



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)
.....
ปริญญญา

.....
วิศวกรรมเคมี
.....
สาขา

.....
วิศวกรรมเคมี
.....
ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ

The Study on the Oxidation Stability of Biodiesel from Jatropha Oil

นามผู้วิจัย นางสาวเดือนเพ็ญ ฉายทองดี

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(..... รองศาสตราจารย์เพ็ญจิตร ศรีนพคุณ, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(..... ผู้ช่วยศาสตราจารย์จรูญ นัตรमानพ, วศ.ด.)

หัวหน้าภาควิชา
(..... รองศาสตราจารย์ผ่องแผ้ว พรรณวดี, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

.....
(..... รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ

The Study on the Oxidation Stability of Biodiesel from Jatropha Oil

โดย

นางสาวเดือนเพ็ญ นายทองดี

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

พ.ศ. 2552

เดือนเพ็ญ นายทองดี 2552: การศึกษาเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมัน
สบู่ดำ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี) สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรม
เคมี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์เพ็ญจิตร ศรีนพคุณ, Ph.D. 149 หน้า

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำซึ่งได้จาก
กระบวนการทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน ตัวเร่งปฏิกิริยาคือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide) ซึ่งใช้
ในปริมาณ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันสบู่ดำ อัตราส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำเท่ากับ 7:1
อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบในการกวน 600 รอบต่อนาที และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1.5 ชั่วโมง
ตามลำดับ จากนั้นเติมสารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) 3 ชนิดคือ PG (3,4,5-Trihydroxybenzoic acid propyl
ester, Propyl gallate), TBHQ (T-Butyl hydroquinone) และ BHA (Butylated hydroxyanisole) ที่ความเข้มข้น 0-
750 พีพีเอ็ม และสารเติมแต่งสำเร็จรูป (Additive) 3 ชนิดคือ ZEP additive, NITROX และ L-power ที่ความ
เข้มข้น 0-1,000 พีพีเอ็ม และนำตัวอย่างไบโอดีเซลที่เติมสารต้านอนุมูลอิสระหรือสารเติมแต่งสำเร็จรูปมาวัดค่า
Induction time ตามวิธี EN14112 โดยเครื่อง Rancimat

ผลการทดลองพบว่า PG เป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดสำหรับการปรับปรุง
เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ ไบโอดีเซลซึ่งเติม PG ในปริมาณความเข้มข้น
50, 150, 250, 350, 500, 650 และ 750 พีพีเอ็ม ทำให้ค่า Induction time เพิ่มขึ้นจาก 4.21 (ยังไม่เติมสารต้านอนุมูล
อิสระหรือสารเติมแต่งใดๆ) เป็น 18.93, 26.35, 30.20 32.98, 34.04, 36.01 และ 37.55 ชั่วโมง งานวิจัยนี้ยังได้
ศึกษาเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากสบู่ดำที่เติม PG ในปริมาณความเข้มข้น 150 พีพีเอ็ม
ที่เก็บไว้เป็นระยะเวลา 20 สัปดาห์ ค่า Induction time ของไบโอดีเซลในสัปดาห์แรกมีค่าเท่ากับ 26.35 ชั่วโมง
และในสัปดาห์ที่ 20 มีค่าเท่ากับ 23.59 ชั่วโมง พบว่าค่า Induction time ลดลง 10.47 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับ
ตอนเริ่มต้น คุณสมบัติทางกายภาพของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติม PG ในปริมาณความเข้มข้น 150 พีพี
เอ็ม มีดังนี้ ค่าความหนืดที่ 40 องศาเซลเซียสคือ 4.40 มิลลิเมตร²ต่อวินาที ค่าจุดหมอกควันคือ 5 องศาเซลเซียส
ค่าจุดไหลเทคือ -2 องศาเซลเซียส ค่าจุดวาบไฟคือ 190 องศาเซลเซียส ค่าความหนาแน่นที่ 15 องศาเซลเซียส
คือ 875.5 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร และ ค่าความเป็นกรดคือ 0.35 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม

Duanpen Chaithongdee 2009: The Study on the Oxidation Stability of Biodiesel from Jatropha Oil. Master of Engineering (Chemical Engineering), Major Field: Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Penjit Srinophakun, Ph.D. 149 pages.

Jatropha biodiesel was produced by transesterification reaction. Potassium hydroxide was a catalyst at 1.5 percent by weight of Jatropha oil. Mole ratio of methanol and Jatropha oil was 7:1. The condition namely temperature, speed of mixing and reaction time of this experiment were 45 °C, 600 rpm and 1.5 hrs respectively. Then, the various antioxidants and additives were added to Jatropha biodiesel. The range of antioxidant and additive concentration were 0-750 and 0-1,000 ppm respectively. Three antioxidants were PG (3,4,5-Trihydroxybenzoic acid propyl ester, Propyl gallate), TBHQ (T-Butyl hydroquinone) and BHA (Butylated hydroxyanisole). Three commercial additives were ZEP additive, NITROX and L-power. The induction time of biodiesel with either antioxidant or additive was measured according to EN14112 using the Rancimat machine.

The result showed that PG was the best antioxidant for Jatropha biodiesel at the concentration of 50, 150, 250, 350, 500, 650 and 750 ppm which could improve the induction time from 4.21 to 18.93, 26.35, 30.20 32.98, 34.04, 36.01 and 37.55 hrs respectively. For the storage of Jatropha biodiesel PG added at the concentration of 150 ppm for 20 weeks, the induction time of the first week storage was 26.35 and led to 23.59 in the final week (reduced 10.47% from the first week). The properties of Jatropha biodiesel PG added at the concentration of 150 ppm, were 4.40 cSt viscosity at 40 °C, 5 °C cloud point, -2 °C pour point, 190 °C flash point, 875.5 kg/m³ density at 15 °C and 0.35 mg KOH/gm neutralization value.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

/ /

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงเนื่องจากความช่วยเหลือ และความกรุณาของผู้มีพระคุณหลายท่าน ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ญจิตร ศรีนพคุณ ประธานกรรมการที่ปรึกษา และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จริญญา ฉัตรมานพ กรรมการร่วม ที่กรุณาให้ความดูแลเอาใจใส่ ให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางต่าง ๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความถูกต้องสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล กองกาญจนาย และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สตินสุภา ขัยจุลเจิม ที่ได้กรุณาสละเวลาในการตรวจแก้ไข และให้คำแนะนำเพิ่มเติมในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณโครงการ เกษ-ไบโอดีเซล บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง สำหรับการสนับสนุนโครงการวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณ บริษัท เมทโรห์ม สยาม จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือทดสอบเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน (Rancimat model 743) และขอขอบคุณพี่โชติมา คงชู ที่คอยแนะนำการใช้เครื่องมือนี้

ขอขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ และบุคคลรอบข้างทุกคนที่เป็นกำลังใจ ให้ความช่วยเหลือ และให้คำปรึกษา

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่คอยห่วงใย เป็นกำลังใจ ให้การสนับสนุนในทุก ๆ ด้าน

ประโยชน์อันใดอันจะเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบแด่ คุณพ่อ คุณแม่ และคณาจารย์ทุกท่าน ที่กรุณาเมตตาอบรมสั่งสอน และให้กำลังใจจนถึงปัจจุบัน

เดือนเพ็ญ นายทองดี

กันยายน 2552

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	43
อุปกรณ์	43
วิธีการ	45
ผลและวิจารณ์	54
สรุปและข้อเสนอแนะ	67
สรุป	67
ข้อเสนอแนะ	68
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	69
ภาคผนวก	74
ภาคผนวก ก มาตรฐานไบโอดีเซล	75
ภาคผนวก ข การคำนวณอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน	80
ภาคผนวก ค การคำนวณค่าความเป็นกรด	82
ภาคผนวก ง เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลที่ได้จากการ วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Rancimat ตามวิธี EN14112	84
ภาคผนวก จ ภาพแสดงสารเติมแต่งที่ใช้ในการวิจัย	142
ภาคผนวก ฉ ราคาสารต้านอนุมูลอิสระและสารเติมแต่งสำเร็จรูป	144
ภาคผนวก ช การคำนวณปริมาณเมทิลเอสเทอร์	146
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	149

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 ชื่อทั่วไป ชื่อทางวิทยาศาสตร์ จำนวนคาร์บอน จำนวนพันธะคู่ และแหล่งที่พบของกรดไขมันบางชนิด	6
2 ปริมาณกรดไขมันชนิดต่างๆที่ผลิตได้จากพืชและสัตว์แต่ละชนิด	8
3 คุณสมบัติทางกายภาพ-เคมีของน้ำมันสบู่ดำ	9
4 ลักษณะสมบัติต่างๆ ที่ได้จากไบโอดีเซลสบู่ดำ เมื่อเติม PG ความเข้มข้น 150 และ 250 พีพีเอ็ม	66
ตารางผนวกที่	
ก1 มาตรฐานไบโอดีเซลตามมาตรฐาน ASTM D6751 ของประเทศสหรัฐอเมริกา	76
ก2 มาตรฐานไบโอดีเซลตามมาตรฐาน DIN EN 14214 ของสหภาพยุโรป	77
ก3 ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2548	78
ง1 เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติม PG ในปริมาณความเข้มข้นต่างๆ	85
ง2 เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติม BHA ในปริมาณความเข้มข้นต่างๆ	86
ง3 เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติม TBHQ ในปริมาณความเข้มข้นต่างๆ	87
ง4 เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติม ZEP ในปริมาณความเข้มข้นต่างๆ	88
ง5 เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติม NITROX ในปริมาณความเข้มข้นต่างๆ	88
ง6 เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติม L-power ในปริมาณความเข้มข้นต่างๆ	89

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ง7	เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่น้ำดำที่เติม PG ในปริมาณความเข้มข้น 150 พีพีเอ็ม ที่ทำการเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 20 สัปดาห์
ฉ1	ราคาของสารต้านอนุมูลอิสระและสารเติมแต่งสำเร็จรูป

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 โครงสร้างของไตรกลีเซอไรด์	6
2 ต้นสบู่ดำ	10
3 เมล็ดสบู่ดำ	11
4 เครื่องหีบน้ำมันสบู่ดำด้วยระบบไฮดรอลิก	12
5 เครื่องสกัดน้ำมันสบู่ดำ โดยใช้แรงงานจากคน	12
6 กลไกการแตกสลายด้วยความร้อนของไตรกลีเซอไรด์	16
7 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์	17
8 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันพืชกับแอลกอฮอล์ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์เป็น เอสเทอร์และกลีเซอรอล	17
9 กลไกของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเบส โดยไดกลีเซอไรด์ (R-OH), หมู่แอลคิลโซ่ยาว (R1) และหมู่แอลคิลโซ่สั้น (R')	18
10 ปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซล	24
11 ปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซลจนเกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์	25
12 ผลิตภัณฑ์ปฏิกิริยาที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซลที่ประกอบด้วย กรดโอเลอิก	26
13 ผลิตภัณฑ์ปฏิกิริยาที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซลที่ประกอบด้วย กรดลิโนเลอิก	27
14 ผลิตภัณฑ์ปฏิกิริยาที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซลที่ประกอบด้วย กรดลิโนเลอิก	28
15 ผลิตภัณฑ์ปฏิกิริยาที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซลที่ประกอบด้วย กรดอาแรคิไดนิค	28
16 ผลิตภัณฑ์ปฏิกิริยาที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซลที่ประกอบด้วย กรดอาแรคิไดนิค	29
17 การเกิดสารประกอบอื่นๆ จากสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์	29

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
18	การเกิดสารประกอบอื่นๆ จากสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์	30
19	การเกิดสารประกอบแอลเคนและแอลคีนจากสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์	30
20	การเกิดสารประกอบอัลดีไฮด์จากสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์	31
21	การเกิดสารประกอบอีพอกไซด์	31
22	กลไกของสารต้านอนุมูลอิสระในการยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน	32
23	เครื่อง Rancimat	33
24	องค์ประกอบภายในเครื่อง Rancimat	34
25	กราฟที่ได้จากเครื่อง Rancimat	34
26	ค่าสูงสุดของอนุพันธ์อันดับสองของกราฟการนำไฟฟ้ากับเวลา	35
27	วิธีการลากจุดตัดของเส้นสัมผัสเพื่อหาค่า Induction time	36
28	สารเคมีที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ (เมทานอล น้ำมันสบู่ดำ และ โพลีเอทเธนไฮดรอกไซด์)	45
29	การเติมโพลีเอทเธนไฮดรอกไซด์ในเมทานอล	46
30	สารละลายผสมระหว่างโพลีเอทเธนไฮดรอกไซด์กับเมทานอลถูกเติมในไบโอดีเซล	46
31	การแยกกลีเซอรอลออกจากไบโอดีเซล	46
32	การล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำกลั่น	47
33	เครื่อง Rancimat และคอมพิวเตอร์สำหรับประมวลผล	48
34	อุปกรณ์และเครื่องมือวัดเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซล	48
35	อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ทดสอบจุดหมอกควันและจุดไหลเท	50
36	ตัวอย่างไบโอดีเซลในหลอดแก้วทดสอบและอุปกรณ์ให้ความเย็น	50
37	เครื่องมือที่ใช้ทดสอบจุดหมอกควันและจุดไหลเท	51
38	จุดหมอกควันของไบโอดีเซลซึ่งเริ่มปรากฏในไบโอดีเซล	51
39	วิธีทดสอบจุดไหลเท	52
40	จุดไหลเทของไบโอดีเซล	52

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
41 วิธีการทดสอบค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซล	53
42 จุดยุติการไทเทรต สารละลายเปลี่ยนเป็นสีชมพูจาง ๆ คงที่ ประมาณ 30 วินาที	53
43 เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำเมื่อเติมสาร PG ในปริมาณความเข้มข้น 0 ถึง 750 พีพีเอ็ม	56
44 เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำเมื่อเติมสาร BHA ในปริมาณความเข้มข้น 0 ถึง 750 พีพีเอ็ม	57
45 เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำเมื่อเติมสาร TBHQ ในปริมาณความเข้มข้น 0 ถึง 750 พีพีเอ็ม	58
46 เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำเมื่อเติมสาร ZEP ในปริมาณความเข้มข้น 0 ถึง 1,000 พีพีเอ็ม	60
47 เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำเมื่อเติมสาร NITROX ในปริมาณความเข้มข้น 0 ถึง 1,000 พีพีเอ็ม	61
48 เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำเมื่อเติมสาร L-power ในปริมาณความเข้มข้น 0 ถึง 1,000 พีพีเอ็ม	62
49 เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร PG 150 พีพีเอ็ม ระหว่างจัดเก็บเป็นระยะเวลา 20 สัปดาห์	64

สารบัญภาพ (ต่อ)

[illegible]

สารบัญภาพ (ต่อ)

[illegible]

สารบัญภาพ (ต่อ)

[illegible]

สารบัญภาพ (ต่อ)

[illegible]

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ง99 เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร L-power ความเข้มข้น 250 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 3)	140
ง100 เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร L-power ความเข้มข้น 500 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 3)	140
ง101 เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร L-power ความเข้มข้น 750 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 3)	141
ง102 เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร L-power ความเข้มข้น 1,000 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 3)	141
จ1 สารเติมแต่งสำเร็จรูป ZEP	143
จ2 สารเติมแต่งสำเร็จรูป NITROX	143
จ3 สารเติมแต่งสำเร็จรูป L-power	143
ช1 ตัวอย่างโครมาโทแกรมของสารตัวอย่าง	148

การศึกษาเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซล จากน้ำมันสนุดำ

The Study on the Oxidation Stability of Biodiesel from Jatropha Oil

คำนำ

ปัจจุบันความต้องการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยการใช้ น้ำมันเชื้อเพลิงจากน้ำมันดิบยังคงเป็นปัจจัยหลัก ไม่ว่าจะเป็นการใช้กับด้านการขนส่งส่วนบุคคล การขนส่งมวลชน หรือด้านอุตสาหกรรม ประกอบกับสถานการณ์ราคาน้ำมันดิบที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่องและปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม ทำให้ประเทศต่างๆ มีความตื่นตัวในการพัฒนาน้ำมันเชื้อเพลิงและพัฒนาพลังงานทางเลือกต่างๆ โดยคำนึงถึงการประหยัดพลังงาน ลดมลพิษ พร้อมทั้งการปรับปรุงมาตรฐานให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับ แหล่งทดแทนน้ำมันดิบ เช่น เชื้อเพลิงชีวภาพ (Biofuel) หรือ สารเคมีชนิดต่างๆ ที่ได้จากชีวมวลประเภทเซลลูโลส (Cellulosic biomass) เช่น ไบโอเอทานอล (Bioethanol) ไบโอดีเซล (Biodiesel) (สำนักคุณภาพน้ำมันเชื้อเพลิง, 2549)

ไบโอดีเซล หมายถึง เชื้อเพลิงเหลวที่ผลิตจากไขมันสัตว์ น้ำมันจากพืช สำหรับขนาดเล็ก รวมถึงน้ำมันที่ใช้แล้วจากการปรุงอาหาร นำมาผ่านกระบวนการทรานเอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยม การผลิตไบโอดีเซลทำได้โดยนำไขมัน หรือน้ำมันมาทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ (Alcohol) เช่น เมทานอล (Methanol) หรือ เอทานอล (Ethanol) และมีตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อเปลี่ยนไขมันให้เป็นเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (Fatty acid methyl ester) หรือเอทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (Fatty acid ethyl ester) ซึ่งเอสเทอร์ (Ester) ที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับประเภทของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในกระบวนการผลิต โดยการผลิตไบโอดีเซลจะมีกลีเซอรอล (Glycerol) เป็นผลพลอยได้ ซึ่งสามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรมยาและเครื่องสำอาง (บริษัท พาราไซแอนติฟิค จำกัด, 2547) ประโยชน์ของไบโอดีเซลนั้น นอกจากจะช่วยลดปริมาณการนำเข้าของน้ำมันดีเซลได้แล้ว ไบโอดีเซลยังมีประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย กล่าวคือ สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ และไม่เป็นพิษ (Ma and Hanna, 1999) โดยพบว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ไบโอดีเซลนั้นจะปล่อยควันพิษออกมาน้อยกว่าเมื่อใช้น้ำมันดีเซล และการใช้ไบโอ

ดีเซลยังลดการสึกหรอของเครื่องยนต์เนื่องจากไบโอดีเซลมีความสามารถในการหล่อลื่นเครื่องยนต์ (Faupel and Kurki, 2002)

สบู่ดำเป็นพืชน้ำมันทางเลือกที่เหมาะสมอีกชนิดหนึ่ง ที่ผู้เชี่ยวชาญด้านการเกษตรระบุว่า หากมีการพัฒนาสายพันธุ์และมีวิธีดูแลการเพาะปลูกที่เหมาะสมแล้วจะสามารถ ให้น้ำมันต่อไร่ได้ สูงถึงปีละ 300 ลิตร แต่ถ้าปลูกตามธรรมชาติจะได้ผลผลิตเพียง 100 ลิตรต่อไร่ต่อปีเท่านั้น ขณะที่ ผลผลิตปาล์มให้น้ำมันปีละประมาณ 600 ลิตร แต่ต้องใช้เวลาปลูก 3 - 4 ปี และข้อดีอีกประการหนึ่ง คือน้ำมันสบู่ดำไม่สามารถรับประทานได้ซึ่งแตกต่างจากพืชน้ำมันชนิดอื่น เป็นผลให้ราคาน้ำมัน สบู่ดำไม่ผันผวน (บริษัท บางจากปิโตรเลียม จำกัด, 2550)

เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation stability) ของไบโอดีเซล คือตัวบ่งบอกของ ความต้านทานในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในไบโอดีเซล เป็นตัวแสดงคุณภาพใน การเก็บ น้ำมันไบโอดีเซล นั่นคือ ไบโอดีเซลที่มีเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันสูง ก็จะสามารถเก็บรักษา ได้เป็นระยะเวลานานโดยคุณสมบัติทางกายภาพไม่เปลี่ยนแปลงมาก คุณสมบัติทางกายภาพที่วุ่น ได้แก่ ความหนืดทางจลน์ (Kinematic viscosity) ค่าความเป็นกรด ค่า Induction time นอกจากนี้ เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซล ยังเป็นตัวรับประกันคุณภาพในตลาดน้ำมันไบโ อีเซลด้วย โดย Xin *et al.* (2008) ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบ โอดีเซล พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซล ได้แก่กรดไขมันที่ ไม่อิ่มตัว อุณหภูมิ แสง อากาศ น้ำ และโลหะที่ประกอบอยู่ในน้ำมันไบโอดีเซล โดยสาเหตุหลัก ของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซลคือ ปริมาณกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวที่มีอยู่ใน โครงสร้างของไบโอดีเซล ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนในอากาศ โดยมีอุณหภูมิ แสง น้ำ และโลหะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซลจะเกิดสารประกอบเปอร์ ออกไซด์ (Peroxide) ซึ่งสารประกอบเปอร์ออกไซด์จะมีผลให้ค่าความเป็นกรดเพิ่มขึ้น ทำให้ไบโ อีเซลเสียสภาพไปจากเดิม โดยเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลส่วนใหญ่จะวัดอยู่ ในรูปของค่า Induction time ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงจำนวนชั่วโมงที่ไบโอดีเซลที่ยังคงมีเสถียรต่อการ เกิดออกซิเดชัน ในปัจจุบันวิธีที่เพิ่มเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลทำได้โดยการ เติมสารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) โดยชนิดและปริมาณของสารต้านอนุมูลอิสระต้องมีความ เหมาะสมเพื่อไปยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซล

จากที่กล่าวมาแล้วนั้นสบู่ดำจึงเป็นพืชน้ำมันที่น่าสนใจในการนำมาผลิตเป็นไบโอดีเซล แต่ ด้วยข้อเสียประการหนึ่งของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำคือ ไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำสามารถ

เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่าย เนื่องจากไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำประกอบด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัว โครงการวิจัยนี้จึงมุ่งประเด็นศึกษา การเพิ่มเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ (โดยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ซึ่งใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสในระดับปฏิบัติการ) โดยศึกษาชนิดและปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระที่เหมาะสม และศึกษาเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสารต้านอนุมูลอิสระซึ่งจัดเก็บเป็นระยะเวลานาน

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาหาชนิดและความเข้มข้นที่เหมาะสม ของสารต้านอนุมูลอิสระและสารเติมแต่งสำเร็จรูปเพื่อเพิ่มเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันสบู่ดำ
2. ศึกษาเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสารต้านอนุมูลอิสระเมื่อทำการจัดเก็บน้ำมันเป็นระยะเวลานานๆ

ขอบเขตของงานวิจัย

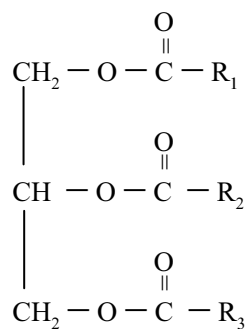
ไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันสบู่ดำ โดยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส คือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันสบู่ดำ ใช้เมทานอลในอัตราส่วน จำนวนโมลของเมทานอลต่อน้ำมันสบู่ดำเท่ากับ 7:1 ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ทำการกวนที่ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 1.5 ชั่วโมง ไบโอดีเซลที่ผลิตถูกเติมด้วยสารต้านอนุมูลอิสระหรือสารเติมแต่งสำเร็จรูปที่ใช้ในการศึกษา คือ BHA (Butylated hydroxyanisol) PG (Propyl gallate) TBHQ (Tert-butyl hydroquinone) ZEP NITROX และ L-power นอกจากนี้ยังศึกษาเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสารต้านอนุมูลอิสระหรือสารเติมแต่งหลังจากจัดเก็บไบโอดีเซลเป็นระยะเวลานาน รวมถึงตรวจสอบลักษณะสมบัติของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสารต้านอนุมูลอิสระหรือสารเติมแต่ง

การตรวจเอกสาร

ไขมัน และน้ำมัน

น้ำมันและไขมันเป็นสารประกอบชนิดเดียวกัน แต่มีคุณสมบัติทางกายภาพต่างกัน กล่าวคือ ในอุณหภูมิห้อง (25 ถึง 27 องศาเซลเซียส) ถ้าอยู่ในสภาพของเหลว เรียกว่า น้ำมัน แต่ถ้าอยู่ในสภาพของแข็ง เรียกว่า ไขมัน โดยน้ำมันแต่ละชนิดมีจุดหลอมเหลวคงที่ จึงได้นำมาใช้เป็นประโยชน์ในการจำแนกชนิดน้ำมันออกจากกัน กรดไขมันเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนพื้นฐานของไขมัน กรดไขมันแบ่งออกได้หลายชนิดตามจำนวน และโครงสร้างของโมเลกุลของธาตุองค์ประกอบทั้งสาม คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ดังนั้นคุณภาพและการใช้ประโยชน์ของน้ำมันพืชแต่ละชนิดจึงขึ้นอยู่กับสัดส่วน และชนิดของกรดไขมันที่ประกอบขึ้นมา กรดไขมันบางชนิดอาจใช้ทดแทนกันได้ หรือนำไปผ่านกรรมวิธีบางอย่างให้มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกันแต่น้ำมันพืชบางชนิดมีคุณสมบัติพิเศษซึ่งต้องนำไปใช้ประโยชน์เฉพาะอย่างเท่านั้น (กำธน, 2538)

กรดไขมันเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบพื้นฐานของไขมันทุกชนิด มีคาร์บอนตั้งแต่ 4 ถึง 36 ตัว ไม่แตกกิ่ง พันธะระหว่างคาร์บอนอาจเป็นพันธะเดี่ยวทั้งหมด ซึ่งเรียกว่ากรดไขมันอิ่มตัว หรือมีพันธะคู่ปนอยู่กับพันธะเดี่ยว ซึ่งเรียกว่ากรดไขมันไม่อิ่มตัว จำนวนของคาร์บอนในกรดไขมันส่วนใหญ่มักเป็นเลขคู่ จุดหลอมเหลวของกรดไขมันขึ้นกับจำนวนคาร์บอนและจำนวนพันธะคู่ เช่นที่อุณหภูมิห้อง กรดไขมันอิ่มตัวที่มีคาร์บอน 12 – 24 ตัวอยู่ในสภาพเป็นไข ในขณะที่กรดไขมันไม่อิ่มตัวที่มีคาร์บอนเท่ากันยังเป็นน้ำมันอยู่ เป็นต้น กรดไขมันสามโมเลกุลรวมตัวกับกลีเซอรอลจะได้ไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) (Agarwal, 2007) โดยโครงสร้างโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์แสดงดังภาพที่ 1 ตารางที่ 1 แสดงชื่อทั่วไป ชื่อทางวิทยาศาสตร์ จำนวนคาร์บอน จำนวนพันธะคู่ และแหล่งที่พบของกรดไขมันบางชนิด ตารางที่ 2 แสดงปริมาณกรดไขมันชนิดต่างๆ ที่ผลิตได้จากพืชแต่ละชนิด



ภาพที่ 1 โครงสร้างของไตรกลีเซอไรด์

ที่มา: Agarwal (2007)

ตารางที่ 1 ชื่อทั่วไป ชื่อทางวิทยาศาสตร์ จำนวนคาร์บอน จำนวนพันธะคู่ และแหล่งที่พบของกรดไขมันบางชนิด

ชื่อทั่วไป	จำนวนคาร์บอน	จำนวนพันธะคู่	ชื่อทางวิทยาศาสตร์	แหล่งที่พบ
Butyric acid	4	0	Butanoic acid	Butterfat
Caproic acid	6	0	Hexanoic acid	Butterfat
Caprylic acid	8	0	Octanoic acid	Coconut oil
Capric acid	10	0	Decanoic acid	Coconut oil
Lauric acid	12	0	Dodecanoic acid	Coconut oil
Myristic acid	14	0	Tetradecanoic acid	Palm kernel oil
Palmitic acid	16	0	Hexadecanoic acid	Palm oil
Palmitoleic acid	16	1	9-Hexadecenoic acid	Animal fats
Stearic acid	18	0	Octadecanoic acid	Animal fats
Oleic acid	18	1	9-Octadecenoic acid	Olive oil
Ricinoleic acid	18	1	12-Hydroxy-9-octadecenoic acid	Castor oil
Vaccenic acid	18	1	11-Octadecenoic acid	Butterfat

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ชื่อทั่วไป	จำนวน คาร์บอน	จำนวน พันธะคู่	ชื่อทางวิทยาศาสตร์	แหล่งที่พบ
Linoleic acid	18	2	9, 12-Octadecadienoic acid	Grape seed oil
Alpha-Linolenic acid (ALA)	18	3	9, 12, 15-Octadecatrienoic acid	Flaxseed (Linseed) oil
Gamma-linolenic acid (GLA)	18	3	6, 9, 12-Octadecatrienoic acid	Borage oil
Arachidic acid	20	0	Eicosanoic acid	Peanut oil, Fish oil
Gadoleic acid	20	1	9-Eicosenoic acid	Fish oil
Arachidonic acid (AA)	20	4	5, 8, 11, 14-Eicosatetraenoic acid	Liver fats
EPA	20	5	5, 8, 11, 14, 17-Eicosapentaenoic acid	Fish oil
Behenic acid	22	0	Docosanoic acid	Rapeseed oil
Erucic acid	22	1	13-Docosenoic acid	Rapeseed oil
DHA	22	6	4, 7, 10, 13, 16, 19- Docosahexaenoic acid	Fish oil
Lignoceric acid	24	0	Tetracosanoic acid	Small amounts in most fats

ที่มา: Zamora (2005 a)

ตารางที่ 2 ปริมาณกรดไขมันชนิดต่างๆที่ผลิตได้จากพืชและสัตว์แต่ละชนิด

Oil or Fat	Unsat. /Sat. ratio	Saturated					Unsaturated	
		Lauric acid	Myristic acid	Palmitic acid	Stearic acid	Oleic acid	Linoleic acid	Alpha Linolenic acid
		C12:0	C14:0	C16:0	C18:0	C18:1	C18:2	C18:3
Beef tallow	0.9	-	3	24	19	43	3	1
Butterfat (Cow)	0.5	3	11	27	12	29	2	1
Butterfat (Goat)	0.5	3	9	25	12	27	3	1
Canola oil	15.7	-	-	4	2	62	22	10
(Rapeseed oil)								
Coconut oil	0.1	47	18	9	3	6	2	-
Corn oil	6.7	-	-	11	2	28	58	1
Cottonseed oil	2.8	-	1	22	3	19	54	1
Grape seed oil	7.3	-	-	8	4	15	73	-
Jatropha oil ^a	3.4	-	-	14.2	6.9	43.1	34.4	-
Lard (Pork fat)	1.2	-	2	26	14	44	10	-
Olive oil	4.6	-	-	13	3	71	10	1
Palm oil	1.0	-	1	45	4	40	10	-
Palm olein	1.3	-	1	37	4	46	11	-
Palm kernel oil	0.2	48	16	8	3	15	2	-
Peanut oil	4.0	-	-	11	2	48	32	-
Safflower oil	10.1	-	-	7	2	13	78	-
Sesame oil	6.6	-	-	9	4	41	45	-
Soybean oil	5.7	-	-	11	4	24	54	7
Sunflower oil	7.3	-	-	7	5	19	68	1
Walnut oil	5.3	-	-	11	5	28	51	5

ที่มา: Zamora (2005 b)

^a Sarin *et al.* (2007)

สบู่ดำ

สบู่ดำเป็นพืชน้ำมันชนิดหนึ่ง น้ำมันที่ได้จากเมล็ดสบู่ดำ สามารถใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลที่เกษตรกรใช้อยู่ได้ โดยไม่ต้องใช้น้ำมันชนิดอื่นผสมอีก ใช้เป็นสมุนไพรรักษาโรค ใช้ปลูกเป็นแนวรั้ว เพื่อป้องกันสัตว์เลื้อยเข้าทำลายผลผลิตเนื่องจากมีสารพิษไฮโดรไซยานิก (Hydrocyanic) ด้วย เหตุผลดังกล่าวสบู่ดำจึงเป็นพืชที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่งในสถานะที่ราคาน้ำมันดีเซลมีราคาสูงในปัจจุบัน สบู่ดำมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Jatropha curcas* Linn. อยู่ในตระกูลไม้ยางพารา ซึ่งเป็นพืชพื้นเมืองของทวีปอเมริกาใต้ ชาวโปรตุเกสนำเข้ามาปลูกในประเทศไทย ในช่วงปลายสมัยกรุงศรีอยุธยา เพื่อนำมาบีบน้ำมันสำหรับทำสบู่ ปัจจุบันสบู่ดำมีปลูกอยู่ทั่วทุกภาคของประเทศไทย มีชื่อเรียกแตกต่างกันไป เช่น ภาคเหนือเรียกว่ามะหุ้งฮั่ว ภาคตะวันออกเฉียงเหนือเรียกว่ามะเขยหรือสีหลอด ภาคใต้เรียกว่ามาเคาะ (ศูนย์ส่งเสริมและพัฒนาอาชีพการเกษตร, 2548) ตารางที่ 3 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพ-เคมีของน้ำมันสบู่ดำ

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางกายภาพ-เคมีของน้ำมันสบู่ดำ

คุณสมบัติทางกายภาพ-เคมี	น้ำมันสบู่ดำ
Density (kg/m ³)	918
Viscosity (cSt)	49.9
Calorific value (kJ/kg)	39,774
Flash point (°C)	240
Moisture content ^a (%)	0.2
Kinematic viscosity ^a (mm ² /sec)	41.51
Specific gravity ^a	0.878

ที่มา: Chhetri *et al.* (2008)

^a Kywe and Oo (2009)

1. ประโยชน์ของสบู่ดำ

เป็นที่ทราบกันดีว่าสบู่ดำมีทั้งคุณประโยชน์และโทษ โดยเกือบทุกส่วนของต้นสบู่ดำสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ ซึ่งได้แก่ (ศูนย์ส่งเสริมและพัฒนาอาชีพการเกษตร, 2548)

1.1 ยางจากก้านใบ ใช้ปายรักษาโรคปากนกกระจอก ห้ามเลือด แก้ปวดฟัน แก้ลิ้นเป็นฝ้าขาว โดยผสมกับน้ำมันมะรดาปายลิ้น

1.2 ลำต้น (ภาพที่ 2) ตัดเป็นท่อนต้มน้ำให้เด็กกินแก้ซางตาขโมย ตัดเป็นท่อนแช่น้ำอาบแก้โรคพุพอง ใช้เป็นแนวรั้วป้องกันสัตว์เลื้อย เช่น โคน กระบือ ม้า แพะ เข้าทำลายผลผลิต

1.3 เมล็ด (ภาพที่ 3) ใช้หีบเป็นน้ำมัน ใช้บำรุงรากผม ใช้เป็นปุ๋ยอินทรีย์ โดยใช้กากที่เหลือจากการหีบน้ำมัน ซึ่งมีธาตุอาหารหลัก มากกว่าปุ๋ยหมักและมูลสัตว์หลายชนิด ยกเว้นมูลไก่ที่มีฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมมากกว่า และยังมีสารพิกเคอซิน (Curcin) มีฤทธิ์เหมือนสลด เมื่อกินเข้าไปแล้วจะทำให้ท้องเดิน



ภาพที่ 2 ต้นสบู่ดำ

ที่มา: Phillip (2006)



ภาพที่ 3 เมล็ดสบู่ดำ

ที่มา: สุรพล (2549)

2. การสกัดน้ำมันสบู่ดำ

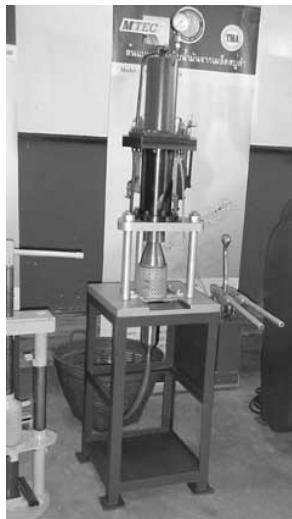
การสกัดน้ำมันสบู่ดำมีหลักการใหญ่ๆ รวม 3 หลักการดังนี้ (สำนักงานอุตสาหกรรมจังหวัดหนองบัวลำภู, 2549)

2.1 การสกัดในห้องปฏิบัติการโดยใช้วิธีบดให้ละเอียด แล้วสกัดด้วยตัวทำละลายปิโตรเลียมอีเทอร์ จะได้น้ำมัน 34.96 เปอร์เซ็นต์ จากเมล็ดรวมเปลือก และ 54.68 เปอร์เซ็นต์ จากเนื้อเมล็ด สำหรับวิธีการนี้เป็นการสกัดที่ได้ผลผลิตในรูปน้ำมันไบโอดีเซลสูงกว่าการสกัดด้วยกระบวนการอื่นทั้งหมด

2.2 การสกัดด้วยระบบไฮดรอลิก (ภาพที่ 4) จะได้น้ำมันประมาณ 25 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ มีน้ำมันตกค้างในกาก 10 ถึง 15 เปอร์เซ็นต์ การสกัดน้ำมันด้วยวิธีนี้ จะต้องนำเมล็ดมาทุบพอแตก แล้วนำไปเพิ่มความร้อน โดยการนำไปตากแดด หรือนึ่ง หรือนำเข้าตู้อบ ก่อนนำเข้าเครื่องสกัด เพื่อให้การสกัดน้ำมันกระทำได้ง่ายขึ้น น้ำมันที่ได้จากการสกัดจะต้องนำไปกรองสิ่งสกปรกออก หรือทิ้งให้ตกตะกอน ก่อนนำไปใช้งาน

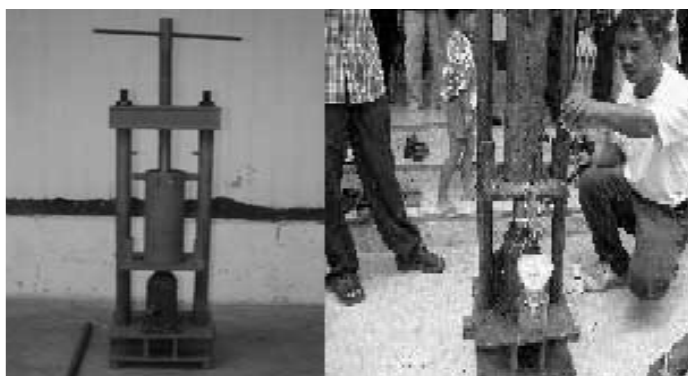
2.3 การสกัดด้วยระบบอัดเกลียว จะได้น้ำมันประมาณ 25 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ มีน้ำมันตกค้างในกาก 10 ถึง 15 เปอร์เซ็นต์ รายละเอียดของเครื่องหีบน้ำมันสบู่ดำ ด้วยแรงงานคนดังแสดง

ในภาพที่ 5 ซึ่งการสกัดด้วยวิธีนี้จะใช้เมล็ดของพืชสับดำส่งเข้าสู่กระบวนการหีบด้วยสกรูเกลียวอัด



ภาพที่ 4 เครื่องหีบน้ำมันสับดำด้วยระบบไฮดรอลิก

ที่มา: สมาคมเครื่องจักรกลไทย (2549)



ภาพที่ 5 เครื่องสกัดน้ำมันสับดำ โดยใช้แรงงานจากคน

ที่มา: สุรพล (2549)

ไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงเหลวที่ผลิตได้จาก น้ำมันพืชและไขมันสัตว์ เช่น ปาล์ม มะพร้าว ถั่วเหลือง ทานตะวัน เมล็ดเรพ สบู่ดำ หรือ น้ำมันพืช น้ำมันสัตว์ ที่ผ่านการใช้งานแล้ว นำมาทำปฏิกิริยาทางเคมีทรานเอสเทอร์ฟิเคชันร่วมกับเมทานอล หรือ เอทานอลจนเกิดเป็นสารเอสเทอร์ที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล เรียกว่า ไบโอดีเซล (B100) ซึ่งเมื่อนำมาผสมกับน้ำมันดีเซลเกรดที่ใช้กันในปัจจุบันในสัดส่วนร้อยละ 5-10 (B5-B10) จะสามารถนำมาใช้งานในเครื่องยนต์ดีเซลได้เป็นอย่างดี โดยไม่ต้องดัดแปลงเครื่องยนต์ นอกจากนี้ยังได้กลีเซอรอลและกรดไขมันเป็นผลพลอยได้ (บริษัท บางจากปิโตรเลียม จำกัด, 2550 ก)

ประโยชน์ของไบโอดีเซลคือ ลดการนำเข้าน้ำมันดีเซลจากต่างประเทศ จำนวนการปล่อยควันพิษของเครื่องยนต์น้อยกว่าเมื่อเทียบกับใช้น้ำมันดีเซล ช่วยลดการสึกหรอของเครื่องยนต์ เนื่องจากไบโอดีเซลมีคุณสมบัติพิเศษในการหล่อลื่นเครื่องยนต์ เพิ่มความปลอดภัยในด้านการขนส่งการจัดเก็บเนื่องจากไบโอดีเซลนั้นเป็นสารไม่มีพิษ อีกทั้งยังสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ และยังเป็นการเพิ่มรายได้ให้แก่เกษตรกรอีกด้วย และไม่ใช่ว่าไบโอดีเซลจะมีแต่ข้อดีไปทั้งหมด ไบโอดีเซลก็มีข้อเสียในหลายด้านเช่นกัน ได้แก่ การใช้ไบโอดีเซลในเครื่องยนต์เก่าบางประเภทอาจต้องเปลี่ยนท่อหรือปะเก็นเครื่องยนต์ ที่จากเดิมใช้ท่อหรือปะเก็นที่ทำจากยาง เป็นสารสังเคราะห์แทน เนื่องจากไบโอดีเซลสามารถทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพได้ (Faupel and Kurki, 2002)

1. คุณสมบัติของไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลเป็นผลผลิตที่ได้จากน้ำมันพืชที่ผ่านกระบวนการทางเคมี ให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล อย่างไรก็ตาม เนื่องจากน้ำมันดีเซลและไบโอดีเซล มีองค์ประกอบและมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน ทำให้ไบโอดีเซลยังคงมีคุณสมบัติที่แตกต่างจากน้ำมันดีเซล ซึ่งบางคุณสมบัติเป็นข้อได้เปรียบ และบางคุณสมบัติเป็นข้อเสียเปรียบเมื่อนำไบโอดีเซลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล เช่น ไบโอดีเซลมีจุดวาบไฟ (Flash point) สูงกว่าน้ำมันดีเซล ทำให้มีความปลอดภัยในการขนส่งมากกว่า เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วสามารถเปรียบเทียบคุณสมบัติของไบโอดีเซลกับน้ำมันดีเซลได้ดังนี้ (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2550)

1.1 ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงสะอาด ไม่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ ทำให้ไอเสียที่ปล่อยออกจากเครื่องยนต์ไม่ก่อให้เกิดภาวะฝนกรด เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ เมื่อถูกเผาไหม้แล้ว กำมะถันในน้ำมันดีเซล จะเปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) หรือกรดกำมะถันตามลำดับ เกิดเป็นมลพิษทางอากาศ เมื่อฝนตกจะชะล้างมลพิษเหล่านี้เกิดเป็นฝนกรดได้

1.2 น้ำมันดีเซลไม่มีออกซิเจนอยู่ในโครงสร้างโมเลกุล และมีองค์ประกอบของสารประกอบอะโรมาติก (Aromatic compound) ถึงร้อยละ 20 ถึง 40 ขณะที่ไบโอดีเซลไม่มีสารประกอบประเภทสารประกอบอะโรมาติก แต่มีออกซิเจนอยู่ในโครงสร้างโมเลกุลถึงร้อยละ 10 ถึง 12 ทำให้เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิง ไอเสียที่เกิดขึ้นมีปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก และมีควันดำต่ำกว่าการใช้้ำมันดีเซล

1.3 ไบโอดีเซลมีจุดวาบไฟสูงกว่าน้ำมันดีเซล จึงมีค่าการจุดระเบิดในเครื่องยนต์ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล

1.4 น้ำมันดีเซลไม่มีพันธะคู่ในโครงสร้างโมเลกุล ขณะที่ไบโอดีเซลมีพันธะคู่ในน้ำมันพืช ซึ่งมีปริมาณที่แตกต่างกันตามชนิดของน้ำมันพืช ทำให้ไบโอดีเซลไม่เสถียรตัว เกิดออกซิเดชันได้เร็วกว่าน้ำมันดีเซล และมีระยะเวลาเก็บรักษาหลังการผลิตสั้นกว่าน้ำมันดีเซล

1.5 ไบโอดีเซลมีคุณสมบัติในการหล่อลื่นเครื่องยนต์ดีกว่าน้ำมันดีเซล ทำให้ช่วยลดการสึกหรอของเครื่องยนต์ได้ดี ไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันพืชต่างชนิดกัน จะมีคุณสมบัติแตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากน้ำมันพืชเป็นสารประกอบไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ที่มีกรดไขมันอยู่ในโครงสร้างของไตรกลีเซอไรด์ถึงร้อยละ 94 ถึง 96 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักโมเลกุล ทำให้คุณสมบัติของน้ำมัน มีคุณสมบัติทั้งทางเคมีและกายภาพเป็นไปตามกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบอยู่ ดังนั้นเมื่อนำน้ำมันพืชชนิดนั้นๆ มาเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล ไบโอดีเซลที่ผลิตได้จะมีคุณสมบัติตามกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบนั้นๆ ด้วย

2. กระบวนการผลิตไบโอดีเซล

เนื่องจากน้ำมันพืชนั้นไม่เหมาะสมสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล ดังนั้นจึงต้องทำการปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆ ให้ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล โดยการปรับปรุงนี้คือการลดความหนืดเพื่อ

ปรับปรุงคุณสมบัติการไหล และคุณสมบัติการเผาไหม้อื่นๆ โดยกระบวนการในการปรับปรุงน้ำมันพืชนั้นมีหลายกระบวนการด้วยกัน ที่นิยมมี 4 กระบวนการด้วยกัน คือ การใช้โดยตรงและการนำมาผสม (Direct use and Blending) ไมโครอิมัลชัน (Microemulsions) การแตกสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis หรือ Thermal Cracking) และปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification หรือ Alcoholysis) (Agarwal, 2007)

2.1 การใช้โดยตรงและการผสม

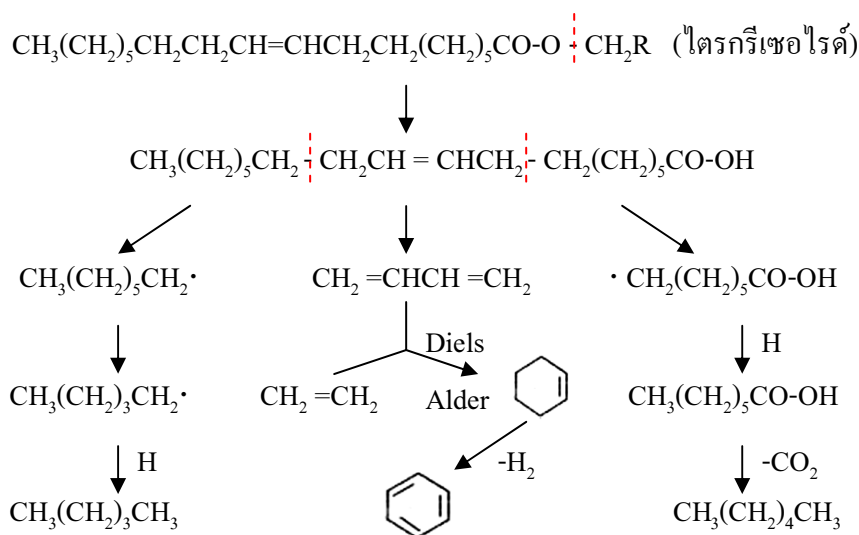
การใช้โดยตรงหรือการนำน้ำมันใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลโดยตรง ส่วนการผสมนั้นคือการนำน้ำมันพืชผสมกับน้ำมันดีเซลในอัตราส่วนต่างๆ เพื่อนำไปใช้ในเครื่องยนต์ดีเซล ในปี 1980 บริษัท Caterpillar (Brazil) ได้ผสมน้ำมันพืช 100 เปอร์เซ็นต์ กับเครื่องยนต์ดีเซลพบว่า การใช้โดยตรงไม่เหมาะสมกับเครื่องยนต์แต่ในขณะเดียวกัน ถ้าผสมน้ำมันพืช 20 เปอร์เซ็นต์ กับ น้ำมันดีเซล 80 เปอร์เซ็นต์ พบว่าไม่ก่อให้เกิดปัญหาแก่เครื่องยนต์ (Agarwal, 2007) นอกจากนี้ Pramanik (2003) พบว่าการผสมน้ำมันสบู่ดำกับน้ำมันดีเซลในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์ สามารถใช้ในเครื่องยนต์โดยไม่ก่อให้เกิดปัญหาแต่อย่างใดกับเครื่องยนต์ แต่อย่างไรก็ยังคงต้องทำการศึกษาผลระยะยาว ของการใช้โดยตรง และการผสมอีกด้วย ซึ่งปัญหาของการนำน้ำมันพืชไปใช้โดยตรงหรือการนำไปผสมกับน้ำมันดีเซล ยังมีปัญหาที่ต้องพิจารณาหลายประการได้แก่ น้ำมันพืชมีความหนืดที่สูง สัดส่วนกรดไขมันอิสระที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันพืช การเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจน การเกิดโพลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ในระหว่างการเก็บรักษาค่าซีเทน (Cetane number) ที่ต่ำ การแข็งตัวเมื่อใช้ในอากาศเย็น การอุดตันของเครื่องยนต์เมื่อใช้เป็นระยะเวลานาน เป็นต้น

2.2 ไมโครอิมัลชัน

วิธีนี้ใช้เพื่อปรับปรุงปัญหาความหนืดที่สูงของน้ำมัน โดยการใช้ตัวทำละลาย เช่น เมทานอล เอทานอล 1-บิวทานอล (1-Butanol) โดยไมโครอิมัลชัน คือ คอลลอยด์ที่กระจายตัวอย่างสมดุล ในโครงสร้างของไหลขนาดเล็ก ซึ่งมีขนาดอยู่ในช่วงระหว่าง 1 ถึง 150 นาโนเมตร ซึ่งเกิดจากของเหลวที่ไม่ละลายซึ่งกันและกัน โดยข้อจำกัดของวิธีนี้ เลขซีเทนต่ำและค่าความร้อนต่ำ (Srivastava and Prasad, 2000)

2.3 การแตกสลายด้วยความร้อน

การแตกสลายด้วยความร้อนเป็นกระบวนการเปลี่ยนสารประกอบหนึ่งไปเป็นสารประกอบอื่น โดยใช้ความร้อน หรือการใช้ความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา สารที่จะนำมาแตกสลายด้วยความร้อนนั้น ได้แก่ น้ำมันพืช ไขมันสัตว์ กรดไขมันอิสระตามธรรมชาติ เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน กระบวนการแตกสลายด้วยความร้อนนั้นได้มีการศึกษาและพัฒนาเป็นเวลามากกว่า 100 ปี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ ที่ขาดแคลนน้ำมันปิโตรเลียม นักวิจัยหลายท่านได้ศึกษาการแตกสลายด้วยความร้อนของไตรกลีเซอไรด์ เพื่อผลิตสารประกอบจำพวก แอลเคน (Alkane) เอนคีน (Alkene) อะโรมาติก (Aromatic) และกรดอินทรีย์ (Carboxylic acid) (Pramanik, 2003) ตัวอย่างการแตกสลายด้วยความร้อนของโมเลกุลไตรกรีเซอไรด์แสดงดังภาพ 6



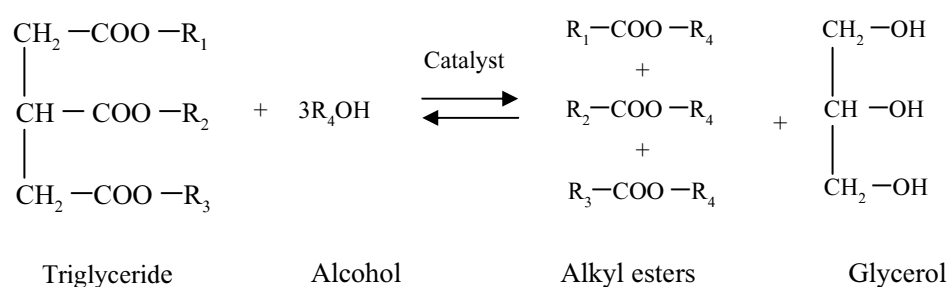
ภาพที่ 6 กลไกการแตกสลายด้วยความร้อนของไตรกรีเซอไรด์

ที่มา: Srivasyava and Prasad (2000)

2.4 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (ภาพที่ 7) เป็นกระบวนการทางเคมีที่ทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์เกิดสารประกอบเอสเทอร์ โดยกระบวนการนี้อาจใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรด ตัวเร่งปฏิกิริยาเบส และเอนไซม์ โดยกระบวนการนี้จะเป็นการเปลี่ยนน้ำมันซึ่งก็คือไตรกลีเซอไรด์ซึ่งทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์แล้วได้เอสเทอร์ นั่นก็คือไบโอดีเซล การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจุดประสงค์เพื่อ

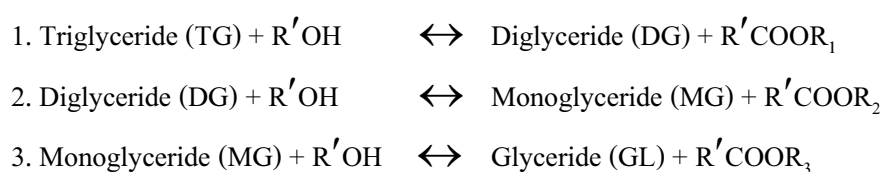
เพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาให้เร็วขึ้น และเนื่องจากปฏิกิริยาการเกิดไบโอดีเซลเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้แอลกอฮอล์จำนวนมากเกินตามความต้องการจริง (Excess alcohol) โดยแอลกอฮอล์ที่ใช้ในกระบวนการนี้ อาจใช้ เมทานอล เอทานอล โพรพานอล (Propanol) บิวทานอล ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาได้แก่ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา อัตราส่วนแอลกอฮอล์กับน้ำมันพืช ตัวเร่งที่ใช้ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา อัตราส่วนและชนิดของกรดไขมันในน้ำมัน (Agarwal, 2007)



ภาพที่ 7 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์

ที่มา: Agarwal (2007)

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน เป็นปฏิกิริยาที่สามารถผันกลับได้ โดยไตรกลีเซอไรด์ สามารถเปลี่ยนเป็นไดกลีเซอรอล (Diglyceride) และ กลีเซอรอล (Freedman *et al.*, 1986) ตามขั้นตอน 3 ขั้นตอนดังภาพที่ 8

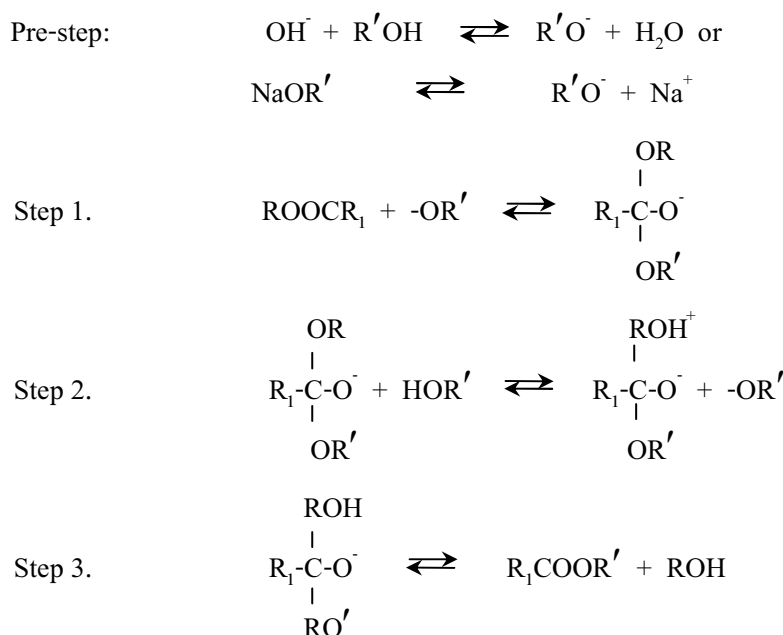


ภาพที่ 8 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันพืชกับแอลกอฮอล์ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์เป็นเอสเทอร์และกลีเซอรอล

ที่มา: Freedman *et al.* (1986)

ตัวเร่งปฏิกิริยาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่นิยมกันทั่วไปคือ การใช้กรด และการใช้เบส โดยเมื่อเปรียบเทียบการใช้เบสเป็นตัวเร่งกับการใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า การใช้เบสจะใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยกว่า และกีดกร่อนอุปกรณ์น้อยกว่า เมื่อเทียบกับการใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นในทางอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จึงนิยมใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Ma and Hanna, 1999) อย่างไรก็ตามถ้าน้ำมันตั้งต้นมีจำนวนกรดไขมันอิสระที่มาก หรือมีองค์ประกอบของน้ำในน้ำมันตั้งต้นมาก พบว่าการใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะเหมาะสมกว่า เนื่องจากจำนวนน้ำและจำนวนกรดไขมันอิสระที่มีอยู่มากในน้ำมัน สามารถทำปฏิกิริยากับตัวเร่งเบส เกิดเป็นสบู่ได้ (Freedman *et al.*, 1984) การใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ในการผลิตไบโอดีเซล ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากมีราคาถูก ในขณะที่การใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ในการผลิตไบโอดีเซล ได้แก่ กรดซัลฟูริก กรดไฮโดรคลอริก (HCl) กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) (Ma and Hanna, 1999) กลไกการเกิดปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันพืชหรือไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์ โดยตัวเร่งเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้นอธิบายในภาพที่ 9

9



ภาพที่ 9 กลไกของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเบส

โดยไดกลีเซอไรด์ (R-OH), หมู่แอลคิลโซ่ยาว (R_1) และหมู่แอลคิลโซ่สั้น (R')

ที่มา: Ma and Hanna (1999)

3. คุณภาพของไบโอดีเซลที่มีผลต่อเครื่องยนต์

ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของไบโอดีเซลต่อเครื่องยนต์มีดังคือ ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จุดวาบไฟ กำมะถันไบโอดีเซล กากถ่าน แก๊สซัลเฟต น้ำ สิ่งปนเปื้อน การกัดกร่อนแผ่นทองแดง ค่าของกรด กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์ (Linolenic acid methyl ester) เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ค่าไอโอดีน เมทานอล โมโนกลีเซอไรด์ (Monoglyceride) ไดกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์ กลีเซอรินอิสระ กลีเซอรินทั้งหมด โลหะ และฟอสฟอรัส โดยรายละเอียดมีดังนี้ (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2550)

3.1 ปริมาณเมทิลเอสเทอร์แสดงถึงความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซล และการเกิดปฏิกิริยาการผลิตไบโอดีเซลที่สมบูรณ์ มาตรฐานกำหนดให้มีปริมาณมากกว่าร้อยละ 96.5 โดยน้ำหนัก เมื่อปริมาณเอสเทอร์น้อยกว่าที่กำหนด ชีบokingยังมีโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ หรือไตรกลีเซอไรด์อยู่ในไบโอดีเซลในปริมาณสูงกว่าที่กำหนด ส่งผลให้ความหนืดของไบโอดีเซลมีค่าสูง และเกี่ยวเนื่องกับการอุดตันในหัวฉีด หรือกระบอกสูบของเครื่องยนต์

3.2 ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส เป็นตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบระบบหัวฉีดจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล ค่าความหนาแน่นเป็นตัวบ่งบอกถึงปริมาณของพลังงานเชื้อเพลิง เมื่อค่าความหนาแน่นมีค่ามากก็จะให้พลังงานความร้อนมากขึ้นตามไปด้วยเมื่อเทียบกับปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงในปริมาณเดียวกัน ความหนาแน่นของไบโอดีเซลจากวัตถุดิบน้ำมันพืชแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกัน นอกจากนี้ปริมาณเมทานอลที่ตกค้างในไบโอดีเซลยังเป็นสาเหตุให้ความหนาแน่นมีค่าต่ำอีกด้วย

3.3 ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เกี่ยวข้องกับการไหล การฉีดเป็นฝอยของหัวฉีดในห้องเผาไหม้ การฉีดเป็นฝอยขนาดเล็กจะทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ ความหนืดของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันพืชที่เป็นวัตถุดิบความหนืดยังเป็นดัชนีแสดงการเสื่อมสภาพของไบโอดีเซลเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันอีกทางหนึ่ง

3.4 จุดวาบไฟเป็นค่าอุณหภูมิต่ำสุดเมื่อเปลวไฟผ่านเหนือไอของน้ำมัน แล้วทำให้น้ำมันติดไฟมาตรฐานกำหนดให้มีค่าจุดวาบไฟมากกว่า 120 องศาเซลเซียส ปริมาณเมทานอลที่

หลงเหลือในไบโอดีเซลทำให้จุดวาบไฟมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานได้ จุดวาบไฟมีผลต่อการขนส่ง เคลื่อนย้าย และการจัดเก็บ ปริมาณเมทานอลที่ยังคงเหลืออยู่ในไบโอดีเซลในปริมาณมากกว่า 0.2 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้จุดวาบไฟมีค่าต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส

3.5 ปริมาณกำมะถันในไบโอดีเซล มีปริมาณต่ำ เนื่องจากน้ำมันพืชดิบที่ใช้ในการผลิต มักมีองค์ประกอบของกำมะถันต่ำกว่า 15 พีพีเอ็ม องค์ประกอบกำมะถันในน้ำมันเมื่อถูกเผาไหม้ จะเปลี่ยนเป็นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งถูกปล่อยออกมาพร้อมไอเสียจากเครื่องยนต์ และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

3.6 กากถ่าน (ร้อยละ 10 ของกากที่เหลือจากการกลั่น) โดยปริมาณกากถ่านมีความสัมพันธ์กับปริมาณกลีเซอรอล กรดไขมันอิสระ สบู่ ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ยังหลงเหลืออยู่ในไบโอดีเซล หากมีปริมาณกากถ่านสูงกว่าข้อกำหนด บ่งบอกถึงยังคงมีสารต่างๆ ที่กล่าวข้างต้นหลงเหลืออยู่ในไบโอดีเซล นอกจากนี้ยังแสดงถึงแนวโน้มของปริมาณกากถ่านที่เหลืออยู่หลังจากการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ กากถ่านมีผลต่อการอุดตันในหัวฉีดหรือที่ลูกสูบ ทำให้กำลังของเครื่องยนต์ลดลง เครื่องยนต์สกปรกและต้องเปลี่ยนถ่ายน้ำมันเครื่องบ่อยครั้ง

3.7 แก๊สซัลเฟตเกิดจากการเผาไหม้ของสารปนเปื้อนในไบโอดีเซล เนื่องมาจากการตกค้างของสบู่ และตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณแก๊สซัลเฟตมีผลต่อการอุดตันในเครื่องยนต์

3.8 ปริมาณน้ำในน้ำมันทำให้การเผาไหม้ไม่ดี นอกจากนี้ในไบโอดีเซลยังเป็นที่สาเหตุให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ระหว่างน้ำกับเอสเทอร์ เกิดเป็นกรดไขมันอิสระ ซึ่งส่งผลต่อการกัดกร่อนในเครื่องยนต์ และเป็นตัวเร่งให้เกิดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในถังเก็บน้ำมัน ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้หัวฉีดอุดตัน

3.9 สิ่งปนเปื้อนทั้งหมดในน้ำมันไบโอดีเซลส่วนใหญ่เป็นผลมาจากกระบวนการทรานเอสเทอริฟิเคชัน และปฏิกิริยาข้างเคียง เช่นปฏิกิริยาการเกิดสบู่ของกรดไขมันอิสระและตัวเร่งปฏิกิริยาเบส โดยทั่วไปสิ่งปนเปื้อนทั้งหมดจะถูกกำจัดออกจากไบโอดีเซลในขั้นตอนการล้างน้ำ สิ่งปนเปื้อนในไบโอดีเซลมีผลเสียต่อเครื่องยนต์หลายด้าน เช่น คุณสมบัติด้านเสถียรของไบโอดีเซลระหว่างการเก็บรักษา

3.10 การกักกร่อนแผ่นทองแดง เป็นคุณสมบัติที่แสดงการกักกร่อนของน้ำมันต่อโลหะที่ใช้เป็นชิ้นส่วนในเครื่องยนต์ดีเซลเนื่องจากปริมาณกรดเช่น กรดไขมันอิสระ และสารประกอบซัลเฟอร์ในน้ำมัน ซึ่งค่าการกักกร่อนนี้มีผลต่อการทำงานของเครื่องยนต์

3.11 ค่าของกรดแสดงความเป็นกรดในน้ำมันไบโอดีเซล เป็นผลมาจากปริมาณกรดไขมันอิสระในวัตถุดิบน้ำมันพืชและปริมาณกรดที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งมีผลต่อการกักกร่อนในเครื่องยนต์ ทำให้อายุการใช้งานของปั๊ม และไส้กรองน้ำมันลดลง นอกจากนี้ยังแสดงถึงการเสื่อมสภาพของน้ำมัน เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลติก (Hydrolytic reaction) จากปริมาณน้ำที่ปนอยู่ในน้ำมันและผลของสภาวะในการจัดเก็บ

3.12 กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์แสดงถึงพันธะคู่หรือความไม่อิ่มตัวของไบโอดีเซล ซึ่งมีแนวโน้มทำให้เกิดพอลิเมอร์ในเครื่องยนต์ ทำให้เกิดการอุดตัน และการเสื่อมสภาพของน้ำมันเครื่อง ปริมาณกรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์ ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันพืชที่เลือกมาใช้เป็นวัตถุดิบ

3.13 เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติจากปฏิกิริยาออกซิเดชันเนื่องจากการเกิดสารประเภทเปอร์ออกไซด์ ขึ้นระหว่างพันธะคู่ของกรดไขมันไม่อิ่มตัว ที่อยู่ในโครงสร้างของไบโอดีเซล ปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดเมื่อน้ำมันสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ โดยที่ความร้อนและแสงแดดมีผลช่วยเร่งปฏิกิริยา ในขณะที่โลหะเช่นทองแดง และตะกั่ว ก็เป็นตัวเร่งให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วขึ้น ผลของปฏิกิริยาทำให้เกิดสารพอลิเมอร์ (Oxidation polymerization) และเกิดของแข็งที่ไม่ละลายในไบโอดีเซลเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน นอกจากจะขึ้นกับประเภทและคุณสมบัติของน้ำมันพืชที่เป็นวัตถุดิบแล้วยังขึ้นกับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลอีกด้วย โดยกระบวนการผลิตที่มีการให้ความร้อนสูงแก่ไบโอดีเซลเป็นระยะเวลานาน อาจส่งผลให้เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดให้มีค่าสูงกว่า 10 ชั่วโมง ที่ 110 องศาเซลเซียส

3.14 ค่าไอโอดีนแสดงพันธะคู่ในน้ำมัน ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของน้ำมันพืชที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล ค่าไอโอดีนต่ำแสดงถึงการมีสัดส่วนกรดไขมันอิ่มตัวในโครงสร้างไบโอดีเซลสูง ทำให้ไม่มีแนวโน้มในการเกิดออกซิเดชัน นอกจากนี้ค่าไอโอดีนยังมีความสัมพันธ์กับจุดขุ่น (Cloud point) ซึ่งแสดงถึงอุณหภูมิที่น้ำมันเริ่มเกิดไข หรือจับตัวเป็นก้อนแข็ง ไบโอดีเซลที่มีค่าไอโอดีนต่ำจะมีจุดขุ่นสูง ซึ่งมีผลต่อการใช้งานสภาพอากาศเย็น ไบโอดีเซล

จากน้ำมันปาล์มดิบมีค่าไอโอดีน 50 ถึง 55 ประกาศกรมธุรกิจพลังงานกำหนดให้ ค่าไอโอดีนไม่สูงกว่า 120 กรัมไอโอดีน/100 กรัม

3.15 เมทานอลเป็นสารตั้งต้นที่เหลือจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งจำเป็นต้องกำจัดออกให้หมดก่อนนำไปโอดีเซลออกจำหน่าย จึงต้องมีปริมาณต่ำในผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซล จุลวามไฟฟ้าของไบโอดีเซลคือ 130 องศาเซลเซียส เมทานอลมีค่าจุลวามไฟฟ้าต่ำ ถ้ายังมีเมทานอลปะปนอยู่ในไบโอดีเซล จะทำให้ไบโอดีเซลมีจุลวามไฟฟ้าต่ำลงด้วย ซึ่งมีผลต่อความปลอดภัยในการเก็บรักษา การขนส่งและการนำมาใช้ในเครื่องยนต์ เมทานอลมีค่าความเข้มข้นมากกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ จะมีผลกระทบต่อค่าซีเทน และความหล่อลื่นของน้ำมัน

3.16 ปริมาณโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ แสดงถึงคุณสมบัติของปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซล โดยปริมาณโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ที่เหลือจากการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันที่ไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้เกิดการอุดตันบริเวณหัวฉีด กระบอกสูบ และวาล์วภายในเครื่องยนต์

3.17 ปริมาณกลีเซอรินอิสระที่ยังเหลืออยู่ในไบโอดีเซล เนื่องมาจากการแยกกลีเซอรินไม่สมบูรณ์ ทำให้มีปัญหาการแยกชั้นของกลีเซอรินในการจัดเก็บไบโอดีเซล รวมถึงการสะสมที่บริเวณด้านล่างของถังน้ำมัน กลีเซอรินมีผลต่อการอุดตันที่หัวฉีดและระบบลำเลียงน้ำมัน

3.18 กลีเซอรินทั้งหมดคือปริมาณของกลีเซอรินอิสระ และปริมาณกลีเซอรินในโมเลกุลโมโนกลีเซอไรด์ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ ที่เจือปนในองค์ประกอบไบโอดีเซล ซึ่งเป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันไม่สมบูรณ์ มีผลก่อให้เกิดการอุดตันที่บริเวณหัวฉีดและไส้กรอง และปัญหาการใช้งานในสภาพอากาศอากาศเย็น

3.19 โลหะกลุ่ม 1 (โซเดียมและโพแทสเซียม) และโลหะกลุ่ม 2 (แคลเซียมและแมกนีเซียม) เป็นการวัดปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเบส สบู่ และโลหะหนักจากน้ำที่ใช้ในขั้นตอนการล้างไบโอดีเซลที่หลงเหลือในผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซล แคลเซียมยังมีคุณสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีสำหรับกระบวนการพอลิเมอไรซ์ของเอสเทอร์อีกด้วย ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซล ตามประกาศกรมธุรกิจพลังงานกำหนดให้ ปริมาณโลหะกลุ่ม 1 และโลหะกลุ่ม 2 ไม่สูงกว่าอย่างละ 5.0 มิลลิกรัม/กิโลกรัม

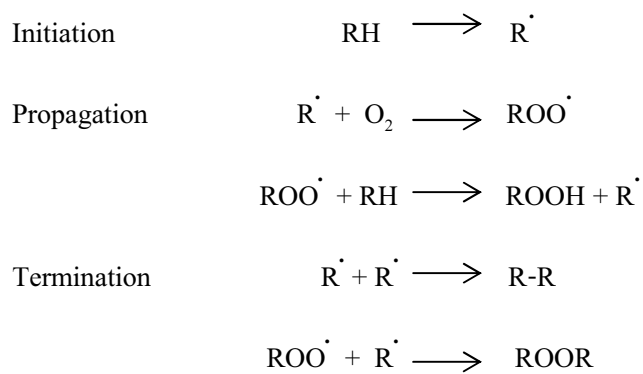
3.20 ฟอสฟอรัสเป็นสารที่ปนเปื้อนอยู่ในวัตถุดิบน้ำมันพืชตั้งแต่เริ่มต้น หากไม่ทำการกำจัดออกจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล จะทำให้ไบโอดีเซลที่ผลิตได้มีฟอสฟอรัสปะปนอยู่ด้วย ซึ่งจะทำให้ความเสียหายให้กับอุปกรณ์คะตะไลติกส์คอนเวอร์เตอร์ (Catalytic converter) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมการแพร่มลพิษจากการที่มาตรฐานของการแพร่มลพิษเป็นกฎข้อบังคับมากขึ้น อุปกรณ์คะตะไลติกส์ คอนเวอร์เตอร์จึงเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญที่ใช้ในเครื่องยนต์ดีเซล

ปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซล

ปัจจัยสำคัญของเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซลนั้นคือ การสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ โดยขึ้นอยู่กับปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวในไบโอดีเซล ซึ่งกระบวนการการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดไขมัน เป็นกลไกที่หลากหลายและซับซ้อน นอกเหนือจากการสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศแล้ว ปัจจัยอื่นที่มีผลต่อเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซล ได้แก่ อิทธิพลของแสง การเก็บในสภาวะอุณหภูมิสูง โลหะที่เจือปนในไบโอดีเซล วัสดุที่ใช้บรรจุไบโอดีเซล และสารต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งการปรับปรุงเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซลทำได้โดยการเติมสารต้านอนุมูลอิสระที่เหมาะสมลงในไบโอดีเซล (Knothe, 2007)

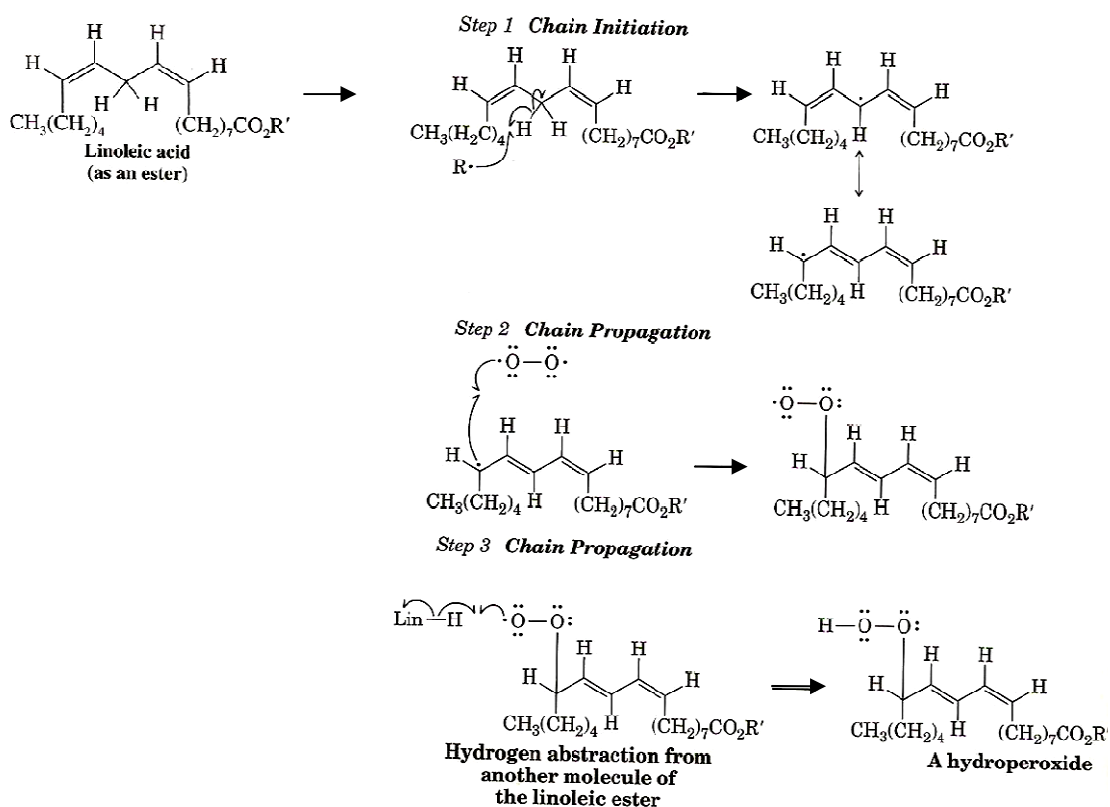
ปฏิกิริยาออกซิเดชันแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนด้วยกัน คือ Initiation, Propagation และ Termination (แสดงในภาพที่ 10) ขั้นตอน Initiation จะเกิดขึ้นเมื่อไบโอดีเซลที่ประกอบด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัวซึ่งมีความเสถียรต่ำ สัมผัสกับอากาศหรือออกซิเจน โดยมีปัจจัยอื่นเป็นตัวเร่ง เช่น น้ำ แสง ซึ่งจะทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะระหว่าง C-H ในหมู่ CH_2 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ติดกับพันธะคู่ของกรดไขมันไม่อิ่มตัว เกิดเป็นสารอนุมูลอิสระ (Radical) ซึ่งมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูง (Solomons, 2003) จากนั้นในขั้นตอน Propagation อนุมูลอิสระนี้จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนอย่างรวดเร็ว เกิดเป็นอนุมูลอิสระที่อยู่ในรูปของเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเปอร์ออกไซด์นี้สามารถรวมตัวกับไฮโดรเจนจากโมเลกุลของกรดไขมันในไบโอดีเซล เกิดเป็นไฮโดรเปอร์ออกไซด์และอนุมูลอิสระอีกตัวหนึ่ง ซึ่งอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นนี้สามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นเปอร์ออกไซด์ได้ ทำให้เกิดปฏิกิริยาต่อเนื่อง และในขั้นตอน Termination อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นใหม่นี้สามารถทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระอื่น ๆ เกิดเป็นสารประกอบจำพวก อัลดีไฮด์ แอลกอฮอล์ กรดคาร์บอนิก และคีโตน เป็นต้น โดยสารประกอบเหล่านี้มีผลทำให้ไบโอดีเซลมีคุณลักษณะที่ไม่เป็นไปตามมาตรฐาน EN 14214 โดยเฉพาะค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันตามวิธี EN 14112

ปัจจุบันที่กำหนดให้มีความมากกว่า 10 ชั่วโมง (Sarin *et al.*, 2007) ตัวอย่างการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซลจนเกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์แสดงดังภาพที่ 11



ภาพที่ 10 ปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซล

ที่มา: Sarin *et al.* (2007)



ภาพที่ 11 ปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซลจนเกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์

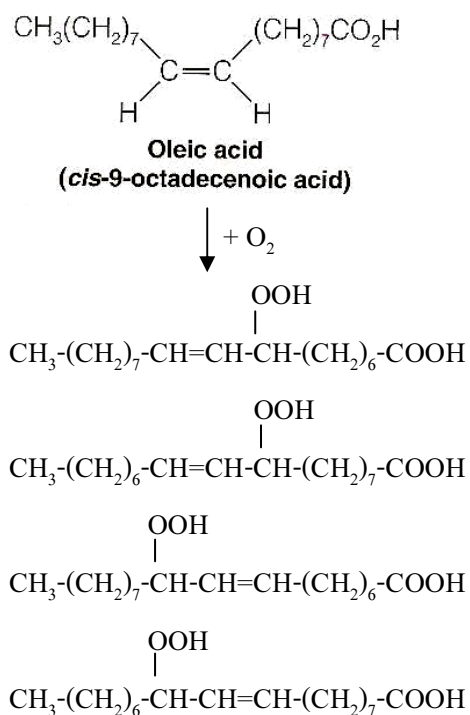
ที่มา: Solomons (2003)

ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซล

ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซลสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ผลิตภัณฑ์ปฐมภูมิ (Primary products) และผลิตภัณฑ์ทุติยภูมิ (Secondary product) ผลิตภัณฑ์ปฐมภูมิคือผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่างไบโอดีเซลและออกซิเจนซึ่งจะเกิดสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (ROOH) ส่วนผลิตภัณฑ์ทุติยภูมิคือผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากผลิตภัณฑ์ปฐมภูมิซึ่งได้แก่สารประกอบจำพวกอัลดีไฮด์ แอลกอฮอล์ แอลเคน แอลคีน โพลีเมอร์ (Claude, 2009)

1. ผลกระทบต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซล

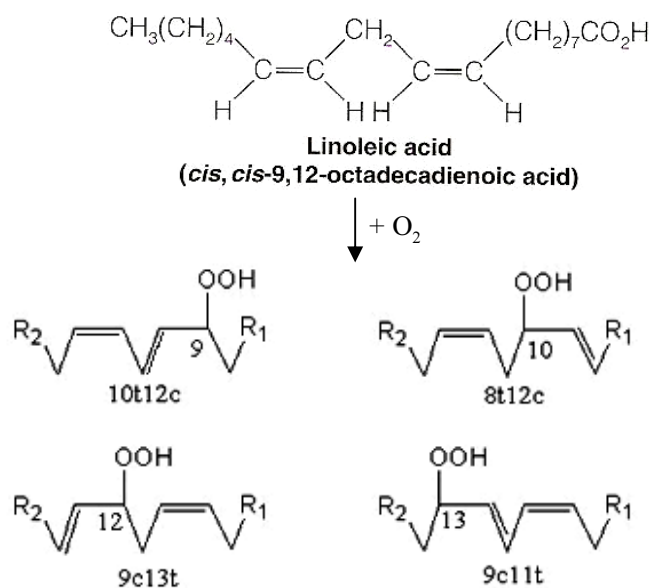
1.1 ไบโอดีเซลที่ประกอบด้วยกรดไขมันที่มีโครงสร้างพันธะคู่ 1 ตำแหน่ง เช่นไบโอดีเซลที่ประกอบด้วยกรดโอเลอิก (Oleic acid) จะสามารถเกิดผลิตภัณฑ์ปฏิกิริยาหรือสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ได้ 4 ชนิด (Claude, 2009) ดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 ผลิตภัณฑ์ปฏิกิริยาที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซลที่ประกอบด้วยกรดโอเลอิก

ที่มา: Claude (2009)

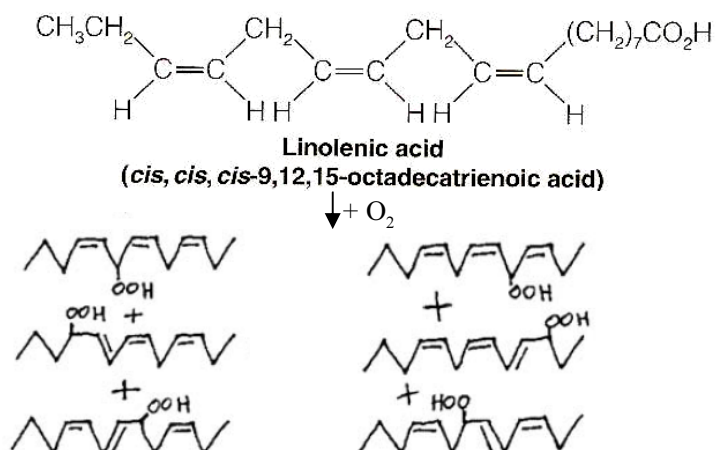
1.2 ไบโอดีเซลที่ประกอบด้วยกรดไขมันที่มีโครงสร้างพันธะคู่ 2 ตำแหน่ง เช่นไบโอดีเซลที่ประกอบด้วยกรดลิโนเลอิก (Linoleic acid) จะสามารถเกิดผลิตภัณฑ์ปฏิกิริยาหรือสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ได้ 4 ชนิด (Claude, 2009) ดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 ผลลัพธ์ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซลที่ประกอบด้วยกรดลิโนเลอิก

ที่มา: Claude (2009)

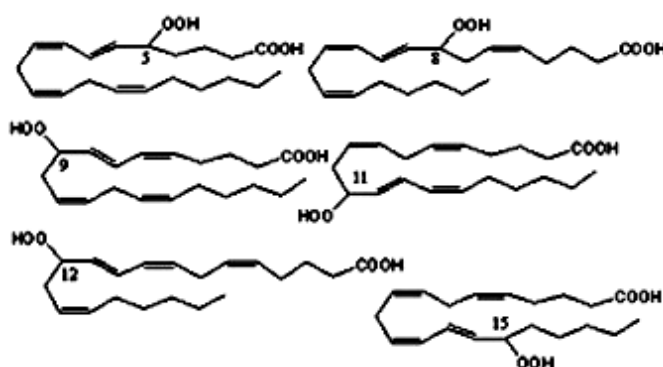
1.3 ไบโอดีเซลที่ประกอบด้วยกรดไขมันที่มีโครงสร้างพันธะคู่ 3 ตำแหน่ง เช่นไบโอดีเซลที่ประกอบด้วยกรดลิโนเลนิก (Linolenic acid) จะสามารถเกิดผลลัพธ์ปฏิกิริยาหรือสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ได้ 6 ชนิด (National Renewable Energy Laboratory U.S. Department of Energy, 2005) ดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 ผลลัพธ์ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซลที่ประกอบด้วยกรดลิโนเลนิก

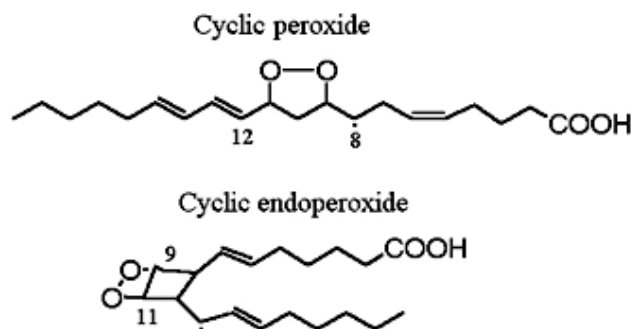
ที่มา: National Renewable Energy Laboratory U.S. Department of Energy (2005)

1.4 ไบโอดีเซลที่ประกอบด้วยกรดไขมันที่มีโครงสร้างพันธะคู่มากกว่า 3 ตำแหน่งขึ้นไป เช่น ไบโอดีเซลที่ประกอบด้วยกรดอาราคิโดนิก (Arachidonic acid) จะสามารถเกิดผลิตภัณฑ์ปฏิกิริยาหรือสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ดังภาพที่ 15 นอกจากนี้ยังสามารถเกิดสารประกอบเปอร์ออกไซด์ที่ประกอบด้วยโซ่เปิดของออกซิเจน 2 อะตอม (Claude, 2009) ดังภาพที่ 16



ภาพที่ 15 ผลลัพธ์ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซลที่ประกอบด้วยกรดอาราคิโดนิก

ที่มา: Claude (2009)

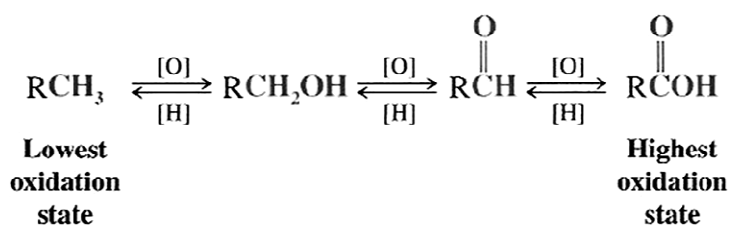


ภาพที่ 16 ผลกระทบปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซลที่ประกอบด้วยกรด
อาราคิไดนิก

ที่มา: Claude (2009)

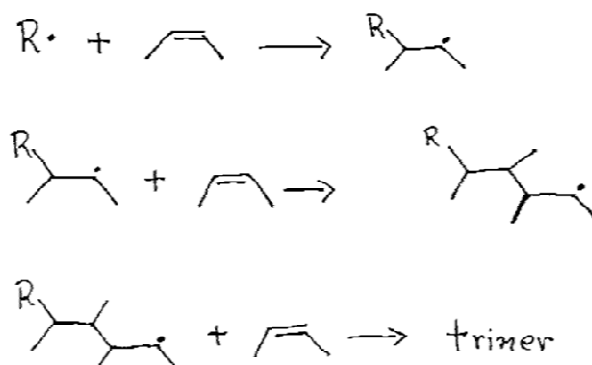
2. ผลกระทบทุติยภูมิ ของปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซล

ผลกระทบทุติยภูมิของปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซลสามารถเกิดสารประกอบได้หลายชนิด ได้แก่สารประกอบแอลเคน แอลคีน อัลดีไฮด์ แอลกอฮอล์ อีพอกไซด์ (Epoxides) โดยผลกระทบทุติยภูมิจะเกิดสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ซึ่งก็คือสารประกอบกรดคาร์บอกซิลิก ซึ่งสารประกอบกรดคาร์บอกซิลิกสามารถเกิดการรีดิวซ์ได้สารประกอบอัลดีไฮด์ แอลกอฮอล์ (Solomons, 2003) ดังภาพที่ 17 โดยสารประกอบที่เกิดขึ้นเหล่านี้สามารถรวมตัวกัน เกิดเป็นสารประกอบพอลิเมอร์ (National Renewable Energy Laboratory U.S. Department of Energy, 2005) ดังภาพที่ 18



ภาพที่ 17 การเกิดสารประกอบอื่นๆ จากสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์

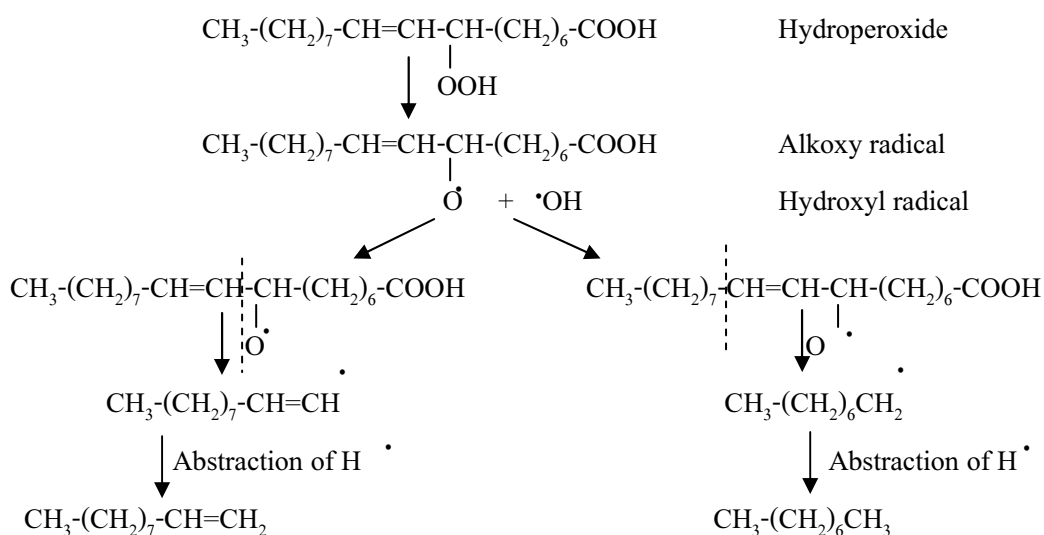
ที่มา: Solomons (2003)



ภาพที่ 18 การเกิดสารประกอบอื่นๆ จากสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์

ที่มา: National Renewable Energy Laboratory U.S. Department of Energy (2005)

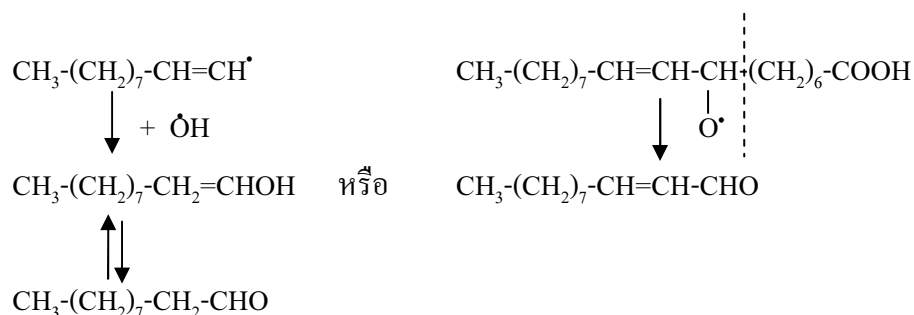
2.1 สารประกอบแอลเคนและแอลคีน เกิดจากการสลายโครงสร้างของสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ โดยหากสลายโครงสร้างสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์แล้วยังคงมีพันธะคู่ในโครงสร้างจะได้สารประกอบแอลคีน แต่หากไม่มีพันธะคู่ในโครงสร้างจะได้สารประกอบแอลเคน (Claude, 2009) ดังแสดงในภาพที่ 19



ภาพที่ 19 การเกิดสารประกอบแอลเคนและแอลคีนจากสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์

ที่มา: Claude (2009)

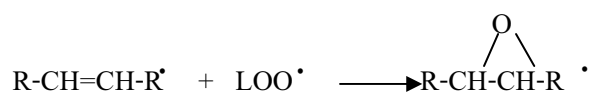
2.2 สารประกอบอัลดีไฮด์ เกิดจากการสลายโครงสร้างของสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Claude, 2009) แสดงดังภาพที่ 20



ภาพที่ 20 การเกิดสารประกอบอัลดีไฮด์จากสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์

ที่มา: Claude (2009)

2.3 สารประกอบอีพอกไซด์คือสารประกอบที่มีโซ่ปิดของออกซิเจน 1 อะตอมในโครงสร้าง เกิดจากการรวมตัวของอนุมูลอิสระที่อยู่ในรูปสารประกอบแอลคีนกับอนุมูลอิสระที่อยู่ในรูปเปอร์ออกไซด์ (Claude, 2009) แสดงดังภาพที่ 21



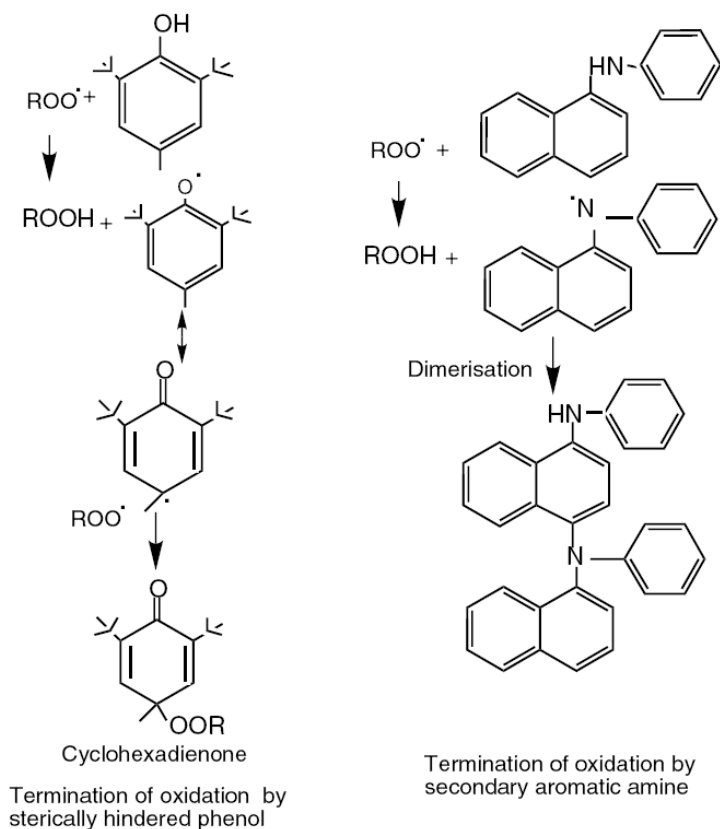
ภาพที่ 21 การเกิดสารประกอบอีพอกไซด์

ที่มา: Claude (2009)

สารต้านอนุมูลอิสระ

สารต้านอนุมูลอิสระ สามารถยับยั้ง หรือ ลดความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซลได้ เนื่องจากโครงสร้างของสารต้านอนุมูลอิสระจะประกอบด้วยไฮโดรเจนที่มีความเสถียรต่ำ ซึ่งไฮโดรเจนที่มีความเสถียรต่ำนี้ สามารถรวมตัวกับอนุมูลอิสระที่อยู่ในรูปของเปอร์ออกไซด์ได้มีประสิทธิภาพดีกว่าการที่เปอร์ออกไซด์นี้จะเข้าร่วมตัวกับกรดไขมันในไบโอดีเซล สารต้านอนุมูลอิสระสามารถแบ่งเป็น 2 คือ ประเภทฟีนอลิก (Phenolic-type) และประเภท

อามินิก (Aminic-type) ซึ่งสารต้านอนุมูลอิสระประเภทที่นิยมใช้ คือ ประเภทฟีนอลิก กลไกของสารต้านอนุมูลอิสระแสดงดังภาพที่ 22 (Sarin *et al.*, 2007)



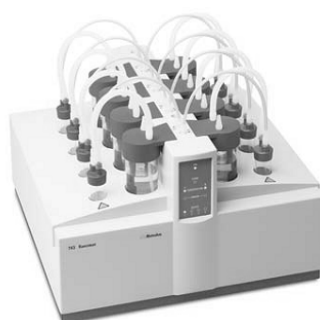
ภาพที่ 22 กลไกของสารต้านอนุมูลอิสระในการยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

ที่มา: Sarin *et al.* (2007)

การวิเคราะห์เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันโดยเครื่อง Rancimat

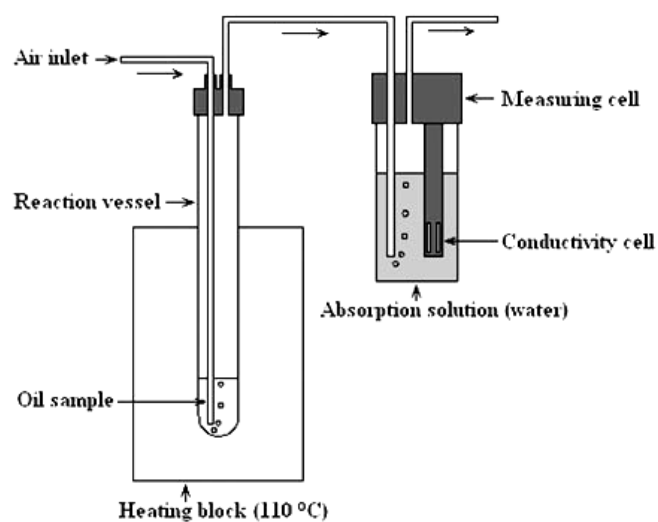
เครื่อง Rancimat (ภาพที่ 23) เป็นเครื่องที่ใช้วิเคราะห์ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ไบโอดีเซล ด้วยวิธีมาตรฐานในการวิเคราะห์ EN14112 โดยค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของน้ำมันไบโอดีเซลจะต้องอยู่ในช่วงที่เหมาะสม คือ ไม่ต่ำกว่า 10 ชั่วโมง

วิธีวิเคราะห์เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันด้วยวิธี EN14112 หลักการมีดังนี้ ตัวอย่างน้ำหนัก 3 กรัมถูกบรรจุภายในหลอดทดลองแก้วและอยู่ในระบบปิด และถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส โดยมีการเติมอากาศที่อัตราการไหลของอากาศ 10 ลิตร/ชั่วโมง หลอดทดลองแก้วที่บรรจุตัวอย่างจะมีการต่อสายท่ออากาศเพื่อนำอากาศส่วนที่อยู่ด้านบนของหลอดทดลองแก้ว ซึ่งอากาศส่วนนั้น คืออากาศที่ถูกออกซิไดซ์ ระบบจะนำพาอากาศส่วนนี้มาที่กระบอกแก้วที่บรรจุน้ำ DI (Deionization) ปริมาตร 80 มิลลิลิตร โดยที่ส่วนผ่านของกระบอกแก้วนี้จะมีเครื่องมือที่วัดค่าความนำไฟฟ้า ซึ่งจะส่งสัญญาณไปยังเครื่อง Rancimat และเครื่อง Rancimat จะประมวลผลเป็นกราฟของค่าความนำไฟฟ้ากับเวลา ซึ่งกราฟดังกล่าวจะแสดงค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน ในรูปของค่า Induction time (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2550) ภาพที่ 24 แสดงองค์ประกอบภายในเครื่อง Rancimat ภาพที่ 25 แสดงกราฟที่ได้จากเครื่อง Rancimat



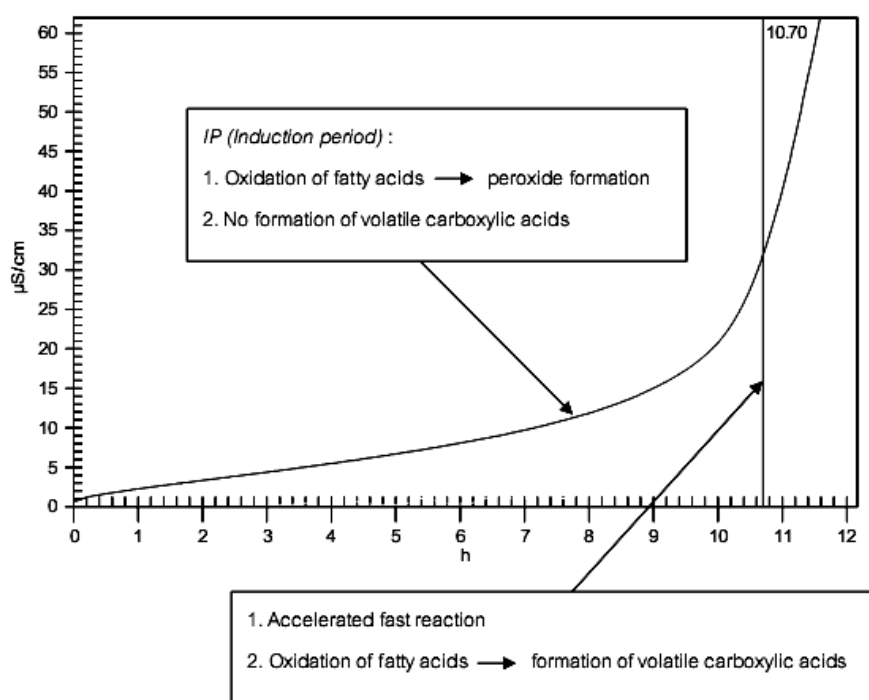
ภาพที่ 23 เครื่อง Rancimat

ที่มา: สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (2550)



ภาพที่ 24 องค์ประกอบภายในเครื่อง Rancimat

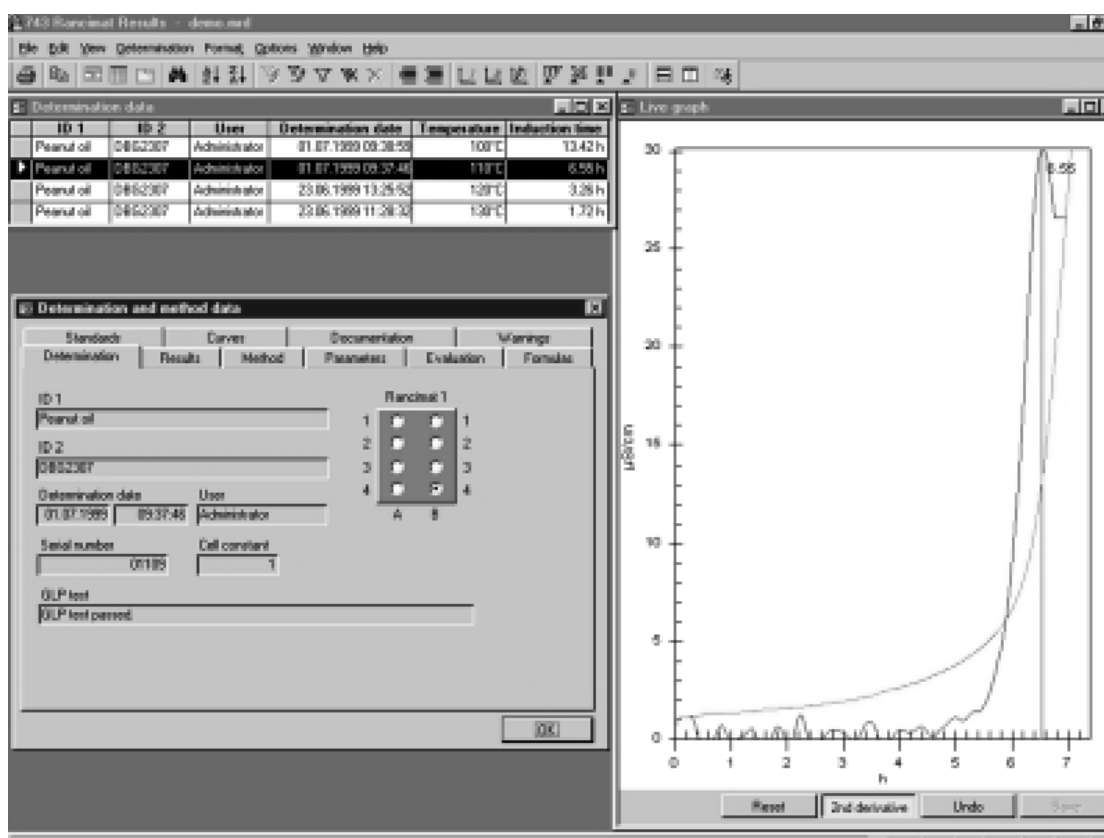
ที่มา: Steinbach, 2007



ภาพที่ 25 กราฟที่ได้จากเครื่อง Rancimat

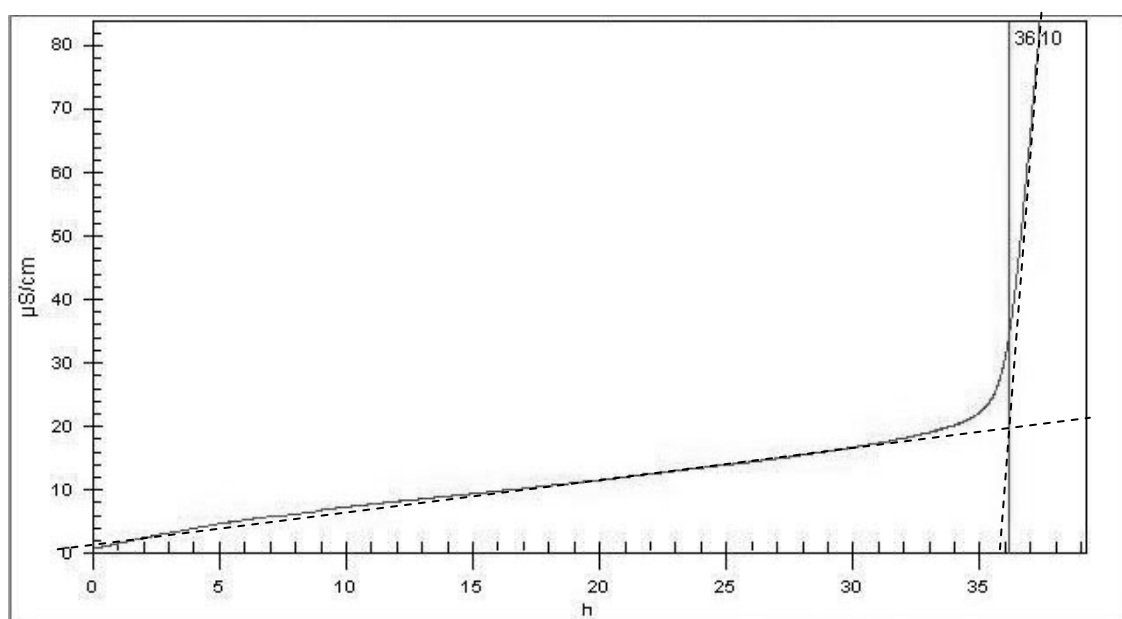
ที่มา: สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (2550)

ค่า Induction time เป็นเวลาที่เริ่มเกิดสารประกอบคาร์บอกซิลิก โดยสารประกอบคาร์บอกซิลิกจะยังไม่เกิดเมื่อเวลาที่ใช้ในปฏิกิริยาออกซิเดชันน้อยกว่าเวลา Induction time สำหรับวิธีการหาค่า Induction time มี 2 วิธี ซึ่งทั้งสองวิธีนี้จะคำนวณจากกราฟการนำไฟฟ้ากับเวลา โดยวิธีแรกค่า Induction time หาได้จากค่าสูงสุดของอนุพันธ์อันดับสอง (2^{nd} Derivative) ของกราฟการนำไฟฟ้ากับเวลา (ค่าสูงสุดของอนุพันธ์อันดับสองแสดงดังภาพที่ 26) วิธีที่สอง คือ วิธีการลากจุดตัดของเส้นสัมผัส โดยแบ่งกราฟออกเป็น 2 ช่วง หาจุดตัดของเส้นสัมผัสในช่วงแรกของปฏิกิริยาออกซิเดชันกับเส้นสัมผัสในช่วงที่ปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว จุดตัดที่ได้คือค่า Induction time (Kolb *et al.*, 2002) วิธีการลากจุดตัดของเส้นสัมผัสแสดงในภาพที่ 27



ภาพที่ 26 ค่าสูงสุดของอนุพันธ์อันดับสองของกราฟการนำไฟฟ้ากับเวลา

ที่มา: Metrohm Ltd. (1999)



ภาพที่ 27 วิธีการลากจุดตัดของเส้นสัมผัสเพื่อหาค่า Induction time

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชวีดา (2551) ทำการศึกษาการปรับปรุงเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ โดยการผสมไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำด้วยไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละ 100:0 80:20 60:40 50:50 40:60 20:80 และ 0:100 พบว่า ที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 50:50 ช่วยเพิ่มค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลของน้ำมันสบู่ดำจาก 3.7 ชั่วโมง เป็น 7.3 ชั่วโมง และส่งผลให้จุดหมอกควันและจุดไหลเทเพิ่มขึ้นจาก 3 องศาเซลเซียส เป็น 9 องศาเซลเซียส และจาก -8 องศาเซลเซียส เป็น 0 องศาเซลเซียส ตามลำดับ นอกจากนี้ยังศึกษาสารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) 3 ชนิด คือ BHA (Butylated hydroxyanisole), BHT (Butylated hydroxytoluene) และ Kerobit® TP 26 ตามลำดับ โดยพบว่า BHA เป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่ใช้ปริมาณน้อยสุด คือ 200 พีพีเอ็ม ที่ทำให้ไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำมีค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันตามมาตรฐาน EN 14112 และการเติมสาร BHA ลงในไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวในปริมาณ 150 พีพีเอ็ม และ 50 พีพีเอ็ม ช่วยให้ไบโอดีเซลผสมที่อัตราส่วนร้อยละ 80:20 และ 60:40 มีค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันเป็นไปตามมาตรฐาน EN 14112 คือ 6.26 ชั่วโมง และ 6.32 ชั่วโมง และมีจุดหมอกควันเท่ากับ 5 และ 8 องศาเซลเซียส และมีจุดไหลเทเท่ากับ -5 และ -2 องศาเซลเซียส ตามลำดับ นอกจากนี้ยังศึกษาเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลที่ถูกจัดเก็บเป็นระยะเวลา 10 สัปดาห์ พบว่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลลดลงตามระยะเวลาการจัดเก็บ ไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร BHA ความเข้มข้น 200 พีพีเอ็ม และไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนร้อยละ 60:40 ที่เติมสาร BHA ความเข้มข้น 50 พีพีเอ็ม มีเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันลดลง 21.46 เปอร์เซ็นต์ และ 9.27 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และการผสมไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำด้วยไบโอดีเซลจากมะพร้าว รวมทั้งการเติมสารต้านอนุมูลอิสระลงในไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำไม่ส่งผลต่อลักษณะสมบัติอื่น ๆ นอกจากทำให้จุดหมอกควันและจุดไหลเทเพิ่มขึ้น และปรับปรุงเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลตามมาตรฐานยุโรป EN 14112

Bondioli *et al.* (2003) ทำการศึกษาเกี่ยวกับเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลที่จำหน่ายตามท้องตลาดในทวีปยุโรปที่ผลิตจากแหล่งต่างๆ กัน คือ น้ำมันเรพซีด (Rapeseed oil) น้ำมันดอกทานตะวัน น้ำมันพีชใช้แล้ว และไขสัตว์ โดยไบโอดีเซลจาก 4 แหล่งข้างต้น นำมาศึกษาระยะเวลาในการจัดเก็บไบโอดีเซลเป็นเวลา 12 เดือน เพื่อศึกษาจำนวนเปอร์ออกไซด์ (วิเคราะห์ด้วยวิธี NFT 60-220) ความหนืดทางจลน์ (ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส) และค่า

เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน (วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Rancimat ด้วยวิธี EN 14112) นอกจากนี้ยังศึกษาผลของสารต้านอนุมูลอิสระ 2 ชนิด (TBHQ และ PG) ความเข้มข้น 400 พีพีเอ็ม ซึ่งเติมในไบโอดีเซลจากน้ำมันเรพซิด จากการทดลองพบว่าเมื่อระยะเวลาในการเก็บเพิ่มขึ้น จำนวนเปอร์ออกไซด์และความหนืดทางกลจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันจะมีค่าลดลง โดยโอดีเซลที่ประกอบด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัว จะมีจำนวนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้นมากกว่า และค่าความหนืดเพิ่มขึ้นน้อยกว่าเมื่อเทียบกับไบโอดีเซลที่ประกอบด้วยกรดไขมันอิ่มตัว นอกจากนี้พบว่า TBHQ เป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่เหมาะสมกับน้ำมันเรพซิด ค่าเปอร์ออกไซด์ของไบโอดีเซลจากน้ำมันเรพซิด น้ำมันดอกทานตะวัน น้ำมันพีชใช้แล้ว และไขสัตว์ ในตอนเริ่มต้นมีค่าดังนี้ 3.40 79.00 9.30 และ ไม่ระบุ ออกซิเจน/กิโลกรัม ตามลำดับ และในเดือนที่ 12 มีค่าดังนี้ 13.30 68.00 16.90 และ 22.00 ออกซิเจน/กิโลกรัม ตามลำดับ ค่าความหนืดทางกลของไบโอดีเซลจากน้ำมัน เรพซิด น้ำมันดอกทานตะวัน น้ำมันพีชใช้แล้ว และไขสัตว์ในตอนเริ่มต้นมีค่าดังนี้ 4.41 4.07 4.67 และ 4.73 ตารางมิลลิเมตร/วินาที ตามลำดับ และในเดือนที่ 12 มีค่าดังนี้ 4.53 4.22 4.94 และ 5.04 ตารางมิลลิเมตร/วินาที ตามลำดับ ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันในตอนเริ่มต้นของไบโอดีเซลจากเรพซิด น้ำมันดอกทานตะวัน น้ำมันพีชใช้แล้ว ไขสัตว์ ไบโอดีเซลเรพซิดที่เติม TBHQ และไบโอดีเซลเรพซิดที่เติม PG มีค่าดังนี้ 9.20 1.31 7.98 0.70 36.00 และ 22.42 ชั่วโมง ตามลำดับ และในเดือนที่ 12 มีค่าเท่ากับ 6.83 4.22 ไม่ระบุ 32.77 และ 20.85 ชั่วโมง ตามลำดับ

Frohlich (2003) ทำการศึกษากิจกรรมของสารต้านอนุมูลอิสระที่มีอยู่ในธรรมชาติ 3 ชนิด คือ α -Tocopherol δ -Tocopherol และ γ -Tocopherol ที่ความเข้มข้น 0 250 500 1,000 และ 2,000 พีพีเอ็ม ต่อความหนืดของไบโอดีเซลจากน้ำมันดอกทานตะวัน นอกจากนี้ยังศึกษากิจกรรมของ δ -Tocopherol ในปริมาณความเข้มข้น 1,000 พีพีเอ็ม เมื่อเติมในไบโอดีเซลจากน้ำมันดอกทานตะวัน น้ำมันเรพซิด น้ำมันพีชใช้แล้ว และไขสัตว์ โดยพิจารณาค่าเปอร์ออกไซด์ของไบโอดีเซลแต่ละชนิดเมื่อทำการเก็บไบโอดีเซลไว้เป็นระยะเวลา 8 วัน ผลการทดลองพบว่า γ -Tocopherol เป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่ใช้ในความเข้มข้นน้อยที่สุด ซึ่งยังคงให้ค่าความหนืดเท่าเดิมเมื่อเติมในไบโอดีเซลจากน้ำมันดอกทานตะวัน โดยไบโอดีเซลจากน้ำมันดอกทานตะวันมีค่าความหนืด 0.48 เซนติสโตก ไบโอดีเซลจากน้ำมันดอกทานตะวันที่เติม γ -Tocopherol ความเข้มข้น 250 พีพีเอ็ม ให้ค่าความหนืดต่ำที่สุด คือ 0.48 เซนติสโตก ไบโอดีเซลจากน้ำมันดอกทานตะวันซึ่งเติม α -Tocopherol ความเข้มข้น 1,000 พีพีเอ็ม ให้ค่าความหนืดต่ำสุด คือ 0.50 และไบโอดีเซลจากน้ำมันดอกทานตะวันซึ่งเติม δ -Tocopherol ความเข้มข้น 500 พีพีเอ็ม ให้ค่าความหนืดต่ำสุด คือ 0.49 และพบว่า δ -Tocopherol มีผลต่อความคงที่ของค่าเปอร์ออกไซด์ของไบโอดีเซลจากแหล่งต่างๆ

เรียงลำดับจากมากไปน้อยดังนี้ ไบโอดีเซลจากไขสัตว์ > ไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว > ไบโอดีเซลจากเรพซิด > ไบโอดีเซลจากน้ำมันดอกทานตะวัน โดย δ -Tocopherol ที่มีอยู่ในไบโอดีเซลจากน้ำมันดอกทานตะวันจะลดลง 93 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับตอนเริ่มต้น และในวันที่ 8 ค่าเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้นเป็น 115 มิลลิโมล/กิโลกรัม ในขณะที่ δ -Tocopherol ที่มีอยู่ในไบโอดีเซลจากไขสัตว์จะลดลงเพียง 17 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับตอนเริ่มต้น และค่าเปอร์ออกไซด์ไม่เปลี่ยนแปลงตลอดระยะเวลา 8 วัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 30 มิลลิโมล/กิโลกรัม

Mittelbach *et al.* (2003) ศึกษาเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากแหล่งต่างกัน คือ ไบโอดีเซลจากน้ำมันเรพซิด น้ำมันพืชใช้แล้ว น้ำมันดอกทานตะวัน และไขมันสัตว์ โดยเปรียบเทียบเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน ระหว่างไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการกลั่น และไบโอดีเซลที่ไม่ผ่านกระบวนการกลั่น การทดลองพบว่า เมื่อเปรียบเทียบไบโอดีเซลทั้ง 4 ชนิดที่ยังไม่ผ่านกระบวนการกลั่น ไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันเรพซิด จะให้ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันสูงสุด คือ 9.15 ชั่วโมง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของกรดไขมันในโอดีเซล และสารต้านอนุมูลอิสระธรรมชาติที่มีอยู่ในไบโอดีเซล นอกจากนี้ยังพบว่า ไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการกลั่น จะมีเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันต่ำกว่าไบโอดีเซลที่ไม่ผ่านกระบวนการกลั่น เนื่องจากการกลั่นจะทำลายสารต้านอนุมูลอิสระธรรมชาติที่มีอยู่ในไบโอดีเซล โดยไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันเรพซิดที่ผ่านกระบวนการกลั่นแล้วจะมีค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันเท่ากับ 3.70 ชั่วโมง ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว ที่ไม่ผ่านกระบวนการกลั่น และผ่านกระบวนการกลั่น มีค่าเท่ากับ 5.10 และ 3.00 ชั่วโมง ตามลำดับ ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันดอกทานตะวัน ที่ไม่ผ่านกระบวนการกลั่น และผ่านกระบวนการกลั่น มีค่าเท่ากับ 3.80 และ 1.20 ชั่วโมง ตามลำดับ ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากไขมันสัตว์ ที่ไม่ผ่านกระบวนการกลั่น และผ่านกระบวนการกลั่น มีค่าเท่ากับ 1.50 และ 0.10 ชั่วโมง ตามลำดับ

Dunn (2005) ทำการศึกษาอิทธิพลของสารต้านอนุมูลอิสระที่มีผลต่อเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันถั่วเหลืองด้วยวิธีทรานส์เอนเทอร์พีเคชัน โดยเปรียบเทียบสารต้านอนุมูลอิสระ 5 ชนิดคือ BHA BHT (Butylated hydroxytoluene) TBHQ α -Tocopherol และ PG เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลพิจารณาจากค่า OT (Oxidation onset temperature) วิเคราะห์ด้วย P-DSC (Pressurized differential scanning calorimetry) ตามวิธี ASTM D4625 โดยพิจารณาทั้งภาวะหยุดนิ่ง (Static mode) และภาวะจลน์ (Dynamic mode) เพื่อให้ทราบช่วงความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารต้านอนุมูลอิสระ โดย P-DSC

จะดำเนินการที่ความดัน 2,000 กิโลปาสกาล (290 psig) และอัตราการให้ความร้อนที่ 5 องศาเซลเซียส / นาที จากผลการทดลองพบว่า PG และ BHA จะมีประสิทธิภาพสูงสุด และ Tocopherol มีประสิทธิภาพน้อยที่สุดในการลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลือง สำหรับน้ำมันที่ผสมระหว่างน้ำมันดีเซลและไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลืองในอัตราส่วน 90:10 80:20 70:30 และ 50:50 พบว่า BHA และ TBHQ ที่ความเข้มข้น 3,000 พีพีเอ็ม สามารถป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันผสมได้ ในขณะที่ BHT ในความเข้มข้นต่ำคือ 210 พีพีเอ็ม สามารถป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันผสม และแม้ว่า PG จะให้ประสิทธิภาพที่ดีเยี่ยมเมื่อเทียบกับสารต้านอนุมูลอิสระตัวอื่นๆ แต่ PG มีปัญหาในเรื่องความสามารถในการละลาย เมื่อใช้อัตราส่วนผสมของไบโอดีเซลต่อน้ำมันดีเซลมาก

Liang *et al.* (2006) ทำการศึกษาผลกระทบของสารต้านอนุมูลอิสระที่มีอยู่ในธรรมชาติ และสารต้านอนุมูลอิสระสังเคราะห์ กับความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปาล์ม โดยวิธีทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ผลการทดลองพบว่าในธรรมชาติแล้ว ไบโอดีเซลที่ผลิตจากปาล์มจะมีสารต้านอนุมูลอิสระธรรมชาติอยู่จำนวนมาก (มากกว่า 600 พีพีเอ็ม) สารต้านอนุมูลอิสระธรรมชาติที่พบบ่อยคือ แคโรทีน และวิตามินอี ซึ่งเมื่อนำไบโอดีเซลที่ผลิตจากปาล์ม (ที่ยังไม่ผ่านการกลั่น) ไปเปรียบเทียบกับไบโอดีเซลที่ผ่านการกลั่นแล้ว พบว่า ไบโอดีเซลที่ผลิตจากปาล์มที่ยังไม่ผ่านการกลั่น มีเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันที่มากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับวิธี EN 14214 (ไบโอดีเซลที่ผลิตจากปาล์มที่ยังไม่ผ่านการกลั่นมีค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันเท่ากับ 25 ชั่วโมง วิเคราะห์โดยเครื่อง Rancimat) เพราะไบโอดีเซลที่ผลิตจากปาล์มที่ผ่านการกลั่น ความร้อนจะทำให้ สารต้านอนุมูลอิสระที่มีอยู่ในธรรมชาติสลายตัวกล่าวคือ ปริมาณแคโรทีน และวิตามินอีลดลง (น้อยกว่า 50 พีพีเอ็ม) นอกจากนี้ยังได้ศึกษาถึงสารต้านอนุมูลอิสระสังเคราะห์ 3 ชนิดด้วยกันคือ α -Tocopherol BHT และ TBHQ ที่ความเข้มข้น 0 50 100 1,000 1,500 2,000 2,500 และ 3,000 พีพีเอ็ม พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของสารต้านอนุมูลอิสระ เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันจะเพิ่มขึ้น (ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันจะเพิ่มขึ้น) และเมื่อเปรียบเทียบกับสารต้านอนุมูลอิสระสังเคราะห์ทั้ง 3 ชนิดนี้พบว่า TBHQ จะให้ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันสูงสุดคือ 30.2 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้น 500 พีพีเอ็ม (ค่ามาตรฐาน EN 14214 ในขณะนั้นคือ 6 ชั่วโมง) รองลงมาคือ BHT ซึ่งให้ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันสูงสุด ที่ 16.60 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้น 1,000 พีพีเอ็ม ในขณะที่ α -T ให้ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันสูงสุด ที่ 11.2 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้น 3,000 พีพีเอ็ม

Domingos *et al.* (2007) ทำการศึกษาอิทธิพลของสารต้านอนุมูลอิสระที่มีผลต่อเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันถั่วเหลือง ด้วยวิธีทรานส์เอเนอเทอริฟิเคชัน สารต้านอนุมูลอิสระ 3 ชนิดคือ BHA BHT และ TBHQ เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันพิจารณาจากค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน ซึ่งวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Rancimat ตามวิธี EN14112 โดยศึกษาสารต้านอนุมูลอิสระที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 0 จนถึง 8,000 พีพีเอ็ม พบว่า ในช่วงสารต้านอนุมูลอิสระที่ความเข้มข้น 0 ถึง 7,000 พีพีเอ็ม BHT จะให้ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันสูงสุดคือที่ 5.67 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้น 7,000 พีพีเอ็ม ในขณะที่พิจารณา สารต้านอนุมูลอิสระที่ความเข้มข้น 7,000 ถึง 8,000 พบว่า TBHQ จะให้ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันสูงสุดที่ 8.93 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้น 8,000 พีพีเอ็ม

Sarin *et al.* (2007) ทำการศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงคุณสมบัติทางอุณหภูมิ (Cloud point และ Pour point) และเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซล ที่เกิดจากไบโอดีเซลน้ำมันปาล์มผสมกับไบโอดีเซลน้ำมันสบู่ดำ ในอัตราส่วนไบโอดีเซลน้ำมันปาล์มต่อไบโอดีเซลน้ำมันสบู่ดำ 0:100 20:80 40:60 50:50 60:40 80:20 และ 100:0 นอกจากนี้ยังศึกษาสารต้านอนุมูลอิสระที่มีผลต่อเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันสบู่ดำ น้ำมันดอกทานตะวัน น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมัน Karanjia โดยพิจารณาเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันซึ่งวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Rancimat (ค่ามาตรฐานโดยวิธี EN 14112 ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันในขณะนั้น ต้องมีค่ามากกว่า 10 ชั่วโมง) สารต้านอนุมูลอิสระที่ใช้ทดสอบ มี 4 ชนิด คือ 2, 6-Ditertiarybutyl hydroxytoluene (AO-1) bis-2, 6-Ditertiarybutyl phenol (AO-2) Butylated-phenol (AO-3) และ Octylated butylated diphenyl amine (AO-4) ที่ความเข้มข้นในช่วง 25 ถึง 400 พีพีเอ็ม จากผลการทดลองพบว่า เมื่ออัตราส่วนไบโอดีเซล ที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มผสมกับน้ำมันสบู่ดำมากเท่าไร ค่าความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันก็เพิ่มขึ้น แต่ในทางกลับกัน คุณสมบัติทางอุณหภูมิ คือ Cloud point และ Pour point จะสูงขึ้น และค่าที่เหมาะสมคือใช้ไบโอดีเซลจากปาล์มผสมไปในจำนวน 20 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์ (อัตราส่วน 20:80 และ 40:60) และ สารต้านอนุมูลอิสระที่เหมาะสมที่สุดคือ 2, 6-Ditertiarybutyl hydroxytoluene (AO-1) โดยควรใช้ที่ความเข้มข้น 200 พีพีเอ็ม ขึ้นไปในการผลิตไบโอดีเซล ที่เกิดจากการผสมระหว่างไบโอดีเซลน้ำมันปาล์มและไบโอดีเซลน้ำมันสบู่ดำ ในอัตราส่วน 20:80 และ 40:60

Xin *et al.* (2008) ศึกษาอิทธิพลของสารต้านอนุมูลอิสระที่มีผลต่อเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมัน 3 ชนิดด้วยกันคือ น้ำมันปาล์ม น้ำมันดอกทานตะวัน และน้ำมันเรพซิด ด้วยวิธีเมทานอลเหนือวิกฤติ (Supercritical methanol) โดยศึกษาสารต้านอนุมูล

อิสระ 2 ชนิด คือ Diphenyl-*P*-phenylenediamine (DPD) และ Propyl gallate (PG) ความเข้มข้น 0 ถึง 5,000 พีพีเอ็ม ต่อเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซล วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Rancimat ตามวิธี EN14112 นอกจากนี้ยังศึกษาอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณ Tocopherol ในไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันเรพซิดโดยศึกษาที่อุณหภูมิในช่วง 270 ถึง 360 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองพบว่า ไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปาล์ม เมื่อใช้ PG ที่ความเข้มข้นประมาณ 100 พีพีเอ็ม จะได้ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันสูงสุดที่ 50 ชั่วโมง ไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันดอกทานตะวัน เมื่อใช้ PG ที่ความเข้มข้นประมาณ 5,000 พีพีเอ็ม จะได้ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันสูงสุดที่ 25 ชั่วโมง และไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันเรพซิดเมื่อเติม PG ที่ความเข้มข้นประมาณ 1,000 พีพีเอ็ม จะได้ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันสูงสุดที่ 24 ชั่วโมง เมื่อพิจารณาจากค่ามาตรฐาน EN 14112 โดยเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันในขณะนั้นต้องมีค่ามากกว่า 10 ชั่วโมง พบว่า ไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปาล์ม หากใช้ PG ควรใช้ที่ระดับความเข้มข้น 50 พีพีเอ็ม ขึ้นไป และหากใช้ DPD ควรใช้ที่ระดับความเข้มข้น 50 พีพีเอ็ม ขึ้นไปเช่นกัน ไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันดอกทานตะวัน หากใช้ PG ควรใช้ที่ระดับความเข้มข้น 1,000 พีพีเอ็ม ขึ้นไป และหากใช้ DPD ควรใช้ที่ระดับความเข้มข้น 3,000 พีพีเอ็ม ขึ้นไป ไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันเรพซิด หากใช้ PG ควรใช้ที่ระดับความเข้มข้น 50 พีพีเอ็ม ขึ้นไป และหากใช้ DPD เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ควรใช้ที่ระดับความเข้มข้น 500 พีพีเอ็ม ขึ้น สำหรับผลการทดลองของการศึกษาอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณ Tocopherol พบว่า จำนวน Tocopherol ที่มีอยู่ในไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันเรพซิดจะมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัตถุดิบและสารเคมีสำหรับการผลิตไบโอดีเซล

1.1 น้ำมันสุรุดำ

1.2 เมทานอล (ความเข้มข้น 99.99 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก) : Analytical grade, J.T.

Baker, U.S.A.

1.3 แกลีคอลโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ : Analytical grade, Ajax Chemical Co., Ltd.

1.4 น้ำกลั่น

2. สารเคมีสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation stability)

2.1 BHA (Butylated hydroxyanisole): Analytical grade, Fluka, Switzerland

2.2 TBHQ (T-Butyl hydroquinone): Analytical grade, Fluka, Switzerland

2.3 PG (3,4,5 – Trihydroxybenzoic acid propyl ester, Propyl gallate): Analytical grade, Fluka, Switzerland

2.4 ZEP diesel fuel additive

2.5 NITROX injector treatment

2.6 L-power

3. สารเคมีสำหรับการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด (Acid value)

3.1 โซเดียมไฮดรอกไซด์: Analytical grade, Merck, Germany

3.2 2-โพรพานอล (ความเข้มข้น 99.99 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก): Analytical grade, J.B. Baker, U.S.A.

3.3 สารละลายฟีนอล์ฟทาไลน์

3.4 น้ำกลั่น

4. อุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด

4.1 เทอร์โมมิเตอร์

4.2 บิวเรต และชุดเครื่องแก้ว

4.3 ชุดอุปกรณ์การกวนด้วยแท่งแม่เหล็กและให้ความร้อน: Chatcharee holding, Thailand

4.4 เครื่องทำน้ำหล่อเย็น: Model CB1D, Bosstech, Thailand

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

4.6 เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง: Model BL210S, Sartorius, Germany

4.7 กระดาษลิตมัส

4.8 กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 4

4.9 นาฬิกาจับเวลา

4.10 เครื่อง Rancimat: Model 743, Metrohm, Switzerland

วิธีการ

1. การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ

ให้ความร้อนน้ำมันสบู่ดำที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เติมนสารละลายผสมระหว่าง โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) กับเมทานอล โดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักน้ำมันสบู่ดำ และอัตราส่วนจำนวนโมลเมทานอลต่อจำนวนโมลน้ำมันสบู่ดำเท่ากับ 7:1 ความเร็วรอบในการกวน 600 รอบต่อนาที และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1.5 ชั่วโมง (ทัศนีย์, 2550) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาจะถูกเทลงในกรวยแยก ซึ่งผลิตภัณฑ์จะแยกเป็น 2 ชั้น ชั้นบนคือ เมทิลเอสเทอร์หรือไบโอดีเซล ส่วนชั้นล่างคือ กลีเซอรอล ทำการแยกกลีเซอรอลออกจากไบโอดีเซล จากนั้นล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำกลั่นเพื่อกำจัดตัวเร่งปฏิกิริยา และให้ความร้อนไบโอดีเซลที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 30 นาที เพื่อกำจัดน้ำ ขั้นตอนวิธีการผลิตไบโอดีเซลแสดงใน ภาพที่ 28 ถึงภาพที่ 32



ภาพที่ 28 สารเคมีที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ (เมทานอล น้ำมันสบู่ดำ และ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์)



ภาพที่ 29 การเติมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในเมทานอล



ภาพที่ 30 สารละลายผสมระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์กับเมทานอลถูกเติมในไบโอดีเซล



ภาพที่ 31 การแยกกลีเซอรอลออกจากไบโอดีเซล



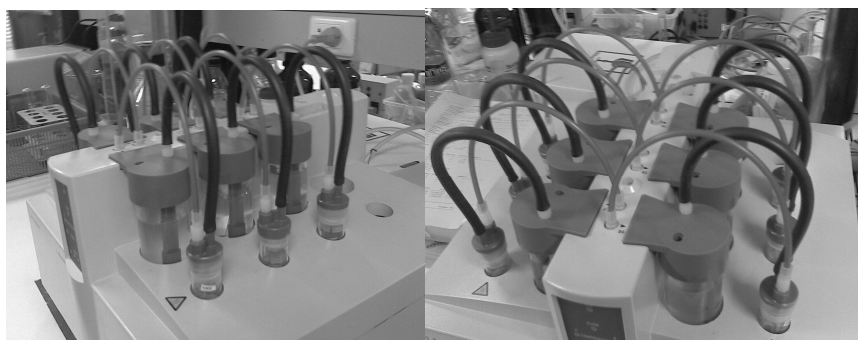
ภาพที่ 32 การล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำกลั่น

2. การวิเคราะห์หาค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซล

การวิเคราะห์หาค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลนั้นจะวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐาน EN 14112 ซึ่งวัดด้วยเครื่อง Rancimat ตัวอย่างไบโอดีเซลปริมาณ 3 กรัมจะถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส และถูกพ่นอากาศที่อัตราการไหล 10 ลิตร/ชั่วโมง อากาศจะออกซิไดซ์กรดไขมันในไบโอดีเซล ทำให้เกิดสารประกอบที่ระเหยได้ง่าย สารประกอบที่เกิดขึ้นนี้จะผ่านเข้าไปในกระบอกแก้วที่บรรจุน้ำ DI (Deionization) 80 มิลลิลิตร ซึ่งฝาของกระบอกแก้วนี้จะมีตัวโปรวัดค่าความนำไฟฟ้า เครื่องมีวิเคราะห์จะวัดค่าสภาพการนำไฟฟ้าของน้ำ DI ไว้อย่างต่อเนื่อง และประมวลผลเป็นกราฟซึ่งแสดงในรูปค่าสภาพการนำไฟฟ้ากับเวลา เส้นกราฟที่ได้จากการประมวลของเครื่องวิเคราะห์คือ เส้นกราฟของปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation curve) จุดโค้งของเส้นกราฟนี้ คือ IP (Induction period หรือ Induction time) ซึ่งมีหน่วยเป็นชั่วโมง โดยค่า Induction time เป็นค่าที่บอกเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของตัวอย่างไบโอดีเซล (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2550) เครื่อง Rancimat และภาพแสดงการทำงานของเครื่องวิเคราะห์แสดงในภาพที่ 33 และภาพที่ 34



ภาพที่ 33 เครื่อง Rancimat และคอมพิวเตอร์สำหรับประมวลผล



ภาพที่ 34 อุปกรณ์และเครื่องมือวัดเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซล

2.1 การศึกษาเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสารต้านอนุมูลอิสระ

การศึกษหาชนิดและปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระที่มีความเหมาะสมกับไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำนั้น สารต้านอนุมูลอิสระที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ BHA, TBHQ และ PG โดยการเติมสารต้านอนุมูลอิสระแต่ละชนิดในปริมาณความเข้มข้น 0 ถึง 750 พีพีเอ็ม ลงในไบโอดีเซล จากนั้นนำตัวอย่างทดสอบค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันด้วยเครื่อง Rancimat model 743

2.2 การศึกษาเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสารเติมแต่งสำเร็จรูป

การศึกษาหาชนิดและปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระที่มีความเหมาะสมกับไบโอดีเซลจากน้ำมันสนุด้าน สารต้านอนุมูลอิสระที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ ZEP, NITROX และ L-power โดยการเติมสารเติมแต่งสำเร็จรูปแต่ละชนิดในปริมาณความเข้มข้น 0 ถึง 1,000 พีพีเอ็ม ลงในไบโอดีเซล จากนั้นนำตัวอย่างทดสอบค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันด้วยเครื่อง Rancimat model 743 ตามวิธี EN14112

2.3 การศึกษาเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสนุดำที่เติมสารต้านอนุมูลอิสระหรือสารเติมแต่งสำเร็จรูปที่เหมาะสมหลังจากจัดเก็บไบโอดีเซลไว้เป็นระยะเวลานาน

การศึกษาหาเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสนุดำที่เติมสารต้านอนุมูลอิสระหรือสารเติมแต่งสำเร็จรูปที่เหมาะสม เมื่อทำการจัดเก็บไบโอดีเซลไว้เป็นระยะเวลานาน ไบโอดีเซลจะถูกจัดเก็บไว้ในที่มีด ฌ อุณหภูมิห้อง (อุณหภูมิประมาณ 30 องศาเซลเซียส) เป็นระยะเวลา 20 สัปดาห์ และทำการวัดค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลทุก 2 สัปดาห์ ด้วยเครื่อง Rancimat model 743 ตามวิธี EN14112

3. การวิเคราะห์หาจุดหมอกควันและจุดไหลเทของไบโอดีเซล

ทำการศึกษาจุดหมอกควันและจุดไหลเทของไบโอดีเซลจากน้ำมันสนุดำที่เติม PG ในความเข้มข้นที่ 0 150 และ 250 พีพีเอ็ม เพื่อศึกษาผลกระทบของไบโอดีเซลที่เติม PG ว่ามีผลกระทบต่อค่าจุดหมอกควันและจุดไหลเทของไบโอดีเซลหรือไม่ โดยจุดหมอกควันเป็นค่าที่บ่งบอกถึงอุณหภูมิต่ำสุดที่น้ำมันเริ่มเป็นไขและขัดขวางการไหลของน้ำมัน ส่วนจุดไหลเทนั้นเป็นอุณหภูมิ ณ จุดที่น้ำมันแข็งตัวและไม่สามารถไหลได้สะดวก (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2550)

3.1 การวิเคราะห์หาจุดหมอกควันของไบโอดีเซล

การวิเคราะห์หาจุดหมอกควันของไบโอดีเซลนั้น ทำได้โดยเทตัวอย่างไบโอดีเซลลงในหลอดแก้วทดสอบโดยเทให้ผิวขอบบนของตัวอย่างเท่ากับขีดบอกระดับของหลอดแก้ว จากนั้นทำการให้ความเย็นแก่ตัวอย่างไบโอดีเซลตามมาตรฐาน ASTM D 2500 โดยอุณหภูมิที่เริ่มปรากฏ

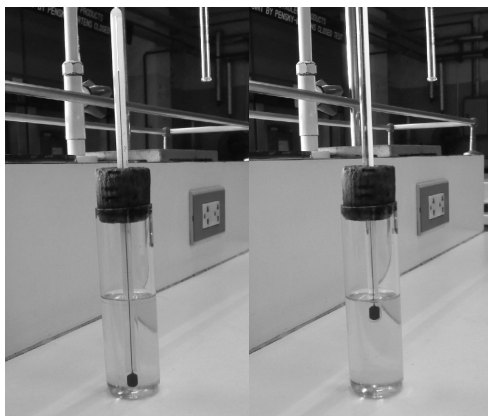
ไขในไบโอดีเซล คือ จุดหมอกควันของไบโอดีเซล โดยเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบจุดหมอกควันและจุดไหลเทของไบโอดีเซลแสดงดังภาพที่ 35 ถึงภาพที่ 38



ภาพที่ 35 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ทดสอบจุดหมอกควันและจุดไหลเท



ภาพที่ 36 ตัวอย่างไบโอดีเซลในหลอดแก้วทดสอบและอุปกรณ์ให้ความเย็น



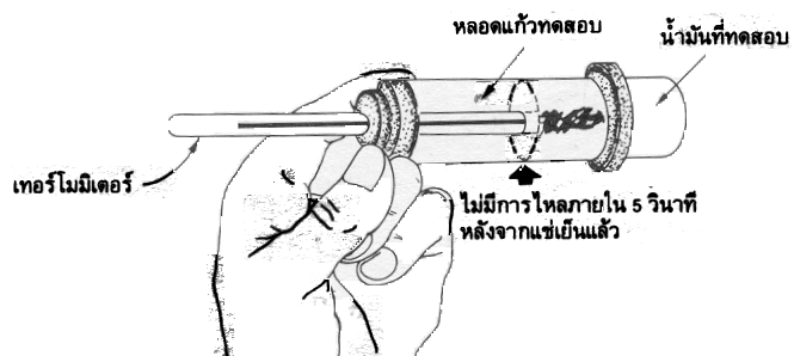
ภาพที่ 37 เครื่องมือที่ใช้ทดสอบจุดหมอกควันและจุดไหลเท



ภาพที่ 38 จุดหมอกควันของไบโอดีเซลซึ่งเริ่มปรากฏในไบโอดีเซล

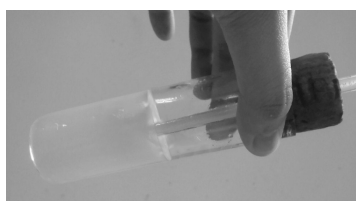
3.2 การวิเคราะห์หาจุดไหลเทของไบโอดีเซล

การวิเคราะห์หาจุดไหลเทของไบโอดีเซลทำได้โดยเทตัวอย่างไบโอดีเซลลงในหลอดแก้วทดสอบโดยเทให้ผิวขอบบนของตัวอย่างเท่ากับขีดบอกระดับของหลอดแก้ว และเสียบเทอร์โมมิเตอร์ผ่านจุกไม้เข้ากับหลอดแก้วทดสอบ โดยให้โคนกระเปาะของเทอร์โมมิเตอร์อยู่ต่ำกว่าระดับของตัวอย่าง 3 มิลลิเมตร จากนั้นให้ความเย็นแก่ตัวอย่างไบโอดีเซลตามมาตรฐาน ASTM D97 ทุก ๆ อุณหภูมิตัวอย่างไบโอดีเซลที่ลดลง 3 องศาเซลเซียส ให้ยกหลอดแก้วขึ้นจากอ่างทดสอบโดยเอียงหลอดแก้วในระนาบ สังเกตที่ผิวบนของตัวอย่างเริ่มแข็งตัวและไม่มีการไหลภายใน 5 วินาที ถือว่าอุณหภูมิ ณ จุดนี้ คือ จุดไหลเทของไบโอดีเซล วิธีการทดสอบจุดไหลเทของไบโอดีเซลแสดงดังภาพที่ 39 และจุดไหลเทของไบโอดีเซลแสดงดังภาพที่ 40



ภาพที่ 39 วิธีทดสอบจุกไฟ

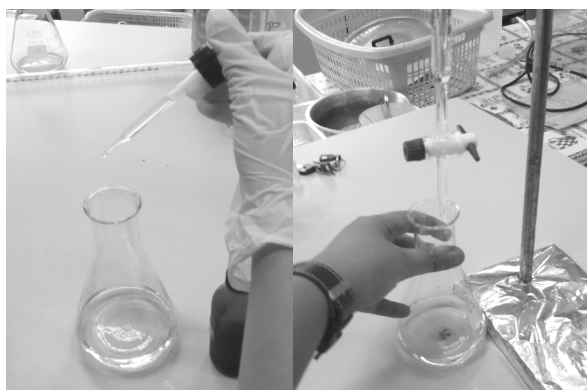
ที่มา: ประเสริฐ และคณะ (2544)



ภาพที่ 40 จุกไฟของไบโอดีเซล

4. การวิเคราะห์หาค่าความเป็นกรด

การวิเคราะห์หาค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลทำได้โดยชั่งน้ำหนักตัวอย่างไบโอดีเซลที่ต้องการทดสอบจำนวน 3 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ เติมน้ำ 2-โพรพานอลปริมาตร 30 มิลลิลิตรลงในตัวอย่าง หยดสารละลายฟีนอล์ฟทาไลน์จำนวน 2-3 หยด นำสารละลายที่ได้มาไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ จนสารละลายเปลี่ยนเป็นสีชมพูจาง ๆ คงที่ประมาณ 30 วินาที จึงถือเป็นจุดยุติ ทำการบันทึกปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เพื่อนำไปคำนวณหาค่าความเป็นกรด ภาพที่ 41 และภาพที่ 42 แสดงวิธีการทดสอบค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซล ซึ่งวิธีการคำนวณสามารถศึกษาได้จากภาคผนวก ค



ภาพที่ 41 วิธีการทดสอบค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซล



ภาพที่ 42 จุดยุติการไทเทรต สารละลายเปลี่ยนเป็นสีชมพูจาง ๆ คงที่ ประมาณ 30 วินาที

ผลและวิจารณ์

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการปรับปรุงเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ โดยศึกษาหาชนิดและปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระหรือสารเติมแต่งสำเร็จรูปที่มีความเหมาะสมต่อการปรับปรุงเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ สารต้านอนุมูลอิสระ 3 ชนิดที่ใช้ในการศึกษา คือ PG, BHA และ TBHQ สารเติมแต่งสำเร็จรูป 3 ชนิดที่ใช้ในการศึกษา คือ ZEP, NITROX และ L-power นอกจากนี้ยังได้ศึกษาเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสารต้านอนุมูลอิสระหรือสารเติมแต่งสำเร็จรูปที่เหมาะสม หลังจากจัดเก็บไบโอดีเซลไว้เป็นระยะเวลา 20 สัปดาห์ รวมทั้งทำการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของไบโอดีเซล เช่น ความหนืดที่ 40 องศาเซลเซียส จุดหมอกควัน จุดไหลเท และจุดวาบไฟ

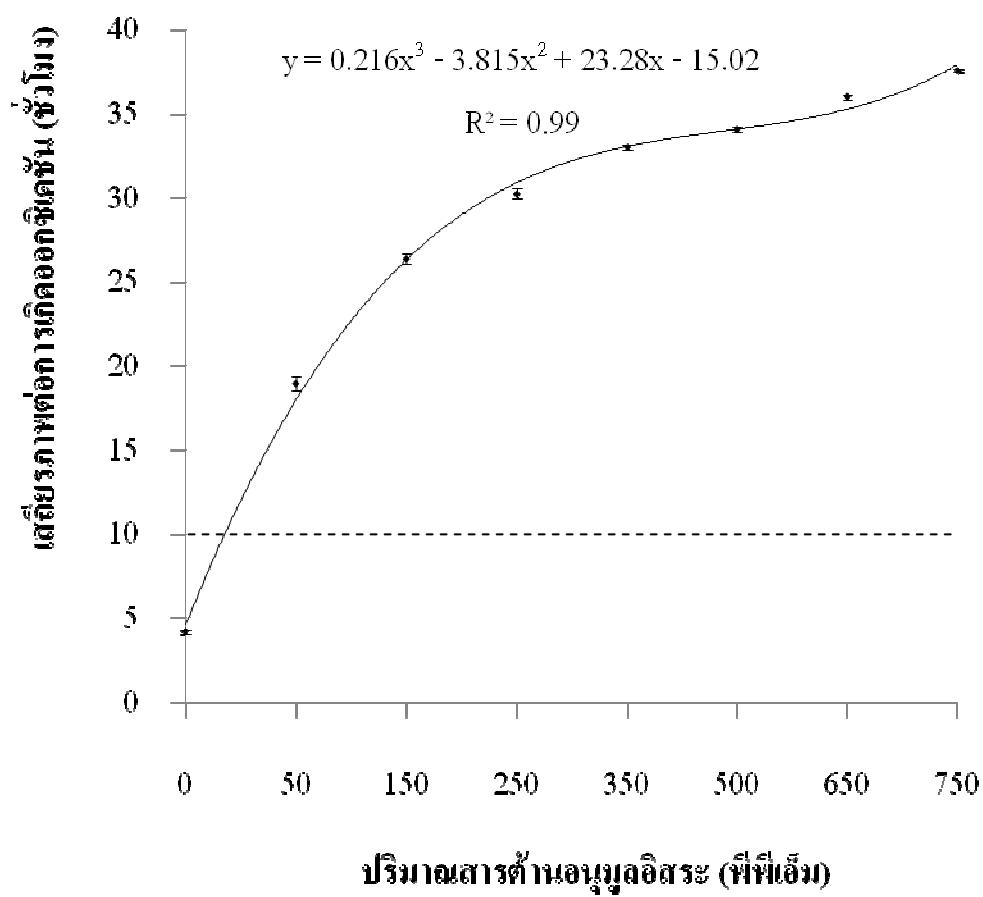
1. การศึกษาเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสารต้านอนุมูลอิสระลงไป

จากงานวิจัยของ Xin *et al.* (2008) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของสารต้านอนุมูลอิสระที่มีผลต่อเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมัน 3 ชนิดคือ น้ำมันปาล์ม น้ำมันดอกทานตะวัน และ น้ำมันเรพซิด สารต้านอนุมูลอิสระ 2 ชนิดที่ใช้ศึกษา คือ Diphenyl-P-phenylenediamine (DPD) และ PG ในช่วงปริมาณความเข้มข้นตั้งแต่ 0 ถึง 5,000 พีพีเอ็ม พบว่า PG เป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่เหมาะสมที่สุดสำหรับไบโอดีเซลจากทั้ง 3 ชนิด นอกจากนี้งานวิจัยของ ขวิดา (2551) ได้ทำการศึกษาหาชนิดและปริมาณของสารต้านอนุมูลอิสระที่เหมาะสมกับเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ สารต้านอนุมูลอิสระ 3 ชนิดที่ใช้ในการศึกษา คือ BHA BHT และ Kerobit® TP 26 ในปริมาณความเข้มข้นตั้งแต่ 50 ถึง 350 พีพีเอ็ม พบว่า BHA เป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่ใช้ในปริมาณความเข้มข้นน้อยที่สุดคือ 200 พีพีเอ็ม ที่ให้ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันเป็นไปตามมาตรฐาน EN 14112 ซึ่งในขณะนั้นกำหนดค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันเท่ากับ 6 ชั่วโมง และงานวิจัยของ Bondiolo *et al.* (2003) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของสารต้านอนุมูลอิสระที่มีผลต่อเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันเรพซิด สารต้านอนุมูลอิสระ 2 ชนิดที่ใช้ในการศึกษา คือ TBHQ และ PG ในปริมาณความเข้มข้น 400 พีพีเอ็ม พบว่า TBHQ เป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่มีความเหมาะสมที่สุดกับไบโอดีเซลจากน้ำมันเรพซิด ด้วยเหตุนี้จึงได้เลือกสารต้านอนุมูลอิสระ 3 ชนิดมาใช้ในการวิจัยนี้

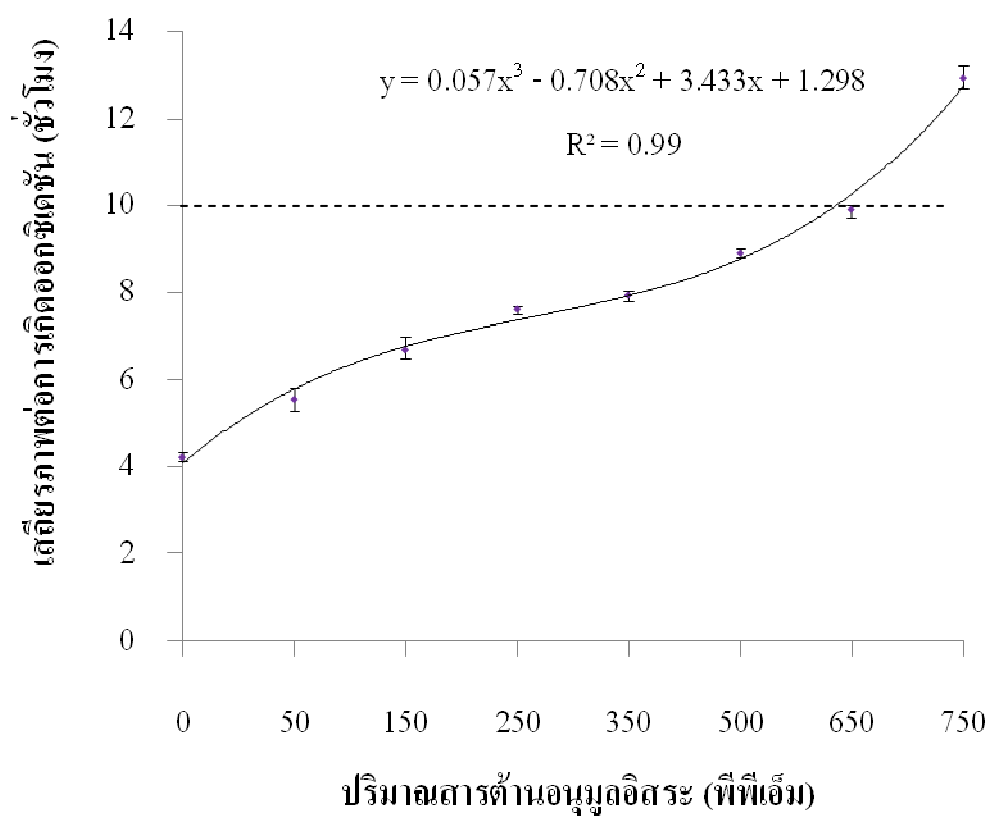
ได้แก่ PG BHA และTBHQ โดยทำการเติมสารต้านอนุมูลอิสระแต่ละชนิดลงในไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำในปริมาณความเข้มข้นตั้งแต่ 0 ถึง 750 พีพีเอ็ม เพื่อศึกษาหาชนิดและปริมาณของสารต้านอนุมูลอิสระที่มีความเหมาะสมต่อการปรับปรุงเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ

ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 43 44 และ 45 พบว่า ไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำมีค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันเท่ากับ 4.21 ชั่วโมง ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐาน EN14112 ที่กำหนดคือ 10 ชั่วโมง ไบโอดีเซลที่เติมสาร PG BHA และTBHQ จะมีค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันเพิ่มขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของสารต้านอนุมูลอิสระที่ใช้ เนื่องจากการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของสารต้านอนุมูลจะเท่ากับ การเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนซึ่งจะไปจับกับสารอนุมูลอิสระในไบโอดีเซลที่อยู่ในรูปเปอร์ออกไซด์ มีผลให้ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซลลดลง (Ramos *et al.*, 2007) เมื่อเปรียบสารต้านอนุมูลอิสระทั้ง 3 ชนิด พบว่า PG เป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่ใช้ในปริมาณน้อยสุด คือ 50 พีพีเอ็ม เพื่อให้ไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำมีค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันมากกว่า 10 ชั่วโมง โดยค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซล เพิ่มขึ้นเป็น 18.93 ชั่วโมง และมีค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันเพิ่มขึ้นเป็น 37.55 ชั่วโมง เมื่อเติมในปริมาณความเข้มข้น 750 พีพีเอ็ม ในขณะที่ BHA และ TBHQ เป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่ใช้ในปริมาณความเข้มข้นน้อยที่สุดคือ 750 พีพีเอ็ม และ 500 พีพีเอ็ม ซึ่งทำให้ไบโอดีเซลจากสบู่ดำมีค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันมากกว่า 10 ชั่วโมง คือ 12.91 และ 11.90 ชั่วโมง ตามลำดับ

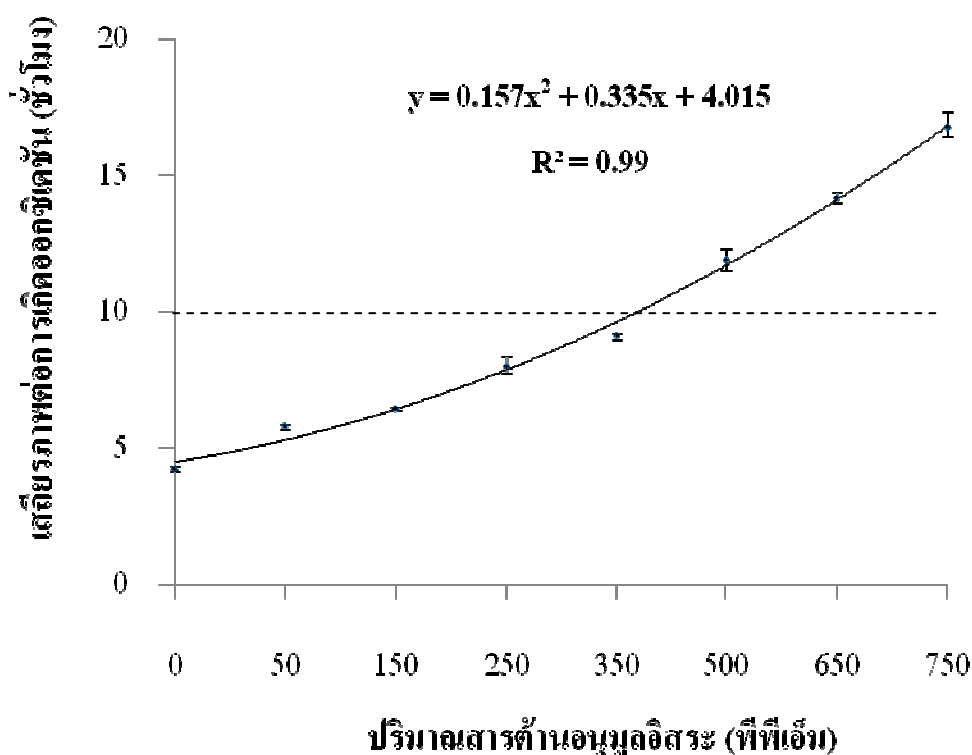
การปรับปรุงเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลทำได้โดยการเติมสารต้านอนุมูลอิสระที่เหมาะสมลงในไบโอดีเซลเพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐานตามวิธีทดสอบ EN 14112 การทดลองนี้พบว่า PG เป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ เมื่อเติมในปริมาณความเข้มข้นตั้งแต่ 50 พีพีเอ็ม ขึ้นไป โดยสารต้านอนุมูลอิสระสามารถยับยั้งหรือลดความว่องไวในการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลได้ เนื่องจากสารต้านอนุมูลอิสระจะให้ไฮโดรเจนแก่อนุมูลอิสระที่อยู่ในรูปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเกิดจากการแตกตัวของกรดไขมันไม่อิ่มตัวในไบโอดีเซล ทำให้อนุมูลอิสระนั้นเสถียรและไม่สามารถไปจับกับโมเลกุลอื่น นอกจากนี้สารต้านอนุมูลอิสระที่ให้ไฮโดรเจนแล้วยังสามารถจับกับอนุมูลอิสระอีกตัวเป็นการยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซล เป็นผลให้เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันเพิ่มขึ้น (Knothe, 2007; Ramos *et al.*, 2007; Sarin *et al.*, 2007)



ภาพที่ 43 เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำเมื่อเติมสาร PG ในปริมาณความเข้มข้น 0 ถึง 750 พีพีเอ็ม



ภาพที่ 44 เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำเมื่อเติมสาร BHA ในปริมาณความเข้มข้น 0 ถึง 750 พีพีเอ็ม



ภาพที่ 45 เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำเมื่อเติมสาร TBHQ ในปริมาณความเข้มข้น 0 ถึง 750 พีพีเอ็ม

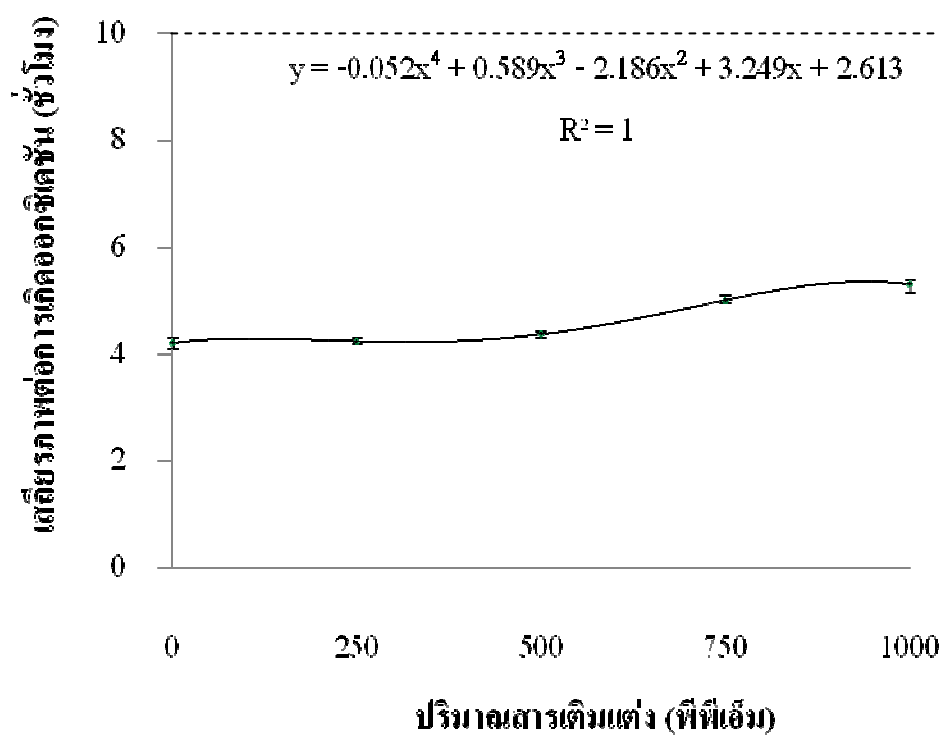
ผลการทดลองข้างต้นพบว่า มีความแนวโน้มเดียวกับงานวิจัยของ Dunn (2005) ซึ่งศึกษาอิทธิพลของสารต้านอนุมูลอิสระที่มีผลต่อเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันถั่วเหลือง พบว่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจะเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณความเข้มข้นของสาร BHA TBHQ และ PG เพิ่มขึ้น จนถึงความเข้มข้น 1,000 พีพีเอ็ม และงานวิจัยของชวิตา (2551) ซึ่งศึกษาหาชนิดและปริมาณของสารต้านอนุมูลอิสระที่เหมาะสมกับเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ พบว่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของสาร BHA ที่เติมลงไป

2. การศึกษาเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสารเติมแต่งสำเร็จรูป

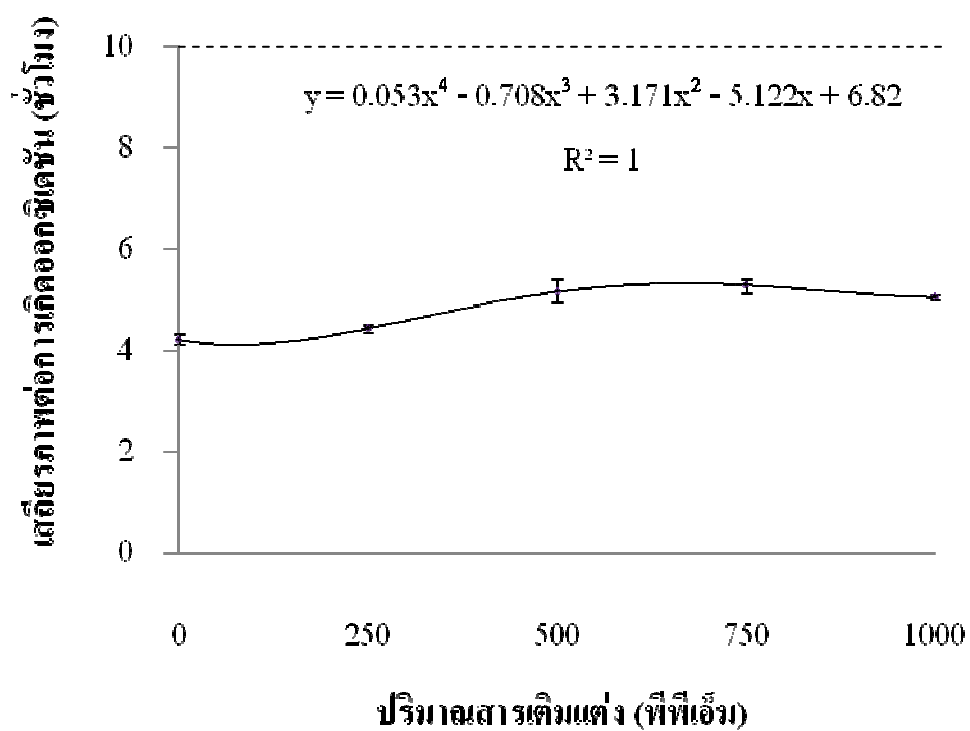
การศึกษาเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสารเติมแต่งสำเร็จรูป 3 ชนิด คือ ZEP NITROX และ L-power การปรับปรุงเสถียรภาพต่อการเกิด

ออกซิเดชันจำเป็นต้องใช้สารต้านอนุมูลอิสระซึ่งมีราคาค่อนข้างสูง และต้องใช้เวลาประมาณ 1 เดือนเพื่อส่งนำเข้าจากต่างประเทศ ในขณะที่สารเติมแต่งสำเร็จรูปมีราคาไม่สูง และสามารถหาซื้อได้ง่ายตามห้างสรรพสินค้าหรือตามสถานีเติมน้ำมันทั่วไปในประเทศไทย ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงได้ทำการศึกษาเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลเมื่อเติมสารเติมแต่งสำเร็จรูป

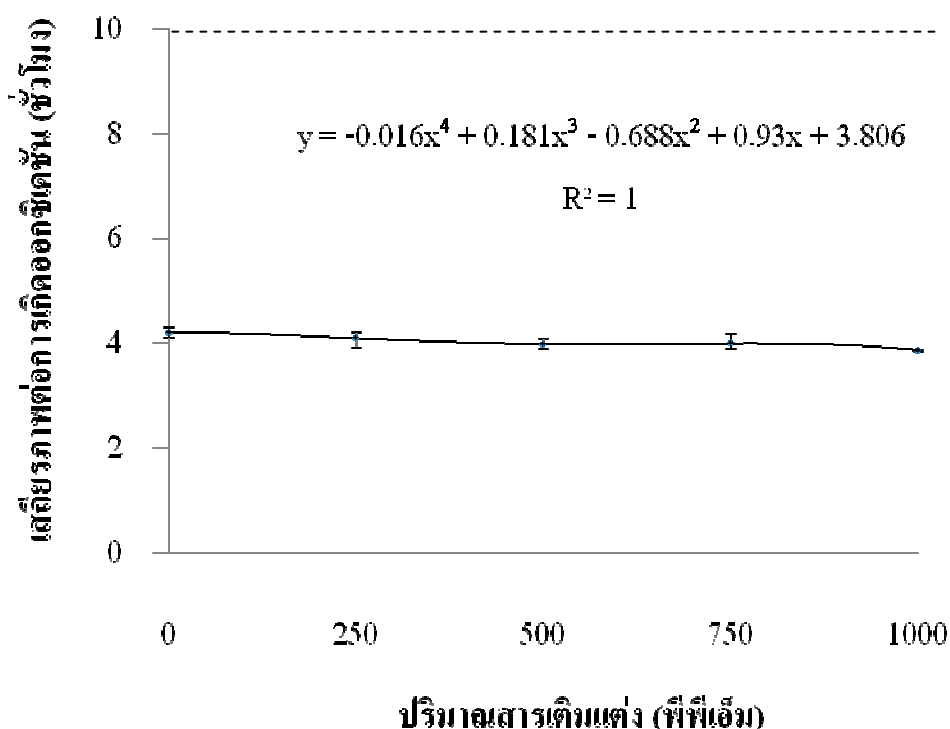
ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 46 47 และ 48 พบว่า การเติมสารเติมแต่งสำเร็จรูปทั้ง 3 ชนิดลงในไบโอดีเซลในช่วงปริมาณความเข้มข้น 0 ถึง 1,000 พีพีเอ็ม มีผลน้อยมากต่อเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน ไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติม ZEP พบว่า ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของสารเติมแต่งจาก 0 ถึง 1,000 พีพีเอ็ม กล่าวคือ ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลมีค่าเท่ากับ 4.25 4.37 5.00 และ 5.30 ชั่วโมง เมื่อเติมในปริมาณความเข้มข้น 250 500 750 และ 1,000 พีพีเอ็ม ตามลำดับ ซึ่งค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันทั้งหมดนี้มีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน EN 14112 ที่กำหนดคือที่ 10 ชั่วโมง ไบโอดีเซลจากสบู่ดำที่เติม NITROX พบว่า ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงปริมาณความเข้มข้น 0 ถึง 750 พีพีเอ็ม และลดลงที่ปริมาณความเข้มข้น 1,000 พีพีเอ็ม โดยค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันทั้งหมดที่ได้ในช่วงความเข้มข้นนี้ มีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน EN14112 คือมีค่าเท่ากับ 4.44 5.16 5.29 และ 5.05 ชั่วโมง เมื่อเติมในปริมาณความเข้มข้น 250 500 750 และ 1,000 พีพีเอ็ม ตามลำดับ ไบโอดีเซลจากสบู่ดำที่เติม L-power พบว่า ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันลดลงเล็กน้อยในช่วงความเข้มข้น 0 ถึง 1,000 พีพีเอ็ม ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลมีค่าเท่ากับ 4.11 4.00 4.01 และ 3.87 ชั่วโมง เมื่อเติมในปริมาณความเข้มข้น 250 500 750 และ 1,000 พีพีเอ็ม ตามลำดับ ซึ่งค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันทั้งหมดที่ได้ล้วนต่ำกว่ามาตรฐาน EN14112 ที่กำหนด นอกจากนี้การเพิ่มความเข้มข้นของสาร L-power แล้วส่งผลให้ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันลดลง อาจเนื่องมาจากสาร L-power ไปกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซล ด้วยเหตุนี้จึงสรุปได้ว่า สารเติมแต่งสำเร็จรูปทั้ง 3 ชนิด คือ ZEP NITROX และ L-power ไม่เหมาะสมต่อการปรับปรุงเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ



ภาพที่ 46 เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำเมื่อเติมสาร ZEP ในปริมาณความเข้มข้น 0 ถึง 1,000 พีพีเอ็ม



ภาพที่ 47 เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอโอดีเซลจากน้ำมันสับดูดำเมื่อเติมสาร NITROX ในปริมาณความเข้มข้น 0 ถึง 1,000 พีพีเอ็ม



ภาพที่ 48 เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำเมื่อเติมสาร L-power ในปริมาณความเข้มข้น 0 ถึง 1,000 พีพีเอ็ม

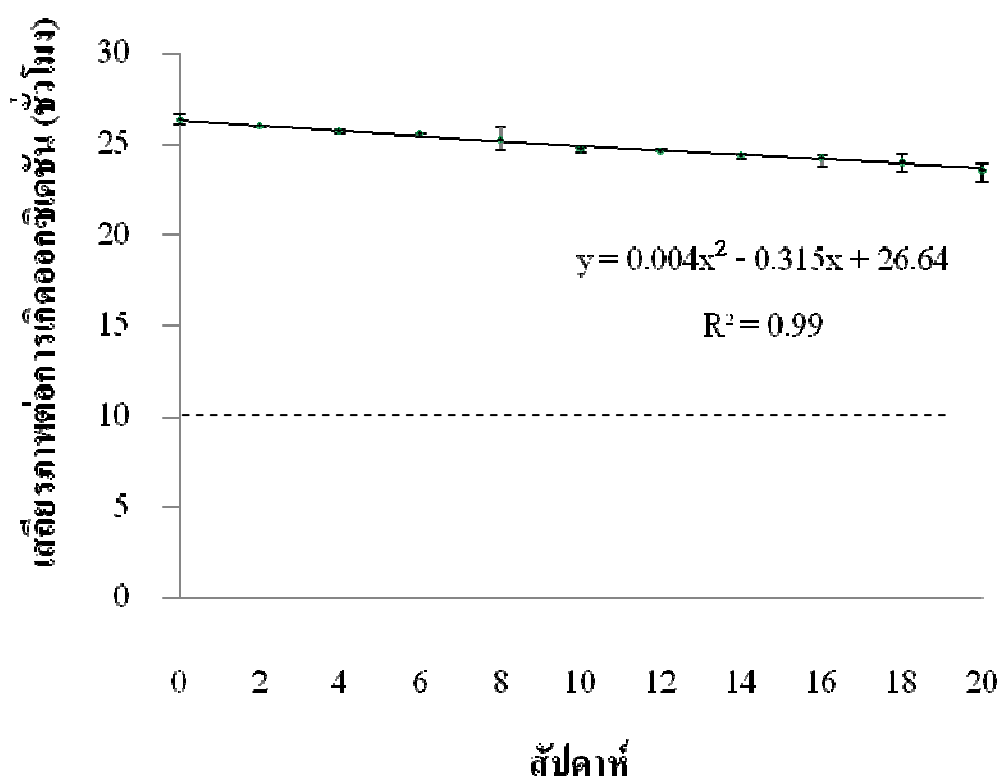
3. การศึกษาเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลที่เติมสารต้านอนุมูลอิสระหลังจากจัดเก็บไบโอดีเซลเป็นระยะเวลานาน

เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลเมื่อทำการจัดเก็บไบโอดีเซลเป็นระยะเวลานานเป็นสิ่งที่ต้องคำนึง เนื่องจากในทางปฏิบัติ ไบโอดีเซลต้องผ่านการขนส่งและการจัดเก็บเป็นระยะเวลานานก่อนนำไปใช้งานจริง โดยเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซลจะมีค่าลดลงตามระยะเวลาการจัดเก็บไบโอดีเซล ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องศึกษาเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลเมื่อทำการจัดเก็บเป็นระยะเวลานาน ซึ่งจะช่วยให้ทราบถึงแนวโน้มในการลดลงของเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซล และทราบถึงระยะเวลาในการจัดเก็บไบโอดีเซลที่เหมาะสม ซึ่งยังคงให้เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน คือ มากกว่า 10 ชั่วโมง

จากการวิจัยในหัวข้อที่ผ่านมา พบว่า PG เป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่เหมาะสมที่สุด สำหรับ

การปรับปรุงเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงได้เลือก PG สำหรับเติมในไบโอดีเซลจากสบู่ดำ เพื่อศึกษาเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซลที่ลดลงตามระยะเวลาการจัดเก็บของไบโอดีเซล โดยไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ จะถูกเติม PG ในปริมาณความเข้มข้น 150 พีพีเอ็ม ซึ่งให้ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซล 26.35 ชั่วโมง ผู้วิจัยเลือกเติม PG ในปริมาณความเข้มข้น 150 พีพีเอ็ม เนื่องจากเป็นปริมาณความเข้มข้นที่น้อยสุดรองจาก 50 พีพีเอ็ม ซึ่งยังให้ค่าเสถียรภาพมากกว่าค่ามาตรฐาน EN14412 มาก เพราะหากเลือกใช้ PG ในปริมาณความเข้มข้น 50 พีพีเอ็ม เมื่อทำการจัดเก็บไบโอดีเซลเป็นระยะเวลานาน อาจทำให้ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันลดลงต่ำกว่ามาตรฐานได้ การศึกษาเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซลที่ลดลงตามระยะเวลาการจัดเก็บของไบโอดีเซลนั้น ตัวอย่างจะถูกเก็บในขวดสีชา ที่อุณหภูมิห้อง และจัดเก็บในที่มืด เป็นระยะเวลา 20 สัปดาห์ ตัวอย่างจะถูกวิเคราะห์เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซลทุกๆ 2 สัปดาห์ ตลอดระยะเวลาการจัดเก็บไบโอดีเซล

ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 49 พบว่า เมื่อเริ่มการทดลอง (สัปดาห์ที่ 0) เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร PG ในความเข้มข้น 150 พีพีเอ็ม มีค่า 26.35 ชั่วโมง และเมื่อทำการจัดเก็บตัวอย่างเป็นระยะเวลานาน 20 สัปดาห์ พบว่า ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจะมีค่าลดลงอย่างสม่ำเสมอ ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลในสัปดาห์ที่ 4 8 12 16 และ 20 มีค่าเท่ากับ 25.72 25.23 24.63 24.22 และ 23.59 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งสรุปได้ว่าไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติม PG ในปริมาณความเข้มข้น 150 พีพีเอ็ม หลังทำการจัดเก็บไบโอดีเซลเป็นระยะเวลา 20 สัปดาห์ จะให้ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลลดลง 10.47 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับตอนเริ่มต้นการที่เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจะมีค่าลดลงเมื่อถูกจัดเก็บไบโอดีเซลไว้เป็นระยะเวลานาน เนื่องมาจาก การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซลจะทำให้ เกิดสารประกอบจำพวก กรด อัลดีไฮด์ และแอลกอฮอล์ ซึ่งเป็นเหตุให้เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลลดลง (Bouaid *et al.*, 2007)



ภาพที่ 49 เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร PG ในปริมาณความเข้มข้น 150 พีพีเอ็ม ระหว่างจัดเก็บไบโอดีเซลเป็นระยะเวลา 20 สัปดาห์

ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ผลสอดคล้องกับ งานวิจัยของ ชวิกา (2551) ซึ่งศึกษาเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำเมื่อทำการจัดเก็บเป็นระยะเวลา 10 สัปดาห์ พบว่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำซึ่งเติม BHA ในความเข้มข้น 200 พีพีเอ็ม ในสัปดาห์ที่ 10 มีค่าลดลง 21.46 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับตอนเริ่มต้น และเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลน้ำมันสบู่ดำและไบโอดีเซลน้ำมันมะพร้าว ในอัตราส่วนผสมร้อยละเท่ากับ 60:40 และเติมสาร BHA ในปริมาณความเข้มข้น 50 พีพีเอ็ม พบว่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลในสัปดาห์ที่ 10 มีค่าลดลง 9.27 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับตอนเริ่มต้น นอกจากนี้งานวิจัยของ Prankl (1998) ได้ทำการศึกษาเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันเรพซิดเมื่อทำการจัดเก็บเป็นระยะเวลา 14 สัปดาห์ พบว่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลลดลง 70 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับตอนเริ่มต้น

4. ลักษณะสมบัติของไบโอดีเซล

งานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจสอบลักษณะคุณสมบัติทางกายภาพต่างๆของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ โดยเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานยุโรป EN14214 คุณสมบัติทางกายภาพของไบโอดีเซลที่ถูกพิจารณาคือ ความหนืดที่ 40 องศาเซลเซียส จุดหมอกควัน จุดไหลเท จุดวาบไฟ ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด และปริมาณเมทิลเอสเทอร์

จากผลการวิจัย พบว่า ไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติม PG ในปริมาณความเข้มข้น 150 และ 250 พีพีเอ็ม ให้ค่าความหนืด 40 องศาเซลเซียสลดลงจากเดิมเล็กน้อย โดยยังคงให้ค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน การที่เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของ PG แล้วทำให้ค่าความหนืดลดลงเล็กน้อย อาจเนื่องมาจาก การเพิ่มปริมาณของสารต้านอนุมูลอิสระทำให้ ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซลลดลง ส่งผลให้เกิดสารจำพวกกรด อัลดีไฮด์ และแอลกอฮอล์ลดลง ทำให้ความหนืดของไบโอดีเซลมีค่าลดลงด้วย ในขณะที่การเติม PG ในปริมาณ 150 และ 250 พีพีเอ็ม ในไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำไม่ส่งผลต่อค่าจุดหมอกควัน ค่าจุดไหลเท ค่าความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส และค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซล สำหรับจุดวาบไฟของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำมีค่าเท่ากับ 185 องศาเซลเซียสซึ่งมีค่าตามมาตรฐาน การเติม PG ในปริมาณความเข้มข้น 150 และ 250 พีพีเอ็ม ส่งผลให้ค่าจุดวาบไฟของไบโอดีเซลลดลงเล็กน้อย เนื่องจากปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณสารประกอบแอลกอฮอล์ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซลมีค่าลดลง ทำให้จุดวาบไฟของไบโอดีเซลลดลง และการเติม PG ไม่ส่งผลต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์ โดยลักษณะสมบัติต่างๆ ที่ได้จากไบโอดีเซลสบู่ดำ เมื่อเติม PG ความเข้มข้น 150 และ 250 พีพีเอ็ม แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ลักษณะสมบัติต่างๆ ที่ได้จากไบโอดีเซลสบู่ดำ เมื่อเติม PG ความเข้มข้น 150 และ 250 พีพีเอ็ม

ลักษณะสมบัติ	มาตรฐาน ไบโอดีเซล EN 14214	ไบโอดีเซล สบู่ดำ	ไบโอดีเซลสบู่ดำ เติม PG 150 พีพีเอ็ม	ไบโอดีเซลสบู่ดำ เติม PG 250 พีพีเอ็ม
ความหนืดที่ 40 องศาเซลเซียส (มิลลิเมตร ² ต่อวินาที)	3.5 – 5.0	4.43	4.40	4.38
จุดหมอกควัน (องศาเซลเซียส)	-	5	5	5
จุดไหลเท (องศาเซลเซียส)	-	-2	-2	-2
จุดวาบไฟ (องศา เซลเซียส) (องศาเซลเซียส)	ไม่ต่ำกว่า 120	185	190	190
ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 องศา เซลเซียส (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)	ไม่ต่ำกว่า 860 และไม่สูงกว่า 900	876.0	875.5	875.5
ค่าความเป็นกรด (มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮ ดรอกไซด์ต่อกรัม)	ไม่สูงกว่า 0.5	0.35	0.35	0.35
ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	ไม่ต่ำกว่า 96.5	100	100	100

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาศึกษาหาชนิดและปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระหรือสารเติมแต่งสำเร็จรูปที่มีความเหมาะสมสำหรับไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำเพื่อเพิ่มเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซล รวมทั้งศึกษาเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสารต้านอนุมูลอิสระหลังจากจัดเก็บไว้เป็นระยะเวลา 20 สัปดาห์ และทำการตรวจสอบลักษณะสมบัติของไบโอดีเซล จากการทดลองสามารถสรุปผลได้ ดังนี้

1. ไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำในงานวิจัยนี้มีค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลหรือค่า Induction time เท่ากับ 4.21 ชั่วโมง ซึ่งไม่เป็นไปตามมาตรฐาน EN14112 ที่กำหนดให้มีค่ามากกว่า 6 ชั่วโมง การเติมสารต้านอนุมูลอิสระที่เหมาะสมในไบโอดีเซลเป็นวิธีการที่ช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซลได้ โดยจากงานวิจัยนี้ PG เป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่ใช้ในปริมาณความเข้มข้นน้อยที่สุดคือ 50 พีพีเอ็ม ซึ่งทำให้ไบโอดีเซลจากสบู่ดำมีค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันมากกว่า 6 ชั่วโมง คือ 18.93 ชั่วโมง เป็นไปเป็นตามมาตรฐาน EN14112 ในขณะที่ BHA และ TBHQ เป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่ใช้ในปริมาณความเข้มข้นน้อยที่สุดคือ 150 พีพีเอ็มเท่ากัน ซึ่งทำให้ไบโอดีเซลจากสบู่ดำมีค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันมากกว่า 6 ชั่วโมง คือ 6.69 และ 6.43 ชั่วโมง ตามลำดับ ในการวิจัยนี้ PG เป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับปรับปรุงเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ สารต้านอนุมูลอิสระที่มีความเหมาะสมสำหรับปรับปรุงเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำรองลงมาคือ TBHQ และ BHA

2. สารเติมแต่งสำเร็จรูปทั้ง 3 ชนิด คือ ZEP NITROX และ L-power ไม่เหมาะสมต่อการปรับปรุงเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ

3. การจัดเก็บไบโอดีเซลเป็นระยะเวลานานหลังจากการผลิตไบโอดีเซล ส่งผลให้เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลลดลงตามระยะการจัดเก็บ ในตอนเริ่มต้นของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติม PG ในปริมาณความเข้มข้น 150 พีพีเอ็ม มีเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันเท่ากับ 26.35 ชั่วโมง หลังจากทำการเก็บไบโอดีเซลในสภาวะปราศจากแสงและอุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) เป็นระยะเวลา 20 สัปดาห์แล้วพบว่า เสถียรภาพต่อการเกิด

ออกซิเดชันของไบโอดีเซลลดลงเป็น 23.59 ชั่วโมง หรือลดลง 10.47 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับตอนเริ่มต้น

4. จากการตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ และไบโอดีเซลที่เติม PG พบว่าการเติมสารต้านอนุมูลอิสระ PG ในปริมาณความเข้มข้น 150 และ 250 พีพีเอ็ม ในไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ พบว่า ค่าจุดหมอกควัน ค่าจุดไหลเท และค่าความเป็นกรดมีค่าเท่าเดิม ส่วนค่าความหนืดที่ 40 องศาเซลเซียสและค่าความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส มีค่าลดลงเล็กน้อย ในขณะที่จุดวาบไฟมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า การเติม PG ในไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำในปริมาณความเข้มข้น 150 และ 250 พีพีเอ็ม ไม่ส่งผลต่อลักษณะสมบัติอื่นๆ ที่สำคัญ นอกเหนือจากการปรับปรุงเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซล

ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยนี้มีข้อเสนอแนะและแนวทางที่ควรศึกษาต่อ ดังนี้

1. เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันเป็นคุณสมบัติที่สำคัญสำหรับไบโอดีเซล ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาปัจจัยอื่นๆ ที่มีอิทธิพลต่อเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซล เช่น ขนาดและวัสดุของภาชนะที่ใช้บรรจุไบโอดีเซลหลังการผลิต การเก็บไบโอดีเซลไว้ในที่อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูง การเก็บไบโอดีเซลไว้ในที่มีแสงและปราศจากแสง การเก็บไบโอดีเซลในลักษณะปริมาณเต็มภาชนะและปริมาณไม่เต็มภาชนะ การเก็บไบโอดีเซลในภาชนะเปิดฝาและปิดฝา การเติมสารต้านอนุมูลอิสระก่อนขั้นตอนดัดน้ำจากไบโอดีเซล การเติมสารเคมีที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH)

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

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

กำธน สินธวานนท์. 2538. พืชน้ำมัน. สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน เล่ม 19.

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

ชวิดา ปัญญาสุรยุธ. 2551. การปรับปรุงความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าว. วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ทัศนีย์ สวัสดิ์พาณิชย์. 2550. การหาสภาวะที่เหมาะสมทางสถิติของการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

บริษัท บางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน). 2550 ก. น้ำมันไบโอดีเซล คืออะไร. ไบโอดีเซล. แหล่งที่มา: <http://www.bangchak.co.th/th/energyDetail.asp?id=11>, 17 พฤศจิกายน 2551.

_____. 2550 ข. วัตถุดิบที่ใช้ผลิตไบโอดีเซล. ไบโอดีเซล. แหล่งที่มา: <http://www.bangchak.co.th/th/energyDetail.asp?id=14>, 17 พฤศจิกายน 2551.

ประเสริฐ เทียนนิมิตร, ขวัญชัย สันทิพย์สมบูรณ์ และปานเพชร ชินินทร. 2544. เชื้อเพลิงและสารหล่อลื่น. บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด, กรุงเทพฯ.

ศูนย์ส่งเสริมและพัฒนาอาชีพการเกษตร จังหวัดชัยนาท (จักรกลเกษตร). 2548. สบู่ดำ. แหล่งที่มา: <http://aopdm01.doae.go.th/data/physicnut21.htm>, 12 สิงหาคม 2551.

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.). 2550. **การผลิตและการตรวจสอบมาตรฐานไบโอดีเซลเบื้องต้น**. แหล่งที่มา: www.tistr.or.th, 11 มิถุนายน 2551.

สำนักคุณภาพน้ำมันเชื้อเพลิง. 2549. การพัฒนาน้ำมันเชื้อเพลิง และพลังงานทางเลือกที่ใช้กับเครื่องยนต์. ใน **การประชุมวิชาการ The 12 th Annual Fuels & Lubes Asia Conference**. ณ เขตการบริหารพิเศษ ชองกง, ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน.

สมาคมเครื่องจักรกลไทย, 2549. **พืชสมุนไพร**. แหล่งที่มา:

www.mindustry.go.th/min/intro/province/Nongbualamphu/plan/biodiesel_01.htm, 10 มิถุนายน 2551.

สำนักงานอุตสาหกรรมจังหวัดหนองบัวลำภู. 2549. **พืชสมุนไพร**. แหล่งที่มา:

www.mindustry.go.th/min/intro/province/Nongbualamphu/plan/biodiesel_01.htm, 10 มิถุนายน 2551.

สุรพล ชามาตย์. 2549. **พืชสมุนไพร**. แหล่งที่มา:

www.mindustry.go.th/min/intro/province/Nongbualamphu/plan/biodiesel_01.htm, 10 มิถุนายน 2551.

อภิชัย. 2550. **L-POWER เม็ดประหยัดน้ำมัน**. แหล่งที่มา:

<http://www.checkprice.net/products/index.php/q/69147/>, 14 เมษายน 2552.

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

Bondioli, P., A. Gasparoli, L.D. Bella, S. Tagliabue, G. Toso, J. Fischer and A. Frohlich. 2003. Work Package 2 Storage Tests, pp. 17-25. In H. Prankl, ed. **Stability of Biodiesel**. Druckerei Queiser GmbH, Amstetten, Austria.

Bouaid, A., M. Martinez and J. Aracil. 2007. Long storage stability of biodiesel from vegetable and used frying oils. **Fuel**. 86: 2596-2602.

- Chhetri, A. B., M. S. Tango, S. M. Budge, K. C. Watts and M. R. Islam. 2008. Non-Edible Plant Oils as New Sources for Biodiesel Production. **Int. J. Mol. Sci.** 9: 169-180.
- Claude, L. 2009. **Lipid Peroxidation**. Available source:
<http://www.cyberlipid.org/perox/oxid0002.htm#1>, September 16, 2009.
- Domingos, A.K., E.B. Saad, W.D. Vechiatto, H.M. Wilhelm and L.P. Ramos. 2007. The Influence of BHA, BHT and TBHQ on the Oxidation Stability of Soybean Oil Ethyl Ester (Biodiesel). **J. Braz. Chem. Soc.** 18: 416-423.
- Dunn, R.O. 2005. Effect of antioxidants on the oxidative stability of methyl soyate (biodiesel). **Fuel Process. Technol.** 86: 1071– 1085.
- Faupel, K. and A. Kurki. 2002. **Biodiesel: a Brief Overview**.
 Available source: <http://www.attra.ncat.org/attrapub/biodiesel.html>, June 10, 2008.
- Freedman, B., E.H. Pryde and T.L. Mounts. 1984. Variables affecting the yields of fatty esters from transesterified vegetable oils. **JAOCs**. 61: 1638-1643.
- Freedman, B., R. O. Butterfield and E. H. Pryde. 1986. Transesterification kinetics of soybean oil. **JAOCs**. 63: 1375-1380.
- Frohlich, A. 2003. Natural Antioxidants, pp. 41-48. In H. Prankl, ed. **Stability of Biodiesel**. Druckerei Queiser GmbH, Amstetten, Austria.
- Knothe, G. 2007. Some aspects of biodiesel oxidative stability. **Fuel Process. Technol.** 88: 669-677.
- Kolb, T., U. Loyall and J. Schafer. 2002. Antioxidants. **Food Market. Technol.** 1-5

- Kywe, T. T. and M. M. Oo. 2009. Production of Biodiesel from Jatropha Oil (*Jatropha curcas*) in Pilot Plant. **Proc. Wrld. Acad. Scie.** 38: 2070-3740.
- Liang, Y.C., C.Y. May, 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 plam diesel. **Fuel**. 85: 867-870.
- Ma, F. and M.A. Hanna. 1999. Biodiesel production: a review. **Bioresour. Technol.** 70: 1-15.
- 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.
- Metrohm Ltd. 1999. **743 Racimat a new era in the determination of oxidative stability of fat and oil.** 743 Racimat. Available source: <http://www.offline-analysis.com/company/metrohminfo/1999>, September 25, 2009.
- Mittelbach, M., S. Schober, P. Bondioli, A. Gasparoli, F. Lacoste, L. Lagardere and A. Frohlich. 2003. Work Package 3 Antioxidants, pp. 27-40. *In* H. Prankl, ed. **Stability of Biodiesel.** Druckerei Queiser GmbH, Amstetten, Austria.
- National Renewable Energy Laboratory U.S. Department of Energy. 2005. **Characterization of Biodiesel Oxidation and Oxidation Production CRC project No. AVFL-2b.** 37
- Phillip P. 2006. **Jatropha.** Agroforestry trees in Timor-Leste. Available source: <http://www.ctahr.hawaii.edu/forestry/data/Timor/Jatropha.html>, August 26, 2009.
- Pramanik K. 2003. Properties and use of *Jatropha curcas* oil and diesel fuel blends in compression ignition engine. **Renew. Energ.** 28: 239-248.

- Prankl, H and H. Schindlbauer. 1998. Oxidation stability of fatty acid methyl esters, pp. 1-5. *In* **10th European Conference on Biomass for Energy and Industry**. 8-11 June 1998, Wurzburg, Germany.
- 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.
- Solomons, T. W. G. 2003. **Organic Chemistry**. 8th ed. John Wiley and Sons, Inc., United States of America.
- Steinbach, A. 2007. **A Comprehensive Analysis of Biodiesel**. Oxidative Stability Determination. Available source: www.biodieselmagazine.com. April 15, 2009
- Xin, J., H. Imahara and S. Saka. 2008. Oxidation stability of biodiesel fuel as prepared by supercritical methanol. **Fuel**. 87: 1807-1813.
- Zamora, A. 2005 a. **Common Fatty Acids**. Fats, Oils, Fatty Acids, Triglycerides. Available source: <http://www.scientificpsychic.com/fitness/fattyacids.html>, June 10, 2008.
- . 2005 b. **Fatty acid composition of some common edible fats and oils**. Fats, Oils, Fatty Acids, Triglycerides. Available source: <http://www.scientificpsychic.com/fitness/fattyacids1.html>, June 10, 2008.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
มาตรฐานไปโอดีเซล

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 มาตรฐานไปโอดีเซลตามมาตรฐาน DIN EN 14214 ของสหภาพยุโรป

ลักษณะสมบัติ	หน่วย	กรรมวิธีการทดสอบ	เกณฑ์	
			ต่ำสุด	สูงสุด
ปริมาณเอสเทอร์	ร้อยละโดยน้ำหนัก	pr EN 14103	96.5	
ความหนาแน่นที่ 15 องศาเซลเซียส	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร	EN ISO 3675	860	900
ความหนืดที่ 40 องศาเซลเซียส	มิลลิเมตร ² ต่อวินาที	EN ISO 3104	3.5	5.0
จุดวาบไฟ	องศาเซลเซียส	ISO/CD 3679	120	
ปริมาณกำมะถัน	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม			10
ปริมาณคาร์บอนตกค้าง (ที่ร้อยละ 10 ของการกลั่น)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	EN ISO 10370		0.3
ค่าซีเทน		EN ISO 5165	51.0	
ปริมาณซีเถ้า	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ISO 3987		0.02
ปริมาณน้ำ	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	EN ISO 12937		500
ปริมาณสารแปลกปลอม	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	EN 12662		24
การกัดกร่อนทองแดง (3 ชั่วโมง ที่ 50 องศาเซลเซียส)	เกณฑ์ตรวจสอบ	EN ISO 2160		
เสถียรภาพที่ 110 องศาเซลเซียส	ชั่วโมง	pr EN 14112	10.0	
ค่าความเป็นกรด	มิลลิกรัมโพแทสเซียม-ไฮดรอกไซด์ต่อกรัม	pr EN 14104		0.5
ค่าไอโอดีน		pr EN 14111		120
เอสเทอร์ชนิดไลโนลินิก	ร้อยละโดยน้ำหนัก	pr EN 14103		12
เอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัว	ร้อยละโดยน้ำหนัก			1
เมทานอล	ร้อยละโดยน้ำหนัก	pr EN 14110		0.2
โมนอกลิเซอไรด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก	pr EN 14105		0.6
ไดโนกลีเซอไรด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก	pr EN 14105		0.2
ไตรโนกลีเซอไรด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก	pr EN 14105		0.2

ที่มา: คณะกรรมการพลังงาน (2545)

ตารางผนวกที่ ก3 ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรด
ไขมัน พ.ศ. 2548

รายการ	ลักษณะสมบัติ	วิธีทดสอบ	ข้อกำหนด
1	เมทิลเอสเทอร์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	EN 14103	ไม่ต่ำกว่า 96.5
2	ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	ASTM D 1298	ไม่ต่ำกว่า 860 และ ไม่สูงกว่า 900
3	ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (เซนติสโตกส์)	ASTM D 445	ไม่ต่ำกว่า 3.5 และ ไม่สูงกว่า 5.0
4	จุดวาบไฟ (องศาเซลเซียส)	ASTM D 93	ไม่ต่ำกว่า 120
5	กำมะถัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ASTM D 2622	ไม่สูงกว่า 0.0010
6	กากถ่าน (ร้อยละ 10 ของกากที่เหลือจากการ กลั่น) (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ASTM D 4530	ไม่สูงกว่า 0.30
7	จำนวนซีเทน	ASTM D 613	ไม่ต่ำกว่า 51
8	เถ้าซัลเฟต (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ASTM D 874	ไม่สูงกว่า 0.02
9	น้ำ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ASTM D 2709	ไม่สูงกว่า 0.050
10	สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ASTM D 5452	ไม่สูงกว่า 0.0024
11	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง	ASTM D 130	ไม่สูงกว่าหมายเลข 1
12	เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส (ชั่วโมง)	EN 14112	ไม่ต่ำกว่า 10
13	ค่าความเป็นกรด (มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม)	ASTM D 664	ไม่สูงกว่า 0.50
14	ค่าไอโอดีน (กรัมไอโอดีนต่อ 100 กรัม)	EN 14111	ไม่สูงกว่า 120
15	กรดลิโนลินิกเมทิลเอสเทอร์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	EN 14103	ไม่สูงกว่า 12.0
16	เมทานอล (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	EN 14110	ไม่สูงกว่า 0.20
17	โมนอกลิเซอไรด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	EN 14105	ไม่สูงกว่า 0.80
18	ไดกลีเซอไรด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	EN 14105	ไม่สูงกว่า 0.20
19	ไตรกลีเซอไรด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	EN 14105	ไม่สูงกว่า 0.20

ตารางผนวกที่ ก3 (ต่อ)

รายการ	ลักษณะสมบัติ	วิธีทดสอบ	ข้อกำหนด
20	กลีเซอรินอิสระ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	EN 14105	ไม่สูงกว่า 0.20
21	กลีเซอรินทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	EN 14105	ไม่สูงกว่า 0.25
22	โลหะกลุ่มที่ 1 (โซเดียมและโพแทสเซียม) (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	EN 14108 และ EN14109	ไม่สูงกว่า 5.0
	โลหะกลุ่มที่ 2 (แคลเซียมและแมกนีเซียม) (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	pr EN 14538	ไม่สูงกว่า 5.0
23	ฟอสฟอรัส (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ASTM D 4951	ไม่สูงกว่า 0.0010
24	สารเติมแต่ง (ถ้ามี)	ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบ จากอธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน	

ที่มา: กรมธุรกิจพลังงาน (2548)

ภาคผนวก ข

การคำนวณอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน

การคำนวณอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน

การคำนวณอัตราส่วน โดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่ใช้ในกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันมีขั้นตอนการคำนวณ ดังนี้

ตัวอย่างการคำนวณ

ทำการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยใช้น้ำมันสุญุดำเริ่มต้นในการผลิตปริมาณ 200 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 200 กรัม

$$\text{จะใช้เมทานอลปริมาณ} = \frac{200 \times 224}{900} = 49.11 \text{ กรัม}$$

ภาคผนวก ค
การคำนวณค่าความเป็นกรด

การคำนวณค่าความเป็นกรด

สามารถคำนวณค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลได้จากสมการ

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

วิธีการคำนวณ

$$\text{ปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้} = 0.25 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$\text{น้ำหนักของไบโอดีเซล} = 4 \text{ กรัม}$$

ดังนั้นค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลเท่ากับ

$$= \frac{0.25 \times 56.1 \times 0.1}{4}$$

$$= 0.35 \text{ มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม}$$

ภาคผนวก ง

เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของ ไบโอดีเซลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Rancimat
ตามวิธี EN14112

ตารางที่ ง1 เติยรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบ โอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติม PG ในปริมาณความเข้มข้นต่างๆ

ปริมาณความเข้มข้น (พีพีเอ็ม)	Induction time (ชั่วโมง)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	4.32	4.20	4.12	4.21
50	19.37	18.53	18.90	18.93
150	26.22	26.72	26.10	26.33
250	29.98	30.56	30.05	30.20
350	32.85	33.20	32.90	32.98
500	34.20	33.90	34.01	34.04
650	36.10	36.08	35.85	36.01
750	37.50	37.63	37.52	37.55

* ค่าความความเป็นกรดของน้ำมันสบู่ดำเริ่มต้นในครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 มีค่าเท่ากับ 4.63 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม ส่วนค่าความความเป็นกรดของน้ำมันสบู่ดำเริ่มต้นในครั้งที่ 3 มีค่าเท่ากับ 4.77 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม

ตารางที่ ง2 เติยรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติม BHA ในปริมาณความเข้มข้นต่างๆ

ปริมาณความเข้มข้น (พีพีเอ็ม)	Induction time (ชั่วโมง)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	4.32	4.20	4.12	4.21
50	5.82	5.55	5.27	5.55
150	7.00	6.50	6.58	6.69
250	7.64	7.68	7.50	7.61
350	8.02	7.96	7.80	7.93
500	8.89	9.00	8.80	8.90
650	9.99	9.72	10.01	9.91
750	13.20	12.67	12.85	12.91

* ค่าความความเป็นกรดของน้ำมันสบู่ดำเริ่มต้นในครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 มีค่าเท่ากับ 4.63 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม ส่วนค่าความความเป็นกรดของน้ำมันสบู่ดำเริ่มต้นในครั้งที่ 3 มีค่าเท่ากับ 4.77 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม

ตารางที่ ง3 เติยรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติม TBHQ ในปริมาณความเข้มข้นต่างๆ

ปริมาณความเข้มข้น (พีพีเอ็ม)	Induction time (ชั่วโมง)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	4.32	4.20	4.12	4.21
50	5.81	5.88	5.70	5.80
150	6.50	6.39	6.40	6.43
250	7.80	7.74	8.37	7.97
350	9.00	9.16	9.22	9.13
500	11.49	12.32	11.90	11.90
650	13.98	14.2	14.37	14.18
750	16.60	16.43	17.34	16.79

* โดยค่าความความเป็นกรดของน้ำมันสบู่ดำเริ่มต้นในครั้งที่ 1 มีค่าเท่ากับ 4.77 มิลลิกรัม โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม ส่วนค่าความความเป็นกรดของน้ำมันสบู่ดำเริ่มต้นในครั้งที่ 2 และครั้งที่ 3 มีค่าเท่ากับ 4.91 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม

ตารางที่ ๓4 เติบยรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำที่เดิม ZEP ในปริมาณความเข้มข้นต่างๆ

ปริมาณความเข้มข้น (พีพีเอ็ม)	Induction time (ชั่วโมง)			เฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
0	4.32	4.20	4.12	4.21
250	4.22	4.32	4.20	4.25
500	4.45	4.35	4.32	4.37
750	5.09	4.97	4.95	5.00
1000	5.36	5.15	5.38	5.30

* โดยค่าความความเป็นกรดของน้ำมันสบูดำเริ่มต้นในครั้งที่ 1, ครั้งที่ 2 และ ครั้งที่ 3 มีค่าเท่ากับ 4.91 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม

ตารางที่ ๓5 เติบยรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำที่เดิม NITROX ในปริมาณความเข้มข้นต่างๆ

ปริมาณความเข้มข้น (พีพีเอ็ม)	Induction time (ชั่วโมง)			เฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
0	4.32	4.20	4.12	4.21
250	4.45	4.52	4.35	4.44
500	5.40	5.12	4.95	5.16
750	5.41	5.35	5.12	5.29
1000	5.11	5.06	4.99	5.05

* โดยค่าความความเป็นกรดของน้ำมันสบูดำเริ่มต้นในครั้งที่ 1, ครั้งที่ 2 และ ครั้งที่ 3 มีค่าเท่ากับ 4.91 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม

ตารางที่ ๖6 เติบยรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบ โอดีเซลจากน้ำมันสบูดำที่เติม L-power ใน ปริมาณความเข้มข้นต่างๆ

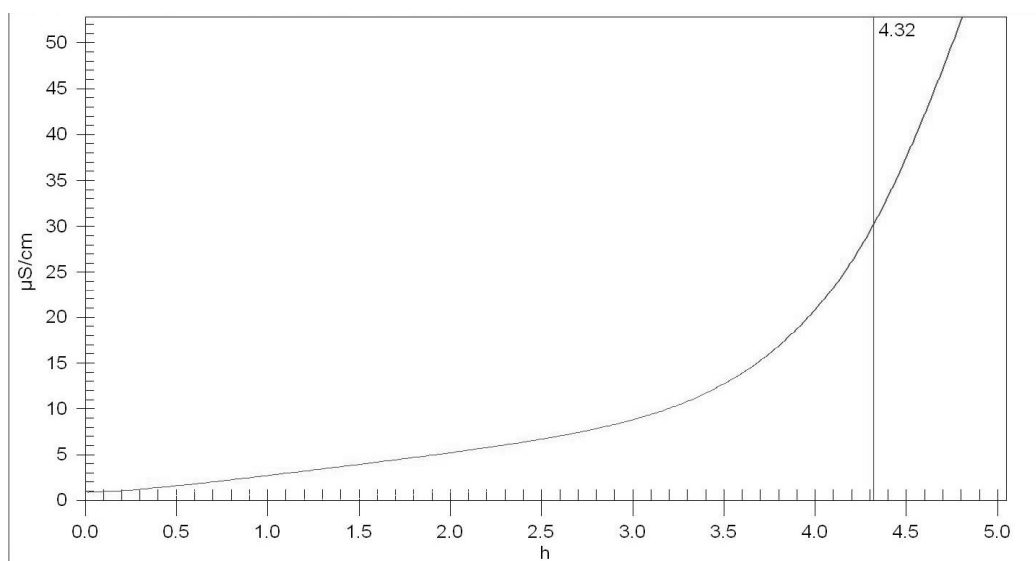
ปริมาณความเข้มข้น (พีพีเอ็ม)	Induction time (ชั่วโมง)			เฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
0	4.32	4.20	4.12	4.21
250	4.18	3.92	4.22	4.11
500	3.90	4.09	4.00	4.00
750	4.20	3.92	3.90	4.01
1000	3.88	3.86	3.88	3.87

* โดยค่าความความเป็นกรดของน้ำมันสบูดำเริ่มต้นในครั้งที่ 1, ครั้งที่ 2 และ ครั้งที่ 3 มีค่าเท่ากับ 4.91 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม

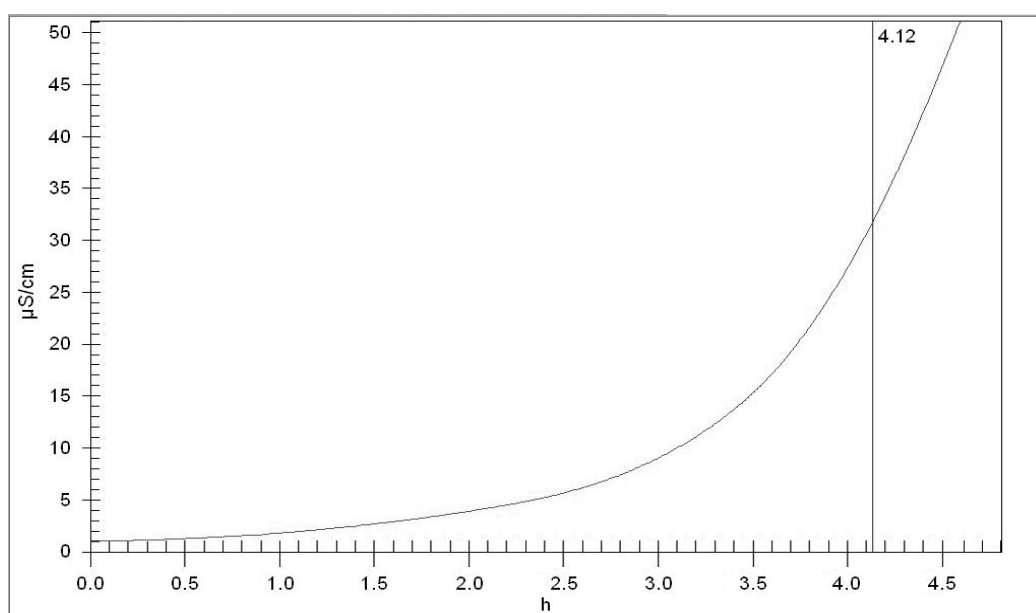
ตารางที่ ๗7 เติบยรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบ โอดีเซลจากน้ำมันสบูดำที่เติม PG ในปริมาณความเข้มข้น 150 พีพีเอ็ม ที่ทำการเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 20 สัปดาห์

สัปดาห์ที่	Induction time (ชั่วโมง)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	26.22	26.72	26.10	26.35
2	25.99	26.03	25.98	26.00
3	25.84	25.70	25.62	25.72
4	25.60	25.55	25.47	25.54
5	24.70	25.98	25.01	25.23
6	24.67	24.87	24.59	24.71
7	24.60	24.75	24.55	24.63
8	24.20	24.50	24.50	24.40
9	23.82	24.45	24.40	24.22
10	23.52	24.52	24.00	24,01
11	22.96	23.81	24.00	23,59
12	26.22	26.72	26.10	26.35
13	25.99	26.03	25.98	26.00
14	25.84	25.70	25.62	25.72
15	25.60	25.55	25.47	25.54
16	24.70	25.98	25.01	25.23
17	24.67	24.87	24,59	24.71
18	24.60	24.75	24.55	24.63
19	24.20	24.50	24.50	24.40
20	23.82	24.45	24.40	24.22

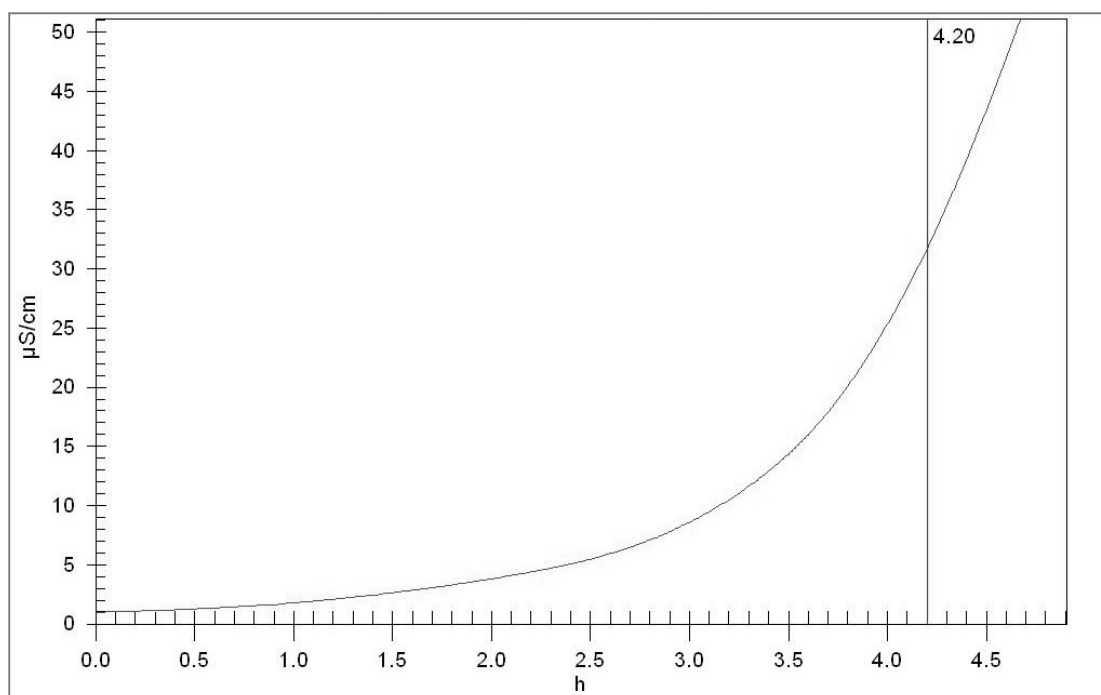
* โดยค่าความความเป็นกรดของน้ำมันสบูดำเริ่มต้นในช่วงสัปดาห์ที่ 0-10 ในครั้งที่ 1, ครั้งที่ 2 และครั้งที่ 3 มีค่าเท่ากับ 5.05 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม และค่าความความเป็นกรดของน้ำมันสบูดำเริ่มต้นในช่วงสัปดาห์ที่ 11-20 ในครั้งที่ 1, ครั้งที่ 2 และ ครั้งที่ 3 มีค่าเท่ากับ 4.91 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม



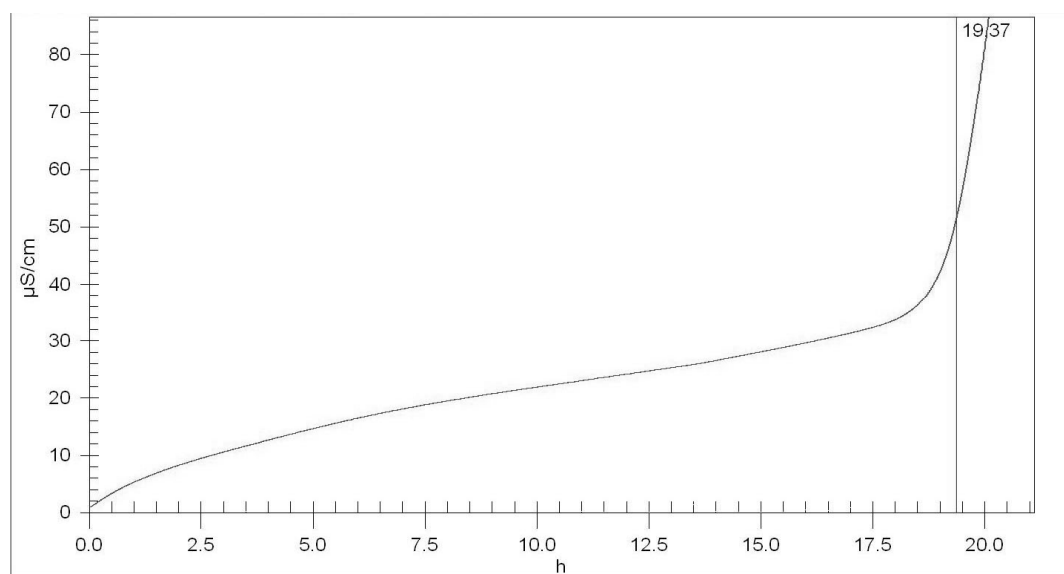
ภาพผนวกที่ ง1 เกลียวกราฟต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสุญดำ (ครั้งที่ 1)



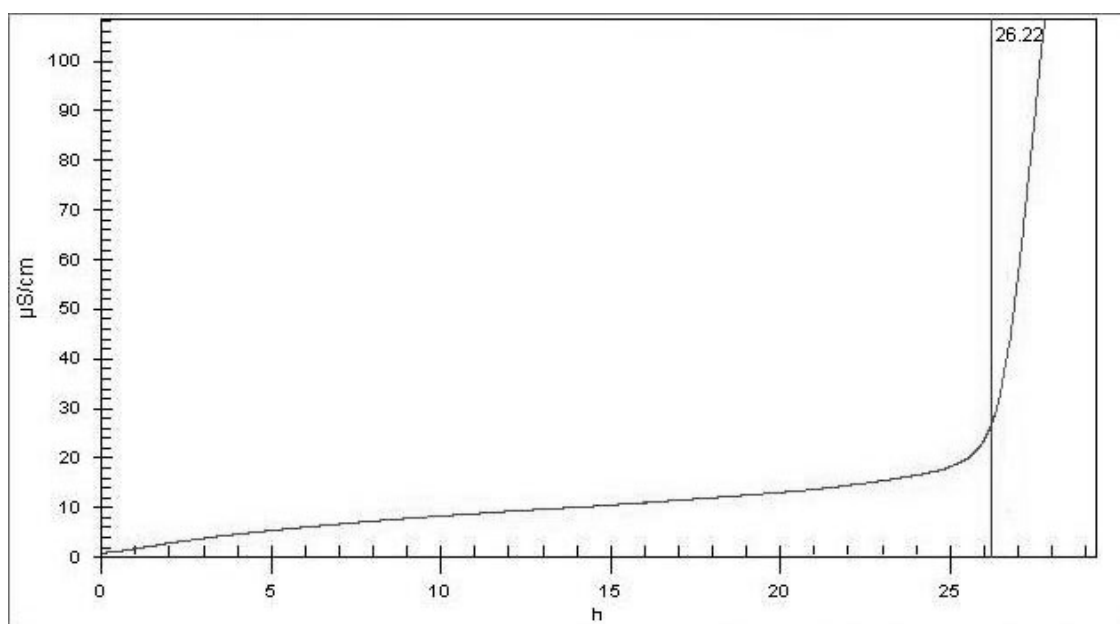
ภาพผนวกที่ ง2 เกลียวกราฟต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสุญดำ (ครั้งที่ 2)



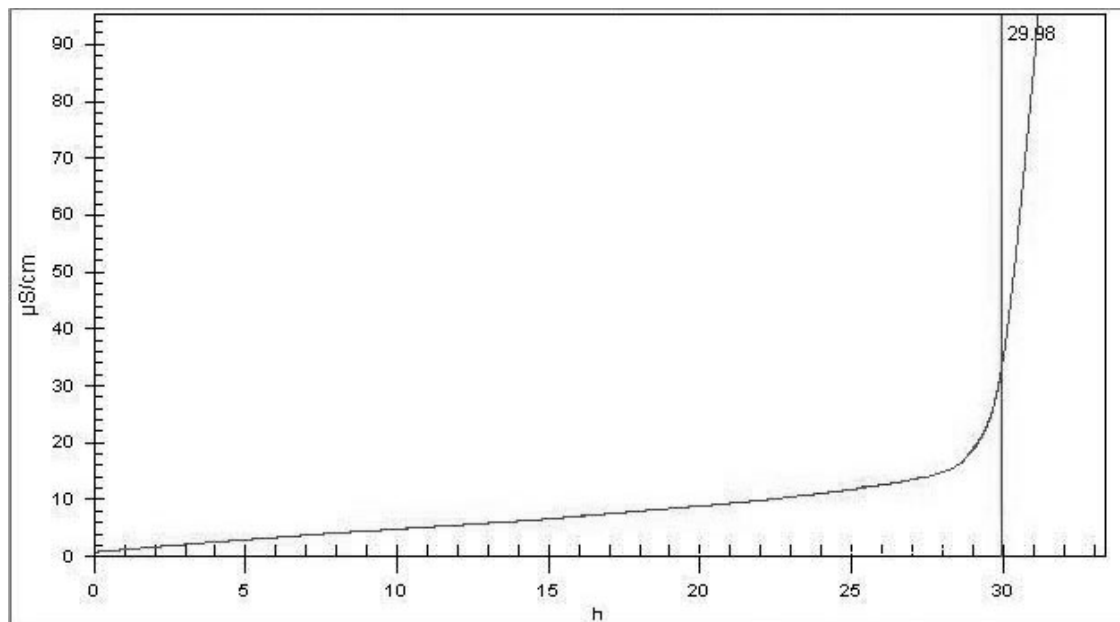
ภาพผนวกที่ 33 เกลียวกราฟต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสนุดำ (ครั้งที่ 3)



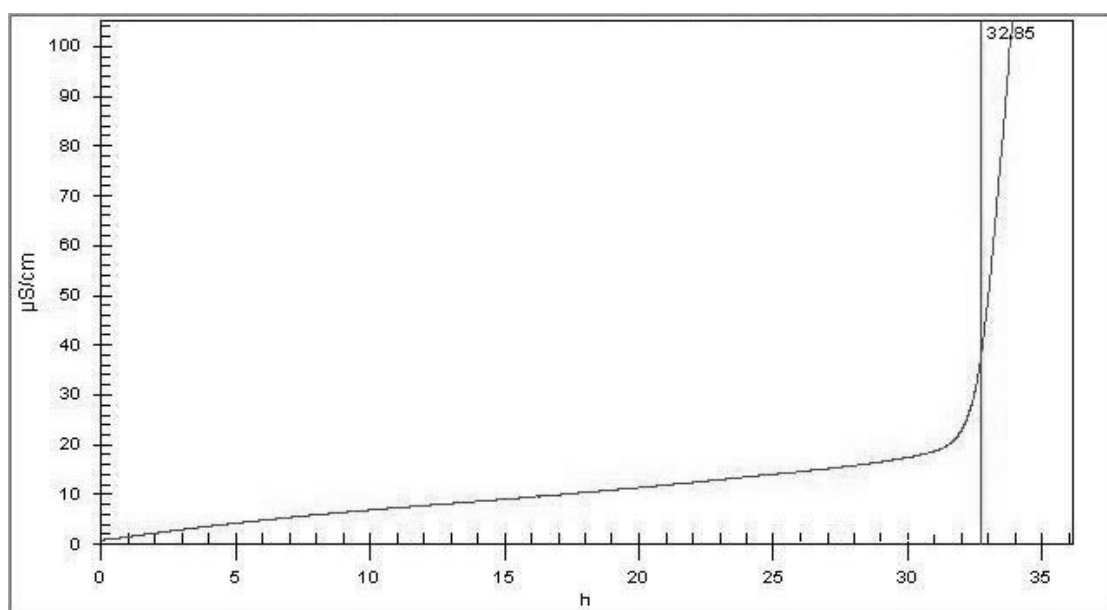
ภาพผนวกที่ 34 เกลียวกราฟต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสนุดำที่เติมสาร PG ความเข้มข้น 50 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 1)



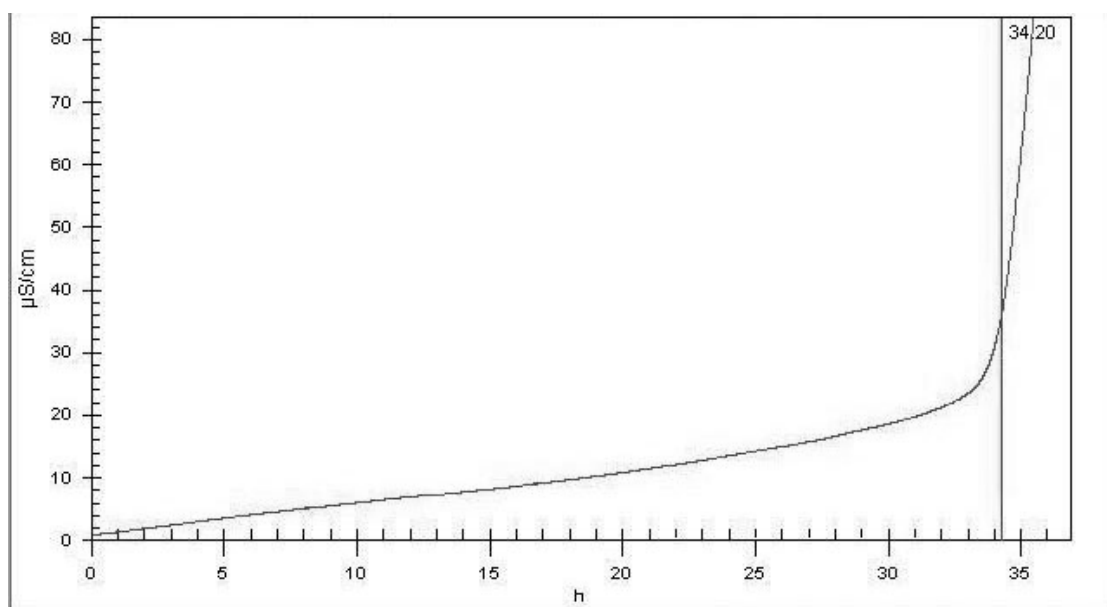
ภาพผนวกที่ ๖5 เกลียวภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร PG
ความเข้มข้น 150 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 1)



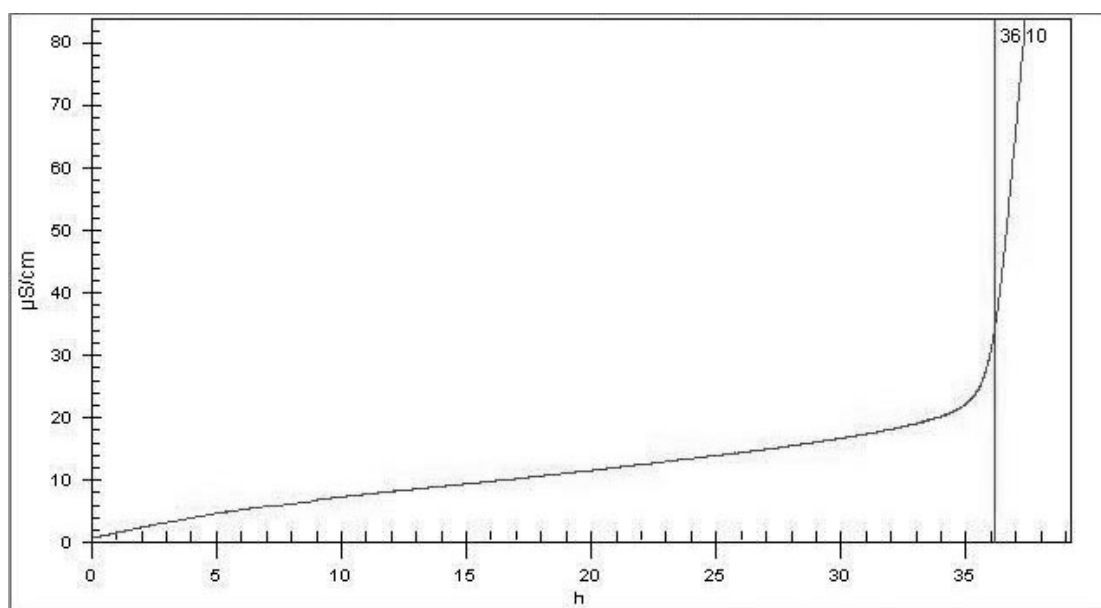
ภาพผนวกที่ ๖6 เกลียวภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร PG
ความเข้มข้น 250 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 1)



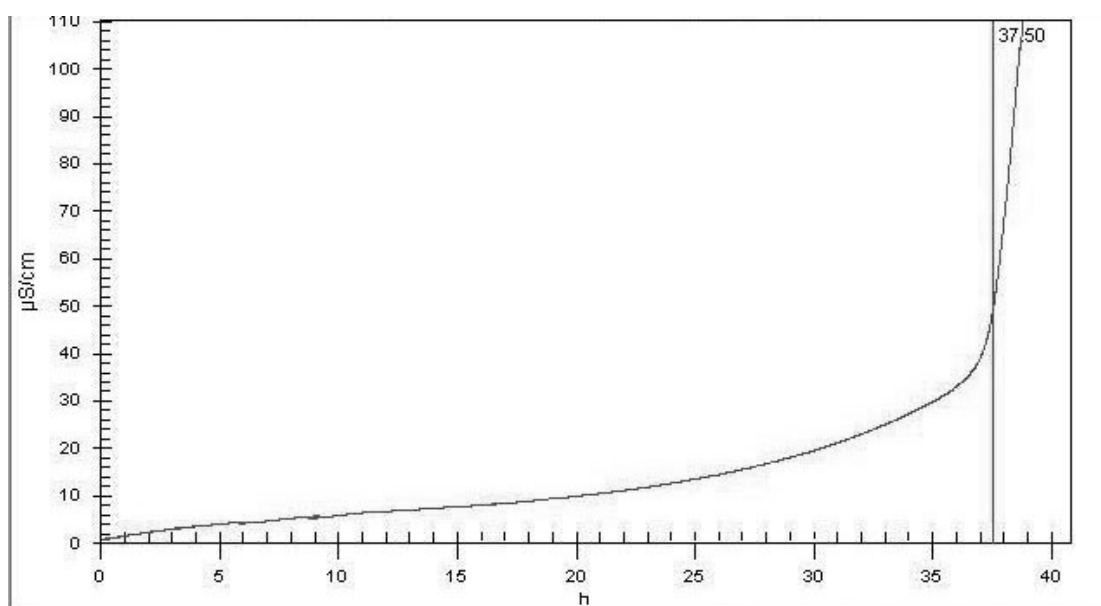
ภาพผนวกที่ ๗ เกลียวกราฟต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำที่เติมสาร PG ความเข้มข้น 350 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 1)



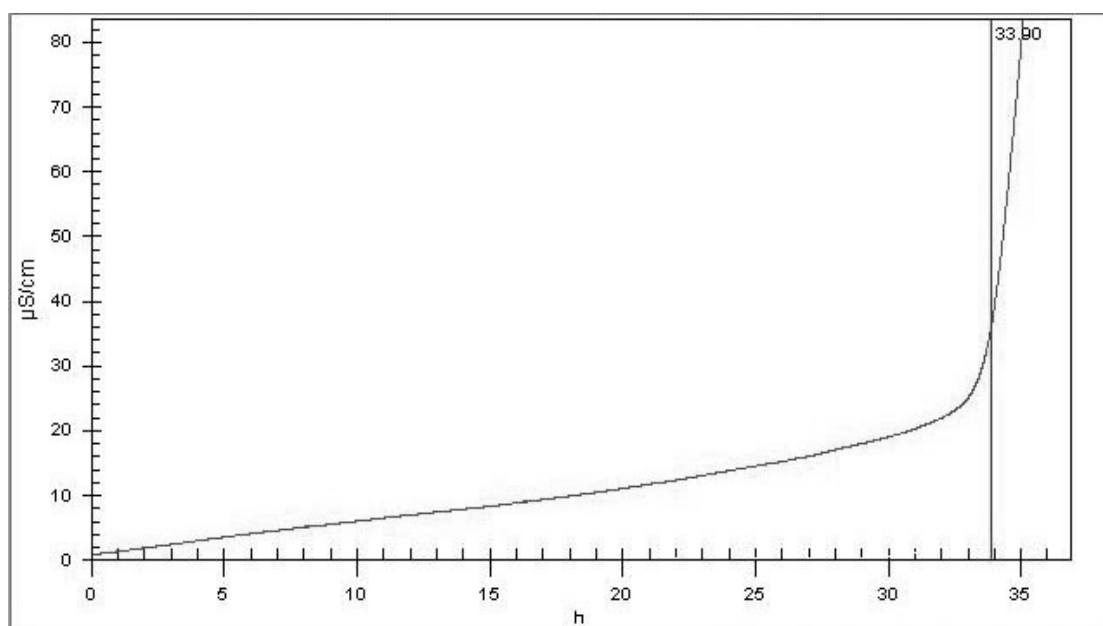
ภาพผนวกที่ ๘ เกลียวกราฟต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำที่เติมสาร PG ความเข้มข้น 500 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 1)



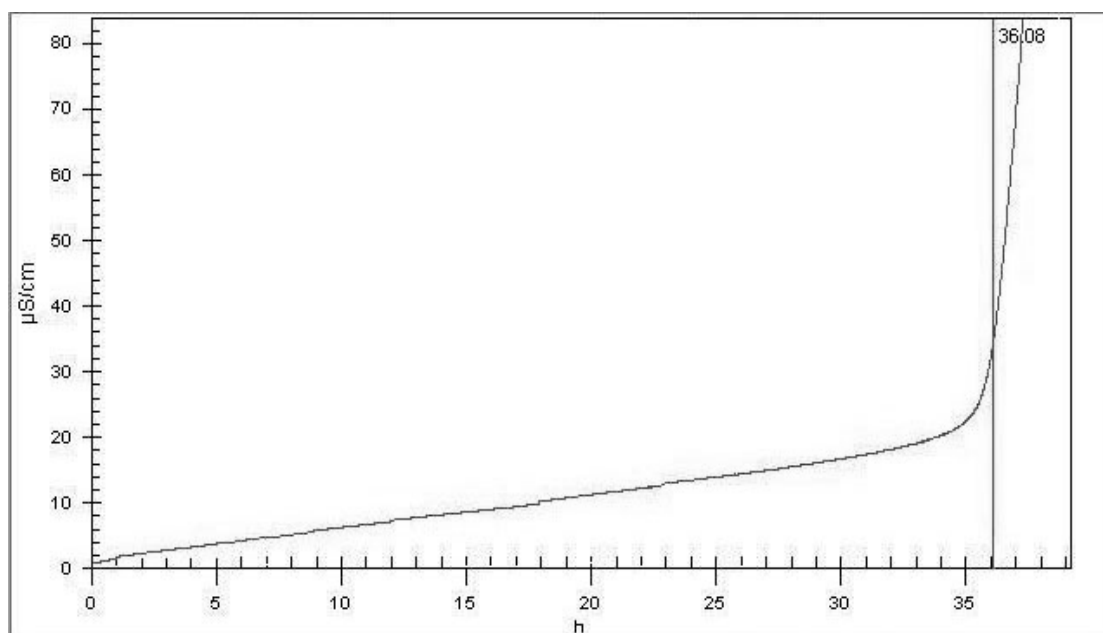
ภาพผนวกที่ ง9 เกลียวกราฟต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร PG ความเข้มข้น 650 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 1)



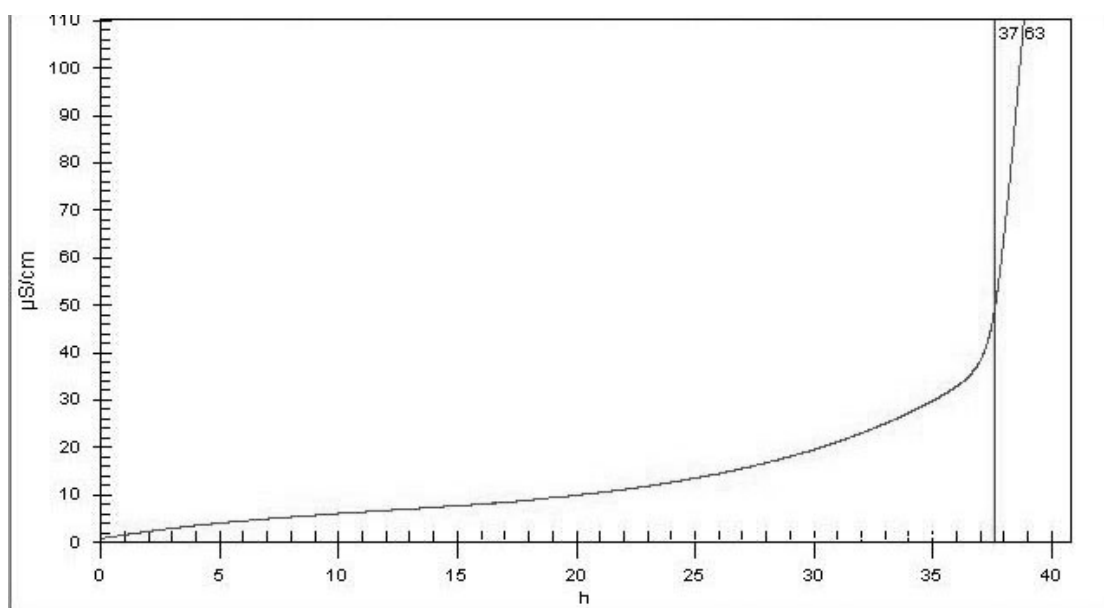
ภาพผนวกที่ ง10 เกลียวกราฟต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร PG ความเข้มข้น 750 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 1)



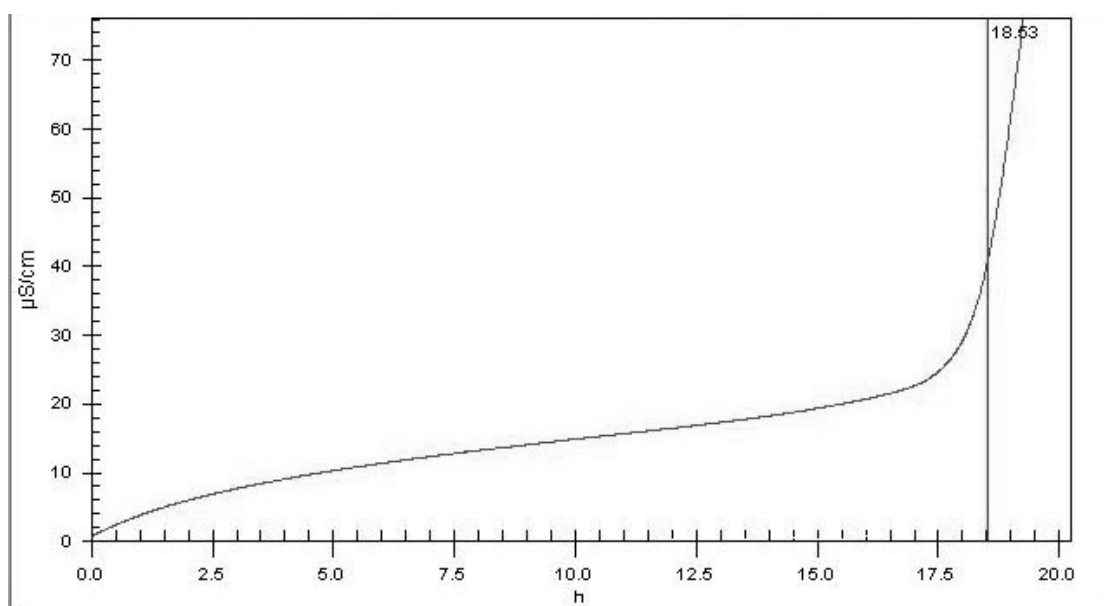
ภาพผนวกที่ ง11 เติบยรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำที่เติมสาร PG
ความเข้มข้น 50 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 2)



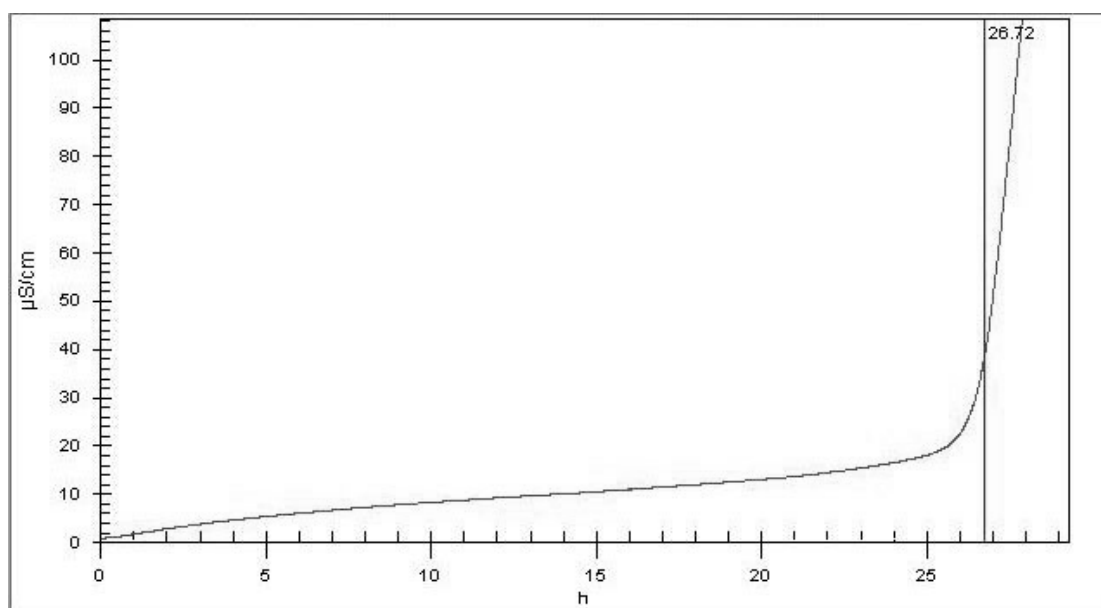
ภาพผนวกที่ ง12 เติบยรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำที่เติมสาร PG
ความเข้มข้น 150 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 2)



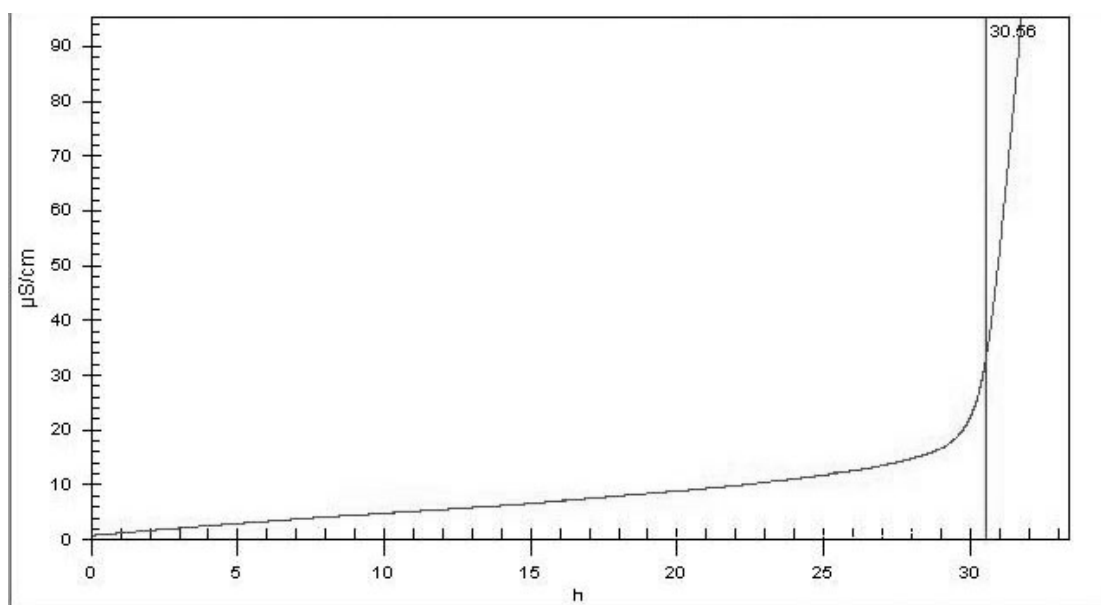
ภาพผนวกที่ ง13 เกลียวกราฟต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำที่เติมสาร PG ความเข้มข้น 250 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 2)



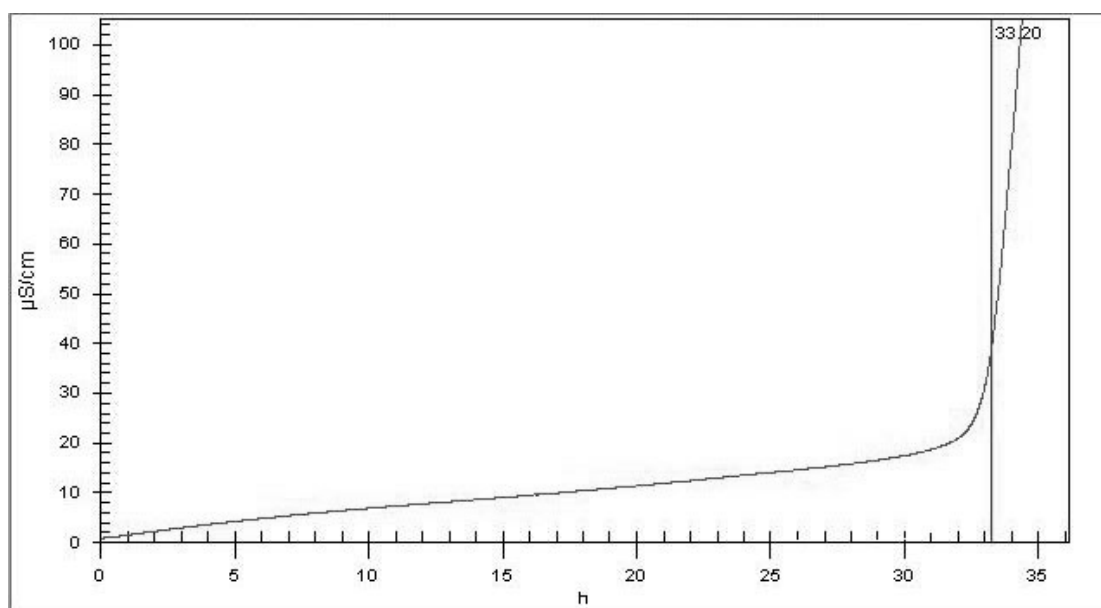
ภาพผนวกที่ ง14 เกลียวกราฟต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำที่เติมสาร PG ความเข้มข้น 350 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 2)



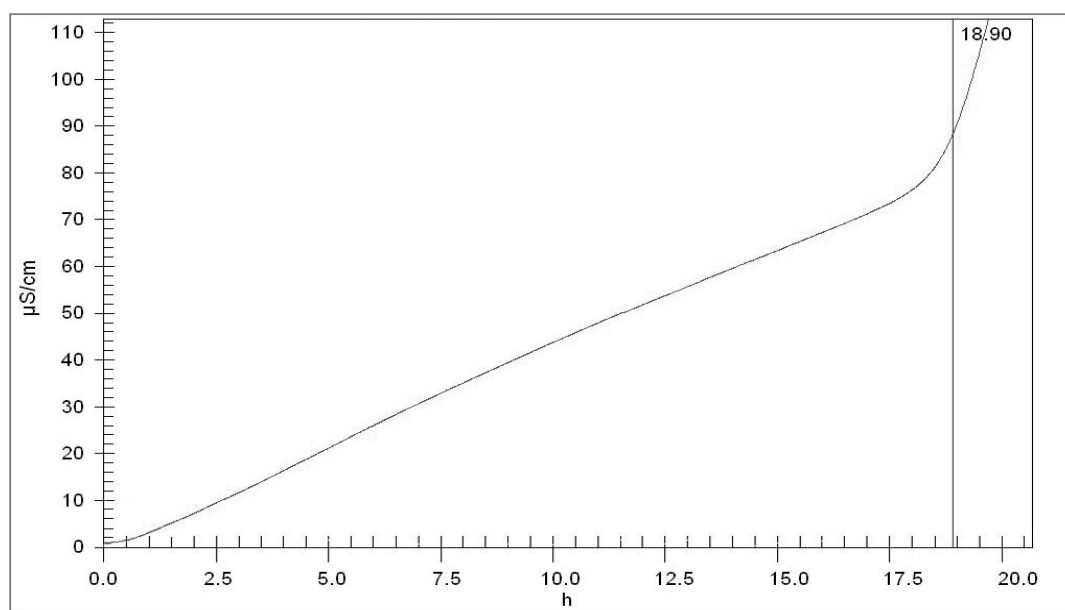
ภาพผนวกที่ ง15 เติบรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร PG ความเข้มข้น 500 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 2)



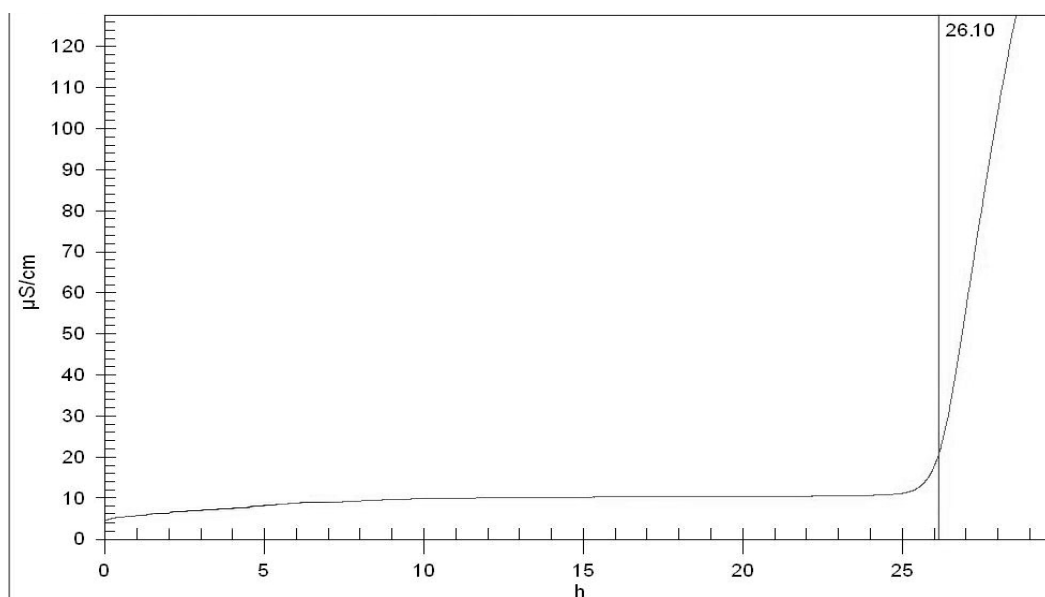
ภาพผนวกที่ ง16 เติบรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร PG ความเข้มข้น 650 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 2)



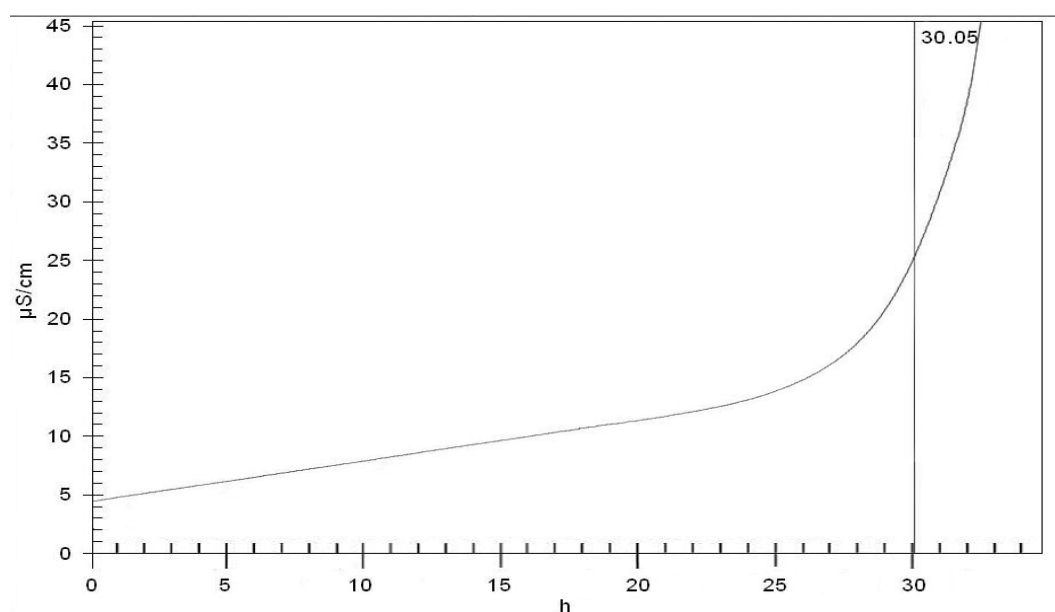
ภาพผนวกที่ ง17 เกลียวภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำที่เติมสาร PG ความเข้มข้น 750 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 2)



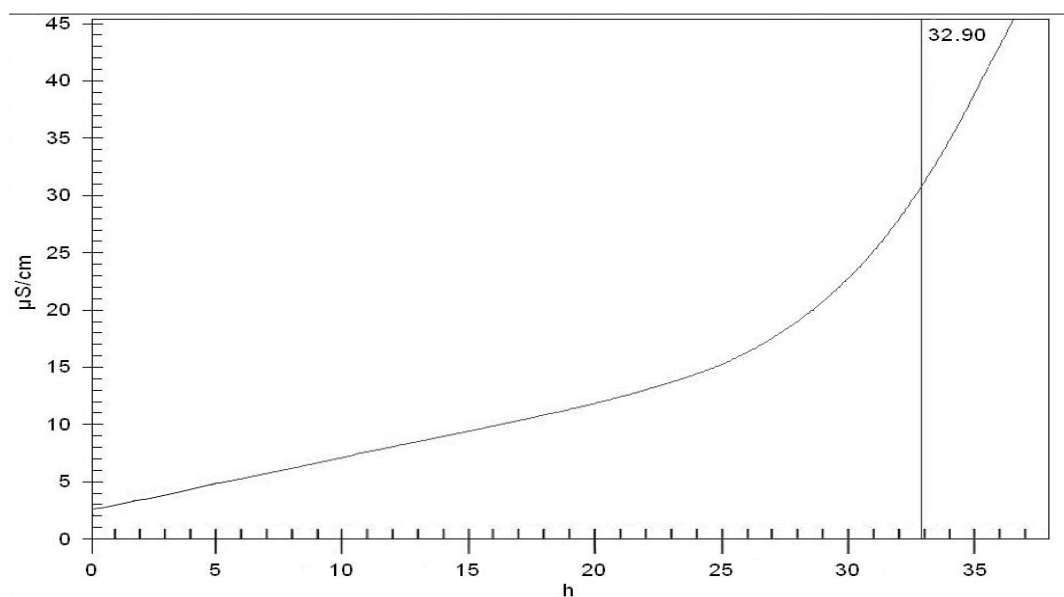
ภาพผนวกที่ ง18 เกลียวภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำที่เติมสาร PG ความเข้มข้น 50 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 3)



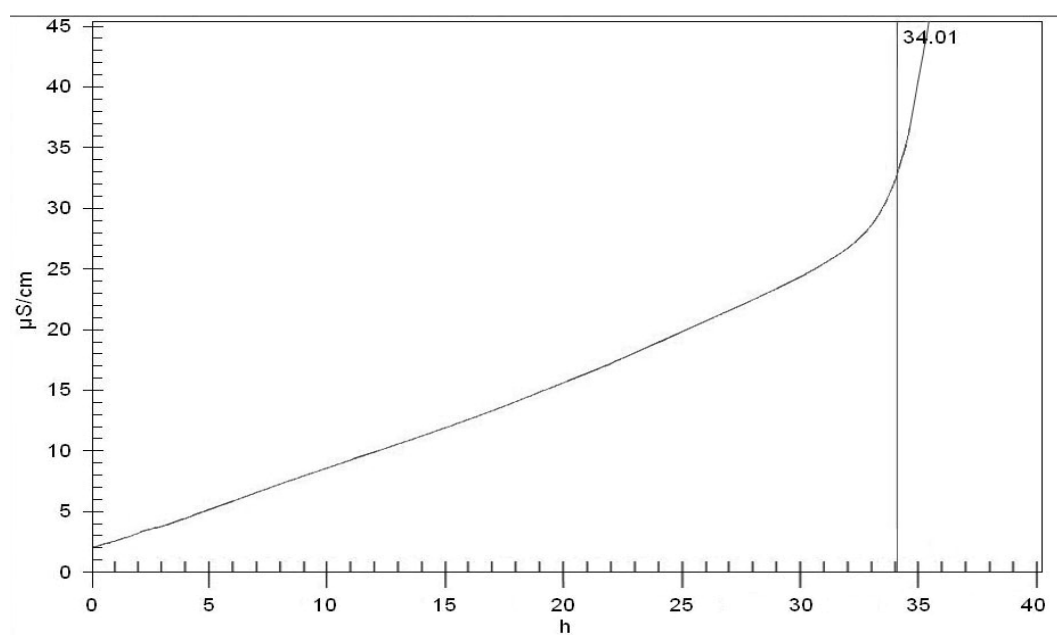
ภาพผนวกที่ ง19 เติลยรภาพต่อการเกิดออกซเดชันของไปโอคิเซลจากน้ำมันสบูดำที่เติมสาร PG
ความเข้มข้น 150 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 3)



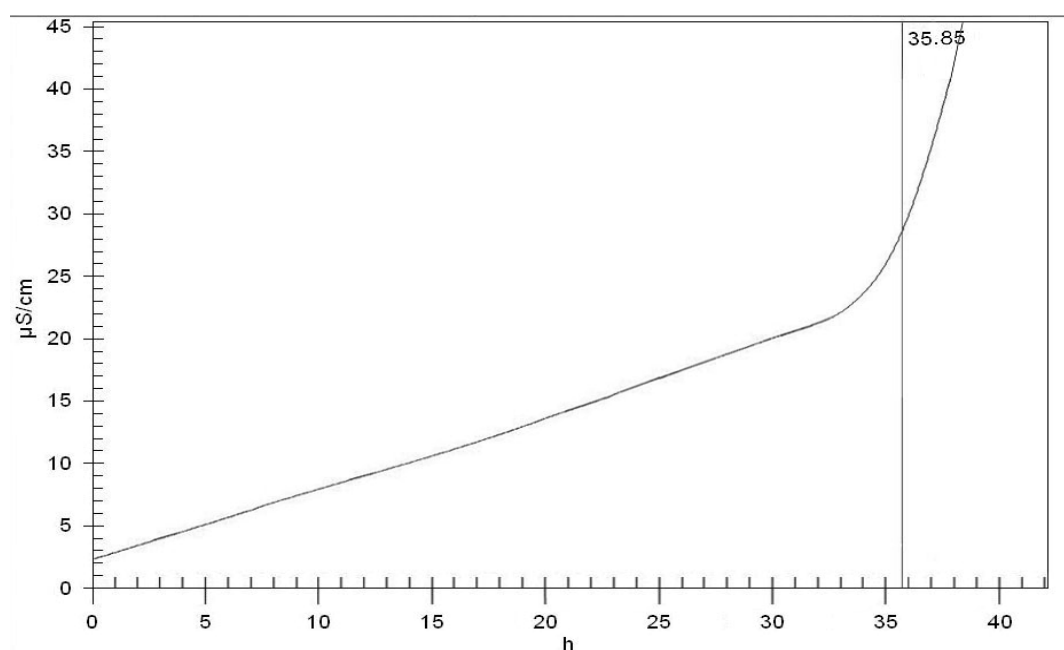
ภาพผนวกที่ ง20 เติลยรภาพต่อการเกิดออกซเดชันของไปโอคิเซลจากน้ำมันสบูดำที่เติมสาร PG
ความเข้มข้น 250 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 3)



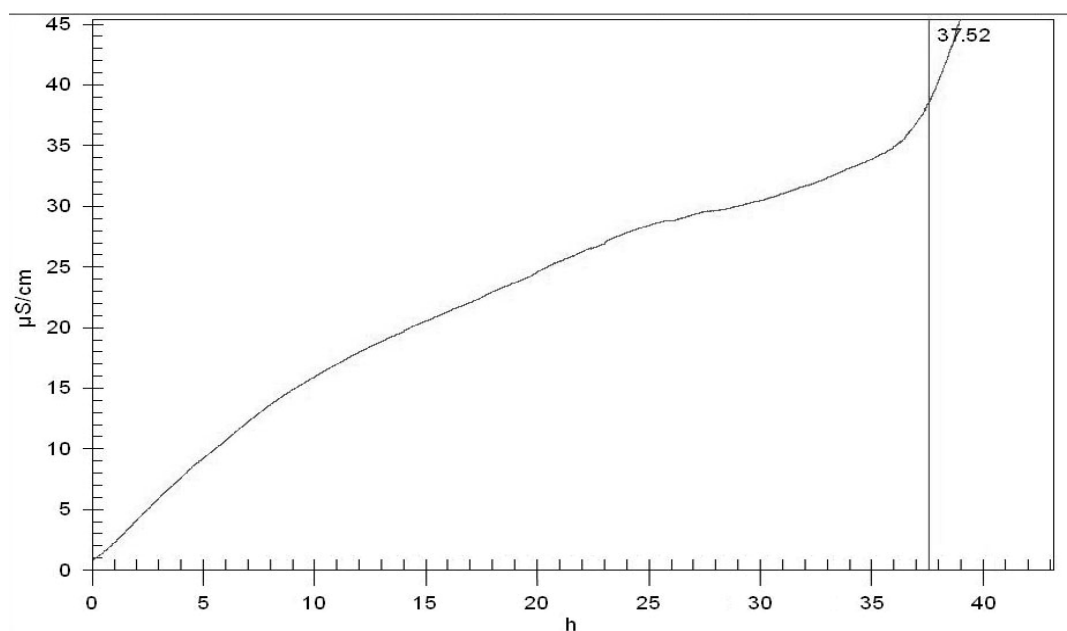
ภาพผนวกที่ ง21 เติบยรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำที่เติมสาร PG
ความเข้มข้น 350 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 3)



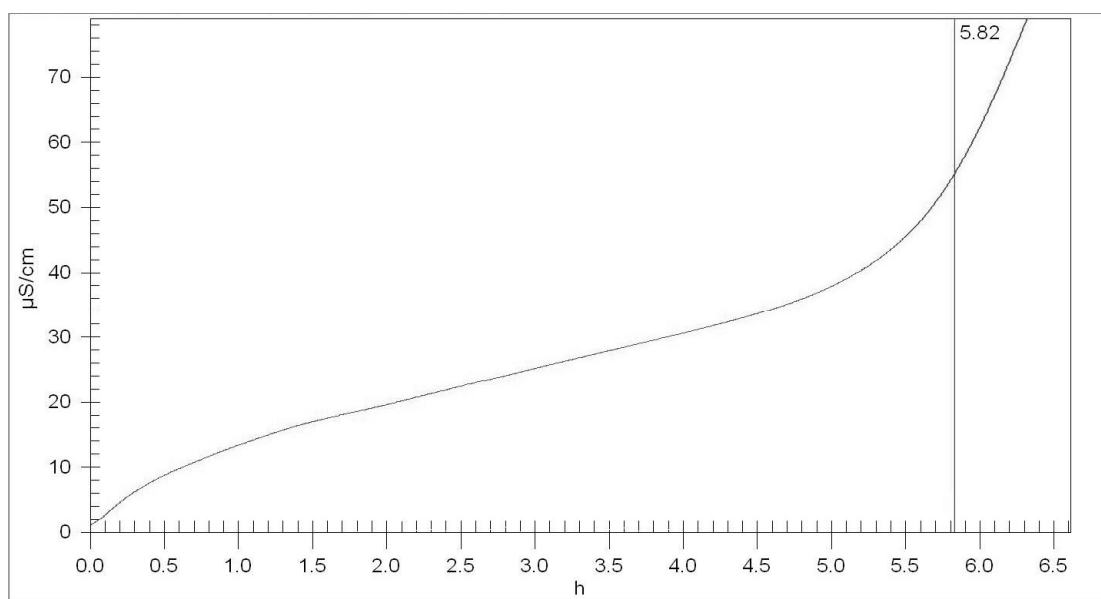
ภาพผนวกที่ ง22 เติบยรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำที่เติมสาร PG
ความเข้มข้น 500 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 3)



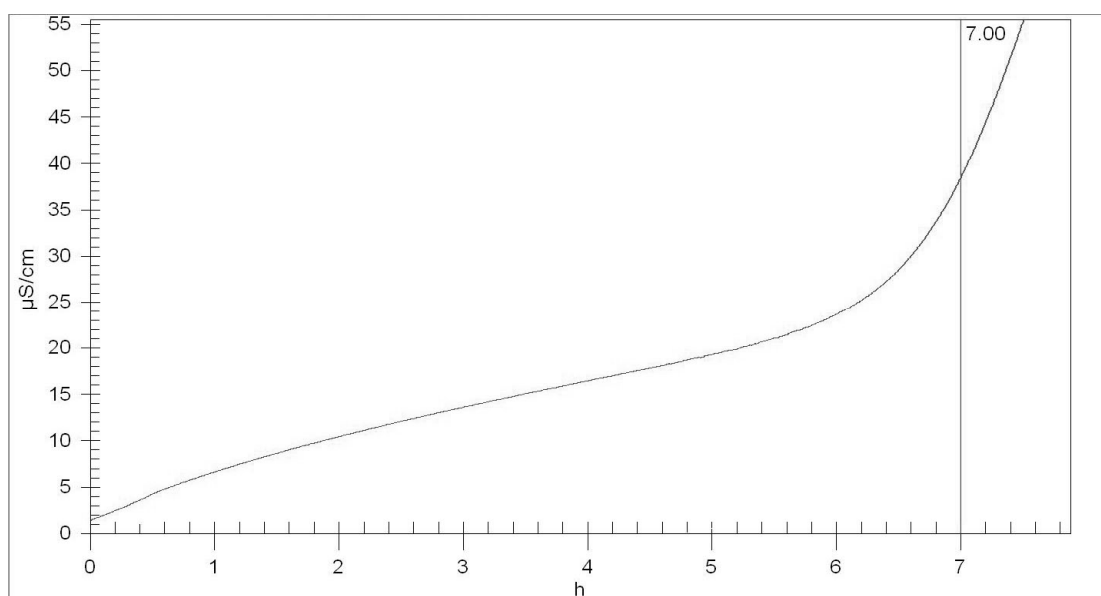
ภาพผนวกที่ ง23 เสร็จรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร PG ความเข้มข้น 650 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 3)



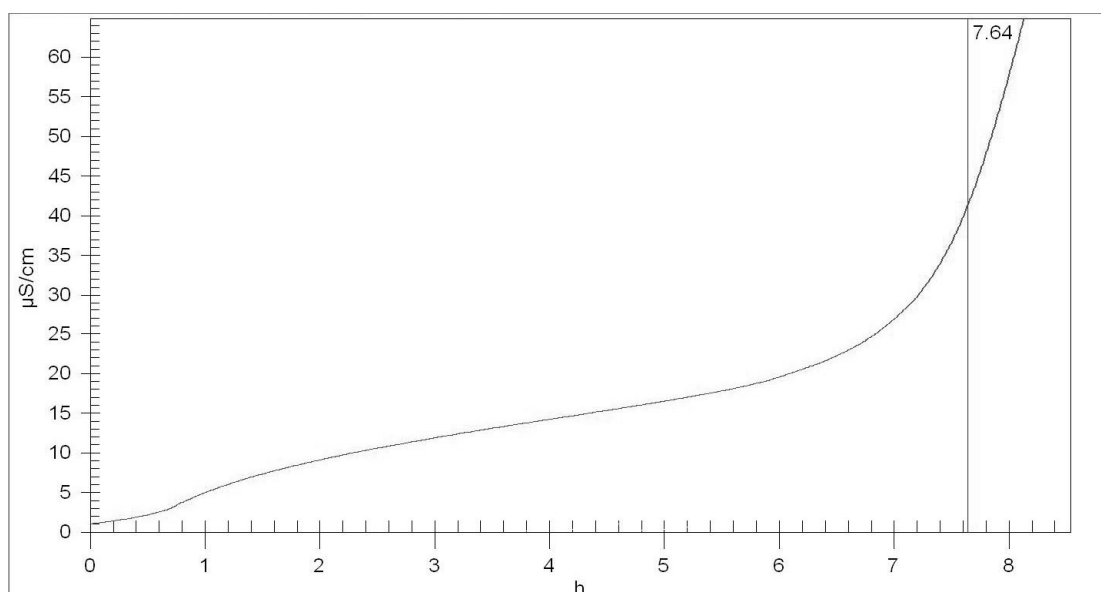
ภาพผนวกที่ ง24 เสร็จรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร PG ความเข้มข้น 750 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 3)



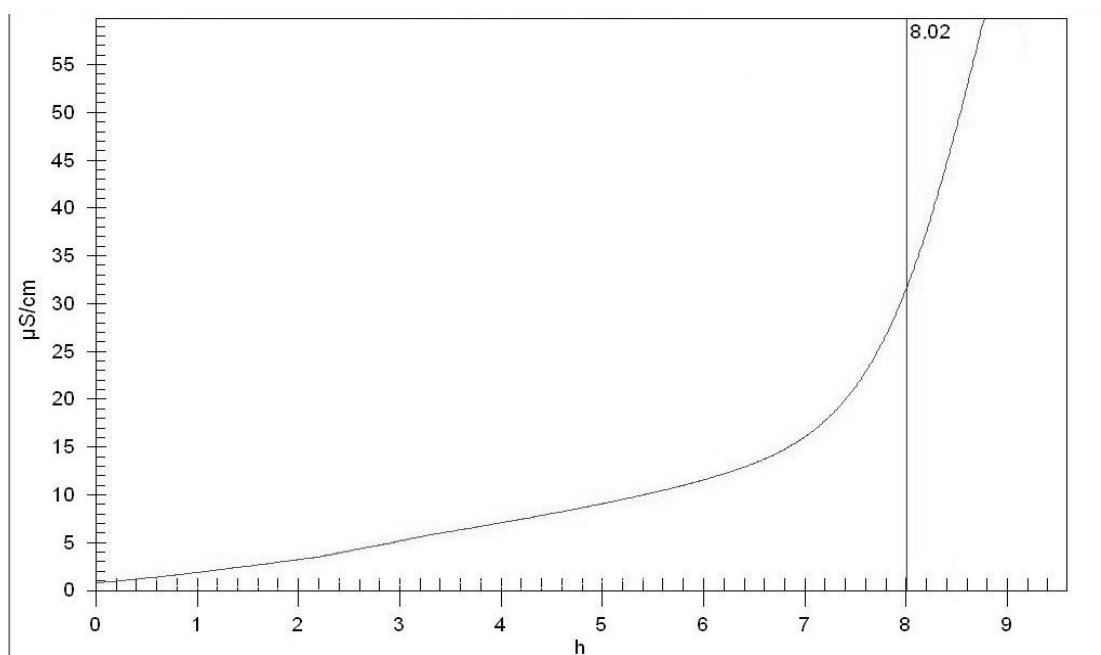
ภาพผนวกที่ ง25 เกลียวกราฟต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำที่เติมสาร BHA ความเข้มข้น 50 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 1)



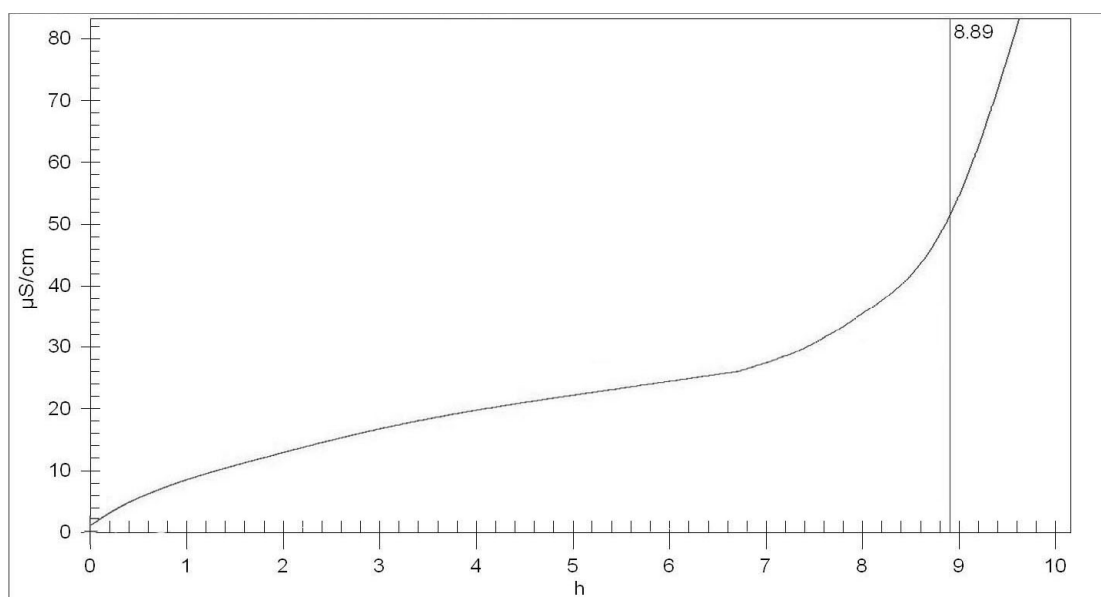
ภาพผนวกที่ ง26 เกลียวกราฟต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำที่เติมสาร BHA ความเข้มข้น 150 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 1)



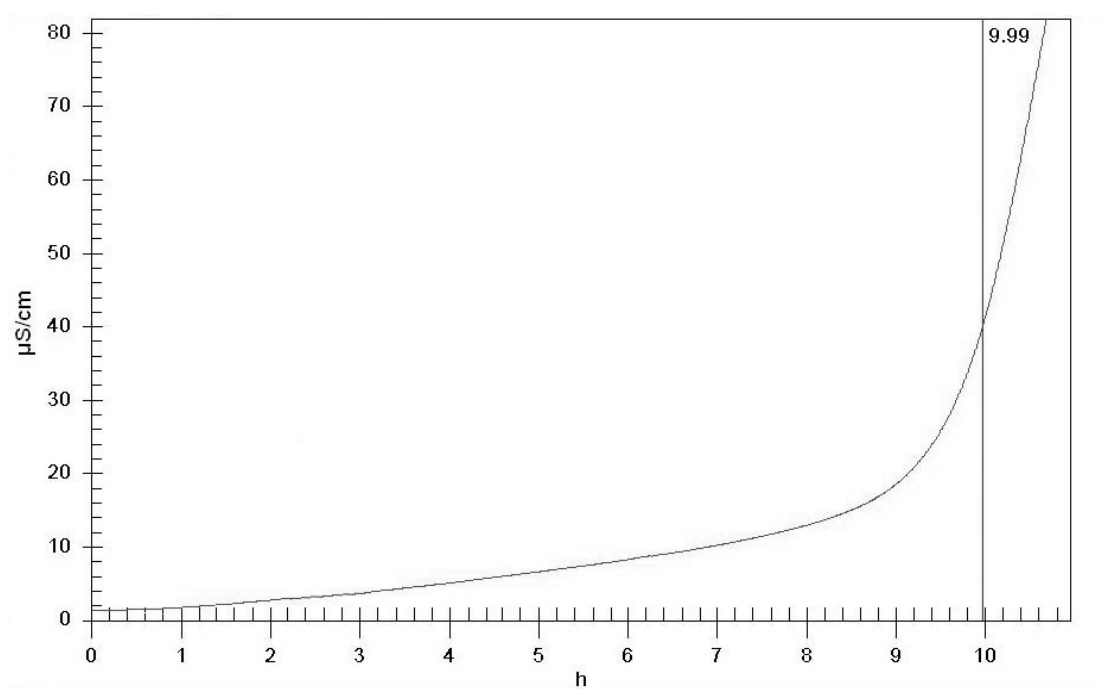
ภาพผนวกที่ ง27 เกลียวกราฟต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร BHA ความเข้มข้น 250 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 1)



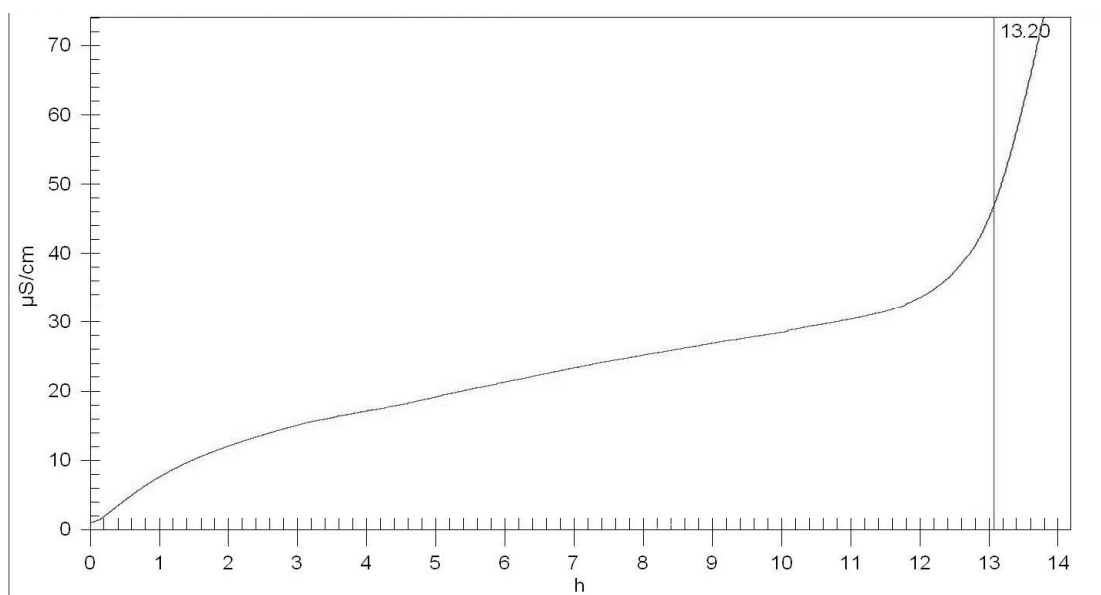
ภาพผนวกที่ ง28 เกลียวกราฟต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร BHA ความเข้มข้น 350 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 1)



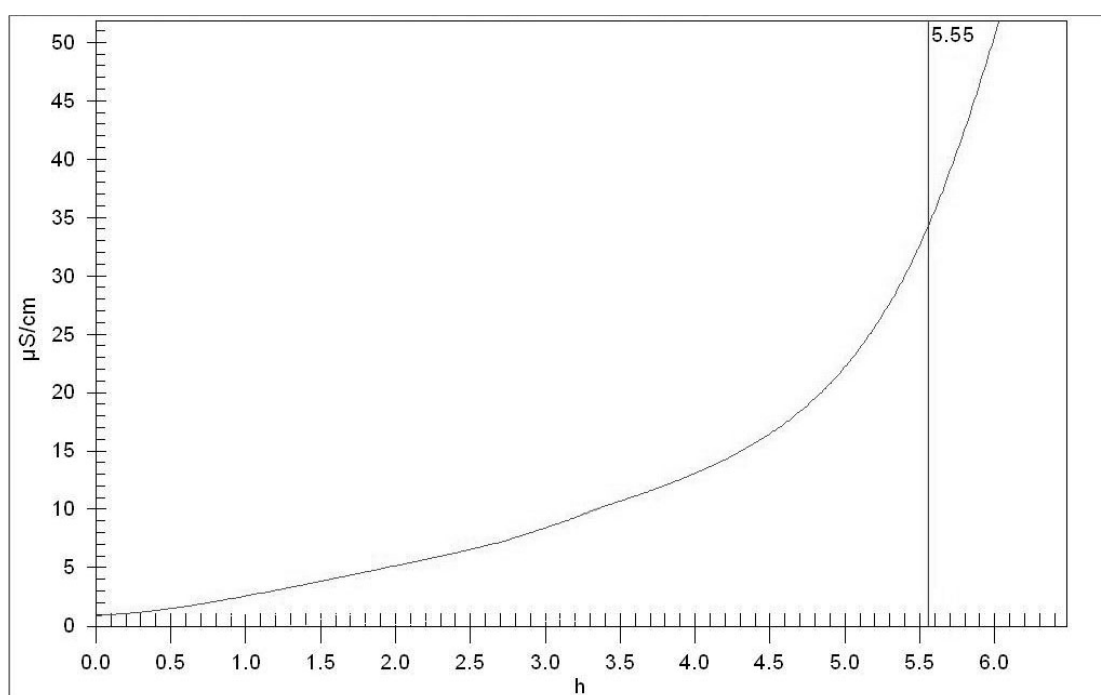
ภาพผนวกที่ ง29 เกลียวกราฟต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสนุดำที่เติมสาร BHA ความเข้มข้น 500 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 1)



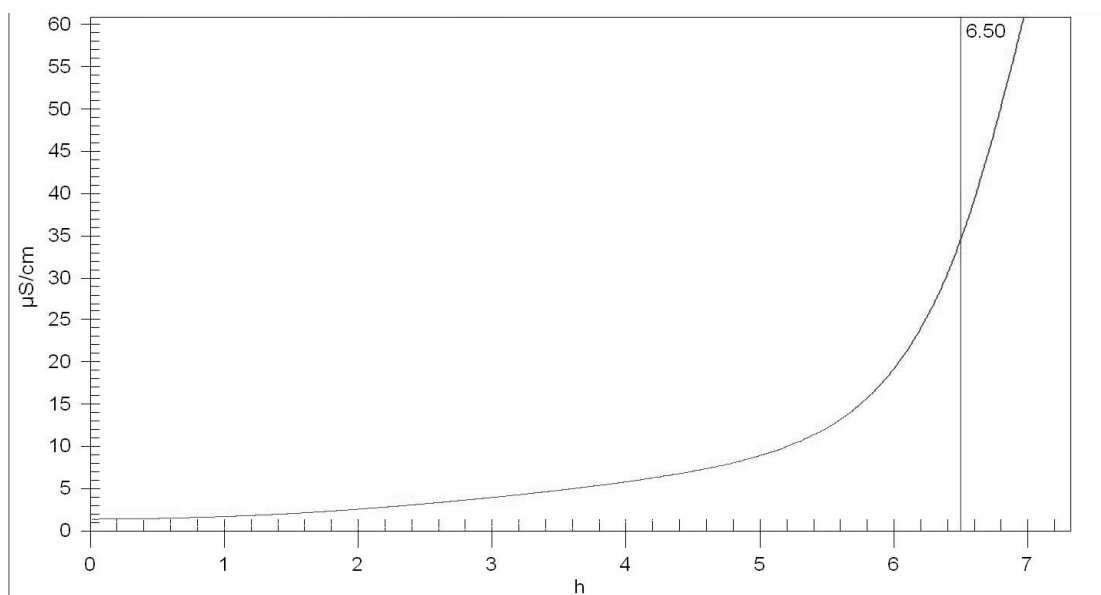
ภาพผนวกที่ ง30 เกลียวกราฟต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสนุดำที่เติมสาร BHA ความเข้มข้น 650 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 1)



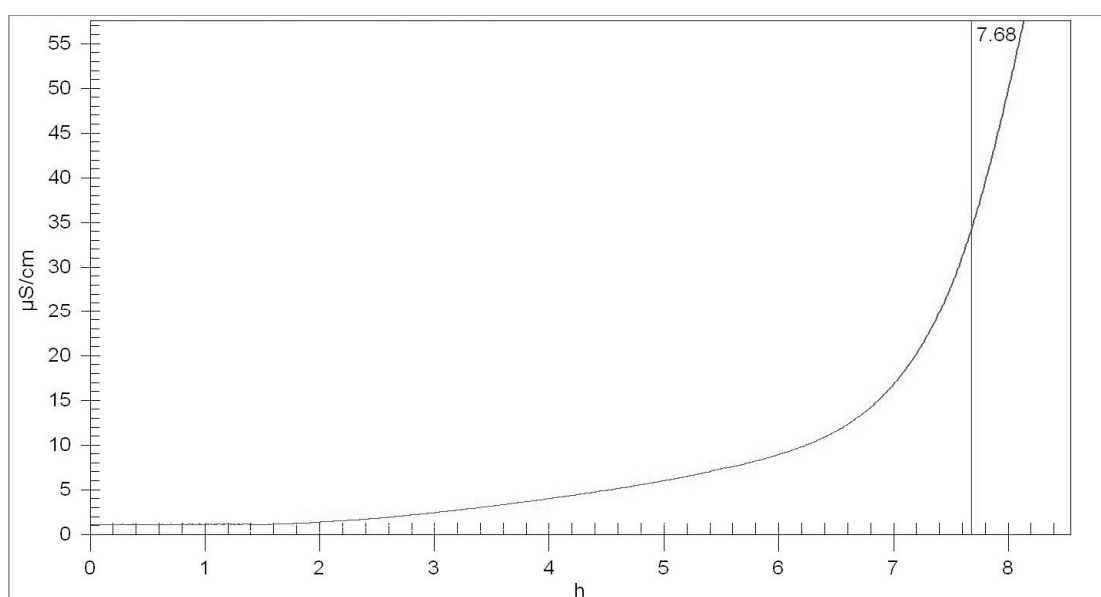
ภาพผนวกที่ ง31 เติบยรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำที่เติมสาร BHA ความเข้มข้น 750 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 1)



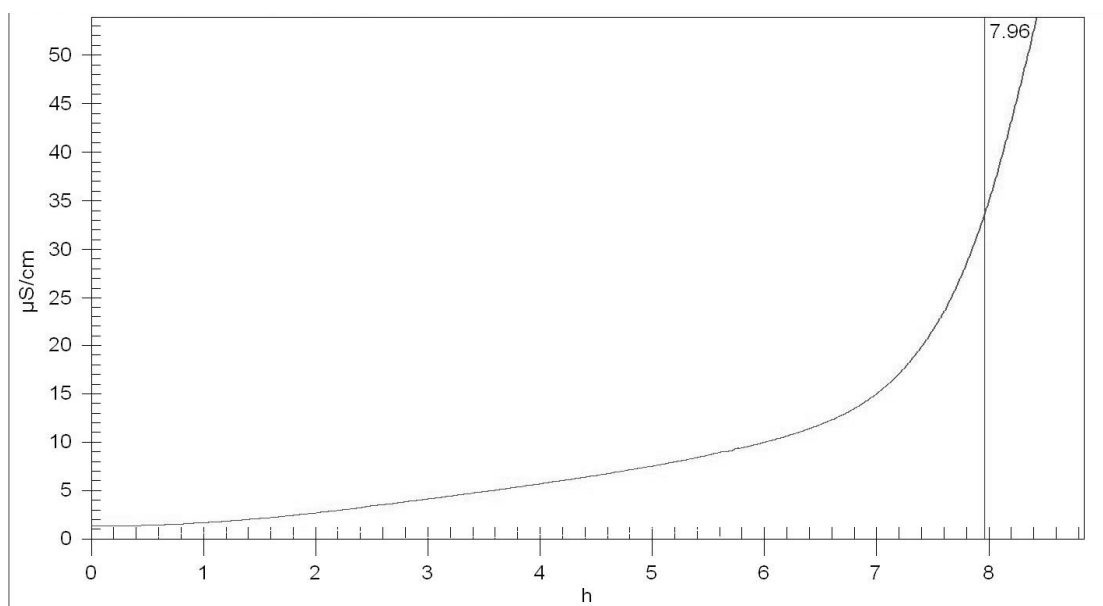
ภาพผนวกที่ ง32 เติบยรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำที่เติมสาร BHA ความเข้มข้น 50 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 2)



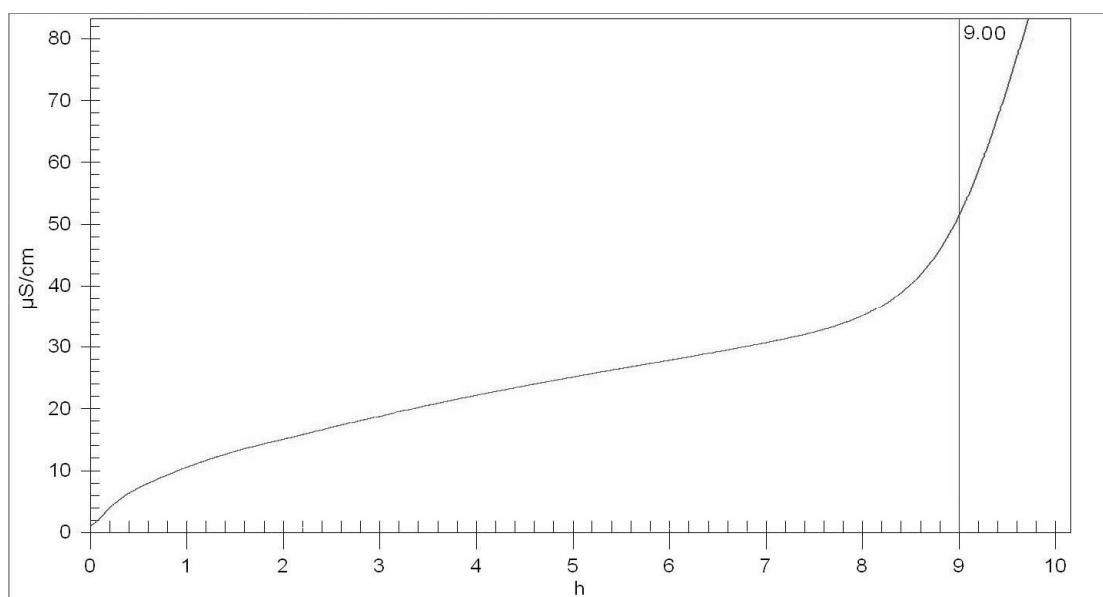
ภาพผนวกที่ ง33 เติบยรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำที่เติมสาร BHA ความเข้มข้น 150 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 2)



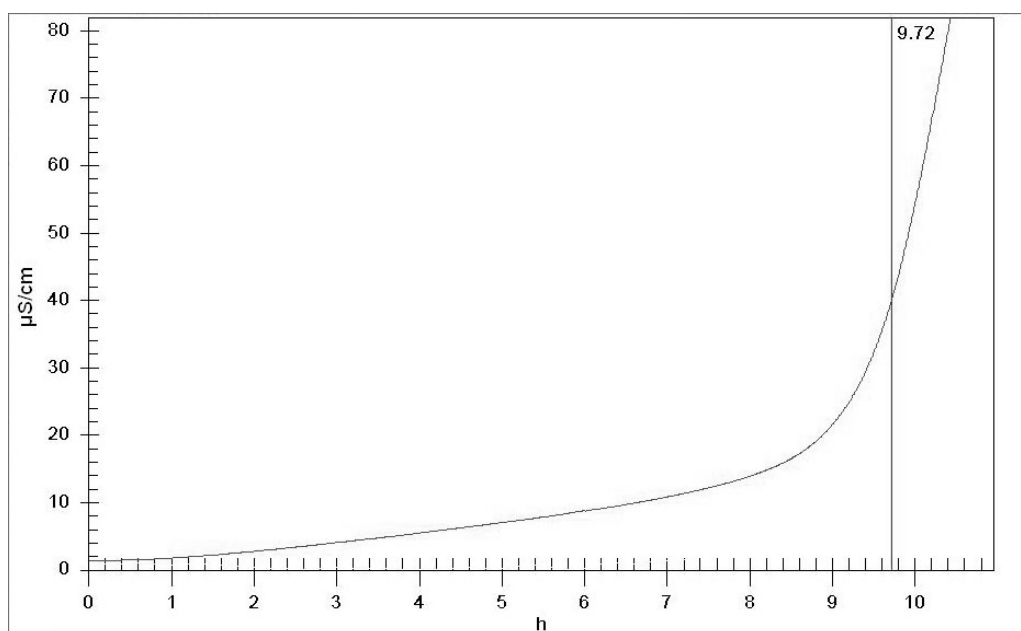
ภาพผนวกที่ ง34 เติบยรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำที่เติมสาร BHA ความเข้มข้น 250 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 2)



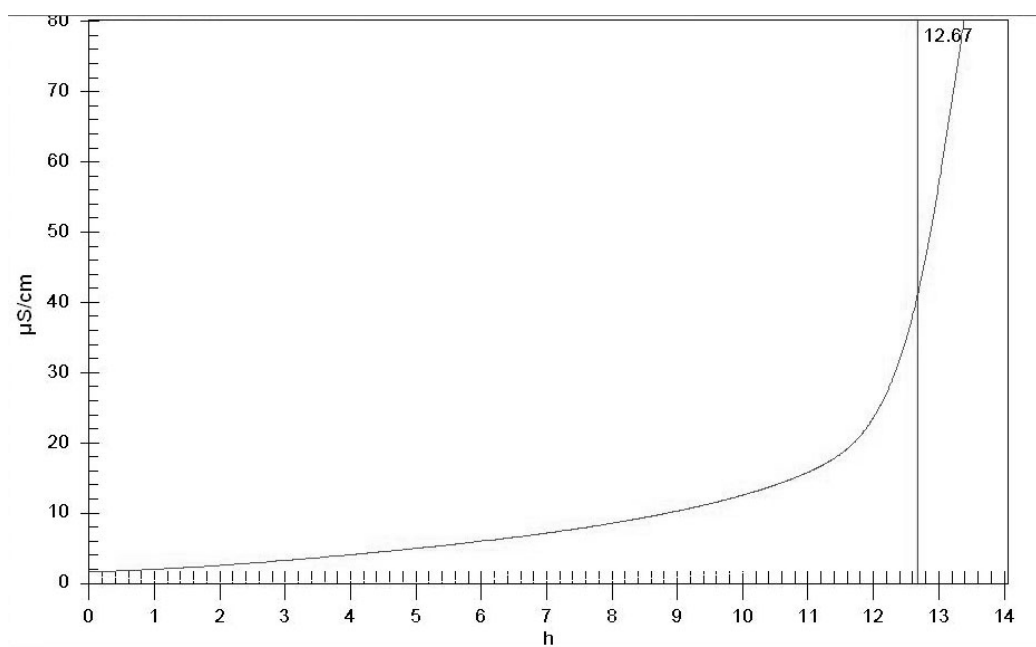
ภาพผนวกที่ ง35 เติษรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำที่เติมสาร BHA ความเข้มข้น 350 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 2)



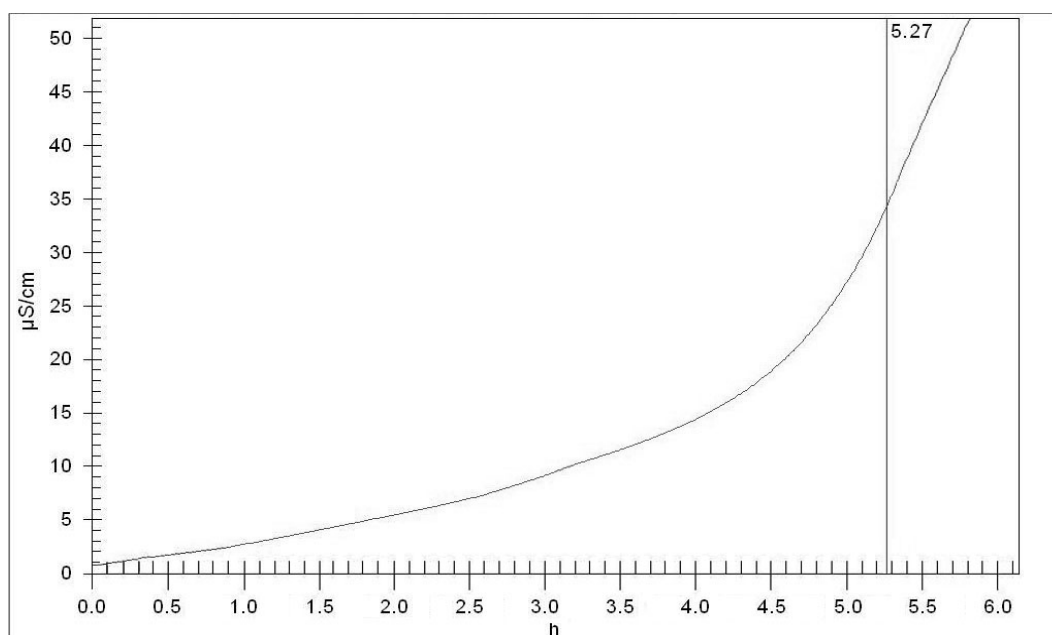
ภาพผนวกที่ ง36 เติษรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำที่เติมสาร BHA ความเข้มข้น 500 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 2)



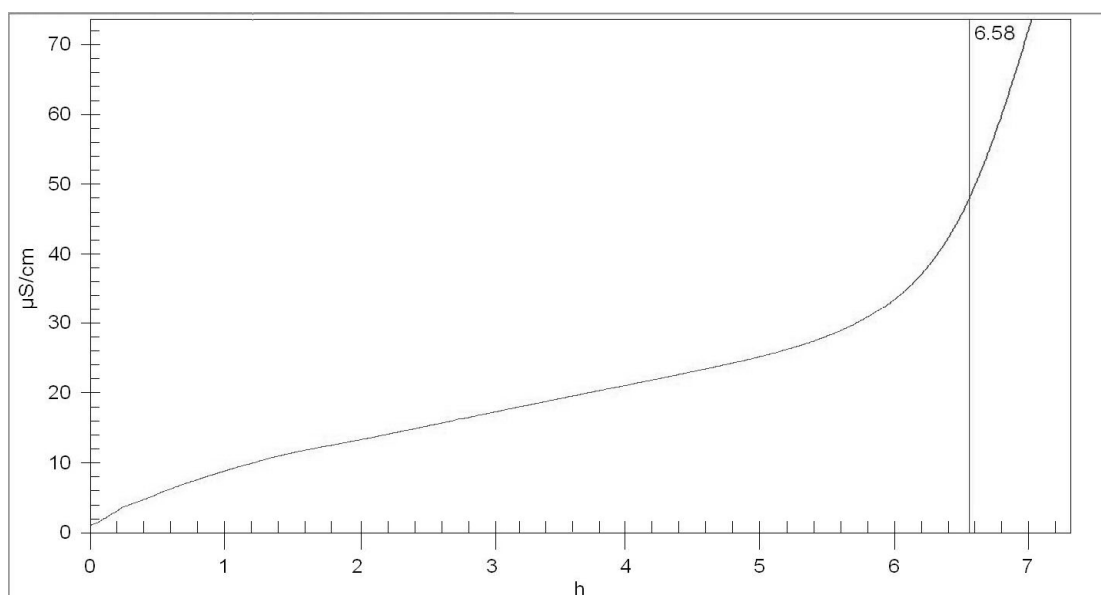
ภาพผนวกที่ ง37 เกลียวกราฟต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร BHA
ความเข้มข้น 650 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 2)



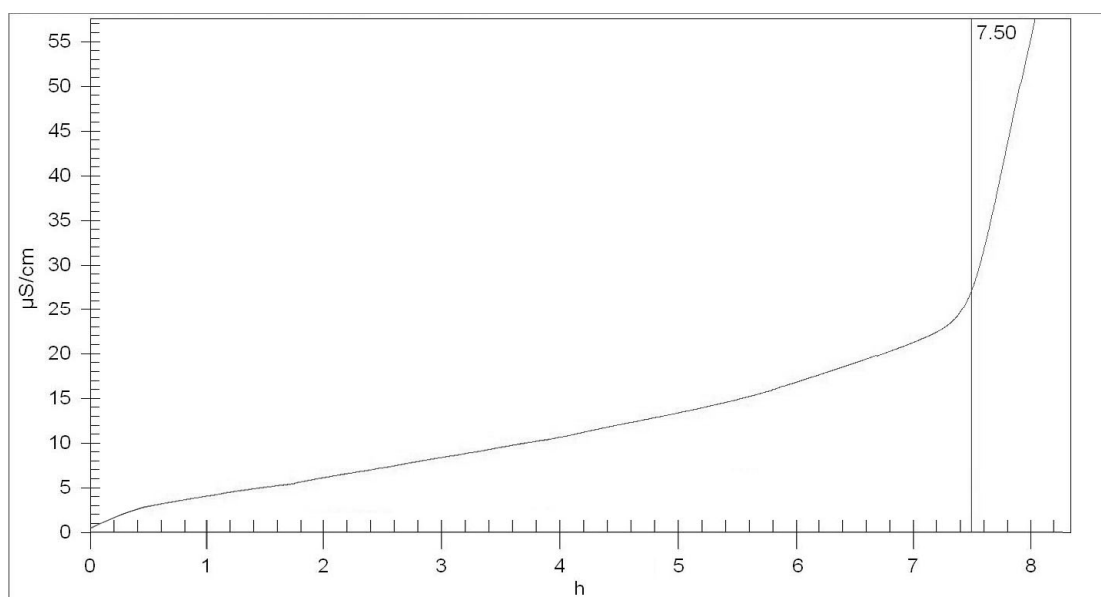
ภาพผนวกที่ ง38 เกลียวกราฟต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร BHA
ความเข้มข้น 750 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 2)



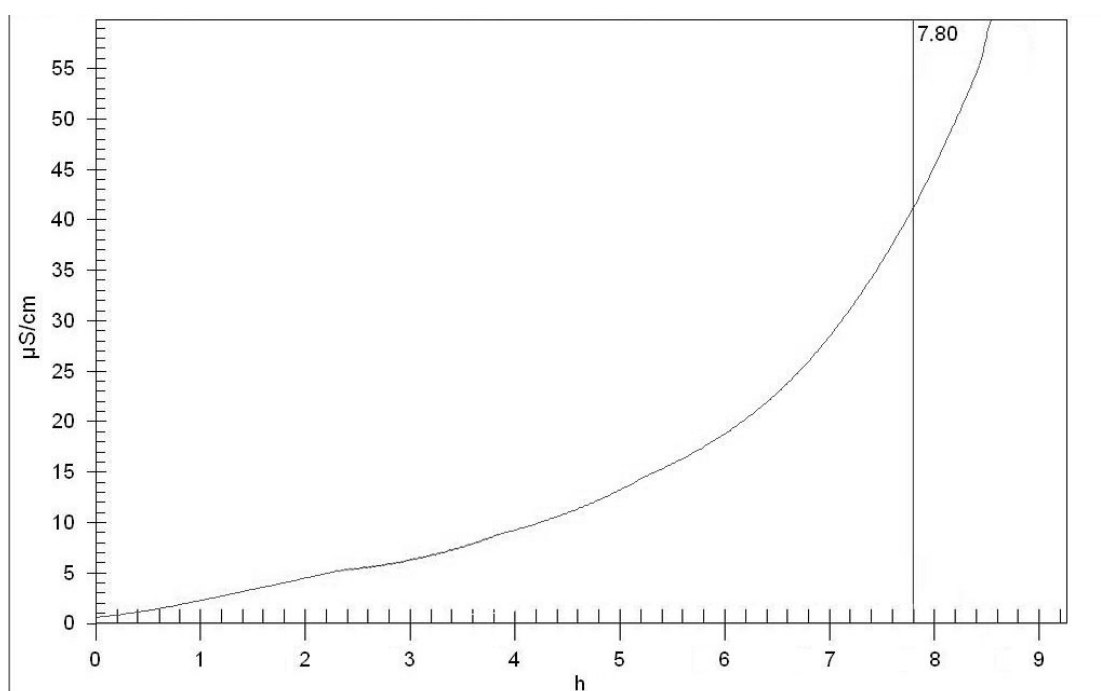
ภาพผนวกที่ ๓๓๙ เกลียวกราฟต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสนุดำที่เติมสาร BHA ความเข้มข้น 50 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 3)



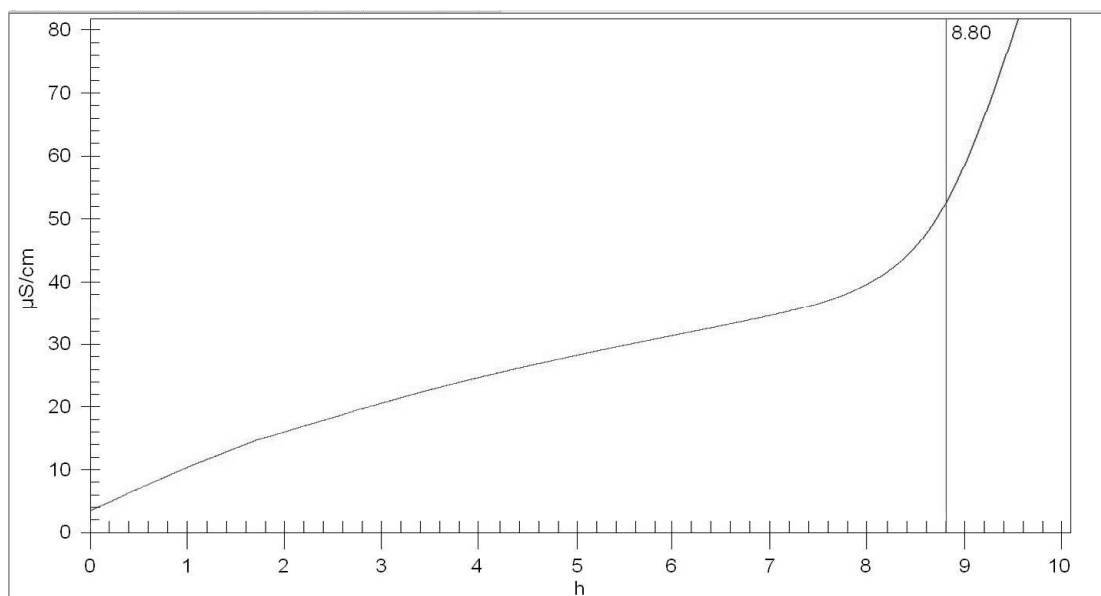
ภาพผนวกที่ ๓๔๐ เกลียวกราฟต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสนุดำที่เติมสาร BHA ความเข้มข้น 150 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 3)



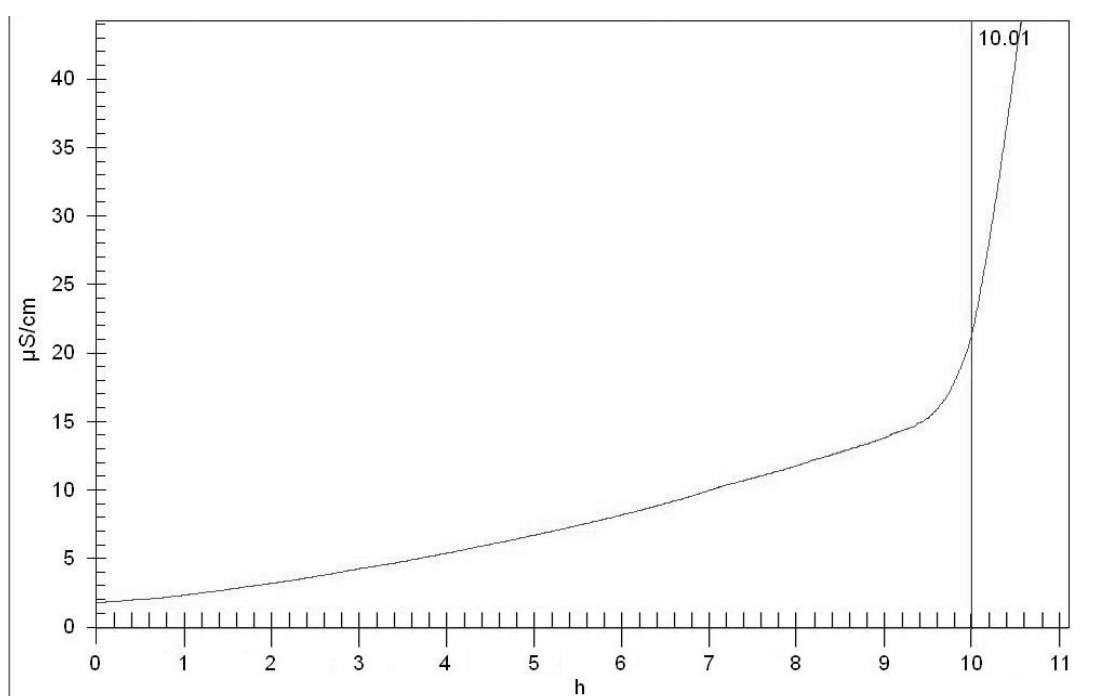
ภาพผนวกที่ ง41 เติบยรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำที่เติมสาร BHA ความเข้มข้น 250 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 3)



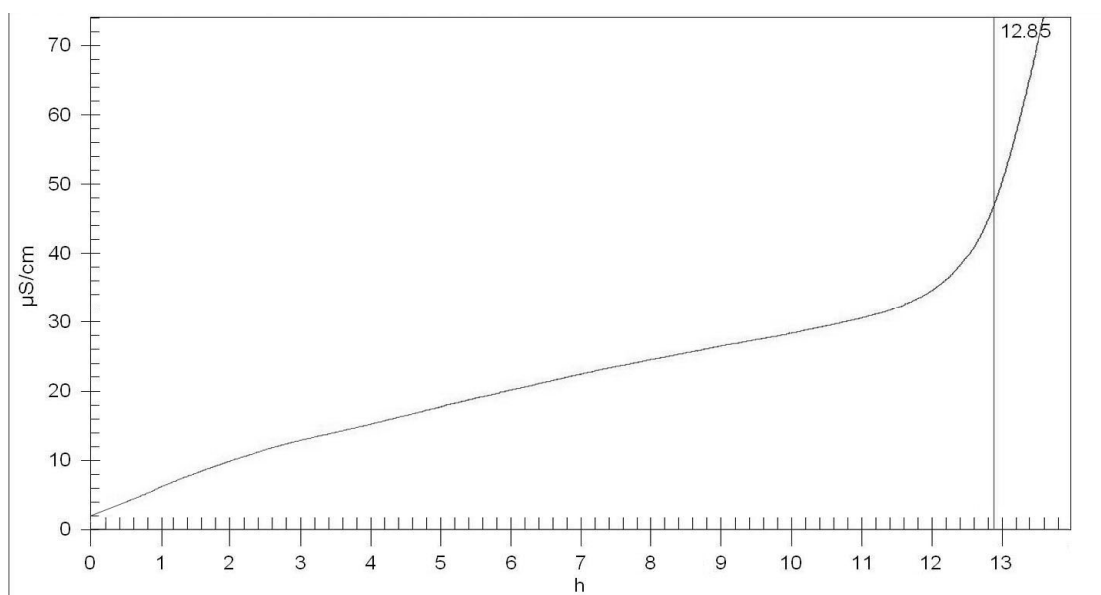
ภาพผนวกที่ ง42 เติบยรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำที่เติมสาร BHA ความเข้มข้น 350 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 3)



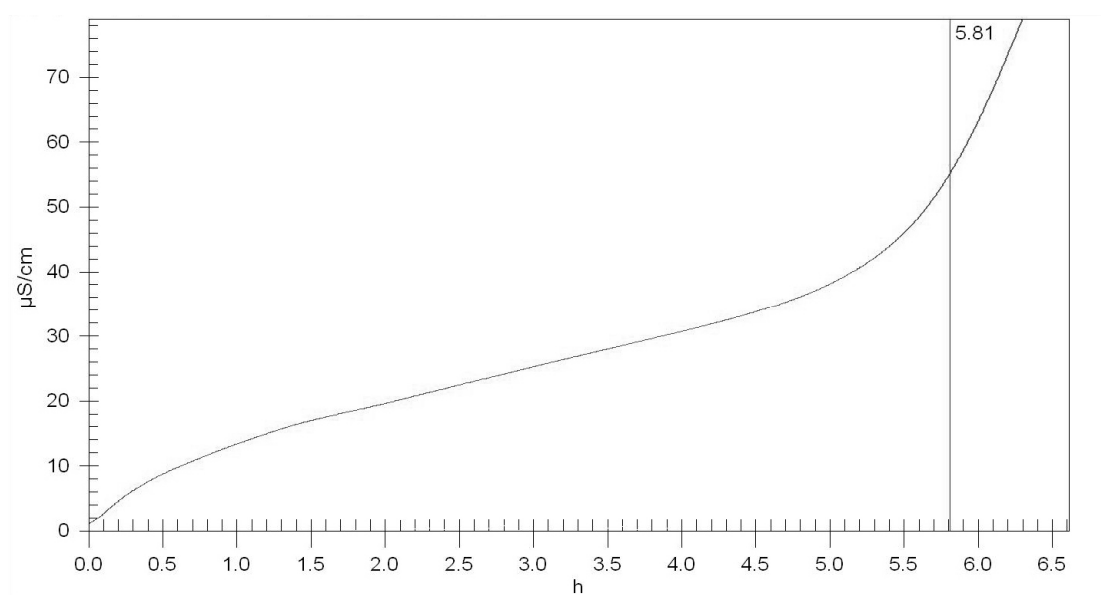
ภาพผนวกที่ ง43 เกลียวกราฟต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร BHA ความเข้มข้น 500 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 3)



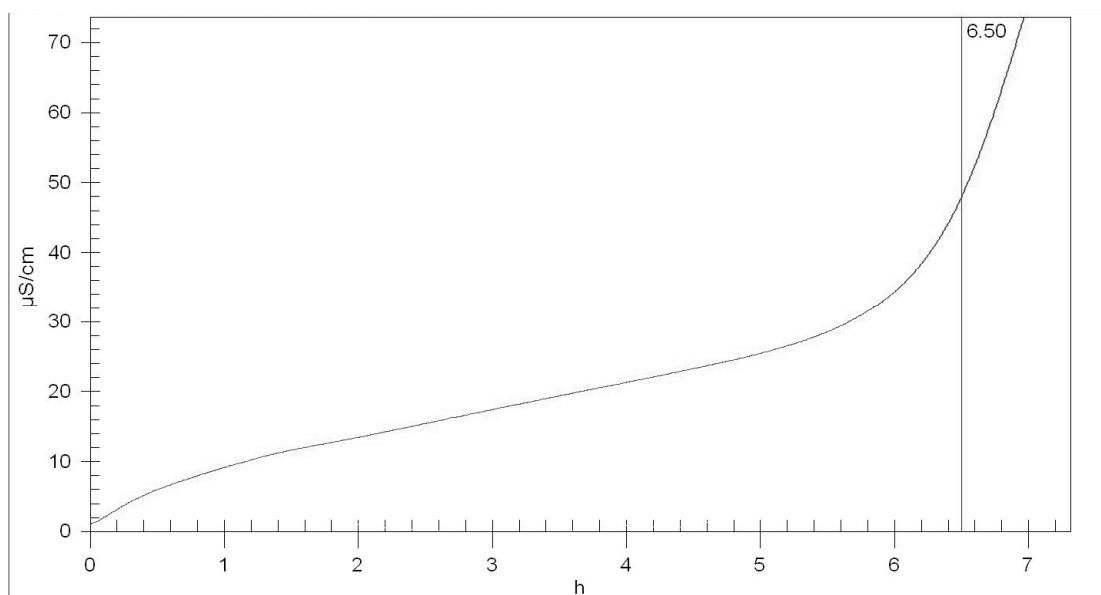
ภาพผนวกที่ ง44 เกลียวกราฟต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร BHA ความเข้มข้น 650 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 3)



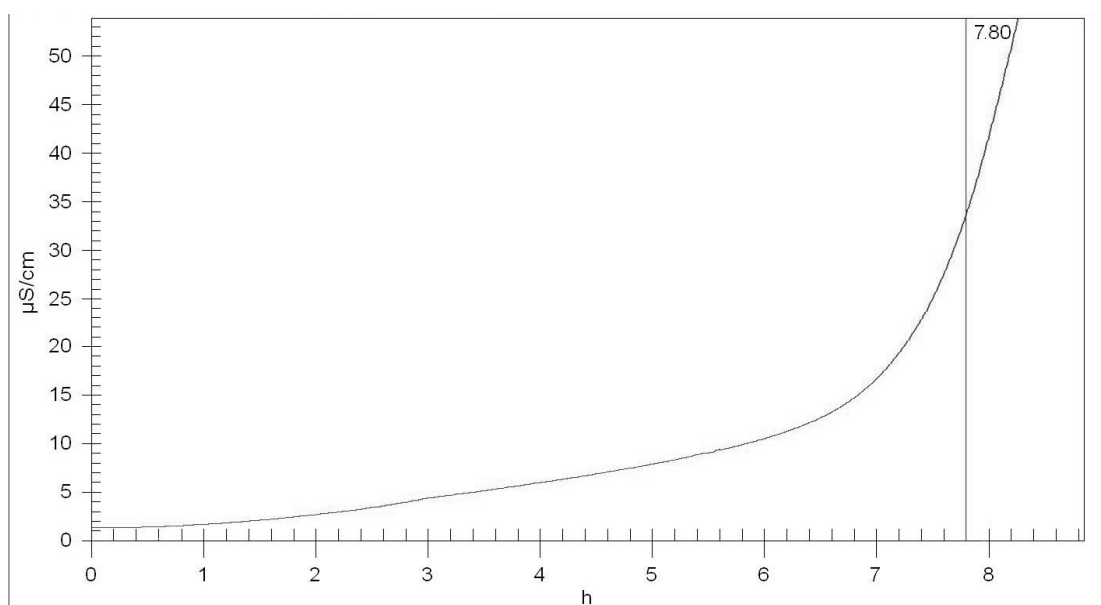
ภาพผนวกที่ ๔45 เติบยรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำที่เติมสาร BHA ความเข้มข้น 750 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 3)



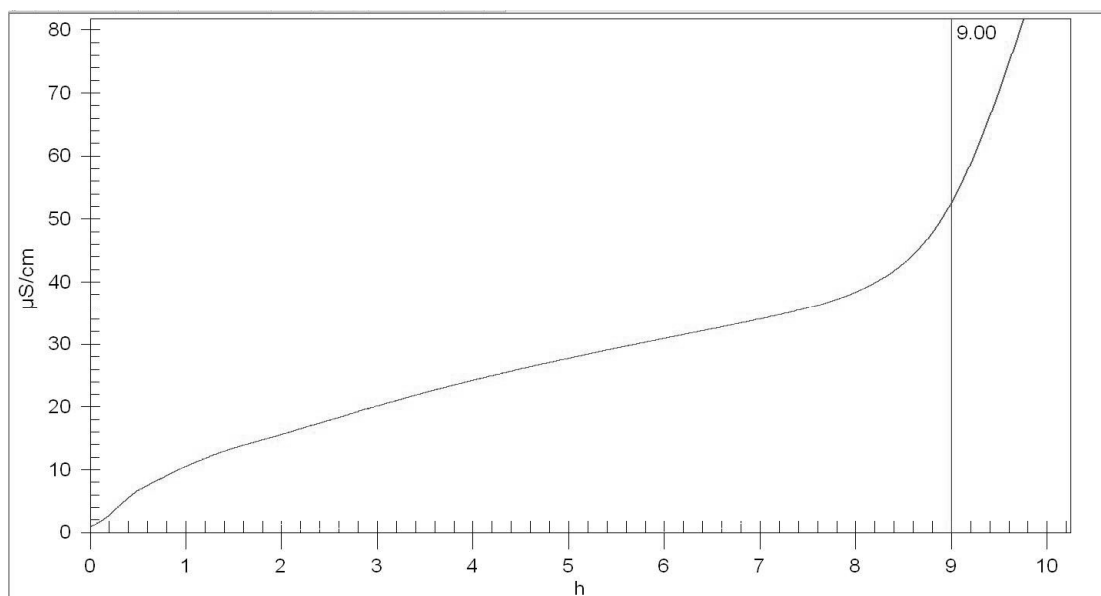
ภาพผนวกที่ ๔46 เติบยรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำที่เติมสาร TBHQ ความเข้มข้น 50 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 1)



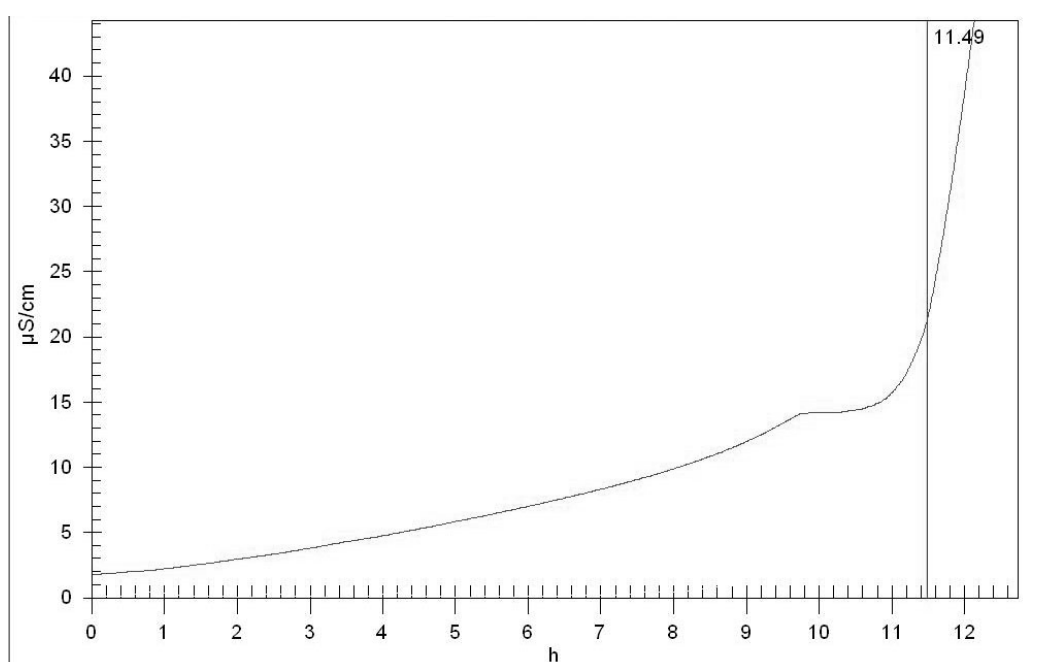
ภาพผนวกที่ ๔๗ เกลียวภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร TBHQ ความเข้มข้น 150 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 1)



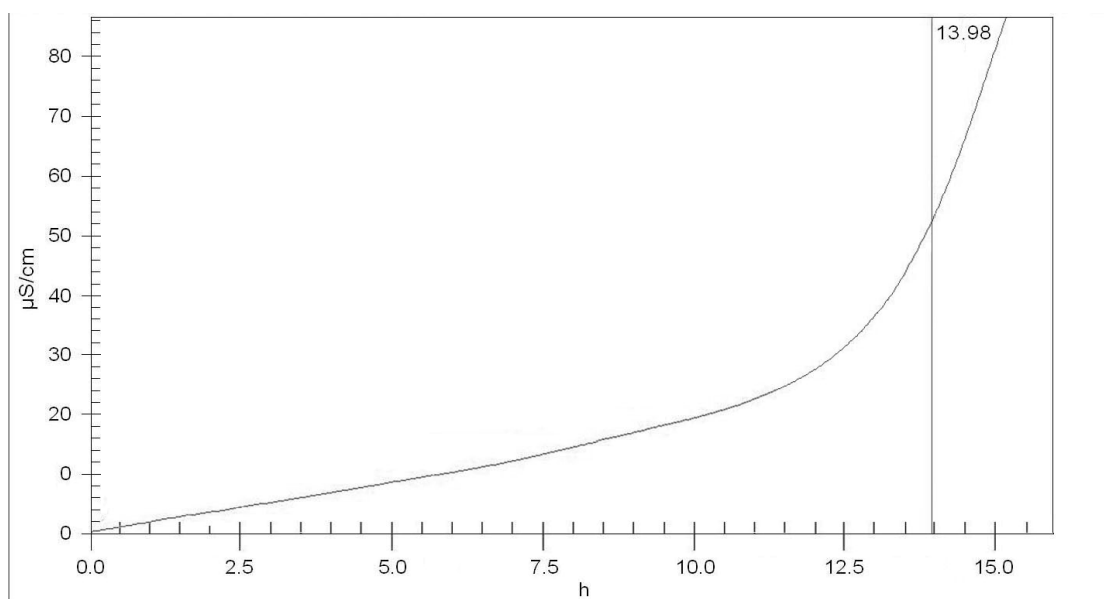
ภาพผนวกที่ ๔๘ เกลียวภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร TBHQ ความเข้มข้น 250 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 1)



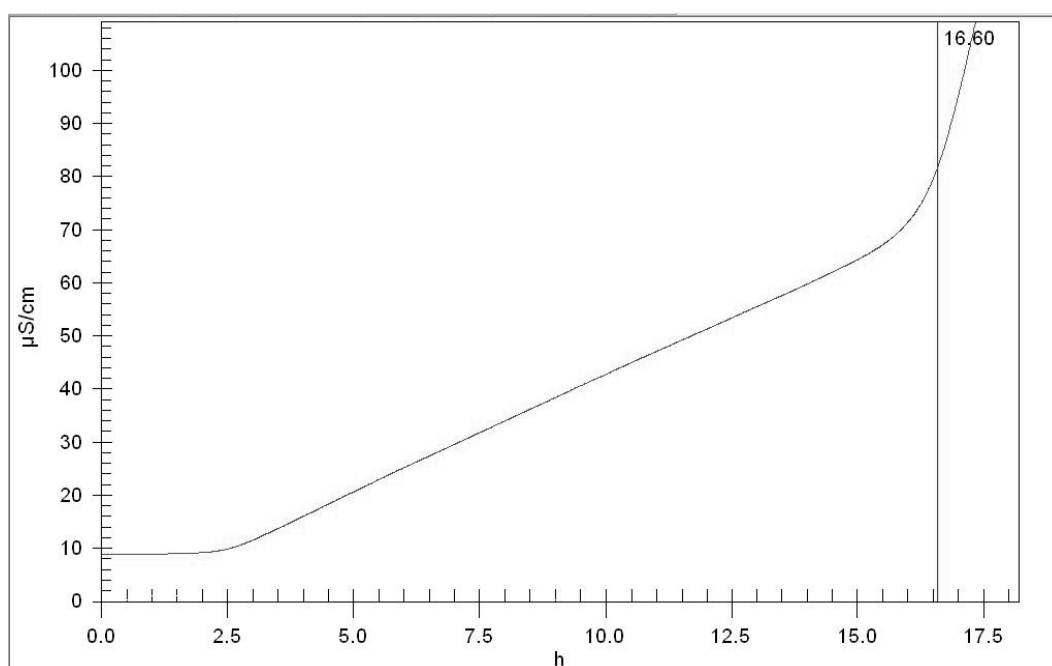
ภาพผนวกที่ ง49 เกลียวกราฟต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร TBHQ ความเข้มข้น 350 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 1)



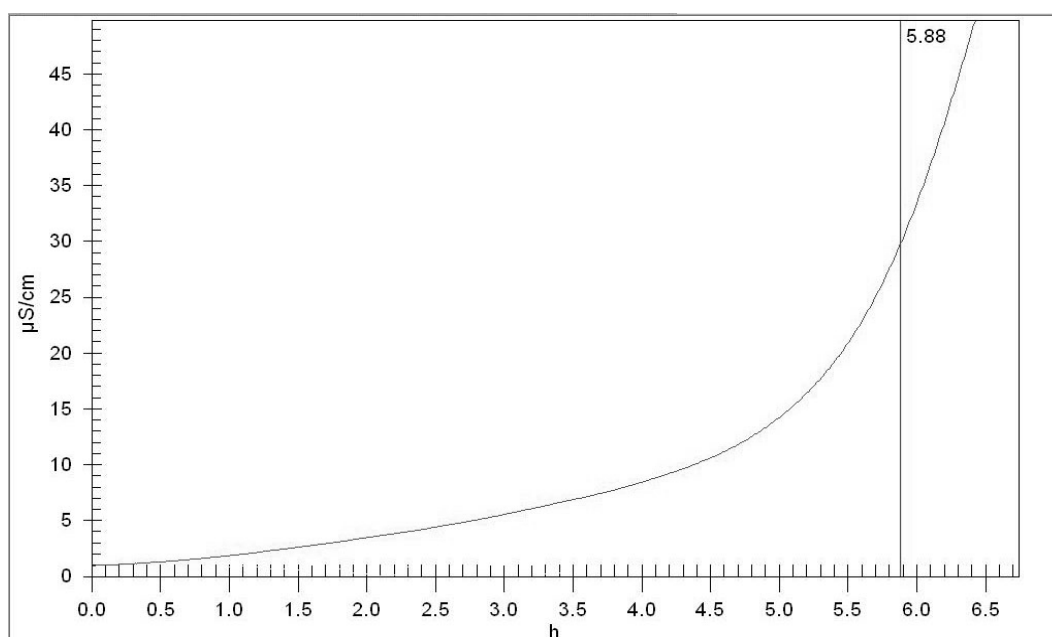
ภาพผนวกที่ ง50 เกลียวกราฟต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร TBHQ ความเข้มข้น 500 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 1)



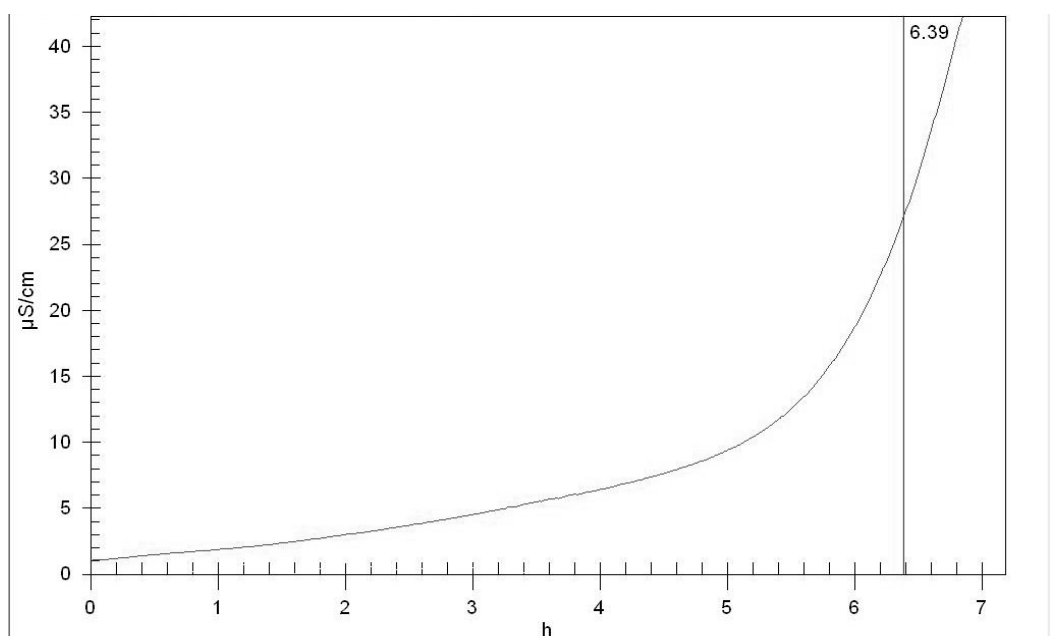
ภาพผนวกที่ ๕1 เติบยรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร TBHQ ความเข้มข้น 650 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 1)



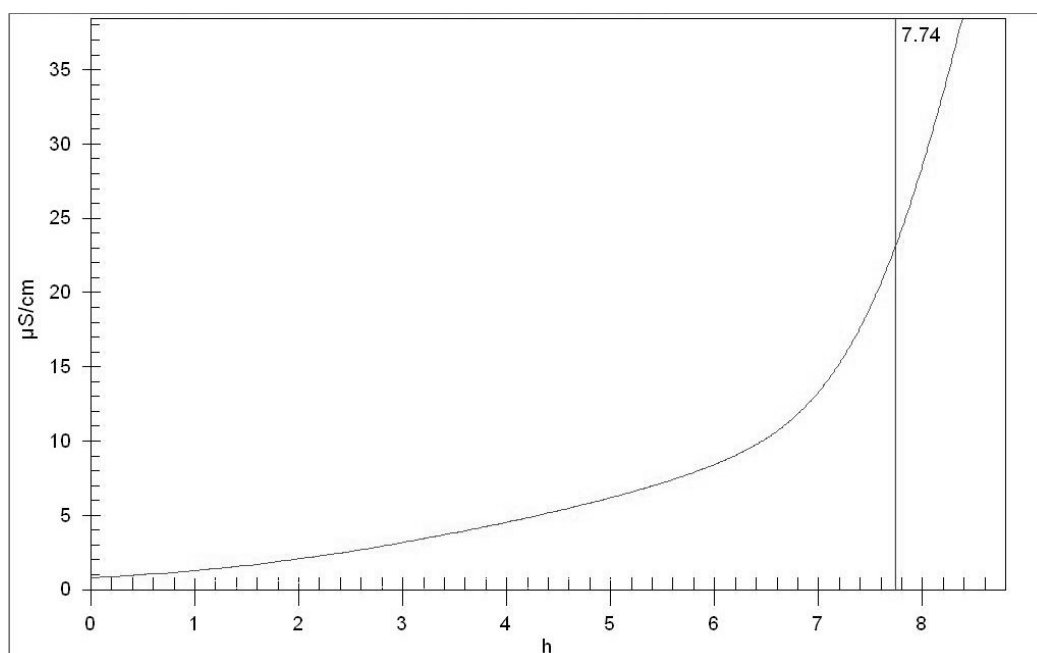
ภาพผนวกที่ ๕2 เติบยรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร TBHQ ความเข้มข้น 750 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 1)



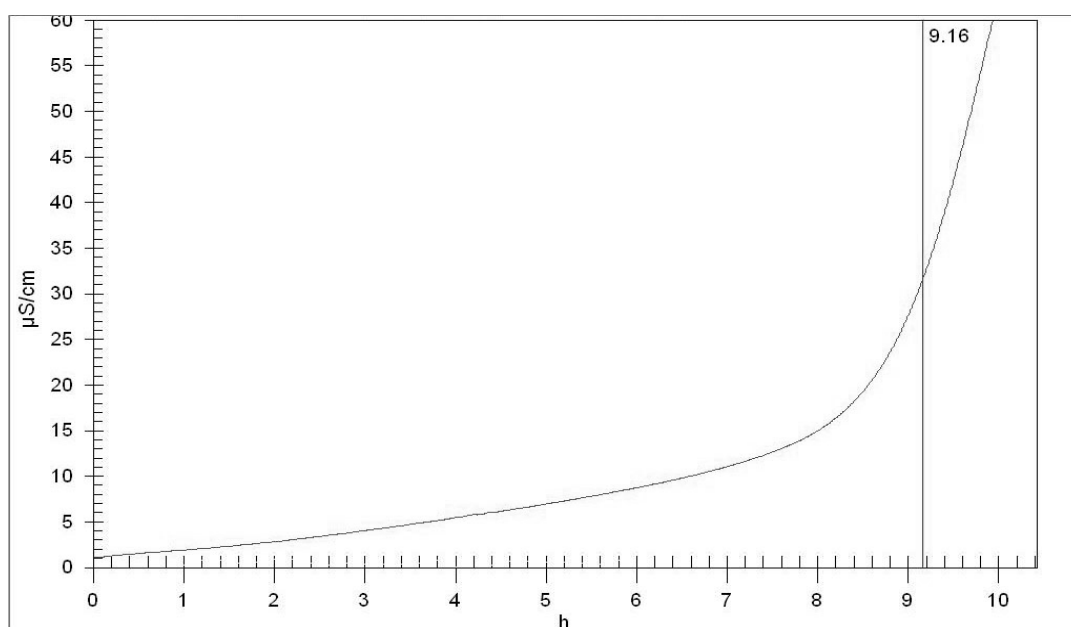
ภาพผนวกที่ ง53 เกลียวกราฟต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร TBHQ ความเข้มข้น 50 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 2)



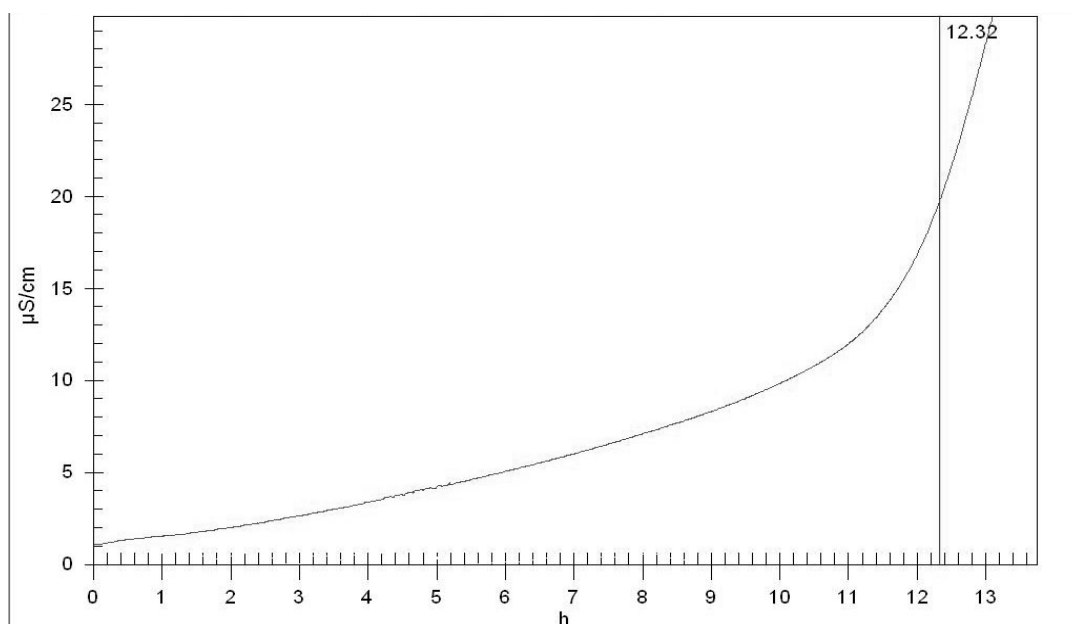
ภาพผนวกที่ ง54 เกลียวกราฟต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร TBHQ ความเข้มข้น 150 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 2)



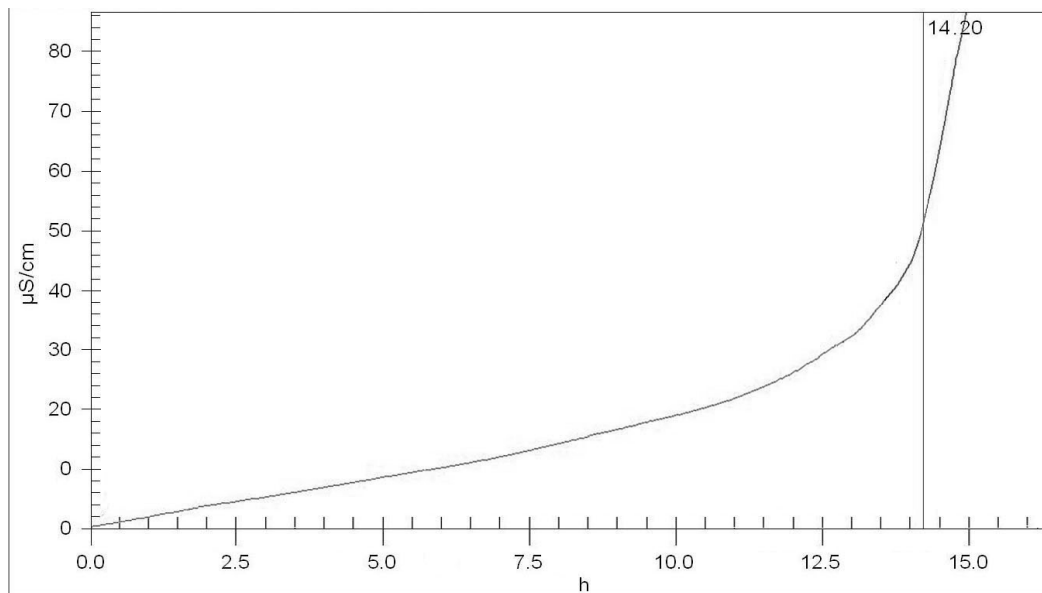
ภาพผนวกที่ ๖55 เกลียวกราฟต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร TBHQ ความเข้มข้น 250 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 2)



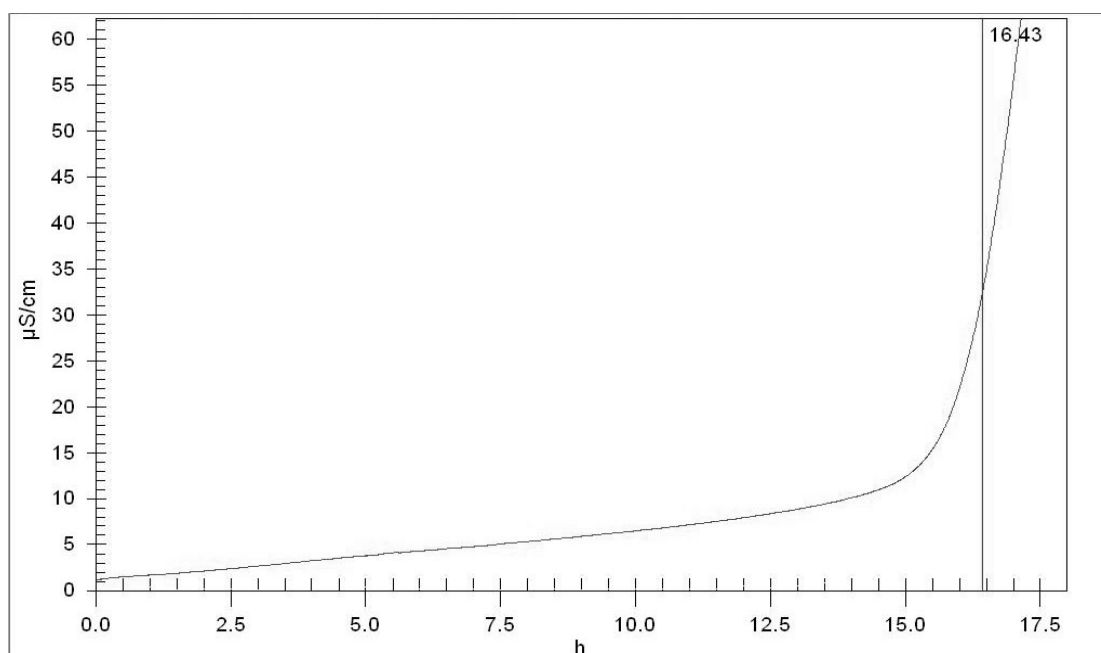
ภาพผนวกที่ ๖56 เกลียวกราฟต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร TBHQ ความเข้มข้น 350 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 2)



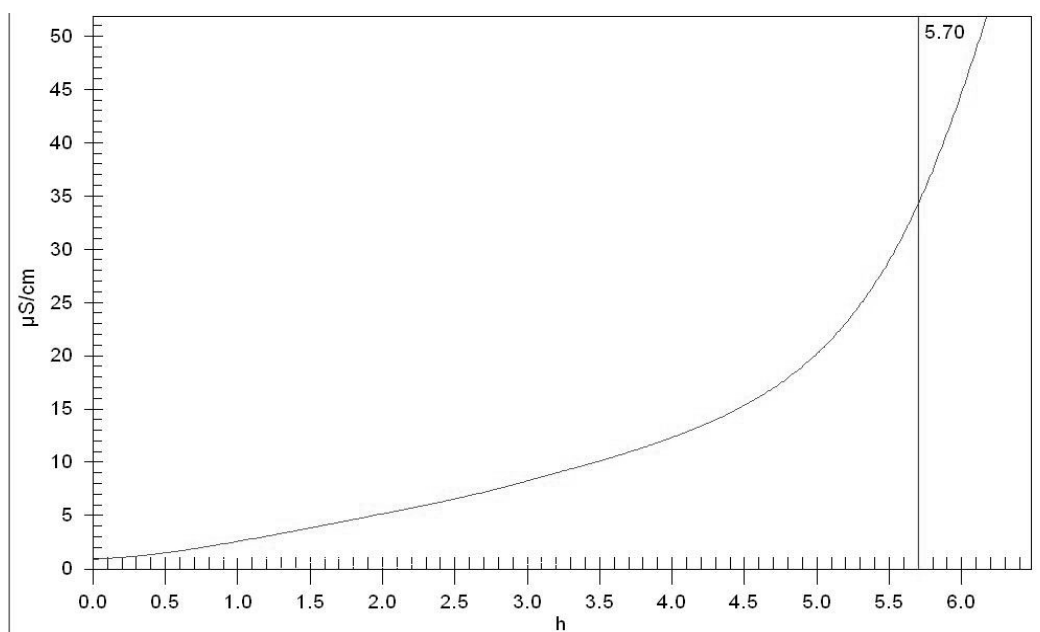
ภาพผนวกที่ ๕๗ เกลียวภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร TBHQ ความเข้มข้น 500 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 2)



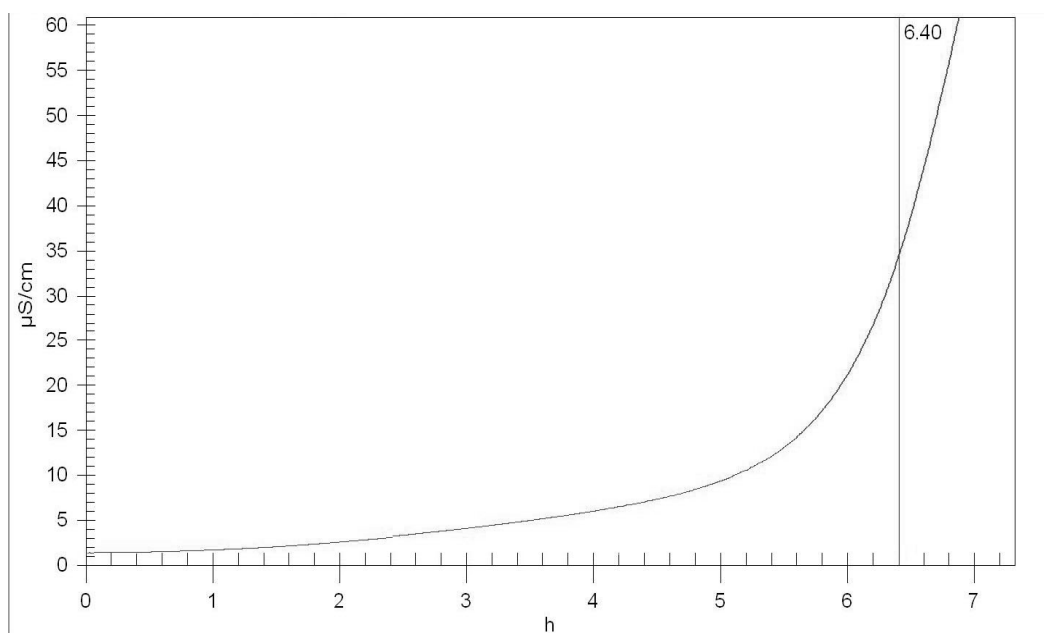
ภาพผนวกที่ ๕๘ เกลียวภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร TBHQ ความเข้มข้น 650 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 2)



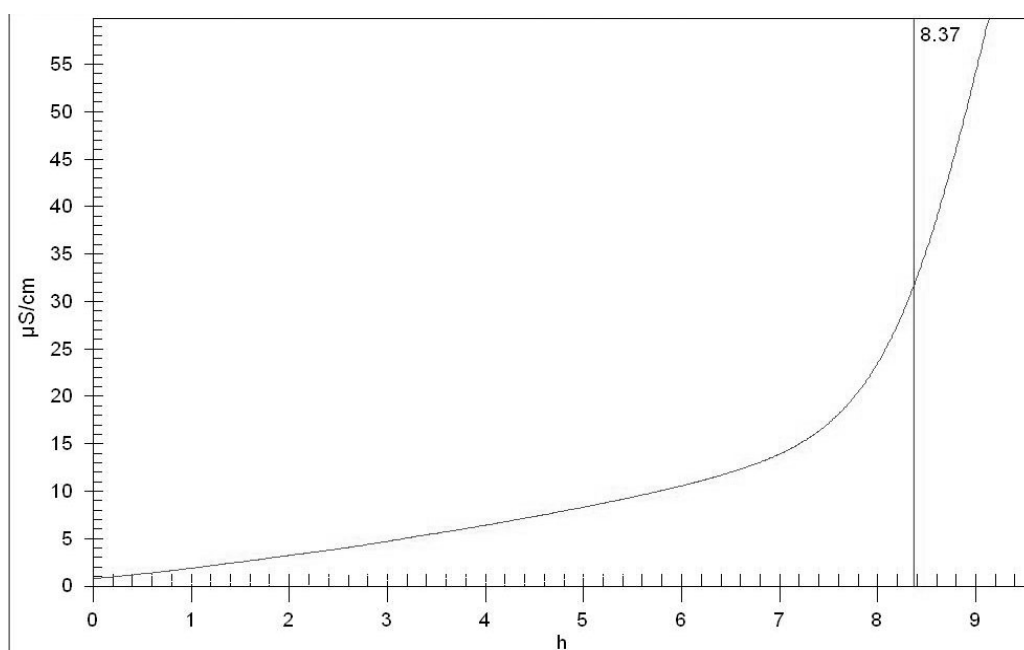
ภาพผนวกที่ ๖๕๙ เกลียวกราฟต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำที่เติมสาร TBHQ ความเข้มข้น 750 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 2)



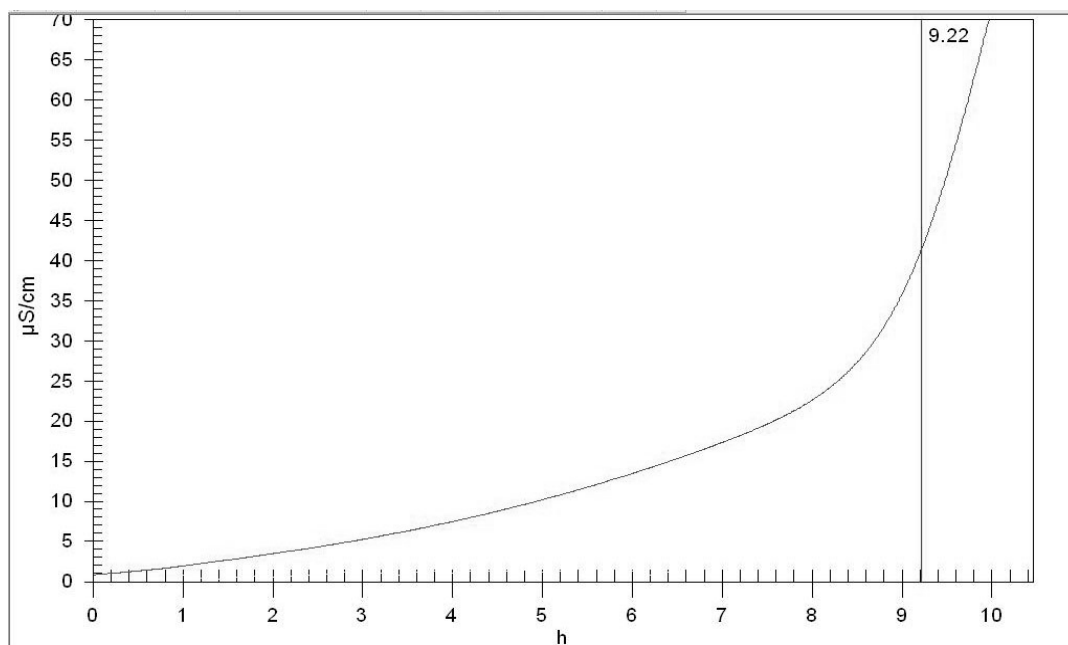
ภาพผนวกที่ ๖๖๐ เกลียวกราฟต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำที่เติมสาร TBHQ ความเข้มข้น 50 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 3)



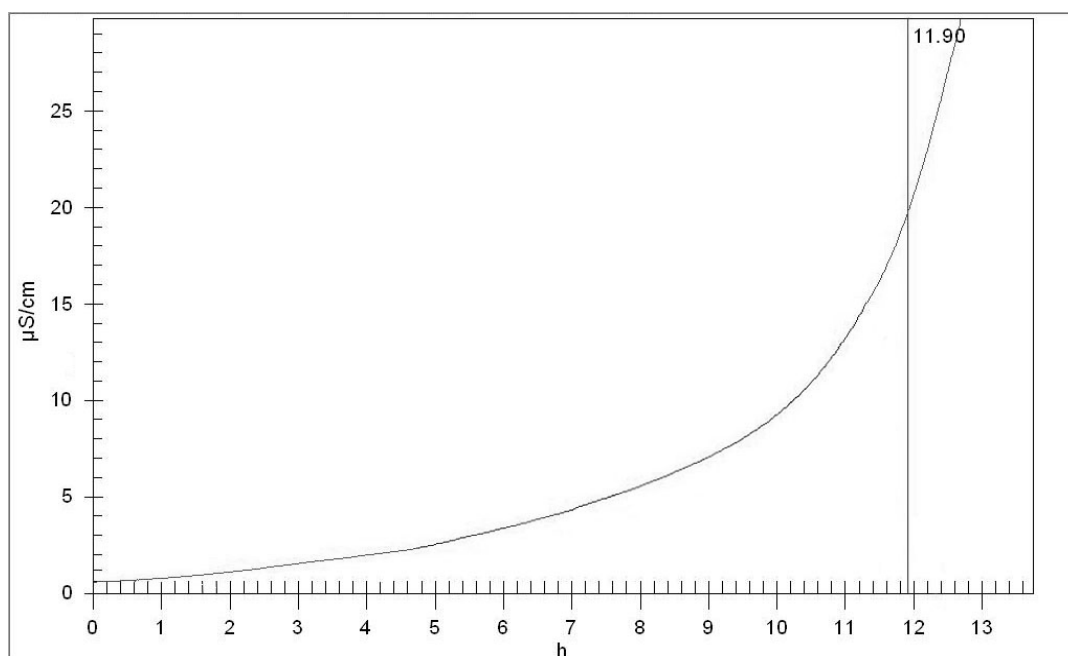
ภาพผนวกที่ ง61 เกลียวกราฟต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร
TBHQ ความเข้มข้น 150 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 3)



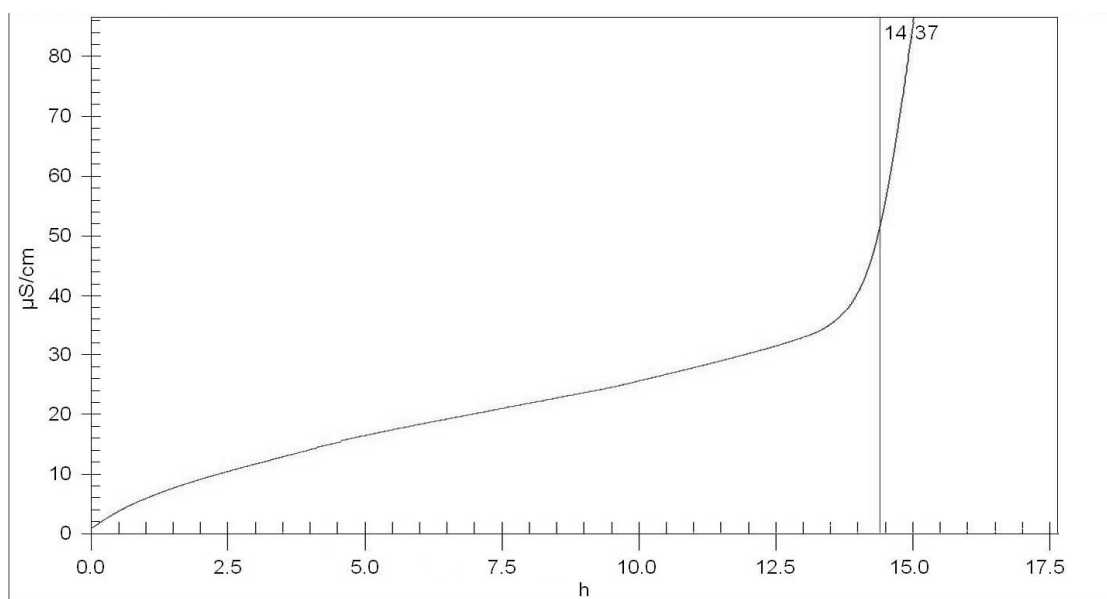
ภาพผนวกที่ ง62 เกลียวกราฟต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร
TBHQ ความเข้มข้น 250 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 3)



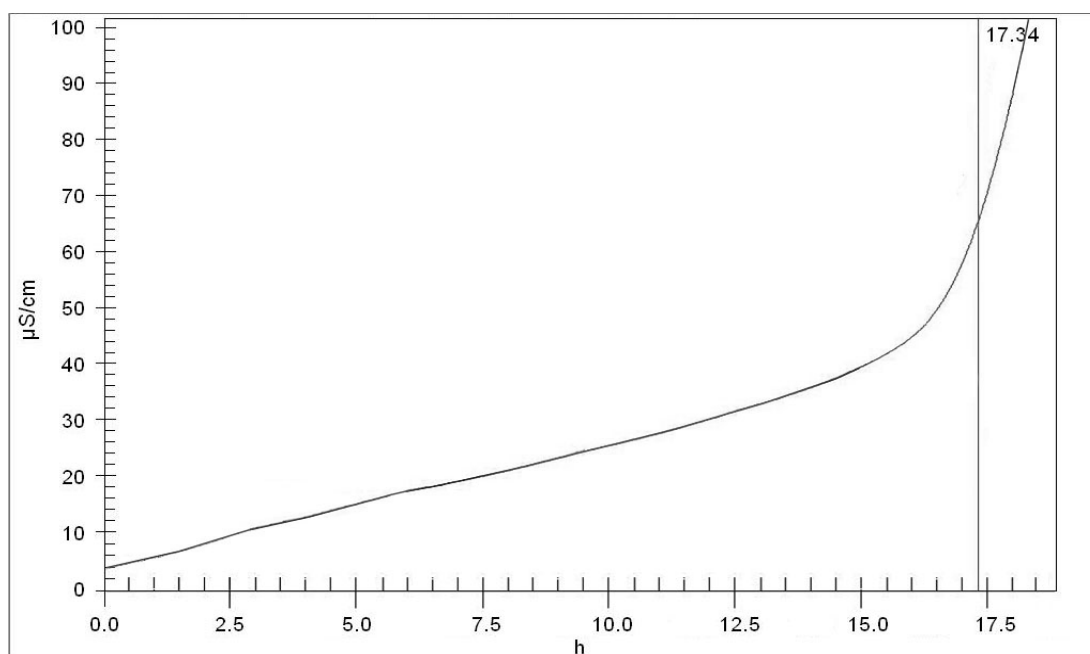
ภาพผนวกที่ ง63 เกลียวกราฟต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร TBHQ ความเข้มข้น 350 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 3)



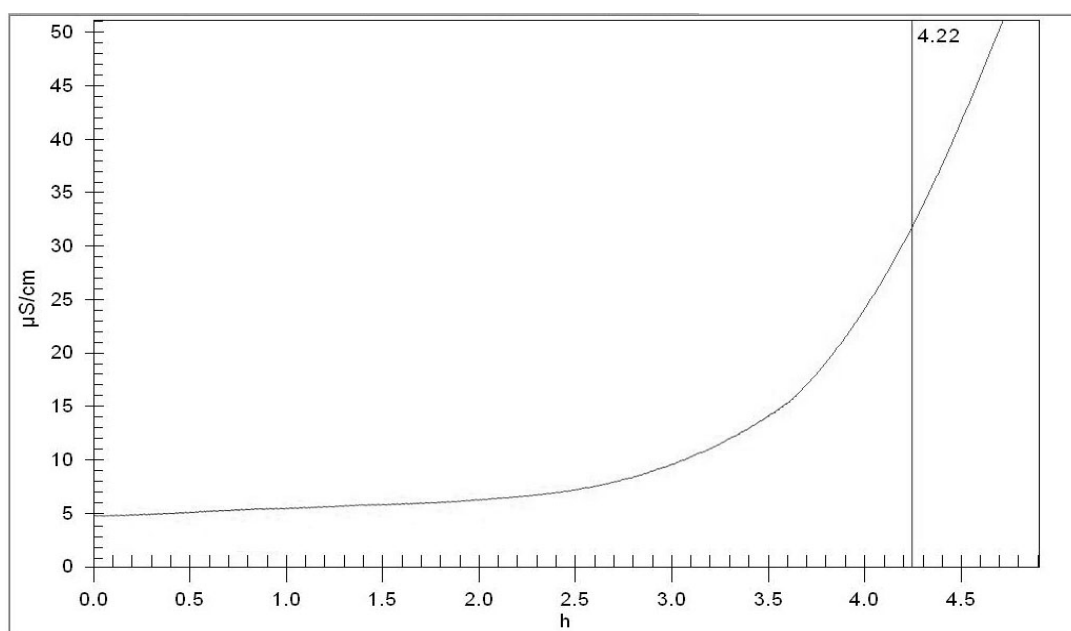
ภาพผนวกที่ ง64 เกลียวกราฟต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร TBHQ ความเข้มข้น 500 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 3)



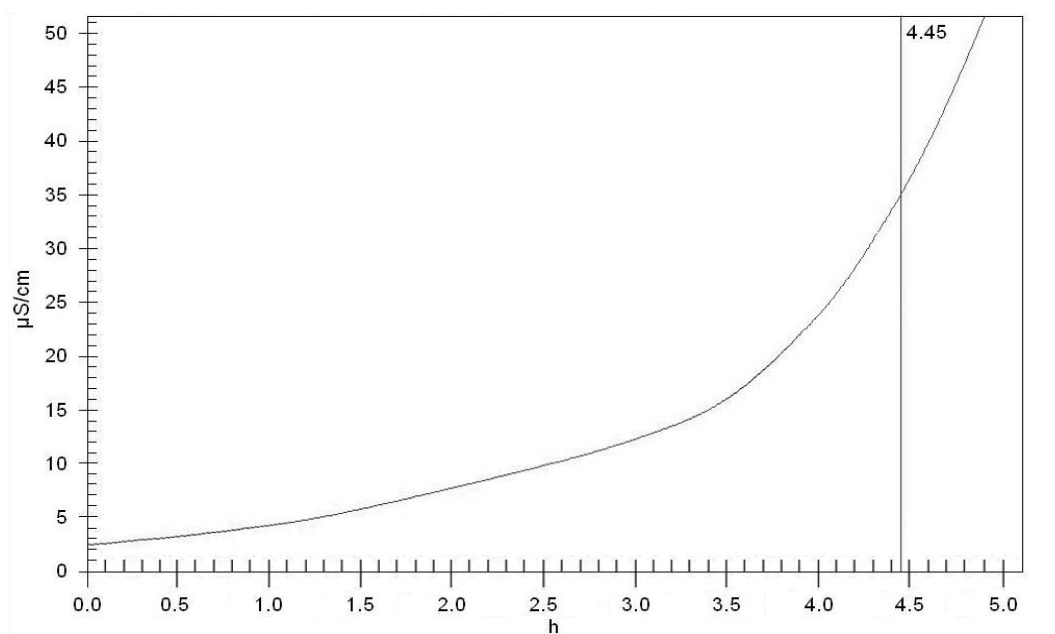
ภาพผนวกที่ ง65 เติบยรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสนุดำที่เดิมสาร
TBHQ ความเข้มข้น 650 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 3)



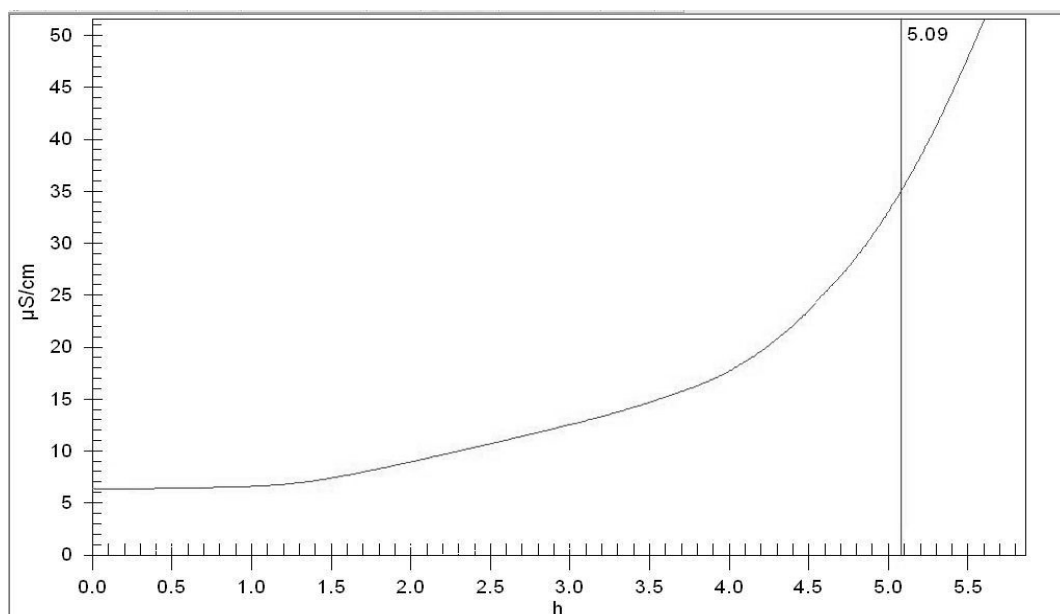
ภาพผนวกที่ ง66 เติบยรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสนุดำที่เดิมสาร
TBHQ ความเข้มข้น 750 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 3)



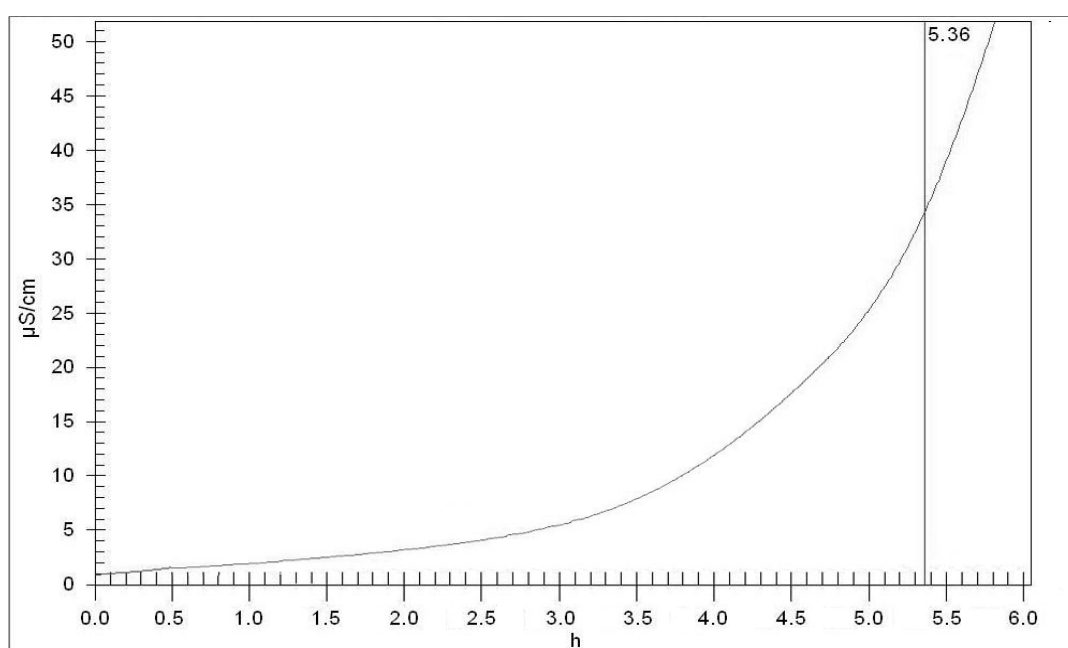
ภาพผนวกที่ ง67 เกลียวภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำที่เดิมสาร ZEP
ความเข้มข้น 250 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 1)



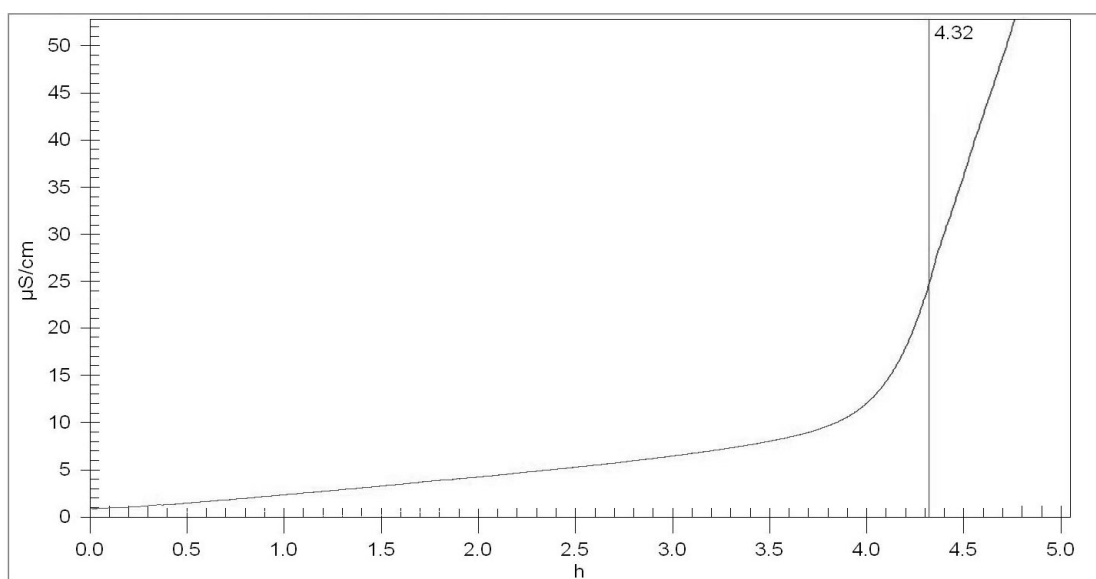
ภาพผนวกที่ ง68 เกลียวภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำที่เดิมสาร ZEP
ความเข้มข้น 500 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 1)



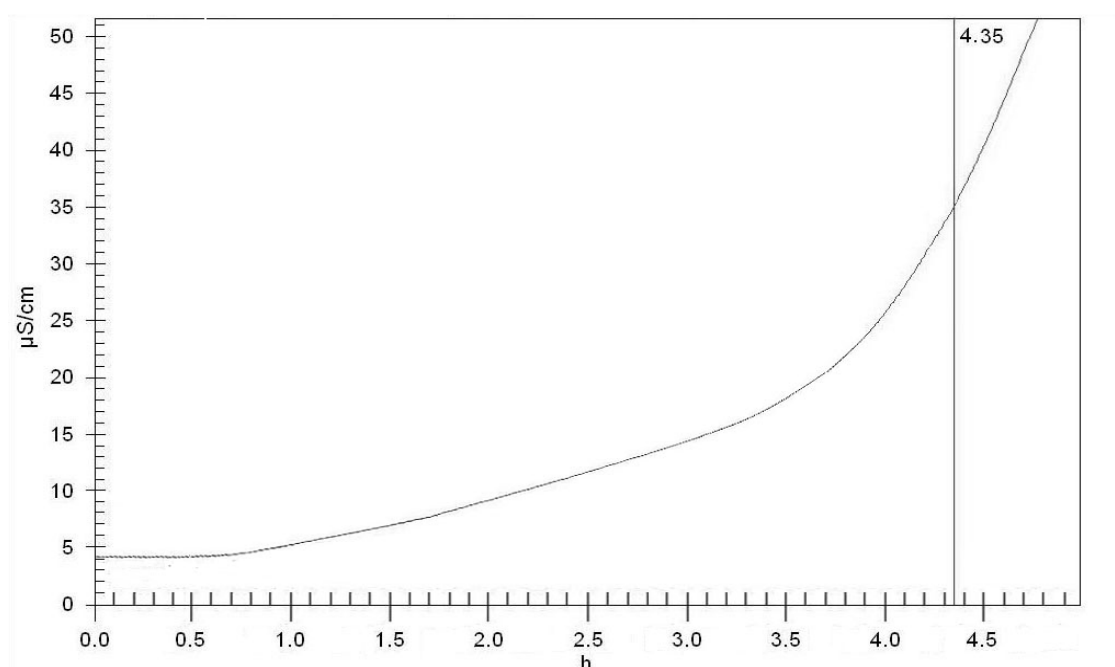
ภาพผนวกที่ ง69 เกลียวภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร ZEP
ความเข้มข้น 750 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 1)



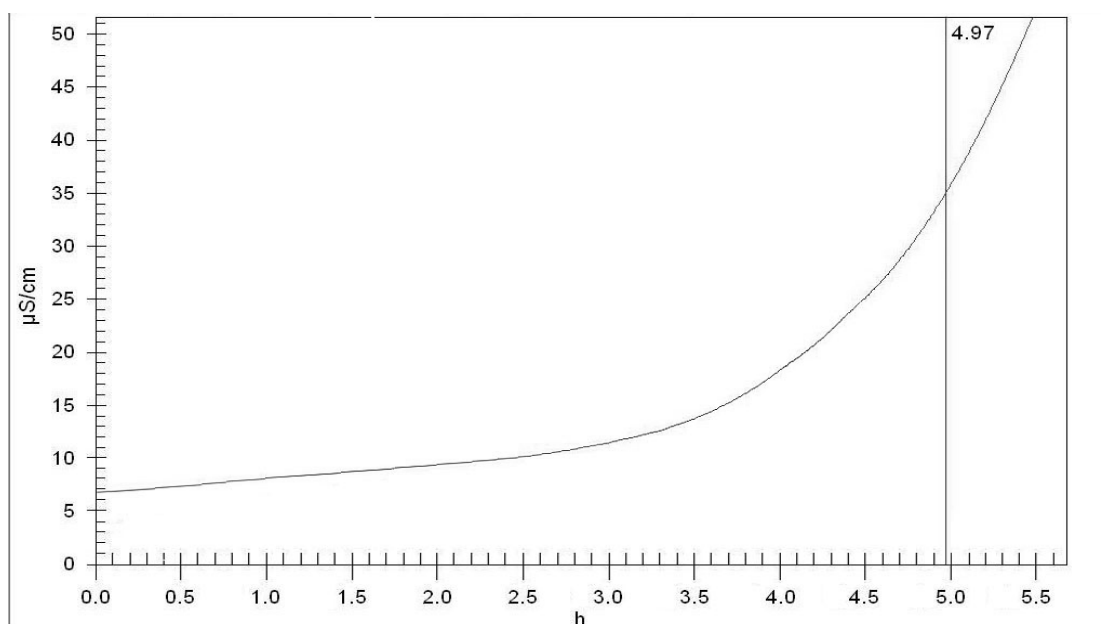
ภาพผนวกที่ ง70 เกลียวภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร ZEP
ความเข้มข้น 1,000 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 1)



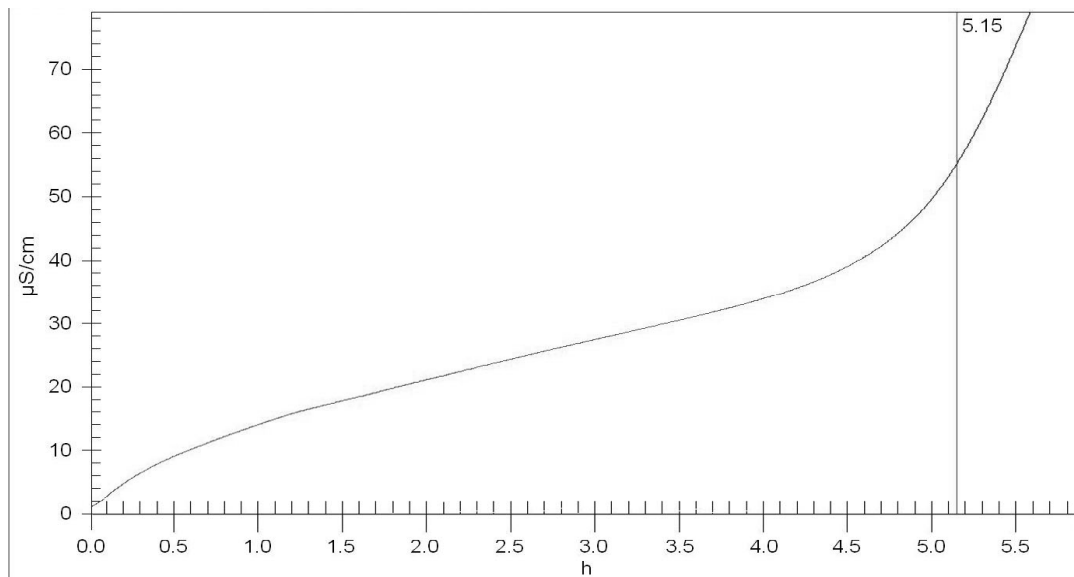
ภาพผนวกที่ ง71 เกลียวภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำที่เดิมสาร ZEP
ความเข้มข้น 250 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 2)



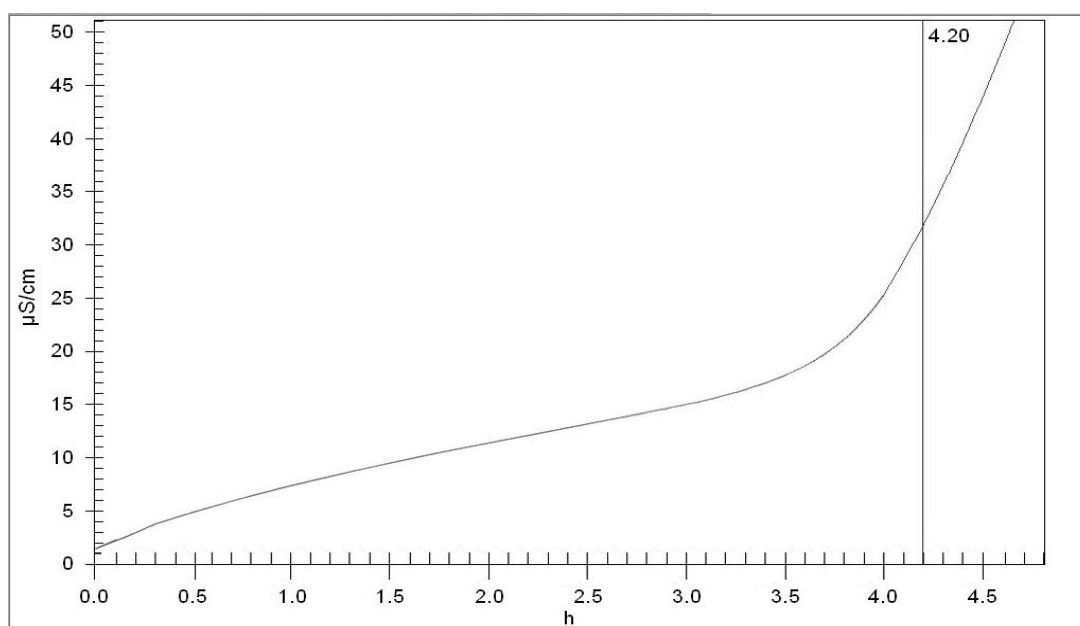
ภาพผนวกที่ ง72 เกลียวภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำที่เดิมสาร ZEP
ความเข้มข้น 500 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 2)



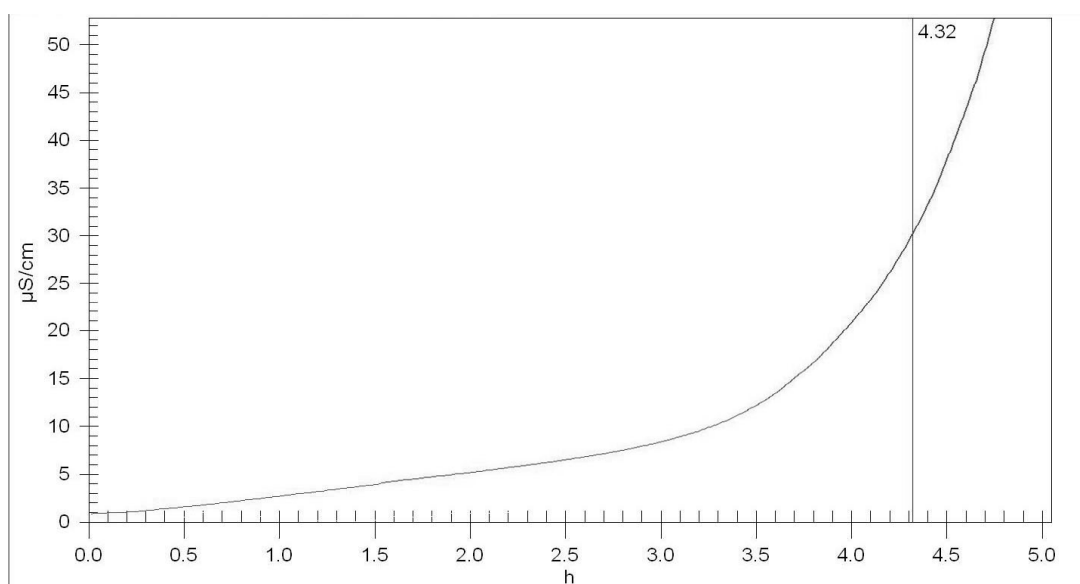
ภาพผนวกที่ ง73 เติลยรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำที่เดิมสาร ZEP
ความเข้มข้น 750 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 2)



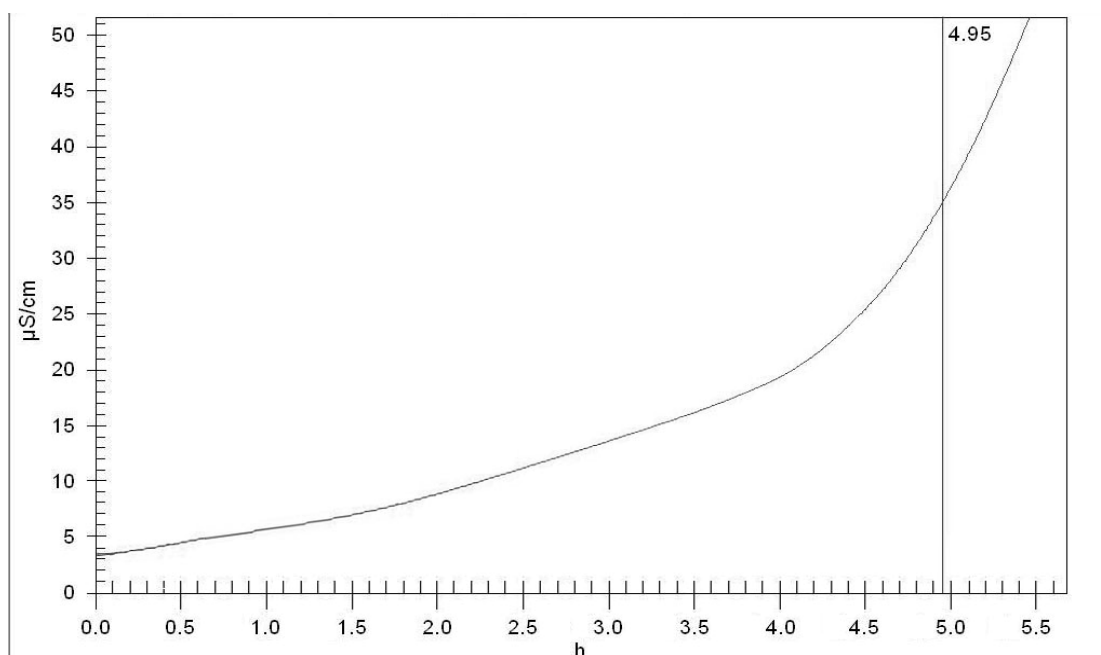
ภาพผนวกที่ ง74 เติลยรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำที่เดิมสาร ZEP
ความเข้มข้น 1,000 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 2)



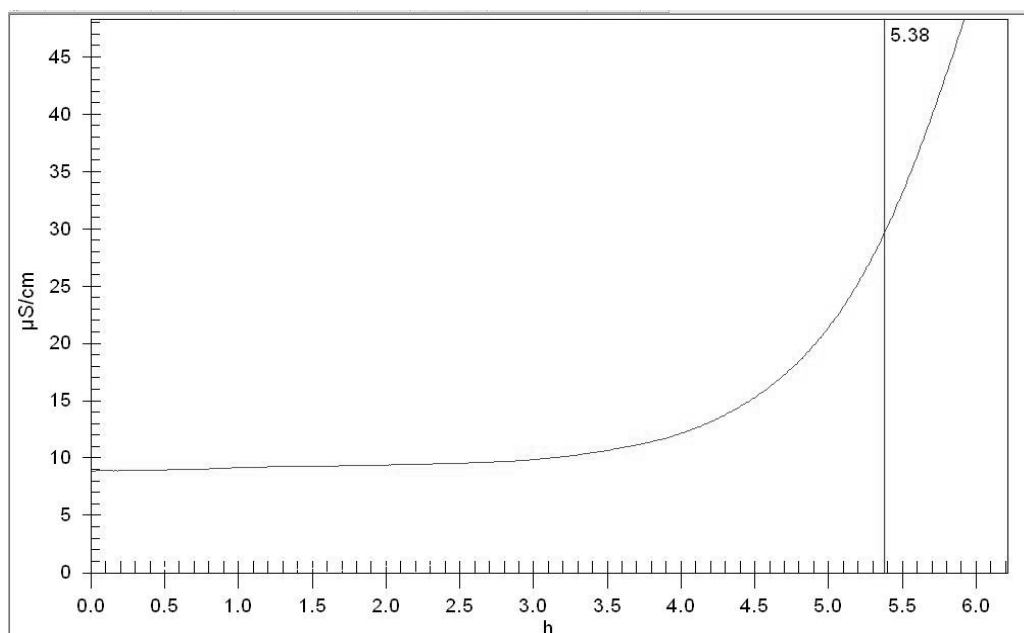
ภาพผนวกที่ ง75 เติบยรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำที่เดิมสาร ZEP
ความเข้มข้น 250 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 3)



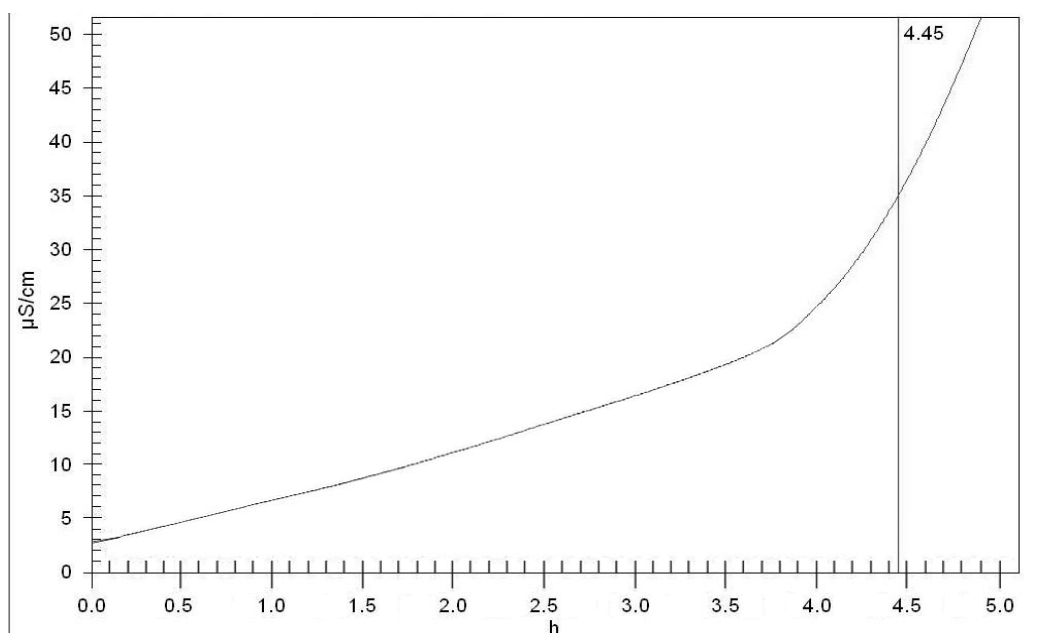
ภาพผนวกที่ ง76 เติบยรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำที่เดิมสาร ZEP
ความเข้มข้น 500 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 3)



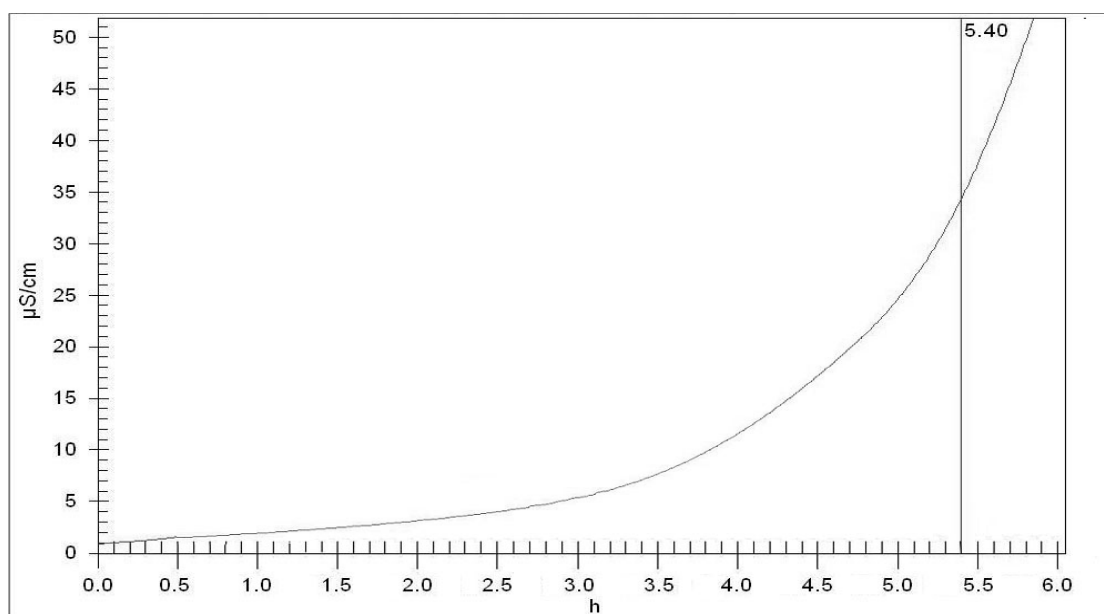
ภาพผนวกที่ ง77 เกลียวภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เดิมสาร ZEP
ความเข้มข้น 750 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 3)



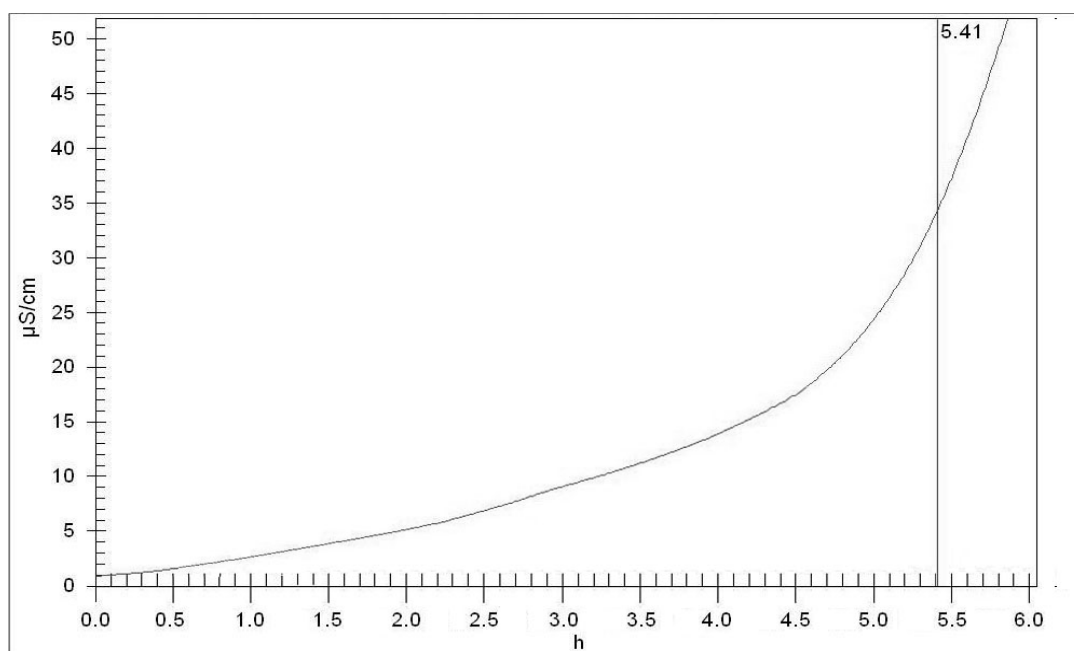
ภาพผนวกที่ ง78 เกลียวภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เดิมสาร ZEP
ความเข้มข้น 1,000 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 3)



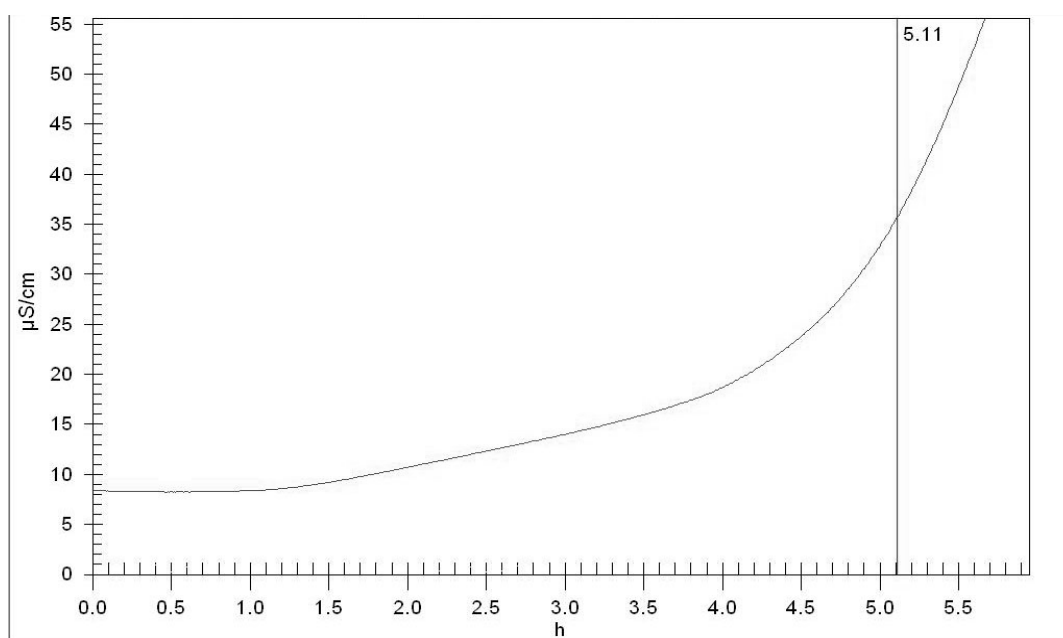
ภาพผนวกที่ ง79 เกลียวกราฟต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เดิมสาร
NITROX ความเข้มข้น 250 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 1)



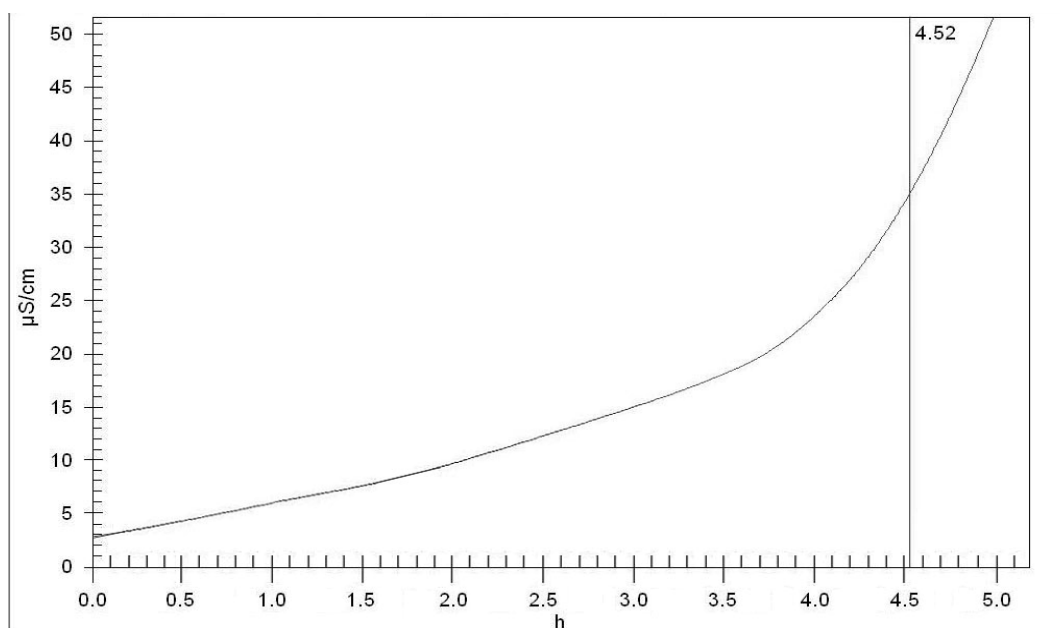
ภาพผนวกที่ ง80 เกลียวกราฟต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เดิมสาร
NITROX ความเข้มข้น 500 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 1)



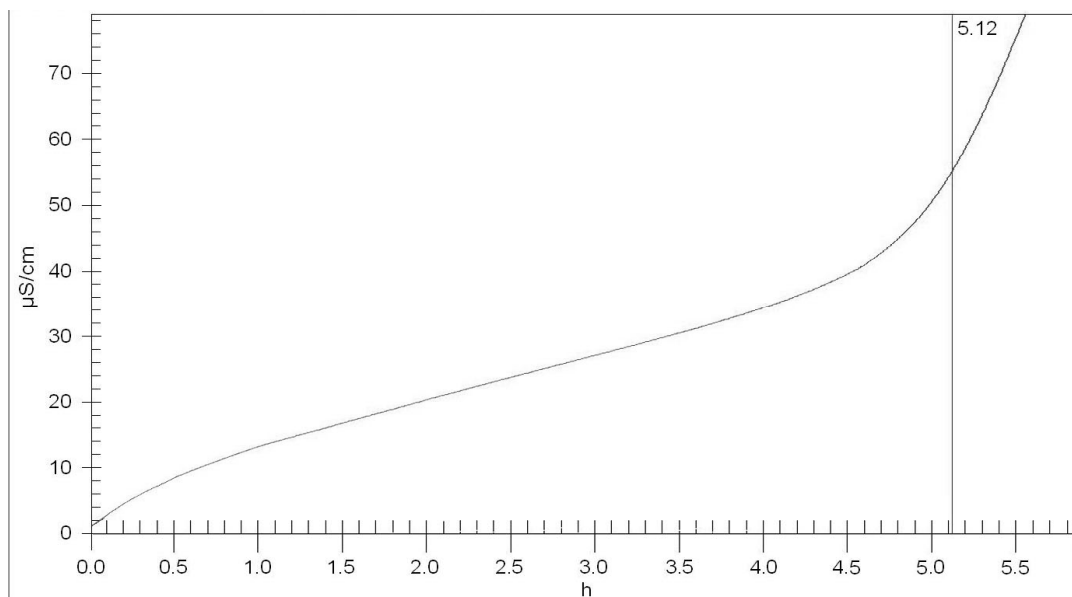
ภาพผนวกที่ ง81 เกลียวภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร
NITROX ความเข้มข้น 750 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 1)



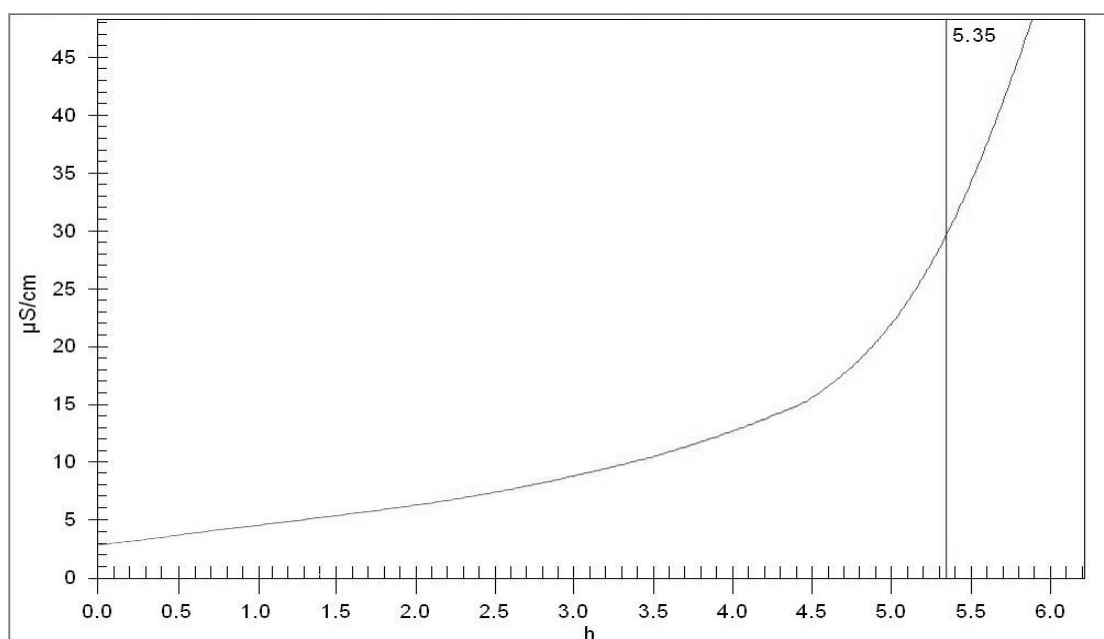
ภาพผนวกที่ ง82 เกลียวภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร
NITROX ความเข้มข้น 1,000 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 1)



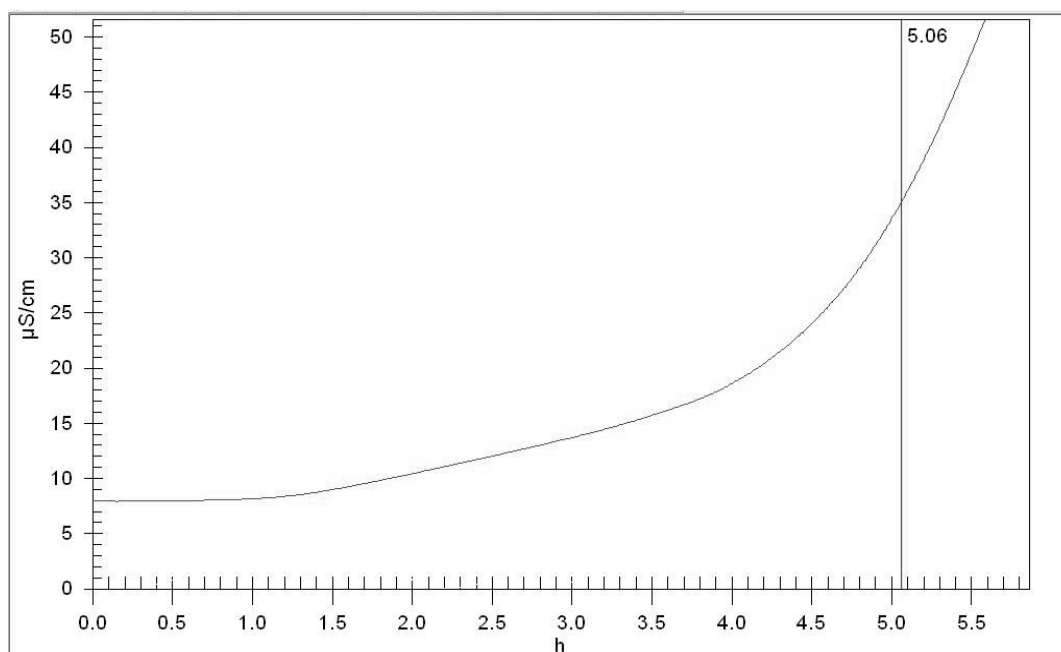
ภาพผนวกที่ ง83 เติบยรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร
NITROX ความเข้มข้น 250 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 2)



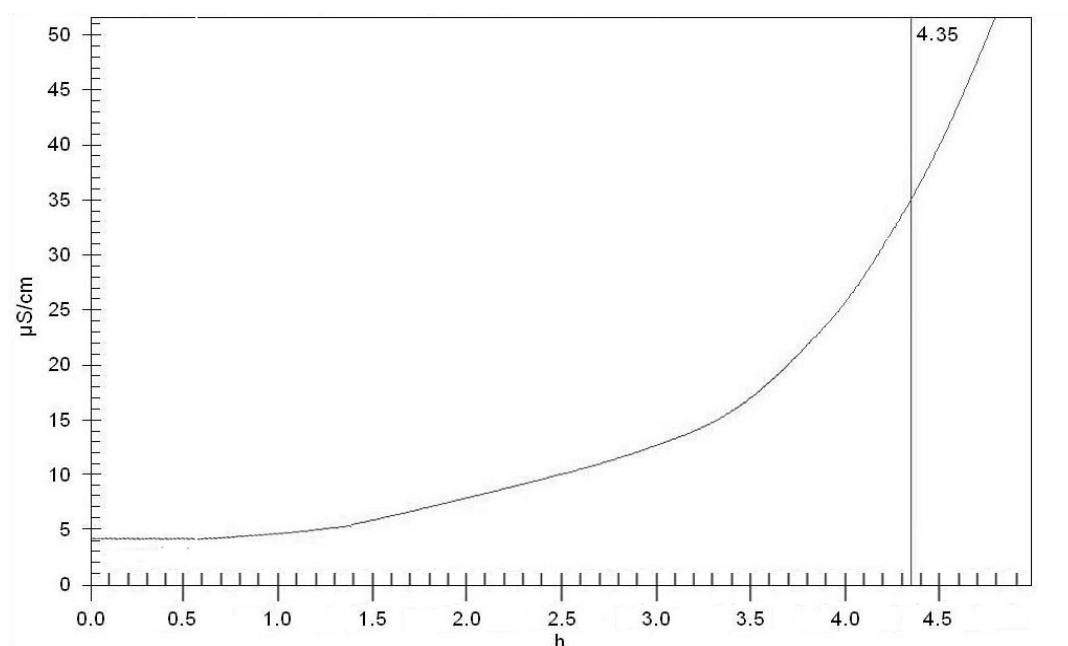
ภาพผนวกที่ ง84 เติบยรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร
NITROX ความเข้มข้น 500 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 2)



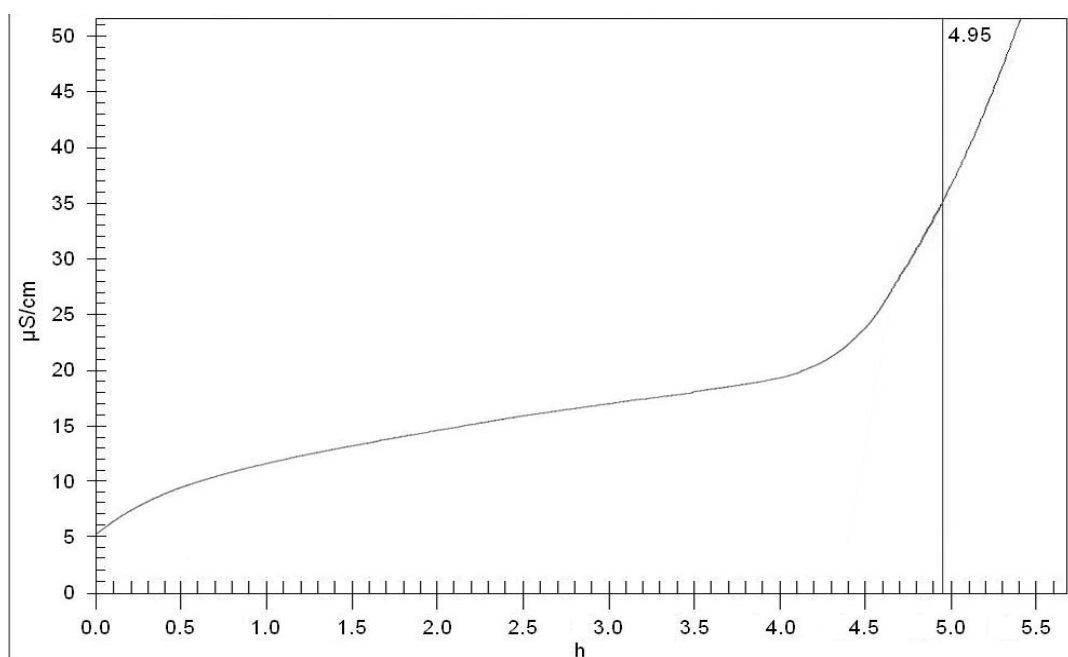
ภาพผนวกที่ ง85 เกลียวภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร
NITROX ความเข้มข้น 750 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 2)



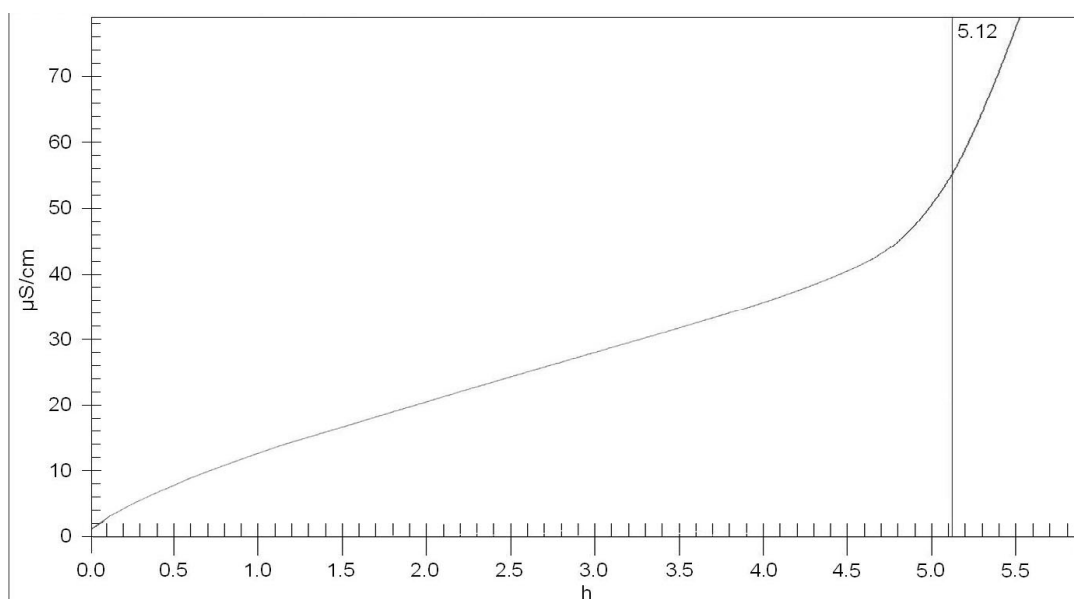
ภาพผนวกที่ ง86 เกลียวภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร
NITROX ความเข้มข้น 1,000 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 2)



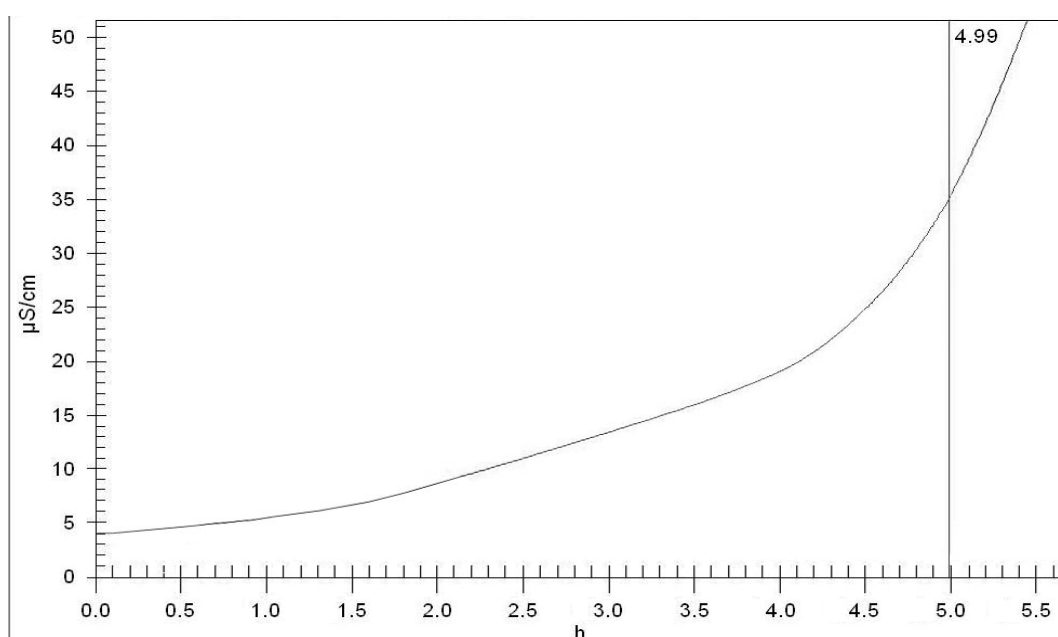
ภาพผนวกที่ ๘๗ เติบยรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำที่เติมสาร
NITROX ความเข้มข้น 250 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 3)



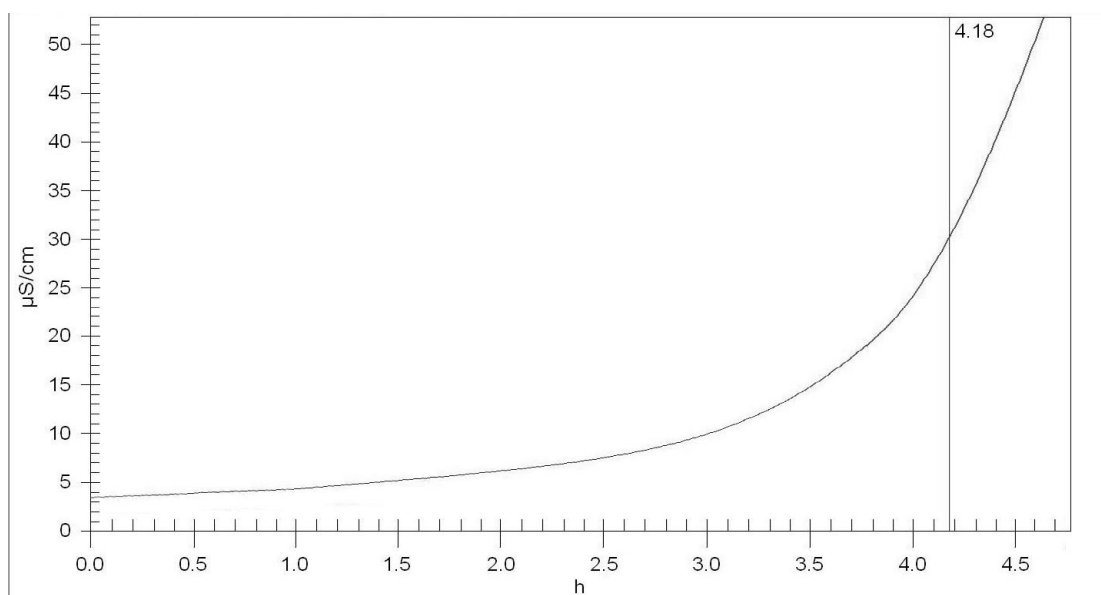
ภาพผนวกที่ ๘๘ เติบยรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำที่เติมสาร
NITROX ความเข้มข้น 500 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 3)



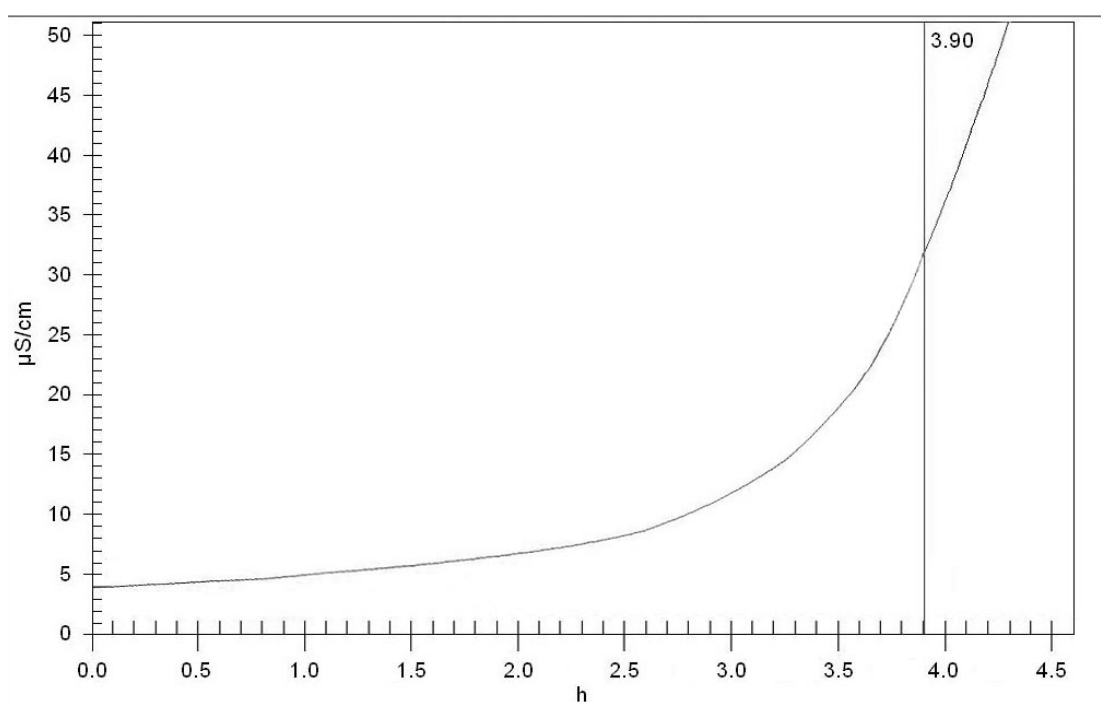
ภาพผนวกที่ ง89 เกลียวกราฟต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสุญ์ดำที่เดิมสาร
NITROX ความเข้มข้น 750 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 3)



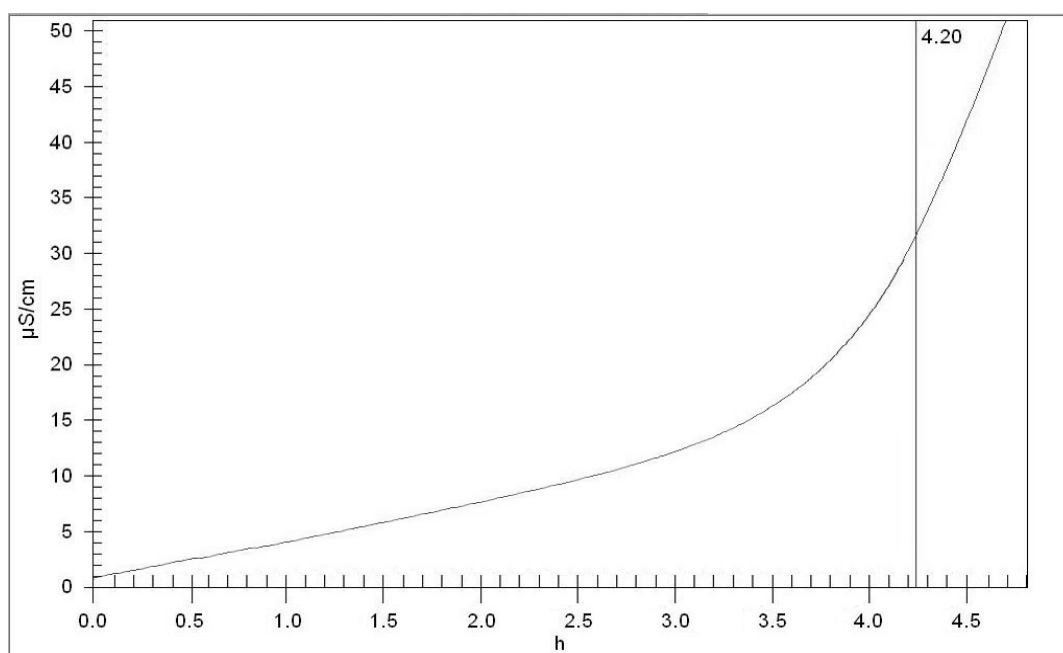
ภาพผนวกที่ ง90 เกลียวกราฟต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสุญ์ดำที่เดิมสาร
NITROX ความเข้มข้น 1,000 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 3)



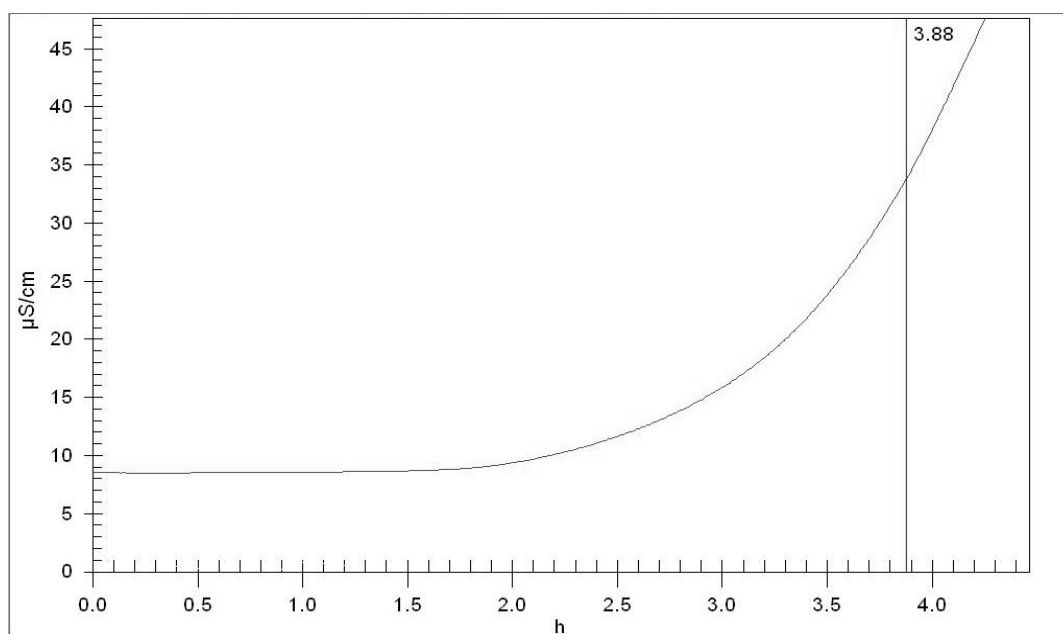
ภาพผนวกที่ ง91 เติบยรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำที่เติมสาร L-power ความเข้มข้น 250 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 1)



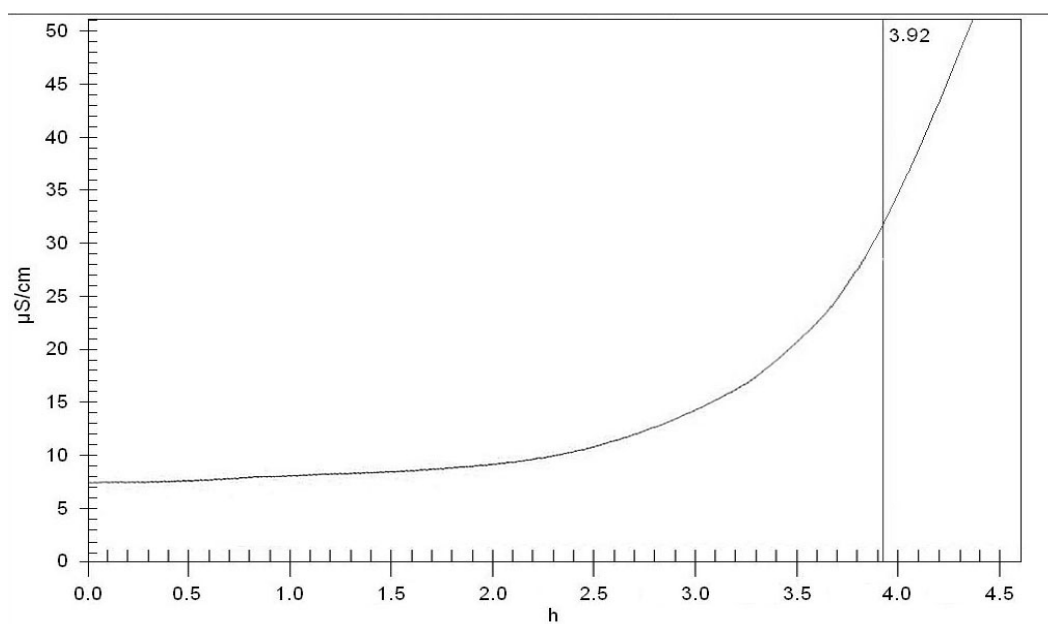
ภาพผนวกที่ ง92 เติบยรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำที่เติมสาร L-power ความเข้มข้น 500 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 1)



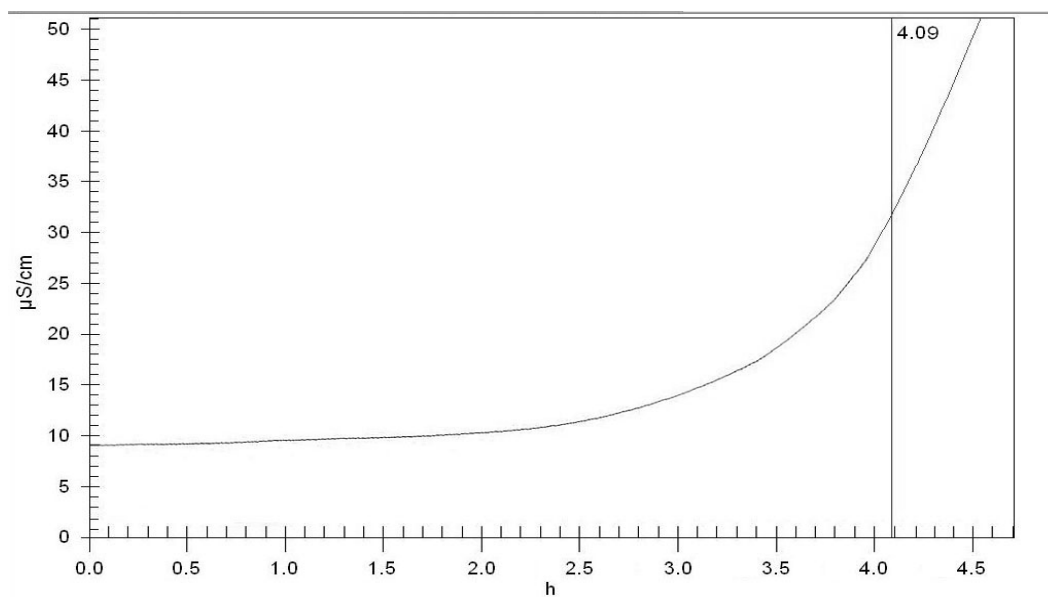
ภาพผนวกที่ ง93 เกลียวภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร L-power ความเข้มข้น 750 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 1)



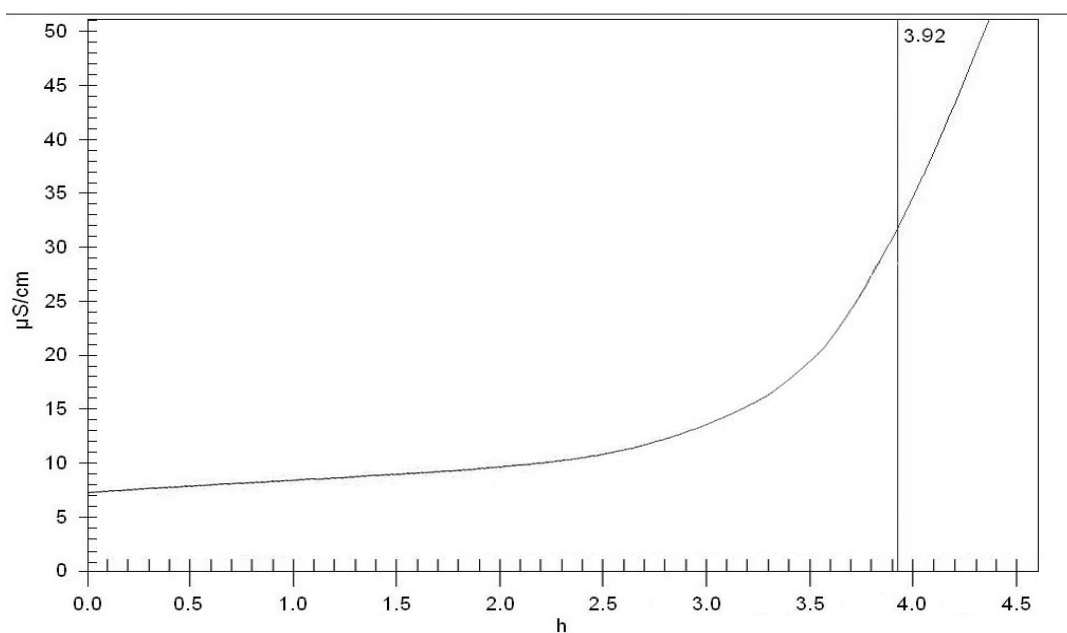
ภาพผนวกที่ ง94 เกลียวภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร L-power ความเข้มข้น 1,000 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 1)



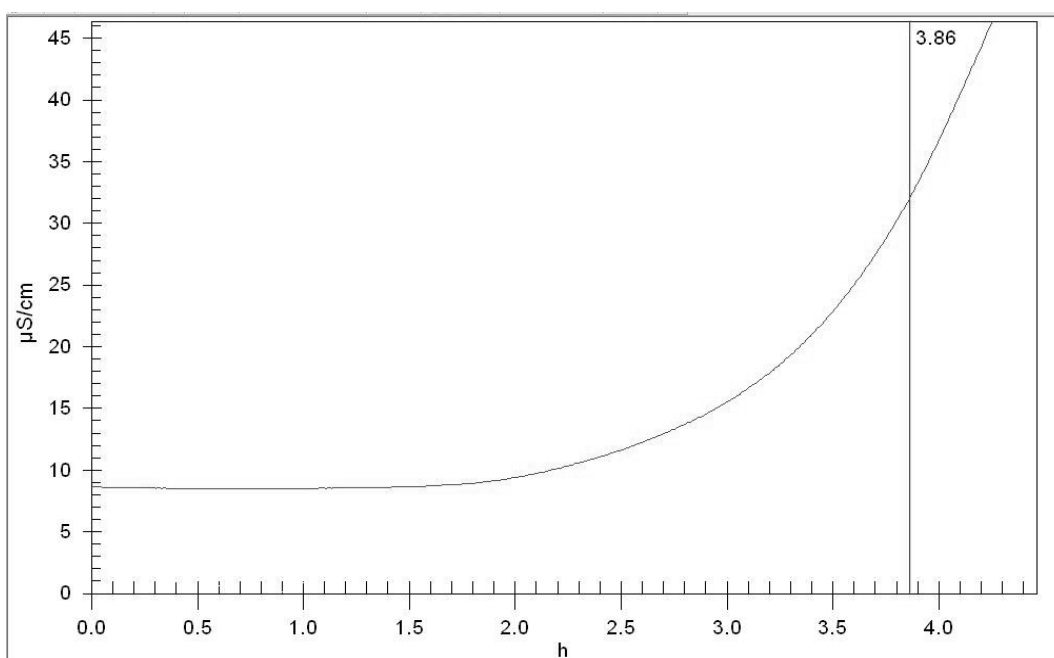
ภาพผนวกที่ ง95 เติษรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร L-power ความเข้มข้น 250 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 2)



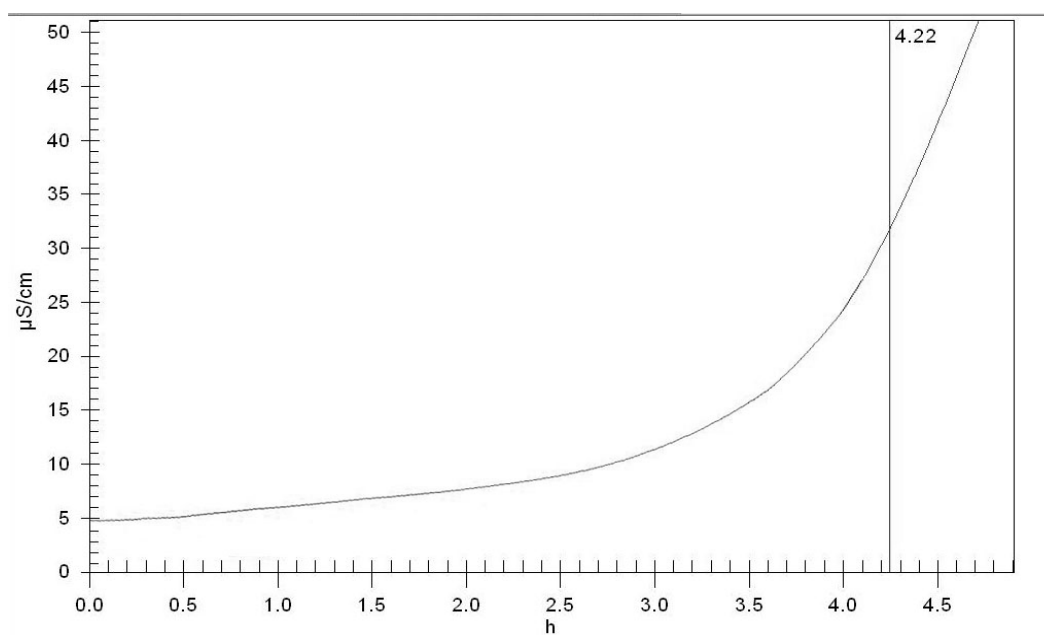
ภาพผนวกที่ ง96 เติษรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร L-power ความเข้มข้น 500 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 2)



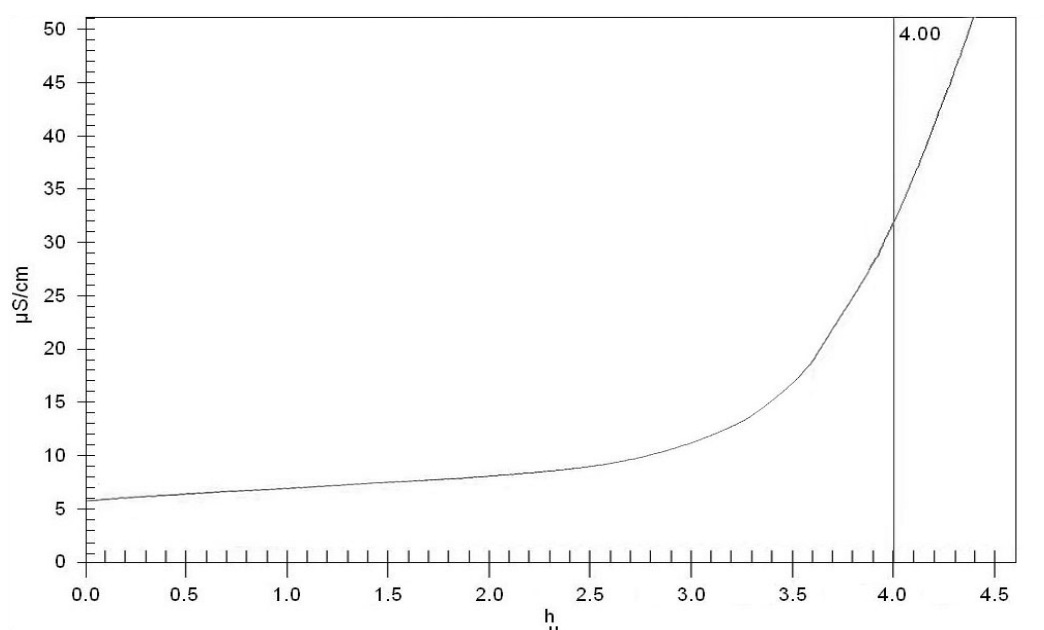
ภาพผนวกที่ ง97 เติบยรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำที่เติมสาร L-power ความเข้มข้น 750 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 2)



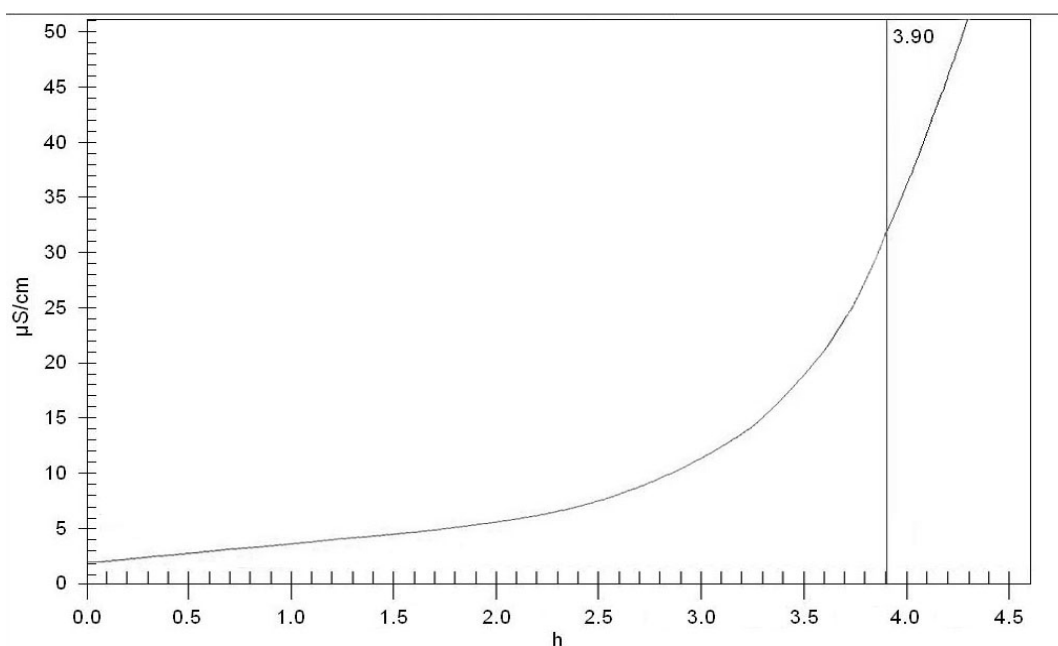
ภาพผนวกที่ ง98 เติบยรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำที่เติมสาร L-power ความเข้มข้น 1,000 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 2)



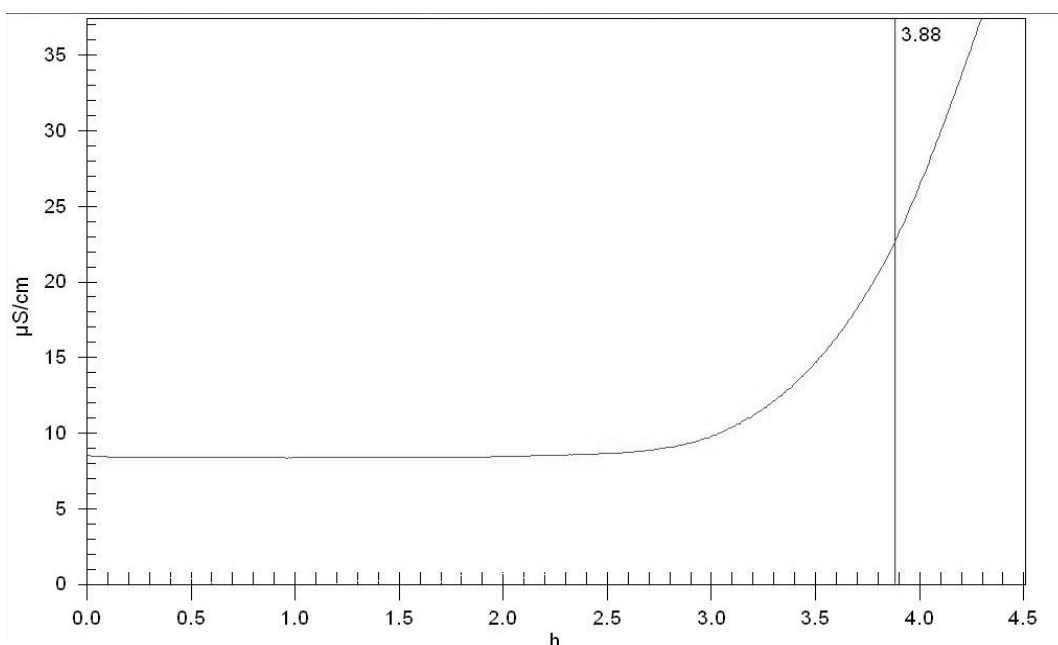
ภาพผนวกที่ ง99 เติษรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร L-power ความเข้มข้น 250 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 3)



ภาพผนวกที่ ง100 เติษรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติม สาร L-power ความเข้มข้น 500 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 3)



ภาพผนวกที่ ง101 เติยรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เดิม สาร L-power ความเข้มข้น 750 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 3)



ภาพผนวกที่ ง102 เติยรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เดิมสาร L-power ความเข้มข้น 1,000 พีพีเอ็ม (ครั้งที่ 3)

ภาคผนวก จ

ภาพแสดงสารเติมแต่งที่ใช้ในการวิจัย

ภาพแสดงสารเติมแต่งที่ใช้ในการวิจัย



ภาพผนวกที่ จ1 สารเติมแต่งสำเร็จรูป ZEP



ภาพผนวกที่ จ2 สารเติมแต่งสำเร็จรูป NITROX



ภาพผนวกที่ จ3 สารเติมแต่งสำเร็จรูป L-power

ที่มา: อภิชัย, 2550

ภาคผนวก จ

ราคาของสารต้านอนุมูลอิสระและสารเติมแต่งสำเร็จรูป

ตารางที่ ๑1 ราคาของสารต้านอนุมูลอิสระและสารเติมแต่งสำเร็จรูป

ชื่อสารต้านอนุมูลอิสระ หรือสารเติมแต่ง สำเร็จรูป	ราคา / หน่วย	ปริมาณหรือ ปริมาตรต่อ 1 หน่วย	ปริมาณที่ใช้ / น้ำมัน
PG	3,380 บาท ¹	100 กรัม	-
BHA	1,670 บาท ¹	100 กรัม	-
TBHQ	1,970 บาท ¹	100 กรัม	-
ZEP	695 บาท / ขวด	มิลลิลิตร	1 มิลลิลิตร / น้ำมัน 1 ลิตร
NITROX	395 บาท / ขวด	มิลลิลิตร	1 มิลลิลิตร / น้ำมัน 1 ลิตร
L-power	150 บาท / เม็ด	3.5 กรัม	1 เม็ด / น้ำมัน 40-60 ลิตร

ที่มา: ¹ บริษัท เอส.เอ็ม.เคมีคอล ซัลพลาย จำกัด (2552)

ภาคผนวก ข

การคำนวณปริมาณเมทิลเอสเทอร์

การคำนวณปริมาณเมทิลเอสเทอร์

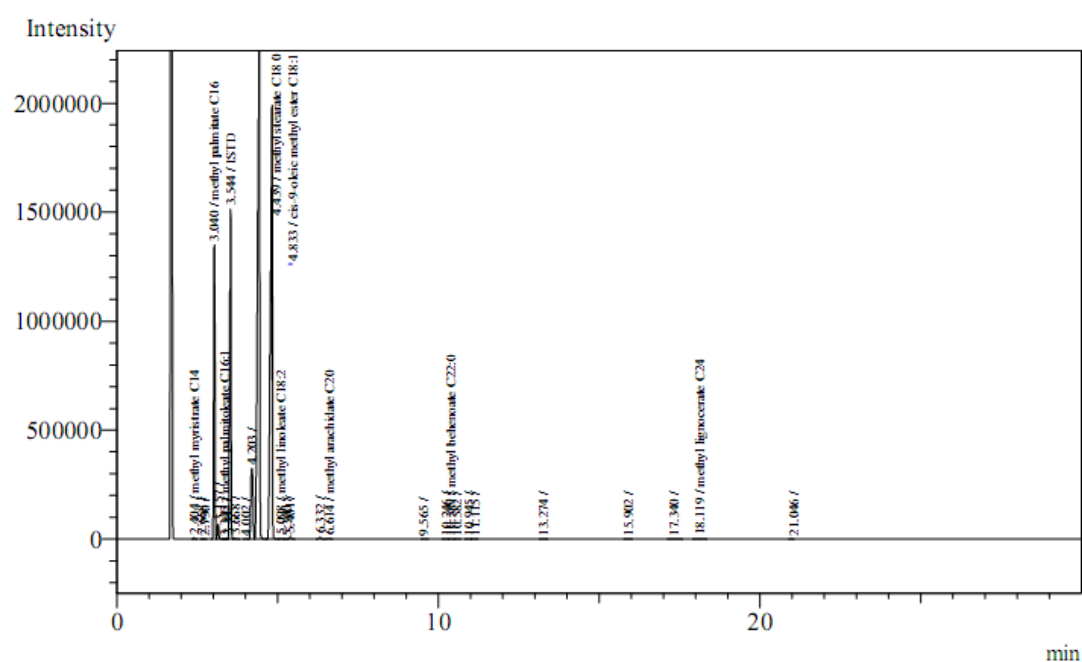
การวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ในไบโอดีเซลด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีตามมาตรฐาน EN 14103 โดยใช้ Methyl heptadecanoate เป็นสารมาตรฐานภายใน (Internal standard) สามารถคำนวณปริมาณเมทิลเอสเทอร์ในไบโอดีเซลได้ดังสมการ

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

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



ภาพผนวกที่ ข1 ตัวอย่างโครมาโทแกรมของสารตัวอย่าง

จากโครมาโทแกรมสามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$\sum A = 28205100.9$$

$$A_{EI} = 4215471$$

$$C_{EI} = 9.998 \text{ มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร}$$

$$V_{EI} = 1 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$m = 56.9 \text{ มิลลิกรัม}$$

สามารถคำนวณปริมาณเมทิลเอสเทอร์ได้ดังนี้

$$C = \left(\frac{28205100.9 - 4215471}{4215471} \right) \times \frac{9.998 \times 1}{56.9} \times 100\% = 100\%$$

ดังนั้น ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ในไบโอดีเซล คือ 100 เปอร์เซ็นต์

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ

นางสาวเดือนเพ็ญ นายทองดี

เกิดวันที่

27 กันยายน 2528

สถานที่เกิด

จังหวัดกรุงเทพมหานคร

ประวัติการศึกษา

ระดับอุดมศึกษา วศ.บ. (วิศวกรรมเคมี)

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

(พ.ศ. 2550)