมูลอิสระลงในไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากสบูดำและจากน้ำมันมะพร้าว ไม่ส่งผลต่อลักษณะสมบัติอื่น ๆ นอกจากการปรับปรุงความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน และทำให้จุดหมอกควันและจุดไหลเทของไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น

ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยนี้มีข้อเสนอแนะและแนวทางที่ควรศึกษาต่อ ดังนี้

1. เนื่องจากความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซล เป็นลักษณะสมบัติสำคัญที่ควรพิจารณาในการขนส่งและเก็บรักษาไบโอดีเซลเป็นระยะเวลานานก่อนนำไปใช้งาน จึงควรศึกษาปัจจัยอื่น ๆ ที่มีอิทธิพลต่อความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน หลังจากจัดเก็บเป็นระยะเวลานานเพิ่มเติม เช่น ค่าความเป็นกรด ค่าเปอร์ออกไซด์ ความหนืดที่ 40 องศาเซลเซียส และค่าไอโอดีน เป็นต้น
2. ควรมีการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันผสมระหว่างน้ำมันสบู่ดำและน้ำมันมะพร้าว เพื่อลดต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซลแยกกันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าว
3. เนื่องจากการผสมไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำด้วยไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวส่งผลให้จุดหมอกควันและจุดไหลเทเพิ่มขึ้น จึงควรศึกษาหาชนิดและปริมาณการเติมสารลดจุดหมอกควันและจุดไหลเทที่มีความเหมาะสมสำหรับไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวและไบโอดีเซลผสมเพิ่มเติม
4. งานวิจัยนี้เป็นการปรับปรุงความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ โดยหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าว รวมทั้งศึกษาหาชนิดและปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ ซึ่งเป็นการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ ดังนั้นจึงควรมีการพัฒนางานวิจัยไปสู่การใช้งานจริงในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมธุรกิจพลังงาน. 2548. ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2548. แหล่งที่มา: www.doeb.go.th, 19 ตุลาคม 2550.

กรมส่งเสริมการเกษตร. 2541. การปลูกมะพร้าว. แหล่งที่มา: <http://www.doae.go.th/Library/html/detail/coconut1/index.html>, 23 พฤศจิกายน 2550.

กระทรวงพลังงาน. 2547. ไบโอดีเซล น้ำมันเชื้อเพลิงจากพืช. **Energy Plus**. 1: 16-21.

คณะกรรมการพลังงาน สภาผู้แทนราษฎร. 2545. พลังงานทดแทน เอทานอล และไบโอดีเซล. สำนักพิมพ์แปลน พรินติ้ง, กรุงเทพฯ.

ณรงค์ โฉมเฉลา. 2550. บทบาทของน้ำมันมะพร้าวต่อสุขภาพ และความงาม. การบรรยายประชุมวิชาการกรมพัฒนา (วันพุธ). กรมพัฒนาการแพทย์แผนไทยและการแพทย์ทางเลือก กระทรวงสาธารณสุข กรุงเทพฯ.

ทัศนีย์ สวัสดิ์พาณิชย์. 2550. การหาสถานะที่เหมาะสมทางสถิติของการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสุบู่ด้วยกระบวนการทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นันทนา ยาค้า. 2528. อุตสาหกรรมน้ำมันมะพร้าว. รายงานภาวะเศรษฐกิจอุตสาหกรรมเฉพาะประเภท. กองเศรษฐกิจอุตสาหกรรม สำนักงานปลัดกระทรวงอุตสาหกรรม กรุงเทพฯ.

นิสากร ปานประสงค์. 2549. สบู่ดำ: ความคาดหวังแห่งพลังงานทดแทน. **อัพเดท**. 21: 37-45.

บริษัท พาราไซแอนติฟิค จำกัด. 2547. ไบโอดีเซล เชื้อเพลิงชีวภาพของยุคสมัย. แหล่งที่มา: www.barascientific.com/bscnews/forum/Biodiesel/biodiesel.php, 22 มีนาคม 2550.

บุปผา มั่นอารมณ์. 2549. พลังงานทดแทน: สบู่ดำกับอนาคตของพลังงานทดแทน. มติชนบท เทคโนโลยีชาวบ้าน. 18: 54-56.

บุษบง บุษปวณิช. 2549. พืช"สบู่ดำ" กินไม่ได้ รุนแรงถึงเสียชีวิต. แหล่งที่มา:
<http://203.156.172.124/news/detail2.php?getdate=30/04/2549&getnum=122788>, 16
 เมษายน 2550.

ประเสริฐ เทียนนิมิตร, ขวัญชัย สันทิพย์สมบุรณ์ และปานเพชร ชินินทร. 2544. เชื้อเพลิงและสาร
 หล่อลื่น. บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด, กรุงเทพฯ.

พิศมัย เจนวนิชปัญญกุล. 2550. การผลักดันอุตสาหกรรมการผลิตไบโอดีเซลอย่างยั่งยืน. การ
 ประชุมวิชาการประจำปีของสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.
 สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และ
 เทคโนโลยี ปทุมธานี.

ภริตา จิรวรรณกุล. 2550. ประโยชน์หลายสถานของ...มะพร้าวไทย. หนึ่งไทย. 763: 44-46.

วิเชียร สุขสร้อย. 2549. ไบโอดีเซลจากสบู่ดำ...ทางเลือกสู่พลังงานทดแทนที่ยั่งยืน. วารสารอิน
 โนว์ชันลิงค์. 6:3.

ศิริวรรณ ศิลป์สกุลสุข. 2550. การควบคุมคุณภาพน้ำมันไบโอดีเซล. แหล่งที่มา:
www.dss.go.th/dssweb/st-articles/index.xsp, 20 พฤศจิกายน 2550.

ศูนย์เครือข่ายความรู้วัฒนธรรม มหาวิทยาลัยบูรพา. 2547. มะพร้าว. แหล่งที่มา:
www.nectec.or.th/courseware/siamculture/plants/coconut.html, 23 พฤศจิกายน 2550.

ศูนย์ส่งเสริมและพัฒนาอาชีพการเกษตร จังหวัดชัยนาท. 2549. สบู่ดำ. แหล่งที่มา:
http://chanthaburi.doae.go.th/news/physic_nut.doc, 16 เมษายน 2550.

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. 2550. การผลิตและการตรวจสอบ
มาตรฐานไบโอดีเซลเบื้องต้น. แหล่งที่มา: www.tistr.or.th, 4 มกราคม 2551.

สมชัย อัครทิวา. 2546. ความรู้พื้นฐานทางวิศวกรรมของปฏิกิริยาเชิงเร่ง. สำนักพิมพ์ท็อป,
กรุงเทพฯ.

สำนักงานอุตสาหกรรมจังหวัดหนองบัวลำภู. 2549. พืชสมุนไพร. แหล่งที่มา:
www.m-industry.go.th/min/intro/province/Nongbualamphu/plan/biodiesel_01.htm, 16
เมษายน 2550.

สุชาดา ไชยสวัสดิ์. 2550. มะพร้าวต้นไม้มั่งชีวิตเพื่อสุขภาพและความงาม. แหล่งที่มา:
http://www.vcharkarn.com/include/article/en_article_javafeed.php?aid=17857, 23
พฤศจิกายน 2550.

แสงโสม เกิดคล้าย. 2550. จากสมุนไพรสู่ไบโอดีเซล...สถานการณ์การได้รับพิษจากเมล็ดสบู่ดำ.
รายงานการเฝ้าระวังทางระบาดวิทยาประจำสัปดาห์. 38(9): 145-148.

อาภาณี เหลืองนฤมิตชัย. 2549. ไบโอดีเซล. แหล่งที่มา:
www.vcharkarn.com/include/article/en_article_javafeed.php?aid=409, 4 มกราคม 2551.

อำพล ชื้อตรง และสาธิต ศรีวิเชียร. 2545. เชื้อเพลิงและวัสดุหล่อลื่น. สำนักพิมพ์ศูนย์ส่งเสริม
วิชาการ, กรุงเทพฯ.

Agarwal, A.K. 2007. Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal
combustion engines. **Prog. Energy Combust. Sci.** 33: 233–271.

Dunn, R.O. 2005. Effect of antioxidants on the oxidative stability of methyl soyate (biodiesel).
Fuel Process. Technol. 86: 1071–1085.

- Exconde, Abigail Alvarez Malaluan. 2003. **Homogeneous and heterogeneous catalytic production of biodiesel from palm kernel oil and coconut oil**. Thesis (M.S.), The Petroleum and Petrochemical College. Bangkok.
- Ferrari, R.A., V.S. Oliveira and A. Scabio. 2005. Oxidative stability of biodiesel from soybean oilfatty acid ethyl esters. **Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)**. 62: 291-295.
- Khan, A.K. 2002. **Research into Biodiesel Kinetics & Catalyst Development**. Available source: http://www.chegue.uq.edu.au/ugrad/chee4001/CHEE400102/Adam_Khan_Thesis.pdf. April 18, 2007
- Lee, J.S., J.Y. Park, D.K. Kim, J.P. Lee, S.P. Park and Y.J. Kim. 2008. Blending effects of biodiesels on oxidation stability and low temperature flow properties. **Bioresour. Technol.** 99: 1196-1203.
- Ma, F. and M.A. Hanna. 1999. Biodiesel production: a review. **Bioresour. Technol.** 70: 1-15.
- May, C.Y., Y.C. Liang, C.S. Foon, M.A. Ngan, C. C. Hock and Y. Basiron. 2006. The effect of natural and synthetic antioxidants on the oxidative stability of palm diesel. **Fuel**. 85: 867–870.
- Mccormick, R.L., M. Ratcliff, L. Moens and R. Lawrence. 2007. Several factors affecting the stability of biodiesel in standard accelerated tests. **Fuel Process. Technol.** 88: 651–657.
- Mittelbach M. and S. Gangl. 2001. Long Storage Stability of Biodiesel Made from Rapeseed and Used Frying Oil. **J. Am. Oil. Chem. Soc.** 78: 573-577.
- Pramanik K. 2003. Properties and use of Jatropha curcas oil and diesel fuel blends in compression ignition engine. **Renew. Energ.** 28: 239–248.

- Ramos, L.P., A.K. Domingos, E.B. Saad, W.W. D. Vechiatto and H. M. Wilhelm. 2007. The Influence of BHA, BHT and TBHQ on the Oxidation Stability of Soybean Oil Ethyl Esters (Biodiesel). **J. Braz. Chem. Soc.** 18: 416-423.
- Sarin, R., M. Sharma, S. Sinharay and R.K. Malhotra. 2007. Jatropha–Palm biodiesel blends: An optimum mix for Asia. **Fuel.** 86: 1365-1371.
- Srivastava, A. and R. Prasad. 2000. Triglycerides – based diesel fuels. **Renew. Sust. Energ. Rev.** 4: 111-133.
- The European Oleochemicals and Allied Products Group. 2007. **Determination of Cloud Point.** Available Source: www.apag.org/oleo/APAG11/stm003.html. March 17, 2008.
- University of Idaho. 2007. **Fuel Stability.** Available Source: www.uidaho.edu/bioenergy/Bioshortcourse/fuel_Stablity.htm. March 16, 2008.
- Waynick, J.A. 2005. **Charaterization of Biodiesel Oxidation and Oxidation Products.** Letter Report No. SwRI 08-10721, For The Coordinating Research Council and National Renewable Energy Laboratory, Contract No. AVFL-2b.
- Xie, W., X. Huang and H. Li. 2007. Soybean oil methyl esters preparation using NaX zeolites loaded with KOH as a heterogeneous catalyst. **Bioresour. Technol.** 98: 936–939.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

มาตรฐานไบโอดีเซล

ตารางผนวกที่ ก1 มาตรฐานไบโอดีเซลตามมาตรฐาน ASTM D 6751 ของประเทศสหรัฐอเมริกา

ลักษณะสมบัติ	หน่วย	วิธีทดสอบ	เกณฑ์	
			ต่ำสุด	สูงสุด
จุดวาบไฟ	องศาเซลเซียส	ASTM D93	130	
น้ำและตะกอน	ร้อยละโดยปริมาตร	ASTM D2709		0.050
ความหนืดที่ 40 องศาเซลเซียส	มิลลิเมตร ² ต่อวินาที	ASTM D445	1.9	6.0
เถ้าซัลเฟต	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ASTM D874		0.02
ปริมาณกำมะถัน	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ASTM D5453		0.05
การกัดกร่อนทองแดง		ASTM D130		No. 3
ค่าซีเทน		ASTM D613	47	
จุดหมอกควัน	องศาเซลเซียส	ASTM D2500	รายงานผล	
กากถ่าน (ร้อยละ 100 ของตัวอย่าง)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ASTM D4530		0.050
ค่าความเป็นกรด	มิลลิกรัมโพแทสเซียม-ไฮดรอกไซด์ต่อกรัม	ASTM D664		0.80
กลีเซอรินอิสระ	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ASTM D6584		0.02
กลีเซอรินทั้งหมด	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ASTM D6584		0.24
ปริมาณฟอสฟอรัส	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ASTM D4951		0.001
อุณหภูมิการกลั่น เทียบเท่าที่ ความดันบรรยากาศกลั่นได้ ร้อยละ 90	องศาเซลเซียส	ASTM D1180		360

ที่มา: คณะกรรมการพลังงาน (2545)

ตารางผนวกที่ ก2 มาตรฐานไบโอดีเซลตามมาตรฐาน DIN EN 14214 ของสหภาพยุโรป

ลักษณะสมบัติ	หน่วย	เกณฑ์		กรรมวิธีการทดสอบ
		ต่ำสุด	สูงสุด	
ปริมาณเอสเทอร์	ร้อยละโดยน้ำหนัก	96.5		pr EN 14103
ความหนาแน่นที่ 15 องศาเซลเซียส	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร	860	900	EN ISO 3675 EN ISO 12185
ความหนืดที่ 40 องศาเซลเซียส	มิลลิเมตร ² ต่อวินาที	3.5	5.0	EN ISO 3104
จุดวาบไฟ	องศาเซลเซียส	120		ISO/CD 3679
ปริมาณกำมะถัน	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม		10	
ปริมาณคาร์บอนตกค้าง (ที่ร้อยละ 10 ของการกลั่น)	ร้อยละโดยน้ำหนัก		0.3	EN ISO 10370
ค่าซีเทน		51.0		EN ISO 5165
ปริมาณขี้เถ้า	ร้อยละโดยน้ำหนัก		0.02	ISO 3987
ปริมาณน้ำ	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม		500	EN ISO 12937
ปริมาณสารแปดกลอม	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม		24	EN 12662
การกัดกร่อนทองแดง (3 ชั่วโมง ที่ 50 องศาเซลเซียส)	เกณฑ์ตรวจสอบ			EN ISO 2160
ความเสถียรที่ 110 องศาเซลเซียส	ชั่วโมง	6.0		pr EN 14112
ค่าความเป็นกรด	มิลลิกรัมโพแทสเซียม-ไฮดรอกไซด์ต่อกรัม		0.5	pr EN 14104
ค่าไอโอดีน			120	pr EN 14111
เอสเทอร์ชนิดไลโนลิติก	ร้อยละโดยน้ำหนัก		12	pr EN 14103
เอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัว	ร้อยละโดยน้ำหนัก		1	
เมทานอล	ร้อยละโดยน้ำหนัก		0.2	pr EN 14110
โมนอกลิเซอไรด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก		0.6	pr EN 14105
ไดโนกลีเซอไรด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก		0.2	pr EN 14105
ไตรโนกลีเซอไรด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก		0.2	pr EN 14105

ที่มา: คณะกรรมการพลังงาน (2545)

**ตารางผนวกที่ ก3 ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรด
ไขมัน พ.ศ. 2548**

รายการ	ลักษณะสมบัติ	ข้อกำหนด	วิธีทดสอบ
1	เมทิลเอสเทอร์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่ต่ำกว่า 96.5	EN 14103
2	ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	ไม่ต่ำกว่า 860 และไม่ สูงกว่า 900	ASTM D 1298
3	ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (เซนติสโตกส์)	ไม่ต่ำกว่า 3.5 และไม่ สูงกว่า 5.0	ASTM D 445
4	จุดวาบไฟ (องศาเซลเซียส)	ไม่ต่ำกว่า 120	ASTM D 93
5	กำมะถัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า 0.0010	ASTM D 2622
6	กากถ่าน (ร้อยละ 10 ของกากที่เหลือจากการกลั่น) (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า 0.30	ASTM D 4530
7	จำนวนซีเทน	ไม่ต่ำกว่า 51	ASTM D 613
8	เถ้าซัลเฟต (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า 0.02	ASTM D 874
9	น้ำ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า 0.050	ASTM D 2709
10	สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า 0.0024	ASTM D 5452
11	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง	ไม่สูงกว่า หมายเลข 1	ASTM D 130
12	เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส (ชั่วโมง)	ไม่ต่ำกว่า 6	EN 14112
13	ค่าความเป็นกรด (มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม)	ไม่สูงกว่า 0.50	ASTM D 664
14	ค่าไอโอดีน (กรัมไอโอดีนต่อ 100 กรัม)	ไม่สูงกว่า 120	EN 14111

ตารางผนวกที่ ก3 (ต่อ)

รายการ	ลักษณะสมบัติ	ข้อกำหนด	วิธีทดสอบ
15	กรดลิโนลินิกเมทิลเอสเทอร์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า 12.0	EN 14103
16	เมทานอล (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า 0.20	EN 14110
17	โมนอกลิเซอไรด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า 0.80	EN 14105
18	ไดกลิเซอไรด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า 0.20	EN 14105
19	ไตรกลิเซอไรด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า 0.20	EN 14105
20	กลีเซอรินอิสระ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า 0.20	EN 14105
21	กลีเซอรินทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า 0.25	EN 14105
22	โลหะกลุ่มที่ 1 (โซเดียมและโพแทสเซียม) (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ไม่สูงกว่า 5.0	EN 14108 และ EN14109
	โลหะกลุ่มที่ 2 (แคลเซียมและแมกนีเซียม) (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ไม่สูงกว่า 5.0	pr EN 14538
23	ฟอสฟอรัส (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า 0.0010	ASTM D 4951
24	สารเติมแต่ง (ถ้ามี)	ให้เป็นไปตามที่ได้รับ ความเห็นชอบจากอธิบดี กรมธุรกิจพลังงาน	

ที่มา: กรมธุรกิจพลังงาน (2548)

ตารางผนวกที่ ก4 มาตรฐานไบโอดีเซลตามมาตรฐาน DIN E 51606 ของประเทศเยอรมนี

ลักษณะสมบัติ	หน่วย	วิธีทดสอบ	เกณฑ์	
			ต่ำสุด	สูงสุด
ความถ่วงจำเพาะ ที่ 15 องศาเซลเซียส	กรัมต่อมิลลิลิตร	ISO 3675	0.875	0.900
ความหนืดที่ 40 องศาเซลเซียส	มิลลิเมตร ² ต่อวินาที	ISO 3104	3.5	5.0
จุดวาบไฟ	องศาเซลเซียส	ISO 2719	100	
ปริมาณกำมะถัน	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ISO 4260		0.01
กากถ่านคอนราดสัน (ร้อยละ 10 ของกากที่เหลือจาก การกลั่น)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ISO 10370		0.30
ค่าซีเทน		ISO 5165	49	
เถ้า	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ISO 6245		0.01
น้ำ	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ASTN D1744		300
มลพิษทั้งหมด	ร้อยละโดยน้ำหนัก	DIN 51419		20
การกัดกร่อนทองแดง (3 ชั่วโมง ที่ 50 องศาเซลเซียส)		ISO 2160		1
ค่าความเป็นกลาง	มิลลิกรัมโพแทสเซียม- ไฮดรอกไซด์ต่อกรัม	DIN 51558 part 1		0.5
เมทานอล	ร้อยละโดยน้ำหนัก			0.3
โมนอกลิเซอไรด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก			0.8
ไดโนกลีเซอไรด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก			0.1
ไตรโนกลีเซอไรด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก			0.1
กลีเซอรินอิสระ	ร้อยละโดยน้ำหนัก			0.02
กลีเซอรินทั้งหมด	ร้อยละโดยน้ำหนัก			0.25
ค่าไอโอดีน	กรัมไอโอดีนต่อ100กรัม	DIN 53241 part 1		115
ฟอสฟอรัส	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม			10

ที่มา: คณะกรรมการพลังงาน (2545)

ภาคผนวก ข

การคำนวณอัตราส่วนโดยโมระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน

การคำนวณอัตราส่วนโดยโมระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่ใช้ในกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันมีขั้นตอนการคำนวณ ดังนี้

ตัวอย่างการคำนวณ

ทำการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยใช้น้ำมันสุญุดำเริ่มต้นในการผลิตปริมาณ 240 กรัม และใช้อัตราส่วนจำนวนโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 7:1

$$\begin{aligned}\text{มวลโมเลกุลของน้ำมันสุญุดำ} &= 900 \text{ กรัมต่อโมล} \\ \text{มวลโมเลกุลของเมทานอล} &= 32 \text{ กรัมต่อโมล}\end{aligned}$$

วิธีการคำนวณ

$$\begin{aligned}\text{เมทานอลจำนวน 7 โมล มีน้ำหนัก} &= 7 \times 32 = 224 \text{ กรัม} \\ \text{น้ำมันสุญุดำจำนวน 1 โมล มีน้ำหนัก} &= 1 \times 900 = 900 \text{ กรัม}\end{aligned}$$

ดังนั้น ถ้าใช้น้ำมันสุญุดำปริมาณ 240 กรัม

$$\text{จะใช้เมทานอลปริมาณ} = \frac{240 \times 224}{900} = 59.73 \text{ กรัม}$$

ภาคผนวก ก

การคำนวณปริมาณเมทิลเอสเทอร์

การวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ในไบโอดีเซลด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีตามมาตรฐาน EN 14103 โดยใช้ Methyl heptadecanoate เป็นสารมาตรฐานภายใน (Internal standard) สามารถคำนวณปริมาณเมทิลเอสเทอร์ในไบโอดีเซลได้ดังสมการ

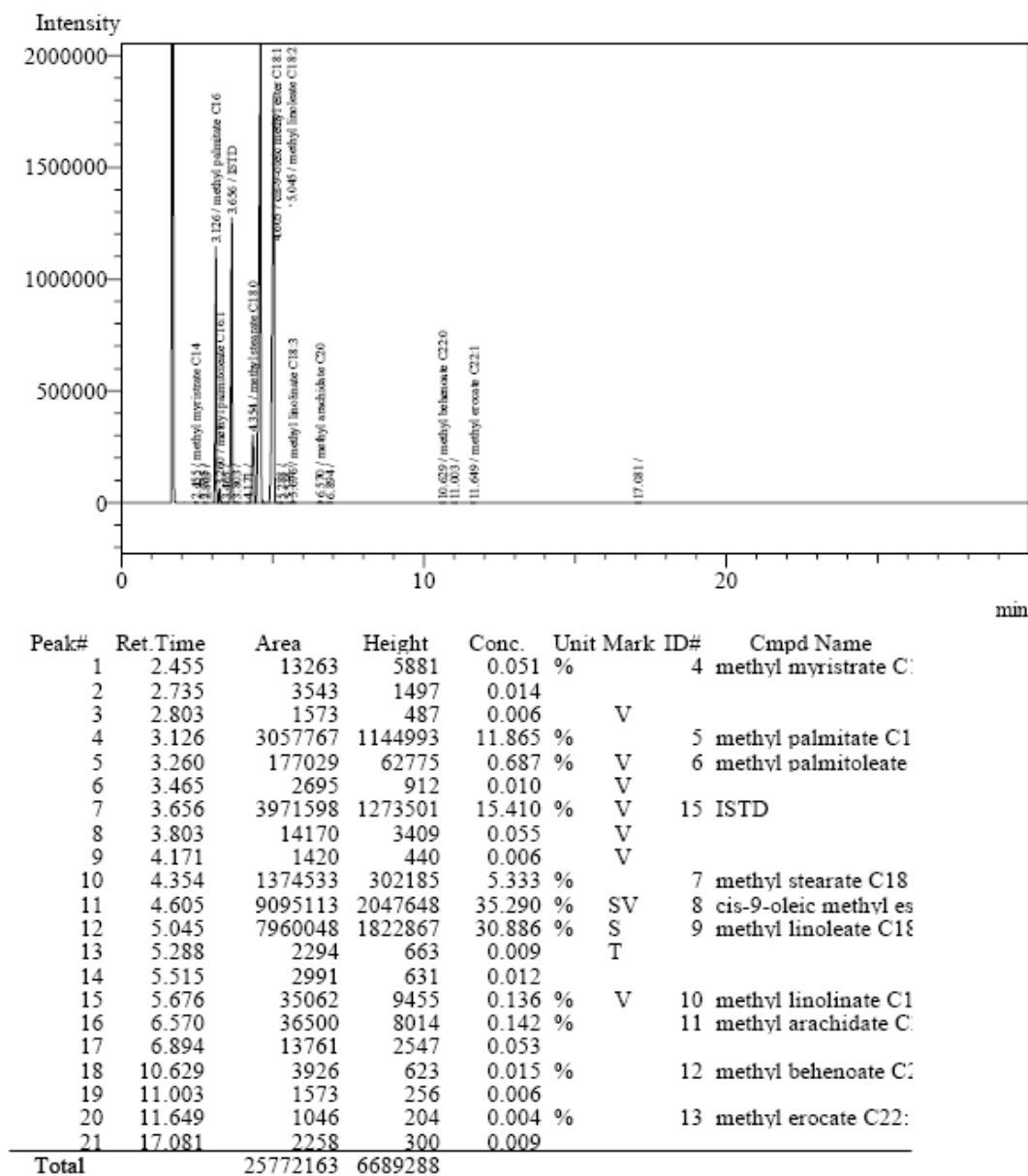
$$C = \frac{(\sum A) - A_{EI}}{A_{EI}} \times \frac{C_{EI} \times V_{EI}}{m} \times 100$$

โดย

- C = ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของเศษส่วนโดยมวล
- $\sum A$ = พื้นที่รวมของเมทิลเอสเทอร์ซึ่งคิดตั้งแต่ C_{14} ถึง C_{24}
- A_{EI} = พื้นที่ของ Methyl Heptadecanoate
- C_{EI} = ความเข้มข้นของ Methyl Heptadecanoate (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)
- V_{EI} = ปริมาตรของ Methyl Heptadecanoate (มิลลิลิตร)
- m = น้ำหนักของตัวอย่างไบโอดีเซล (มิลลิกรัม)

ตัวอย่างการคำนวณ

ทำการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยใช้น้ำมันสนุ่ดำเริ่มต้นในการผลิตปริมาณ 240 กรัม ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบส คือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์ โดยมีอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 7:1 และเวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 1.5 ชั่วโมง



ภาพผนวกที่ ค1 ตัวอย่างโครมาโทแกรมของสารตัวอย่าง

จากโครมาโทแกรมสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\sum A = 25772163$$

$$A_{EI} = 3971598$$

$$C_{EI} = 9.6328 \text{ มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร}$$

$$V_{EI} = 1 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$m = 53 \text{ มิลลิกรัม}$$

สามารถคำนวณปริมาณเมทิลเอสเทอร์ได้ดังนี้

$$C = \left(\frac{25772163 - 3971598}{3971598} \right) \times \frac{9.6328 \times 1}{53} \times 100\% = 99.76\%$$

ดังนั้น ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ในไบโอดีเซล คือ 99.76 เปอร์เซ็นต์

ภาคผนวก ง

การคำนวณค่าความเป็นกรด

สามารถคำนวณค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลได้จากสมการ

$$\text{ค่าความเป็นกรด} = \frac{\text{ปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ (มิลลิลิตร)} \times 56.1 \times 0.1}{\text{น้ำหนักของน้ำมันตัวอย่างตั้งต้น หรือเมทิลเอสเทอร์ (กรัม)}}$$

วิธีการคำนวณ

$$\text{ปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้} = 0.21 \text{ มิลลิลิตร}$$

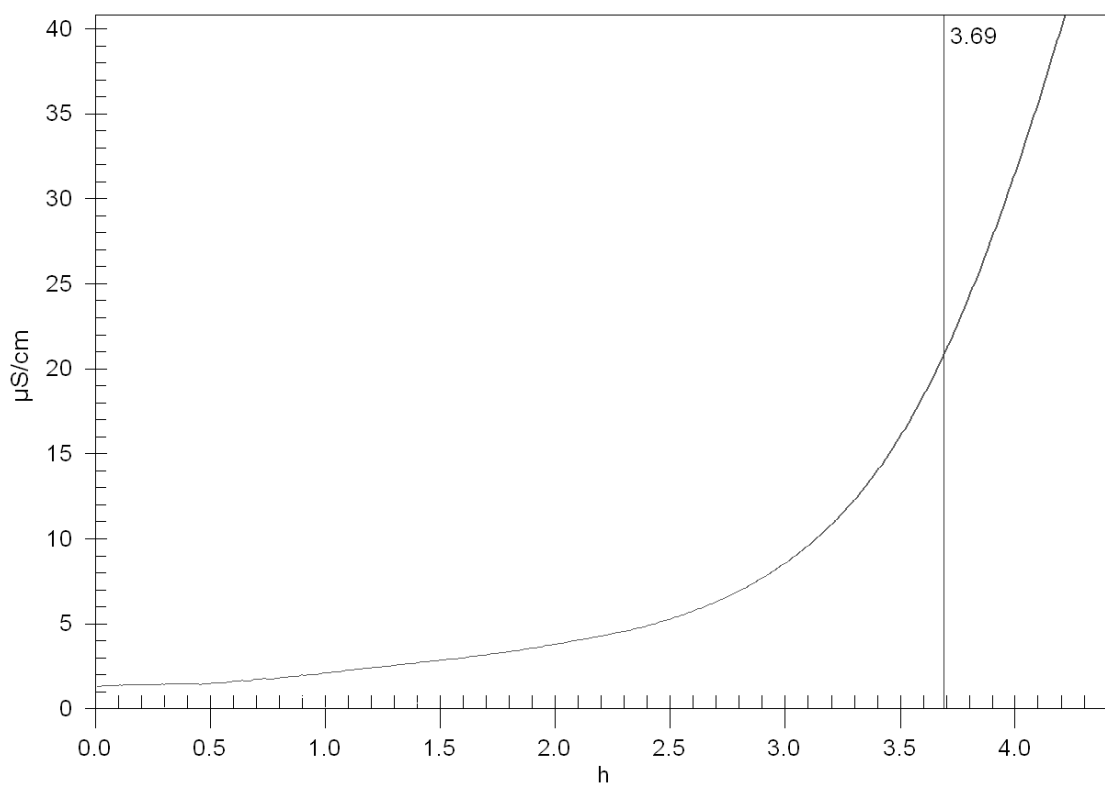
$$\text{น้ำหนักของไบโอดีเซล} = 3 \text{ กรัม}$$

ดังนั้นค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลเท่ากับ

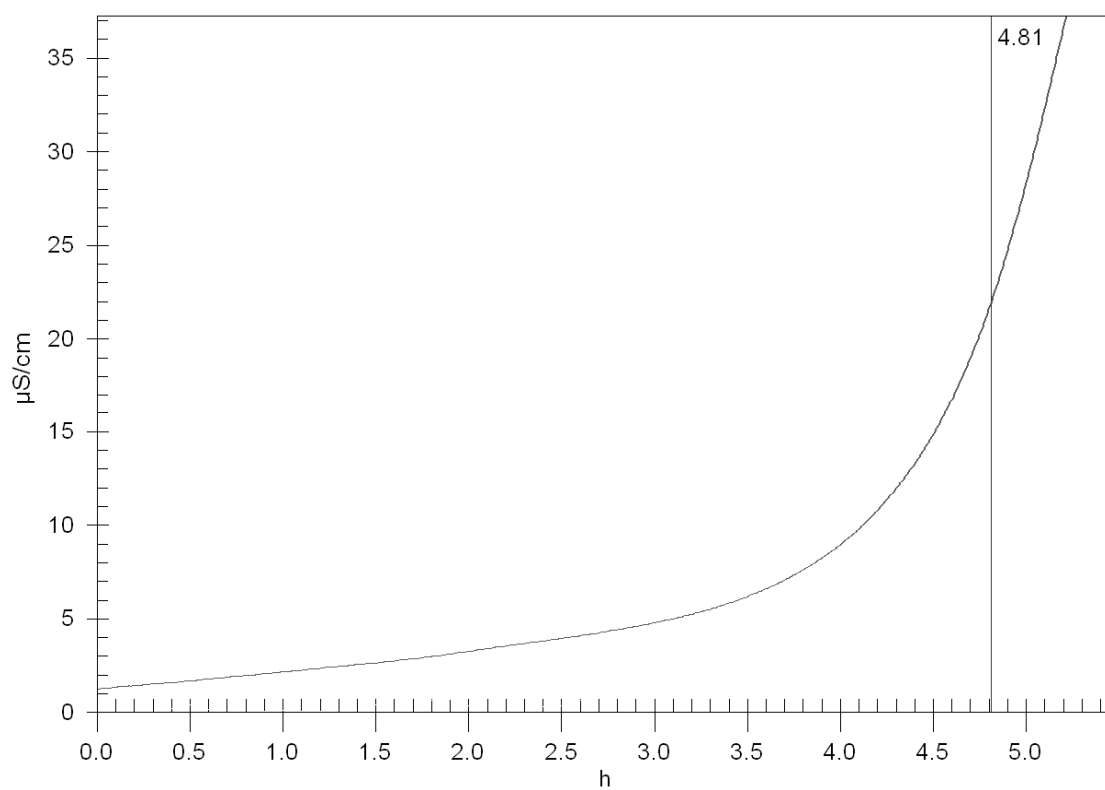
$$\frac{0.21 \times 56.1 \times 0.1}{3} = 0.3927 \text{ มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม}$$

ภาคผนวก จ

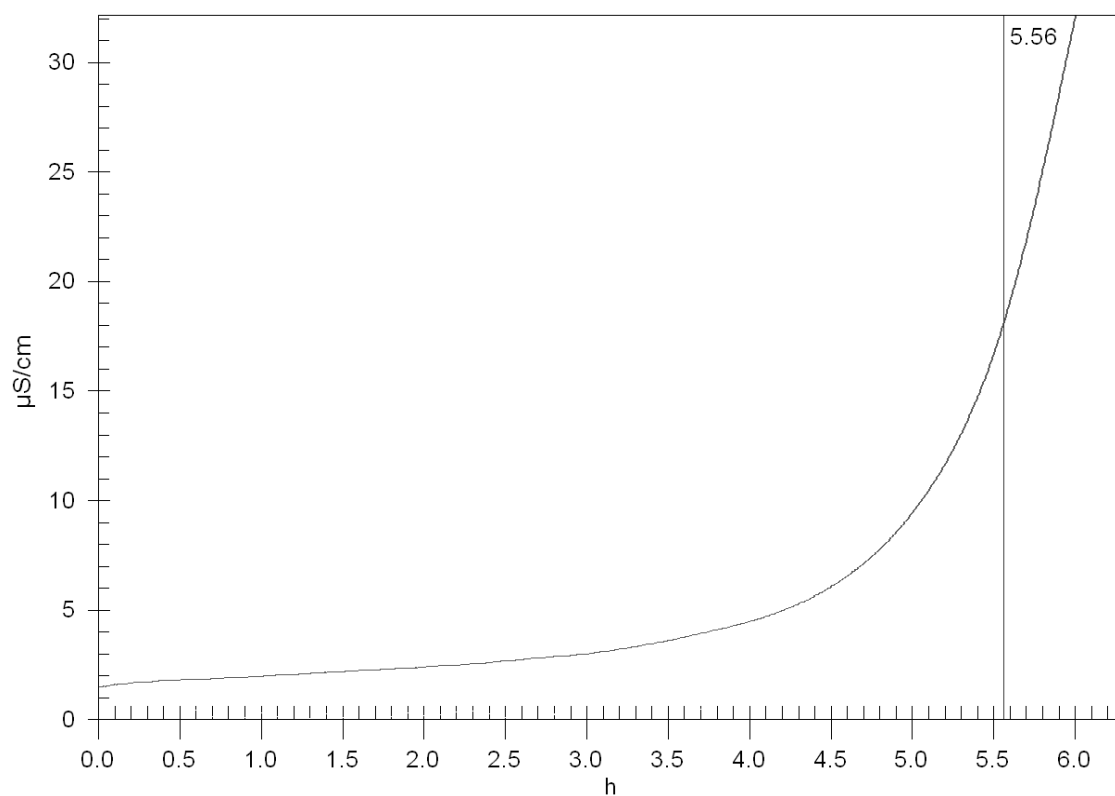
ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Rancimat



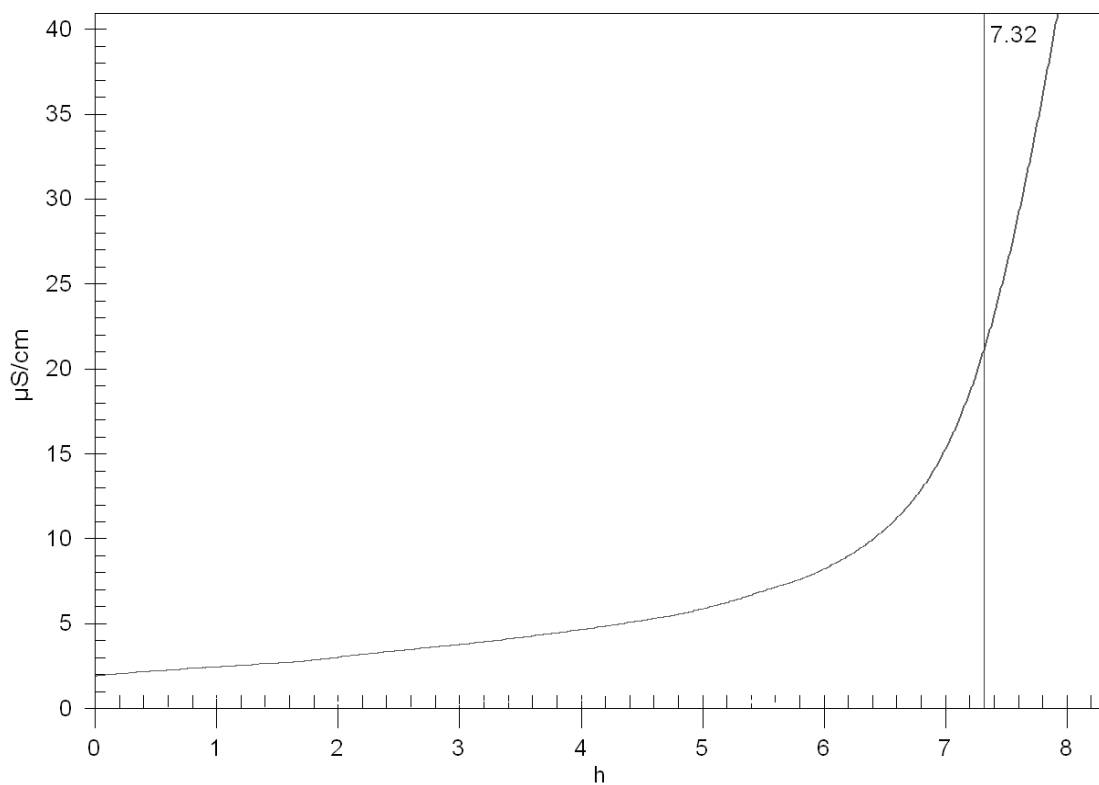
ภาพผนวกที่ จ1 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสนุดำ



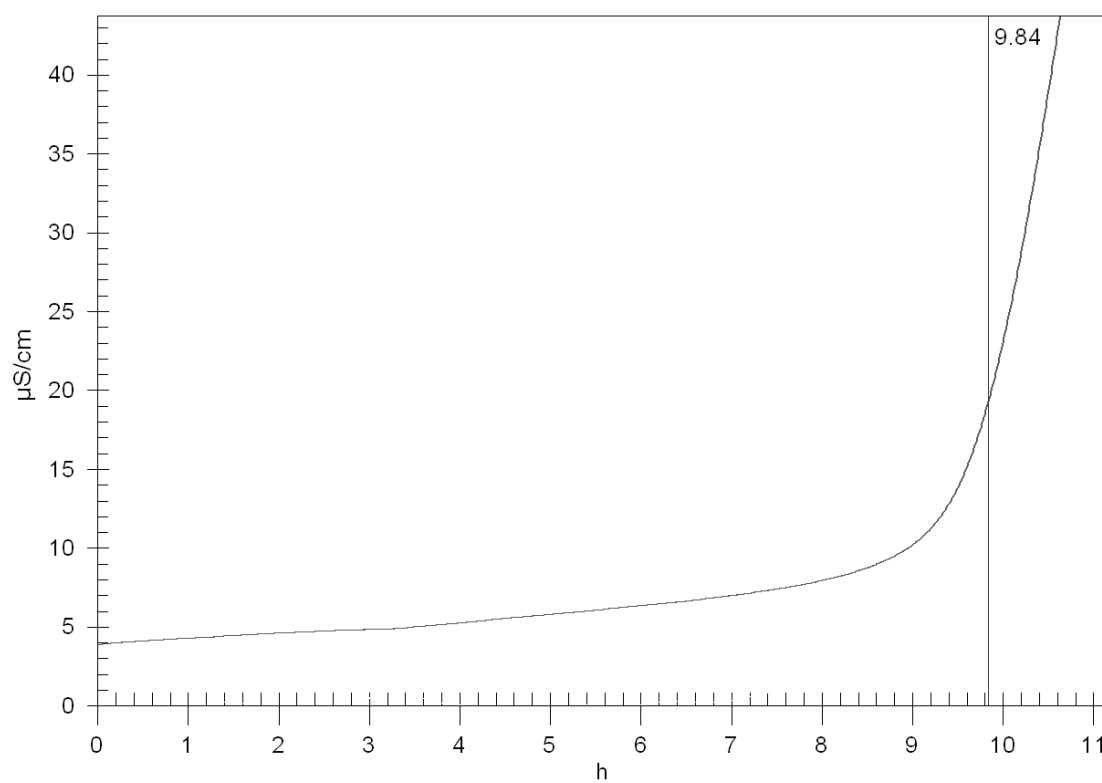
ภาพผนวกที่ จ2 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซล
จากน้ำมันสุรุ่มดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 80:20



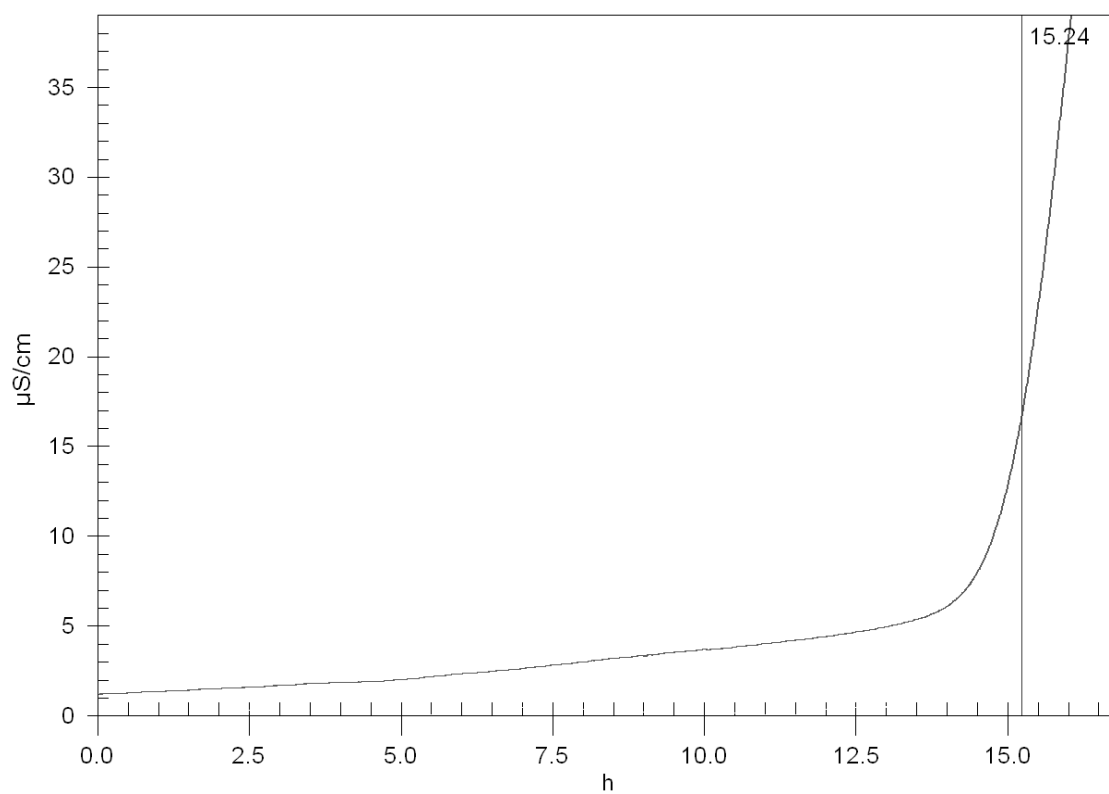
ภาพผนวกที่ จ3 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซล
จากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 60:40



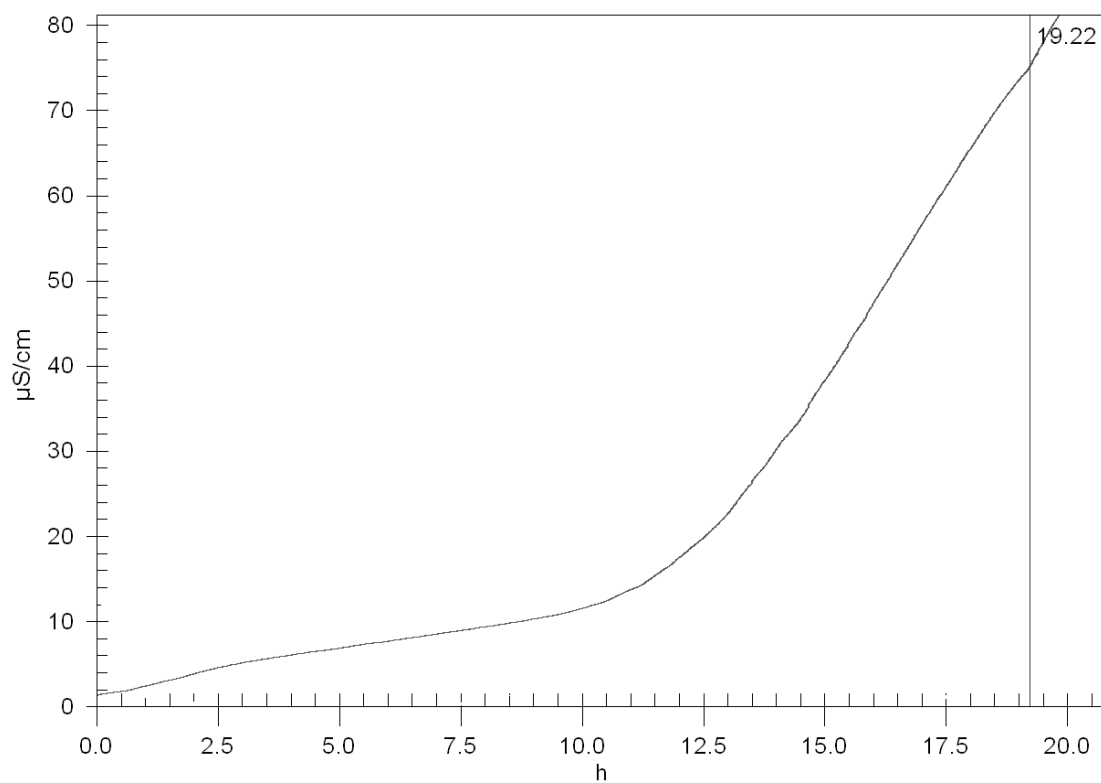
ภาพผนวกที่ จ4 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซล
จากน้ำมันสุญ่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 50:50



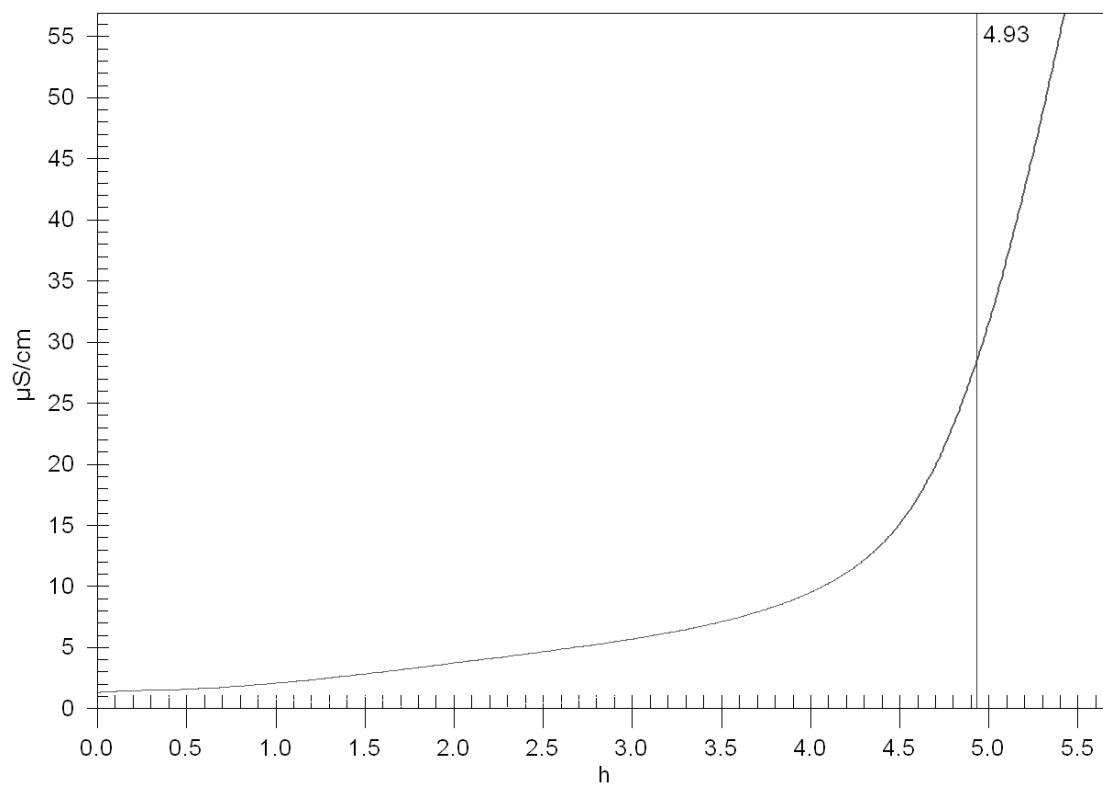
ภาพผนวกที่ จ5 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซล
จากน้ำมันสุญ่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 40:60



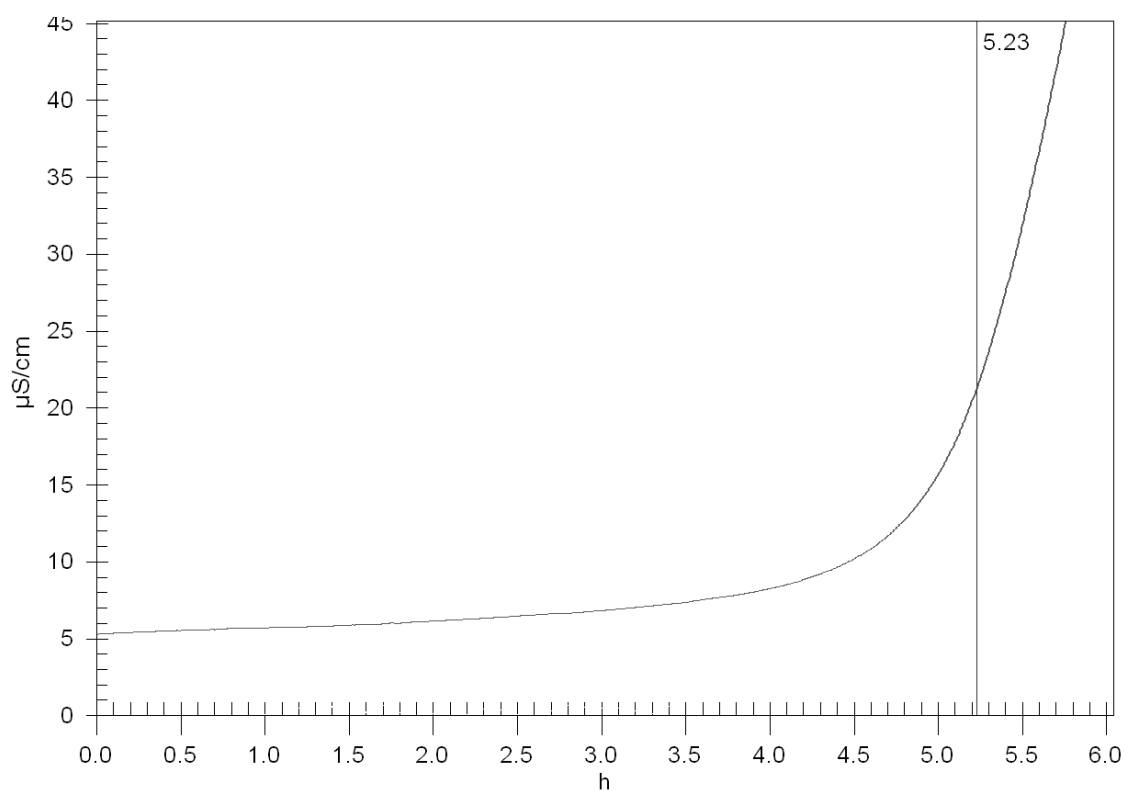
ภาพผนวกที่ จ6 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซล
จากน้ำมันสุรุดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 20:80



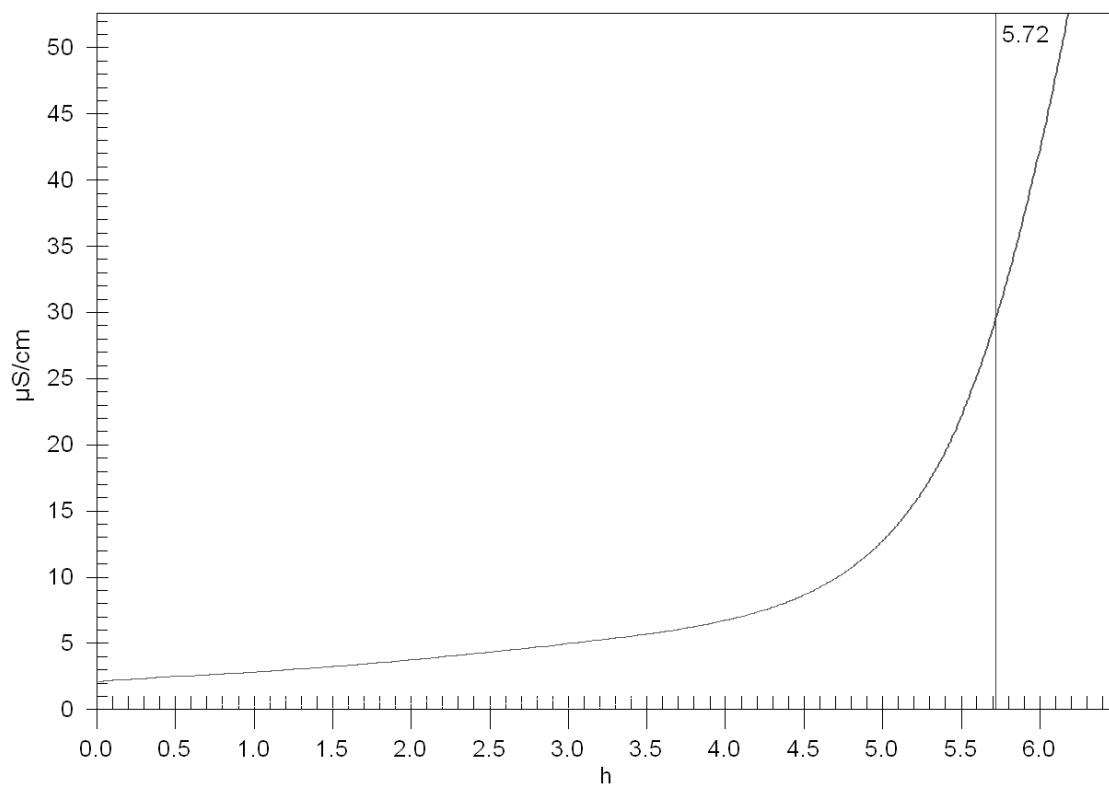
ภาพผนวกที่ จ7 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าว



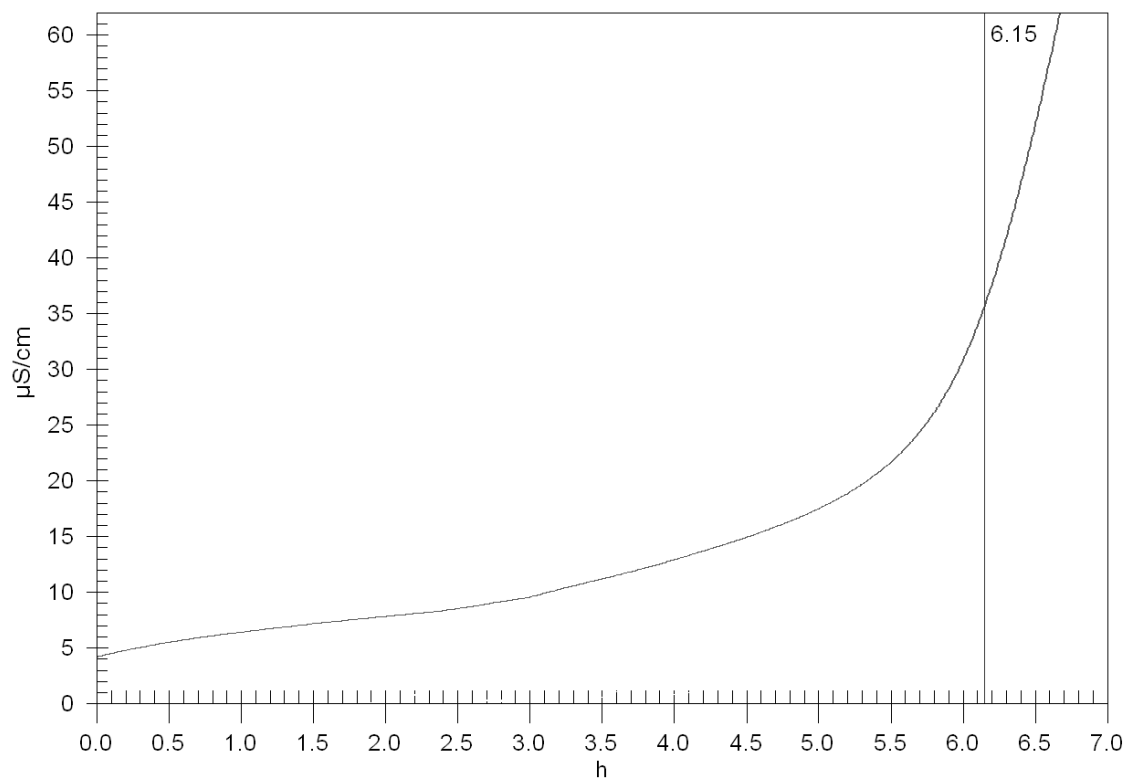
ภาพผนวกที่ ๖8 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของ ไบโอดีเซลจากน้ำมันสับดูดำที่เดิมสาร
BHA ความเข้มข้น 50 พีพีเอ็ม



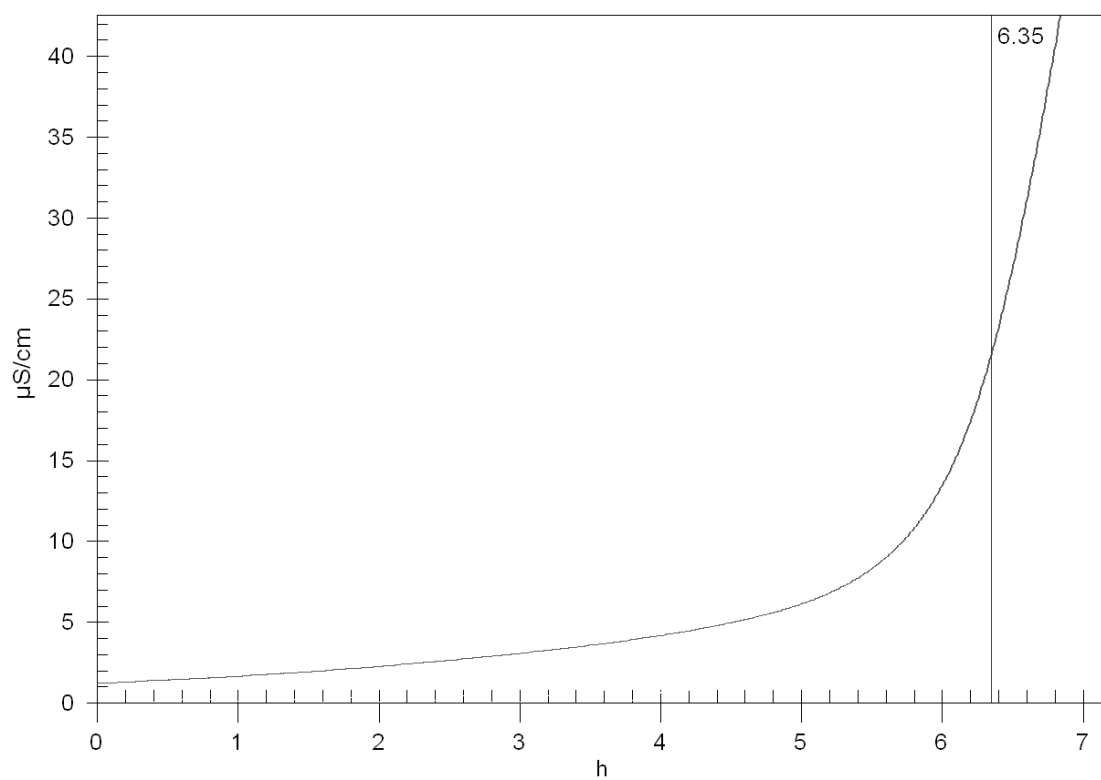
ภาพผนวกที่ ๑๑ ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสนุดำที่เติมสาร BHA ความเข้มข้น 100 พีพีเอ็ม



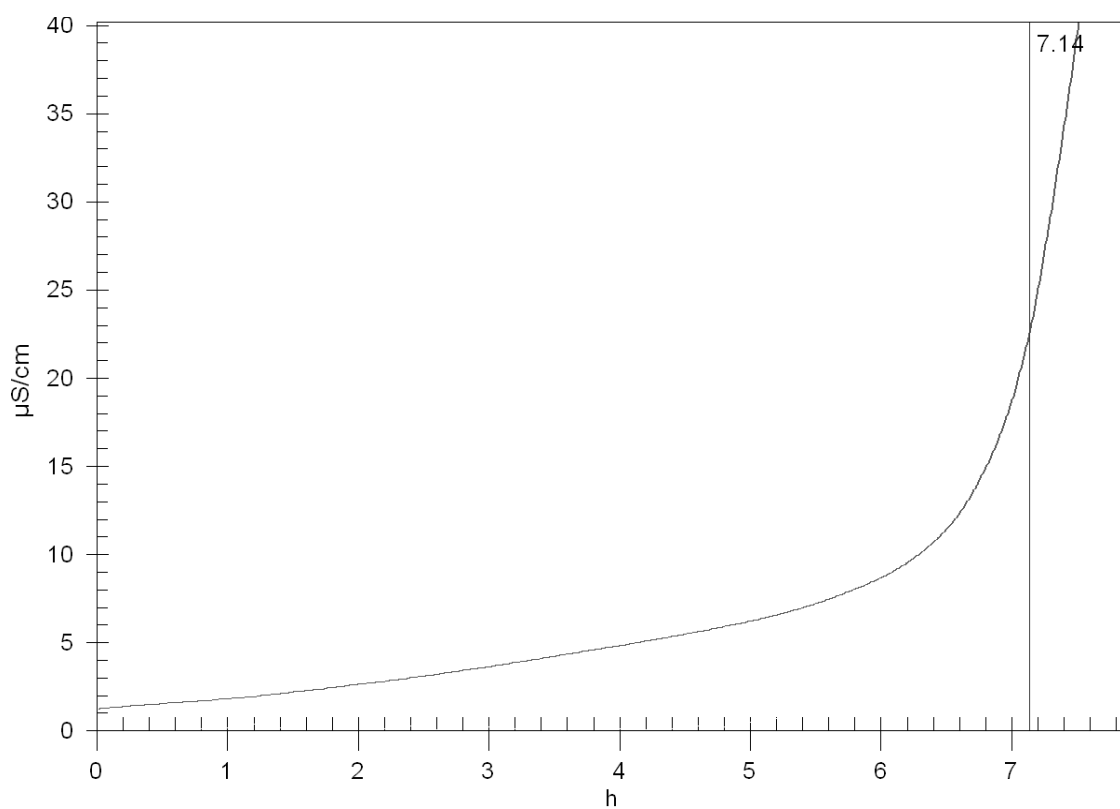
ภาพผนวกที่ จ10 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร BHA ความเข้มข้น 150 พีพีเอ็ม



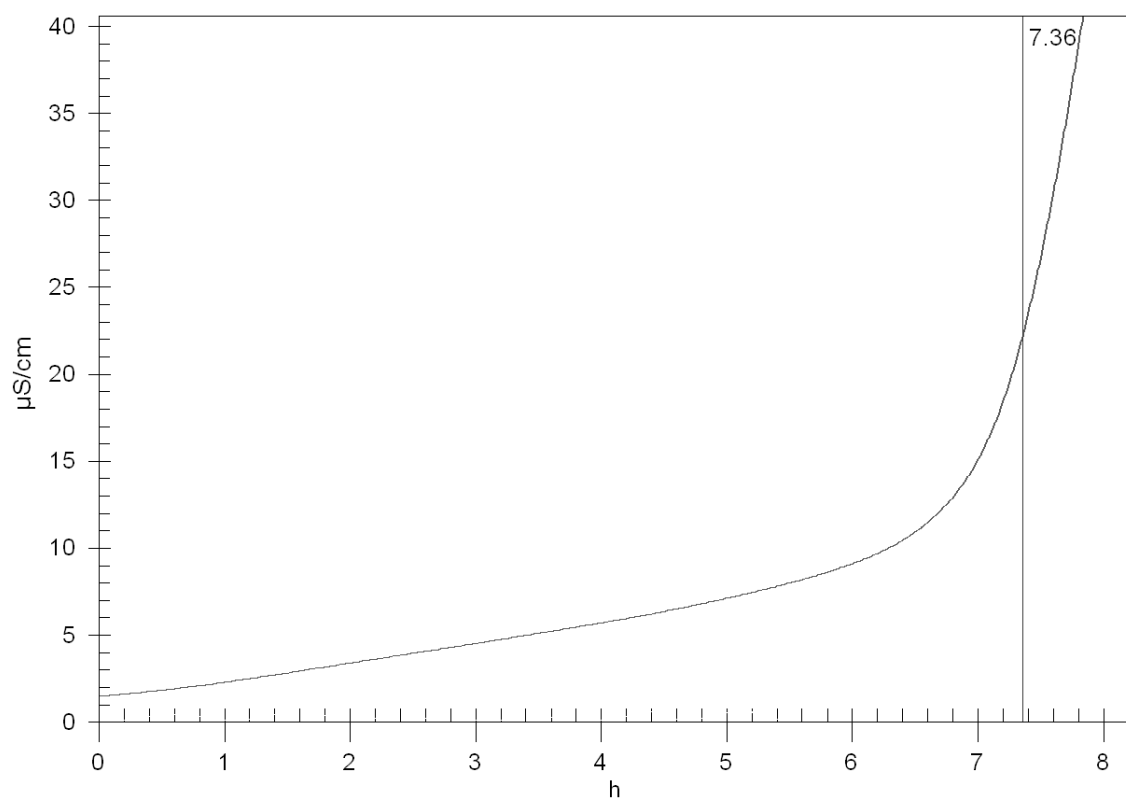
ภาพผนวกที่ จ11 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสนดำที่เติมสาร
BHA ความเข้มข้น 200 พีพีเอ็ม



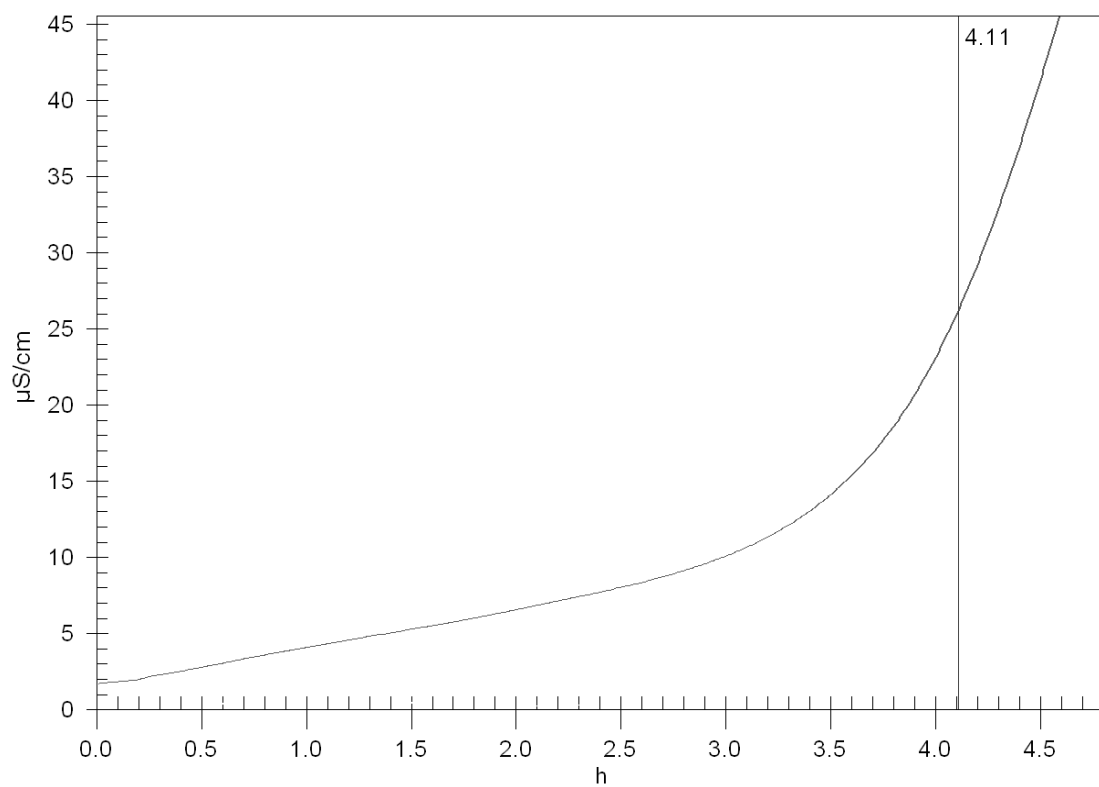
ภาพผนวกที่ ๑12 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร
BHA ความเข้มข้น 250 พีพีเอ็ม



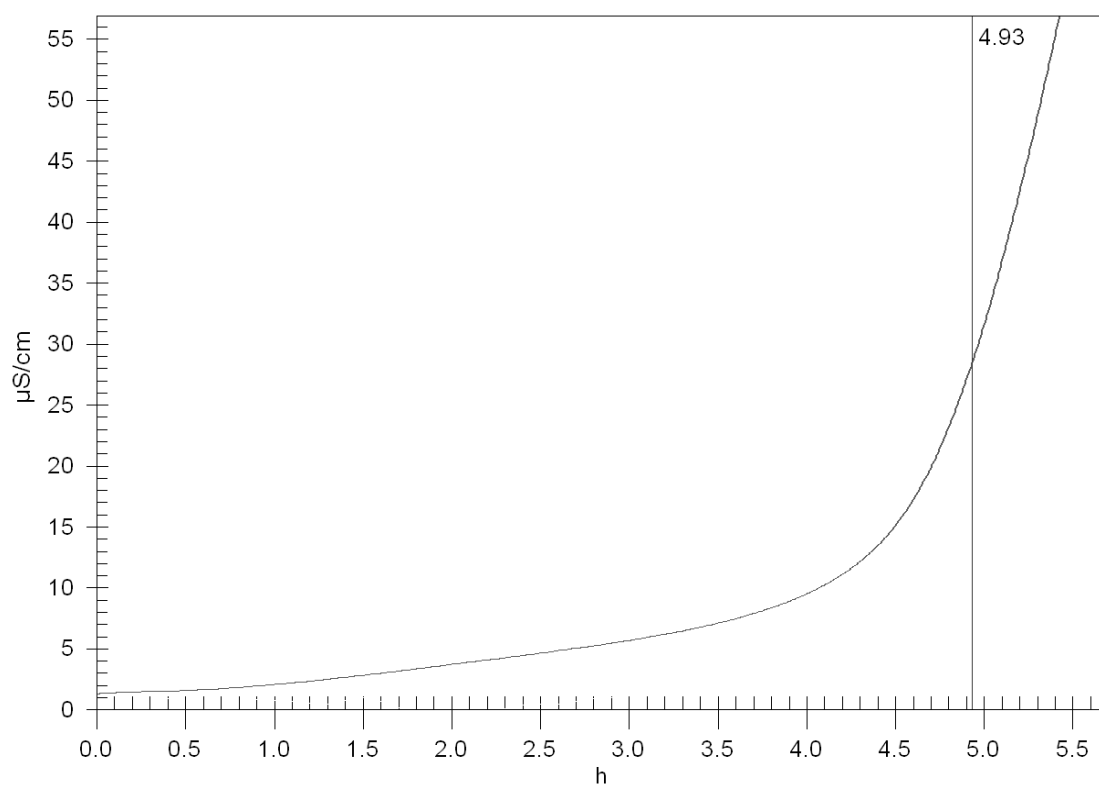
ภาพผนวกที่ จ13 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร BHA ความเข้มข้น 300 พีพีเอ็ม



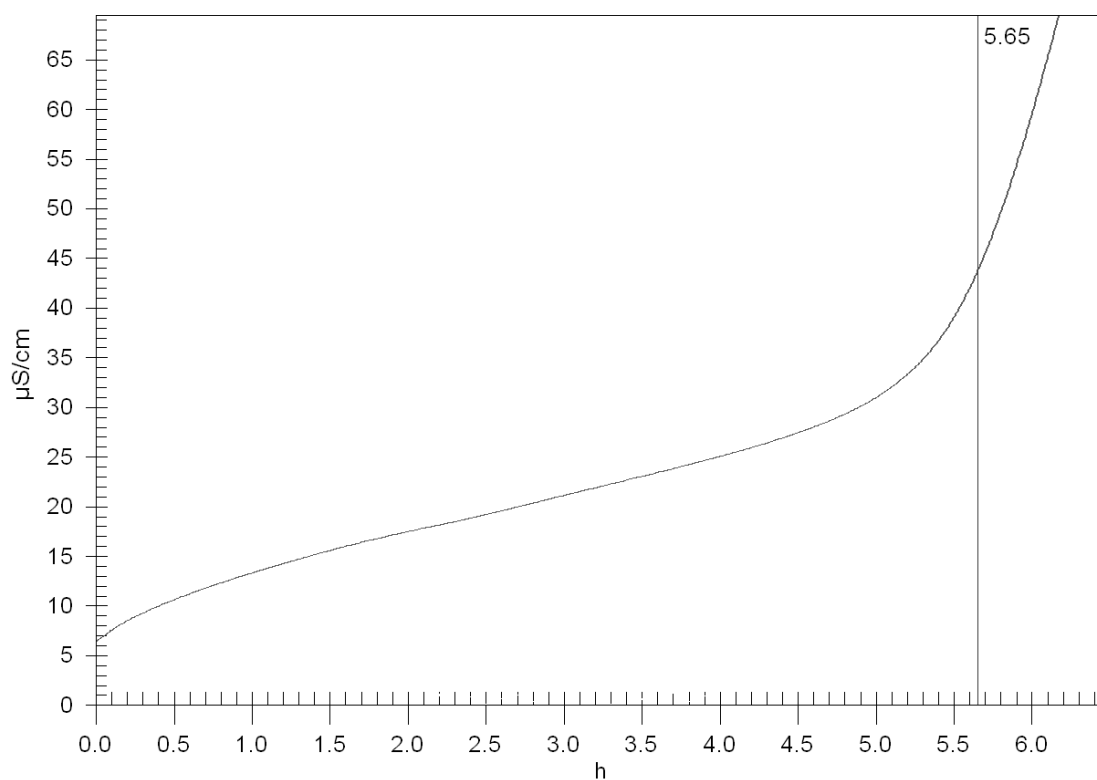
ภาพผนวกที่ จ14 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร BHA ความเข้มข้น 350 พีพีเอ็ม



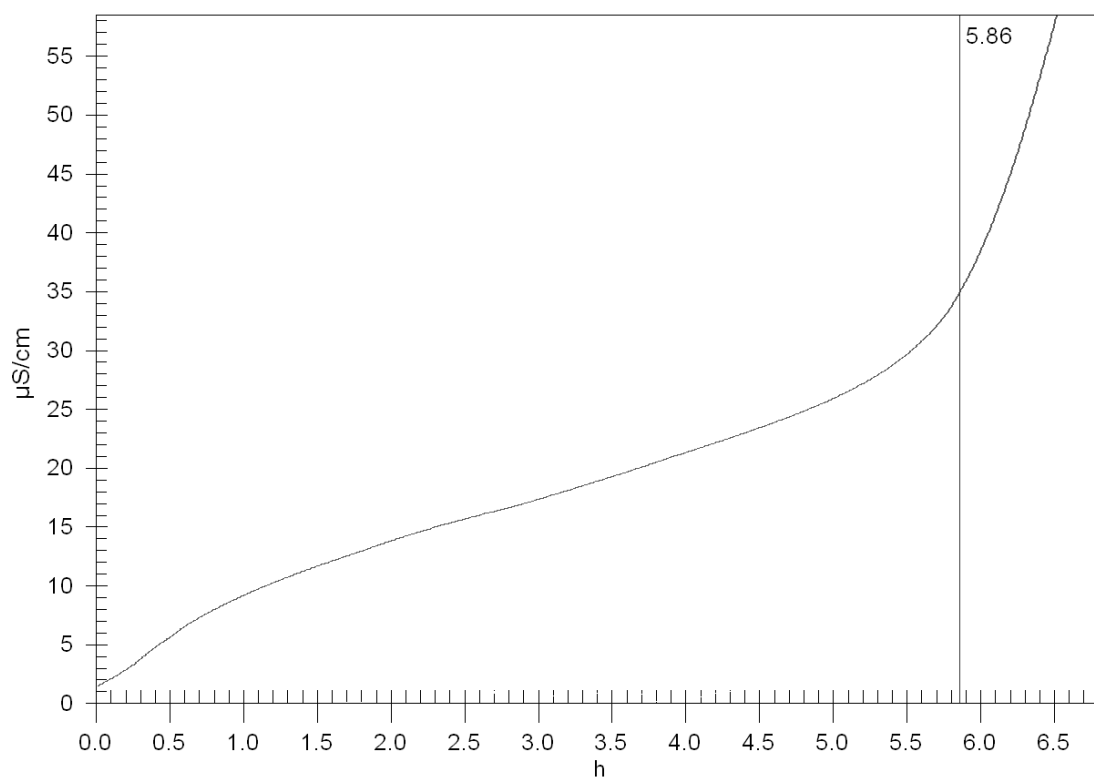
ภาพผนวกที่ จ15 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสนุดำที่เติมสาร
Kerobit[®] TP ความเข้มข้น 50 พีพีเอ็ม



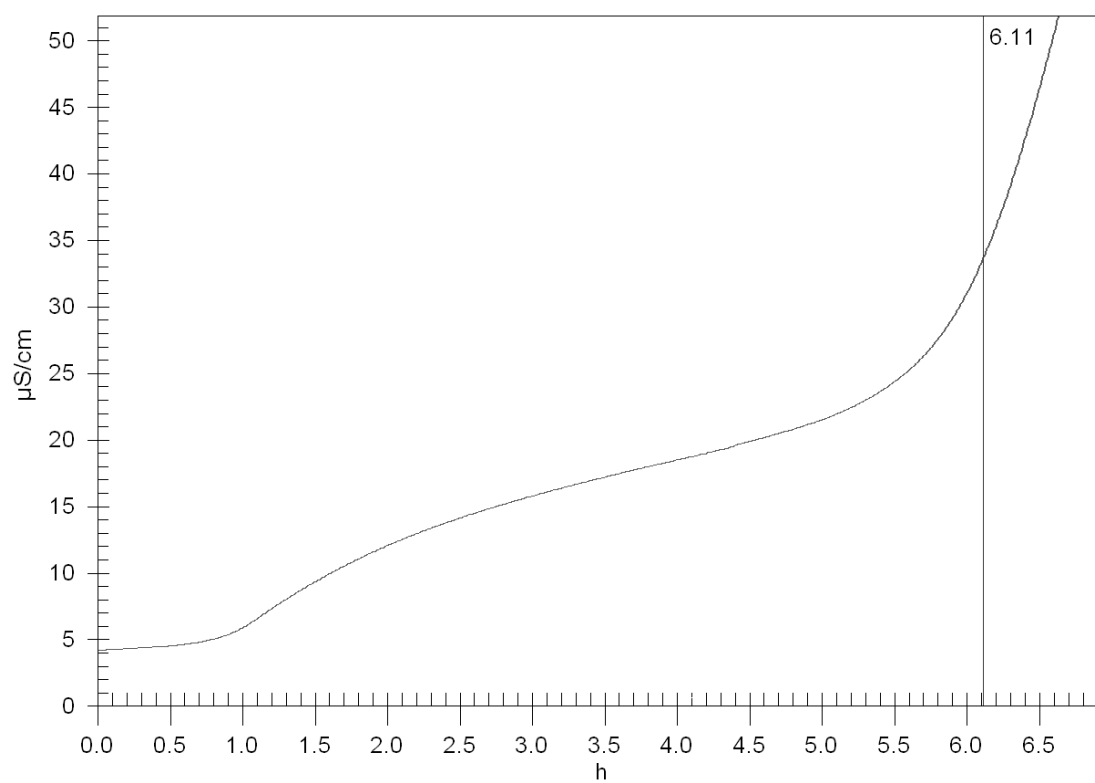
ภาพผนวกที่ จ16 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสุญ์ดำที่เติมสาร
Kerobit[®] TP ความเข้มข้น 100 พีพีเอ็ม



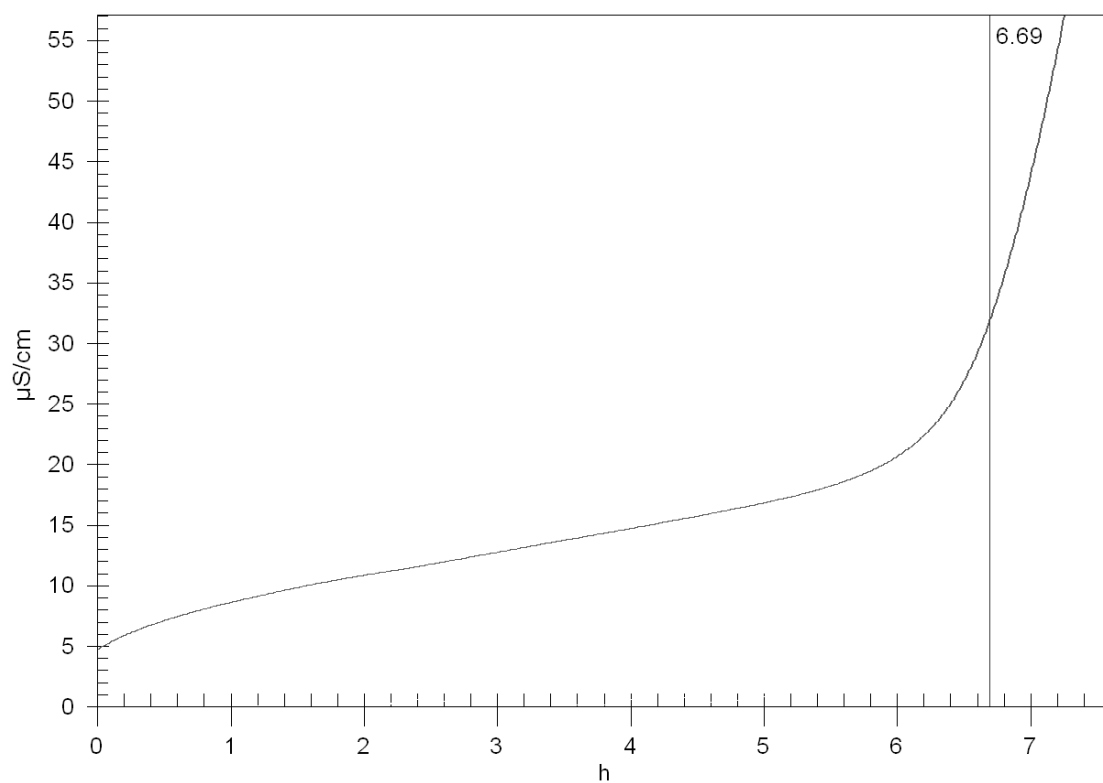
ภาพผนวกที่ จ17 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสุญ่ดำที่เดิมสาร
Kerobit® TP ความเข้มข้น 150 พีพีเอ็ม



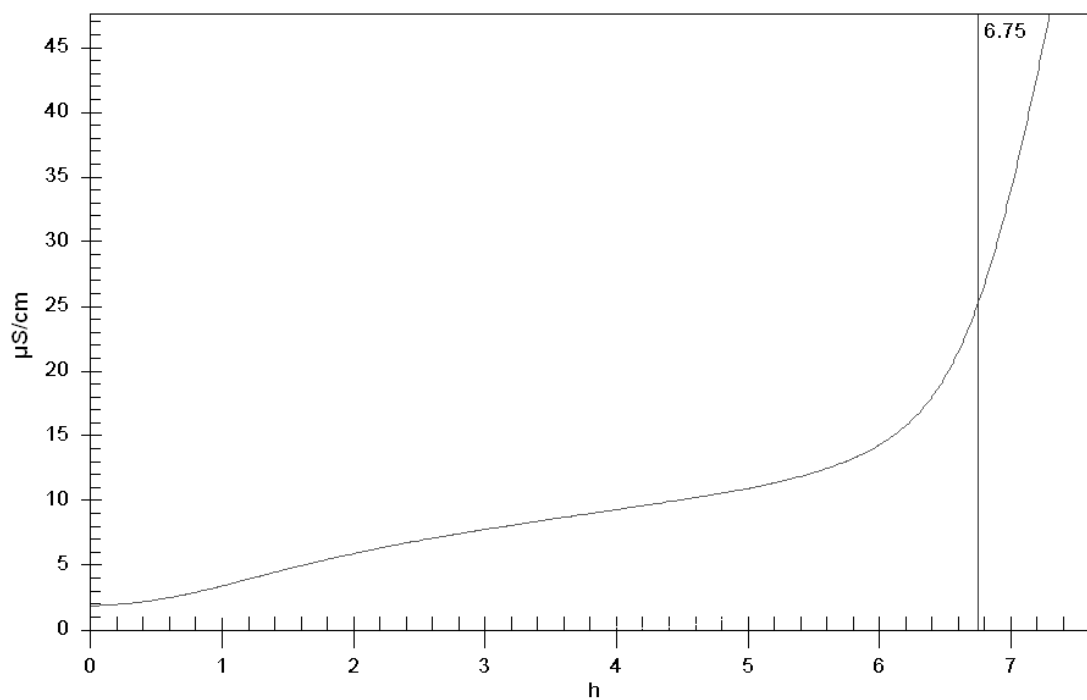
ภาพผนวกที่ จ18 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสนุดำที่เติมสาร
Kerobit® TP ความเข้มข้น 200 พีพีเอ็ม



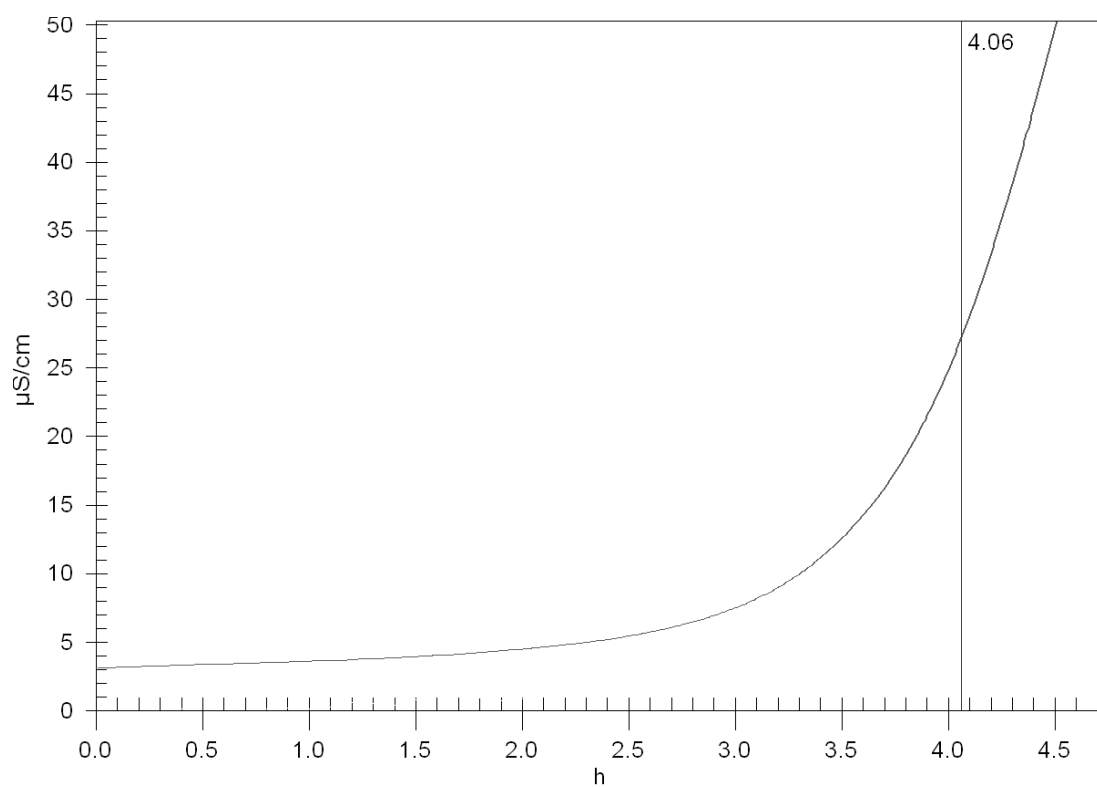
ภาพผนวกที่ จ19 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสับุดำที่เดิมสาร
Kerobit® TP ความเข้มข้น 250 พีพีเอ็ม



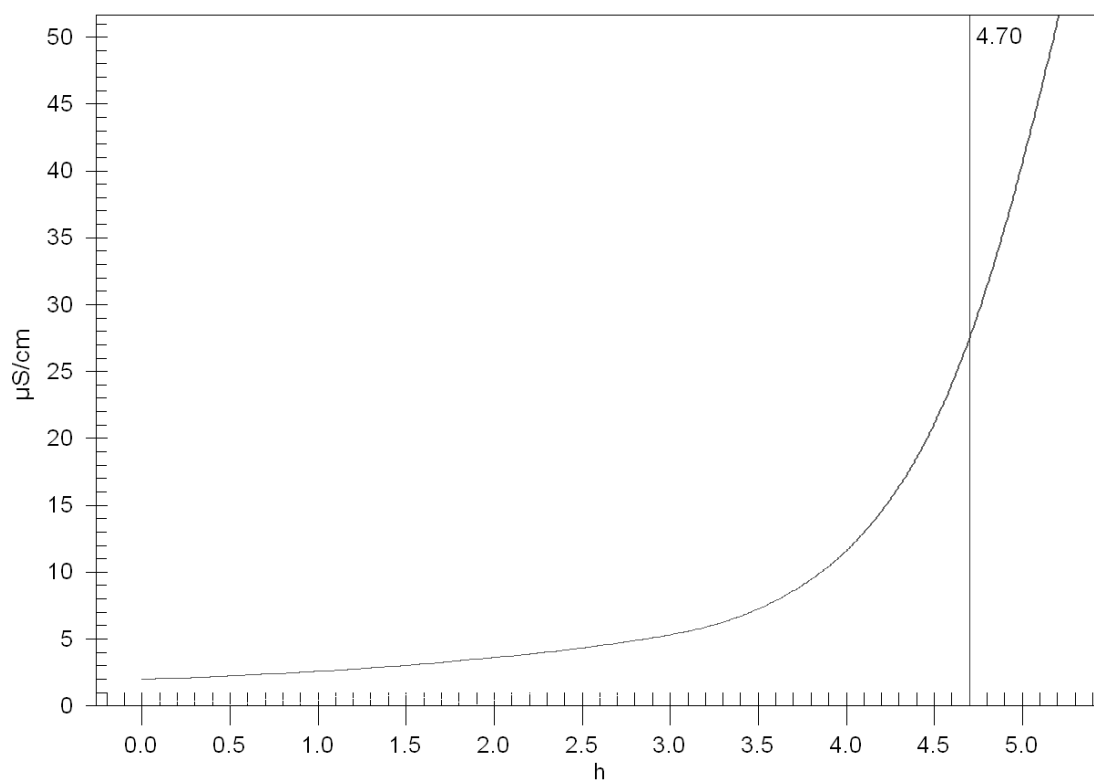
ภาพผนวกที่ จ20 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร
Kerobit® TP ความเข้มข้น 300 พีพีเอ็ม



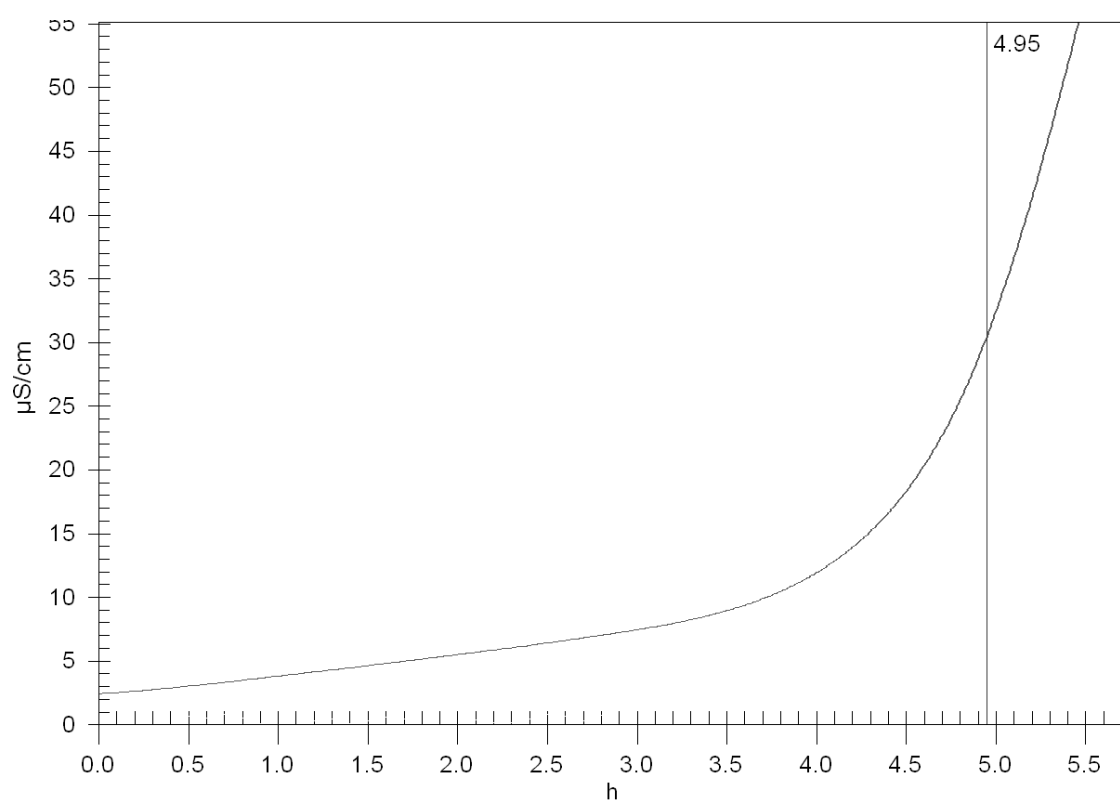
ภาพผนวกที่ จ21 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสนุดำที่เติมสาร
Kerobit® TP ความเข้มข้น 350 พีพีเอ็ม



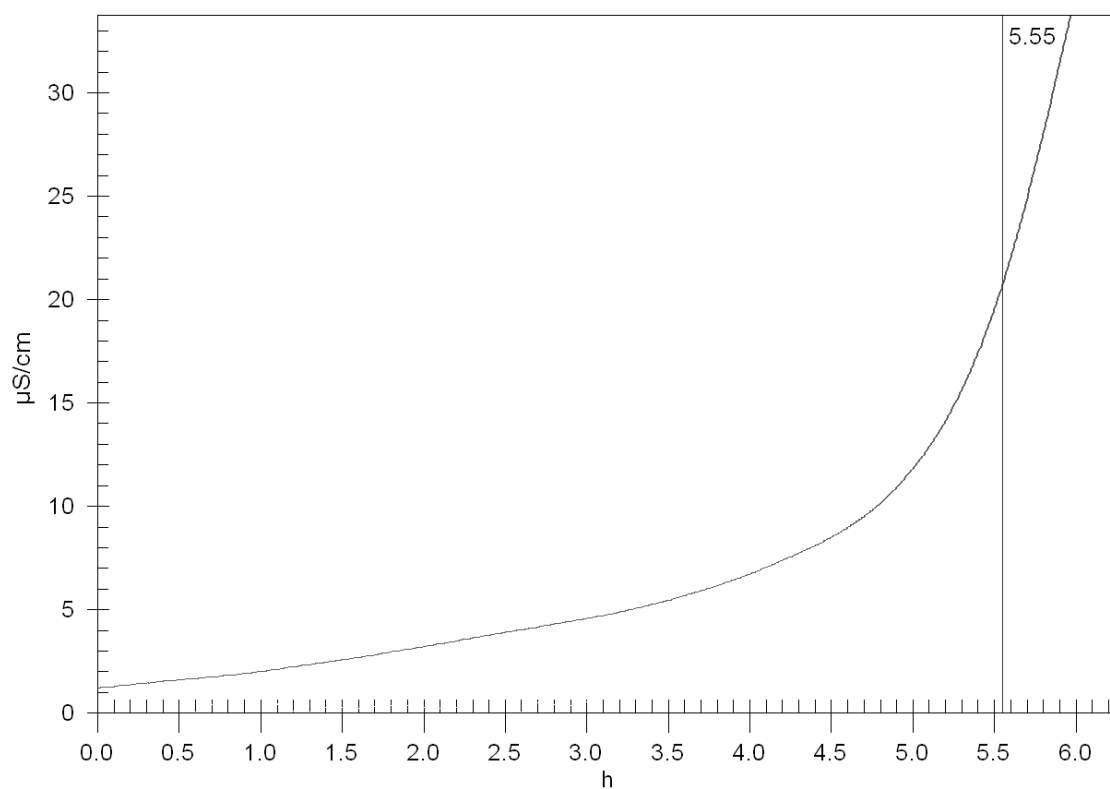
ภาพผนวกที่ จ22 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสนุดำที่เติมสาร
BHT ความเข้มข้น 50 พีพีเอ็ม



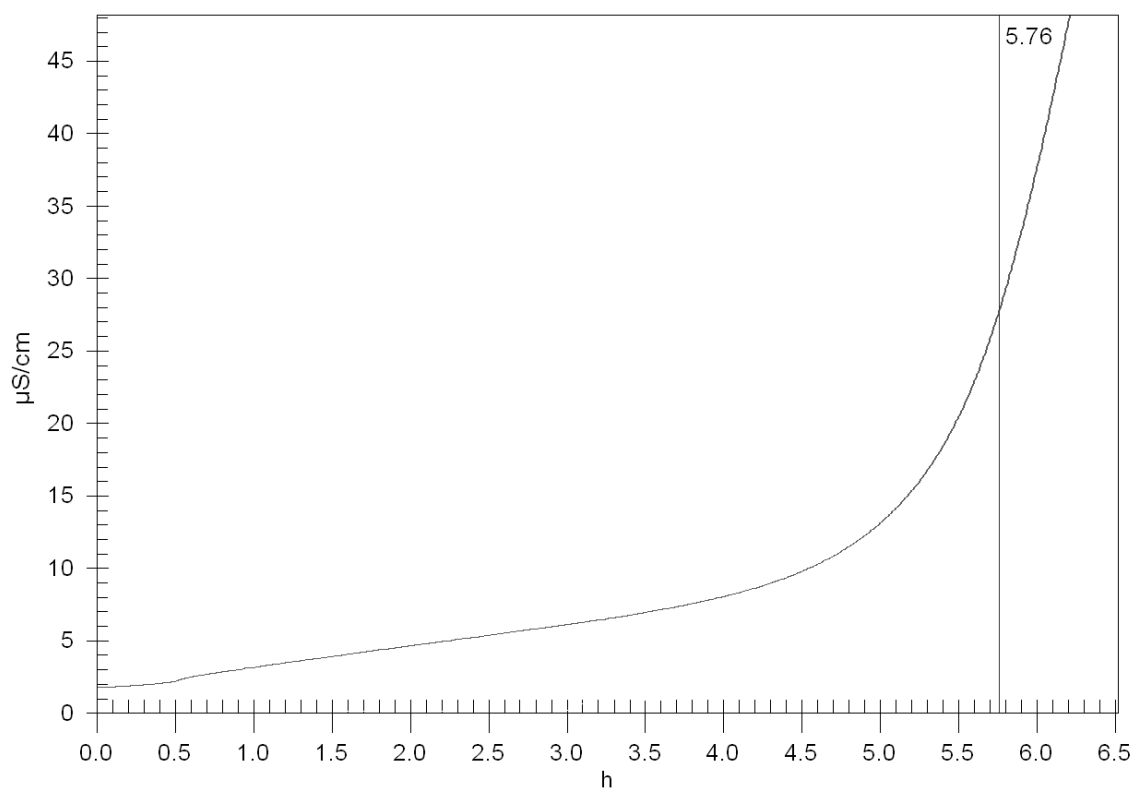
ภาพผนวกที่ จ23 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสนดำที่เติมสาร
BHT ความเข้มข้น 100 พีพีเอ็ม



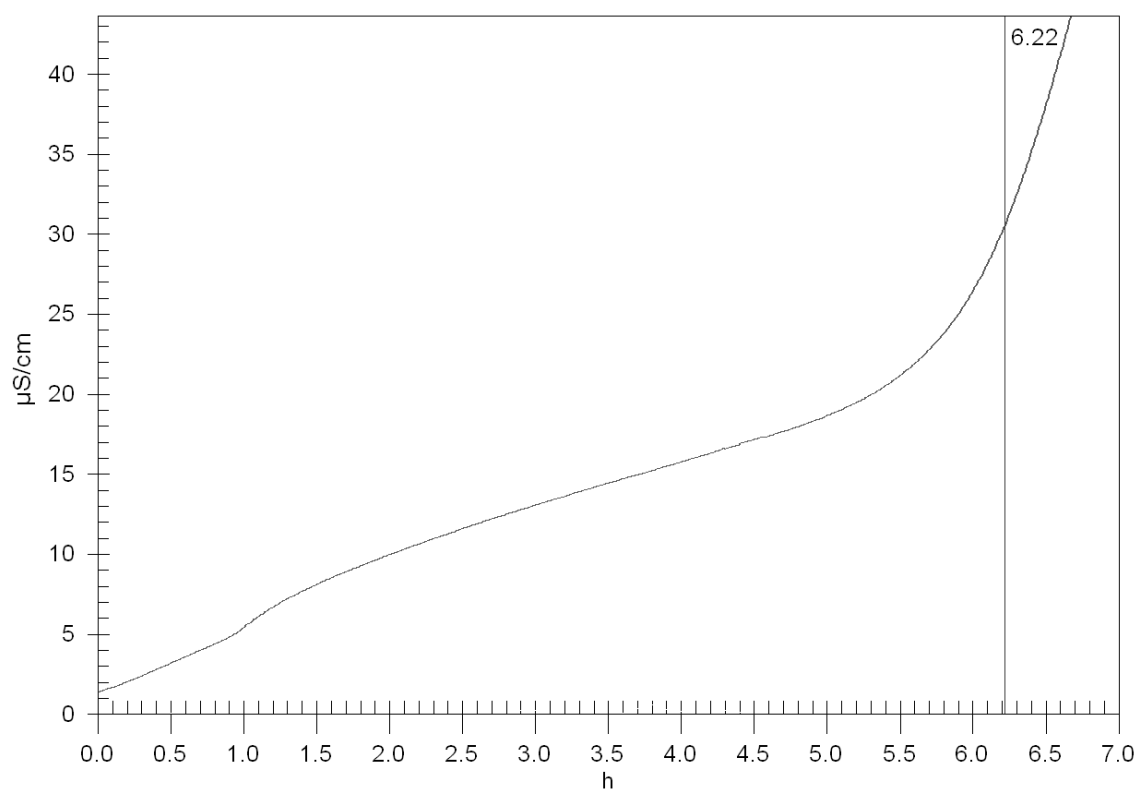
ภาพผนวกที่ จ24 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร
BHT ความเข้มข้น 150 พีพีเอ็ม



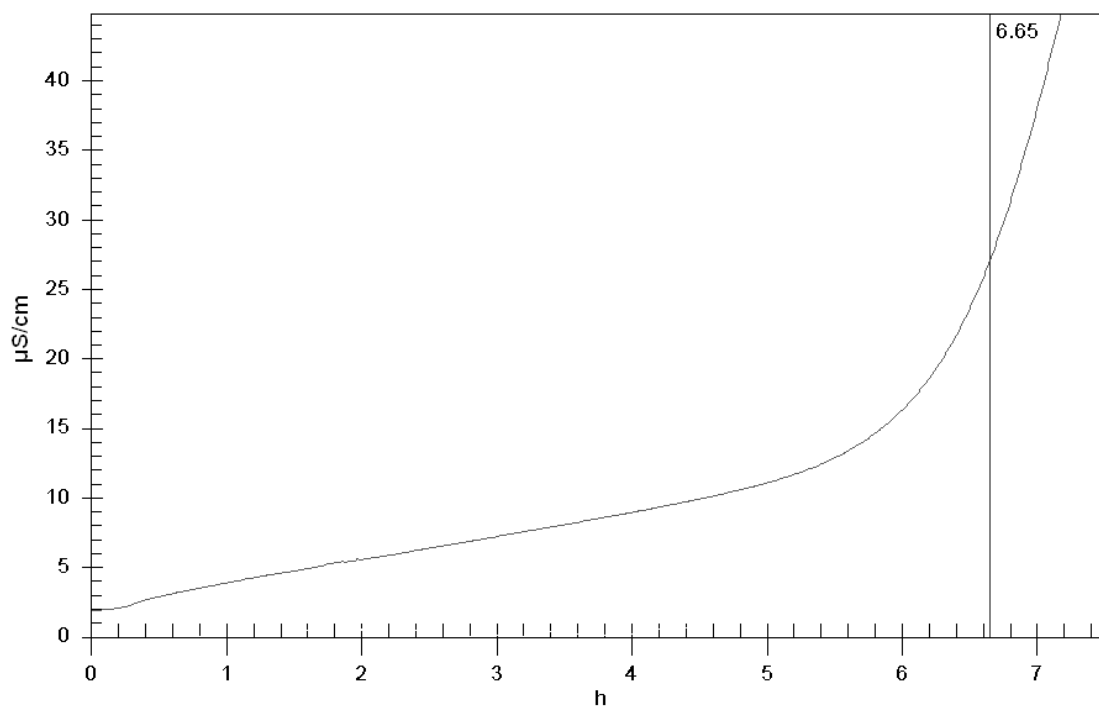
ภาพผนวกที่ จ25 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสับุดำที่เติมสาร BHT ความเข้มข้น 200 พีพีเอ็ม



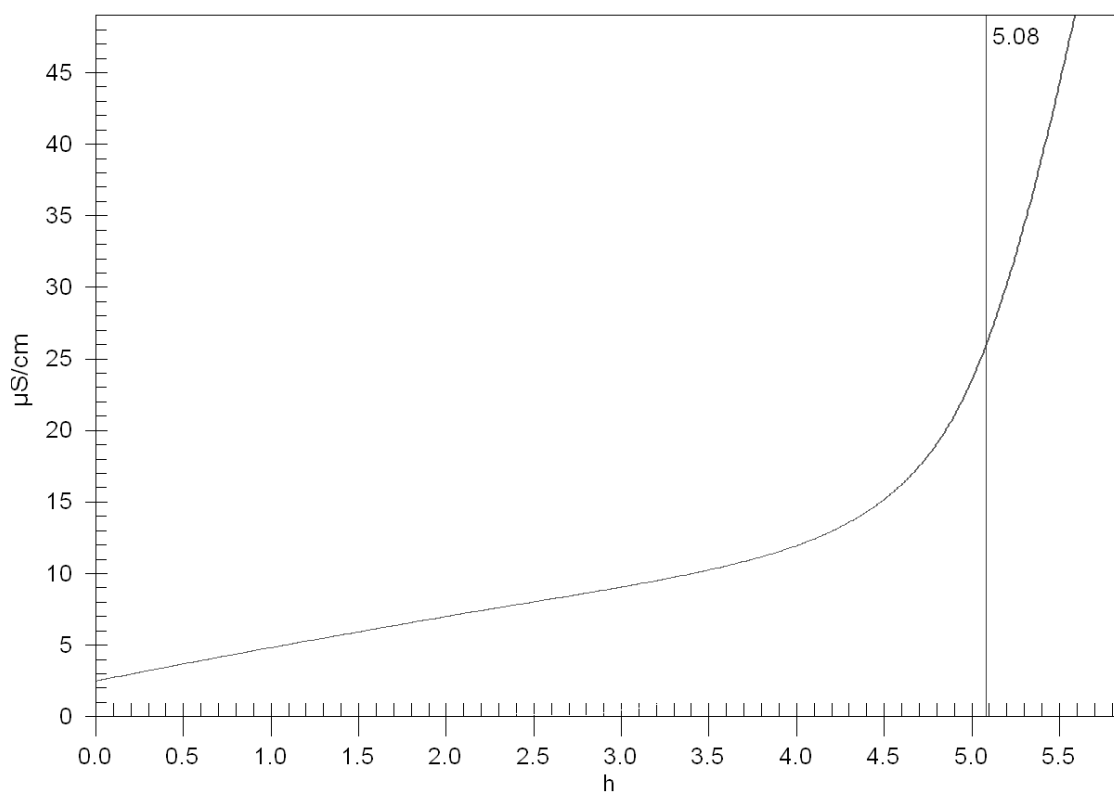
ภาพผนวกที่ จ26 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสนุดำที่เติมสาร
BHT ความเข้มข้น 250 พีพีเอ็ม



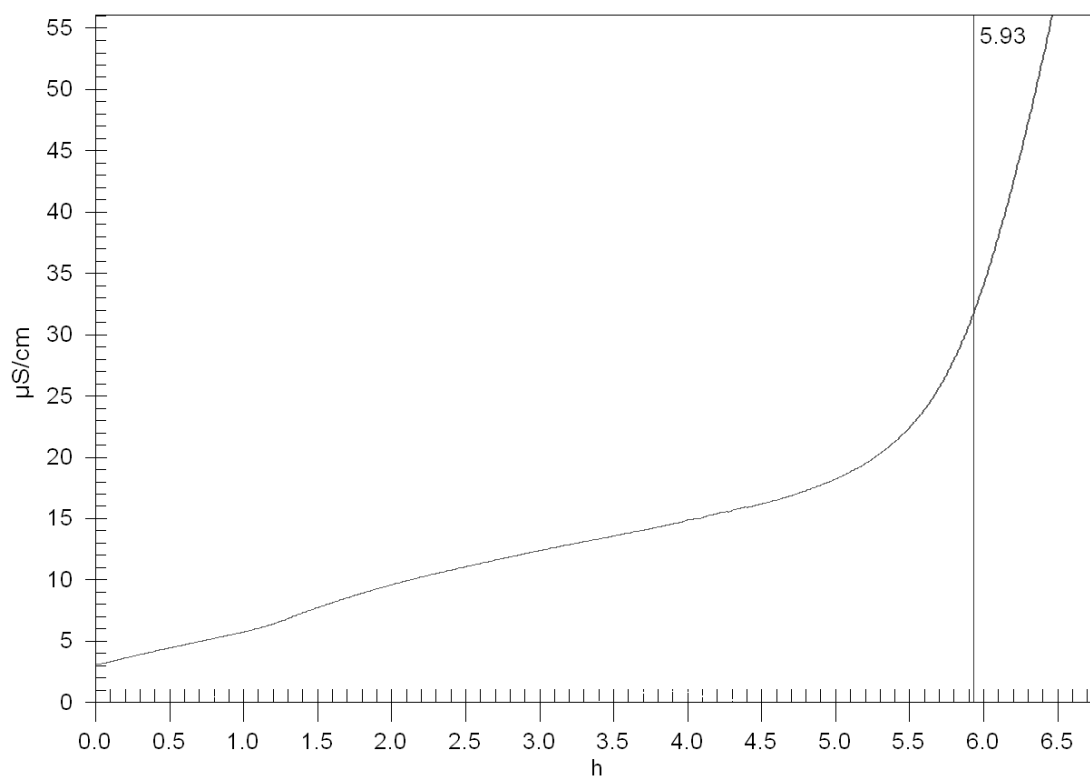
ภาพผนวกที่ จ27 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสนุดำที่เติมสาร
BHT ความเข้มข้น 300 พีพีเอ็ม



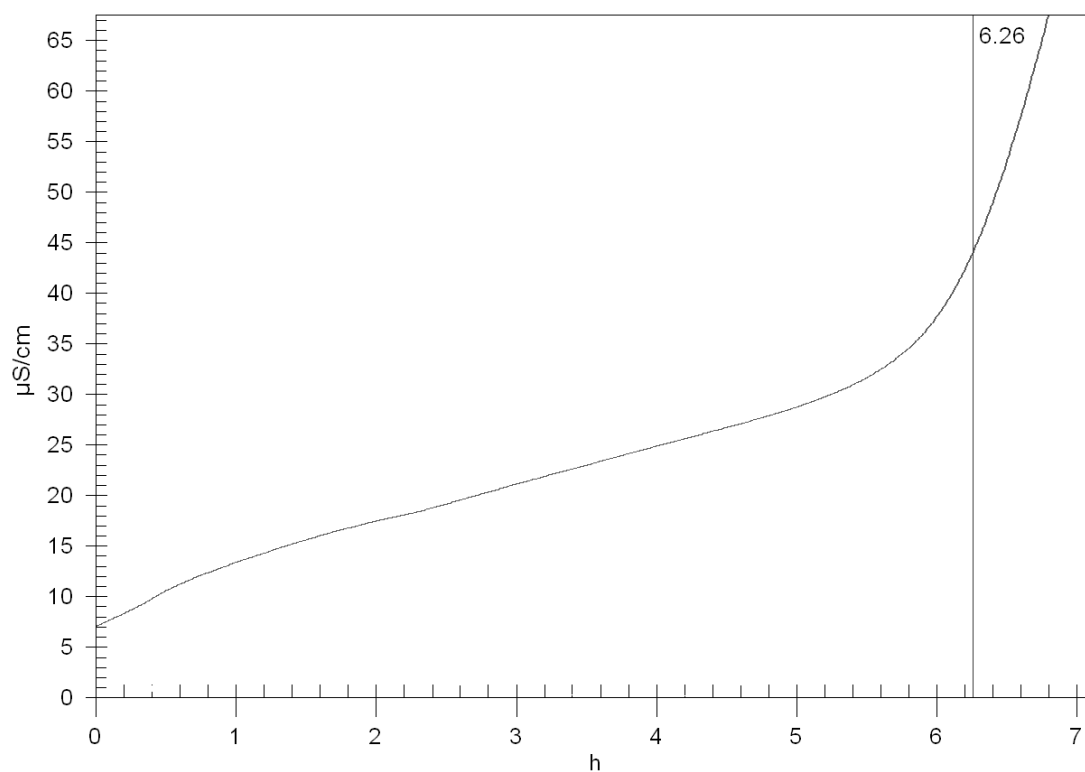
ภาพผนวกที่ จ28 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสนดำที่เติมสาร
BHT ความเข้มข้น 350 พีพีเอ็ม



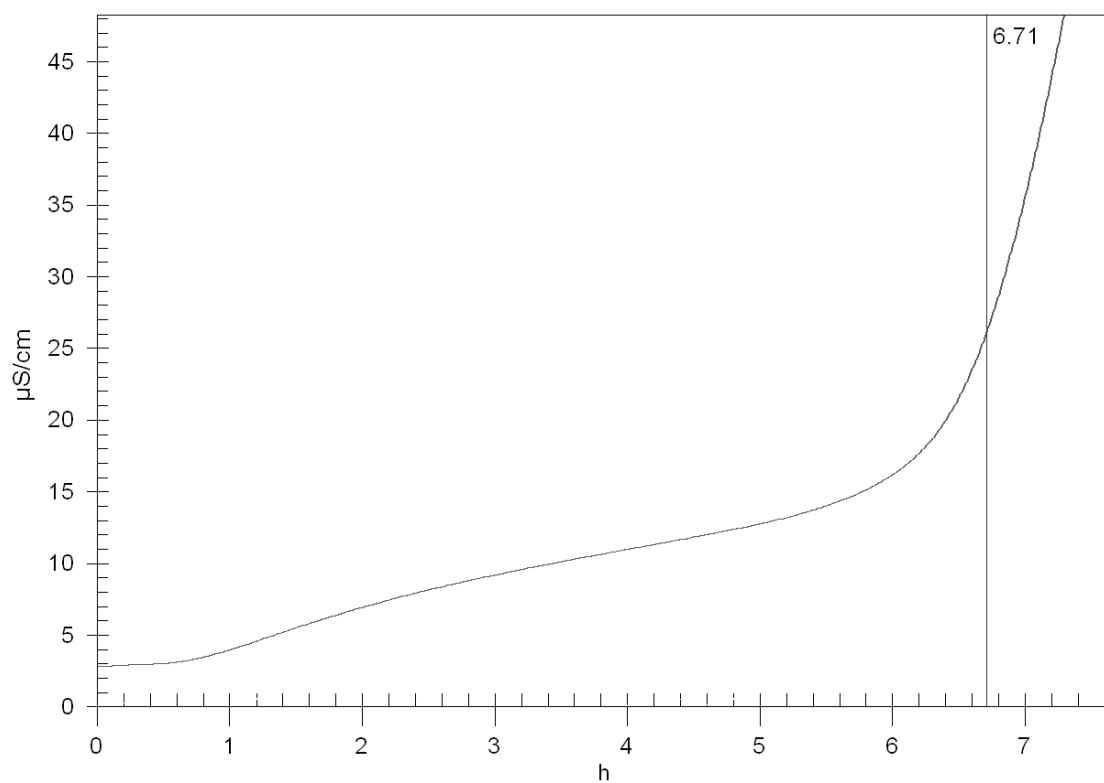
ภาพผนวกที่ จ29 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซล
จากน้ำมันสุ้ดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 80:20
และเติมสาร BHA 50 พีพีเอ็ม



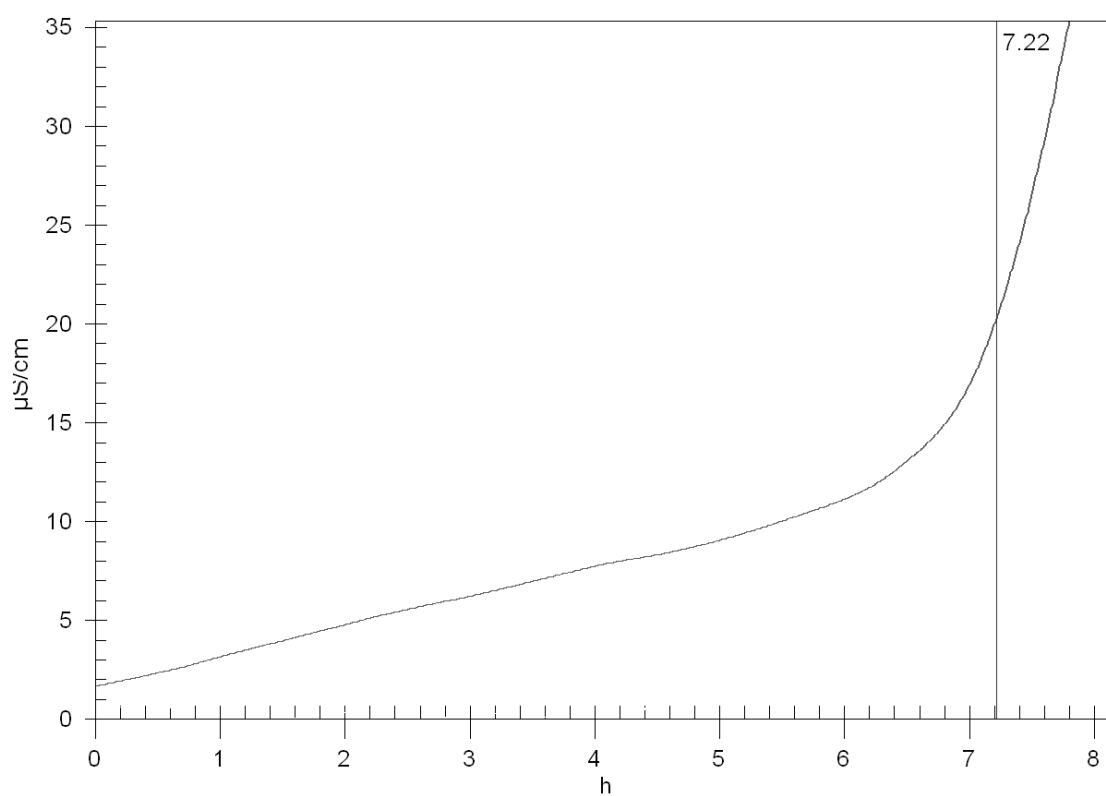
ภาพผนวกที่ จ30 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซล
จากน้ำมันสนดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 80:20
และเติมสาร BHA 100 พีพีเอ็ม



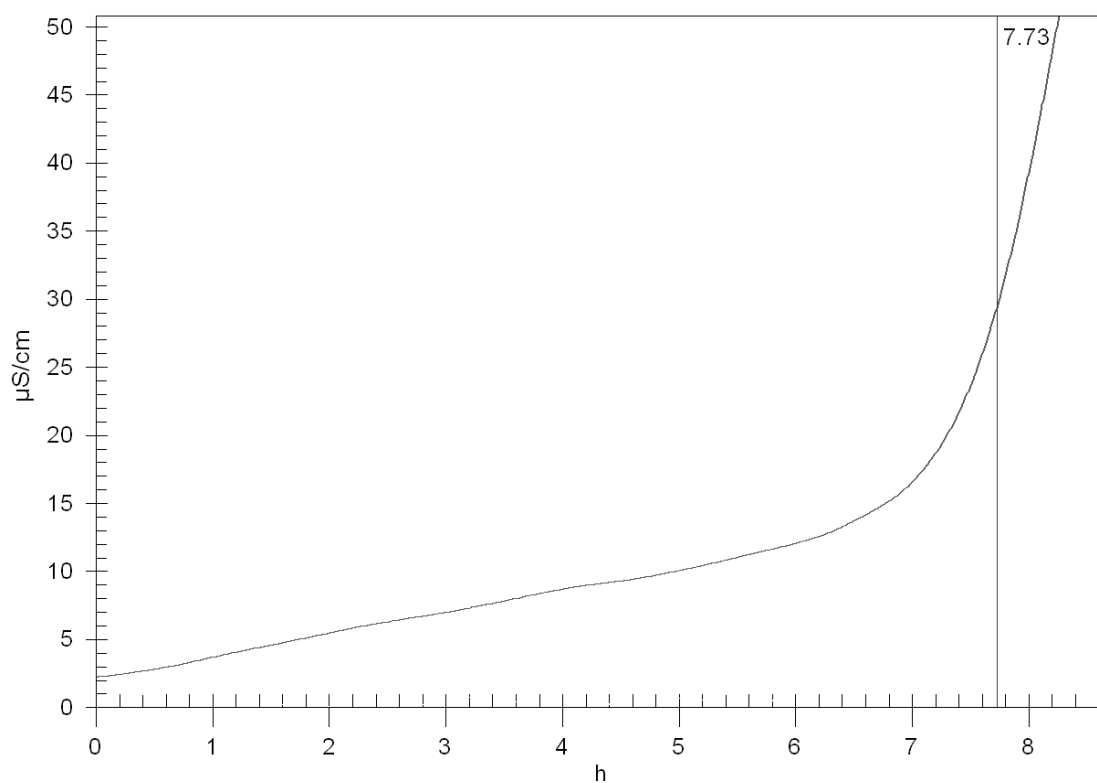
ภาพผนวกที่ จ31 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซล
จากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 80:20
และเติมสาร BHA 150 พีพีเอ็ม



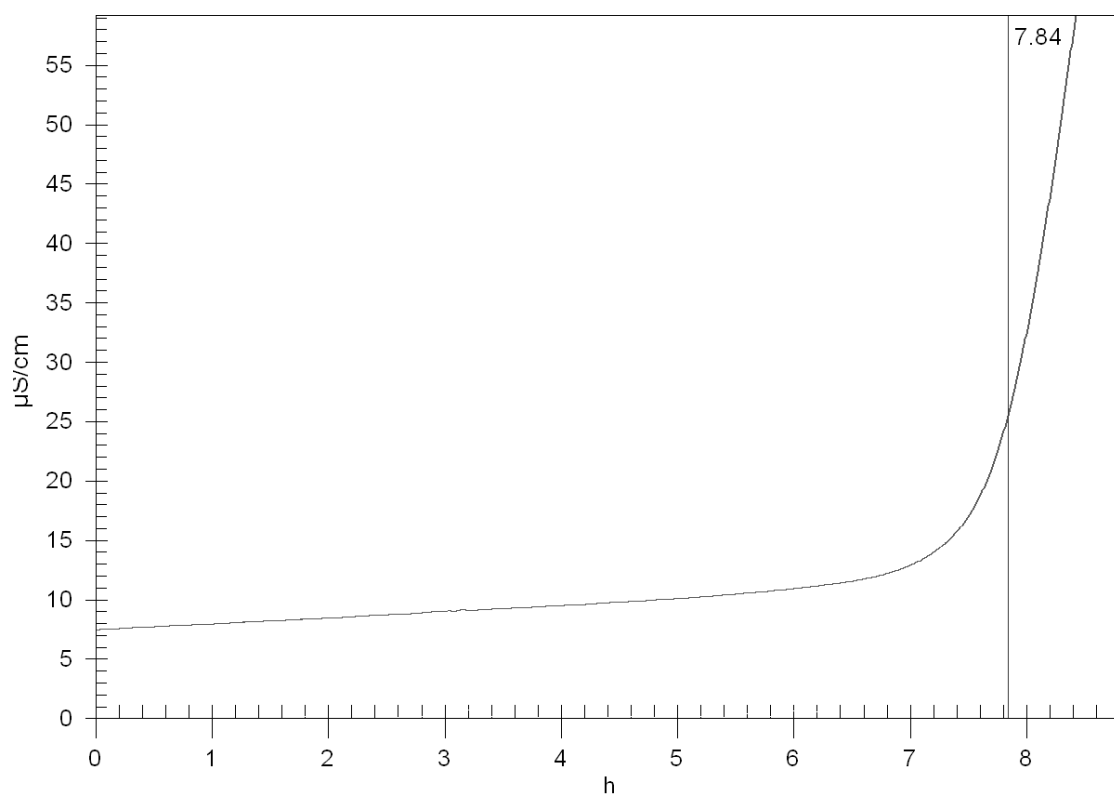
ภาพผนวกที่ จ32 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซล
จากน้ำมันสนดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 80:20
และเติมสาร BHA 200 พีพีเอ็ม



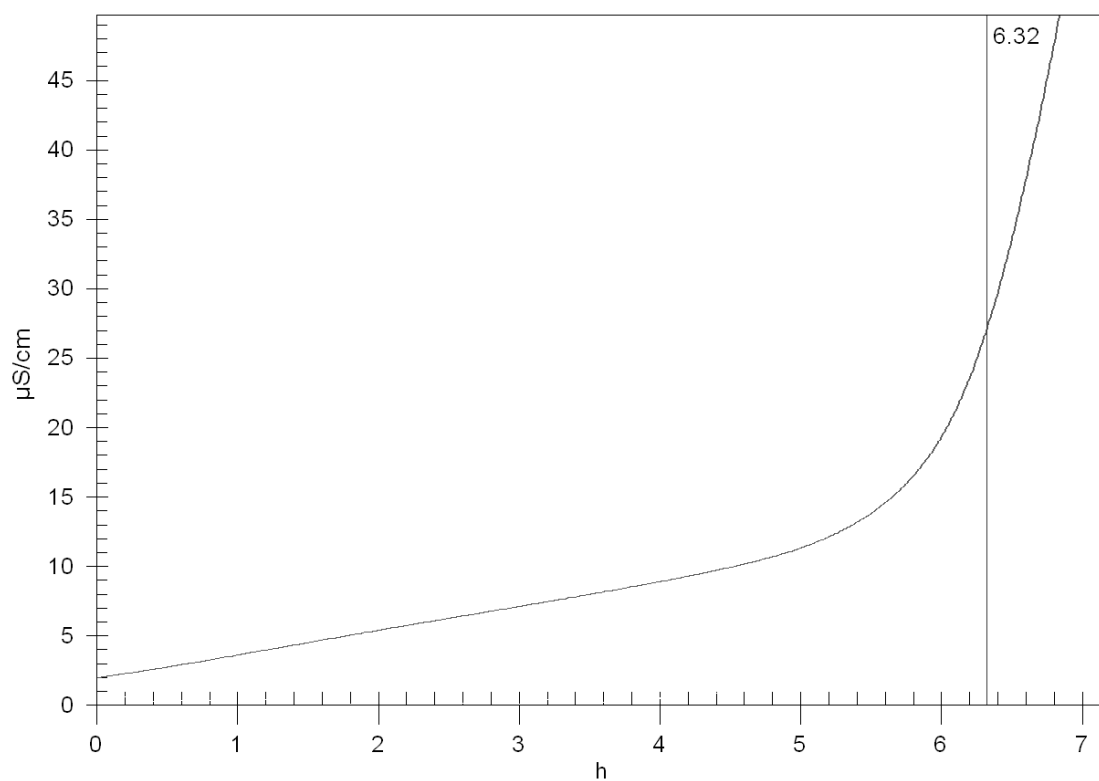
ภาพผนวกที่ จ33 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซล
จากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 80:20
และเติมสาร BHA 250 พีพีเอ็ม



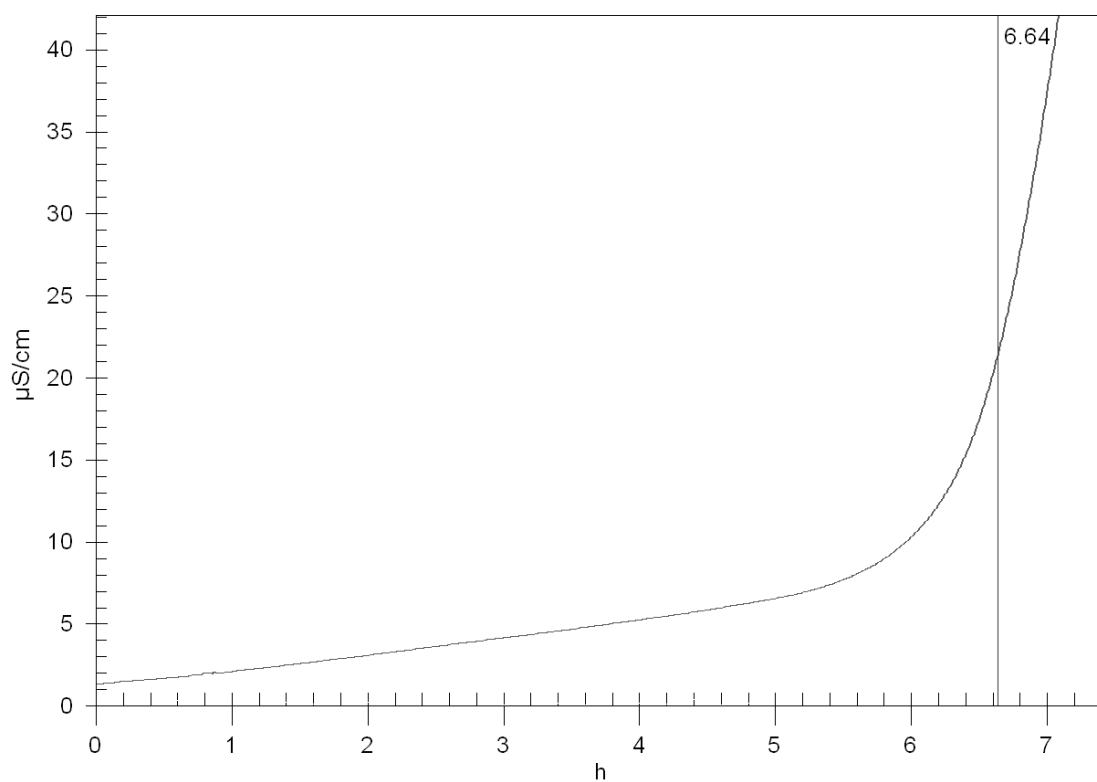
ภาพผนวกที่ จ34 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซล
จากน้ำมันสนดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 80:20
และเติมสาร BHA 300 พีพีเอ็ม



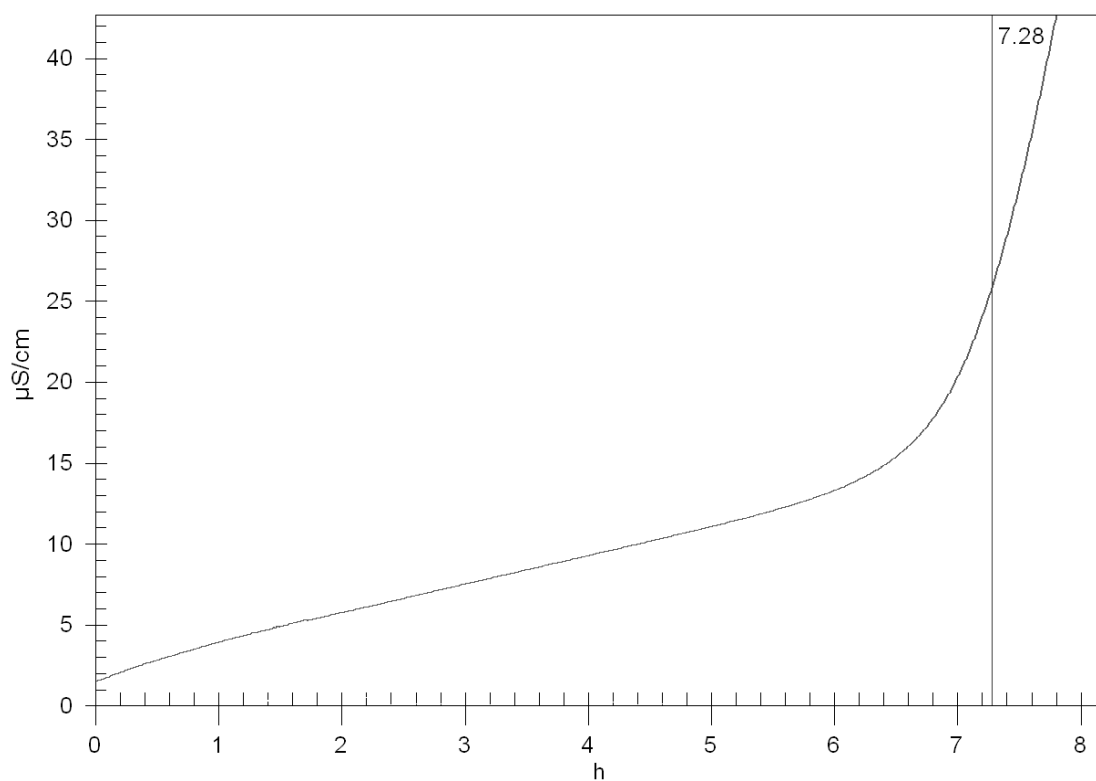
ภาพผนวกที่ จ35 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซล
จากน้ำมันสนดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 80:20
และเติมสาร BHA 350 พีพีเอ็ม



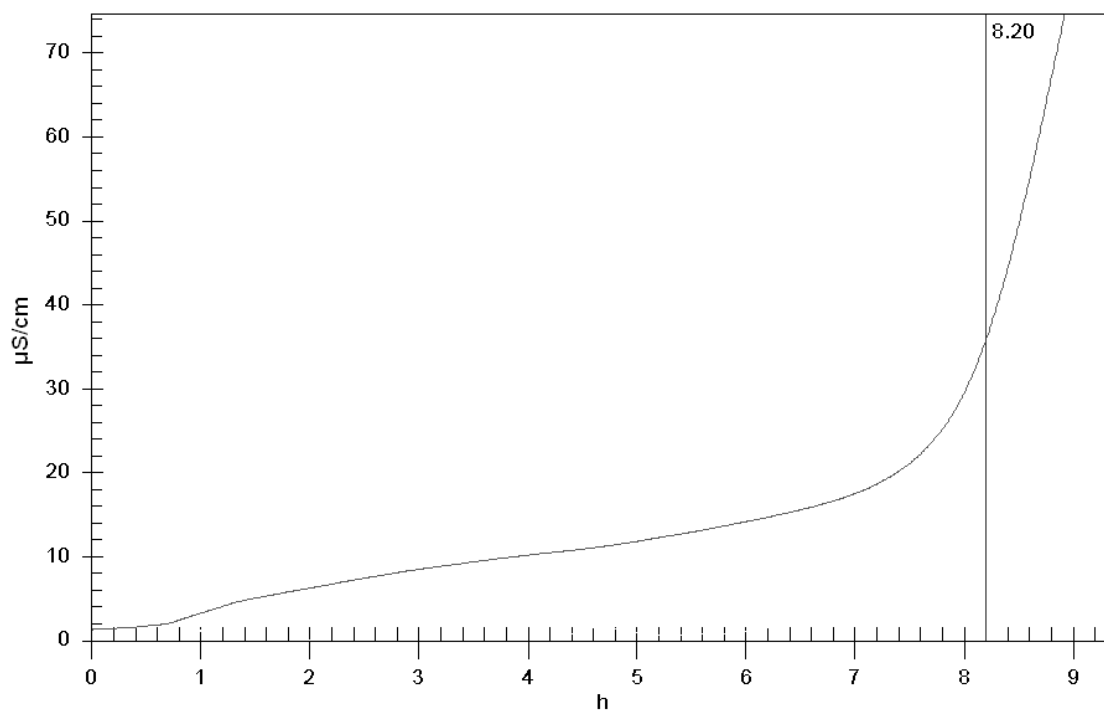
ภาพผนวกที่ จ36 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซล
จากน้ำมันสนดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 60:40
และเติมสาร BHA 50 พีพีเอ็ม



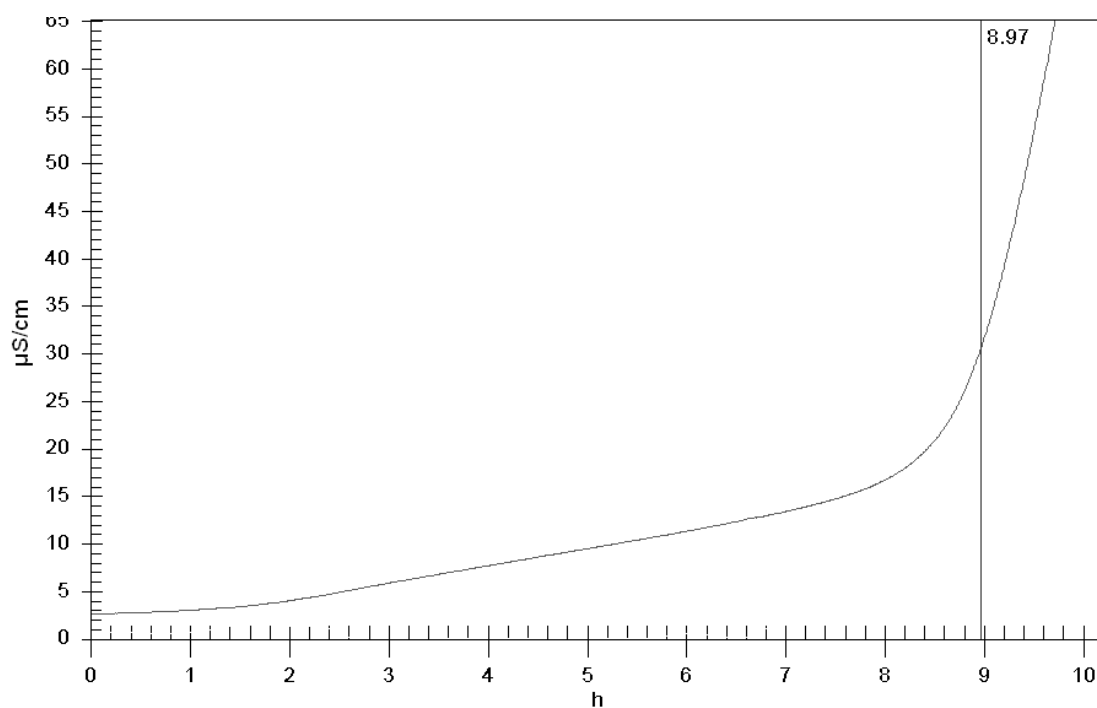
ภาพผนวกที่ จ37 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซล
จากน้ำมันสุบุด้าและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 60:40
และเติมสาร BHA 100 พีพีเอ็ม



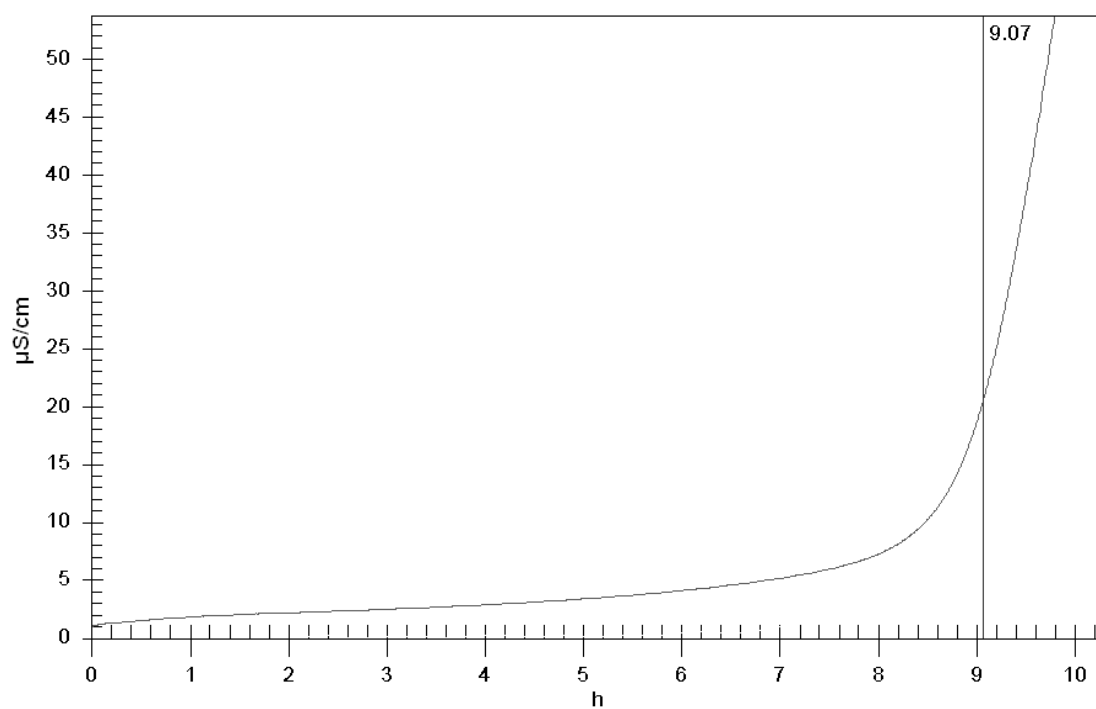
ภาพผนวกที่ จ38 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซล
จากน้ำมันสนดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 60:40
และเติมสาร BHA 150 พีพีเอ็ม



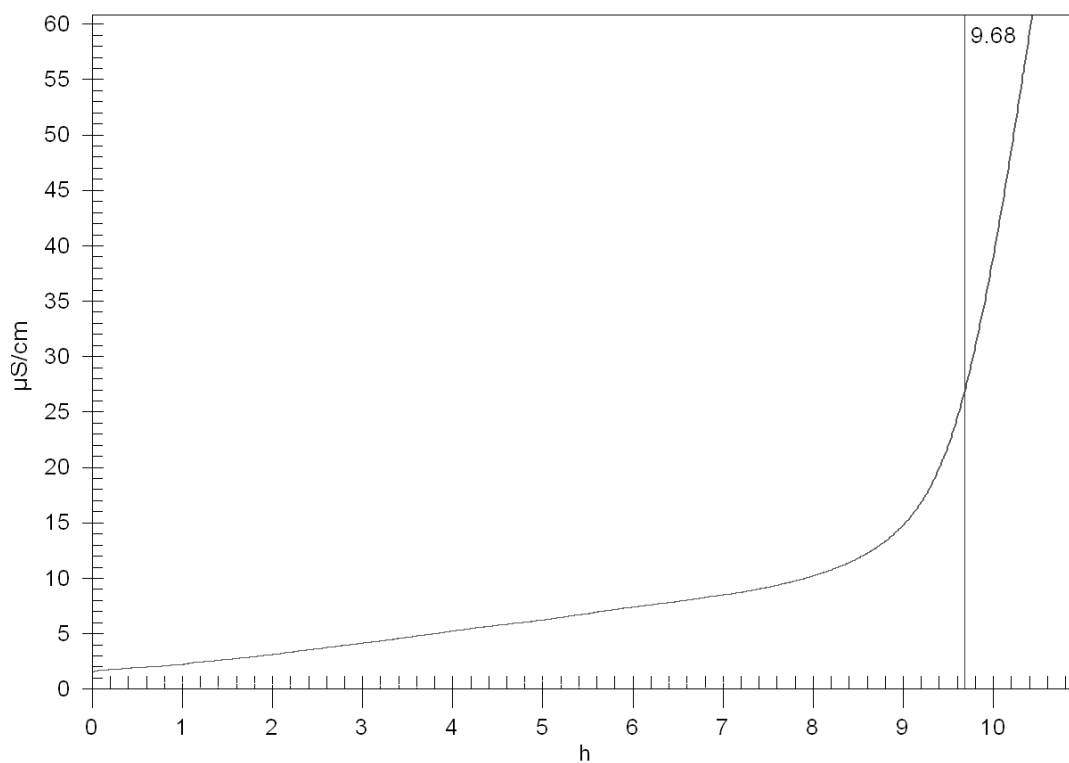
ภาพผนวกที่ จ39 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซล
จากน้ำมันสุ้ดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 60:40
และเติมสาร BHA 200 พีพีเอ็ม



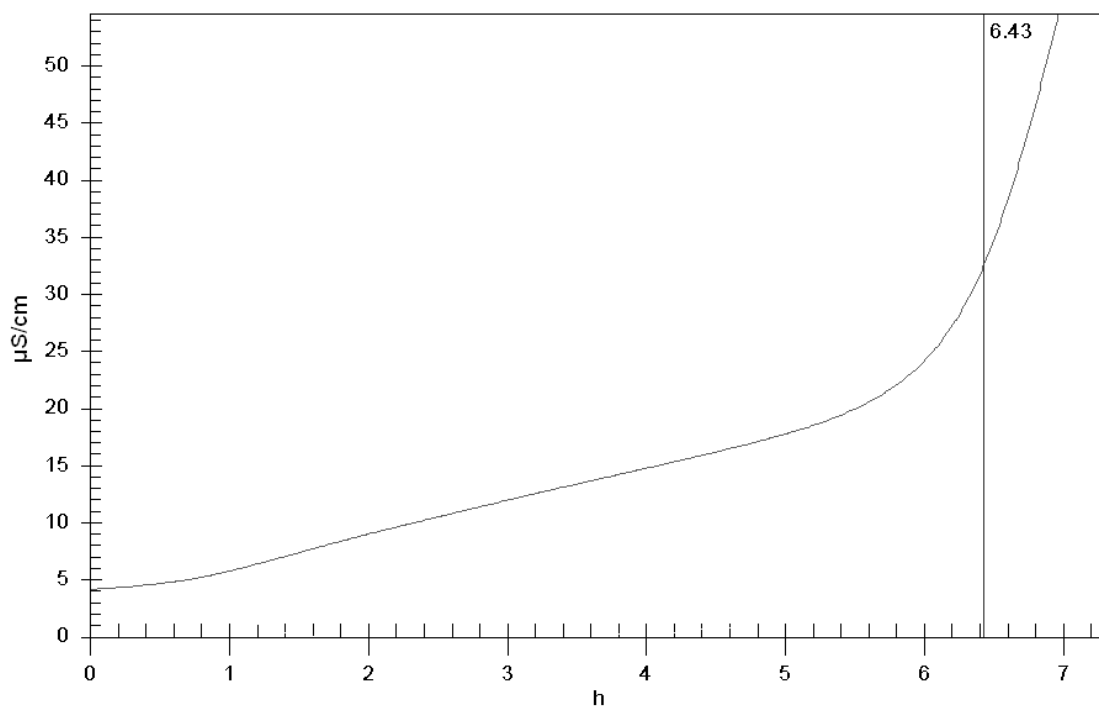
ภาพผนวกที่ จ40 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซล
จากน้ำมันสุบุดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 60:40
และเติมสาร BHA 250 พีพีเอ็ม



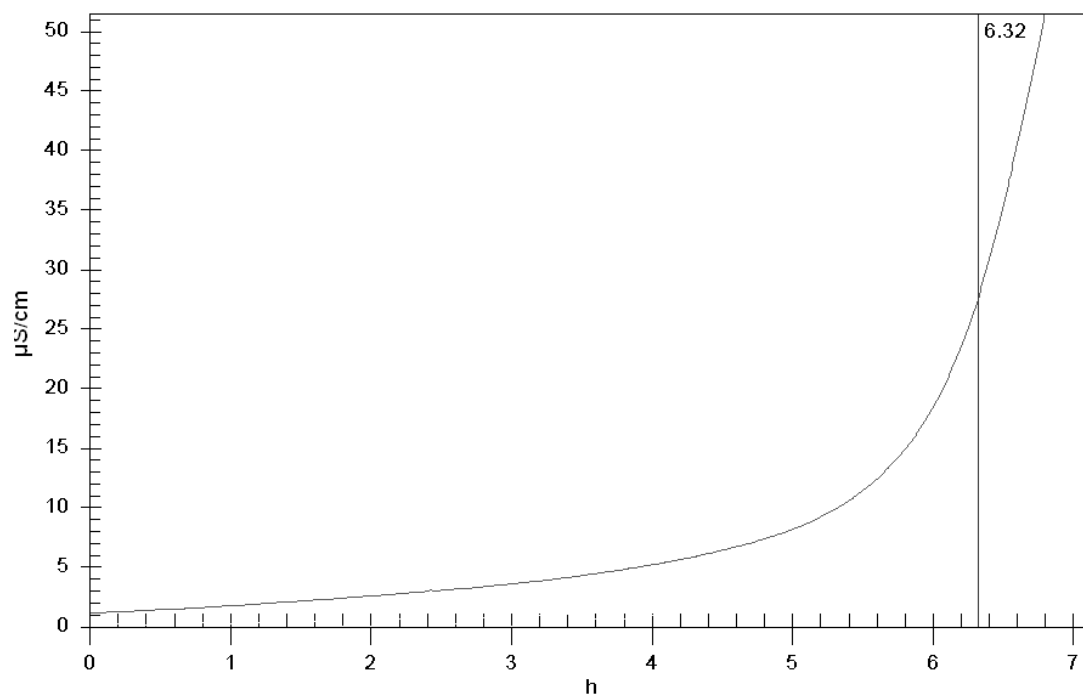
ภาพผนวกที่ จ41 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซล
จากน้ำมันสุบุดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 60:40
และเติมสาร BHA 300 พีพีเอ็ม



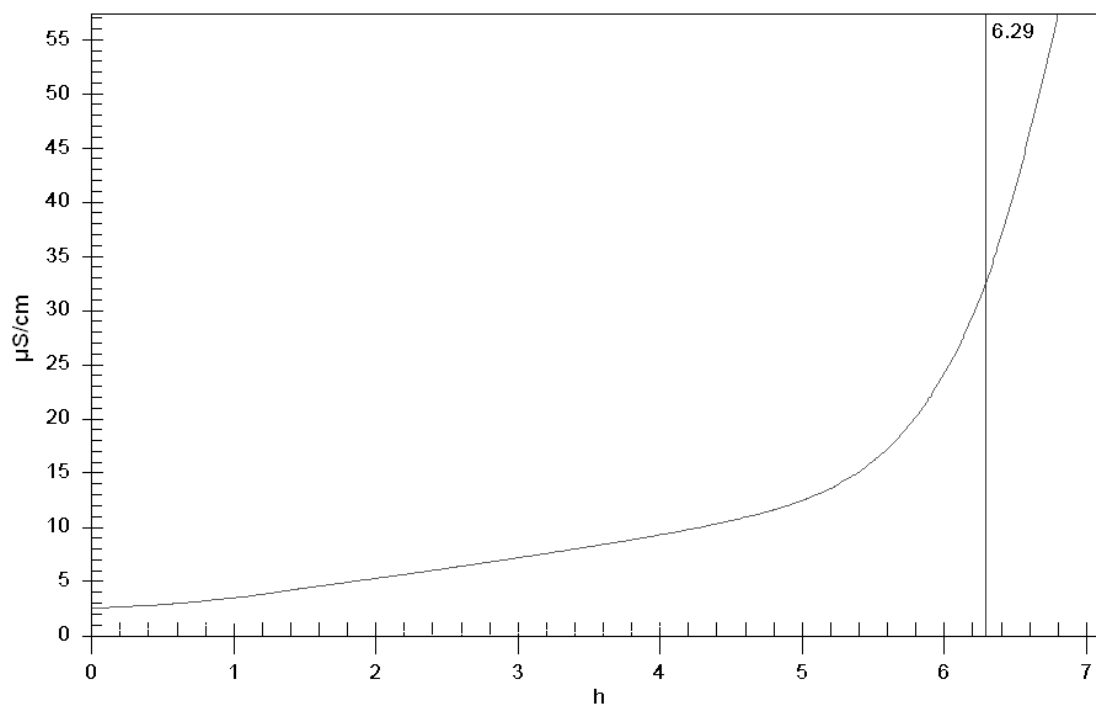
ภาพผนวกที่ จ42 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซล
จากน้ำมันสนดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 60:40
และเติมสาร BHA 350 พีพีเอ็ม



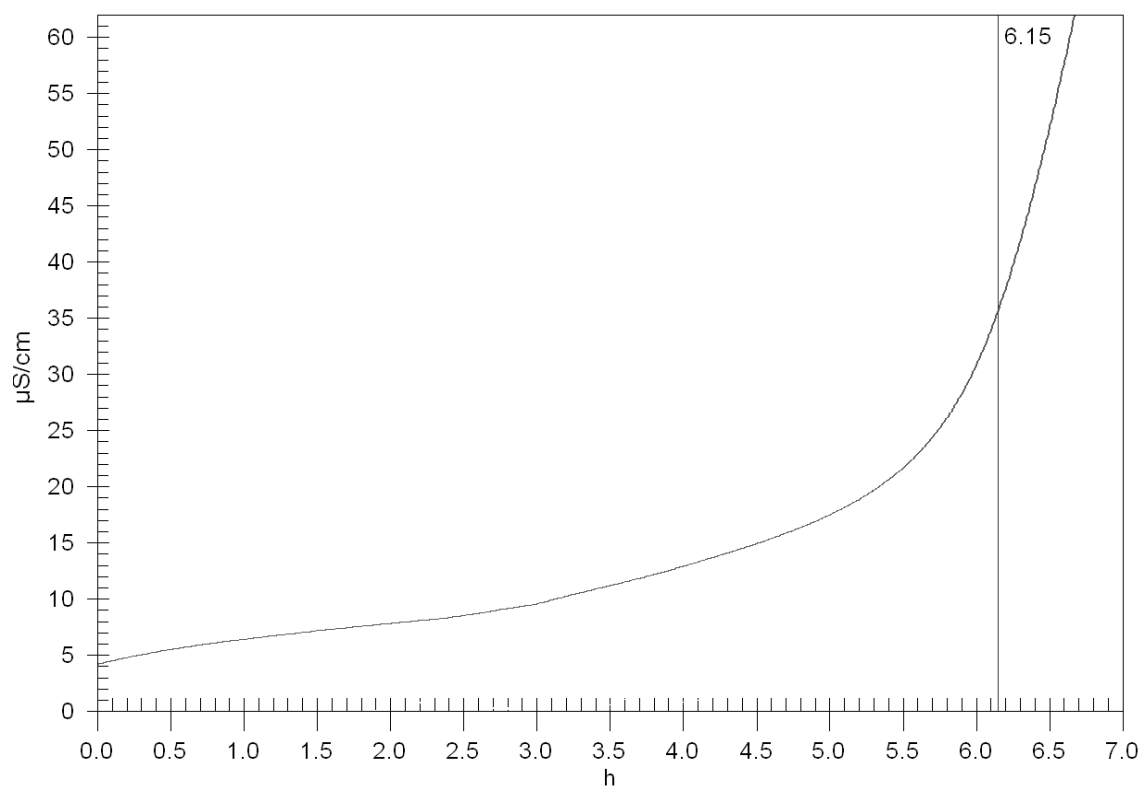
ภาพผนวกที่ จ43 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสุบุดำที่เติมสาร BHA 200 พีพีเอ็ม ก่อนจัดเก็บเป็นระยะเวลา 10 สัปดาห์



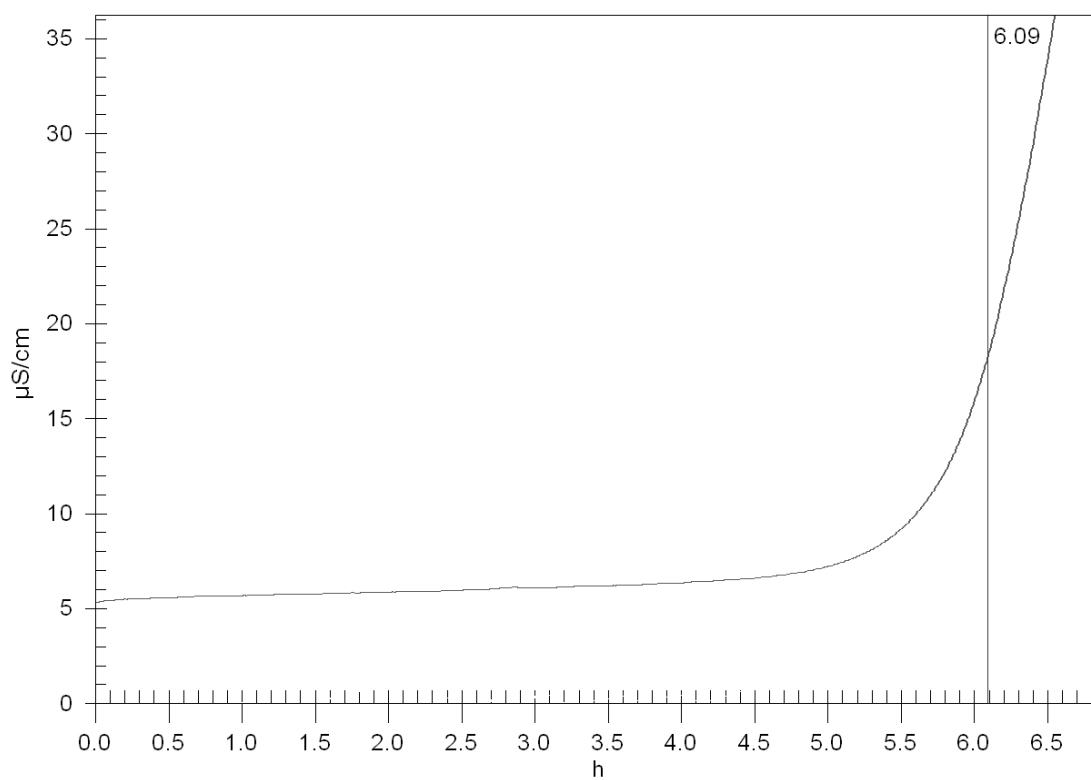
ภาพผนวกที่ จ44 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร BHA 200 พีพีเอ็ม หลังจัดเก็บเป็นระยะเวลา 2 สัปดาห์



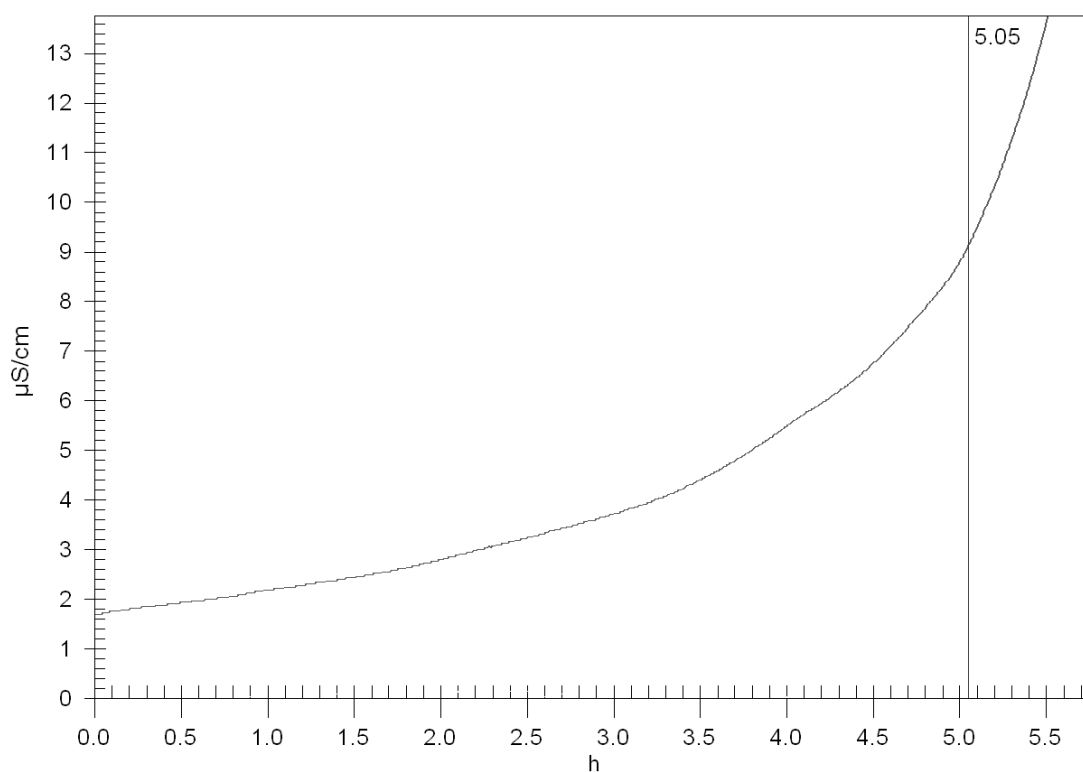
ภาพผนวกที่ จ45 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสนดำที่เติมสาร BHA 200 พีพีเอ็ม หลังจัดเก็บเป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์



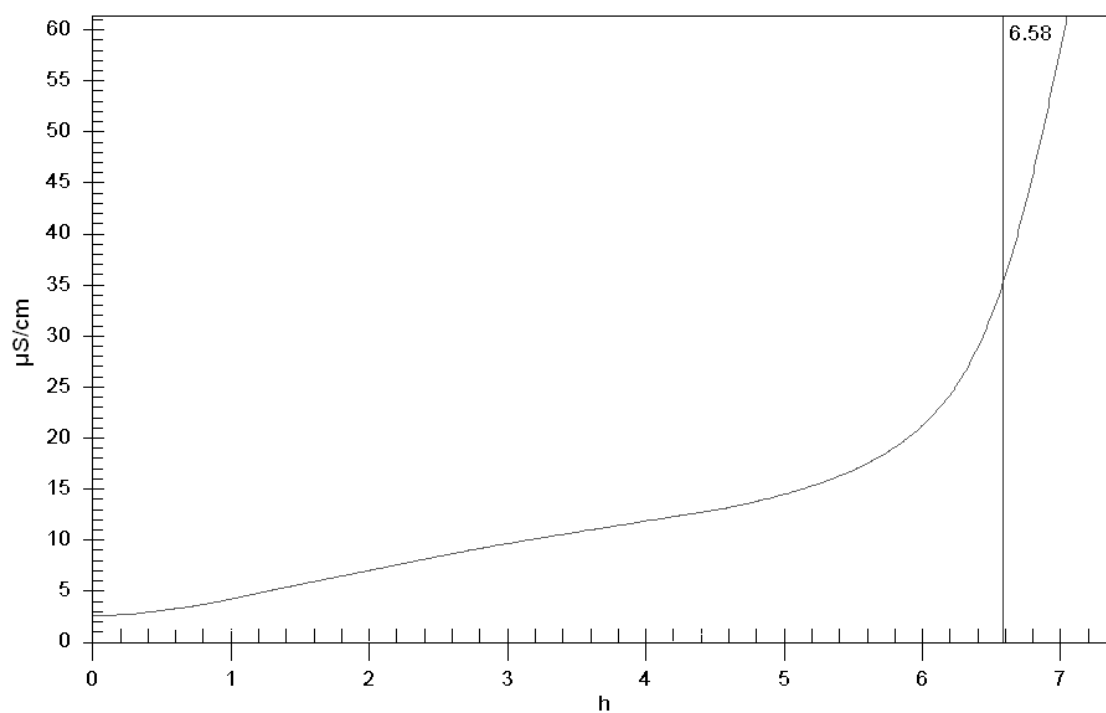
ภาพผนวกที่ จ46 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสนดำที่เติมสาร BHA 200 พีพีเอ็ม หลังจัดเก็บเป็นระยะเวลา 6 สัปดาห์



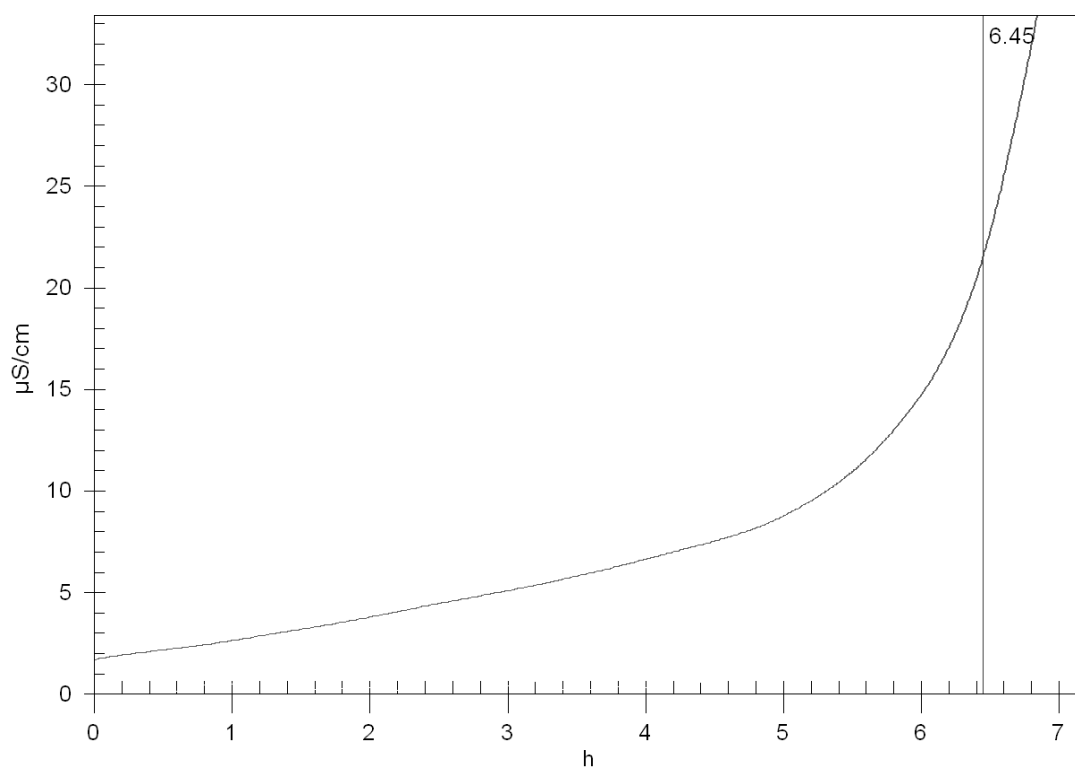
ภาพผนวกที่ จ47 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร BHA 200 พีพีเอ็ม หลังจัดเก็บเป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์



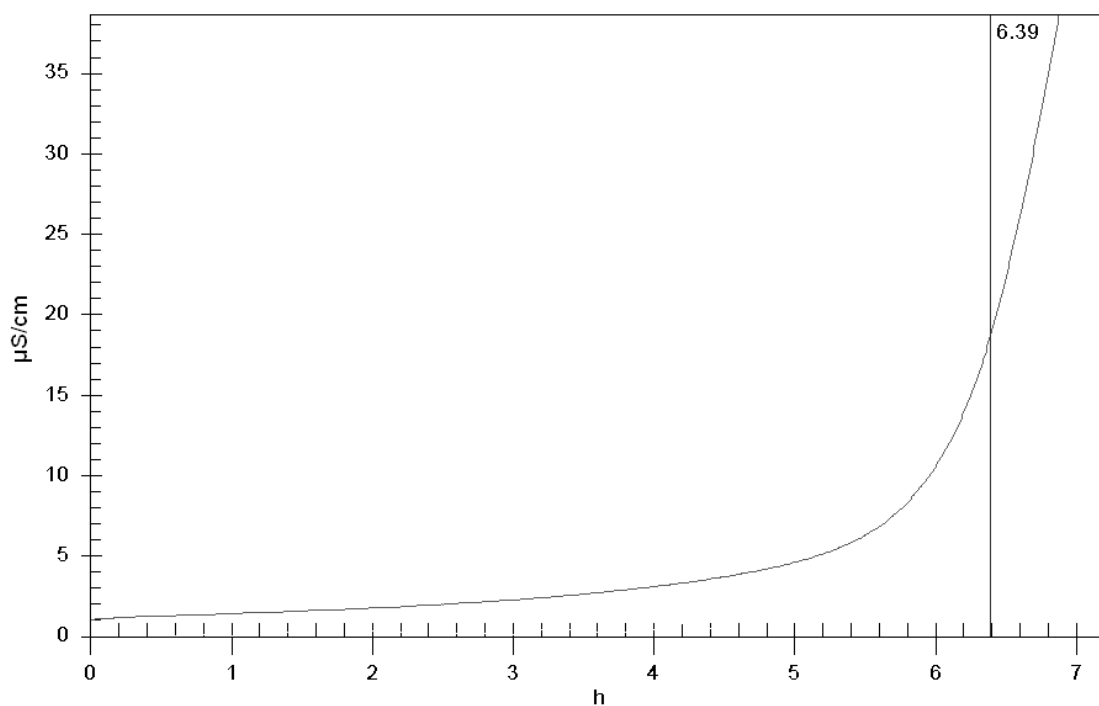
ภาพผนวกที่ จ48 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสนุดำที่เติมสาร BHA 200 พีพีเอ็ม หลังจัดเก็บเป็นระยะเวลา 10 สัปดาห์



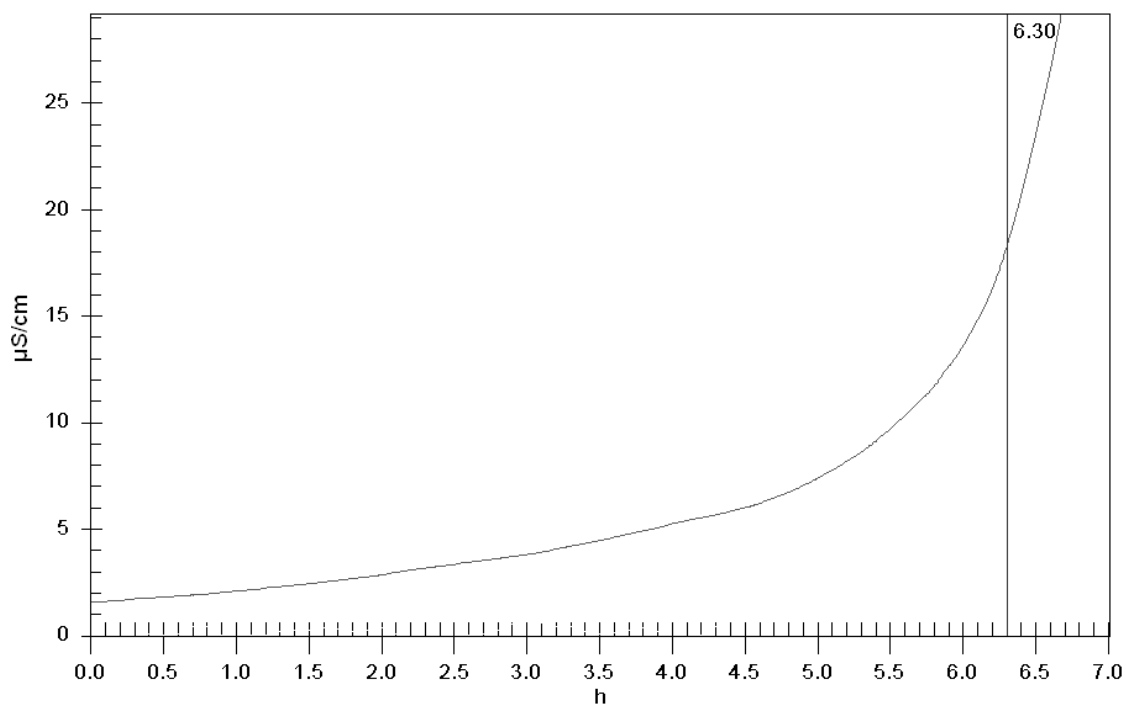
ภาพผนวกที่ จ49 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซล
จากน้ำมันสนดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 60:40
และเติมสาร BHA 50 พีพีเอ็ม ก่อนจัดเก็บเป็นระยะเวลา 10 สัปดาห์



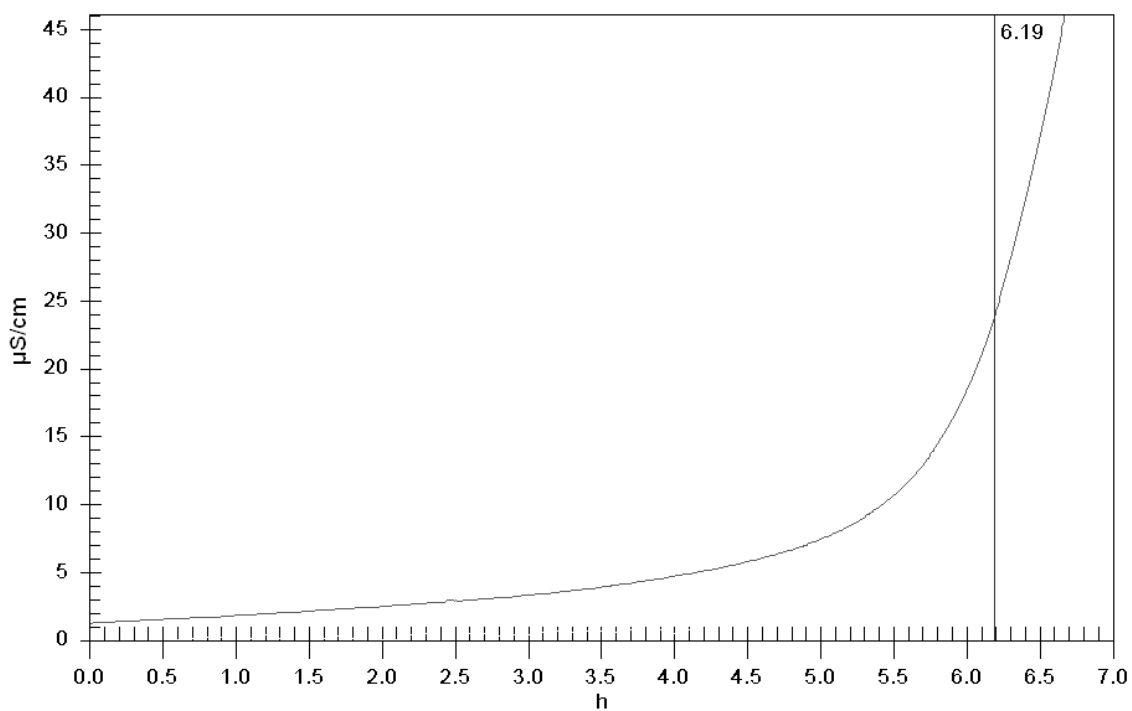
ภาพผนวกที่ จ50 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซล
จากน้ำมันสุดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 60:40
และเติมสาร BHA 50 พีพีเอ็ม หลังจัดเก็บเป็นระยะเวลา 2 สัปดาห์



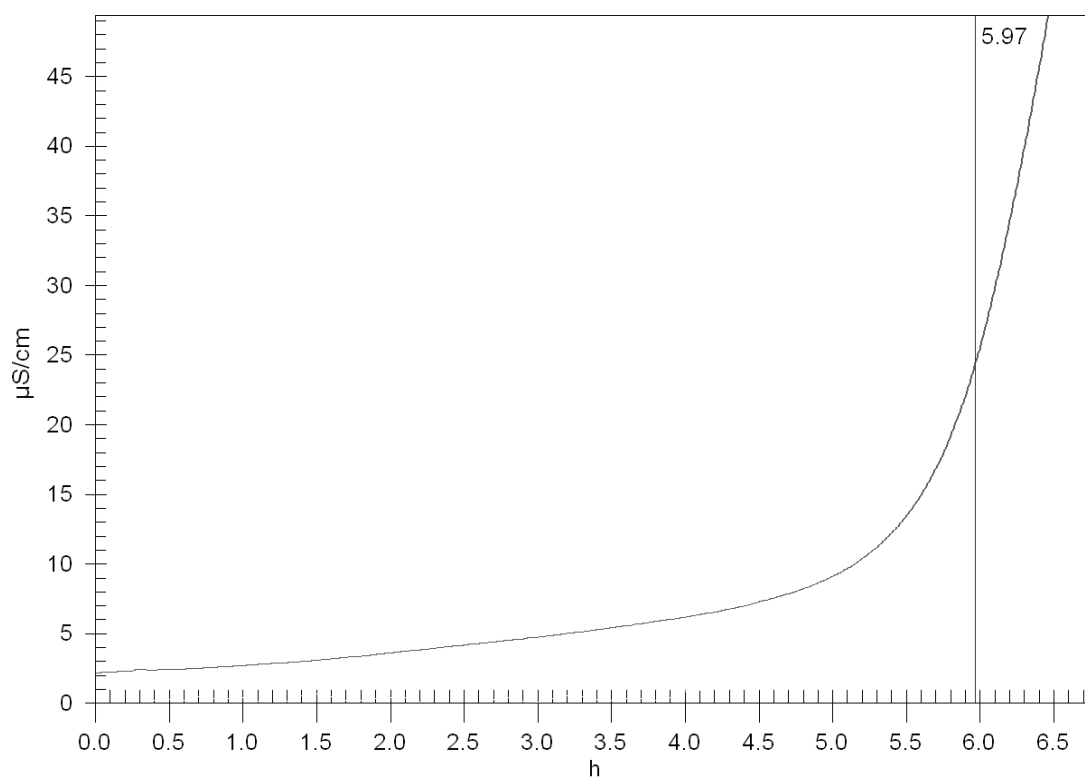
ภาพผนวกที่ จ51 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซล
จากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 60:40
และเติมสาร BHA 50 พีพีเอ็ม หลังจัดเก็บเป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์



ภาพผนวกที่ จ52 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซล
จากน้ำมันสุญ์ดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 60:40
และเติมสาร BHA 50 พีพีเอ็ม หลังจัดเก็บเป็นระยะเวลา 6 สัปดาห์



ภาพผนวกที่ จ53 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซล
จากน้ำมันสุ้ดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 60:40
และเติมสาร BHA 50 พีพีเอ็ม หลังจัดเก็บเป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์



ภาพผนวกที่ จ54 ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซล
จากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 60:40
และเติมสาร BHA 50 พีพีเอ็ม หลังจัดเก็บเป็นระยะเวลา 10 สัปดาห์

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวชวิดา ปัญญาสุรยุทธ
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 22 มกราคม 2527
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	ระดับอุดมศึกษา วศ.บ. (วิศวกรรมเคมี) สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น (พ.ศ. 2549)
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนจากโครงการพัฒนาบัณฑิตและวิจัยด้านวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ทุนอุดหนุนการค้นคว้าและวิจัยประเภทวิทยานิพนธ์ ปีการศึกษา 2550 บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์