



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

ปริญญา

วิศวกรรมเคมี

วิศวกรรมเคมี

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง อิทธิพลของโลหะทองแดง น้ำ และ TBHQ ต่อสมบัติไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน
น้ำมันสับดูดำ และ น้ำมันทานตะวัน

Effect of Copper Metal, Water and TBHQ on Biodiesel Properties from Palm Olein,
Jatropha and Sunflower Oils

นามผู้วิจัย นางสาวสุกานดา เชิงคำ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์เพ็ญจิตร ศรีนพคุณ, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์เมธี สายศรีหยุด, Dr.Techn.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์อภิญา ดวงจันทร์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สิงสิงห์ มตาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

อิทธิพลของโลหะทองแดง น้ำ และ TBHQ ต่อสมบัติไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน น้ำมันสน
ดำ และน้ำมันทานตะวัน

Effect of Copper Metal, Water and TBHQ on Biodiesel Properties from Palm Olein,
Jatropha and Sunflower Oils

โดย

นางสาวสุกานดา เชิงคำ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

พ.ศ. 2555

สุกานดา เชียงคำ 2555: อิทธิพลของโลหะทองแดง น้ำ และ TBHQ ต่อสมบัติไบโอดีเซล
จากน้ำมันปาล์มโอเลอิน น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันทานตะวัน ปรินญาวิศวกรรมศาสตร
มหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี) สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์เพ็ญจิตร ศรีนพคุณ, Ph.D. 126 หน้า

งานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อเสถียรภาพการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมัน
ปาล์มโอเลอิน น้ำมันสบู่ดำ และ น้ำมันทานตะวัน โดยศึกษาการเติมโลหะทองแดงในปริมาณ
ความเข้มข้น 0 1 และ 2 พีพีเอ็ม การเติมน้ำในปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0 0.05 และ 1 โดย
น้ำหนัก และจัดเก็บไบโอดีเซลในสภาวะไร้แสงและจำกัดออกซิเจนที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา
22 สัปดาห์ ผลการทดลองพบว่า การเติมโลหะทองแดงที่ปริมาณความเข้มข้น 2 พีพีเอ็ม และการ
เติมน้ำที่ปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 1 มีผลมากที่สุดที่ทำให้ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน
น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันทานตะวัน มีปริมาณร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ลดลงจาก 100 98.44 และ
96.55 ในสัปดาห์แรก เป็น 93.61 91.07 89.00 และ 94.21 92.5 90.2 ในสัปดาห์ที่ 22 ตามลำดับ ค่า
ไอโอดีนลดลงจาก 60.85 70.89 83.13 เป็น 52.77 54.40 61.01 และ 53.00 58.32 62.77 กรัม
ไอโอดีนต่อ 100 กรัม น้ำมัน ตามลำดับ ค่าความหนืดเพิ่มขึ้นจาก 4.19 4.41 4.75 เป็น 4.99 4.75
5.05 และ 4.82 4.92 4.91 เซ็นติสโตกส์ ตามลำดับ ค่าความเป็นกรดเพิ่มขึ้นจาก 0.18 0.28 0.23 เป็น
0.38 0.42 0.42 และ 0.38 0.40 0.47 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม ตามลำดับ งานวิจัย
นี้ยังได้ศึกษาการเติมสารต้านอนุมูลอิสระ TBHQ (tert-butylhydroquinone) ลงไปในไบโอดีเซลที่
ปริมาณความเข้มข้น 0-2,000 พีพีเอ็ม โดยพบว่า ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระที่ปริมาณความ
เข้มข้น 1,000 พีพีเอ็ม ช่วยทำให้ไบโอดีเซลจากน้ำมันทานตะวันมีค่าความหนืดไม่สูงกว่า
มาตรฐาน เมื่อทำการจัดเก็บเป็นระยะเวลา 22 สัปดาห์ และโลหะทองแดงเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการ
เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซลมากที่สุด

Sukanda Chiangkam 2012: Effect of Copper Metal, Water and TBHQ on Biodiesel Properties from Palm Olein, Jatropha and Sunflower Oils. Master of Engineering (Chemical Engineering), Major Field: Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Penjit Srinophakun, Ph.D. 126 pages.

The objective of this work was to study the factors that affected oxidation stability of biodiesel from palm olein, jatropha and sunflower oils. The copper metal and water were added to three types of biodiesels at the concentration range of 0-2 ppm and 0-1% by weight, respectively. Then, the samples were stored in the condition of fixed oxygen and dark room at room temperature for 22 weeks. It was found that the concentration at 2 ppm of copper and 1% of water were strongest effect to the properties of biodiesel from palm olein, jatropha and sunflower oils. The percentage, of methyl ester were decreased from 100 98.44 and 96.55 at starting to 93.61 91.07 89.00 and 94.21 92.5 90.2 after 22 week of storage, respectively. The iodine value decreased from 60.85 70.89 83.13 to 52.77 54.40 61.01 and 53.00 58.32 62.77 g I₂/100g, respectively. The kinematic viscosity at 40 °C were increased from 4.19 4.41 4.75 to 4.99 4.75 5.05 and 4.82 4.92 4.91 cSt, respectively. The acids value were increased from 0.18 0.28 0.23 to 0.38 0.42 0.42 and 0.38 0.40 0.47 mg KOH/g, respectively. The copper metal has dominated effect on oxidation stability of biodiesel. The antioxidant, TBHQ (tert-butylhydroquinone), was added at the concentration range of 0-2,000 ppm to investigate the effect of the antioxidant on biodiesels for long term storage. The result founded that while without adding the antioxidant, biodiesel from Palm olein and Jatropha oil were still qualified for commercial standard after 22 week storage. TBHQ at the concentration of 1,000 ppm were enough to control the kinematic viscosity of biodiesel of sunflower oil with containing copper at 2 ppm to meet the standard of commercial biodiesel after storage for 22 weeks.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญจิตร ศรีนพคุณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่คอยดูแล ให้คำแนะนำ และคำปรึกษาในการแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นตลอดการศึกษาวิจัย ขอขอบพระคุณ ดร.เมธี สายศรีหยุด ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และช่วยตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์ ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุสิทธิ์ ธนะพิมพ์เมธา และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิทธิรัตน์ ท่อแก้ว ที่กรุณาสละเวลาเพื่อเป็นคณะกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึงให้คำแนะนำและแนวคิดที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อผู้จัดทำ

ขอขอบคุณโครงการ เอยู-ไบโอดีเซล ที่ให้ความอนุเคราะห์น้ำมันสุญุดำและเครื่องมือวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิศวกรรมชีวกระบวนการ และภาควิชาวิศวกรรมเคมี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ และ ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี รวมถึง เพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ในภาควิชาวิศวกรรมเคมี ที่ให้การสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (KURDI) และบัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนในด้านทุนวิจัยและส่งเสริมการทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ญาติพี่น้องที่เป็นกำลังใจเสมอมา จนสำเร็จการศึกษา

สุกานดา เชียงคำ

มีนาคม 2555

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(7)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	39
อุปกรณ์	39
วิธีการ	42
ผลและวิจารณ์	46
สรุปและข้อเสนอแนะ	70
สรุป	70
ข้อเสนอแนะ	71
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	72
ภาคผนวก	76
ภาคผนวก ก การคำนวณอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน	77
ภาคผนวก ข การคำนวณค่าความเป็นกรด	79
ภาคผนวก ค การคำนวณปริมาณเมทิลเอสเทอร์	81
ภาคผนวก ง ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอดีเซล	85
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	126

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 โครงสร้างทางเคมีของกรดไขมันทั่วไป	5
2 ชนิดของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันพืชชนิดต่างๆ	6
3 คุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันสบู่ดำ	18
4 องค์ประกอบทางเคมีและกายภาพของน้ำมันจากเมล็ดทานตะวัน	21
5 คุณสมบัติโดยทั่วไปของไบโอดีเซลเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล	23
6 ลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน	28
7 ปริมาณร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ของน้ำมันปาล์ม โอเลอิน น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันทานตะวัน	61
ตารางผนวกที่	
ง1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม โอเลอิน น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันทานตะวัน ที่เติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 0-2 พีพีเอ็ม	86
ง2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม โอเลอิน น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันทานตะวัน ที่เติมน้ำในปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0-1	87
ง3 ผลการวิเคราะห์ค่าไอโอดีนของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม โอเลอิน ที่เติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 0-2 พีพีเอ็ม	88
ง4 ผลการวิเคราะห์ค่าไอโอดีนของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ ที่เติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 0-2 พีพีเอ็ม	89
ง5 ผลการวิเคราะห์ค่าไอโอดีนของไบโอดีเซลจากน้ำมันทานตะวัน ที่เติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 0-2 พีพีเอ็ม	90
ง6 ผลการวิเคราะห์ค่าไอโอดีนของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม โอเลอิน ที่เติมน้ำในปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0-1	91

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ง7 ผลการวิเคราะห์ค่าไอโอดีนของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ ที่เติมน้ำในปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0-1	92
ง8 ผลการวิเคราะห์ค่าไอโอดีนของไบโอดีเซลจากน้ำมันทานตะวัน ที่เติมน้ำในปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0-1	93
ง9 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนืดของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน ที่เติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 0-2 พีพีเอ็ม	94
ง10 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนืดของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ ที่เติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 0-2 พีพีเอ็ม	95
ง11 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนืดของไบโอดีเซลจากน้ำมันทานตะวัน ที่เติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 0-2 พีพีเอ็ม	96
ง12 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนืดของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน ที่เติมน้ำในปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0-1	97
ง13 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนืดของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ ที่เติมน้ำในปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0-1	98
ง14 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนืดของไบโอดีเซลจากน้ำมันทานตะวัน ที่เติมน้ำในปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0-1	99
ง15 ผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน ที่เติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 0-2 พีพีเอ็ม	100
ง16 ผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ ที่เติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 0-2 พีพีเอ็ม	101
ง17 ผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลจากน้ำมันทานตะวัน ที่เติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 0-2 พีพีเอ็ม	102
ง18 ผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน ที่เติมน้ำในปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0-1	103
ง19 ผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ ที่เติมน้ำในปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0-1	104

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ง20 ผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลจากน้ำมันทานตะวัน ที่เติมน้ำในปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0-1	105
ง21 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันทานตะวัน ที่เติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 2 พีพีเอ็ม และเติมสารต้านอนุมูลอิสระ TBHQ ในปริมาณความเข้มข้น 0-2,000 พีพีเอ็ม	106
ง22 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันทานตะวัน ที่เติมน้ำในปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 1 และเติมสารต้านอนุมูลอิสระ TBHQ ในปริมาณความเข้มข้น 0-2,000 พีพีเอ็ม	107
ง23 ผลการวิเคราะห์ค่าไอโอดีนของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน ที่เติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 2 พีพีเอ็ม และเติมสารต้านอนุมูลอิสระ TBHQ ในปริมาณความเข้มข้น 0-2,000 พีพีเอ็ม	108
ง24 ผลการวิเคราะห์ค่าไอโอดีนของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ ที่เติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 2 พีพีเอ็ม และเติมสารต้านอนุมูลอิสระ TBHQ ในปริมาณความเข้มข้น 0-2,000 พีพีเอ็ม	109
ง25 ผลการวิเคราะห์ค่าไอโอดีนของไบโอดีเซลจากน้ำมันทานตะวัน ที่เติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 2 พีพีเอ็ม และเติมสารต้านอนุมูลอิสระ TBHQ ในปริมาณความเข้มข้น 0-2,000 พีพีเอ็ม	110
ง26 ผลการวิเคราะห์ค่าไอโอดีนของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน ที่เติมน้ำในปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 1 และเติมสารต้านอนุมูลอิสระ TBHQ ในปริมาณความเข้มข้น 0-2,000 พีพีเอ็ม	111
ง27 ผลการวิเคราะห์ค่าไอโอดีนของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ ที่เติมน้ำในปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 1 และเติมสารต้านอนุมูลอิสระ TBHQ ในปริมาณความเข้มข้น 0-2,000 พีพีเอ็ม	112

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ง28 ผลการวิเคราะห์ค่าไอโอดีนของไบโอดีเซลจากน้ำมันทานตะวัน ที่เติมน้ำในปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 1 และเติมสารต้านอนุมูลอิสระ TBHQ ในปริมาณความเข้มข้น 0–2,000 พีพีเอ็ม	113
ง29 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนืดของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน ที่เติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 2 พีพีเอ็ม และเติมสารต้านอนุมูลอิสระ TBHQ ในปริมาณความเข้มข้น 0–2,000 พีพีเอ็ม	114
ง30 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนืดของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ ที่เติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 2 พีพีเอ็ม และเติมสารต้านอนุมูลอิสระ TBHQ ในปริมาณความเข้มข้น 0–2,000 พีพีเอ็ม	115
ง31 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนืดของไบโอดีเซลจากน้ำมันทานตะวัน ที่เติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 2 พีพีเอ็ม และเติมสารต้านอนุมูลอิสระ TBHQ ในปริมาณความเข้มข้น 0–2,000 พีพีเอ็ม	116
ง32 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนืดของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน ที่เติมน้ำในปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 1 และเติมสารต้านอนุมูลอิสระ TBHQ ในปริมาณความเข้มข้น 0–2,000 พีพีเอ็ม	117
ง33 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนืดของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ ที่เติมน้ำในปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 1 และเติมสารต้านอนุมูลอิสระ TBHQ ในปริมาณความเข้มข้น 0–2,000 พีพีเอ็ม	118
ง34 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนืดของไบโอดีเซลจากน้ำมันทานตะวัน ที่เติมน้ำในปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 1 และเติมสารต้านอนุมูลอิสระ TBHQ ในปริมาณความเข้มข้น 0–2,000 พีพีเอ็ม	119
ง35 ผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน ที่เติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 2 พีพีเอ็ม และเติมสารต้านอนุมูลอิสระ TBHQ ในปริมาณความเข้มข้น 0–2,000 พีพีเอ็ม	120

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ง36 ผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ ที่เติม โลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 2 พีพีเอ็ม และเติมสารต้านอนุมูลอิสระ TBHQ ในปริมาณความเข้มข้น 0–2,000 พีพีเอ็ม	121
ง37 ผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลจากน้ำมันทานตะวัน ที่เติม โลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 2 พีพีเอ็ม และเติมสารต้านอนุมูลอิสระ TBHQ ในปริมาณความเข้มข้น 0–2,000 พีพีเอ็ม	122
ง38 ผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน ที่เติมน้ำ ในปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 1 และเติมสารต้านอนุมูลอิสระ TBHQ ในปริมาณ ความเข้มข้น 0–2,000 พีพีเอ็ม	123
ง39 ผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ ที่เติมน้ำใน ปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 1 และเติมสารต้านอนุมูลอิสระ TBHQ ในปริมาณ ความเข้มข้น 0–2,000 พีพีเอ็ม	124
ง40 ผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลจากน้ำมันทานตะวัน ที่เติมน้ำใน ปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 1 และเติมสารต้านอนุมูลอิสระ TBHQ ในปริมาณ ความเข้มข้น 0–2,000 พีพีเอ็ม	125

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 โครงสร้างโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์	4
2 กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบ	9
3 กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์	10
4 ลำต้นของสบู่ดำ	12
5 ใบของสบู่ดำ	12
6 ดอกของสบู่ดำ	13
7 ผลของสบู่ดำ	13
8 เมล็ดของสบู่ดำ	14
9 เครื่องสกัดน้ำมันสบู่ดำโดยใช้แรงงานจากคน	16
10 เครื่องหีบน้ำมันสบู่ดำด้วยระบบไฮดรอลิก	17
11 กระบวนการแตกสลายทางความร้อนของไตรกลีเซอไรด์	25
12 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์	26
13 กลไกการเกิดปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันพืชกับแอลกอฮอล์	26
14 ปฏิกริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซล	30
15 กลไกของสารต้านอนุมูลอิสระ	32
16 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	43
17 ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (ก) ค่าไอโอดีน (ข) ค่าความหนืด (ค) และ ค่าความเป็นกรด (ง) ของน้ำมันปาล์มโอเลอิน โดยเติมโลหะทองแดงที่ปริมาณความเข้มข้น 0-2 พีพีเอ็ม	49
18 ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (ก) ค่าไอโอดีน (ข) ค่าความหนืด (ค) และ ค่าความเป็นกรด (ง) ของน้ำมันสบู่ดำ โดยเติมโลหะทองแดงที่ปริมาณความเข้มข้น 0-2 พีพีเอ็ม	50
19 ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (ก) ค่าไอโอดีน (ข) ค่าความหนืด (ค) และ ค่าความเป็นกรด (ง) ของน้ำมันทานตะวัน โดยเติมโลหะทองแดงที่ปริมาณความเข้มข้น 0-2 พีพีเอ็ม	51

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
20 ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (ก) ค่าไอโอดีน (ข) ค่าความหนืด (ค) และ ค่าความเป็นกรด (ง) ของน้ำมันปาล์มโอเลอิน โดยเติมน้ำที่ปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0-1	54
21 ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (ก) ค่าไอโอดีน (ข) ค่าความหนืด (ค) และ ค่าความเป็นกรด (ง) ของน้ำมันสบู่ดำ โดยเติมน้ำที่ปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0-1	55
22 ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (ก) ค่าไอโอดีน (ข) ค่าความหนืด (ค) และ ค่าความเป็นกรด (ง) ของน้ำมันทานตะวัน โดยเติมน้ำที่ปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0-1	56
23 ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ของไบโอดีเซลจากน้ำมันชนิดต่างๆ ที่เติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 2 พีพีเอ็ม (ก) และ เติมน้ำในปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 1 (ข)	58
24 ค่าไอโอดีนของไบโอดีเซลจากน้ำมันชนิดต่างๆ ที่เติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 2 พีพีเอ็ม (ก) และ เติมน้ำในปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 1 (ข)	58
25 ค่าความหนืดของไบโอดีเซลจากน้ำมันชนิดต่างๆ ที่เติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 2 พีพีเอ็ม (ก) และ เติมน้ำในปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 1 (ข)	59
26 ค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลจากน้ำมันชนิดต่างๆ ที่เติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 2 พีพีเอ็ม (ก) และ เติมน้ำในปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 1 (ข)	59
27 กลไกการยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารต้านอนุมูลอิสระ	63
28 ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (ก) ค่าไอโอดีน (ข) ค่าความหนืด (ค) และ ค่าความเป็นกรด (ง) ของน้ำมันปาล์มโอเลอิน โดยเติมโลหะทองแดง 2 พีพีเอ็ม และเติม TBHQ 0-2,000 พีพีเอ็ม	64
29 ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (ก) ค่าไอโอดีน (ข) ค่าความหนืด (ค) และ ค่าความเป็นกรด (ง) ของน้ำมันปาล์มโอเลอิน โดยเติมน้ำร้อยละ 1 และเติม TBHQ 0-2,000 พีพีเอ็ม	65
30 ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (ก) ค่าไอโอดีน (ข) ค่าความหนืด (ค) และ ค่าความเป็นกรด (ง) ของน้ำมันสบู่ดำ โดยเติมโลหะทองแดง 2 พีพีเอ็ม และเติม TBHQ 0-2,000 พีพีเอ็ม	66
31 ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (ก) ค่าไอโอดีน (ข) ค่าความหนืด (ค) และ ค่าความเป็นกรด (ง) ของน้ำมันสบู่ดำ โดยเติมน้ำร้อยละ 1 และเติม TBHQ 0 - 2,000 พีพีเอ็ม	67

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
32	ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (ก) ค่าไอโอดีน (ข) ค่าความหนืด (ค) และ ค่าความเป็นกรด (ง) ของน้ำมันทานตะวัน โดยเติมโลหะทองแดง 2 พีพีเอ็ม และเติม TBHQ 0–2,000 พีพีเอ็ม	68
33	ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (ก) ค่าไอโอดีน (ข) ค่าความหนืด (ค) และ ค่าความเป็นกรด (ง) ของน้ำมันทานตะวัน โดยเติมน้ำร้อยละ 1 และเติม TBHQ 0–2,000 พีพีเอ็ม	69
ภาพผนวกที่		
ค1	ตัวอย่างโครมาโทแกรมของสารตัวอย่าง	83

อิทธิพลของโลหะทองแดง น้ำ และ TBHQ ต่อสมบัติไบโอดีเซลจาก น้ำมันปาล์มโอเลอิน น้ำมันสบู่ดำ และ น้ำมันทานตะวัน

Effect of Copper Metal, Water and TBHQ on Biodiesel Properties from Palm Olein, Jatropha and Sunflower Oils

คำนำ

ในปัจจุบันพบว่า น้ำมันเชื้อเพลิงซึ่งมีความสำคัญต่อการดำเนินการในภาคอุตสาหกรรม ระบบธุรกิจการค้า การขนส่ง และเป็นวัตถุดิบในระบบสาธารณูปโภคของประเทศมีราคาสูงขึ้น และเนื่องจากประเทศไทยมีความจำเป็นที่จะต้องนำเข้าน้ำมันเชื้อเพลิงจากต่างประเทศในแต่ละปี เป็นจำนวนมาก ดังนั้นประเทศไทยจึงได้พยายามที่จะพัฒนาหาแหล่งพลังงานทดแทนเพื่อลดการนำเข้าน้ำมันดังกล่าว จึงได้มีการนำน้ำมันพืช ไขมันสัตว์ หรือน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว มาใช้เป็นเชื้อเพลิง ซึ่งสามารถผลิตได้ภายในประเทศ ซึ่งน้ำมันที่ผลิตได้จากวัตถุดิบดังกล่าวนี้ คือ ไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงที่ได้จากน้ำมันของพืชหรือสัตว์ โดยน้ำมันชนิดนี้จะมีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลแต่มีข้อดีกว่าในเรื่องที่สามารถเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์และไม่มีสารก่อมะเร็งเกิดขึ้น น้ำมันจากพืชหลากหลายชนิด เช่น น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันปาล์ม น้ำมันสบู่ดำ และ น้ำมันทานตะวัน ถูกนำมาใช้ในการผลิตไบโอดีเซลกันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะ น้ำมันสบู่ดำ เนื่องจากน้ำมันที่ได้จากเมล็ดของสบู่ดำมีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล อีกทั้งน้ำมันสบู่ดำไม่สามารถนำมาบริโภคได้ จึงสามารถนำมาใช้ในการผลิตไบโอดีเซลได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ

แต่การนำน้ำมันที่ได้จากพืชหรือสัตว์ไปใช้โดยตรง จะก่อให้เกิดปัญหาบางอย่างกับเครื่องยนต์ เช่น มีคราบเขม่าติดที่เครื่องยนต์ มีการอุดตันของไส้กรอง เป็นต้น ดังนั้นจึงต้องทำการปรับปรุงน้ำมันดังกล่าวเพื่อลดปัญหาที่เกิดขึ้น โดยการนำมาผ่านกระบวนการต่างๆ อาทิเช่น การเจือจางด้วยแอลกอฮอล์ การแตกลำน้ำมันด้วยความร้อน และการนำน้ำมันมาผ่านปฏิกิริยาทรานส์-เอสเทอริฟิเคชัน เป็นต้น

เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation stability) ของไบโอดีเซล เป็นตัวบ่งบอกถึง ความต้านทานในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในไบโอดีเซล โดยแสดงถึงคุณภาพในการเก็บ

น้ำมันไบโอดีเซล เนื่องจาก ไบโอดีเซลที่มีเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันสูงจะสามารถเก็บรักษาได้เป็นระยะเวลานานและทำให้คุณสมบัติทางกายภาพ ซึ่งได้แก่ ค่าความหนืดทางจลน์ (Kinematic viscosity) และค่าความเป็นกรด ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก นอกจากนี้เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซล ยังเป็นตัวรับประกันคุณภาพของไบโอดีเซลทางการค้าอีกด้วย โดยปัจจัยที่มีผลต่อเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซล ได้แก่ กรดไขมันที่ไม่อิ่มตัว อ่อนหภูมิ แสง อากาศ น้ำ และโลหะที่เจือปนอยู่ในไบโอดีเซล แต่สาเหตุหลักของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซล คือ ปริมาณกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวที่มีอยู่ในโครงสร้างของไบโอดีเซล ปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซลจะเกิดสารประกอบเปอร์รอกไซด์ (Peroxide) ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความเป็นกรดเพิ่มมากขึ้น ทำให้ไบโอดีเซลเสถียรภาพไปจากเดิม ซึ่งเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลส่วนใหญ่นั้นจะวัดอยู่ในรูปของค่า Induction time ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงจำนวนชั่วโมงที่ไบโอดีเซลที่ยังคงมีความเสถียรต่อการเกิดออกซิเดชัน

การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชชนิดต่างๆ กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก แต่เนื่องจากไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากน้ำมันพืชนั้น มีเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันต่ำ ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน น้ำมันสุคำ และน้ำมันทานตะวัน ด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อเป็นแนวทางในการป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

วัตถุประสงค์

ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อเสถียรภาพการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมัน
ปาล์มโอเลอิน น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันทานตะวัน

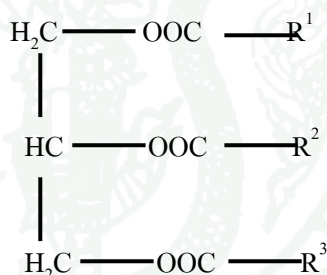
ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน น้ำมันสบู่ดำ และ น้ำมัน
ทานตะวัน ด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา
ชนิดเบส คือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) 1.5% โดยน้ำหนักของน้ำมัน ใช้เมทานอลใน
อัตราส่วน จำนวนโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 7:1 ทำการกวนด้วยเครื่อง Homogenizer ที่
อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง (ทัศนีย์, 2550) และศึกษาปัจจัยในการเกิดปฏิกิริยา
ออกซิเดชัน ซึ่งได้แก่ ปริมาณโลหะ ปริมาณน้ำ ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ และระยะเวลาในการ
เก็บไบโอดีเซล แล้ววิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ได้

การตรวจเอกสาร

ไขมันและน้ำมัน

ไขมันและน้ำมันเป็นสารประกอบชนิดเดียวกันแต่มีคุณสมบัติทางกายภาพที่ต่างกัน และเป็นสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำแต่ละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น คลอโรฟอร์ม อีเทอร์ เป็นต้น (Ma and Hanna, 1999) โมเลกุลของไขมัน ประกอบด้วย กลีเซอริน 1 โมเลกุล และกรดไขมัน 3 โมเลกุล ซึ่งอาจเป็นกรดไขมันชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้ โดยกรดไขมันแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ กรดไขมันอิ่มตัว (Saturated fatty acids) และ กรดไขมันไม่อิ่มตัว (Unsaturated fatty acids) ซึ่งกรดไขมันไม่อิ่มตัวนั้นพบมากในน้ำมันจากพืช โดยจะประกอบด้วยไตรกลีเซอไรด์ (Triglycerides) เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งไตรกลีเซอไรด์เป็นสารประกอบที่เกิดจากกรดไขมันกับ กลีเซอรอล (Agarwal, 2007) โดยโครงสร้างโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 โครงสร้างโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์

ที่มา: Agarwal (2007)

กรดไขมันที่พบโดยทั่วไปทั้งในพืชและสัตว์จะมีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่อยู่ระหว่าง 14-22 อะตอม โดยเฉพาะจำนวนคาร์บอนอะตอมเท่ากับ 16 และ 18 สามารถพบได้มากที่สุด โดยโครงสร้างทางเคมีของกรดไขมันทั่วไปแสดงดังตารางที่ 1 และเนื่องจากในน้ำมันพืชส่วนใหญ่ประกอบด้วยกรดไขมันหลายชนิด ดังนั้นจึงมีคุณสมบัติขึ้นอยู่กับกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบ ซึ่งตารางที่ 2 แสดงชนิดของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันพืชชนิดต่างๆ

ตารางที่ 1 โครงสร้างทางเคมีของกรดไขมันทั่วไป

กรดไขมัน	ชื่อทางเคมีของกรดไขมัน	โครงสร้าง	สูตรโครงสร้าง
Lauric	Dodecanoic	12:0	$C_{12}H_{24}O_2$
Myristic	Tetradecanoic	14:0	$C_{14}H_{28}O_2$
Palmitic	Hexadecanoic	16:0	$C_{16}H_{32}O_2$
Stearic	Octadecanoic	18:0	$C_{18}H_{36}O_2$
Arachidic	Elcosanoic	20:0	$C_{20}H_{40}O_2$
Behenic	Docosanoic	22:0	$C_{22}H_{44}O_2$
Lignoceric	Tetracosanoic	24:0	$C_{24}H_{48}O_2$
Oleic	<i>cis</i> -9-Octadecenoic	18:1	$C_{18}H_{34}O_2$
Linoleic	<i>cis</i> -9, <i>cis</i> -12-Octadecadienoic	18:2	$C_{18}H_{32}O_2$
Linolenic	<i>cis</i> -9, <i>cis</i> -12, <i>cis</i> -15-Octadecatrienoic	18:3	$C_{18}H_{30}O_2$
Erueic	<i>cis</i> -13-Docosenoic	22:1	$C_{22}H_{42}O_2$

ที่มา: Srivastava and Prasad (2000)

ตารางที่ 2 ชนิดของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันพืชชนิดต่างๆ

Vegetable oil	Fatty acid composition % by weight										
	12:0	14:0	16:0	18:0	20:0	22:0	24:0	18:1	22:1	18:2	18:3
Corn ^a	-	-	11.67	1.85	0.24	0.00	0.00	25.16	0.00	60.60	0.48
Cottonseed ^a	-	-	28.33	0.89	0.00	0.00	0.00	13.27	0.00	57.51	0.00
Crambe ^a	-	-	2.07	0.70	2.09	0.80	1.12	18.86	58.5	9.00	6.85
Peanut ^a	-	-	11.38	2.39	1.32	2.52	1.23	48.28	0.00	31.95	0.93
Rapeseed ^a	-	-	3.49	0.85	0.00	0.00	0.00	64.40	0.00	22.30	8.23
Soybean ^a	-	-	11.75	3.15	0.00	0.00	0.00	23.26	0.00	55.53	6.31
Sunflower ^a	-	-	6.08	3.26	0.00	0.00	0.00	16.93	0.00	73.73	0.00
Safflower ^b	-	0	9	2	0	0	0	12	0	78	0
H.O.Safflower ^b	-	Tr	5	2	Tr	0	0	79	0	13	0
Sesame ^b	-	0	13	4	0	0	0	53	0	30	0
Mahua ^b	-	-	16-	20.0-	0.0-	-	-	41-	-	8.9-	-
			28.2	25.1	3.3			51		13.7	
Karanja ^b	-	-	3.7-	2.4-	-	-	1.1-	44.5-	-	10.8-	-
			7.9	8.9			3.5	71.3		18.3	
Crude palm oil ^c	0.35	0.92	44.11	4.36	0.09	-	-	38.97	-	11.21	-
Jatropha oil ^c	-	-	14.85	7.43	0.08	-	-	47.65	-	29.80	0.19
Palm stearin ^c	0.25	1.27	59.19	4.43	0.31	-	-	28.61	-	5.86	-
Palm olein ^c	0.37	0.91	38.53	0.08	0.13	-	-	58.13	-	1.78	0.07

หมายเหตุ Tr: Trace

ที่มา: ^a Ma and Hanna (1999)

^b Agarwal (2006)

^c สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (2550)

โดยทั่วไปแล้วน้ำมันที่ได้จากพืชสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลได้โดยตรง ซึ่งมีข้อดี คือ สามารถเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์และไม่ทำให้เกิดสารก่อมะเร็ง แต่อาจจะทำให้เกิดปัญหาบางอย่างกับเครื่องยนต์ เช่น การเกิดคราบเขม่าที่เครื่องยนต์ การเกิดตะกอนที่หัวฉีด บริเวณกระบอกสูบและการอุดตันในไส้กรอง เป็นต้น ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันพืชเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว

ปาล์มน้ำมัน

ปาล์มน้ำมัน (Oil palm) เป็นพืชที่มีบทบาทสำคัญในด้านธุรกิจน้ำมันพืชเพื่อการบริโภค เนื่องจากให้ผลผลิตน้ำมันในปริมาณสูง และมีต้นทุนในการผลิตและราคาที่ต่ำกว่าน้ำมันพืชชนิดอื่นๆ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลายโดยใช้เป็นอาหารและใช้เป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์อื่นๆ อาทิเช่น บะหมี่กึ่งสำเร็จรูป เนยเทียม และขนมขบเคี้ยว เป็นต้น หรือนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทนน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลได้อีกด้วย ดังนั้นในการพัฒนาการนำปาล์มน้ำมันไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่นๆ ที่ไม่ใช่การใช้เป็นอาหารจึงเป็นเรื่องที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากในการพัฒนาให้มีศักยภาพเพื่อเพิ่มรายได้ให้กับประเทศ

1. ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของปาล์มน้ำมัน

ปาล์มน้ำมัน มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Elaeis guineensis* Jacq. อยู่ในวงศ์ Palmae หรือ Recaceae โดยมีถิ่นกำเนิดอยู่ทางตะวันตกและตอนกลางของทวีปอเมริกา ซึ่งในปัจจุบันมีประเทศปลูกปาล์มน้ำมัน 42 ประเทศทั่วโลก ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของปาล์มน้ำมันโดยทั่วไป แสดงได้ดังต่อไปนี้ (กลุ่มเกษตรสัญจร, 2531)

1.1 ราก ปาล์มน้ำมันมีระบบรากฝอย ลักษณะจะแตกประสานไปมาอย่างหนาแน่น โดยในจำนวนรากทั้งหมดจะเจริญอยู่ในระดับใกล้ผิวดินที่มีความลึกประมาณ 2 เมตร และในบางครั้งอาจมีรากแตกออกจากโคนต้นส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินด้วย ซึ่งรากเหล่านี้จะเรียกว่ารากพิเศษหรือรากอากาศ โดยจะมีส่วนช่วยในการหาอาหาร หายใจ และยึดลำต้นให้แข็งแรงเพิ่มขึ้น

1.2 ลำต้น เป็นลำต้นเดี่ยวตั้งตรง ภายในจะประกอบไปด้วยเส้นใย ไม่มีเนื้อเยื่อเจริญ บริเวณผิวนอกของลำต้นจะปกคลุมไปด้วยฐานทางใบหรือตอทางใบที่เกิดสลับเวียนขึ้นไปรอบต้น

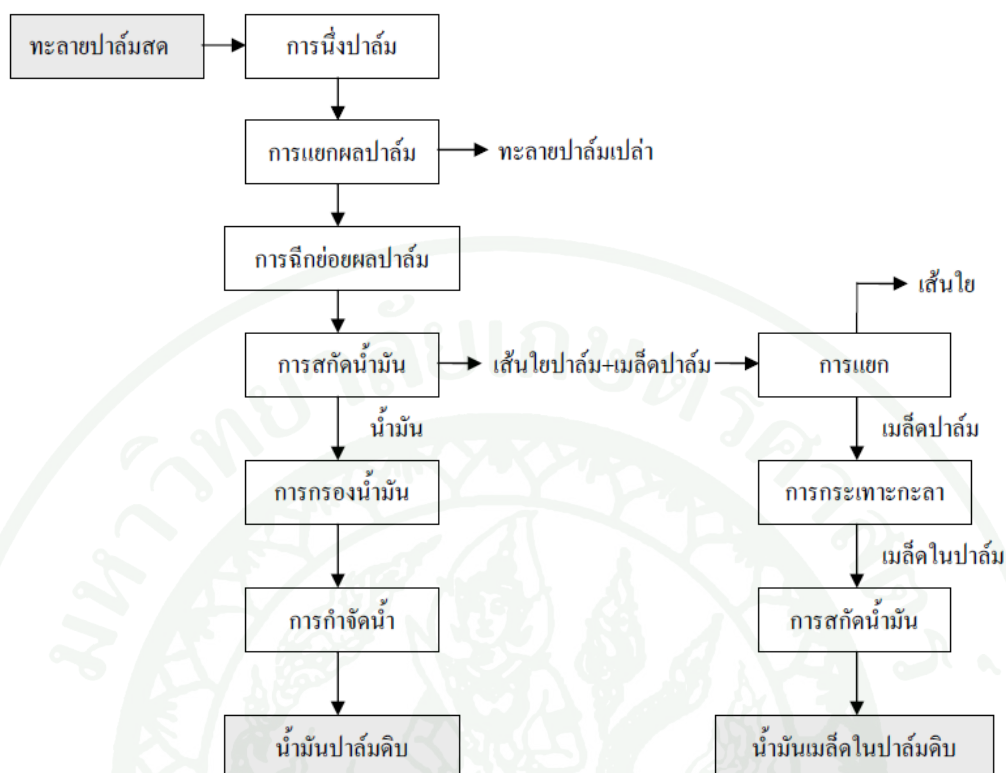
1.3 ใบ จะมีลักษณะคล้ายกับใบของมะพร้าว ซึ่งเป็นรูปขนนก โดยจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนก้านใบและส่วนของใบย่อยที่จะติดอยู่ทั้งสองข้างของก้านทางใบ

1.4 ช่อดอก มีดอกตัวผู้และดอกตัวเมียแยกกันอยู่คนละดอก แต่อยู่ในต้นเดียวกัน ทั้งช่อดอกตัวผู้และตัวเมียจะมีลักษณะคล้ายกัน โดยการเกิดช่อดอกตัวผู้และดอกตัวเมียของปาล์มน้ำมันในต้นเดียวกันจะไม่พร้อมกัน และต้องอาศัยการผสมพันธุ์โดยการผสมข้ามต้น มีลมและแมลงเป็นตัวชักนำ

1.5 ผลและเมล็ด ในปาล์มน้ำมันหนึ่งทะลาย จะประกอบไปด้วย ก้านทะลาย ช่อดอกทะลายย่อย และผล ซึ่งในแต่ละผลประกอบไปด้วยเปลือกชั้นนอก เปลือกชั้นกลางหรือกาบ ทั้ง 2 ส่วนนี้เป็นส่วนที่มีน้ำมัน และมีชั้นในสุดเป็นกะลา ถัดจากส่วนนี้ไปเป็นส่วนของเมล็ดซึ่งประกอบด้วยเนื้อในเมล็ด (Kernel) ที่มีน้ำมันอยู่เช่นเดียวกัน และคัพภะ (Embryo)

2. ขั้นตอนและวิธีการสกัดน้ำมันปาล์ม

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชเศรษฐกิจชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญและสามารถนำมาสกัดและให้ปริมาณน้ำมันมากที่สุด เมื่อเทียบกับพืชน้ำมันชนิดอื่นๆ โดยผลปาล์มสามารถนำมาสกัดเป็นน้ำมันได้ 2 ชนิด คือ น้ำมันปาล์ม (Palm oil) ซึ่งสกัดได้จากเปลือกนอกของผลปาล์ม และน้ำมันเมล็ดในปาล์ม (Palm kernel oil) ซึ่งสกัดได้จากเนื้อของเมล็ดในปาล์ม มีลักษณะเป็นสารกึ่งของเหลวและเป็นไขที่อุณหภูมิปกติ ซึ่งขั้นตอนของกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบ แสดงดังภาพที่ 2

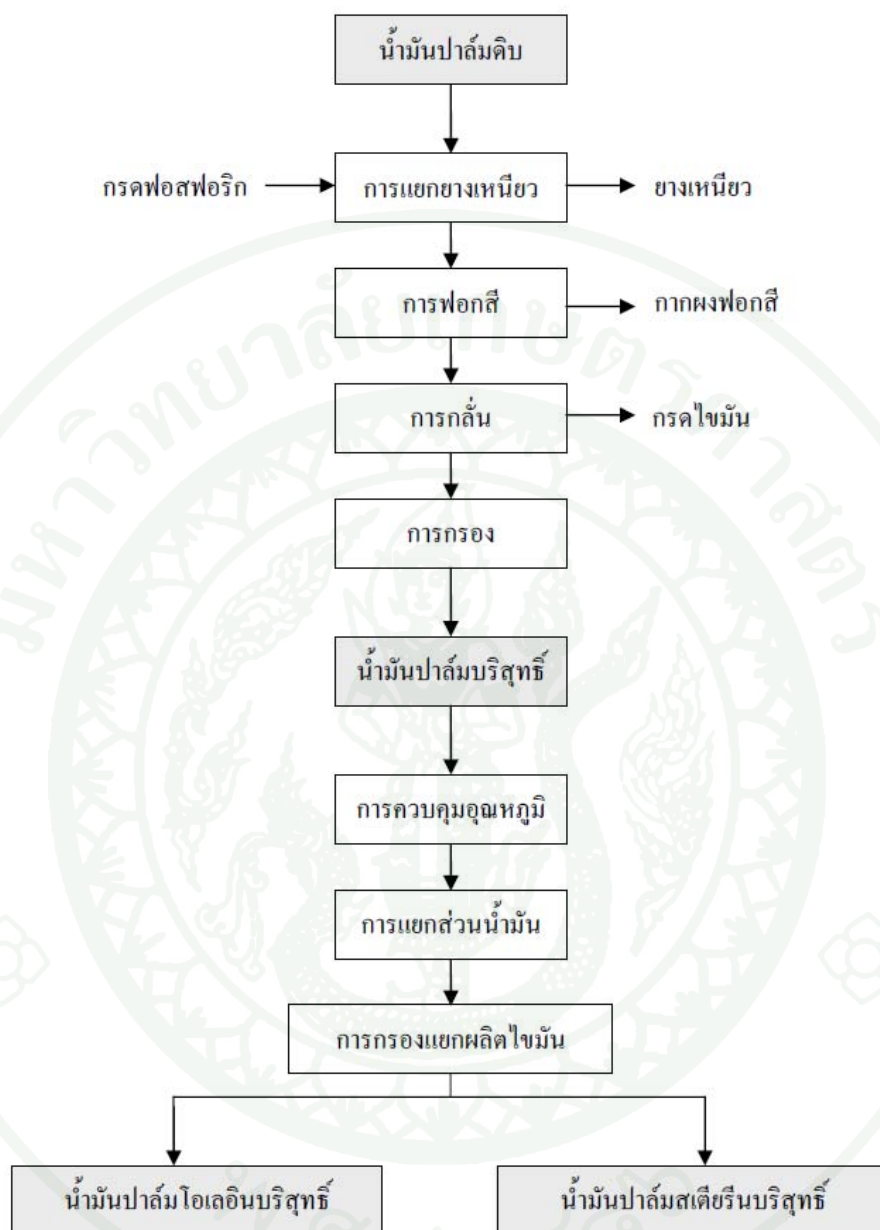


ภาพที่ 2 กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

ที่มา: คณะกรรมการพลังงาน สภาผู้แทนราษฎร (2545)

2.1 กระบวนการกลั่นบริสุทธิ์น้ำมันปาล์ม (Refine processing)

การกลั่นบริสุทธิ์น้ำมันปาล์ม เป็นกระบวนการทำให้น้ำมันปาล์มดิบเป็นน้ำมันปาล์มพร้อมสำหรับการอุปโภคและบริโภค การผลิตน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ ใช้วิธีทำให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีการกายภาพ หรือเรียกว่า Physical refining ซึ่งขั้นตอนการผลิตน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ แสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์

ที่มา: คณะกรรมการพลังงาน สภาผู้แทนราษฎร (2545)

กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์นั้นเป็นการนำน้ำมันดิบมาผ่านกระบวนการกำจัดขางเหนียว โดยใช้กรดฟอสฟอริกในปริมาณ 0.05-0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน

ยางเหนียวหรือสารประกอบฟอสโฟไทด์จะถูกกำจัดออก จากนั้นจึงทำการฟอกสีโดยใช้ผงฟอกสีในปริมาณ 2-3 เปอร์เซ็นต์ เข้าดูดซับสี และกรองผงฟอกสีที่ดูดซับสีออก แล้วจึงนำน้ำมันไปกลั่นที่อุณหภูมิ 240-260 องศาเซลเซียส ที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ โดยในการกลั่นนี้จะเป็นการกำจัดสี กลิ่น และกรดไขมันอิสระออก ซึ่งน้ำมันที่ได้จะนำไปกรองเพื่อให้ได้น้ำมันที่ใสและบริสุทธิ์ และเมื่อปล่อยให้ได้น้ำมันที่ได้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้องจะตกผลึกเป็นไขมันปนอยู่กับน้ำมัน จึงนำไปผ่านกระบวนการแยกไข โดยสุดท้ายแล้วจะได้น้ำมัน 2 ส่วน คือ น้ำมันใส (Olein) 60 เปอร์เซ็นต์ และน้ำมันขุ่นที่เรียกว่า สเตียร์น (Stearin) 40 เปอร์เซ็นต์

น้ำมันปาล์มโอเลอิน เป็นน้ำมันสีเหลืองใส ส่วนมากนิยมนำมาทำการบริโภค ส่วนที่เป็นไข เรียกว่า สเตียร์น ส่วนมากนำมาใช้ประโยชน์ในเชิงอุตสาหกรรม เช่น เครื่องสำอาง เทียนไข สบู่ และเนยเทียม โดยพบว่าที่สภาวะเดียวกัน ปริมาณผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากน้ำมันปาล์มดิบ มีค่าน้อยกว่า ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากไขปาล์มสเตียร์น เนื่องจากค่าความเป็นกรดของน้ำมันตั้งต้นของน้ำมันทั้งสองชนิด มีค่าแตกต่างกัน (Ma and Hanna, 1999)

สรุปคำ

สรุปคำจัดเป็นพืชในวงศ์ Euphorbiaceae ซึ่งเป็นวงศ์เดียวกับมันสำปะหลัง และยางพารา ซึ่งสรุปคำมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Jatropha curcas* Linn. สรุปคำสามารถเจริญเติบโตได้เกือบทั่วโลก ทำให้มีชื่อเรียกที่แตกต่างกันออกไป สำหรับในประเทศไทย ได้มีการนำสรุปคำเข้ามาปลูกในช่วงปลายสมัยกรุงศรีอยุธยา โดยในปัจจุบันนี้มีการนำมาปลูกกันแพร่หลายในทั่วทุกภูมิภาคของประเทศไทย และมีชื่อเรียกแตกต่างกันออกไป เช่น ภาคเหนือ เรียกว่า มะหุ้งฮั่ว ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เรียกว่า มะเยา ส่วนภาคใต้ เรียกว่า หงส์เทศ

1. ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของสรุปคำ (อนุวัฒน์, 2551)

สรุปคำเป็นไม้พุ่มยืนต้นขนาดกลาง สูงประมาณ 2-7 เมตร มีอายุไม่น้อยกว่า 20 ปี เป็นพืชที่มีโครโมโซมแบบดิพลอยด์ ($2n = 22$)

1.1 ลำต้น มีเปลือกลำต้นเรียบ มีสีเทา-น้ำตาล ลำต้นเกลี้ยง อวบน้ำ เป็นไม้เนื้ออ่อน ไม่มีแก่น หักง่าย มีน้ำยางสีขาวใส ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ลำต้นของสบูดำ

ที่มา: อนุวัฒน์ (2551)

1.2 ใบ เป็นใบเดี่ยวรูปไข่ กว้างหรือค่อนข้างกลม จัดเรียงแบบสลับ โคนใบเว้า รูปหัวใจ ปลายใบแหลม ขอบใบเรียบหรือหยักเว้า 3-5 หยัก ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ใบของสบูดำ

ที่มา: อนุวัฒน์ (2551)

1.3 ดอก มีช่อดอกแบบ Panicle หรือ Panicle cyme ประกอบด้วยดอกตัวผู้และดอกตัวเมีย อยู่ในช่อดอกเดียวกัน ดอกทั้ง 2 ชนิด มีกลีบรอง และกลีบดอก อย่างละ 5 กลีบ ดอกตัวผู้มีเกสรเรียงเป็นวง วงละ 5 อัน ดอกตัวเมียมีรังไข่ ก้านเกสรตัวเมียมี 6 แฉก ดอกมีขนาดเล็ก สีเขียวแกมเหลือง มีกลิ่นหอมอ่อนๆ ออกเป็นช่อที่ซอกใบหรือปลายยอด ในช่อดอกเดียวกันมีดอกตัวผู้มากกว่าดอก

ตัวเมีย ดอกแต่ละช่อบานไม่พร้อมกัน มีช่อดอกประมาณ 15-30 ช่อต่อต้น แต่ละช่อดอกมีดอกย่อย 70-120 ดอก แต่ละช่อดอกมีผลเพียง 8-14 ผล ดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ดอกของสบู่ดำ

ที่มา: อนุวัฒน์ (2551)

1.4 ผล ผลที่เกิดจากช่อดอกเดียวกันจะสุกไม่พร้อมกัน ผลอ่อนมีสีเขียว เมื่อแก่มีสีเหลือง คล้ายลูกจันทน์ ผลมีลักษณะกลมรีเล็กน้อย ผลมีขนาดปานกลาง กว้าง 2-3 เซนติเมตร ยาว 2.5-3.5 เซนติเมตร ผลมีพู พูละ 1 เมล็ด เมื่อสุกแก่ผลจะปริแตก ผลสด 1 กิโลกรัม มีจำนวน 85-90 ผล ดังแสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ผลของสบู่ดำ

ที่มา: อนุวัฒน์ (2551)

1.5 เมล็ด รูปกลมรี เปลือกนอกสีดำ เนื้อในสีขาว มีสารพิษ (Curcin) หากบริโภคจะเกิดอาการอาเจียนและท้องเสีย เมล็ดกว้างประมาณ 1 เซนติเมตร ยาวประมาณ 2 เซนติเมตร น้ำหนัก 100 เมล็ด ประมาณ 70 กรัม เมล็ด 1 กิโลกรัม มีประมาณ 1,300 – 1,500 เมล็ด ดังแสดงในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 เมล็ดของสนุ่นดำ

ที่มา: อนุวัฒน์ (2551)

2. ประโยชน์และพิษของสนุ่นดำ (อนุวัฒน์, 2551)

2.1 ประโยชน์ของสนุ่นดำ

ใบ ใบอ่อนสามารถนำมานึ่ง หรือต้มรับประทานได้อย่างปลอดภัย

ลำต้น ตัดเป็นท่อนต้มน้ำให้เด็กกินแก้ซาง ตาลงโมย ตัดเป็นท่อน แขน้ำอาบแก้โรค

พุพอง

ดอก ใช้เลียงผึ้งเพื่อผลิตน้ำผึ้ง

เมล็ด ใช้เป็นยาถ่าย ยาระบาย กากเมล็ด ซึ่งเป็นส่วนที่เหลือจากการหีบเอาน้ำมันไปใช้ แล้ว จะนำมาอัดเป็นก้อน ส่วนนี้จะมีเคอร์ซิน (Curcin) ซึ่งเป็นโปรตีนพิเศษเหมือนกับไรซิน (Ricin) ในละหุ่ง

น้ำยางจากก้านใบ รักษาโรคปากนกกระจอก ห้ามเลือด แก้ปวดฟัน แก้ลิ้นเป็นฝ้าขาว โดยผสมกับน้ำมันมะรดา ป้ายลิ้น หรือใช้ประโยชน์อย่างอื่น เช่น เปื่อปลา เป็นต้น

ราก ใช้เป็นยาขับถ่ายพยาธิ

นอกจากนี้ น้ำมันเมล็ดของสบู่ดำ ซึ่งประกอบไปด้วยน้ำมันประมาณ 35-40 เปอร์เซ็นต์ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายประการ อาทิเช่น ทำเครื่องสำอาง สารเคมีกำจัดศัตรูพืช ใช้ทำสบู่ และ ยา เป็นต้น

2.2 พืชของสบู่ดำ (นันทวรรณ, 2549)

ใบ มีฤทธิ์ในการฆ่าเชื้อและฆ่าพยาธิโดยยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียกลุ่ม Staphylococcus, Bacillus และ Micrococcus

กิ่งก้าน หรือส่วนลำต้น จากการศึกษาในห้องปฏิบัติการ พบว่ามีฤทธิ์ยับยั้ง cytopathic effect ของเชื้อ HIV โดยมีพืชดำ

ผล ทดสอบกับปลาการ์ฟ พบว่าพืชของ Phorbol ester ทำให้ปลาเจริญเติบโตช้าลง มีมูกในอุจจาระและไม่กินอาหาร และจากการทดสอบกับตัวอ่อนในครรภ์ของหนู พบว่า ผลของสบู่ดำทำให้หนูแท้งได้

เมล็ด สารพิษในเมล็ด คือ Curcin มีฤทธิ์ต่อสัตว์หลายชนิดและมนุษย์ ดังนี้

พิษในสัตว์ เช่น แกะ แพะ ทำให้ท้องเสีย ขาดน้ำ ไม่กินอาหาร และมีเลือดออกในอวัยวะภายใน เช่น กระเพาะอาหาร ปอด ไต หัวใจผิดปกติ มีเลือดออกหลายแห่งในร่างกาย

พิษในมนุษย์ เช่น พิษที่พบในเด็กที่รับประทานเมล็ดสบูดำ ได้แก่ อาการ กระสับกระส่าย คลื่นไส้ อาเจียน ท้องเดิน และขาดน้ำ ส่วนพิษที่พบในผู้ใหญ่ เช่น หากรับประทาน เพียงแค่ 3 เมล็ด ก็เป็นอันตรายต่อระบบทางเดินอาหาร แต่บางพันธุ์รับประทานถึง 50 เมล็ดก็ไม่เป็นอันตราย

3. การสกัดน้ำมันจากสบูดำ

การสกัดน้ำมันจากสบูดำทำได้ 3 วิธี ได้แก่

3.1 แบบง่าย โดยเก็บผลสบูดำแห้ง (ผลสีเหลืองถึงดำ) นำมาแกะเปลือกออกให้เหลือเฉพาะเมล็ด แล้วนำไปล้างทำความสะอาด จากนั้นนำมาผึ่งลมให้แห้ง แล้วนำไปบดให้เมล็ดแตก โดยการทุบหรือบดหยาบ นำเมล็ดที่บดแล้วออกตากแดดประมาณ 30 นาที แล้วจึงนำเข้าเครื่องสกัด (ใช้แรงงานคน) นำน้ำมันที่ได้ไปกรองเพื่อแยกเศษผงออกด้วยผ้าขาวบาง 2-3 ชั้น โดยเมล็ดสบูดำ 4 กิโลกรัม จะสามารถสกัดเป็นน้ำมันได้ 1 ลิตร ซึ่งเครื่องสกัดน้ำมันสบูดำโดยใช้แรงงานคน แสดงดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 เครื่องสกัดน้ำมันสบูดำโดยใช้แรงงานจากคน

ที่มา: สำนักงานอุตสาหกรรมจังหวัดหนองบัวลำภู (2549)

3.2 แบบใช้เครื่องบีบอัด เครื่องบีบอัดระบบไฮดรอลิก (Hydraulic press) การสกัดแบบนี้ จะได้น้ำมันประมาณ 20-25 เปอร์เซ็นต์ และมีน้ำค้างในกากเมล็ดสนุ่นดำ 10-25 เปอร์เซ็นต์ แล้วแต่ กำลังของไฮดรอลิก โดยเครื่องหีบน้ำมันสนุ่นดำด้วยระบบไฮดรอลิก แสดงดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 เครื่องหีบน้ำมันสนุ่นดำด้วยระบบไฮดรอลิก

ที่มา: สำนักงานอุตสาหกรรมจังหวัดหนองบัวลำภู (2549)

3.3 แบบสกัดด้วยตัวทำละลาย การสกัดด้วยสารเคมีปิโตรเลียมอีเทอร์ จะได้น้ำมัน ประมาณ 35-38 เปอร์เซ็นต์ และเมล็ดสนุ่นดำ 3-4 กิโลกรัม จะได้น้ำมัน 1 ลิตร

น้ำมันที่ได้จากการสกัดสามารถนำไปใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลที่เกษตรกรใช้อยู่ได้เลย โดยไม่ต้องนำไปผสมกับน้ำมันชนิดอื่นอีก ซึ่งเป็นคุณสมบัติพิเศษเฉพาะ ทำให้เกษตรกรมีความสะดวกที่จะใช้งาน โดยคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันสนุ่นดำแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันสนุดำ

คุณสมบัติทางเชื้อเพลิง	น้ำมันสนุดำ
ความถ่วงจำเพาะ	0.860-0.933
จุดวาบไฟ (องศาเซลเซียส)	210-240
คาร์บอนตกค้าง (เปอร์เซ็นต์)	0.07-0.64
ค่าซีเทน	38.0-51.0
ค่าความหนืด (cSt)	37.00-54.80
ปริมาณซัลเฟอร์ (เปอร์เซ็นต์)	0-0.13

ที่มา: Achten *et al.* (2008)

ทานตะวัน

ทานตะวัน เป็นพืชน้ำมันที่มีความสำคัญมากชนิดหนึ่ง เนื่องจากน้ำมันที่ได้จากการสกัดจากเมล็ดทานตะวันจะมีคุณภาพสูง ประกอบด้วยกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัว เช่น กรดลิโนเลนิก หรือ กรดลิโนเลอิก ซึ่งช่วยในการลดโคเลสเตอรอลที่เป็นสาเหตุของโรคไขมันอุดตันในเส้นเลือด นอกจากนี้ น้ำมันจากทานตะวันยังประกอบด้วย วิตามิน เอ ดี อี และเคด้วย ผลผลิตส่วนใหญ่อยู่ในเขตอบอุ่น เช่น สหภาพโซเวียต อาร์เจนตินา และประเทศในแถบยุโรปตะวันออก สำหรับประเทศไทย ได้มีการส่งเสริมให้มีการปลูกทานตะวันเป็นอาชีพเสริมมากขึ้น เพื่อเพิ่มผลผลิตให้เพียงพอกับอุตสาหกรรมพืชน้ำมันและความต้องการของผู้บริโภค ทั้งนี้ เพราะทานตะวันเป็นพืชที่มีอายุสั้น ระบายรากลึก มีความทนทานต่อสภาพแห้งแล้งได้ดีกว่าพืชอื่น ๆ แหล่งปลูกที่สำคัญ ได้แก่ จังหวัดลพบุรี เพชรบูรณ์และสระบุรี

1. ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

ทานตะวัน เป็นพืชในตระกูลเดียวกับเบญจมาศ และดาวเรืองเป็นพืชล้มลุกที่มีปลูกกันมากในเขตอบอุ่น การที่มีชื่อเรียกว่า "ทานตะวัน" เพราะลักษณะการหันของช่อดอกและใบจะหันไปทางทิศของดวงอาทิตย์

1.1 ราก เป็นระบบรากแก้วยังลึกลงไปประมาณ 150-270 เซนติเมตร มีรากแขนงค่อนข้างแข็งแรงแผ่ขยายไปด้านข้างได้ยาวถึง 60-150 เซนติเมตร เพื่อช่วยลำต้นลำต้นได้ดีและสามารถใช้ความชื้นระดับผิวดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.2 ลำต้น ส่วนใหญ่ไม่มีแขนง ความสูงของต้นอยู่ระหว่าง 1-10 เซนติเมตร ความสูงของลำต้นพันธุ์ที่มีการแตกแขนง อาจมีความยาวของแขนงสูงกว่าลำต้นหลักแขนงอาจแตกมาจากส่วนโคนหรือยอด หรือตลอดลำต้นก็ได้

1.3 ใบ เป็นใบเดี่ยวเกิดตรงกันข้าม หลังจากที่มีใบเกิดแบบตรงกันข้ามอยู่ 5 คู่แล้ว ใบที่เกิดขึ้นหลังจากนั้นจะมีลักษณะวน จำนวนใบบนต้นอาจมีตั้งแต่ 8-70 ใบ รูปร่างของใบแตกต่างกันตามพันธุ์ สีของใบอาจมีตั้งแต่เขียวอ่อน เขียว และเขียวเข้ม ใบที่เกิดออกมาจากตายอดใหม่ ๆ ก้านใบจะอยู่ในแนวตั้งจนกระทั่งใบมีความยาว 1 เซนติเมตร ปลายยอดจะค่อย ๆ โค้งลงจนเมื่อใบแก่แล้วก็จะโค้งลงมาเป็นรูปตัวยู (U) การสร้างใบจะมีมากจนกระทั่งดอกบาน หลังจากนั้นการสร้างใบจะลดน้อยลง

1.4 ดอก เป็นรูปจาน เกิดอยู่บนตายอดของลำต้นหลัก หรือแขนงลำต้นมีเส้นผ่าศูนย์กลางของดอกอยู่ระหว่าง 6-37 เซนติเมตร ซึ่งขึ้นกับพันธุ์และสภาพแวดล้อม ดอกมีลักษณะเป็นแบบช่อดอก ประกอบด้วยดอกย่อยเป็นจำนวนมาก

1.5 เมล็ด (หรือผล) ประกอบด้วยเนื้อใน ซึ่งถูกห่อหุ้มไว้ด้วยเปลือกที่แข็งแรง เมื่อผลสุกส่วนของดอกที่อยู่เหนือรังไข่จะร่วง ผลที่มีขนาดใหญ่จะอยู่วงรอบนอก ส่วนผลที่อยู่ข้างในใกล้ๆ กึ่งกลางจะมีผลเล็กลง

2. ประโยชน์ของทานตะวัน

แต่เดิมทานตะวันเป็นเพียงไม้ดอกไม้ประดับเท่านั้น ต่อมาได้นำมาเมล็ดมาเป็นของขบเคี้ยว และสกัดเป็นน้ำมัน จึงทำให้กลายเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญพืชหนึ่ง การใช้ประโยชน์จากทานตะวันมีหลายลักษณะ ดังนี้

2.1 เมล็ด ใช้บริโภคโดยตรงเพื่อเป็นแหล่งโปรตีนแทนเนื้อสัตว์ได้ ในเมล็ดมีธาตุเหล็กสูง ไม่แพ้ธาตุเหล็กจากไข่แดงและตับสัตว์ เมื่ออบทำแป้งจะได้แป้งสีขาว มีไขมันสูง มีโปรตีนมากกว่า ร้อยละ 50 ของปริมาณแป้ง

2.2 เปลือกของลำต้น มีลักษณะเหมือนเยื่อไม้ นำมาทำกระดาษสีขาวได้คุณภาพดี ลำต้นใช้ทำเชื้อเพลิงได้ เมื่อไถกลบจะเป็นปุ๋ยเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ให้แก่ดินได้ดี

2.3 ราก ใช้ทำ แป้งเค้ก สปาเก็ตตี้ ในรากมีวิตามินบี 1 และธาตุอีกหลายชนิด แพทย์แนะนำให้ใช้รากทานตะวันประกอบอาหารสำหรับผู้ป่วยเป็นโรคเบาหวาน

2.4 น้ำมัน น้ำมันที่สกัดจากเมล็ดจะให้ปริมาณน้ำมันสูงถึงร้อยละ 35 และได้น้ำมันที่มีคุณภาพสูง ประกอบด้วยกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัว เช่น กรดลิโนเลอิก หรือกรดลิโนเลนิก สูงถึงร้อยละ 60-70 ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อร่างกายในการช่วยลดคอเลสเตอรอล ที่เป็นสาเหตุของโรคไขมันอุดตันในเส้นเลือดได้ และยังประกอบด้วย ไวตามิน เอ ดี อี และเค ซึ่งคุณภาพของไวตามินอีจะสูงกว่าในน้ำมันพืชอื่น ๆ เมื่อเก็บไว้เป็นเวลานานจะไม่เกิดกลิ่นหืน ทั้งยังทำให้สีกลิ่น และรสชาติไม่เปลี่ยนแปลง นอกจากใช้เป็นน้ำมันพืชแล้วยังนิยมใช้ในอุตสาหกรรม ทำ เนยเทียม สี น้ำมันชักเงา สบู่ และน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ โดยองค์ประกอบองค์ประกอบทางเคมีและกายภาพของน้ำมันจากเมล็ดทานตะวัน แสดงดังตารางที่ 4

2.5 กาก กากที่ได้จากการสกัดน้ำมันออกแล้ว จะนำไปใช้เป็นส่วนผสมของอาหารสัตว์ได้ในกากเมล็ดทานตะวันที่จะเพาะเปลือกและบีบน้ำมันออกแล้ว จะมีโปรตีนร้อยละ 42 และใช้เป็นแหล่งแคลเซียมสำหรับปศุสัตว์ได้ดีแต่จะมีปริมาณกรดอะมิโนอยู่เล็กน้อย และขาดไลซีน จึงต้องใช้อย่างรอบคอบเมื่อนำไปผสมเป็นอาหารสัตว์ที่มีไขมันต่ำเกินไป

ตารางที่ 4 องค์ประกอบทางเคมีและกายภาพของน้ำมันจากเมล็ดทานตะวัน

องค์ประกอบทางเคมีและกายภาพ	น้ำมันเมล็ดทานตะวัน
ค่าความหนืด (mm^2/s ที่ 311 K)	34.4
ปริมาณคาร์บอนตกค้าง (% โดยน้ำหนัก)	0.28
ค่าซีเทน	36.7
ค่าความร้อนสูง (% โดยน้ำหนัก)	39.6
ปริมาณจีเถ้า	0.01
ปริมาณกำมะถัน (% โดยน้ำหนัก)	0.01
ค่าไอโอดีน (กรัมไอโอดีน/100 กรัมของน้ำมัน)	132.32

ที่มา: คณะกรรมการพลังงาน สภาผู้แทนราษฎร (2545)

ไบโอดีเซล

ไบโอดีเซล (Biodiesel) เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากแหล่งทรัพยากรหมุนเวียน เช่น น้ำมันพืช ไขมันสัตว์ หรือสาหร่าย ซึ่งเป็นพลังงานเชื้อเพลิงทดแทนนอกเหนือจากน้ำมันดีเซลที่ผลิตได้จากปิโตรเลียม โดยมีคุณสมบัติการเผาไหม้เหมือนกับน้ำมันดีเซล จึงสามารถนำมาใช้ทดแทนกันได้ นอกจากนี้ไบโอดีเซลยังสามารถย่อยสลายได้เองตามกระบวนการทางชีวภาพในธรรมชาติ (Biodegradation) และไม่เป็นพิษ (Non-toxic) ต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นในการนำไบโอดีเซลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อทดแทนน้ำมันดีเซลจึงเป็นการช่วยลดมลภาวะในอากาศ และยังสามารถเพิ่มรายได้ให้กับเกษตรกรเนื่องจากไบโอดีเซลนั้นผลิตมาจากน้ำมันพืชและไขมันสัตว์ (กองบรรณาธิการ, 2548)

1. ประเภทของไบโอดีเซล (อาภาณี, 2549)

ไบโอดีเซลที่มีการผลิตกันมากที่สุดแบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่

1.1 ไบโอดีเซลที่ใช้น้ำมันพืชหรือไขมันจากสัตว์โดยตรง เช่น น้ำมันปาล์ม น้ำมันสนุด้า หรือจากไขมันสัตว์ เช่น น้ำมันหมู เป็นต้น โดยจะนำน้ำมันที่ได้มาใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลโดยตรง

โดยไม่ผ่านการผสมหรือเติมสารเคมีลงไป ซึ่งน้ำมันประเภทนี้จะมีราคาถูก แต่ในการนำมาใช้นั้น จะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติทางความร้อนและความเหมาะสมอื่นๆด้วย เช่น น้ำมันพืชมีคุณสมบัติในการระเหยเป็นไอได้น้อยมาก จึงทำให้การจุดระเบิดเกิดขึ้นได้ยาก ส่งผลให้เครื่องยนต์ติดยาก และมีเขม่าหลงเหลืออยู่ที่หัวฉีด

1.2 ไบโอดีเซลถูกผสม โดยจะทำการผสมน้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์กับน้ำมันก๊าด หรือน้ำมันดีเซล เพื่อลดความหนืดของน้ำมันพืชลงให้ได้น้ำมันไบโอดีเซลที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลให้มากที่สุด แต่น้ำมันที่ได้จากวิธีนี้มีความเหมาะสมในกรณีของการที่จำเป็นจะต้องใช้น้ำมันอย่างเร่งด่วน หรือใช้งานกับเครื่องยนต์ที่ใช้งานหนัก

1.3 ไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์ เป็นไบโอดีเซลที่มีการเปลี่ยนแปลงโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ไปเป็นเอสเทอร์ของไตรกลีเซอไรด์ ซึ่งไบโอดีเซลที่ได้จากวิธีนี้จะมีคุณสมบัติทางกายภาพใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลมากที่สุด และน้ำมันที่ได้ก็มีความคงตัวมากขึ้น ทำให้เมื่อนำไปใช้งานกับเครื่องยนต์แล้วไม่ก่อให้เกิดปัญหาการมีเขม่าหลงเหลือ และจุควาบไฟของไบโอดีเซลมีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล ทำให้มีความปลอดภัยในระบบขนส่งและเก็บรักษามากขึ้น

เนื่องจากค่าซีเทนของไบโอดีเซลนั้นมีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล ซึ่งค่าซีเทนนี้เป็นค่าที่บ่งบอกถึงคุณภาพในการติดไฟของน้ำมัน ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ในปัจจุบันนี้มีการนำไบโอดีเซลมาผสมกับน้ำมันดีเซลเป็นจำนวนมากในสถานีเติมน้ำมันแต่ละประเทศ รวมถึงประเทศไทยด้วย ซึ่งคุณสมบัติโดยทั่วไปของไบโอดีเซลเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล แสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 คุณสมบัติโดยทั่วไปของไบโอดีเซลเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล

Fuel property	Diesel	Biodiesel
Fuel standard	ASTMD975	ASTMD6751
Lower heating value, Btu/gal	~129,050	~118,170
Kinematic viscosity, (40 °C)	1.3 to 4.1	4.0 to 6.0
Specific gravity kg/l, (60 °F)	0.85	0.88
Density, lb/gal (15 °C)	7.079	7.328
Water and sediment, val%	0.05 max	0.05 max
Carbon, wt%	87	77
Hydrogen, wt%	13	12
Sulfur, wt%	0.05 max	0.0 to 0.0024
Boiling point, °C	180 to 340	315 to 350
Flash point, °C	60 to 80	100 to 170
Cloud point, °C	-18 to 5	-3 to 12
Pour point, °C	-35 to -15	-15 to 10
Cetane number	40 to 55	48 to 65
Lubricity SLBOCLE, grams	2,000 to 5,000	>7,000

ที่มา: Tyson (2004)

2. กระบวนการผลิตไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลสามารถผลิตได้หลายวิธี คือ การใช้โดยตรงและการผสม ไมโครอิมัลชัน (Microemulsions) กระบวนการแตกสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis) กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน กระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยการทำปฏิกิริยากับเมทานอลในสภาวะเหนือวิกฤต นอกจากนั้นยังมีการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน (Ma and Hanna, 1999)

2.1 การใช้โดยตรงและการผสม

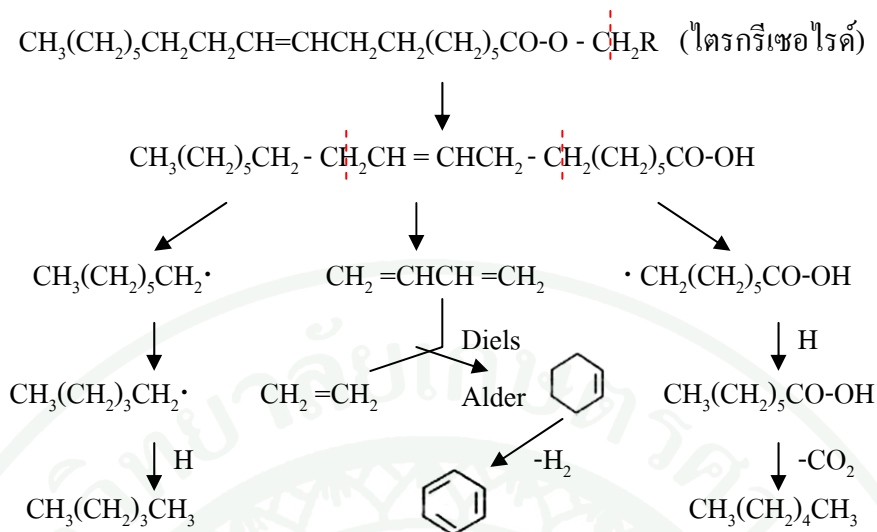
การใช้โดยตรงคือ น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชแท้ๆ เช่น น้ำมันมะพร้าว น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วลิสง น้ำมันเหลือง หรือน้ำมันจากไขมันสัตว์เช่น น้ำมันหมู ซึ่งสามารถนำมาใช้ได้เลยกับเครื่องยนต์ดีเซลโดยไม่ต้องผสมหรือผสมสารเคมีอื่นหรือไม่ต้องนำมาเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของน้ำมัน ส่วนแบบผสมคือเป็นการผสมระหว่างน้ำมันพืช (หรือไขมันสัตว์) กับน้ำมันก๊าดหรือน้ำมันดีเซลหรืออื่นๆ เพื่อให้ไบโอดีเซลที่ได้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลให้มากที่สุด (กองบรรณาธิการ, 2548)

2.2 ไมโครอิมัลชัน (Microemulsions)

ไมโครอิมัลชัน คือ คอลลอยด์ที่กระจายตัวในสภาวะสมดุลโดยมีอนุภาคในคอลลอยด์ส่วนมากอยู่ในช่วง 1-150 นาโนเมตร โดยสามารถเกิดได้เองตามธรรมชาติจากของเหลวสองชนิดที่ไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกันในภาวะปกติและมี Amphiphiles ผสมอยู่ในของเหลวดังกล่าวอย่างน้อยชนิดหนึ่ง เพื่อทำให้เกิดความคงสภาพโดยอาจเป็นสารที่มีประจุหรือไม่มีประจุก็ได้ ซึ่งไมโครอิมัลชันเป็นวิธีการหนึ่งเพื่อแก้ปัญหาค่าความหนืดสูงในน้ำมันพืชให้มีความหนืดลดลง โดยใช้ควบคู่กับตัวทำละลาย เช่น เมทานอล เอทานอล และ 1-บิวทานอล (Schwab *et al.*, 1987)

2.3 กระบวนการแตกสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis or Thermal cracking)

ไพโรไลซิส หมายถึงกระบวนการเปลี่ยนสารตั้งต้นชนิดหนึ่งไปเป็นอีกชนิดหนึ่ง โดยใช้ความร้อนหรือใช้ความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา ทั้งนี้จะต้องจำกัดปริมาณอากาศหรือออกซิเจนที่ใช้ในกระบวนการด้วยเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการประมาณ 450 – 600 องศาเซลเซียส แต่ข้อเสียของกระบวนการนี้คือ เครื่องมือที่มีราคาแพงในขณะที่ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณสมบัติทางเคมีใกล้เคียงกับแก๊สโซลีนและน้ำมันดีเซล และออกซิเจนที่ถูกจำกัดออกไปจากกระบวนการไพโรไลซิสจะทำให้เกิดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม (Ma and Hanna, 1999) โดยกลไกของกระบวนการแตกสลายทางความร้อนแสดงในภาพที่ 11



ภาพที่ 11 กระบวนการแตกสลายทางความร้อนของไตรกลีเซอไรด์

ที่มา: Srivasyava and Prasad (1999)

2.4 การทำปฏิกิริยากับเมทานอลในสถานะเหนือวิกฤต (Supercritical methanol)

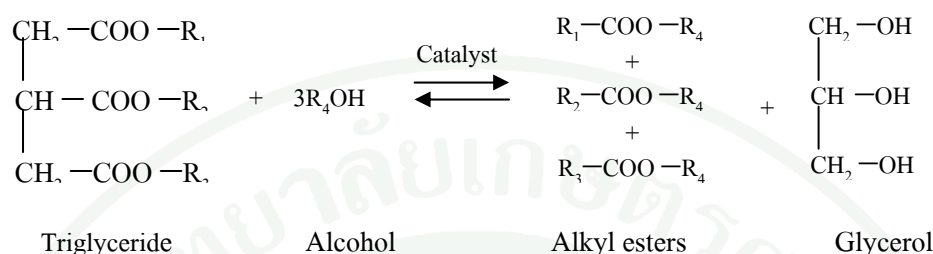
เป็นกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเป็นการนำเอาน้ำมันวัตถุดิบมาทำปฏิกิริยากับเมทานอลในสถานะเหนือวิกฤต ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาน้อย พร้อมทั้งเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมกล่าวคือ ไม่มีของเสียจากกระบวนการ แต่อย่างไรก็ตามวิธีนี้จะต้องใช้อุณหภูมิและความดันในระดับที่ค่อนข้างสูงประมาณ 512.2 เคลวิน และ 8.1 เมกะปาสกาลตามลำดับ เพื่อต้องทำให้เมทานอลอยู่ในสถานะเหนือวิกฤต (Demirbas, 2006)

2.5 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification or Alcoholysis)

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาระหว่างไขมันหรือน้ำมัน(Triglyceride) กับแอลกอฮอล์ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเอสเทอร์และกลีเซอรอล โดยมีตัวเร่งในปฏิกิริยา(Ma and Hanna, 1999) ซึ่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์แสดงดังภาพที่ 12

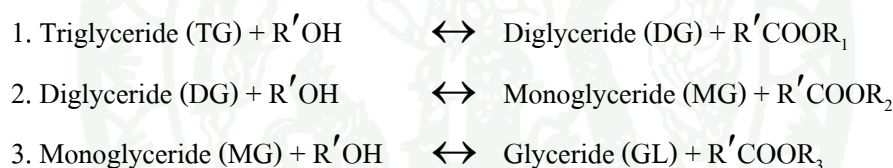
ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันประกอบด้วยปฏิกิริยาย่อยแบบผันกลับได้ 3 ขั้นตอนย่อย นั่นคือเริ่มจากไตรกลีเซอไรด์ เปลี่ยนเป็นไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ ตามลำดับสุดท้ายได้

เป็น เอสเทอร์ กับ กลีเซอรอล ดังแสดงในภาพที่ 13 จากกลไกข้างล่างพบว่าแต่ละขั้นตอนย่อยจะได้ 1 โมลของเอสเทอร์



ภาพที่ 12 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์

ที่มา: Ma and Hanna (1999)



ภาพที่ 13 กลไกการเกิดปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันพืชกับแอลกอฮอล์

ที่มา: Fukuda *et al.* (2001)

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้มีหลายชนิดแต่ที่นิยมใช้คือตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสภาพเป็นกรดหรือที่มีสภาพเป็นเบสและเอนไซม์ไลเปส โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสภาพเป็นเบสจะใช้ในอุตสาหกรรมมากกว่าเนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีเร็วกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสภาพเป็นกรดมาก แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสภาพเป็นกรดจะใช้ได้ดีในกรณีที่น้ำมันที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบมีกรดไขมันอิสระอยู่ในปริมาณที่มาก เนื่องจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่สามารถผันกลับได้ ดังนั้นในการทำงานจริงต้องมีการใส่แอลกอฮอล์มากเกินไป เพื่อป้องกันปฏิกิริยาย้อนกลับ ซึ่งแอลกอฮอล์ที่นิยมใช้กันมาก คือ เมทานอลและเอทานอล เพราะมีราคาถูกและคุณสมบัติทางกายภาพที่ขี้และสายโซ่แอลกอฮอล์ที่สั้นสามารถเกิดปฏิกิริยาที่เร็ว และละลายในตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสได้ง่าย

3. คุณสมบัติของไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลเป็นผลผลิตที่ได้จากน้ำมันพืชที่ผ่านกระบวนการทางเคมี ให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล อย่างไรก็ตาม เนื่องจากน้ำมันดีเซลและไบโอดีเซล มีองค์ประกอบและมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน ทำให้ไบโอดีเซลยังคงมีคุณสมบัติที่แตกต่างจากน้ำมันดีเซล ซึ่งบางคุณสมบัติเป็นข้อได้เปรียบ และบางคุณสมบัติเป็นข้อเสียเปรียบ โดยทั่วไปแล้วสามารถเปรียบเทียบคุณสมบัติของไบโอดีเซลกับน้ำมันดีเซลได้ดังนี้ (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2550)

3.1 ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงสะอาด ไม่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ ทำให้ไอเสียที่ปล่อยออกจากเครื่องยนต์ไม่ก่อให้เกิดภาวะฝนกรด เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ เมื่อถูกเผาไหม้แล้ว กำมะถัน จะเปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และกรดซัลฟิวริก เกิดเป็นมลพิษทางอากาศ เมื่อฝนตกจะชะล้างมลพิษเหล่านี้เกิดเป็นฝนกรดได้

3.2 น้ำมันดีเซล ไม่มีออกซิเจนอยู่ในโครงสร้างโมเลกุล และมีองค์ประกอบของสาร Aromatic compound ถึงร้อยละ 20 - 40 ขณะที่ไบโอดีเซลไม่มีสารประกอบประเภท Aromatic compound แต่มีออกซิเจนอยู่ในโครงสร้างโมเลกุลถึงร้อยละ 10 - 12 ทำให้เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิง ไอเสียที่เกิดขึ้นมีปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก และมีควันดำต่ำกว่าการใช้้ำมันดีเซล

3.3 ไบโอดีเซลมีจุดวาบไฟสูงกว่าน้ำมันดีเซล จึงมีค่าการจุดระเบิดในเครื่องยนต์สูงกว่าน้ำมันดีเซล

3.4 น้ำมันดีเซลไม่มีพันธะคู่ในโครงสร้างโมเลกุล ขณะที่ไบโอดีเซลมีพันธะคู่ในน้ำมันพืช ซึ่งมีปริมาณที่แตกต่างกันตามชนิดของน้ำมันพืช ทำให้ไบโอดีเซลไม่เสถียรตัว เกิดออกซิเดชันได้เร็วกว่าน้ำมันดีเซล และมีระยะการเก็บรักษาหลังการผลิตสั้นกว่าน้ำมันดีเซล

3.5 ไบโอดีเซลมีคุณสมบัติในการหล่อลื่นเครื่องยนต์ดีกว่าน้ำมันดีเซล ทำให้ช่วยลดการสึกหรอของเครื่องยนต์ได้ดี

ไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันพืชต่างชนิดกันจะมีคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพแตกต่างกัน ซึ่งเป็นไปตามกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบอยู่ ดังนั้น ในการสังเคราะห์ไบโอดีเซลสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงต้องมีการทดสอบคุณสมบัติของไบโอดีเซลด้วย ซึ่งจะต้องเป็นไปตามรายละเอียดแนบท้ายประกาศกรมธุรกิจพลังงาน ว่าด้วยเรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน ซึ่งประกาศกรมธุรกิจพลังงาน เมื่อวันที่ 13 กรกฎาคม 2552 มีรายละเอียดดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน

ข้อกำหนด	อัตราสูงต่ำ	วิธีทดสอบ
เมทิลเอสเทอร์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่ต่ำกว่า	96.5 EN 14103
ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 °C	ไม่ต่ำกว่า	860
(กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)	ไม่สูงกว่า	900
ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 °C	ไม่ต่ำกว่า	3.5
(เซนติสต็อกส์)	ไม่สูงกว่า	5
จุดวาบไฟ (°C)	ไม่ต่ำกว่า	120
กากถ่าน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า	0.3
จำนวนซีเทน	ไม่ต่ำกว่า	51
เถ้าซิลิเกต (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า	0.02
น้ำ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า	0.05
สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด	ไม่สูงกว่า	0.0024
(ร้อยละโดยน้ำหนัก)		EN 12662
การกัดกร่อนแผ่นทองแดง	ไม่สูงกว่า	หมายเลข 1
เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (ชั่วโมง)	ไม่ต่ำกว่า	10
ค่าความเป็นกรด	ไม่สูงกว่า	0.50
(มิลลิกรัมโพตัสเซียมไฮดรอกไซด์)		ASTM D 664

ตารางที่ 6 (ต่อ)

ข้อกำหนด	อัตราสูงค่า	วิธีทดสอบ	
ค่าไอโอดีน (กรัมไอโอดีน / 100กรัม)	ไม่สูงกว่า	120	EN 14111
กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์	ไม่สูงกว่า	12.0	EN 14103
เมทานอล (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า	0.2	EN 14110
โมนอกลิเซอไรด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า	0.8	EN 14105
ไดกลิเซอไรด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า	0.2	EN 14105
ไตรกลิเซอไรด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า	0.2	EN 14105
กลีเซอรินอิสระ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า	0.02	EN 14105
กลีเซอรินทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า	0.25	EN 14105
โลหะกลุ่ม 1 (โซเดียมและโพแทสเซียม)	ไม่สูงกว่า	5	EN 14108 และ EN 14109
โลหะกลุ่ม 2 (แคลเซียมและแมกนีเซียม)	ไม่สูงกว่า	5	pr EN 14538
ฟอสฟอรัส (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า	0.001	ASTM D 4951
สารเติมแต่ง	ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบจากอธิบดีกรม ธุรกิจพลังงาน		

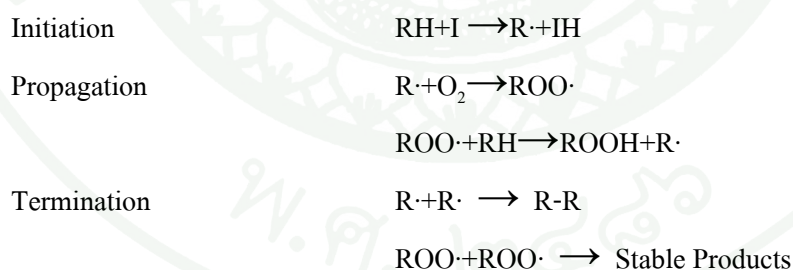
ที่มา: กรมธุรกิจพลังงาน 2550

ปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซล

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซล คือ การสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับปริมาณของกรดไขมันไม่อิ่มตัวในไบโอดีเซล กระบวนการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดไขมันนั้น เป็นกลไกที่หลากหลายและซับซ้อน โดย นอกจากการสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศโดยตรงแล้ว อาจมีปัจจัยอื่นที่มีผลต่อความเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซลซึ่งได้แก่ อิทธิพลของแสง อุณหภูมิ โลหะที่เจือปน

ในไบโอดีเซล รวมไปถึงวัสดุที่ใช้บรรจุไบโอดีเซล สารประกอบเปอร์ออกไซด์และสารต้านอนุมูลอิสระอีกด้วย (Knothe, 2007)

ปฏิกิริยาออกซิเดชันแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนด้วยกัน คือ Initiation, Propagation และ Termination ซึ่งแสดงดังภาพที่ 14 โดยขั้นตอน Initiation จะเกิดขึ้นเมื่อไบโอดีเซลที่ประกอบด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัวซึ่งมีความเสถียรต่ำ เมื่อไบโอดีเซลดังกล่าวสัมผัสกับอากาศ หรือออกซิเจน โดยมีปัจจัยอื่นเป็นตัวเร่ง เช่น น้ำ แสง จะทำให้เกิดการแตกตัวของโมเลกุลตรงพันธะคู่ของกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวเกิดเป็นสารอนุมูลอิสระ (Radical) ซึ่งมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูง จากนั้นในขั้นตอน Propagation อนุมูลอิสระนี้จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนอย่างรวดเร็ว จะเกิดเป็นอนุมูลอิสระที่อยู่ในรูปของเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเปอร์ออกไซด์นี้สามารถรวมตัวกับไฮโดรเจนจากโมเลกุลของกรดไขมันในไบโอดีเซล เกิดเป็นไฮโดรเปอร์ออกไซด์และอนุมูลอิสระอีกตัวหนึ่ง ซึ่งอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นนี้สามารถไปทำปฏิกิริยากับ ออกซิเจนเกิดเป็นเปอร์ออกไซด์ได้ ทำให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ และในขั้นตอน Termination อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นใหม่นี้จะสามารถทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระอื่นๆ เกิดเป็นสารประกอบ เช่น อัลดีไฮด์ แอลกอฮอล์ กรดคาร์บอนิก และคีโตน เป็นต้น โดยสารประกอบเหล่านี้มีผลทำให้ไบโอดีเซลมีลักษณะสมบัติที่ไม่เป็นไปตามมาตรฐาน EN 14214 โดยเฉพาะค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันตามวิธี EN 14112 ซึ่งกำหนดให้มีค่ามากกว่า 6 ชั่วโมง (Sarin *et al.*, 2007)



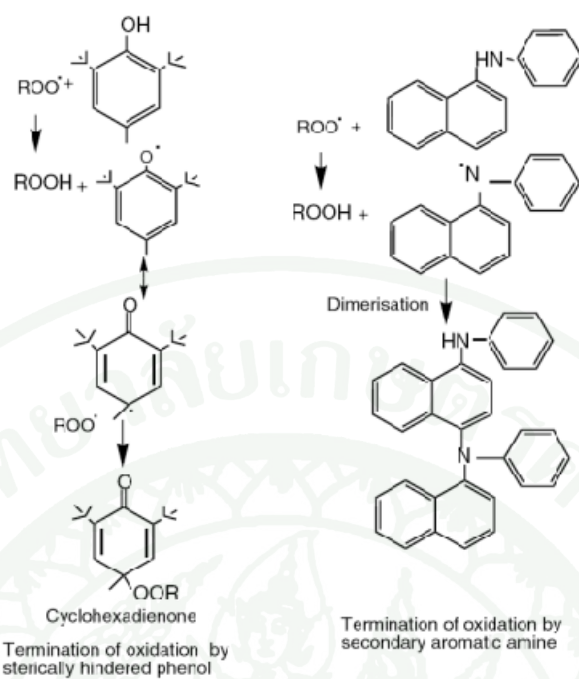
ภาพที่ 14 ปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซล

ที่มา: Jain and Sharma (2010)

สารต้านอนุมูลอิสระ

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

สารต้านอนุมูลอิสระที่ช่วยยับยั้งปฏิกิริยาลูกโซ่ของสารอนุมูลอิสระแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทฟีนอลิก (Phenolic-type) และประเภทอะมินิก (Aminic-type) ซึ่งสารต้านอนุมูลอิสระประเภทที่นิยมใช้ คือ ประเภทฟีนอลิก โดยกลไกของสารต้านอนุมูลอิสระแสดงดังภาพที่ 25 สารต้านอนุมูลอิสระนั้นประกอบด้วยไฮโดรเจนที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระที่อยู่ในรูปของเปอร์ออกไซด์ได้ดีกว่ากรดไขมันและเอสเทอร์ ทำให้อนุมูลอิสระนั้นเสถียร ส่วนสารต้านอนุมูลอิสระที่สูญเสียไฮโดรเจนจะทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระอีกโมเลกุลหนึ่งเพื่อทำให้เกิดความเสถียร ดังนั้นสารต้านอนุมูลอิสระจึงช่วยยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันลูกโซ่ (Sarin *et al.*, 2007; Waynick, 2005)



ภาพที่ 15 กลไกของสารต้านอนุมูลอิสระ

ที่มา: Sarin *et al.* (2007)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เดือนเพ็ญ (2552) ทำการศึกษาการปรับปรุงเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ โดยทำการเติมสารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) 3 ชนิด คือ PG (3,4,5-Trihydroxybenzoic acid propyl ester, propyl gallate), TBHQ (T-butyl hydroquinone) และ BHA (Butylated hydroxyanisole) ที่ความเข้มข้น 0-750 พีพีเอ็ม สารเติมแต่งสำเร็จรูป (Additives) 3 ชนิด คือ ZEP additive, NITROX และ L-power ที่ความเข้มข้น 0-1,000 พีพีเอ็ม แล้วนำตัวอย่างที่เติมสารต้านอนุมูลอิสระหรือสารเติมแต่งสำเร็จรูปมาหาเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันโดยวัดค่า Induction time ตามวิธี EN14112 ด้วยเครื่อง Rancimat ผลการทดลองพบว่า PG เป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดในการปรับปรุงความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ โดยไบโอดีเซลซึ่งเติม PG ในปริมาณความเข้มข้น 50, 150, 250, 350, 500, 650 และ 750 พีพีเอ็ม ทำให้ค่า Induction time เพิ่มขึ้นจาก 4.21 (ยังไม่เติมสารต้านอนุมูลอิสระหรือสารเติมแต่งใดๆ) เป็น 18.93, 26.35, 30.20 32.98, 34.04, 36.01 และ 37.55 ชั่วโมง ตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากสบู่ดำที่เติม PG ในปริมาณความเข้มข้น 150 พีพีเอ็ม เป็นระยะเวลา 20 สัปดาห์ พบว่า ค่า Induction time ของ ไบโอดีเซลในสัปดาห์แรกมีค่าเท่ากับ 26.35 ชั่วโมง และในสัปดาห์ที่ 20 มีค่าเท่ากับ 23.59 ชั่วโมง โดยค่าคุณสมบัติทางกายภาพของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติม PG ในปริมาณความเข้มข้น 150 พีพีเอ็ม 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

ชวิดา (2551) ทำการศึกษาการปรับปรุงเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ โดยการผสมไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำด้วยไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละ 100:0, 80:20, 60:40, 50:50, 40:60, 20:80 และ 0:100 ซึ่งพบว่า ที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 50:50 ช่วยเพิ่มค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำจาก 3.7 ชั่วโมง เป็น 7.3 ชั่วโมง และส่งผลให้จุดหมอกควัน เพิ่มขึ้นจาก 3 องศาเซลเซียส เป็น 9 องศาเซลเซียส และจุดไหลเทเพิ่มขึ้นจาก -8 องศาเซลเซียส เป็น 0 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังศึกษาการปรับปรุงความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ โดยการเติมสารต้านอนุมูลอิสระลงไป 3 ชนิด คือ BHA (Butylated hydroxyanisole), BHT (Butylated

hydroxytoluene) และ Kerobit® TP 26 ตามลำดับ โดยพบว่า การเติม BHA ในปริมาณ 200 พีพีเอ็ม ทำให้ไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำมีค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันเป็นไปตามมาตรฐาน EN 14112 และเมื่อทำการเติม BHA ลงในไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวในปริมาณ 150 พีพีเอ็ม ช่วยให้ไบโอดีเซลผสมที่อัตราส่วนร้อยละ 80:20 มีค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันเป็นไปตามมาตรฐาน EN 14112 มีจุดหมอกควันเท่ากับ 5 องศาเซลเซียส มีจุดไหลเทเท่ากับ -5 องศาเซลเซียส และการเติม BHA ในปริมาณ 50 พีพีเอ็ม ช่วยให้ไบโอดีเซลผสมที่อัตราส่วนร้อยละ 60:40 มีค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันเป็นไปตามมาตรฐาน EN 14112 มีจุดหมอกควันเท่ากับ 8 องศาเซลเซียส และมีจุดไหลเทเท่ากับ -2 องศาเซลเซียส และหลังจากจัดเก็บไบโอดีเซลเป็นระยะเวลา 10 สัปดาห์ พบว่า เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลลดลงตามระยะเวลาการจัดเก็บ โดยไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่เติมสาร BHA ปริมาณความเข้มข้น 200 พีพีเอ็ม และไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วนผสมร้อยละ 60:40 ที่เติมสาร BHA ปริมาณความเข้มข้น 50 พีพีเอ็ม มีเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันลดลง 21.46 เปอร์เซ็นต์ และ 9.27 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

Bondioli *et al.* (2003) ทำการศึกษาเกี่ยวกับเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลที่มีจำหน่ายในทวีปยุโรปซึ่งผลิตจากแหล่งต่างๆ กัน คือ น้ำมันเรพซีด (Rapeseed oil) น้ำมันดอกทานตะวัน น้ำมันพีชใช้แล้ว และไขสัตว์ โดยนำมาจัดเก็บเป็นระยะ 1 ปี เพื่อศึกษาจำนวนเปอร์ออกไซด์ (วิเคราะห์ด้วยวิธี NFT 60-220) ความหนืดทางจลน์ (ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส) และค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน (วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Rancimat ด้วยวิธี EN 14112) นอกจากนี้ยังศึกษาผลของสารต้านอนุมูลอิสระ 2 ชนิด (TBHQ และ PG) ที่ความเข้มข้น 400 พีพีเอ็ม ซึ่งเติมในไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดเรพ จากการทดลองพบว่าเมื่อระยะเวลาในการเก็บเพิ่มขึ้น จำนวนเปอร์ออกไซด์และความหนืดทางจลน์จะเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันจะมีค่าลดลง โดยไบโอดีเซลที่ประกอบด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัว จะมีจำนวนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้นมากกว่า และค่าความหนืดเพิ่มขึ้นน้อยกว่าเมื่อเทียบกับไบโอดีเซลที่ประกอบด้วยกรดไขมันอิ่มตัว นอกจากนี้พบว่า TBHQ เป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่เหมาะสมกับน้ำมันเมล็ดเรพ ค่าเปอร์ออกไซด์ของไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดเรพ น้ำมันดอกทานตะวัน น้ำมันพีชใช้แล้ว และไขสัตว์ ในตอนเริ่มต้นมีค่าดังนี้ 3.40 79.00 9.30 และ 16.90 ออกซิเจน/กิโลกรัม ตามลำดับ และในเดือนที่ 12 มีค่าดังนี้ 13.30 68.00 16.90 และ 22.00 ออกซิเจน/กิโลกรัม ตามลำดับ ค่าความหนืดทางจลน์ของไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดเรพ 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 ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันในตอนเริ่มต้นของไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดเร้ว น้ำมันดอกทานตะวัน น้ำมันพีชใช้แล้ว ไขสัตว์ ไบโอดีเซลเมล็ดเร้วที่เติม TBHQ และไบโอดีเซลเรพชิตที่เติม 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

Bryan (2011) ทำการศึกษาผลของระยะเวลาในการเก็บไบโอดีเซลที่มีต่อคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันคาโนรา น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันทานตะวัน โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลเป็นระยะเวลา 12 เดือน ที่อุณหภูมิ -15 และ 40 องศาเซลเซียส และทำการวิเคราะห์ค่าเสถียรภาพการเกิดออกซิเดชัน ค่าจุดหมอกควัน ค่าจุดไหลเท ค่าความหนืดทางจลน์ที่ 40 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด และค่าไอโอดีน จากผลการทดลองพบว่า ค่าเสถียรภาพการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลมีค่าลดลงอย่างเป็นนัยสำคัญกับระยะเวลาในการจัดเก็บ โดยค่าเสถียรภาพการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันคาโนรา น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันทานตะวัน ในตอนเริ่มต้น มีค่าเท่ากับ 6.4 10.9 5.0 และ 6.2 ชั่วโมง ตามลำดับ และ ในเดือนที่ 12 ที่อุณหภูมิ -15 อุณหภูมิห้อง และ 40 องศาเซลเซียส สำหรับน้ำมันคาโนรา มีค่าเท่ากับ 4.0 0.5 และ ไม่ระบุ ชั่วโมง สำหรับน้ำมันปาล์ม มีค่าเท่ากับ 9.2 4.3 และ ไม่ระบุ ชั่วโมง สำหรับน้ำมันถั่วเหลือง มีค่าเท่ากับ 2.4 0.5 และ ไม่ระบุ ชั่วโมง สำหรับน้ำมันทานตะวัน มีค่าเท่ากับ 4.0 2.2 และ ไม่ระบุ ชั่วโมง ตามลำดับ ค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลจากน้ำมันคาโนรา น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันทานตะวัน ในตอนเริ่มต้น มีค่าเท่ากับ 0.01 mg KOH/g และ ในเดือนที่ 12 ที่อุณหภูมิ -15 อุณหภูมิห้อง และ 40 องศาเซลเซียส สำหรับน้ำมันคาโนรา มีค่าเท่ากับ 0.07 0.34 และ 1.14 mg KOH/g สำหรับน้ำมันปาล์ม มีค่าเท่ากับ 0.07 0.07 และ 0.49 mg KOH/g สำหรับน้ำมันถั่วเหลือง มีค่าเท่ากับ 0.06 0.26 และ 0.60 mg KOH/g สำหรับน้ำมันทานตะวัน มีค่าเท่ากับ 0.08 0.10 และ 0.79 mg KOH/g ตามลำดับ ค่าความหนืดของไบโอดีเซลจากน้ำมันคาโนรา น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันทานตะวัน ในตอนเริ่มต้น มีค่าเท่ากับ 4.42 4.58 4.12 และ 4.74 mm²/s ตามลำดับ และ ในเดือนที่ 12 ที่อุณหภูมิ -15 อุณหภูมิห้อง และ 40 องศาเซลเซียส สำหรับน้ำมันคาโนรา มีค่าเท่ากับ 4.76 4.84 และ 4.99 mm²/s สำหรับน้ำมันปาล์ม มีค่าเท่ากับ 4.61 4.70 และ 4.80 mm²/s สำหรับน้ำมันถั่วเหลือง มีค่าเท่ากับ 4.24 4.38 และ 4.55 mm²/s สำหรับน้ำมันทานตะวัน มีค่าเท่ากับ 4.78 4.81 และ 5.19 mm²/s ตามลำดับ และพบว่าระยะเวลาในการจัดเก็บไม่มีผลต่อ ค่าไอโอดีน ค่าจุดหมอกควัน และจุดไหลเท โดยเมื่อเปรียบเทียบชนิดของน้ำมันพบว่า

ระยะเวลาในการจัดเก็บมีผลต่อน้ำมันคาโนร่ามากที่สุด เนื่องจากมีค่าเสถียรภาพการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลและค่าความหนืดเปลี่ยนแปลงไปมากที่สุด

Jain and Shama (2011) ได้ทำการศึกษาการเก็บไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำเป็นระยะเวลานาน โดยศึกษาการเติมโลหะ 5 ชนิด ได้แก่ เหล็ก นิกเกิล แมงกานีส โคบอลต์ และทองแดง ที่ปริมาณความเข้มข้น 2 พีพีเอ็ม และเติม Pyrogallol (PY) ที่ปริมาณความเข้มข้น 0 – 800 พีพีเอ็ม และจัดเก็บไบโอดีเซลโดยให้สัมผัสกับอากาศและแสงเป็นระยะเวลา 6 เดือน โดยทำการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด ค่าเปอร์ออกไซด์ ค่าความหนืด และค่าเสถียรภาพการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซล จากผลการทดลองพบว่า เมื่อจัดเก็บไบโอดีเซลเป็นระยะเวลา 6 เดือน ค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.15 เป็น 0.45 mg KOH/g ค่าเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 4.16 เป็น 38.26 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ค่าความหนืด เพิ่มขึ้นจาก 4.38 เป็น 5.63 เซนติสโตกส์ และปริมาณโลหะที่เติมลงไป ส่งผลให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดเร็วขึ้น เนื่องจากค่าความหนืดและค่าเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก และเมื่อทำการเติม PY ลงไป พบว่า ค่าเสถียรภาพการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลมีค่าเพิ่มขึ้น และการเติม PY ในปริมาณ 200 พีพีเอ็ม จะทำให้ไบโอดีเซลยังคงความเสถียรเมื่อจัดเก็บเป็นระยะเวลา 6 เดือน และเมื่อศึกษาปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวต่อระยะเวลาในการเก็บพบว่า การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ส่งผลให้ปริมาณกรด ลิโนเลอิก และ ลิโนเลนิก มีค่าลดลง ส่วนกรด โอเลอิก มีค่าสูงขึ้น

Knothe (2007) ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อเสถียรภาพของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซล โดยหนึ่งในปัจจัยสำคัญต่อเสถียรภาพของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซลนั้น คือ การสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวในไบโอดีเซล กระบวนการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดไขมัน เป็นกลไกที่มีความซับซ้อน และนอกจากการสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศแล้ว ยังพบว่า ปัจจัยอื่นที่มีผลต่อเสถียรภาพของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซล ได้แก่ อิทธิพลของแสง การเก็บในสภาวะอุณหภูมิสูง โลหะที่เจือปนในไบโอดีเซล วัสดุที่ใช้บรรจุไบโอดีเซลเปอร์ออกไซด์และสารต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งการปรับปรุงเสถียรภาพของไบโอดีเซลทำได้โดยการเติมสารต้านอนุมูลอิสระ ที่เหมาะสมลงในไบโอดีเซล

Leung *et al.* (2006) ศึกษาการเสื่อมสภาพของไบโอดีเซลภายใต้สภาวะการเก็บที่แตกต่างกัน โดยนำไบโอดีเซลที่ผลิตจากเมล็ดแรมพจำนวน 12 ตัวอย่าง มาทำการเก็บที่อุณหภูมิ 4 20 และ 40

องศาเซลเซียส โดยที่แต่ละอุณหภูมิประกอบไปด้วย 4 ตัวอย่างที่สภาวะการเก็บต่างกัน คือ การเก็บไบโอดีเซลโดยไม่ให้สัมผัสกับอากาศ การเก็บไบโอดีเซลโดยเปิดสู่บรรยากาศ การผสมน้ำ 5% ลงในไบโอดีเซลและไม่ให้สัมผัสกับอากาศ การผสมน้ำ 5% ลงในไบโอดีเซลแต่เปิดสู่บรรยากาศ จากนั้นตัวอย่างทั้งหมดจะถูกห่อด้วยอลูมิเนียมฟรอยด์เพื่อป้องกันแสง และจัดเก็บเป็นระยะเวลา 52 สัปดาห์ ผลการทดลองพบว่า ไบโอดีเซลที่เก็บที่อุณหภูมิ 4 และ 20 องศาเซลเซียส มีความบริสุทธิ์ลดลงประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ส่วนไบโอดีเซลที่เก็บที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสนั้นมีความบริสุทธิ์ลดลงประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ และยังพบว่าอุณหภูมิและอากาศเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของไบโอดีเซล โดยเมื่อทำการเก็บไบโอดีเซลที่อุณหภูมิสูงและเปิดสู่บรรยากาศพบว่า จะทำให้ไบโอดีเซลเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็ว เมื่อเทียบกับการจัดเก็บไบโอดีเซลที่อุณหภูมิสูงหรือเปิดสู่บรรยากาศเพียงอย่างเดียว และการมีน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ในไบโอดีเซลนั้นส่งผลให้ไบโอดีเซลเสื่อมสภาพได้น้อยกว่าเมื่อเทียบกับผลของอุณหภูมิและอากาศ

McCormick *et al.* (2007) ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อเสถียรภาพของไบโอดีเซลที่เก็บในปี 2004 ที่ใช้กันทั่วไปในประเทศสหรัฐอเมริกา โดยผลิตมาจากน้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันพืชใช้แล้ว และไขมันสัตว์ แล้วนำมาตามมาตรฐาน ASTM D2274 และทดสอบค่าเสถียรภาพการเกิดออกซิเดชัน ตามมาตรฐาน EN 14112 จากผลการทดลองพบว่า ในการทดสอบค่าเสถียรภาพการเกิดออกซิเดชัน การทดสอบด้วยเครื่อง Rancimat model 743 มีความเหมาะสมมากกว่า การวิเคราะห์การเกิดสารที่ไม่สามารถละลายได้ และปริมาณโลหะในไบโอดีเซลก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่คณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษา โดยพบว่า ไบโอดีเซลที่มีปริมาณโลหะ คือ ทองแดง เหล็ก และสังกะสีมากกว่า 6 พีพีเอ็ม จะมีค่าความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันต่ำ และปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวในไบโอดีเซลมีอิทธิพลมากที่สุดในการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารที่ไม่ละลาย และยังทำให้ค่าเสถียรภาพการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลลดลง อย่างไรก็ตาม ปริมาณของโพลิเมอร์หรือโพลิเมอร์จะลดลงเมื่อปริมาณของสารต้านอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้น และจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณกลีเซอริน นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระในไบโอดีเซล

Nataly *et al.* (2011) ได้ทำการศึกษาการใช้กรดคาเฟอิกเป็นสารต้านอนุมูลอิสระสำหรับไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลืองที่มีโลหะเจือปน โดยศึกษาการเติมไอออนของโลหะ 5 ชนิด ได้แก่ เหล็ก ไอออน แมงกานีส ไอออน โคบอลต์ ไอออน โครเมียม ไอออน และคอปเปอร์ ไอออน ลงไปในไบโอดีเซลที่ปริมาณความเข้มข้น 0 - 3 พีพีเอ็ม แล้วทำการวิเคราะห์ค่าเสถียรภาพการเกิด

ออกซิเดชันของไบโอดีเซล จากผลการทดลองพบว่า ค่าเสถียรภาพการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจะมีค่าคงที่เมื่อปริมาณความเข้มข้นของโลหะไอออน มีค่ามากกว่า 1 ซึ่งโลหะทั้ง 5 ชนิด ให้ผลการทดลองเช่นเดียวกัน จากนั้นทำการศึกษาการเติมสารต้านอนุมูลอิสระ Butylated hydroxytoluene (BHT) Tert-butylhydroquinone (TBHQ) และ Caffeic acid (CA) ที่ปริมาณความเข้มข้น 200-2,000 พีพีเอ็ม พบว่า การเติม CA ที่ปริมาณ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่งผลให้ค่าเสถียรภาพของไบโอดีเซลที่มีเหล็กไอออน แมงกานีสไอออน โคบอลต์ไอออน และโครเมียมไอออน มีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐาน EN 14214 คือสูงกว่า 6 ชั่วโมง โดยการเติม CA มีประสิทธิภาพดีที่สุด รองลงมา คือ TBHQ และ BHT ตามลำดับ และเมื่อทำการศึกษการสลายตัวของสารต้านอนุมูลอิสระทั้ง 3 ชนิด พบว่า CA มีอุณหภูมิการสลายตัวสูงกว่า TBHQ และ BHT ตามลำดับ ซึ่งมีอุณหภูมิการสลายตัวสูงกว่า 110 องศาเซลเซียส ซึ่งในการวิเคราะห์เสถียรภาพการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลตามมาตรฐาน EN 14112 นั้น จะใช้อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส หากสารต้านอนุมูลอิสระมีอุณหภูมิการสลายตัวต่ำกว่า 110 องศาเซลเซียส สารต้านอนุมูลอิสระอาจเปลี่ยนเป็นสารประกอบชนิดอื่นๆ

Sarin *et al.* (2009) ทำการศึกษาผลของโลหะที่เจือปนอยู่ในไบโอดีเซลต่อเสถียรภาพของการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันสบู่ดำ โดยโลหะที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ ไอออน นิกเกิล แมงกานีส โคบอลต์ และคอปเปอร์ ซึ่งได้ทำการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ แล้วแล้วทำการวิเคราะห์ค่าเสถียรภาพการเกิดออกซิเดชันด้วยเครื่อง Rancimat ตามวิธี EN14112 พบว่าไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำมีค่าเสถียรภาพการเกิดออกซิเดชัน 3.95 ชั่วโมง ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐานที่กำหนด จึงได้ทำการเติมสารต้านอนุมูลอิสระ 3 ชนิด ได้แก่ 2,6-Ditertiarybutyl hydroxytoluene (AO1), Bis-2,6-ditertiarybutyl phenol derivative (AO2), Aminic antioxidant octylated butylated diphenyl amine (AO3) ที่ความเข้มข้น 0 - 300 พีพีเอ็ม จากผลการทดลองพบว่า AO1 ให้ค่า Induction time สูงกว่ามาตรฐาน ที่ความเข้มข้น 200 พีพีเอ็ม จากนั้นจึงนำไบโอดีเซลที่เติมสารต้านอนุมูลอิสระ AO1 มาทำการเติมโลหะทั้ง 5 ชนิดลงไปที่ความเข้มข้น 2 พีพีเอ็ม จากผลการทดลองพบว่า ปริมาณของสารต้านอนุมูลอิสระ AO1 ค่าที่สุดที่ทำให้ไบโอดีเซลมีเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันสูงกว่ามาตรฐานเมื่อเติมทำการเติมโลหะทั้ง 5 ชนิดได้แก่ 500 พีพีเอ็ม เมื่อทำการเติมไอออนและนิกเกิล 700 พีพีเอ็ม เมื่อทำการเติมแมงกานีส 900 และ 1,000 พีพีเอ็ม เมื่อทำการเติมโคบอลต์และคอปเปอร์ ตามลำดับ

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัตถุดิบและสารเคมีสำหรับการผลิตไบโอดีเซล

- 1.1 น้ำมันปาล์มโอเลอิน: บริษัท สุขสมบุญรณน้ำมันพืช จำกัด, ประเทศไทย
- 1.2 น้ำมันสบู่ดำ ได้จากการหีบโดยไม่มีการทำให้บริสุทธิ์: โครงการเคยู-ไบโอดีเซล, ประเทศไทย
- 1.3 น้ำมันทานตะวัน: บริษัท มรกต อินดัสทรีส์ จำกัด, ประเทศไทย
- 1.4 เมทานอล (ความเข้มข้น 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก): Commercial grade, Zen Point, Thailand.
- 1.5 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์: Analytical grade, Ajax Fine Chem, Australia
- 1.6 น้ำกลั่น

2. สารเคมีสำหรับการวิเคราะห์ความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation stability)

- 2.1 TBHQ (T-Butyl hydroquinone): Analytical grade, Fluka, Switzerland
- 2.2 โลหะทองแดง (Copper powder) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.04 มิลลิเมตร: Analytical grade, Sigma-Aldrich, Singapore

3. สารเคมีสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์

- 3.1 เมทิลเฮปตะดิกาโนเอท (Methyl heptadecanoate): Analytical grade, Fluka, Switzerland
- 3.2 เฮปเทน (Heptane) (ความเข้มข้น 99 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก): Analytical grade, Fluka, Germany

4. สารเคมีสำหรับการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด (Acid value)

4.1 โซเดียมไฮดรอกไซด์: Analytical grade, Merck, Germany

4.2 2-โพรพานอล (ความเข้มข้น 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก): Commercial grade, Zen Point, Thailand

4.3 สารละลายฟีนอล์ฟทาลีน

4.4 น้ำกลั่น

5. สารเคมีสำหรับการวิเคราะห์ค่าไอโอดีน (Iodine value)

5.1 โซเดียมไทโอซัลเฟต: Analytical grade, APS Finechem, Australia

5.2 กรดอะซิติก (ความเข้มข้น 98 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก): Commercial grade, Zen Point, Thailand

5.3 ไอโอดีนโมโนคลอไรด์ (ความเข้มข้น 98 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก): Analytical grade, Panreac, Spain

5.4 แมกนีเซียมอะซิเตรท: Analytical grade, QReC, New Zealand

5.5 โพแทสเซียมไอโอไดด์: Analytical grade, BDH, England

5.6 น้ำกลั่น

6. อุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล

6.1 เทอร์โมมิเตอร์

6.2 ชุดเครื่องแก้ว

6.3 ชุดอุปกรณ์การกวนด้วยแท่งแม่เหล็กและให้ความร้อน: Scientific Promotion, Thailand

6.4 เครื่องต้มน้ำ: AJ IN 001 AS, AJ, Thailand

6.5 เครื่อง Homogenizer: Model T 25, IKA-Labortechnik, Germany

6.6 เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง: Mettler PG 2002-S, Mettler-toledo, Thailand

6.7 เครื่องชั่งทศนิยม 5 ตำแหน่ง: Mettler-toledo, Thailand

6.8 กระดาษลิทมัส

6.9 กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 4

6.10 นาฬิกาจับเวลา

7. อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์

7.1 เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี: model GC – 2010, Shimadzu Japan

แก๊สดำนำ: He

คอลัมน์: DB – Wax ขนาด 30 เมตร x 0.32 มิลลิเมตร

ดีเทคเตอร์: FID อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส

อินเจคเตอร์: DB – Wax อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส, split ratio 25

7.2 เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 5 ตำแหน่ง: Mettler-toledo, Thailand

7.3 เครื่องผสม (Vortex Mixer): KMC-1300V, VISION, Korea

7.4 ขวด Vial ขนาด 10 มิลลิลิตร

8. อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าความหนืด ค่าความเป็นกรด และค่าไอโอดีน

8.1 เครื่อง Viscometer: Chemoscience, Thailand

8.2 บิวเรต

8.3 เครื่อง Auto titration: Metrohm 848, Metrohm Siam, Thailand

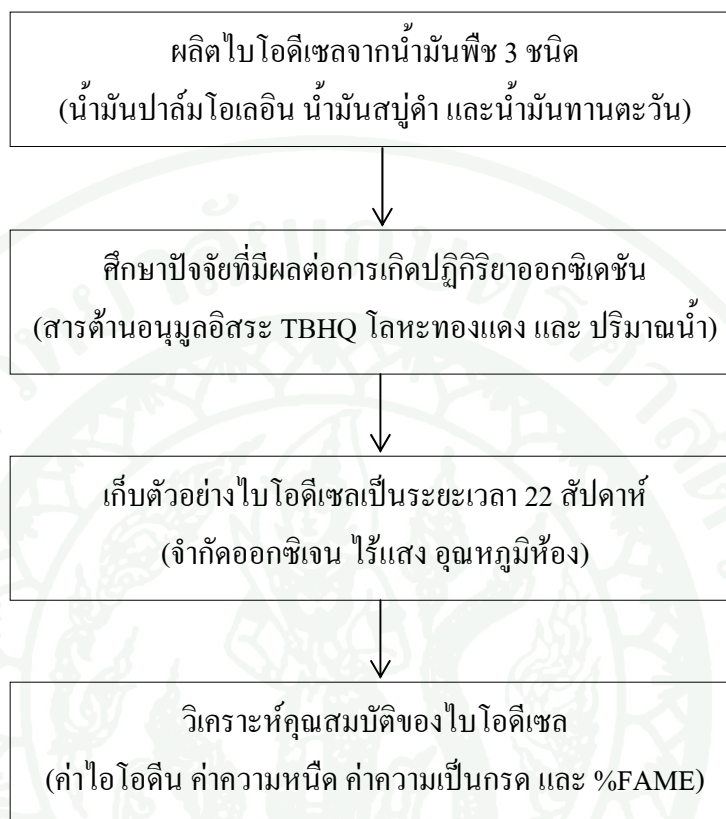
วิธีการ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมัน 3 ชนิด ได้แก่ น้ำมันปาล์ม โอเลอิน น้ำมันสบู่ดำ และ น้ำมันทานตะวัน เนื่องจาก น้ำมันทั้ง 3 ชนิดนี้ มีปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวเป็นองค์ประกอบในปริมาณที่แตกต่างกัน โดยน้ำมันปาล์ม โอเลอิน น้ำมันสบู่ดำ และ น้ำมันทานตะวัน มีองค์ประกอบของกรดไขมันไม่อิ่มตัวอยู่ในโครงสร้างโมเลกุลร้อยละ 59.98 77.64 และ 88 ตามลำดับ (Sarin *at al.*, 2007) ซึ่งปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวนี้ เป็นปัจจัยหนึ่งในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซล โดยหากไบโอดีเซลซึ่งผลิตจากน้ำมันพืชที่มีองค์ประกอบของกรดไขมันไม่อิ่มตัวอยู่ในโครงสร้างโมเลกุลในปริมาณที่สูง จะทำให้ไบโอดีเซลนั้นมีความเสถียรต่ำส่งให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดได้ง่ายกว่าน้ำมันพืชที่มีองค์ประกอบของกรดไขมันในปริมาณที่ต่ำกว่า

โดยปฏิกิริยาออกซิเดชันในไบโอดีเซล จะส่งผลให้ค่าคุณสมบัติต่างๆ ของไบโอดีเซลเปลี่ยนแปลงไป ทำให้ไบโอดีเซลมีประสิทธิภาพน้อยลงเมื่อถูกนำไปใช้งาน ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ จึงได้ศึกษาปัจจัยในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซล โดยศึกษาจากคุณสมบัติของไบโอดีเซล 4 ชนิด ได้แก่ ค่าไอโอดีน ซึ่งแสดงถึงปริมาณพันธะคู่ในไบโอดีเซล โดยเป็นคุณสมบัติหลักที่สามารถแสดงได้ว่าไบโอดีเซลเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และยังได้ศึกษาถึง ค่าความหนืด ค่าความเป็นกรด และ ปริมาณร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ เนื่องจากคุณสมบัติต่างๆ เหล่านี้ จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไป เมื่อเกิดผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซล ซึ่งได้แก่ กรดคาร์บอกซิลิก อัลดีไฮด์ และคีโตน เป็นต้น ดังนั้น คุณสมบัติที่กล่าวมานี้ จึงเป็นตัวช่วยบ่งบอกได้อีกทางหนึ่งว่าเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นในไบโอดีเซล

งานวิจัยนี้ ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อเสถียรภาพการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซล โดยได้ทำการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืช 3 ชนิด และนำไปศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน จากนั้นจึงจัดเก็บไบโอดีเซลเป็นระยะเวลานาน และทำการวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ของไบโอดีเซลตลอดระยะเวลาการจัดเก็บ โดยขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย แสดงดังภาพที่ 16

1. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย



ภาพที่ 16 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

2. การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันทานตะวัน

ให้ความร้อนน้ำมันที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เติมสารละลายผสมระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) กับเมทานอล โดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักน้ำมัน และอัตราส่วนจำนวนโมลเมทานอลต่อจำนวนโมลน้ำมันเท่ากับ 7:1 (ทัศนีย์, 2550) ซึ่งวิธีการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก จากนั้น ทำการกวนโดยใช้เครื่อง Homogenizer เป็นเวลา 45 นาที แล้วเติมเมทานอลในอัตราส่วนจำนวนโมลเมทานอลต่อจำนวนโมลน้ำมันเท่ากับ 3.5:1 และทำปฏิกิริยาต่อไปอีก 45 นาที ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาจะถูกเทลงในกรวยแยก ซึ่งผลิตภัณฑ์จะแยกเป็น 2 ชั้น ชั้นบนคือ เมทิลเอสเทอร์หรือไบโอดีเซล ส่วนชั้นล่างคือ กลีเซอรอล ทิ้งให้ไบโอดีเซลและกลีเซอรอลแยกชั้นเป็นเวลา 1 คืน จากนั้นทำการแยกกลีเซอรอลออกจากไบ

โอดีเซล แล้วล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำกลั่นเพื่อกำจัดตัวเร่งปฏิกิริยา และให้ความร้อนไบโอดีเซลที่ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 45 นาที เพื่อกำจัดน้ำ

3. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อเสถียรภาพการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน น้ำมันสบู่ดำ และ น้ำมันทานตะวัน

การศึกษหาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันชนิดต่างๆในงานวิจัยนี้ ทำการศึกษาทั้งหมด 3 ปัจจัย ได้แก่ ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ ปริมาณโลหะ และ ปริมาณน้ำ โดยสภาวะที่ใช้ในการศึกษา มีดังนี้

2.1 เติมสารต้านอนุมูลอิสระ TBHQ ในปริมาณความเข้มข้น 0, 1,000 และ 2,000 พีพีเอ็ม

2.2 เติมโลหะทองแดง ในปริมาณความเข้มข้น 0 ถึง 2 พีพีเอ็ม

2.3 เติมน้ำ ในปริมาณความเข้มข้น 0 ถึง 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมัน

จากนั้น จัดเก็บไบโอดีเซลในสภาวะจำกัดออกซิเจน และไร้แสง โดยจัดเก็บใส่ขวดสีชา ปริมาตร 80 มิลลิลิตร และหุ้มด้วยกระดาษฟลอยด์ เก็บในตู้ทึบแสง ที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 22 สัปดาห์ และทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอดีเซล

4. การวิเคราะห์หาค่าไอโอดีน

ในการวิเคราะห์หาค่าไอโอดีนของไบโอดีเซลทำได้โดยการชั่งน้ำหนักตัวอย่างไบโอดีเซลที่ต้องการทดสอบจำนวน 1 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ เติมกรดอะซิติกลงไปปริมาตร 20 มิลลิลิตร กวนให้เข้ากัน เติมสารละลายไอโอดีนโมโนคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตรในกรดอะซิติก ลงไปในปริมาตร 25 มิลลิลิตร และเติมสารละลายแมกนีเซียมอะซิเตรทความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในกรดอะซิติก ลงไปในปริมาตร 10 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปเก็บไว้ในที่มืดเป็นเวลา 5 นาที แล้วจึงนำมาเติมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ลงไปในปริมาตร 15 มิลลิลิตร แล้วนำไปไตเตรทกับสารละลายไทโอซัลเฟตที่ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ด้วยเครื่องไตเตรทอัตโนมัติ

5. การวิเคราะห์หาค่าความหนืด

ในการวิเคราะห์หาค่าความหนืดนั้นจะทำการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส โดยนำตัวอย่างของไบโอดีเซลประมาณ 6.4 มิลลิลิตร เทลงไปหลอดวัดความหนืด แล้วจึงนำไปใส่ในเครื่อง Viscometer รอจนกระทั่งอุณหภูมิคงที่เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นใช้ลูกยางดูดตัวอย่างไบโอดีเซลจากหลอดวัดความหนืดให้ขึ้นมาอยู่เหนือขีดบนของหลอด ทำการจับเวลาเมื่อตัวอย่างไบโอดีเซลไหลลงมาจากขีดบนจนถึงขีดล่างของหลอดวัดความหนืด บันทึกเวลาที่ใช้

6. การวิเคราะห์หาค่าความเป็นกรด

การวิเคราะห์หาค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลทำได้โดยชั่งน้ำหนักตัวอย่างไบโอดีเซลที่ต้องการทดสอบจำนวน 3 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ เติม 2-โพรพานอลปริมาตร 30 มิลลิลิตรลงไปในตัวอย่าง หยดสารละลายฟีนอล์ฟทาไลน์จำนวน 2-3 หยด นำสารละลายที่ได้มาไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ จนสารละลายเปลี่ยนเป็นสีชมพูจาง ๆ คงที่ประมาณ 30 วินาที จึงถือเป็นจุดยุติ ทำการบันทึกปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เพื่อนำไปคำนวณหาค่าความเป็นกรด ซึ่งวิธีการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข

7. การวิเคราะห์หาปริมาณเมทิลเอสเทอร์โดยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี

ในการวิเคราะห์หาปริมาณเมทิลเอสเทอร์นั้น จะทำการชั่งตัวอย่างไบโอดีเซลจำนวน 50 - 60 มิลลิกรัม ใส่ลงในขวด Vial ขนาด 10 มิลลิลิตร และเติมสารละลายเมทิลเฮปตะดีคาโนเอทในปริมาณความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ลงไปในปริมาตร 1 มิลลิลิตร นำไปเขย่าให้ด้วยเครื่อง Vortex mixer หลังจากนั้นจึงนำไปวิเคราะห์หาปริมาณเมทิลเอสเทอร์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี โดยวิธีการคำนวณหาปริมาณเมทิลเอสเทอร์แสดงในภาคผนวก ค

ผลและวิจารณ์

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อเสถียรภาพการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันพืช 3 ชนิดที่มีองค์ประกอบของกรดไขมันต่างกัน ได้แก่ น้ำมันปาล์มโอเลอิน น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันทานตะวัน โดยได้ศึกษาการเติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 0-2 พีพีเอ็ม เติมน้ำในปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0-1 และเติมสารต้านอนุมูลอิสระ TBHQ ในปริมาณความเข้มข้น 0-2,000 พีพีเอ็ม โดยนำหนักของน้ำมัน ลงในไบโอดีเซล และจัดเก็บไบโอดีเซลที่สภาวะจำกัดออกซิเจน และไร้แสง ที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 22 สัปดาห์ โดยในแต่ละสัปดาห์จะทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอดีเซล ซึ่งได้แก่ ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ ค่าไอโอดีน ค่าความหนืด และค่าความเป็นกรด

1. การศึกษาผลของโลหะทองแดงที่มีต่อคุณสมบัติของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน น้ำมันสบู่ดำ และ น้ำมันทานตะวัน

โลหะที่เจือปนอยู่ในไบโอดีเซล ซึ่งได้แก่ ทองแดง เหล็ก และโคบอลต์ เป็นต้น เป็นโลหะที่เป็นองค์ประกอบในภาชนะที่ใช้ในการบรรจุไบโอดีเซล ซึ่งโลหะเหล่านี้เป็นปัจจัยหนึ่งในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เนื่องจากปริมาณโลหะในไบโอดีเซล จะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันให้เกิดเร็วขึ้น จากงานวิจัยของ Sarin *et al.* (2009) ซึ่งศึกษาอิทธิพลของโลหะที่เจือปนอยู่ในไบโอดีเซลต่อเสถียรภาพการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ โดยได้ศึกษาการเติมปริมาณโลหะ 5 ชนิด ได้แก่ เหล็ก นิกเกิล แมลกาไนส โคบอลต์ และทองแดง ในปริมาณความเข้มข้น 0-3 พีพีเอ็ม พบว่า การเติมโลหะทองแดงลงไปไบโอดีเซล มีผลมากที่สุดต่อการลดลงของค่าเสถียรภาพการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซล และยังพบว่า การเติมโลหะทั้ง 5 ชนิด ในปริมาณความเข้มข้นมากกว่า 2 พีพีเอ็ม ไม่ส่งผลต่อการลดลงของค่าเสถียรภาพการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซล ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงได้เลือกโลหะทองแดง มาเป็นปัจจัยในการศึกษา โดยทำการเติมโลหะทองแดงลงในไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันทานตะวัน ในปริมาณความเข้มข้น 0-2 พีพีเอ็ม เพื่อศึกษาหาผลของปริมาณโลหะทองแดงที่มีต่อเสถียรภาพการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชดังกล่าว

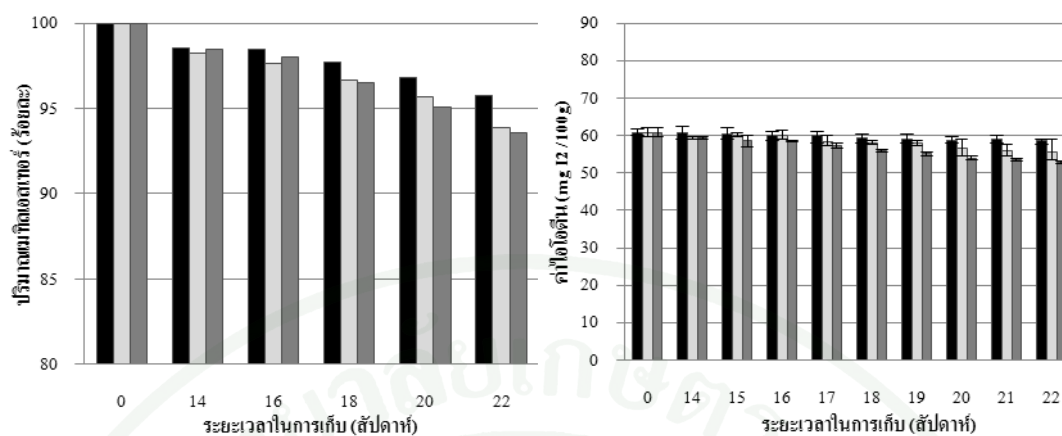
เมื่อพิจารณาถึงผลของโลหะทองแดงที่มีต่อคุณสมบัติของไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชทั้ง 3 ชนิด แสดงดังภาพที่ 17 18 และ 19 พบว่า การเติมโลหะทองแดงลงไป ในปริมาณความเข้มข้น 0 1

และ 2 พีพีเอ็ม ส่งผลให้ค่าคุณสมบัติต่างๆ ของไบโอดีเซลจากน้ำมันทั้ง 3 ชนิด มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ ปริมาณเมทิลเอสเทอร์และค่าไอโอดีนมีค่าลดลง แต่ค่าความหนืดและค่าความเป็นกรดมีค่าเพิ่มขึ้น ตามปริมาณความเข้มข้นของโลหะทองแดง โดยที่ปริมาณความเข้มข้นของโลหะทองแดงเท่ากับ 2 พีพีเอ็ม ส่งผลให้ค่าคุณสมบัติของไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชชนิดต่างๆ มีค่าเปลี่ยนแปลงไปมากที่สุด และยังพบว่า หลังจากจัดเก็บเป็นระยะเวลา 22 สัปดาห์ โดยเติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 0 1 และ 2 พีพีเอ็ม ทำให้คุณสมบัติของไบโอดีเซลยังคงมีค่าเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด ยกเว้นปริมาณเมทิลเอสเทอร์ซึ่งมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ให้มีค่าไม่ต่ำกว่า ร้อยละ 96.5 โดยพบว่า ปริมาณความเข้มข้นของโลหะทองแดงที่ 2 พีพีเอ็มทำให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ลดลงมากที่สุด ซึ่งไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันทานตะวัน มีค่าปริมาณเมทิลเอสเทอร์ลดลงจากร้อยละ 100 98.44 และ 96.55 ในตอนเริ่มต้น เป็น 93.61 91.07 และ 89.00 ในสัปดาห์สุดท้าย ตามลำดับ จากผลการทดลองนี้ได้แสดงว่าปริมาณโลหะทองแดงที่เติมลงไปไบโอดีเซลนั้น ส่งผลต่อการลดลงของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ และเมื่อพิจารณาถึงค่าไอโอดีนของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน น้ำมันสบู่ดำ และ น้ำมันทานตะวัน ที่เติมโลหะทองแดงในปริมาณ 2 พีพีเอ็ม พบว่า มีค่าไอโอดีนลดลงจาก 60.85 70.89 และ 83.13 ในตอนเริ่มต้น เป็น 52.77 56.40 และ 61.01 mg I₂/100 g ในสัปดาห์สุดท้าย ตามลำดับการทดลองที่ได้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bryan (2011) ซึ่งศึกษาผลของระยะเวลาในการเก็บที่มีต่อคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันคาโนรา น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันทานตะวัน พบว่า ค่าไอโอดีนของน้ำมันปาล์มและน้ำมันทานตะวันที่เก็บที่อุณหภูมิห้อง มีค่าลดลงจาก 52 เป็น 51 และ 85 เป็น 84 กรัมไอโอดีนต่อ 100 กรัม ตามลำดับ ดังนั้นการเติมโลหะทองแดงจึงมีผลต่อการลดลงของค่าไอโอดีน ทั้งนี้ เนื่องจากโลหะทองแดงช่วยเร่งสารอนุมูลอิสระในปฏิกิริยาออกซิเดชันให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น Sarin *et al.* (2009) จึงทำให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์และค่าไอโอดีนมีค่าลดลง

เมื่อพิจารณาถึงค่าความหนืดและค่าความเป็นกรด พบว่า การเติมโลหะทองแดงลงไปไบโอดีเซล มีผลให้ค่าความหนืดและค่าความเป็นกรดเพิ่มมากขึ้น โดยจะเพิ่มตามปริมาณความเข้มข้นของโลหะทองแดง โดยค่าความหนืดและค่าความเป็นกรดมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก เมื่อพิจารณาที่ปริมาณความเข้มข้นของโลหะทองแดงที่ 2 พีพีเอ็ม พบว่า ค่าความหนืดของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันทานตะวัน มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 4.194 4.405 และ 4.748 ในตอนเริ่มต้น เป็น 4.986 4.746 และ 5.046 เซ็นติสโตกส์ ในสัปดาห์สุดท้าย ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bondioli *et al.* (2003) ที่ศึกษาเสถียรภาพของไบโอดีเซลที่มีจำหน่ายในทวีปยุโรปโดย

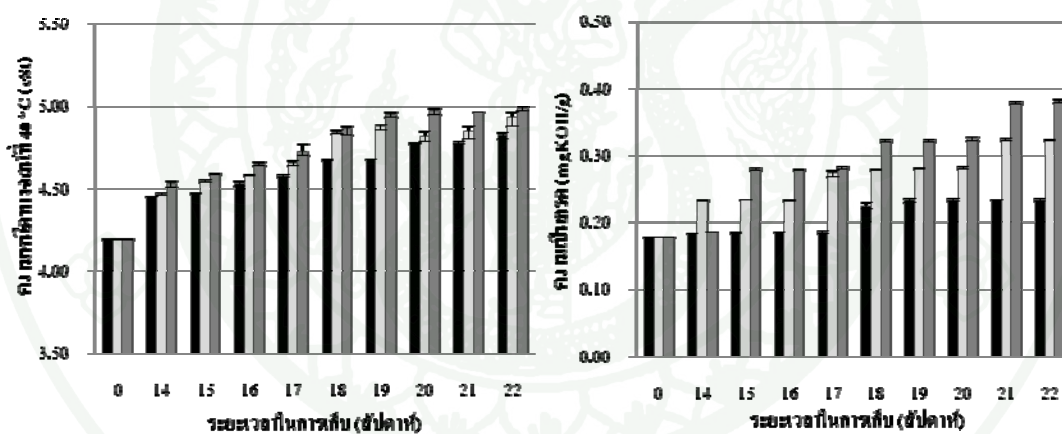
นำมาจัดเก็บเป็นระยะเวลา 1 ปี พบว่า ค่าความหนืดของไบโอดีเซลจากน้ำมันทานตะวันกลั่น มีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อจัดเก็บเป็นระยะเวลา 1 ปี และค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลจมน้ำมันปาล์มโอเลอิน น้ำมันสบูดำ และน้ำมันทานตะวัน มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.178 0.279 และ 0.234 ในตอนเริ่มต้น เป็น 0.381 0.415 และ 0.419 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม ตามลำดับ จากงานวิจัยของ Moser (2011) ซึ่งศึกษาผลของระยะเวลาในการเก็บที่มีต่อคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของเมทิลเอสเตอร์จากน้ำมันคาโนรา ปาล์ม ถั่วเหลือง และน้ำมันทานตะวัน พบว่า ค่าความหนืดและค่าความเป็นกรด ของน้ำมันปาล์มและน้ำมันทานตะวัน มีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเช่นเดียวกัน โดยการเพิ่มขึ้นของค่าความเป็นกรดเป็นผลมาจากสารประกอบจำพวกกรดที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน และค่าความหนืดที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการสารประกอบพอลิเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลสูงซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซล (Jain and Sharma, 2010) แต่เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซลเกิดผลิตภัณฑ์ได้หลายชนิด ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นอาจจะเกิดสารประกอบประเภทอื่นที่ไม่ส่งผลต่อค่าความหนืดและค่าความเป็นกรด จึงทำให้มีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่เมื่อพิจารณาค่าความหนืดของน้ำมันทานตะวันที่เติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 2 พีพีเอ็ม เป็นระยะเวลา 19 สัปดาห์ พบว่า มีค่าความหนืดสูงกว่าค่ามาตรฐาน คือ 5.027 เซนติสโตกส์ ซึ่งอาจเกิดจากการที่น้ำมันทานตะวันมีค่าความหนืดในตอนเริ่มต้นสูงกว่าน้ำมันชนิดอื่นๆ และมีองค์ประกอบของปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูงกว่าน้ำมันชนิดอื่นๆ

นอกจากนี้ ยังพบว่า การลดลงของค่าไอโอดีนและการเพิ่มขึ้นของค่าความหนืดของน้ำมันสบูดำและน้ำมันทานตะวัน มีแนวโน้มเป็นไปในลักษณะเดียวกัน ซึ่งเนื่องจาก ในน้ำมันทั้ง 2 ชนิดนี้ มีองค์ประกอบของกรดไขมันไม่อิ่มตัวในปริมาณสูงเมื่อเทียบกับน้ำมันปาล์มโอเลอิน และในการเกิดกรดคาร์บอกซิลิก ซึ่งเป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน อาจเกิดตรงบริเวณพันธะคู่ ซึ่งทำให้การลดลงของค่าไอโอดีน มีความสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของค่าความเป็นกรด



(ก)

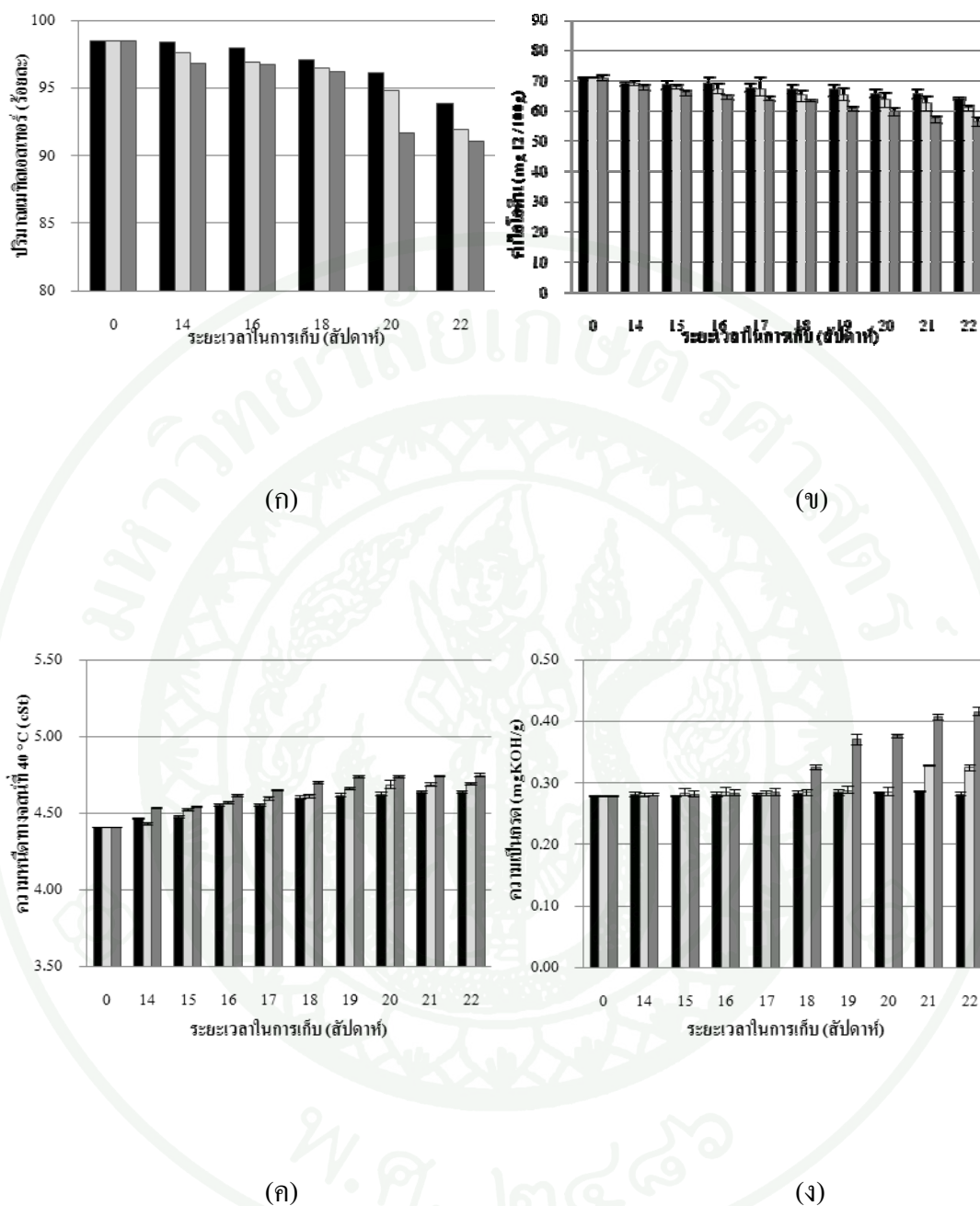
(ข)



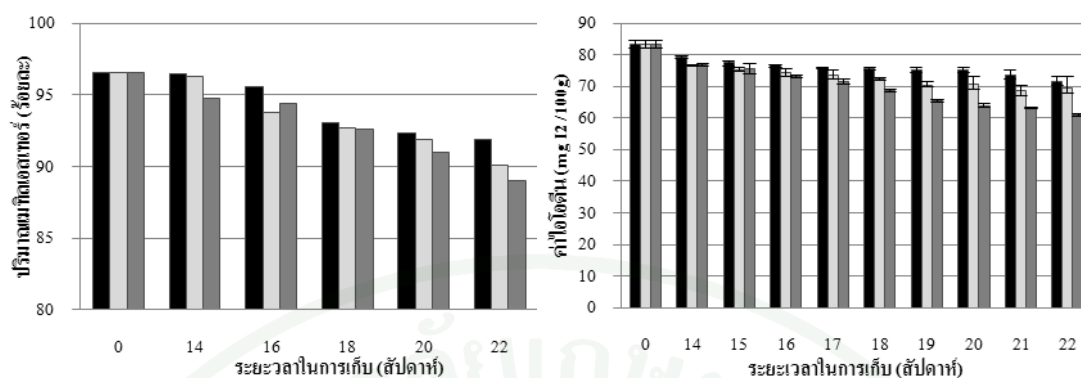
(ค)

(ง)

ภาพที่ 17 ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (ก) ค่าไอโอดีน (ข) ค่าความหนืด (ค) และ ค่าความเป็นกรด (ง) ของน้ำมันปาล์มโอเลอิน โดยเติมโลหะทองแดงที่ปริมาณความเข้มข้น 0-2 พีพีเอ็ม (■ Cu = 0 พีพีเอ็ม, □ Cu = 1 พีพีเอ็ม, ▒ Cu = 2 พีพีเอ็ม)

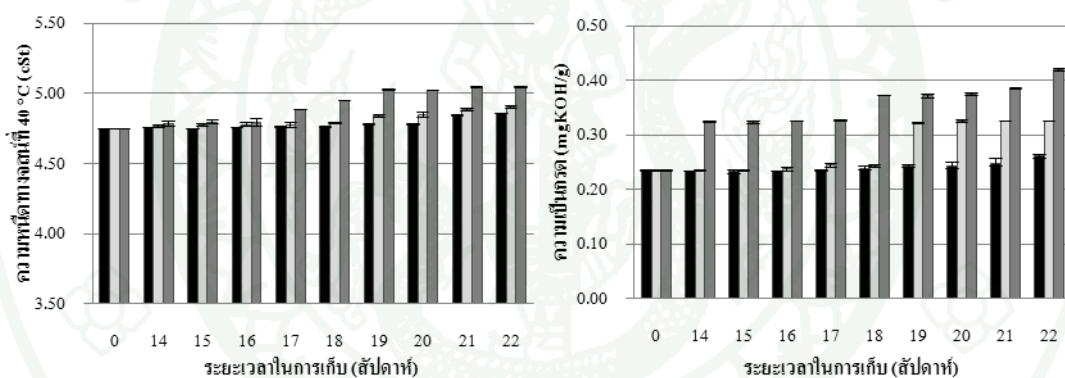


ภาพที่ 18 ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (ก) ค่าไอโอดีน (ข) ค่าความหนืด (ค) และ ค่าความเป็นกรด (ง) ของน้ำมันสบูดำ โดยเติมโลหะทองแดงที่ปริมาณความเข้มข้น 0-2 พีพีเอ็ม (■ Cu = 0 พีพีเอ็ม, □ Cu = 1 พีพีเอ็ม, ▒ Cu = 2 พีพีเอ็ม)



(ก)

(ข)



(ค)

(ง)

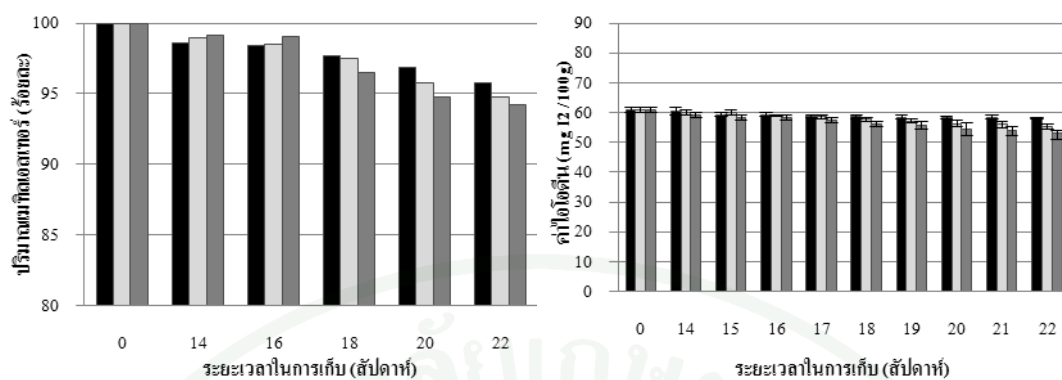
ภาพที่ 19 ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (ก) ค่าไอโอดีน (ข) ค่าความหนืด (ค) และ ค่าความเป็นกรด (ง) ของน้ำมันทานตะวัน โดยเติมโลหะทองแดงที่ปริมาณความเข้มข้น 0-2 พีพีเอ็ม (■ Cu = 0 พีพีเอ็ม, □ Cu = 1 พีพีเอ็ม, ▒ Cu = 2 พีพีเอ็ม)

2. การศึกษาผลของปริมาณน้ำที่มีต่อคุณสมบัติของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน น้ำมันสนูปดำ และน้ำมันทานตะวัน

ปริมาณน้ำที่เจือปนอยู่ในไบโอดีเซล นอกจากจะส่งต่อการเจริญเติบโตจุลินทรีย์แล้ว ยังส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้เช่นกัน โดยหากมีปริมาณน้ำอยู่ในไบโอดีเซลจะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้เร็วขึ้น เนื่องจากมีน้ำเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้ ปริมาณน้ำยังส่งผลให้ความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลมีค่าลดลงอีกด้วย จากงานวิจัยของ Leung *et al.* (2006) ซึ่งศึกษาการเสื่อมสภาพของไบโอดีเซลภายใต้สภาวะการเก็บที่ต่างกัน โดยศึกษาการเติมน้ำ 5% โดยน้ำหนักลงไปไบโอดีเซลที่ผลิตจากเมล็ดแร่ พบว่า ความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซล มีค่าลดลงจาก 99.7% ในสัปดาห์แรก เป็น 92.5 % ในสัปดาห์ที่ 52 ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และค่าความเป็นกรดมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.15 เป็น 0.93 mg KOH/g ดังนั้น ปริมาณน้ำที่เจือปนอยู่ในไบโอดีเซลจึงน่าจะเป็นปัจจัยหนึ่งในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงได้เลือกปริมาณน้ำมาเป็นปัจจัยในการศึกษา โดยจะเพิ่มในปริมาณความเข้มข้น 0-1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

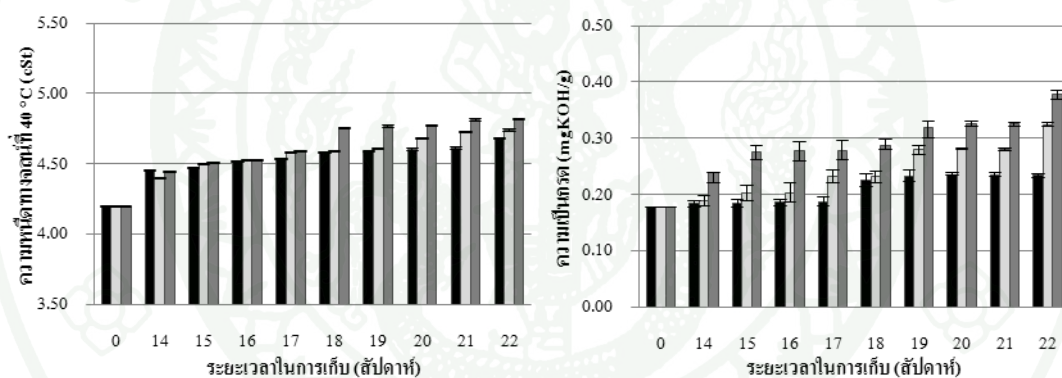
เมื่อพิจารณาถึงผลของปริมาณน้ำที่มีต่อคุณสมบัติของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน น้ำมันสนูปดำ และน้ำมันทานตะวัน แสดงดังภาพที่ 20 21 และ 22 พบว่า การเติมน้ำลงไปไบโอดีเซลนั้นส่งผลให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์และค่าไอโอดีนมีค่าลดลงตามความเข้มข้นของปริมาณน้ำที่เติม โดยหากทำการเติมน้ำปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของน้ำมัน จะส่งผลให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์และค่าไอโอดีนมีค่าลดลงมากกว่าไบโอดีเซลที่เติมน้ำในปริมาณความเข้มข้น 0.05 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และไบโอดีเซลที่ไม่เติมน้ำ โดยหากพิจารณาปริมาณเมทิลเอสเทอร์ของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน น้ำมันสนูปดำ และน้ำมันทานตะวัน ที่เติมน้ำในปริมาณร้อยละ 1 พบว่า มีปริมาณเมทิลเอสเทอร์ลดลงจากร้อยละ 100 98.44 และ 96.55 ในตอนเริ่มต้น เป็น 94.21 92.5 และ 90.2 ในสัปดาห์สุดท้าย ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Leung *et al.* (2006) ที่ทำการเติมน้ำลงไปแล้วพบว่า ความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์มีปริมาณลดลง และค่าไอโอดีนของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน น้ำมันสนูปดำ และ น้ำมันทานตะวัน ที่เติมน้ำในปริมาณร้อยละ 1 พบว่า มีค่าไอโอดีนลดลงจาก 60.85 70.89 และ 83.13 ในตอนเริ่มต้น เป็น 52.99 58.32 และ 62.77 mg I₂/100 g ในสัปดาห์สุดท้าย ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาถึงค่าความหนืดและค่าความเป็นกรด พบว่า การเติมน้ำลงไปไบโอดีเซล มีผลให้ค่าความหนืดและค่าความเป็นกรดเพิ่มมากขึ้น โดยจะเพิ่มตามปริมาณความเข้มข้นของน้ำ โดยค่าความหนืดมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 4.194 4.405 และ 4.748 ในตอนเริ่มต้น เป็น 4.818 4.918 และ 4.908 เซนติสโตกส์ ในสัปดาห์สุดท้าย ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bondioli *et al.* (2003) ที่ศึกษาเสถียรภาพของไบโอดีเซลภายใต้สภาวะการจัดเก็บแบบการค้ำเป็นระยะเวลา 1 ปี พบว่า ค่าความหนืดของไบโอดีเซลจากน้ำมันทานตะวันกลั่น มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อจัดเก็บเป็นระยะเวลา 1 ปี และค่าความเป็นกรดมีค่าเพิ่มมากขึ้นจาก 0.178 0.279 และ 0.234 ในตอนเริ่มต้น เป็น 0.378 0.396 และ 0.468 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม ในสัปดาห์สุดท้าย ตามลำดับ จากงานวิจัยของ Bryan (2011) ซึ่งศึกษาผลของระยะเวลาในการเก็บที่มีต่อคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันคาโนรา ปาล์ม ถั่วเหลือง และน้ำมันทานตะวัน พบว่า ค่าความหนืดและค่าความเป็นกรด ของน้ำมันปาล์มและน้ำมันทานตะวัน มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะการเติมน้ำลงไปไบโอดีเซล อาจมีส่วนช่วยให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน จึงทำให้ค่าคุณสมบัติต่างๆของไบโอดีเซลมีค่าเปลี่ยนแปลงไป แต่เนื่องจากในการเติมน้ำลงไปปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0.05 และ 1 นั้น อาจจะเป็นการเติมในปริมาณที่น้อยเกินไป จึงทำให้ค่าคุณสมบัติต่างๆเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับไบโอดีเซลที่ไม่มีการเติมน้ำ โดยการเติมน้ำลงไปก่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งจะทำให้ปริมาณกรดไขมันเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้ค่าความเป็นกรดเพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส มีผลเพียงเล็กน้อยต่อค่าความเป็นกรด จึงทำให้ค่าความเป็นกรดเพิ่มขึ้นไม่มากนักเมื่อเทียบกับปัจจัยอื่นๆ (Leung *et al.*, 2006)



(ก)

(ข)

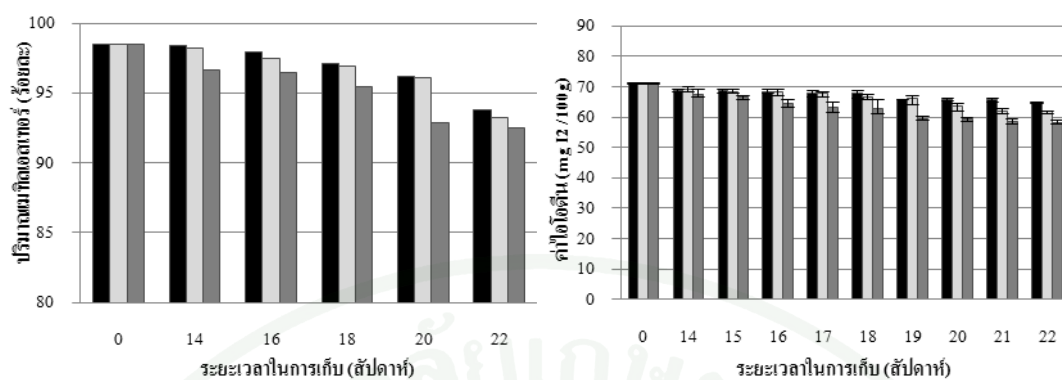


(ค)

(ง)

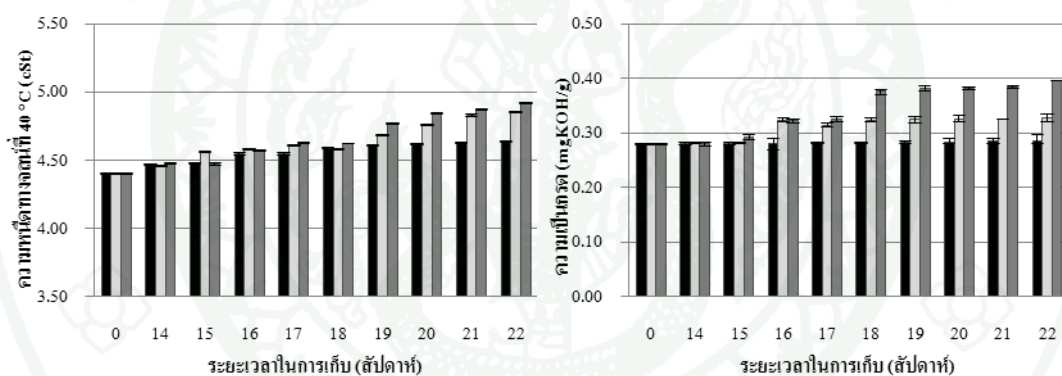
ภาพที่ 20 ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (ก) ค่าไอโอดีน (ข) ค่าความหนืด (ค) และ ค่าความเป็นกรด (ง) ของน้ำมันปาล์มโอเลอิน โดยเติมน้ำที่ปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0-1

(■ water = 0.020%, □ water = 0.05%, ▒ water = 1%)



(ก)

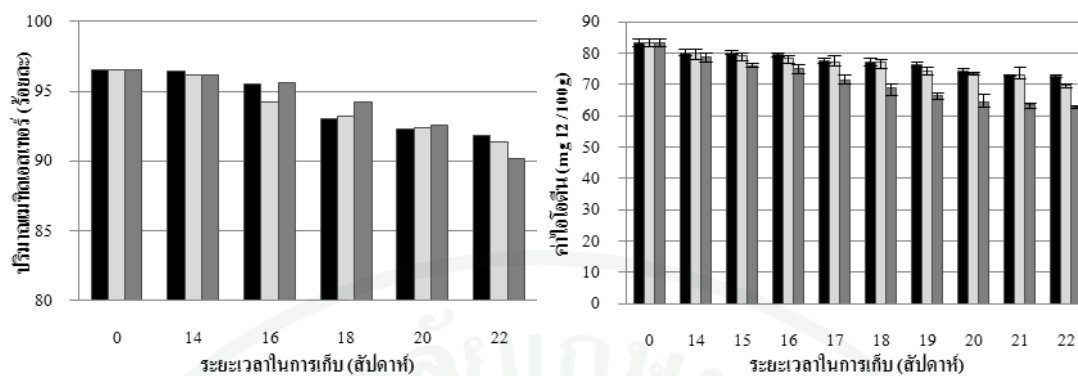
(ข)



(ค)

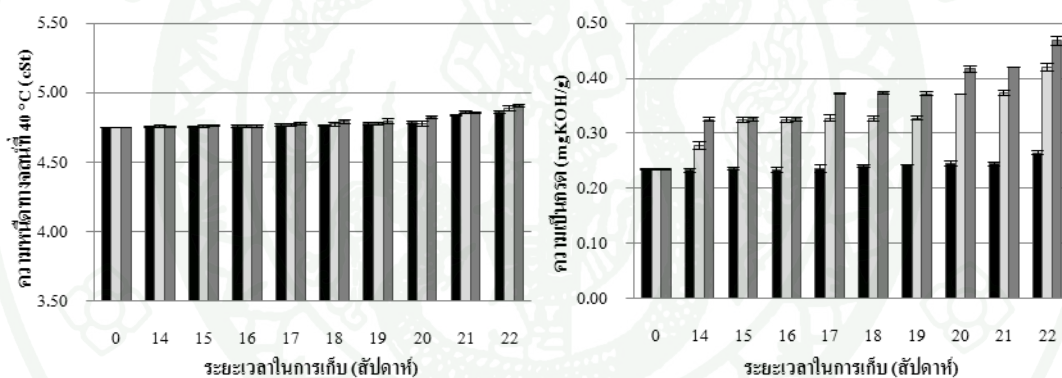
(ง)

ภาพที่ 21 ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (ก) ค่าไอโอดีน (ข) ค่าความหนืด (ค) และ ค่าความเป็นกรด (ง) ของน้ำมันสบูดำ โดยเติมน้ำที่ปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0-1
(■ water = 0.025%, □ water = 0.05%, ▒ water = 1%)



(ก)

(ข)



(ค)

(ง)

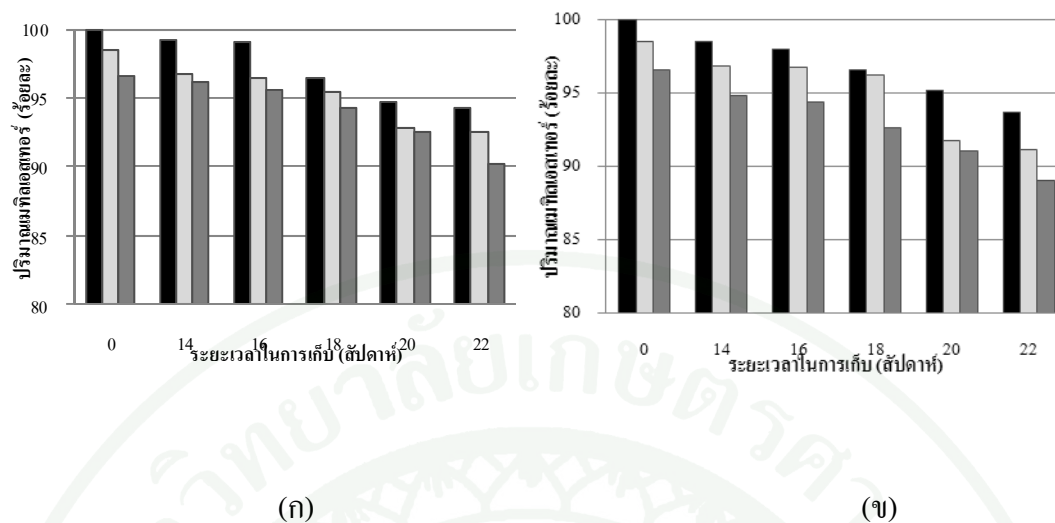
ภาพที่ 22 ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (ก) ค่าไอโอดีน (ข) ค่าความหนืด (ค) และ ค่าความเป็นกรด (ง) ของน้ำมันทานตะวัน โดยเติมน้ำที่ปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0-1

(■ water = 0.033%, □ water = 0.05%, ▒ water = 1%)

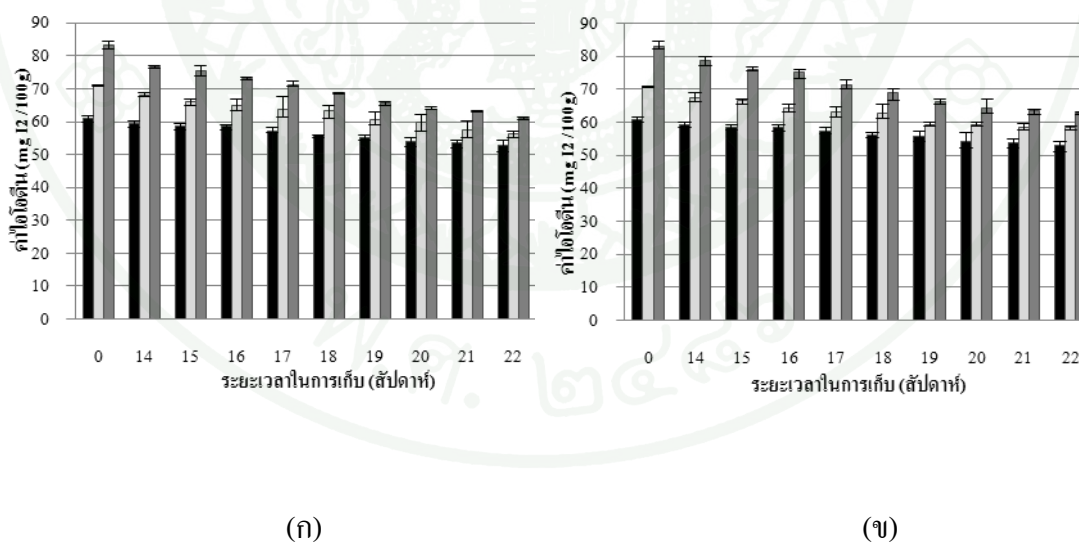
3. การศึกษาผลของปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันปาล์มโอเลอิน น้ำมันสบูดำ และน้ำมันทานตะวัน ที่มีต่อคุณสมบัติของไบโอดีเซล

ปริมาณของกรดไขมันไม่อิ่มซึ่งเป็นองค์ประกอบในน้ำมันพืชชนิดต่างๆ เป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซล เนื่องจากกรดไขมันไม่อิ่มตัวนี้มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ และมีความเสถียรต่ำ จึงทำให้เกิดเป็นสารอนุมูลอิสระได้ง่าย โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกน้ำมัน 3 ชนิด ซึ่งมีปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มที่แตกต่างกัน ดังนี้ น้ำมันปาล์มโอเลอิน น้ำมันสบูดำ และ น้ำมันทานตะวัน ซึ่งมีปริมาณของกรดไขมันไม่อิ่มตัวทั้งหมด 59.98 77.64 และ 88 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (Sarin *et al.*, 2007)

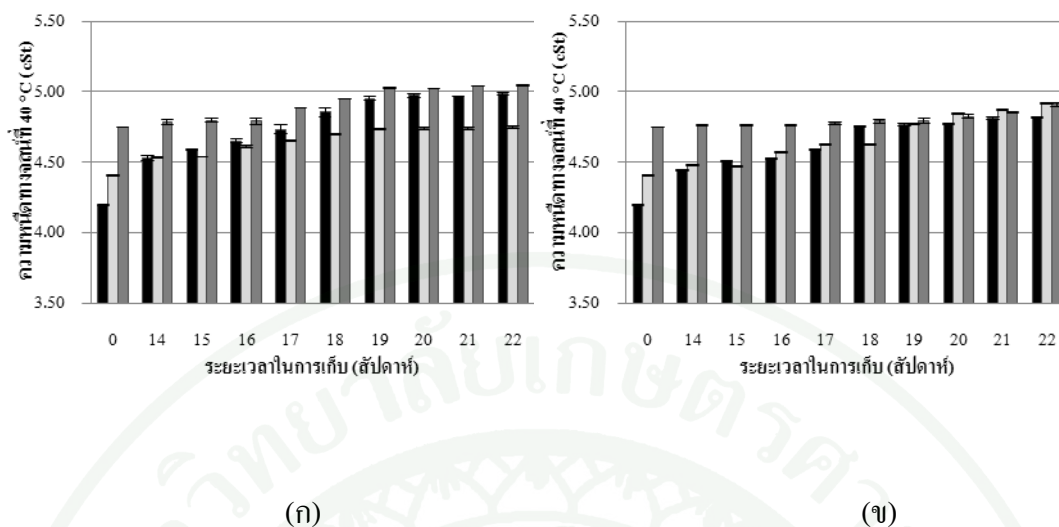
จากผลการทดลองที่ผ่านมาพบว่า การเติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 2 พีพีเอ็ม และการเติมน้ำในปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 1 มีผลให้คุณสมบัติของไบโอดีเซลเปลี่ยนแปลงมากที่สุด ดังนั้น ในการศึกษาผลของปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่แตกต่างกันในไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชชนิดต่างๆ จึงได้เลือกสภาวะทั้งสองมาทำการศึกษาต่อ ซึ่งผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 23-26 เมื่อพิจารณาถึงคุณสมบัติของไบโอดีเซล พบว่า ปริมาณเมทิลเอสเทอร์และค่าไอโอดีนมีค่าลดลง ส่วนค่าความหนืดและค่าความเป็นกรดมีค่าเพิ่มขึ้น โดยพบว่าไบโอดีเซลจากน้ำมันทานตะวันมีการลดลงของเมทิลเอสเทอร์และค่าไอโอดีนมากที่สุด โดยมีร้อยละของการลดลงเป็น 7.82 และ 26.613 สำหรับการเติมโลหะทองแดง 2 พีพีเอ็ม 6.58 และ 24.488 สำหรับการเติมน้ำร้อยละ 1 ตามลำดับ รองลงมา คือ น้ำมันสบูดำ และน้ำมันปาล์มโอเลอิน โดยมีร้อยละของการลดลงเป็น 7.49 6.39 และ 20.436 13.273 สำหรับการเติมโลหะทองแดง 2 พีพีเอ็ม 6.03 5.79 และ 17.728 12.906 สำหรับการเติมน้ำร้อยละ 1 ตามลำดับ ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอินค่าความหนืดเพิ่มขึ้นมากที่สุด รองลงมาคือ น้ำมันสบูดำและน้ำมันทานตะวัน ตามลำดับ และไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอินมีค่าความเป็นกรดเพิ่มขึ้นมากที่สุด รองลงมา คือ น้ำมันทานตะวัน และน้ำมันสบูดำ ตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติของไบโอดีเซลขึ้นอยู่กับปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมัน ซึ่งผลที่ได้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Jain and Sharma (2011) ที่ศึกษาเสถียรภาพของการจัดเก็บไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำเป็นระยะเวลานาน พบว่า ปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันสบูดำ ซึ่งได้แก่ กรดโอเลอิก กรดลิโนเลอิก และ กรดลิโนเลนิก โดยการเติมโลหะลงไปส่งผลให้ปริมาณกรดโอเลอิกมีค่าเพิ่มขึ้น และกรดลิโนเลอิกและลิโนเลนิก มีค่าลดลง



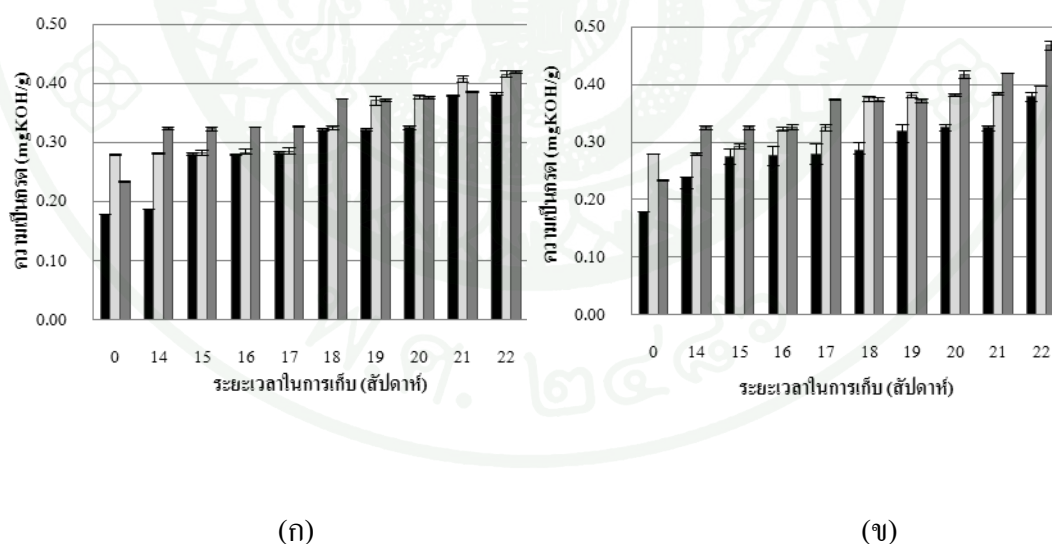
ภาพที่ 23 ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ของไบโอดีเซลจากน้ำมันชนิดต่างๆ ที่เติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 2 พีพีเอ็ม (ก) และ เติมน้ำในปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 1 (ข)
(■ น้ำมันปาล์มโอเลอิน, □ น้ำมันสับดูดำ, ■ น้ำมันทานตะวัน)



ภาพที่ 24 ค่าไอโอดีนของไบโอดีเซลจากน้ำมันชนิดต่างๆ ที่เติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 2 พีพีเอ็ม (ก) และ เติมน้ำในปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 1 (ข)
(■ น้ำมันปาล์มโอเลอิน, □ น้ำมันสับดูดำ, ■ น้ำมันทานตะวัน)



ภาพที่ 25 ค่าความหนืดของไบโอดีเซลจากน้ำมันชนิดต่างๆ ที่เติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 2 พีพีเอ็ม (ก) และ เติมน้ำในปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 1 (ข)
(■ น้ำมันปาล์มโอเลอิน, □ น้ำมันสับดูดำ, ▒ น้ำมันทานตะวัน)



ภาพที่ 26 ค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลจากน้ำมันชนิดต่างๆ ที่เติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 2 พีพีเอ็ม (ก) และ เติมน้ำในปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 1 (ข)
(■ น้ำมันปาล์มโอเลอิน, □ น้ำมันสับดูดำ, ▒ น้ำมันทานตะวัน)

จากผลการทดลองที่ผ่านมา พบว่า ค่าคุณสมบัติต่างๆ ของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน น้ำมันทานตะวัน และน้ำมันสบู่ดำ มีค่าเปลี่ยนแปลงมากที่สุด เมื่อเติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 2 พีพีเอ็ม และเติมน้ำในปริมาณร้อยละ 1 ซึ่งหากพิจารณาที่คุณสมบัติที่ทำการวิเคราะห์นั้น จะพบว่า ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ เป็นคุณสมบัติเดียว ที่ทำให้ไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันทั้ง 3 ชนิด มีค่าไม่เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด เมื่อจัดเก็บไปเป็นระยะเวลานาน แสดงดังตารางที่ 7 โดยหากพิจารณาที่น้ำมันปาล์มโอเลอิน พบว่า เมื่อไม่ได้เติมโลหะทองแดงหรือน้ำลงไป ในไบโอดีเซล ค่าปริมาณเมทิลเอสเทอร์จะมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานที่กำหนด คือ ร้อยละ 96.5 ในสัปดาห์ที่ 22 ซึ่งมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 95.76 และเมื่อทำการเติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 2 พีพีเอ็ม และ น้ำ ร้อยละ 1 พบว่า มีปริมาณเมทิลเอสเทอร์ต่ำกว่ามาตรฐานในสัปดาห์ที่ 20 ซึ่งมีค่า 95.10 และ 94.73 ซึ่งหมายความว่า การเติมน้ำลงในไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอินมีผลทำให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ลดลงมากกว่าการเติมโลหะทองแดง เมื่อพิจารณาที่น้ำมันสบู่ดำ พบว่า เมื่อไม่ได้เติมโลหะทองแดงหรือน้ำลงในไบโอดีเซล ค่าปริมาณเมทิลเอสเทอร์จะมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานที่กำหนด คือ ร้อยละ 96.5 ในสัปดาห์ที่ 20 ซึ่งมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 96.16 และเมื่อทำการเติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 2 พีพีเอ็ม และ น้ำ ร้อยละ 1 พบว่า มีปริมาณเมทิลเอสเทอร์ต่ำกว่ามาตรฐานในสัปดาห์ที่ 18 และ 16 ซึ่งมีค่า 96.22 และ 96.43 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาที่น้ำมันทานตะวัน พบว่า ปริมาณเมทิลเอสเทอร์จะมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานที่กำหนด ในสัปดาห์ที่ 14 ซึ่งมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 96.42 94.78 96.20 เมื่อไม่เติมโลหะทองแดงและน้ำ เมื่อเติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 2 พีพีเอ็ม และ เมื่อเติมน้ำในปริมาณความเข้มข้น ร้อยละ 1 ตามลำดับ ซึ่งการเติมโลหะทองแดงลงไปในไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและน้ำมันทานตะวัน จะส่งผลให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์มีค่าลดลงมากกว่าการเติมน้ำ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในไบโอดีเซลซึ่งมีโลหะเป็นตัวเร่ง อาจเกิดที่บริเวณพื้นระอุของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและน้ำมันทานตะวัน เนื่องจากในน้ำมันทั้ง 2 ชนิดนี้ มีปริมาณพันธะคู่เป็นองค์ประกอบมากกว่าน้ำมันปาล์มโอเลอิน

ตารางที่ 7 ปริมาณร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ของน้ำมันปาล์มโอเลอิน น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันทานตะวัน

	สปีดค่า เริ่มต้น	สปีดค่าที่ปริมาณเมทิลเอส เทอร์มีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน (< ร้อยละ 96.5)	ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ ในสปีดค่าที่มีค่าต่ำ กว่ามาตรฐาน
น้ำมันปาล์มโอเลอิน			
ไม่เติม	100	22	95.76
โลหะทองแดง 2 พีพีเอ็ม		20	95.10
ปริมาณน้ำร้อยละ 1		20	94.73
น้ำมันสบู่ดำ			
ไม่เติม	98.44	20	96.16
โลหะทองแดง 2 พีพีเอ็ม		18	96.22
ปริมาณน้ำร้อยละ 1		16	96.43
น้ำมันทานตะวัน			
ไม่เติม	96.55	14	96.42
โลหะทองแดง 2 พีพีเอ็ม		14	94.78
ปริมาณน้ำร้อยละ 1		14	96.20

4. การศึกษาผลของสารต้านอนุมูลอิสระที่มีต่อคุณสมบัติของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันทานตะวัน ที่เติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 2 พีพีเอ็ม และ เติมน้ำในปริมาณร้อยละ 1

การปรับปรุงเสถียรภาพการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลทำได้โดยการเติมสารต้านอนุมูลอิสระที่เหมาะสมลงในไบโอดีเซลเพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐาน จากงานวิจัยของเดือนเพ็ญ (2552) ซึ่งศึกษาเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ โดยทำการเติมสารต้านอนุมูลอิสระ TBHQ ลงในไบโอดีเซลในปริมาณความเข้มข้น 0-1,000 พีพีเอ็ม พบว่าปริมาณความเข้มข้นของ TBHQ ที่ใช้ในปริมาณความเข้มข้นน้อยที่สุด คือ 750 พีพีเอ็ม และ 500 พีพีเอ็ม ซึ่งทำให้ไบโอดีเซลจากสบู่ดำมีค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันมากกว่า 10 ชั่วโมง คือ

12.91 และ 11.90 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยงานวิจัยนี้ ได้ศึกษาปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ TBHQ ในปริมาณความเข้มข้น 0-2,000 พีพีเอ็ม

จากผลการทดลองพบว่า ไบโอดีเซลที่เติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 2 พีพีเอ็ม และเติมน้ำในปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 1 มีผลมากที่สุดในการลดลงของคุณสมบัติของไบโอดีเซล จึงเลือกสภาวะนี้มาทำการเติมสารต้านอนุมูลอิสระ TBHQ ลงไปในปริมาณความเข้มข้น 0-2,000 พีพีเอ็ม เพื่อศึกษาผลของสารต้านอนุมูลอิสระที่มีต่อคุณสมบัติของไบโอดีเซล

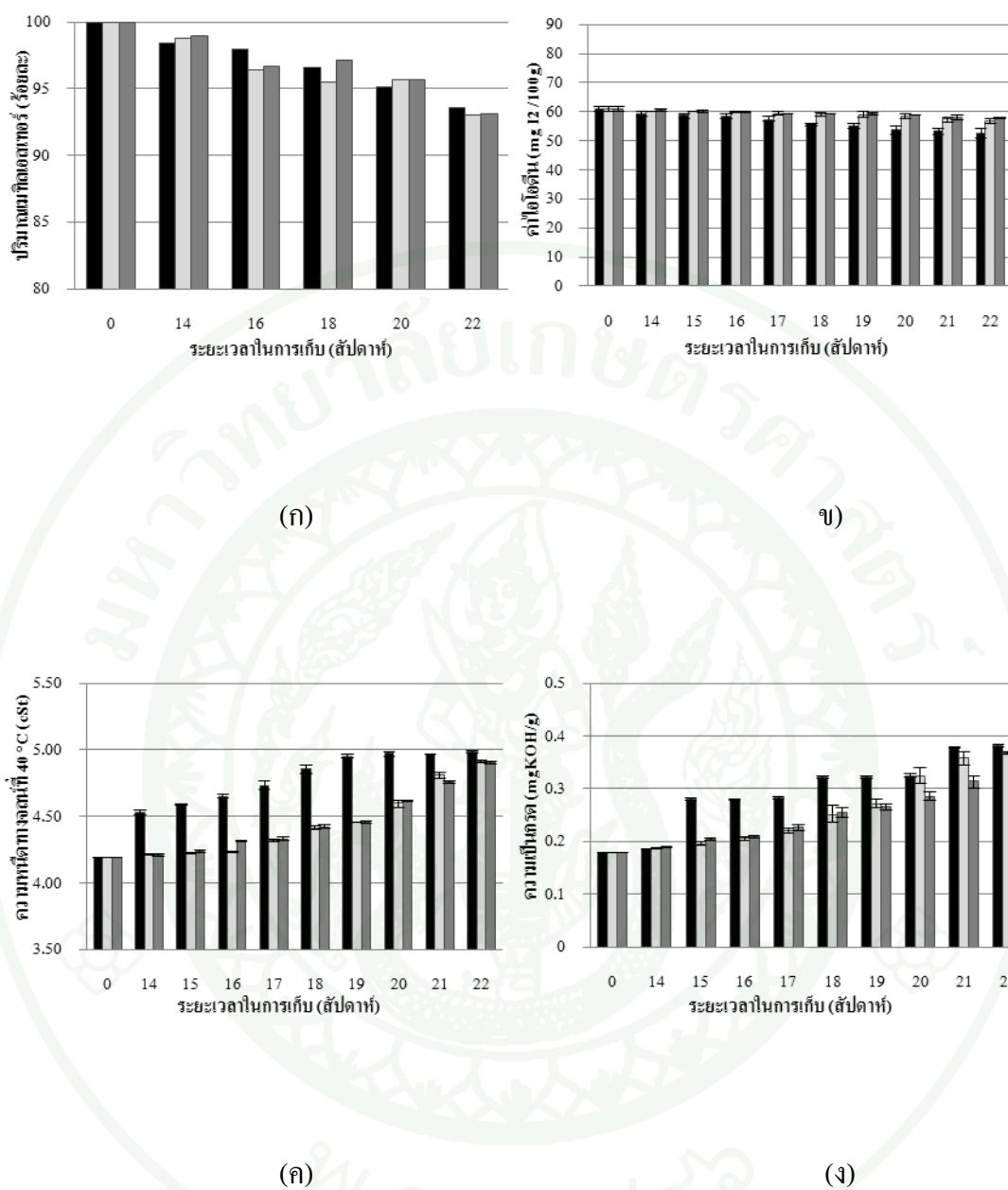
เมื่อพิจารณาถึงผลของสารต้านอนุมูลอิสระที่มีต่อคุณสมบัติของไบโอดีเซล พบว่า การเติม TBHQ ในปริมาณความเข้มข้น 0 1,000 และ 2,000 พีพีเอ็ม ส่งผลให้คุณสมบัติของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันทานตะวัน มีค่าการเปลี่ยนแปลงน้อยลงเมื่อเทียบกับไบโอดีเซลที่ไม่มีการเติมสารต้านอนุมูลอิสระ ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 28-33 โดยการเติมสารต้านอนุมูลอิสระ TBHQ ลงในไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน พบว่า เมื่อพิจารณาว่าการเติมโลหะทองแดง 2 พีพีเอ็ม และเติมน้ำร้อยละ 1 ทำให้มีค่าคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไปไม่ต่างกัน และเมื่อเติมในปริมาณ 1,000 และ 2,000 พบว่า ช่วยให้ค่าคุณสมบัติต่างๆของไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างช้าๆ เมื่อเทียบกับการไม่เติม และที่ความเข้มข้น 1,000 และ 2,000 พีพีเอ็ม ให้ผลไม่แตกต่างกัน และเมื่อพิจารณาถึงค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ พบว่า การเติมสารต้านอนุมูลอิสระ TBHQ ลงไปในปริมาณ 2,000 พีพีเอ็ม ให้ผลไม่แตกต่างจากการเติม TBHQ ในปริมาณความเข้มข้น 1,000 พีพีเอ็ม ในระยะเวลา 20 สัปดาห์แรก แต่หลังจากนั้น พบว่า การเติมสารต้านอนุมูลอิสระในปริมาณความเข้มข้น 2,000 พีพีเอ็ม จะสามารถควบคุมการเพิ่มขึ้นของค่าความเป็นกรดให้เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ได้ดีกว่าการเติมที่ปริมาณความเข้มข้น 1,000 พีพีเอ็ม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nataly *et al.* (2011) ที่ศึกษาผลของสารต้านอนุมูลอิสระต่อไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลืองที่มีการเจือปนของโลหะ โดยพบว่า สารต้านอนุมูลอิสระ TBHQ ในปริมาณความเข้มข้น 2,000 พีพีเอ็ม ทำให้ค่าเสถียรภาพการเกิดออกซิเดชันของน้ำมันไบโอดีเซลจากถั่วเหลืองที่มีโลหะเจือปน มีค่าสูงกว่ามาตรฐาน EN 14214 ซึ่งมีค่า 6 ชั่วโมง และจากผลการทดลองพบว่า ค่าความหนืดของไบโอดีเซลที่มีการเติมสารต้านอนุมูลอิสระ TBHQ ลงไปในปริมาณ 1,000 พีพีเอ็ม มีส่วนช่วยให้ค่าความหนืดของไบโอดีเซลจากน้ำมันทานตะวัน มีค่าไม่เกินมาตรฐานเมื่อจัดเก็บเป็นระยะเวลา 22 สัปดาห์

โดยสารต้านอนุมูลอิสระสามารถลดความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซลได้ เนื่องจากสารต้านอนุมูลอิสระจะให้ไฮโดรเจนแก่อนุมูลอิสระที่อยู่ในรูปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเกิดจากการแตกตัวของกรดไขมันไม่อิ่มตัวในไบโอดีเซล ทำให้อนุมูลอิสระนั้นเสถียรและไม่สามารถไปจับกับโมเลกุลอื่น นอกจากนี้สารต้านอนุมูลอิสระที่ให้ไฮโดรเจนแล้วยังสามารถจับกับอนุมูลอิสระอีกด้วยเป็นการยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซล เป็นผลให้ค่าเสถียรภาพการเกิดออกซิเดชันเพิ่มขึ้น (Knothe, 2007) ซึ่งกลไกการยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซลแสดงดังภาพที่ 27

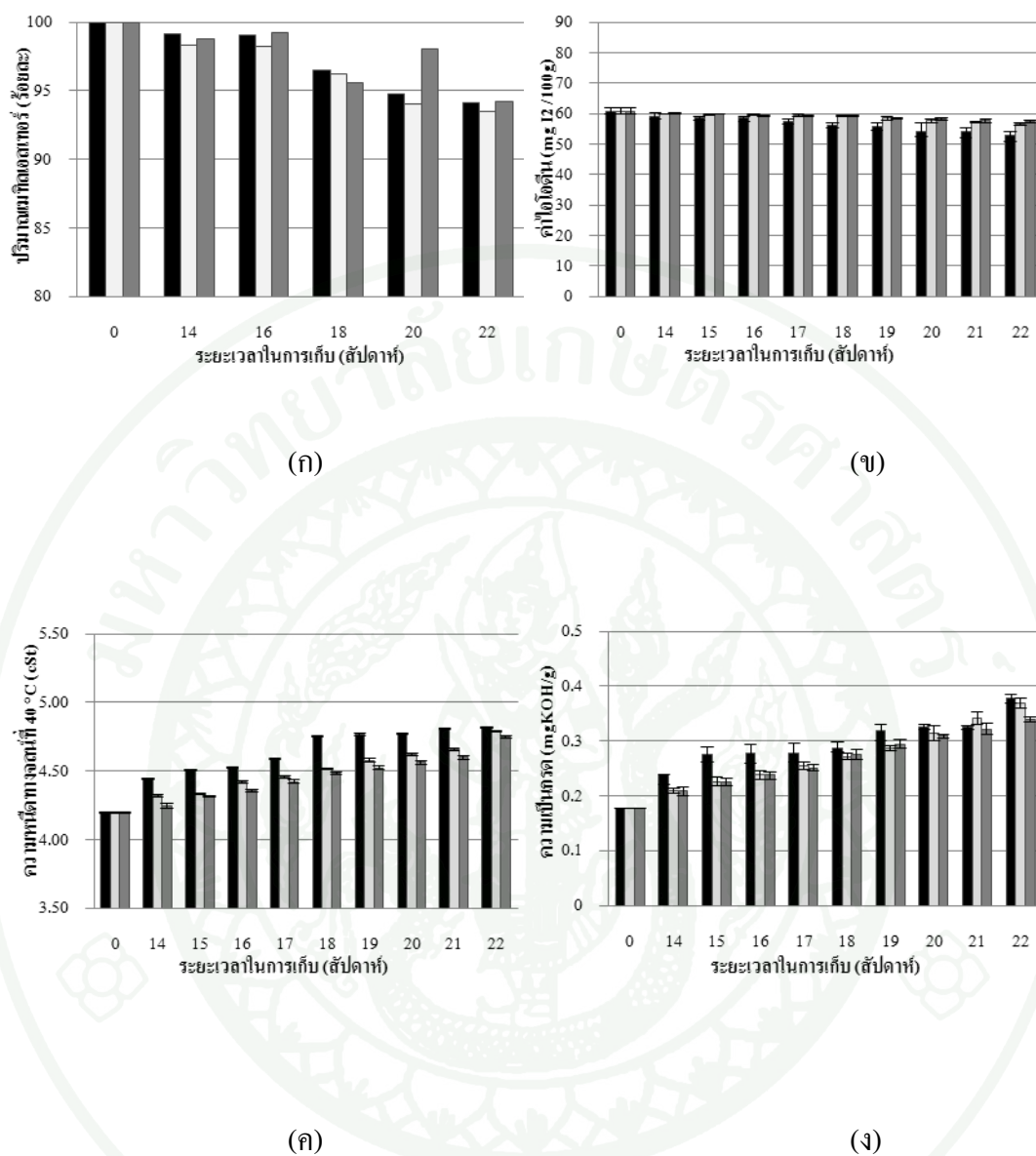


ภาพที่ 27 กลไกการยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารต้านอนุมูลอิสระ

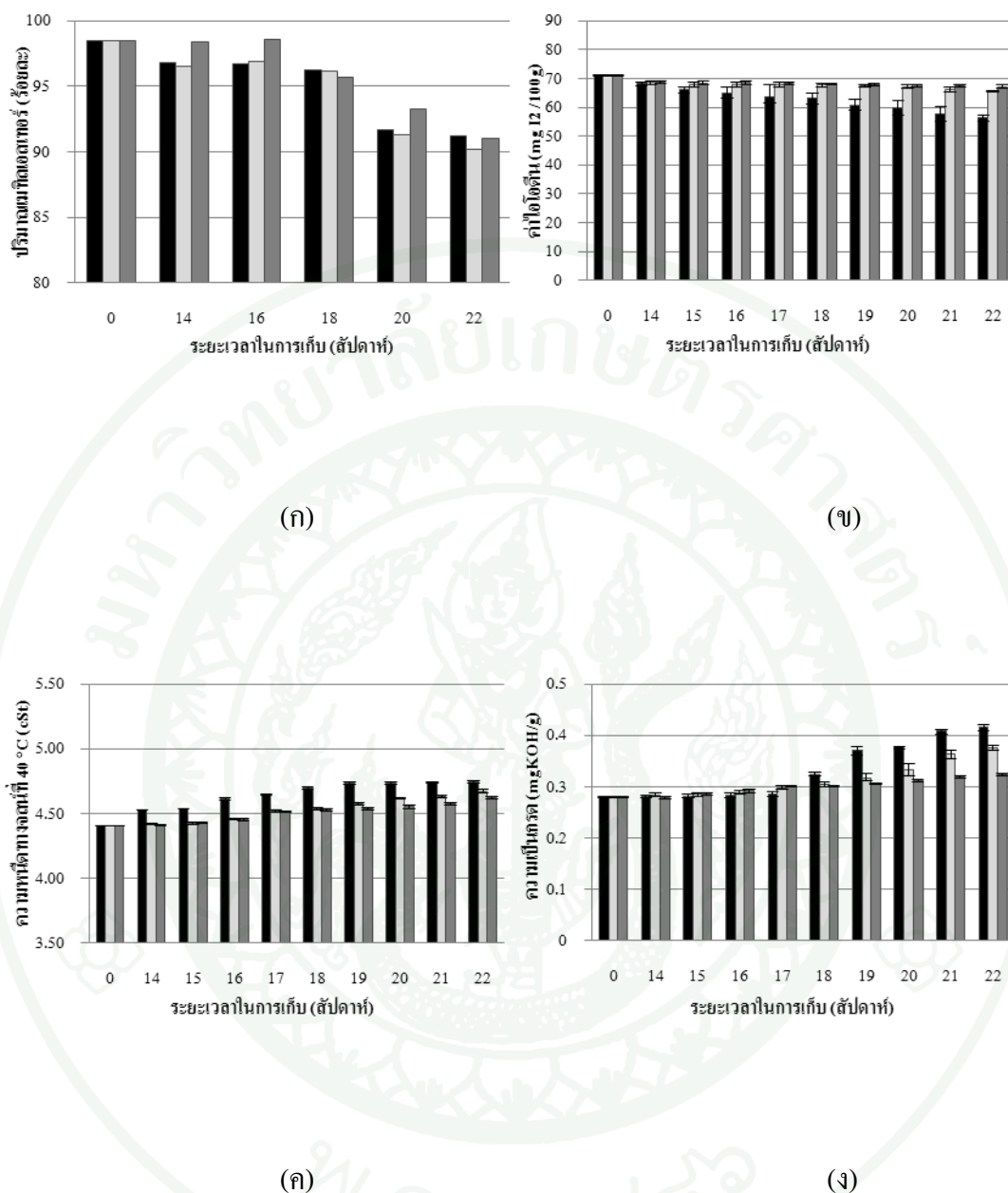
ที่มา: Jain and Sharma (2011)



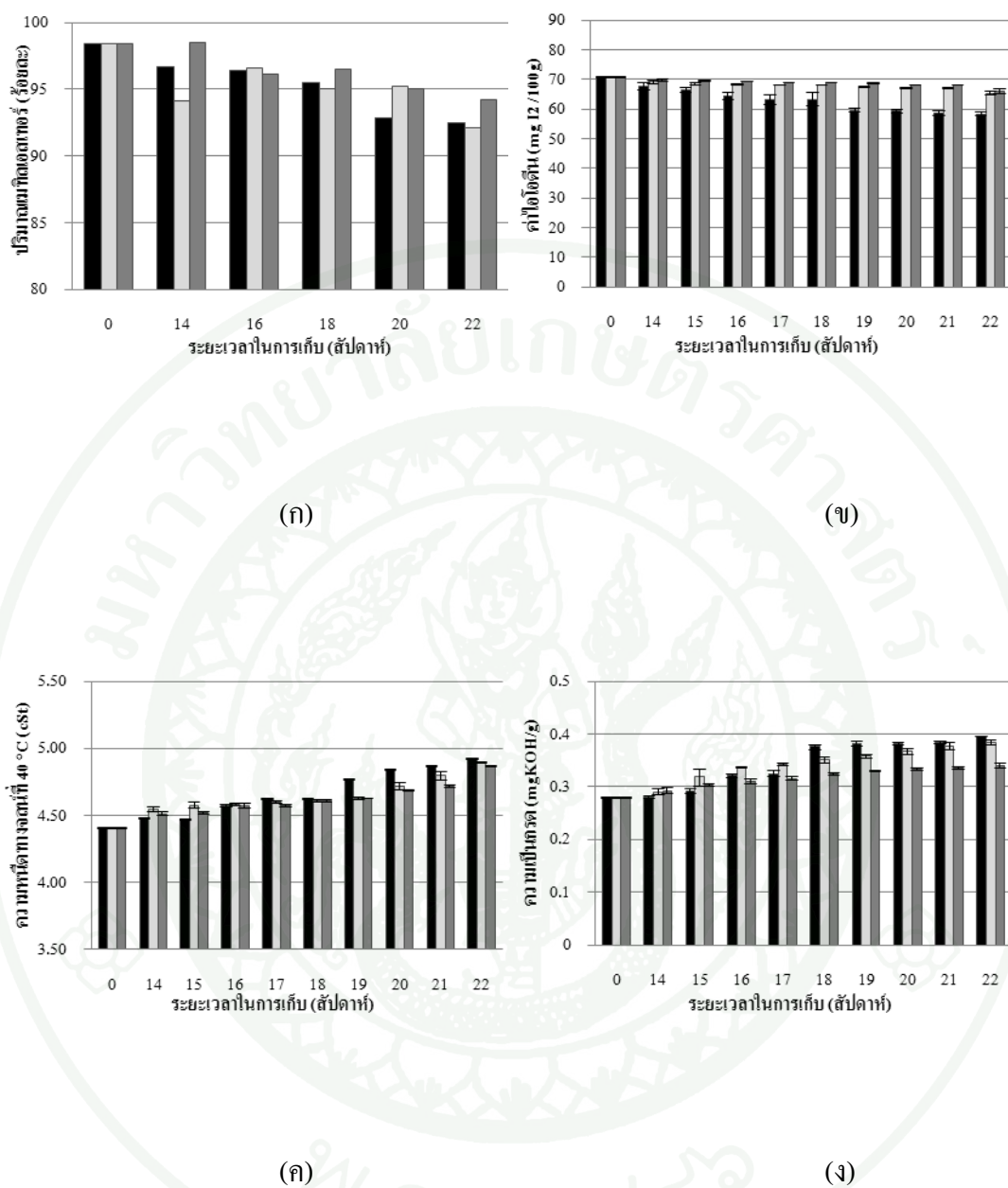
ภาพที่ 28 ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (ก) ค่าไอโอดีน (ข) ค่าความหนืด (ค) และ ค่าความเป็นกรด (ง) ของน้ำมันปาล์มโอเลอิน โดยเติมโลหะทองแดง 2 พีพีเอ็ม และเติม TBHQ 0-2,000 พีพีเอ็ม (■ TBHQ = 0 พีพีเอ็ม, □ TBHQ = 1,000 พีพีเอ็ม, ▒ TBHQ = 2,000 พีพีเอ็ม)



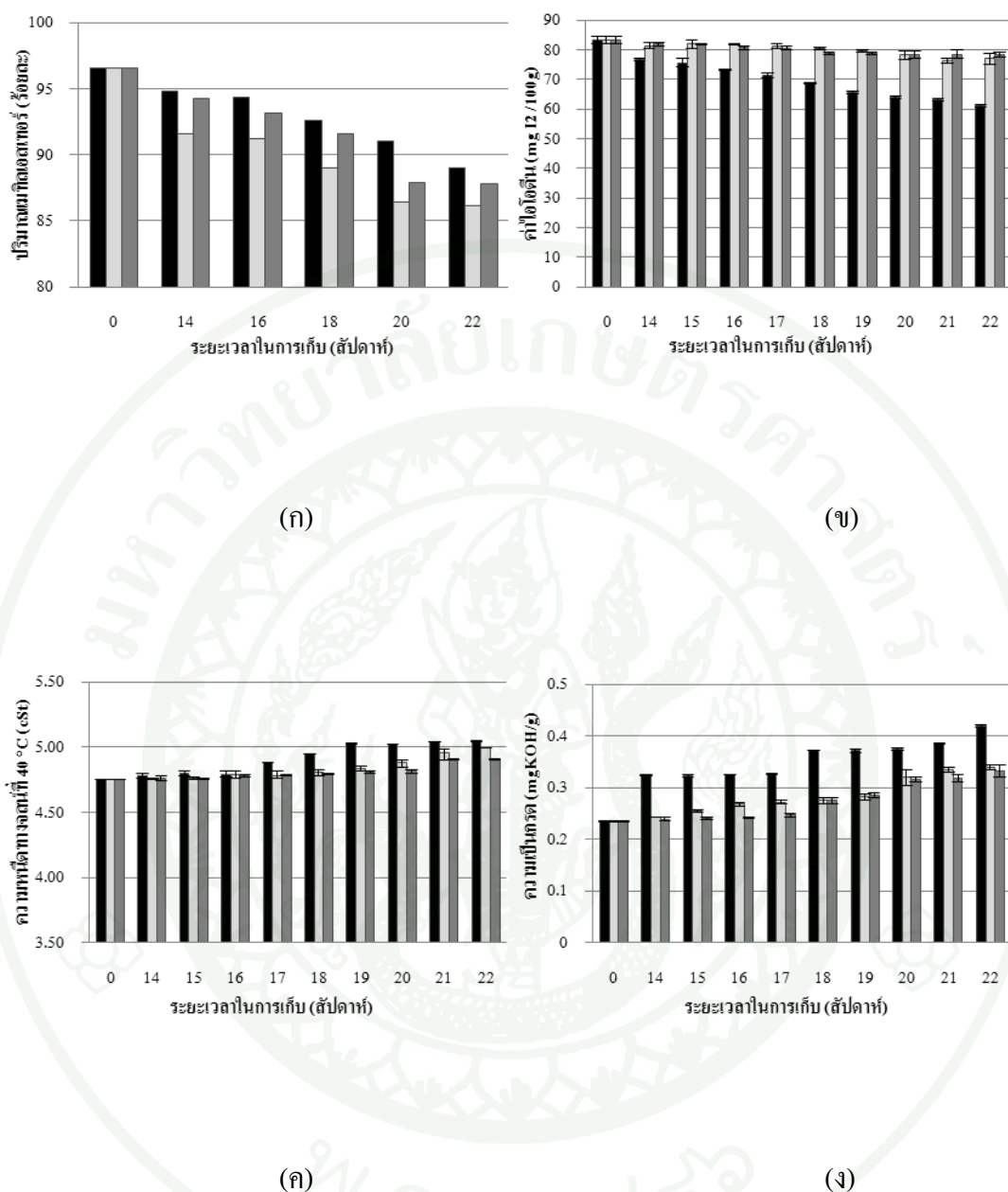
ภาพที่ 29 ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (ก) ค่าไอโอดีน (ข) ค่าความหนืด (ค) และ ค่าความเป็นกรด (ง) ของน้ำมันปาล์มโอเลอิน โดยเติมน้ำร้อยละ 1 และเติม TBHQ 0-2,000 พีพีเอ็ม (■ TBHQ = 0 พีพีเอ็ม, □ TBHQ = 1,000 พีพีเอ็ม, ▒ TBHQ = 2,000 พีพีเอ็ม)



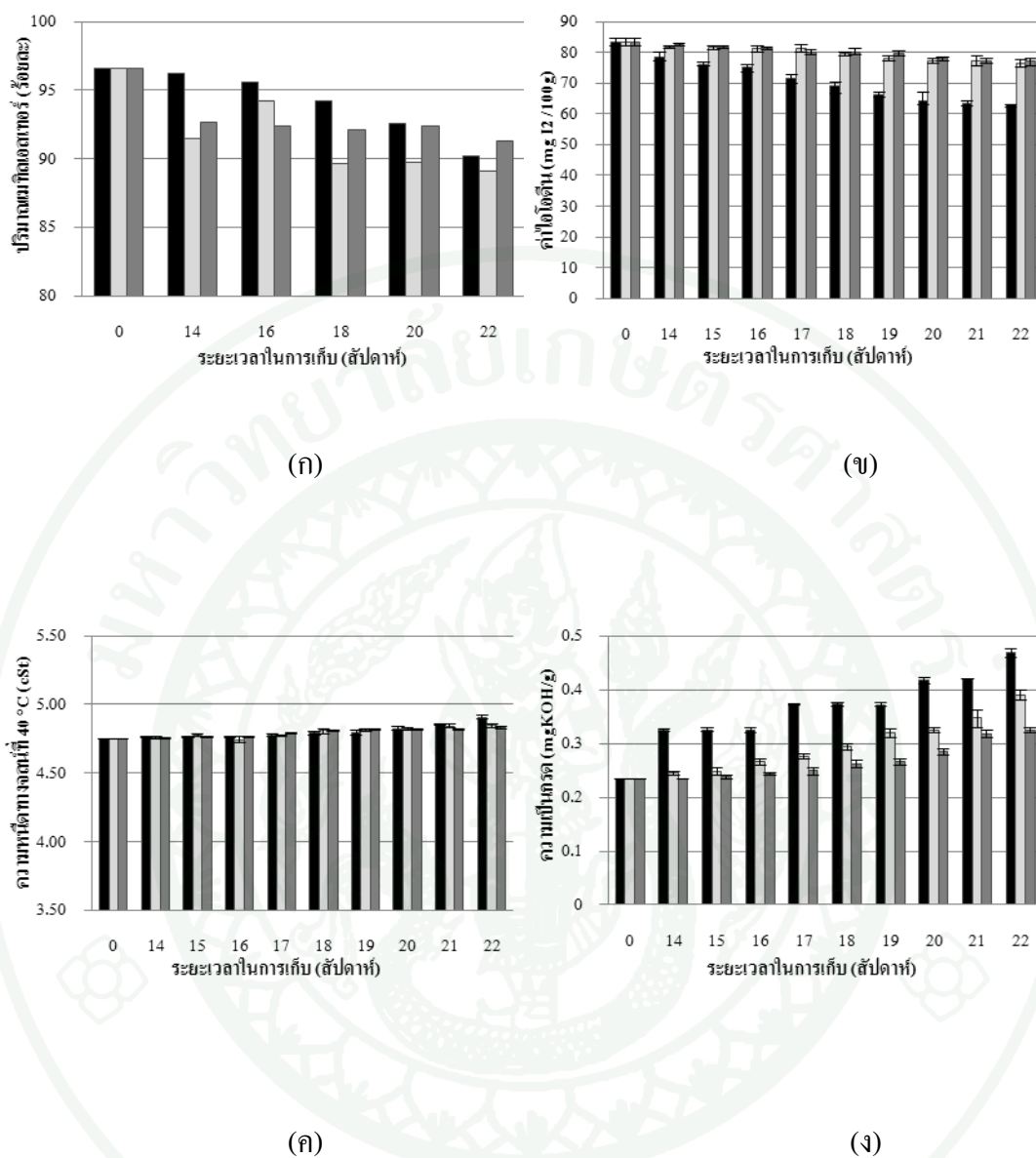
ภาพที่ 30 ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (ก) ค่าไอโอดีน (ข) ค่าความหนืด (ค) และ ค่าความเป็นกรด (ง) ของน้ำมันสบูดำ โดยเติมโลหะทองแดง 2 พีพีเอ็ม และเติม TBHQ 0-2,000 พีพีเอ็ม (■ TBHQ = 0 พีพีเอ็ม, □ TBHQ = 1,000 พีพีเอ็ม, ▒ TBHQ = 2,000 พีพีเอ็ม)



ภาพที่ 31 ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (ก) ค่าไอโอดีน (ข) ค่าความหนืด (ค) และ ค่าความเป็นกรด (ง) ของน้ำมันสับดำ โดยเติมน้ำร้อยละ 1 และเติม TBHQ 0-2,000 พีพีเอ็ม (■ TBHQ = 0 พีพีเอ็ม, □ TBHQ = 1,000 พีพีเอ็ม, ▒ TBHQ = 2,000 พีพีเอ็ม)



ภาพที่ 32 ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (ก) ค่าไอโอดีน (ข) ค่าความหนืด (ค) และ ค่าความเป็นกรด (ง) ของน้ำมันทานตะวัน โดยเติมโทเคทอลแดง 2 พีพีเอ็ม และเติม TBHQ 0-2,000 พีพีเอ็ม (■TBHQ = 0 พีพีเอ็ม, □TBHQ = 1,000 พีพีเอ็ม, ▒TBHQ = 2,000 พีพีเอ็ม)



ภาพที่ 33 ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (ก) ค่าไอโอดีน (ข) ค่าความหนืด (ค) และ ค่าความเป็นกรด (ง) ของน้ำมันทานตะวัน โดยเติมน้ำร้อยละ 1 และเติม TBHQ 0-2,000 พีพีเอ็ม (■ TBHQ = 0 พีพีเอ็ม, □ TBHQ = 1,000 พีพีเอ็ม, ▒ TBHQ = 2,000 พีพีเอ็ม)

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาหาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันทานตะวัน รวมถึงการเติมสารต้านอนุมูลอิสระและการจัดเก็บไบโอดีเซล เป็นระยะเวลา 22 สัปดาห์ และทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ได้ ซึ่งจากผลการทดลอง สามารถสรุปได้ ดังนี้

1. การเติมโลหะทองแดงลงในไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันทานตะวัน ส่งผลให้คุณสมบัติของไบโอดีเซล มีค่าเปลี่ยนแปลงไป โดยความเข้มข้นของโลหะทองแดงที่ปริมาณ 2 พีพีเอ็ม มีผลให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันทานตะวันลดลงร้อยละ 6.39 7.49 และ 7.82 ตามลำดับ ค่าไอโอดีนลดลงร้อยละ 13.27 20.44 และ 26.61 ตามลำดับ ค่าความหนืดมีการเพิ่มขึ้นเป็น 1.19 1.08 และ 1.06 ตามลำดับ โดยเทียบจากสัปดาห์แรก ค่าความเป็นกรดเพิ่มขึ้น 2.14 1.49 และ 1.79 ตามลำดับ โดยเทียบจากสัปดาห์แรก ดังนั้น การที่โลหะทองแดงส่งผลให้ค่าคุณสมบัติของไบโอดีเซลเปลี่ยนแปลงไป จึงทำให้สรุปได้ว่า โลหะทองแดงเป็นหนึ่งในปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซล

2. การเติมน้ำลงในไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันทานตะวัน ส่งผลให้คุณสมบัติของไบโอดีเซล มีค่าเปลี่ยนแปลงไป โดยความเข้มข้นของน้ำที่ปริมาณร้อยละ 1 มีผลให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันทานตะวันลดลงร้อยละ 5.79 6.03 และ 6.58 ตามลำดับ ค่าไอโอดีนลดลงร้อยละ 12.91 17.73 และ 24.49 ตามลำดับ ค่าความหนืดเพิ่มขึ้น 1.15 1.12 และ 1.03 ตามลำดับ ค่าความเป็นกรดเพิ่มขึ้น 2.13 1.42 และ 2.0 ตามลำดับ ดังนั้น น้ำจึงเป็นปัจจัยในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซล โดยมีส่วนต่อค่าความเป็นกรดมากที่สุด

3. ปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่เป็นองค์ประกอบในไบโอดีเซล มีผลต่อคุณสมบัติของไบโอดีเซล โดยน้ำมันทานตะวัน ซึ่งมีองค์ประกอบของกรดไขมันในปริมาณสูงที่สุด ส่งผลให้คุณสมบัติของไบโอดีเซลมีค่าความหนืดเกินกว่าค่ามาตรฐาน เมื่อเติมปริมาณโลหะทองแดงและจัดเก็บไบโอดีเซลเป็นระยะเวลานาน

4. สารต้านอนุมูลอิสระ TBHQ ที่ปริมาณความเข้มข้น 1,000 พีพีเอ็ม ช่วยให้ไบโอดีเซลจากน้ำมันทานตะวัน ที่เติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 2 พีพีเอ็ม มีค่าความหนืดสูงกว่ามาตรฐาน

5. โลหะทองแดงเป็นปัจจัยที่มีผลมากที่สุดต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันทานตะวัน เนื่องจากส่งผลให้คุณสมบัติของไบโอดีเซลเปลี่ยนแปลงไปมากที่สุด

ข้อเสนอแนะ

1. การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซลเกิดได้จากหลายปัจจัย ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาปัจจัยอื่นๆ เช่น อากาศ แสง อุณหภูมิ ชนิดของภาชนะที่ใช้ในการบรรจุไบโอดีเซล ซึ่งรวมถึงวัสดุที่ทำนำมาใช้ผลิตไบโอดีเซลด้วย เนื่องจากปัจจัยต่างๆ เหล่านี้ ส่งผลต่อค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลทั้งสิ้น

2. ในการศึกษาปัจจัยของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซล มีตัวแปรเป็นจำนวนมาก จึงควรมีการนำการออกแบบการทดลองมาใช้ร่วมด้วย เพื่อเป็นการลดจำนวนการทดลองและยังเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการทดลองได้อีกด้วย

3. งานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซลในระดับห้องปฏิบัติการเท่านั้น ดังนั้น จึงควรมีการพัฒนาเพื่อนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรม

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมธุรกิจพลังงาน. 2550. ประกาศกรมธุรกิจพลังงานเรื่องกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2550. แหล่งที่มา : www.doeb.go.th, 13 ตุลาคม 2552.

กองบรรณาธิการ. 2548. ไบโอดีเซล-พลังงานทดแทนช่วยชาติ. เทคนิค เครื่องกลไฟฟ้าอุตสาหกรรม. 22(256) : 154-163.

กลุ่มเกษตรสัญจร. 2531. ปาล์มน้ำมัน. โรงพิมพ์มิตรสยาม, กรุงเทพฯ.

คณะกรรมการพลังงาน สภาผู้แทนราษฎร. 2545. พลังงานทดแทนเอทานอลและไบโอดีเซล. สำนักพิมพ์แปลน พรินติ้ง, กรุงเทพฯ.

ชวิดา ปัญญาสุรยุทธ. 2551. การปรับปรุงความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลผสมระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและจากน้ำมันมะพร้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เดือนเพ็ญ ฉายทองดี. 2552. การศึกษาเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ทัศนีย์ สวัสดิ์พาณิชย์. 2550. การหาสถานะที่เหมาะสมทางสถิติของการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นันทวรรณ สโรบล. 2549. พืชวิทยาของสบู่ดำ. แหล่งที่มา <http://www.doa.go.th/fieldcrops/phinut/oth/tox.html>, 10 ตุลาคม 2552.

บุญรอด วงษ์สวาท. 2551. เคมีอินทรีย์. แหล่งที่มา http://www.promma.ac.th/main/chemistry/boonrawd_site/toc.htm, 3 มกราคม 2555

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว). 2550. การผลิตและการตรวจสอบ
มาตรฐานไบโอดีเซลเบื้องต้น. แหล่งที่มา : www.tistr.or.th, 12 ตุลาคม 2552.

สำนักงานอุตสาหกรรมจังหวัดหนองบัวลำภู. 2549. พืชสบูดำ. แหล่งที่มา :
www.mindustry.go.th/min/intro/province/Nongbualamphu/plan/biodiesel_01.html,
12 ตุลาคม 2552.

อนุวัฒน์ จันทรสวรรณ. 2551. ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของสบู่ดำ. แหล่งที่มา:
<http://www.doa.go.th/fieldcrops/phanut/oth/bot.html>, 10 ตุลาคม 2552.

อาภาณี เหลืองนฤมิตรชัย. 2549. ไบโอดีเซล วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
แหล่งที่มา : <http://www.vcharkarn.com/include/article/showarticle.php?Aid=409>,
12 ตุลาคม 2552

Achten, J.M.W., L. Verchot, Y.J. Franken, E. Mathijs, V.P. Singh, R. Aerts and B. Muys. article
in press, 2008. Jatropha biodiesel production and use. **Biosource technology**.

Agarwal, A.K. 2007. Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal
combustion engines. **Progress in Energy and Combustion Science**. 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.

Bryan, R.M. 2011. Influence of extended storage on fuel properties of methyl esters prepared
from canola, palm, soybean and sunflower oils. **Renewable Energy** 36: 1221-1226.

- Demirbas, A. 2003 Biodiesel fuels from vegetable oil via catalytic and non-catalytic supercritical alcohol tranesterifications and other methods. **Energy Conversion and Management** 44: 2093-2109.
- Fukuda, H., A. Kondo and H. Noda. 2001. Biodiesel fuel production by transesterification of oils. **J. Biosci. Bioeng.** 92: 405-416.
- Jain, S. and M.P. Sharma, 2010. Stability of biodiesel and its blends: A review. **Renweable and Sustainable Energy Review.** 14: 667-678.
- Jain, S. and M.P. Sharma, 2011. Long term storage stability of Jatropha curcas biodiesel. **Energy.** 36: 5409-5415.
- Knothe, G. 2007. Some aspects of biodiesel oxidative stability. **Fuel Process. Technol.** 88: 669-677.
- Leung, D.Y.C., Koo, B.C.P., Guo, Y., 2006. Degradation of biodiesel under different storage conditions. **Biosource technology.** 97: 250-256.
- Ma, F. and M.A. Hanna. 1999. Biodiesel production: a review. **Bioresource Technology.** 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.
- Nataly, A.S., Sarah, S.D., Pedro, H.M., Veronica, C.M., Raul, R. Valter, J., Fernandes Jr., Neide, Q., Ieda M., G. Santos, Ary, S.M., and Antonio, G.S. 2011. Caffeic Acid: An Efficient Antioxidant for Soybean Biodiesel Contaminated with Metals. **Energy Fuels.** 25: 4190-4194.

- Sarin, R., M. Sharma, S. Sinharay and R.K. Malhotra. 2007. Jatropha–Palm biodiesel blends: An optimum mix for Asia. **Fuel**. 86: 1365-1371.
- Sarin, A., A. Rajneesh, N.P. Singh, M. Sharma, R.K. malhotra. 2009. Influence of metal contaminants on oxidation stability of Jatropha biodiesel. **Energy**. 34: 1271-1275.
- Sarin, A., Arora R., Singh N.P., Sharma M. and Malhotra R.K., 2010. Influence of metal contaminants on oxidation stability of Jatropha biodiesel. **Energy**. 34: 1271-1275.
- Schwab, A.W., M.O. Bagby and B. Freedman. 1987. Preparation and properties of diesel fuels from vegetable oils. **Fuel**. 66: 1372-1378.
- Srivastava, A. and Prasad, R.1999. Triglycerides-base diesel fuels. **Renewable and Sustainable Energy Review**. 4: 111-133.
- Srivastava, A. and R. Prasad. 2000. Triglycerides-based diesel fuels. **Renew. Sust. Energ. Rev.** 4: 111-133.
- Tyson, K.S. 2004. Biodiesel Handling and Use Guidelines. **National Renewable Energy Laboratory**. U.S. Department of Energy: 17-18.
- Waynick, J.A. 2005. Charaterization of Biodiesel Oxidation and Oxidation Products. Letter Report No. SwRI 08-10721, **For The Coordinating Research Council and National Renewable Energy Laboratory**, Contract No. AVFL-2b.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

การคำนวณอัตราส่วนโดยโมระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน

ภาคผนวก ก

การคำนวณอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน

การคำนวณอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่ใช้ในกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันมีขั้นตอนการคำนวณ ดังนี้

ตัวอย่างการคำนวณ

ทำการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยใช้น้ำมันสุญุดำเริ่มต้นในการผลิตปริมาณ 100 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 100 กรัม

$$\text{จะใช้เมทานอลปริมาณ} = \frac{100 \times 224}{900} = 24.89 \text{ กรัม}$$



ภาคผนวก ข

การคำนวณค่าความเป็นกรด

สามารถคำนวณค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลได้จากสมการ

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

วิธีการคำนวณ

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

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

ดังนั้นค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลเท่ากับ

$$= \frac{0.25 \times 56.1 \times 0.1}{3}$$

$$= 0.468 \text{ mg KOH/g}$$



ภาคผนวก ค
การคำนวณปริมาณเมทิลเอสเทอร์

ภาคผนวก ค

การคำนวณปริมาณเมทิลเอสเทอร์

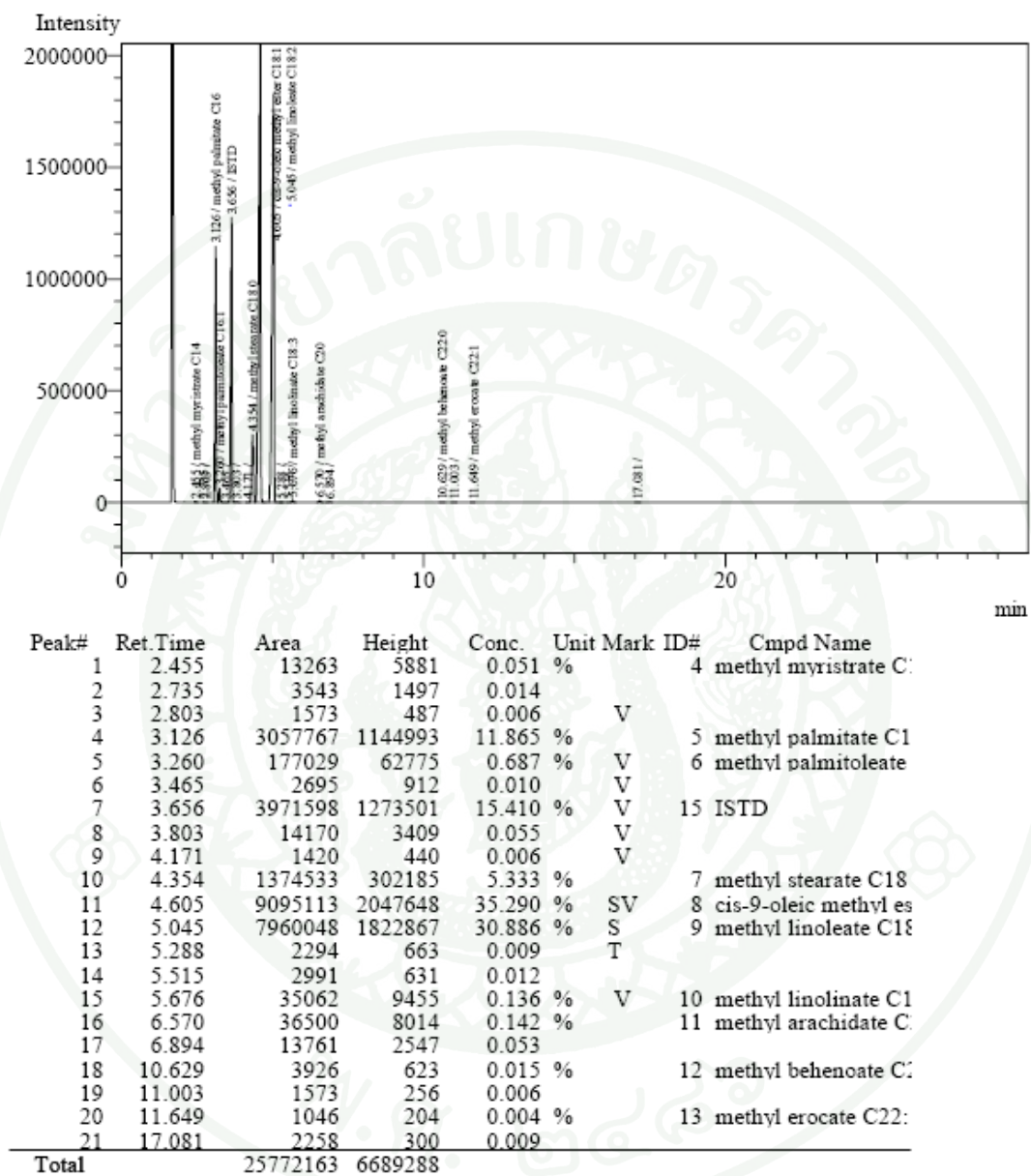
การวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ในไบโอดีเซลด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีตามมาตรฐาน EN 14103 โดยใช้ Methyl heptadecanoate เป็นสารมาตรฐานภายใน (Internal standard) สามารถคำนวณปริมาณเมทิลเอสเทอร์ในไบโอดีเซลได้ดังสมการ

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

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 ค1 ตัวอย่างโครมาโทแกรมของสารตัวอย่าง

จากโครมาโทแกรมสามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$\sum A = 25772163$$

$$A_{EI} = 3971598$$

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

$$V_{EI} = 1 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$m = 53 \text{ มิลลิกรัม}$$

สามารถคำนวณปริมาณเมทิลเอสเทอร์ได้ดังนี้

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

ดังนั้น ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ในไบโอดีเซล คือ 99.76 เปอร์เซ็นต์



ภาคผนวก ง

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอดีเซล

ตารางผนวกที่ ง1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันทานตะวัน ที่เติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 0-2 พีพีเอ็ม

ระยะเวลาในการจัดเก็บ (สัปดาห์)	ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (ร้อยละ)								
	น้ำมันปาล์มโอเลอิน			น้ำมันสบู่ดำ			น้ำมันทานตะวัน		
	ปริมาณโลหะทองแดง (พีพีเอ็ม)			ปริมาณโลหะทองแดง (พีพีเอ็ม)			ปริมาณโลหะทองแดง (พีพีเอ็ม)		
	0	1	2	0	1	2	0	1	2
0	100.00	100.00	100.00	98.44	98.44	98.44	96.55	96.55	96.55
14	98.56	98.27	98.44	98.40	97.61	96.80	96.42	96.26	94.78
16	98.44	97.62	97.98	97.92	96.88	96.71	95.55	93.81	94.38
18	97.70	96.66	96.54	97.07	96.51	96.22	93.07	92.67	92.61
20	96.84	95.69	95.10	96.16	94.83	91.71	92.3	91.88	91.00
22	95.76	93.89	93.61	93.87	91.95	91.07	91.84	90.11	89.00

ตารางผนวกที่ ๖2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันทานตะวัน ที่เติมน้ำในปริมาณความเข้มข้น ร้อยละ 0-1

ระยะเวลาในการ จัดเก็บ (สัปดาห์)	ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (ร้อยละ)								
	น้ำมันปาล์มโอเลอิน			น้ำมันสบู่ดำ			น้ำมันทานตะวัน		
	ปริมาณน้ำ (ร้อยละ)			ปริมาณน้ำ (ร้อยละ)			ปริมาณน้ำ (ร้อยละ)		
	0	0.05	1	0	0.05	1	0	0.05	1
0	100	100	100	98.44	98.44	98.44	96.55	96.55	96.55
14	98.56	98.97	99.16	98.4	98.22	96.68	96.42	96.20	96.20
16	98.44	98.47	99.07	97.92	97.44	96.43	95.55	94.25	95.60
18	97.70	97.48	96.50	97.07	96.94	95.46	93.07	93.18	94.21
20	96.84	95.78	94.73	96.16	96.05	92.85	92.30	92.37	92.59
22	95.76	94.73	94.21	93.57	93.22	92.50	91.84	91.35	90.20

ตารางผนวกที่ 3 ผลการวิเคราะห์ค่าไอโอดีนของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน ที่เติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 0-2 พีพีเอ็ม

ระยะเวลาในการจัดเก็บ		ค่าไอโอดีน (mg I ₂ /100g)									
(สัปดาห์)	จำนวนการทดลอง	0	14	15	16	17	18	19	20	21	22
ปริมาณโลหะทองแดง 0 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	60.00	59.03	58.87	58.74	58.12	58.09	57.99	57.87	57.80	57.72
	ครั้งที่ 2	60.78	60.12	59.90	60.12	60.90	59.98	58.87	58.12	58.89	58.87
	ครั้งที่ 3	61.77	62.55	62.10	61.11	61.00	60.43	60.34	59.59	60.14	59.13
	เฉลี่ย	60.85	60.56	60.29	59.99	60.00	59.50	59.07	58.53	58.94	58.57
ปริมาณโลหะทองแดง 1 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	60.00	59.34	59.10	58.87	57.89	57.03	56.64	55.12	55.05	54.48
	ครั้งที่ 2	60.78	59.41	60.21	59.89	58.12	57.79	57.45	56.53	55.90	55.24
	ครั้งที่ 3	61.77	59.98	61.23	61.34	59.23	59.03	59.32	57.72	57.23	56.67
	เฉลี่ย	60.85	59.58	60.18	60.03	58.41	57.95	57.80	56.46	56.06	55.46
ปริมาณโลหะทองแดง 2 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	60.00	58.34	57.65	57.43	56.61	55.23	54.34	52.27	52.10	51.01
	ครั้งที่ 2	60.78	59.97	58.89	58.84	56.65	55.90	55.43	53.98	53.98	52.87
	ครั้งที่ 3	61.77	60.12	59.44	59.12	58.34	56.10	55.96	55.23	54.43	54.44
	เฉลี่ย	60.85	59.48	58.66	58.46	57.20	55.74	55.24	53.83	53.50	52.77

ตารางผนวกที่ 4 ผลการวิเคราะห์ค่าไอโอดีนของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ ที่เติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 0-2 พีพีเอ็ม

ระยะเวลาในการจัดเก็บ		ค่าไอโอดีน (mg I ₂ /100g)									
(สัปดาห์)	จำนวนการทดลอง	0	14	15	16	17	18	19	20	21	22
ปริมาณโลหะทองแดง 0 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	70.66	68.48	67.09	67.00	66.50	65.67	65.09	64.43	64.20	63.93
	ครั้งที่ 2	70.88	68.98	68.84	69.94	67.71	67.73	67.73	65.52	65.52	64.10
	ครั้งที่ 3	71.12	69.78	70.12	71.12	69.09	68.71	68.89	67.23	67.08	64.44
	เฉลี่ย	70.89	69.08	68.68	69.35	67.77	67.37	67.24	65.73	65.60	64.16
ปริมาณโลหะทองแดง 1 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	70.66	68.02	67.75	66.53	66.23	64.43	64.20	62.21	60.57	60.43
	ครั้งที่ 2	70.88	69.92	67.89	67.12	67.71	65.54	65.55	63.32	62.28	61.12
	ครั้งที่ 3	71.12	69.99	68.88	67.90	67.77	66.10	65.90	65.18	64.41	61.90
	เฉลี่ย	70.89	69.31	68.17	67.18	67.24	65.36	65.22	63.57	62.42	61.15
ปริมาณโลหะทองแดง 2 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	70.66	67.47	65.10	63.24	61.44	61.09	58.98	57.11	55.02	55.10
	ครั้งที่ 2	70.88	68.21	66.32	64.43	62.28	63.87	59.98	59.90	57.56	56.98
	ครั้งที่ 3	71.12	68.90	66.90	66.87	67.71	65.01	62.98	62.24	60.12	57.12
	เฉลี่ย	70.89	68.19	66.11	64.85	63.81	63.32	60.65	59.75	57.57	56.40

ตารางผนวกที่ 5 ผลการวิเคราะห์ค่าไอโอดีนของไบโอดีเซลจากน้ำมันทานตะวัน ที่เติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 0-2 พีพีเอ็ม

ระยะเวลาในการจัดเก็บ		ค่าไอโอดีน (mg I ₂ /100g)									
(สัปดาห์)	จำนวนการทดลอง	0	14	15	16	17	18	19	20	21	22
ปริมาณโลหะทองแดง 0 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	82.07	78.87	76.45	76.02	75.57	75.04	74.38	74.35	72.27	70.23
	ครั้งที่ 2	82.87	78.88	77.87	76.88	75.89	75.40	75.43	75.12	73.48	71.48
	ครั้งที่ 3	84.45	79.63	78.03	76.90	76.10	76.00	76.12	76.14	75.32	73.21
	เฉลี่ย	83.13	79.13	77.45	76.60	75.85	75.48	75.31	75.20	73.69	71.64
ปริมาณโลหะทองแดง 1 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	82.07	76.42	74.67	73.30	72.16	71.87	69.94	68.88	67.02	67.74
	ครั้งที่ 2	82.87	77.10	75.12	73.89	73.12	72.13	70.09	69.90	68.88	67.89
	ครั้งที่ 3	84.45	77.00	75.89	75.77	75.09	72.89	71.34	73.21	70.13	73.21
	เฉลี่ย	83.13	76.84	75.23	74.32	73.46	72.30	70.46	70.66	68.68	69.61
ปริมาณโลหะทองแดง 2 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	82.07	76.39	74.03	72.89	70.67	68.32	65.00	63.56	62.88	60.67
	ครั้งที่ 2	82.87	76.90	75.78	72.90	71.09	68.33	65.78	63.56	62.90	61.01
	ครั้งที่ 3	84.45	77.12	77.12	73.38	72.22	68.90	66.00	64.43	63.45	61.34
	เฉลี่ย	83.13	76.80	75.64	73.06	71.33	68.52	65.59	63.85	63.08	61.01

ตารางผนวกที่ ๖ ผลการวิเคราะห์ค่าไอโอดีนของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน ที่เติมน้ำในปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0-1

ระยะเวลาในการจัดเก็บ		ค่าไอโอดีน (mg I ₂ /100g)									
(สัปดาห์)	จำนวนการทดลอง	0	14	15	16	17	18	19	20	21	22
ปริมาณน้ำ ร้อยละ 0	ครั้งที่ 1	60.00	59.03	58.87	58.74	58.12	58.09	57.99	57.87	57.80	57.72
	ครั้งที่ 2	60.78	60.12	59.12	58.89	58.90	58.99	58.09	58.34	58.03	57.87
	ครั้งที่ 3	61.77	61.77	60.11	60.11	59.12	59.00	59.11	58.68	58.99	58.12
	เฉลี่ย	60.85	60.31	59.37	59.25	58.71	58.69	58.40	58.30	58.27	57.90
ปริมาณน้ำ ร้อยละ 0.05	ครั้งที่ 1	60.00	59.34	59.10	58.87	57.89	57.03	56.64	55.12	55.05	54.48
	ครั้งที่ 2	60.78	60.12	60.08	58.90	58.81	57.87	57.00	56.12	56.11	55.12
	ครั้งที่ 3	61.77	60.89	60.99	59.12	59.05	58.12	57.98	57.45	57.09	56.34
	เฉลี่ย	60.85	60.12	60.06	58.96	58.58	57.67	57.21	56.23	56.08	55.31
ปริมาณน้ำ ร้อยละ 1	ครั้งที่ 1	60.00	58.34	57.65	57.43	56.61	55.23	54.34	52.27	52.10	51.01
	ครั้งที่ 2	60.78	59.09	58.82	58.89	57.12	56.44	56.12	53.85	54.48	53.98
	ครั้งที่ 3	61.77	60.12	59.12	59.09	58.34	56.90	57.14	56.80	55.14	54.00
	เฉลี่ย	60.85	59.18	58.53	58.47	57.36	56.19	55.87	54.31	53.91	52.10

ตารางผนวกที่ 7 ผลการวิเคราะห์ค่าไอโอดีนของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ ที่เติมน้ำในปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0-1

ระยะเวลาในการจัดเก็บ		ค่าไอโอดีน (mg I ₂ /100g)									
(สัปดาห์)	จำนวนการทดลอง	0	14	15	16	17	18	19	20	21	22
ปริมาณน้ำ ร้อยละ 0	ครั้งที่ 1	70.66	68.48	68.03	67.71	66.54	66.10	65.54	65.23	65.03	64.40
	ครั้งที่ 2	70.88	69.00	68.83	68.12	67.78	68.12	66.24	65.97	65.98	64.90
	ครั้งที่ 3	71.12	69.23	69.00	69.23	68.87	68.80	65.67	66.00	66.12	65.09
	เฉลี่ย	70.89	68.90	68.62	68.35	67.73	67.67	65.82	65.73	65.71	64.80
ปริมาณน้ำ ร้อยละ 0.05	ครั้งที่ 1	70.66	68.08	67.74	67.10	66.77	65.55	64.02	62.04	61.20	61.20
	ครั้งที่ 2	70.88	69.12	68.23	68.34	67.78	66.34	66.90	63.96	62.22	61.97
	ครั้งที่ 3	71.12	70.11	69.27	69.11	68.45	67.32	67.11	64.39	62.89	62.07
	เฉลี่ย	70.89	69.10	68.41	68.18	67.67	66.40	66.01	63.46	62.10	61.75
ปริมาณน้ำ ร้อยละ 1	ครั้งที่ 1	70.66	66.39	65.65	63.01	61.48	61.08	58.87	58.73	57.77	57.62
	ครั้งที่ 2	70.88	67.17	66.94	64.48	63.45	62.12	59.00	59.20	58.12	58.34
	ครั้งที่ 3	71.12	68.98	67.15	65.55	64.89	65.59	60.10	60.00	59.46	59.00
	เฉลี่ย	70.89	67.51	66.58	64.35	63.27	62.93	59.32	59.31	58.45	58.32

ตารางผนวกที่ ๘ ผลการวิเคราะห์ค่าไอโอดีนของไบโอดีเซลจากน้ำมันทานตะวัน ที่เติมน้ำในปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0-1

ระยะเวลาในการจัดเก็บ		ค่าไอโอดีน (mg I ₂ /100g)									
(สัปดาห์)	จำนวนการทดลอง	0	14	15	16	17	18	19	20	21	22
ปริมาณน้ำ ร้อยละ 0	ครั้งที่ 1	82.07	79.34	79.64	78.89	76.54	76.09	75.54	73.32	72.77	72.32
	ครั้งที่ 2	82.87	80.12	80.11	79.23	77.45	77.12	76.69	74.34	72.90	72.90
	ครั้งที่ 3	84.45	81.11	80.80	80.12	78.23	78.34	77.12	75.23	73.12	73.02
	เฉลี่ย	83.13	80.19	80.18	79.41	77.41	77.18	76.45	74.30	72.93	72.75
ปริมาณน้ำ ร้อยละ 0.05	ครั้งที่ 1	82.07	78.14	77.62	76.56	75.89	75.03	73.21	72.90	71.77	69.05
	ครั้งที่ 2	82.87	80.23	79.93	78.84	76.88	77.78	74.23	73.12	72.24	69.90
	ครั้งที่ 3	84.45	81.23	80.12	79.34	79.10	78.12	75.57	73.89	75.34	70.12
	เฉลี่ย	83.13	79.87	79.22	78.25	77.29	76.98	74.34	73.30	73.12	69.69
ปริมาณน้ำ ร้อยละ 1	ครั้งที่ 1	82.07	77.12	75.49	73.34	70.08	66.63	65.37	62.87	62.41	62.34
	ครั้งที่ 2	82.87	78.81	76.00	75.78	71.23	69.89	66.47	63.09	63.90	62.90
	ครั้งที่ 3	84.45	79.92	76.67	76.12	72.90	70.11	67.12	66.89	64.00	63.08
	เฉลี่ย	83.13	78.62	76.05	75.08	71.40	68.88	66.32	64.28	63.44	62.77

ตารางผนวกที่ 9 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนืดของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน ที่เติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 0-2 พีพีเอ็ม

ระยะเวลาในการจัดเก็บ		ค่าความหนืด (cSt)									
(สัปดาห์)	จำนวนการทดลอง	0	14	15	16	17	18	19	20	21	22
ปริมาณโลหะทองแดง 0 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	4.193	4.450	4.466	4.519	4.570	4.671	4.678	4.771	4.775	4.800
	ครั้งที่ 2	4.194	4.455	4.471	4.538	4.576	4.674	4.678	4.775	4.780	4.836
	ครั้งที่ 3	4.195	4.457	4.474	4.545	4.582	4.677	4.678	4.777	4.786	4.845
	เฉลี่ย	4.194	4.454	4.470	4.534	4.576	4.674	4.678	4.774	4.780	4.827
ปริมาณโลหะทองแดง 1 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	4.193	4.462	4.537	4.575	4.639	4.834	4.860	4.789	4.800	4.882
	ครั้งที่ 2	4.194	4.470	4.547	4.580	4.657	4.845	4.880	4.815	4.867	4.957
	ครั้งที่ 3	4.195	4.476	4.556	4.589	4.667	4.854	4.890	4.850	4.878	4.965
	เฉลี่ย	4.194	4.469	4.547	4.581	4.654	4.844	4.877	4.818	4.848	4.935
ปริมาณโลหะทองแดง 2 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	4.193	4.511	4.587	4.637	4.700	4.823	4.938	4.953	4.966	4.975
	ครั้งที่ 2	4.194	4.529	4.590	4.648	4.715	4.879	4.957	4.978	4.968	4.985
	ครั้งที่ 3	4.195	4.543	4.595	4.665	4.770	4.882	4.963	4.989	4.969	4.998
	เฉลี่ย	4.194	4.528	4.591	4.650	4.728	4.861	4.953	4.973	4.968	4.986

ตารางผนวกที่ 10 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนืดของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ ที่เติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 0-2 พีพีเอ็ม

ระยะเวลาในการจัดเก็บ (สัปดาห์)	จำนวนการ ทดลอง	ค่าความหนืด (cSt)									
		0	14	15	16	17	18	19	20	21	22
ปริมาณโลหะทองแดง 0 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	4.402	4.462	4.469	4.542	4.542	4.587	4.602	4.613	4.624	4.631
	ครั้งที่ 2	4.405	4.467	4.478	4.550	4.550	4.589	4.615	4.623	4.635	4.638
	ครั้งที่ 3	4.407	4.469	4.481	4.561	4.561	4.610	4.624	4.634	4.641	4.645
	เฉลี่ย	4.405	4.466	4.476	4.551	4.551	4.595	4.614	4.623	4.633	4.638
ปริมาณโลหะทองแดง 1 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	4.402	4.417	4.514	4.561	4.585	4.598	4.648	4.660	4.677	4.681
	ครั้งที่ 2	4.405	4.425	4.521	4.569	4.598	4.612	4.659	4.668	4.681	4.689
	ครั้งที่ 3	4.407	4.437	4.531	4.571	4.605	4.621	4.669	4.710	4.693	4.699
	เฉลี่ย	4.405	4.426	4.522	4.567	4.596	4.610	4.659	4.679	4.684	4.690
ปริมาณโลหะทองแดง 2 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	4.402	4.527	4.536	4.603	4.643	4.691	4.726	4.728	4.733	4.737
	ครั้งที่ 2	4.405	4.530	4.536	4.608	4.645	4.698	4.732	4.735	4.741	4.745
	ครั้งที่ 3	4.407	4.533	4.541	4.623	4.652	4.705	4.740	4.744	4.745	4.755
	เฉลี่ย	4.405	4.530	4.538	4.611	4.647	4.698	4.733	4.736	4.740	4.746

ตารางผนวกที่ 11 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนืดของไบโอดีเซลจากน้ำมันทานตะวัน ที่เติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 0-2 พีพีเอ็ม

ระยะเวลาในการจัดเก็บ		ค่าความหนืด (cSt)									
(สัปดาห์)	จำนวนการทดลอง	0	14	15	16	17	18	19	20	21	22
ปริมาณโลหะทองแดง 0 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	4.747	4.752	4.748	4.755	4.758	4.755	4.771	4.778	4.835	4.852
	ครั้งที่ 2	4.748	4.754	4.748	4.755	4.759	4.759	4.773	4.779	4.845	4.854
	ครั้งที่ 3	4.749	4.754	4.748	4.758	4.761	4.762	4.779	4.779	4.847	4.855
	เฉลี่ย	4.748	4.753	4.748	4.756	4.759	4.759	4.774	4.779	4.842	4.854
ปริมาณโลหะทองแดง 1 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	4.747	4.757	4.761	4.762	4.756	4.781	4.830	4.830	4.872	4.890
	ครั้งที่ 2	4.748	4.761	4.767	4.771	4.777	4.783	4.841	4.855	4.880	4.896
	ครั้งที่ 3	4.749	4.773	4.787	4.788	4.789	4.788	4.848	4.865	4.889	4.910
	เฉลี่ย	4.748	4.764	4.772	4.774	4.774	4.784	4.840	4.850	4.880	4.899
ปริมาณโลหะทองแดง 2 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	4.747	4.764	4.783	4.768	4.880	4.945	5.023	5.023	5.040	5.043
	ครั้งที่ 2	4.748	4.779	4.788	4.789	4.882	4.948	5.028	5.024	5.042	5.045
	ครั้งที่ 3	4.749	4.800	4.812	4.815	4.883	4.950	5.031	5.025	5.044	5.050
	เฉลี่ย	4.748	4.781	4.794	4.791	4.882	4.948	5.027	5.024	5.042	5.046

ตารางผนวกที่ 12 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนืดของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน ที่เติมน้ำในปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0-1

ระยะเวลาในการจัดเก็บ		ค่าความหนืด (cSt)									
(สัปดาห์)	จำนวนการทดลอง	0	14	15	16	17	18	19	20	21	22
ปริมาณน้ำ ร้อยละ 0	ครั้งที่ 1	4.192	4.446	4.463	4.514	4.528	4.570	4.579	4.590	4.605	4.674
	ครั้งที่ 2	4.194	4.449	4.466	4.519	4.532	4.579	4.583	4.598	4.610	4.678
	ครั้งที่ 3	4.196	4.454	4.469	4.523	4.540	4.587	4.589	4.607	4.616	4.682
	เฉลี่ย	4.194	4.450	4.466	4.519	4.533	4.579	4.584	4.598	4.610	4.678
ปริมาณน้ำ ร้อยละ 0.05	ครั้งที่ 1	4.192	4.390	4.493	4.518	4.570	4.579	4.601	4.677	4.719	4.730
	ครั้งที่ 2	4.194	4.396	4.498	4.520	4.575	4.582	4.612	4.678	4.722	4.735
	ครั้งที่ 3	4.196	4.401	4.503	4.524	4.579	4.588	4.614	4.683	4.726	4.745
	เฉลี่ย	4.194	4.396	4.498	4.521	4.575	4.583	4.609	4.679	4.722	4.737
ปริมาณน้ำ ร้อยละ 1	ครั้งที่ 1	4.192	4.437	4.504	4.519	4.580	4.748	4.760	4.769	4.802	4.814
	ครั้งที่ 2	4.194	4.441	4.510	4.525	4.589	4.754	4.763	4.773	4.810	4.816
	ครั้งที่ 3	4.196	4.450	4.513	4.529	4.592	4.755	4.772	4.779	4.816	4.823
	เฉลี่ย	4.194	4.443	4.509	4.524	4.587	4.752	4.765	4.774	4.809	4.818

ตารางผนวกที่ 13 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนืดของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ ที่เติมน้ำในปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0-1

ระยะเวลาในการจัดเก็บ		ค่าความหนืด (cSt)									
(สัปดาห์)	จำนวนการทดลอง	0	14	15	16	17	18	19	20	21	22
ปริมาณน้ำ ร้อยละ 0	ครั้งที่ 1	4.401	4.466	4.469	4.542	4.542	4.587	4.602	4.613	4.624	4.631
	ครั้งที่ 2	4.406	4.470	4.477	4.548	4.549	4.589	4.610	4.618	4.629	4.635
	ครั้งที่ 3	4.409	4.475	4.479	4.552	4.554	4.595	4.614	4.622	4.634	4.642
	เฉลี่ย	4.405	4.470	4.475	4.547	4.548	4.590	4.609	4.618	4.629	4.636
ปริมาณน้ำ ร้อยละ 0.05	ครั้งที่ 1	4.401	4.451	4.559	4.579	4.601	4.577	4.679	4.752	4.823	4.846
	ครั้งที่ 2	4.406	4.457	4.562	4.583	4.608	4.582	4.683	4.759	4.830	4.850
	ครั้งที่ 3	4.409	4.461	4.567	4.588	4.611	4.589	4.690	4.762	4.840	4.855
	เฉลี่ย	4.405	4.456	4.563	4.583	4.607	4.583	4.684	4.758	4.831	4.850
ปริมาณน้ำ ร้อยละ 1	ครั้งที่ 1	4.401	4.474	4.466	4.566	4.620	4.619	4.765	4.834	4.865	4.915
	ครั้งที่ 2	4.406	4.477	4.473	4.570	4.620	4.620	4.769	4.840	4.869	4.917
	ครั้งที่ 3	4.409	4.482	4.477	4.578	4.628	4.627	4.774	4.848	4.876	4.922
	เฉลี่ย	4.405	4.478	4.472	4.571	4.623	4.622	4.769	4.841	4.870	4.918

ตารางผนวกที่ 14 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนืดของไบโอดีเซลจากน้ำมันทานตะวัน ที่เติมน้ำในปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0-1

ระยะเวลาในการจัดเก็บ		ค่าความหนืด (cSt)									
(สัปดาห์)	จำนวนการทดลอง	0	14	15	16	17	18	19	20	21	22
ปริมาณน้ำ ร้อยละ 0	ครั้งที่ 1	4.746	4.750	4.748	4.753	4.755	4.755	4.770	4.778	4.830	4.850
	ครั้งที่ 2	4.747	4.755	4.755	4.761	4.768	4.761	4.779	4.785	4.838	4.859
	ครั้งที่ 3	4.750	4.759	4.760	4.767	4.774	4.768	4.785	4.795	4.842	4.868
	เฉลี่ย	4.748	4.755	4.754	4.760	4.766	4.761	4.778	4.786	4.837	4.859
ปริมาณน้ำ ร้อยละ 0.05	ครั้งที่ 1	4.746	4.749	4.750	4.750	4.756	4.762	4.766	4.761	4.850	4.870
	ครั้งที่ 2	4.747	4.753	4.761	4.765	4.768	4.779	4.778	4.787	4.860	4.886
	ครั้งที่ 3	4.750	4.765	4.769	4.772	4.775	4.785	4.786	4.796	4.866	4.905
	เฉลี่ย	4.748	4.756	4.760	4.762	4.766	4.775	4.777	4.781	4.859	4.887
ปริมาณน้ำ ร้อยละ 1	ครั้งที่ 1	4.746	4.753	4.755	4.753	4.765	4.779	4.779	4.810	4.848	4.896
	ครั้งที่ 2	4.747	4.759	4.762	4.769	4.773	4.795	4.798	4.823	4.852	4.909
	ครั้งที่ 3	4.750	4.762	4.769	4.770	4.785	4.804	4.812	4.835	4.856	4.918
	เฉลี่ย	4.748	4.758	4.762	4.764	4.774	4.793	4.796	4.823	4.852	4.908

ตารางผนวกที่ 15 ผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน ที่เติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 0-2 พีพีเอ็ม

ระยะเวลาในการจัดเก็บ		ความเป็นกรด (g KOH/g)									
(สัปดาห์)	จำนวนการทดลอง	0	14	15	16	17	18	19	20	21	22
ปริมาณโลหะทองแดง 0 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	0.178	0.184	0.184	0.186	0.184	0.220	0.230	0.232	0.234	0.232
	ครั้งที่ 2	0.178	0.184	0.186	0.186	0.186	0.222	0.232	0.234	0.234	0.234
	ครั้งที่ 3	0.178	0.184	0.186	0.186	0.188	0.230	0.236	0.236	0.234	0.236
	เฉลี่ย	0.178	0.184	0.185	0.186	0.186	0.224	0.233	0.234	0.234	0.234
ปริมาณโลหะทองแดง 1 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	0.178	0.232	0.233	0.232	0.268	0.278	0.28	0.28	0.322	0.322
	ครั้งที่ 2	0.178	0.233	0.233	0.233	0.277	0.28	0.281	0.281	0.324	0.324
	ครั้งที่ 3	0.178	0.233	0.234	0.234	0.278	0.28	0.282	0.284	0.326	0.324
	เฉลี่ย	0.178	0.233	0.233	0.233	0.274	0.279	0.281	0.282	0.324	0.323
ปริมาณโลหะทองแดง 2 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	0.178	0.186	0.278	0.278	0.28	0.32	0.32	0.322	0.377	0.379
	ครั้งที่ 2	0.178	0.186	0.28	0.28	0.284	0.32	0.322	0.325	0.379	0.379
	ครั้งที่ 3	0.178	0.186	0.282	0.28	0.284	0.324	0.324	0.328	0.38	0.384
	เฉลี่ย	0.178	0.186	0.280	0.279	0.283	0.321	0.322	0.325	0.379	0.381

ตารางผนวกที่ 16 ผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลจากน้ำมันสุญ์ดำ ที่เติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 0-2 พีพีเอ็ม

ระยะเวลาในการจัดเก็บ		ความเป็นกรด (g KOH/g)									
(สัปดาห์)	จำนวนการทดลอง	0	14	15	16	17	18	19	20	21	22
ปริมาณโลหะทองแดง 0 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	0.278	0.278	0.278	0.278	0.280	0.280	0.280	0.282	0.284	0.280
	ครั้งที่ 2	0.279	0.280	0.280	0.281	0.281	0.281	0.284	0.284	0.284	0.280
	ครั้งที่ 3	0.280	0.284	0.28	0.284	0.282	0.286	0.288	0.284	0.286	0.284
	เฉลี่ย	0.279	0.281	0.279	0.281	0.281	0.282	0.284	0.283	0.285	0.281
ปริมาณโลหะทองแดง 1 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	0.278	0.278	0.279	0.280	0.280	0.28	0.282	0.279	0.326	0.320
	ครั้งที่ 2	0.279	0.279	0.280	0.283	0.283	0.285	0.285	0.284	0.324	0.324
	ครั้งที่ 3	0.280	0.282	0.29	0.292	0.286	0.288	0.294	0.292	0.328	0.329
	เฉลี่ย	0.279	0.280	0.283	0.285	0.283	0.284	0.287	0.285	0.326	0.324
ปริมาณโลหะทองแดง 2 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	0.278	0.279	0.278	0.279	0.280	0.322	0.362	0.373	0.402	0.410
	ครั้งที่ 2	0.279	0.279	0.28	0.281	0.284	0.324	0.373	0.379	0.410	0.413
	ครั้งที่ 3	0.280	0.282	0.286	0.288	0.290	0.328	0.378	0.379	0.412	0.422
	เฉลี่ย	0.279	0.280	0.281	0.283	0.285	0.325	0.371	0.377	0.408	0.415

ตารางผนวกที่ 17 ผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลจากน้ำมันทานตะวัน ที่เติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 0-2 พีพีเอ็ม

ระยะเวลาในการจัดเก็บ		ความเป็นกรด (g KOH/g)									
(สัปดาห์)	จำนวนการทดลอง	0	14	15	16	17	18	19	20	21	22
ปริมาณโลหะทองแดง 0 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	0.233	0.233	0.23	0.234	0.233	0.236	0.24	0.239	0.244	0.258
	ครั้งที่ 2	0.234	0.233	0.234	0.234	0.234	0.238	0.242	0.242	0.244	0.262
	ครั้งที่ 3	0.235	0.234	0.236	0.234	0.235	0.242	0.245	0.25	0.256	0.264
	เฉลี่ย	0.234	0.233	0.233	0.234	0.234	0.239	0.242	0.244	0.248	0.261
ปริมาณโลหะทองแดง 1 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	0.233	0.233	0.234	0.234	0.240	0.240	0.320	0.322	0.325	0.326
	ครั้งที่ 2	0.234	0.234	0.236	0.240	0.246	0.244	0.321	0.325	0.326	0.326
	ครั้งที่ 3	0.235	0.235	0.237	0.240	0.248	0.246	0.322	0.328	0.326	0.326
	เฉลี่ย	0.234	0.234	0.236	0.238	0.245	0.243	0.321	0.325	0.326	0.326
ปริมาณโลหะทองแดง 2 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	0.233	0.322	0.320	0.325	0.326	0.373	0.368	0.373	0.383	0.416
	ครั้งที่ 2	0.234	0.324	0.325	0.325	0.326	0.373	0.373	0.375	0.385	0.420
	ครั้งที่ 3	0.235	0.326	0.325	0.325	0.328	0.373	0.374	0.378	0.386	0.422
	เฉลี่ย	0.234	0.324	0.323	0.325	0.327	0.373	0.372	0.375	0.385	0.419

ตารางผนวกที่ 18 ผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน ที่เติมน้ำในปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0-1

ระยะเวลาในการจัดเก็บ		ความเป็นกรด (g KOH/g)									
(สัปดาห์)	จำนวนการทดลอง	0	14	15	16	17	18	19	20	21	22
ปริมาณน้ำ ร้อยละ 0	ครั้งที่ 1	0.178	0.178	0.178	0.180	0.180	0.214	0.222	0.234	0.232	0.230
	ครั้งที่ 2	0.178	0.184	0.185	0.186	0.186	0.224	0.233	0.234	0.234	0.234
	ครั้งที่ 3	0.178	0.189	0.192	0.192	0.196	0.236	0.244	0.238	0.238	0.237
	เฉลี่ย	0.178	0.184	0.185	0.186	0.187	0.225	0.233	0.235	0.235	0.234
ปริมาณน้ำ ร้อยละ 0.05	ครั้งที่ 1	0.178	0.180	0.188	0.186	0.220	0.221	0.270	0.280	0.278	0.320
	ครั้งที่ 2	0.178	0.187	0.200	0.200	0.232	0.232	0.279	0.281	0.281	0.324
	ครั้งที่ 3	0.178	0.198	0.216	0.220	0.244	0.242	0.288	0.283	0.283	0.328
	เฉลี่ย	0.178	0.188	0.201	0.202	0.232	0.232	0.279	0.281	0.281	0.324
ปริมาณน้ำ ร้อยละ 1	ครั้งที่ 1	0.178	0.220	0.262	0.260	0.262	0.280	0.300	0.320	0.320	0.370
	ครั้งที่ 2	0.178	0.232	0.276	0.277	0.277	0.280	0.324	0.325	0.326	0.379
	ครั้งที่ 3	0.178	0.238	0.288	0.293	0.296	0.298	0.330	0.330	0.328	0.386
	เฉลี่ย	0.178	0.238	0.275	0.277	0.278	0.286	0.318	0.325	0.326	0.378

ตารางผนวกที่ 19 ผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลจากน้ำมันสุญ์ดำ ที่เติมน้ำในปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0-1

ระยะเวลาในการจัดเก็บ		ความเป็นกรด (g KOH/g)									
(สัปดาห์)	จำนวนการทดลอง	0	14	15	16	17	18	19	20	21	22
ปริมาณน้ำ ร้อยละ 0	ครั้งที่ 1	0.278	0.278	0.278	0.270	0.280	0.281	0.280	0.280	0.280	0.280
	ครั้งที่ 2	0.279	0.280	0.279	0.281	0.281	0.282	0.284	0.283	0.285	0.281
	ครั้งที่ 3	0.28	0.282	0.282	0.290	0.282	0.282	0.286	0.289	0.290	0.298
	เฉลี่ย	0.279	0.280	0.280	0.280	0.281	0.282	0.283	0.284	0.285	0.286
ปริมาณน้ำ ร้อยละ 0.05	ครั้งที่ 1	0.278	0.280	0.280	0.320	0.310	0.320	0.318	0.320	0.326	0.320
	ครั้งที่ 2	0.279	0.282	0.280	0.324	0.312	0.324	0.326	0.326	0.326	0.327
	ครั้งที่ 3	0.28	0.284	0.282	0.328	0.318	0.328	0.330	0.332	0.326	0.334
	เฉลี่ย	0.279	0.282	0.281	0.324	0.313	0.324	0.325	0.326	0.326	0.327
ปริมาณน้ำ ร้อยละ 1	ครั้งที่ 1	0.278	0.277	0.288	0.318	0.320	0.370	0.377	0.380	0.381	0.396
	ครั้งที่ 2	0.279	0.280	0.292	0.323	0.325	0.379	0.379	0.382	0.384	0.396
	ครั้งที่ 3	0.28	0.282	0.296	0.325	0.330	0.380	0.386	0.384	0.386	0.396
	เฉลี่ย	0.279	0.280	0.292	0.322	0.325	0.376	0.381	0.382	0.384	0.396

ตารางผนวกที่ 20 ผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลจากน้ำมันทานตะวัน ที่เติมน้ำในปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0-1

ระยะเวลาในการจัดเก็บ		ความเป็นกรด (g KOH/g)									
(สัปดาห์)	จำนวนการทดลอง	0	14	15	16	17	18	19	20	21	22
ปริมาณน้ำ ร้อยละ 0	ครั้งที่ 1	0.233	0.230	0.233	0.228	0.230	0.239	0.242	0.240	0.240	0.261
	ครั้งที่ 2	0.234	0.233	0.234	0.234	0.234	0.239	0.242	0.244	0.248	0.264
	ครั้งที่ 3	0.235	0.236	0.238	0.238	0.242	0.242	0.242	0.250	0.248	0.268
	เฉลี่ย	0.234	0.233	0.235	0.233	0.235	0.240	0.242	0.245	0.245	0.264
ปริมาณน้ำ ร้อยละ 0.05	ครั้งที่ 1	0.233	0.270	0.320	0.320	0.322	0.322	0.324	0.372	0.368	0.412
	ครั้งที่ 2	0.234	0.279	0.324	0.326	0.327	0.327	0.327	0.372	0.372	0.420
	ครั้งที่ 3	0.235	0.286	0.328	0.328	0.334	0.332	0.332	0.372	0.377	0.428
	เฉลี่ย	0.234	0.278	0.324	0.325	0.328	0.327	0.328	0.372	0.372	0.420
ปริมาณน้ำ ร้อยละ 1	ครั้งที่ 1	0.233	0.322	0.322	0.321	0.372	0.370	0.368	0.410	0.420	0.460
	ครั้งที่ 2	0.234	0.325	0.326	0.326	0.373	0.372	0.372	0.417	0.420	0.468
	ครั้งที่ 3	0.235	0.328	0.329	0.330	0.374	0.376	0.375	0.423	0.420	0.476
	เฉลี่ย	0.234	0.325	0.326	0.326	0.373	0.373	0.372	0.417	0.420	0.468

ตารางผนวกที่ 21 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน น้ำมันสนุดำ และน้ำมันทานตะวัน ที่เติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 2 พีพีเอ็ม และเติมสารต้านอนุมูลอิสระ TBHQ ในปริมาณความเข้มข้น 0-2,000 พีพีเอ็ม

ระยะเวลาในการ จัดเก็บ (สัปดาห์)	ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (ร้อยละ)								
	น้ำมันปาล์มโอเลอิน			น้ำมันสนุดำ			น้ำมันทานตะวัน		
	ปริมาณ TBHQ (พีพีเอ็ม)			ปริมาณ TBHQ (พีพีเอ็ม)			ปริมาณ TBHQ (พีพีเอ็ม)		
	0	1,000	2,000	0	1,000	2,000	0	1,000	2,000
0	100.00	100.00	100.00	98.44	98.44	98.44	96.55	96.55	96.55
14	98.44	98.81	98.94	96.80	96.50	98.40	94.78	91.54	94.23
16	97.98	96.37	96.66	96.71	96.94	98.53	94.38	91.21	93.14
18	96.54	95.45	97.13	96.22	96.15	95.64	92.61	88.98	91.56
20	95.10	95.63	95.63	91.71	91.33	93.25	91.00	87.85	87.85
22	93.61	93.00	93.14	91.21	90.20	91.07	89.00	87.79	87.79

ตารางผนวกที่ ๖22 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันทานตะวัน ที่เติมน้ำในปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 1 และเติมสารต้านอนุมูลอิสระ TBHQ ในปริมาณความเข้มข้น 0-2,000 พีพีเอ็ม

ระยะเวลาในการ จัดเก็บ (สัปดาห์)	ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (ร้อยละ)								
	น้ำมันปาล์มโอเลอิน			น้ำมันสบู่ดำ			น้ำมันทานตะวัน		
	ปริมาณ TBHQ (พีพีเอ็ม)			ปริมาณ TBHQ (พีพีเอ็ม)			ปริมาณ TBHQ (พีพีเอ็ม)		
	0	1,000	2,000	0	1,000	2,000	0	1,000	2,000
0	100	100	100	98.44	98.44	98.44	96.55	96.55	96.55
14	99.16	98.28	98.76	96.68	94.10	98.53	96.20	91.44	92.69
16	99.07	98.24	99.20	96.43	96.62	96.11	95.60	94.22	92.38
18	96.50	96.21	95.63	95.46	95.00	96.54	94.21	89.62	92.13
20	94.73	94.00	98.01	92.85	95.21	95.01	92.59	89.77	92.36
22	94.10	93.50	94.21	92.50	92.12	94.22	90.20	89.11	91.33

ตารางผนวกที่ 23 ผลการวิเคราะห์ค่าไอโอดีนของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน ที่เติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 2 พีพีเอ็ม และเติมสารต้านอนุมูลอิสระ TBHQ ในปริมาณความเข้มข้น 0-2,000 พีพีเอ็ม

ระยะเวลาในการจัดเก็บ		ค่าไอโอดีน (mg I ₂ /100g)									
(สัปดาห์)	จำนวนการทดลอง	0	14	15	16	17	18	19	20	21	22
ปริมาณ TBHQ 0 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	60.00	58.34	57.65	57.43	56.61	55.23	54.34	52.27	52.10	51.01
	ครั้งที่ 2	60.78	59.97	58.89	58.84	56.65	55.90	55.43	53.98	53.98	52.87
	ครั้งที่ 3	61.77	60.12	59.44	59.12	58.34	56.10	55.96	55.23	54.43	54.44
	เฉลี่ย	60.85	59.48	58.66	58.46	57.20	55.74	55.24	53.83	53.50	52.77
ปริมาณ TBHQ 1,000 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	60.00	59.99	59.91	59.89	58.75	58.55	58.07	57.59	56.25	55.89
	ครั้งที่ 2	60.78	60.00	60.00	59.99	59.54	59.08	59.00	58.16	57.87	56.72
	ครั้งที่ 3	61.77	60.01	60.00	60.01	59.92	59.88	59.97	59.42	58.17	57.66
	เฉลี่ย	60.85	60.00	59.97	59.96	59.40	59.17	59.01	58.39	57.43	56.76
ปริมาณ TBHQ 2,000 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	60.00	59.98	59.87	59.66	59.07	59.09	58.75	58.65	57.35	57.65
	ครั้งที่ 2	60.78	60.22	60.07	59.75	59.14	59.25	58.98	58.75	57.91	57.75
	ครั้งที่ 3	61.77	60.98	60.45	60.01	59.45	59.40	59.67	59.06	58.77	58.05
	เฉลี่ย	60.85	60.39	60.13	59.81	59.22	59.25	59.13	58.82	58.01	57.82

ตารางผนวกที่ 24 ผลการวิเคราะห์ค่าไอโอดีนของไบโอดีเซลจากน้ำมันสุบุดำ ที่เติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 2 พีพีเอ็ม และเติมสารต้านอนุมูลอิสระ TBHQ ในปริมาณความเข้มข้น 0-2,000 พีพีเอ็ม

ระยะเวลาในการจัดเก็บ		ค่าไอโอดีน (mg I ₂ /100g)									
(สัปดาห์)	จำนวนการทดลอง	0	14	15	16	17	18	19	20	21	22
ปริมาณ TBHQ 0 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	70.66	67.47	65.10	63.24	61.44	61.09	58.98	57.11	55.02	55.10
	ครั้งที่ 2	70.88	68.21	66.32	64.43	62.28	63.87	59.98	59.90	57.56	56.98
	ครั้งที่ 3	71.12	68.90	66.90	66.87	67.71	65.01	62.98	62.24	60.12	57.12
	เฉลี่ย	70.89	68.19	66.11	64.85	63.81	63.32	60.65	59.75	57.57	56.40
ปริมาณ TBHQ 1,000 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	70.66	67.90	67.06	67.04	67.03	67.01	66.89	66.55	65.19	65.12
	ครั้งที่ 2	70.88	68.75	68.15	68.18	68.16	68.00	67.12	67.03	66.40	65.35
	ครั้งที่ 3	71.12	69.16	68.79	68.54	68.59	68.12	67.99	67.75	67.17	65.75
	เฉลี่ย	70.89	68.61	68.00	67.92	67.93	67.71	67.33	67.11	66.25	65.41
ปริมาณ TBHQ 2,000 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	70.66	68.16	68.03	68.05	67.89	67.65	67.45	67.05	67.00	66.51
	ครั้งที่ 2	70.88	68.87	68.16	68.98	68.01	67.89	67.66	67.89	67.13	67.13
	ครั้งที่ 3	71.12	69.01	69.16	69.07	68.66	68.07	68.12	68.01	67.89	67.98
	เฉลี่ย	70.89	68.68	68.45	68.70	68.19	67.87	67.74	67.65	67.34	67.21

ตารางผนวกที่ 25 ผลการวิเคราะห์ค่าไอโอดีนของไบโอดีเซลจากน้ำมันทานตะวัน ที่เติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 2 พีพีเอ็ม และเติมสารต้านอนุมูลอิสระ TBHQ ในปริมาณความเข้มข้น 0-2,000 พีพีเอ็ม

ระยะเวลาในการจัดเก็บ		ค่าไอโอดีน (mg I ₂ /100 g)									
(สัปดาห์)	จำนวนการทดลอง	0	14	15	16	17	18	19	20	21	22
ปริมาณ TBHQ 0 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	82.07	76.39	74.03	72.89	70.67	68.32	65.00	63.56	62.88	60.67
	ครั้งที่ 2	82.87	76.90	75.78	72.90	71.09	68.33	65.78	63.56	62.90	61.01
	ครั้งที่ 3	84.45	77.12	77.12	73.38	72.22	68.90	66.00	64.43	63.45	61.34
	เฉลี่ย	83.13	76.80	75.64	73.06	71.33	68.52	65.59	63.85	63.08	61.01
ปริมาณ TBHQ 1,000 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	82.07	80.18	80.45	81.48	80.48	79.77	79.14	76.56	75.45	75.00
	ครั้งที่ 2	82.87	81.00	82.12	81.99	81.12	80.23	79.79	78.87	76.23	76.76
	ครั้งที่ 3	84.45	82.56	83.44	82.09	81.90	80.89	80.04	79.45	77.22	78.89
	เฉลี่ย	83.13	81.25	82.00	81.85	81.17	80.30	79.66	78.29	76.30	76.88
ปริมาณ TBHQ 2,000 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	82.07	81.07	81.55	80.14	79.89	78.42	78.23	77.12	77.05	77.41
	ครั้งที่ 2	82.87	82.11	81.98	80.98	80.44	78.65	78.90	78.00	78.34	78.24
	ครั้งที่ 3	84.45	82.34	81.99	81.11	81.23	79.14	78.99	79.45	79.79	78.98
	เฉลี่ย	83.13	81.84	81.84	80.74	80.52	78.74	78.71	78.19	78.39	78.21

ตารางผนวกที่ 26 ผลการวิเคราะห์ค่าไอโอดีนของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน ที่เติมน้ำในปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 1 และเติมสารต้านอนุมูลอิสระ TBHQ ในปริมาณความเข้มข้น 0–2,000 พีพีเอ็ม

ระยะเวลาในการจัดเก็บ		ค่าไอโอดีน (mg I ₂ /100 g)									
(สัปดาห์)	จำนวนการทดลอง	0	14	15	16	17	18	19	20	21	22
ปริมาณ TBHQ 0 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	60.00	58.34	57.65	57.43	56.61	55.23	54.34	52.27	52.10	51.01
	ครั้งที่ 2	60.78	59.09	58.82	58.89	57.12	56.44	56.12	53.85	54.48	53.98
	ครั้งที่ 3	61.77	60.12	59.12	59.09	58.34	56.90	57.14	56.80	55.14	54.00
	เฉลี่ย	60.85	59.18	58.53	58.47	57.36	56.19	55.87	54.31	53.91	53.00
ปริมาณ TBHQ 1,000 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	60.00	59.98	59.58	59.24	59.01	58.89	57.87	57.05	56.78	56.04
	ครั้งที่ 2	60.78	59.99	59.98	59.57	59.23	59.04	58.45	58.13	57.12	56.88
	ครั้งที่ 3	61.77	60.01	60.01	59.98	59.76	59.34	58.95	58.34	57.34	57.16
	เฉลี่ย	60.85	59.99	59.86	59.60	59.33	59.09	58.42	57.84	57.08	56.70
ปริมาณ TBHQ 2,000 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	60.00	59.99	59.78	59.23	59.12	58.98	58.02	57.89	57.03	56.78
	ครั้งที่ 2	60.78	60.00	59.89	59.34	59.33	59.34	58.21	58.04	57.76	56.98
	ครั้งที่ 3	61.77	60.12	59.98	59.56	59.44	59.40	58.78	58.76	58.04	57.98
	เฉลี่ย	60.85	60.04	59.88	59.38	59.30	59.24	58.34	58.23	57.61	57.25

ตารางผนวกที่ 27 ผลการวิเคราะห์ค่าไอโอดีนของไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ ที่เติมน้ำในปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 1 และเติมสารต้านอนุมูลอิสระ TBHQ ในปริมาณความเข้มข้น 0-2,000 พีพีเอ็ม

ระยะเวลาในการจัดเก็บ		ค่าไอโอดีน (mg I ₂ /100 g)									
(สัปดาห์)	จำนวนการทดลอง	0	14	15	16	17	18	19	20	21	22
ปริมาณ TBHQ 0 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	70.66	66.39	65.65	63.01	61.48	61.08	58.87	58.73	57.77	57.62
	ครั้งที่ 2	70.88	67.17	66.94	64.48	63.45	62.12	59.00	59.20	58.12	58.34
	ครั้งที่ 3	71.12	68.98	67.15	65.55	64.89	65.59	60.10	60.00	59.46	59.00
	เฉลี่ย	70.89	67.51	66.58	64.35	63.27	62.93	59.32	59.31	58.45	58.32
ปริมาณ TBHQ 1,000 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	70.66	68.48	68.23	68.05	68.00	67.88	67.23	67.01	66.76	64.56
	ครั้งที่ 2	70.88	69.16	68.87	68.23	68.12	68.11	67.46	67.23	67.08	65.12
	ครั้งที่ 3	71.12	69.89	69.02	68.45	68.23	68.12	67.57	67.33	67.11	66.12
	เฉลี่ย	70.89	69.18	68.71	68.24	68.12	68.04	67.42	67.19	66.98	65.27
ปริมาณ TBHQ 2,000 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	70.66	69.46	69.23	69.10	68.89	68.76	68.44	68.02	67.99	65.12
	ครั้งที่ 2	70.88	69.78	69.45	69.23	68.91	68.88	68.77	68.12	68.00	65.77
	ครั้งที่ 3	71.12	69.90	69.57	69.35	69.03	68.99	68.88	68.22	68.11	66.89
	เฉลี่ย	70.89	69.71	69.42	69.23	68.94	68.88	68.69	68.12	68.03	65.94

ตารางผนวกที่ 28 ผลการวิเคราะห์ค่าไอโอดีนของใบโอดีเซลจากน้ำมันทานตะวัน ที่เติมน้ำในปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 1 และเติมสารต้านอนุมูลอิสระ TBHQ ในปริมาณความเข้มข้น 0-2,000 พีพีเอ็ม

ระยะเวลาในการจัดเก็บ		ค่าไอโอดีน (mg I ₂ /100 g)									
(สัปดาห์)	จำนวนการทดลอง	0	14	15	16	17	18	19	20	21	22
ปริมาณ TBHQ 0 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	82.07	77.12	75.49	73.34	70.08	66.63	65.37	62.87	62.41	62.34
	ครั้งที่ 2	82.87	78.81	76.00	75.78	71.23	69.89	66.47	63.09	63.90	62.90
	ครั้งที่ 3	84.45	79.92	76.67	76.12	72.90	70.11	67.12	66.89	64.00	63.08
	เฉลี่ย	83.13	78.62	76.05	75.08	71.40	68.88	66.32	64.28	63.44	62.77
ปริมาณ TBHQ 1,000 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	82.07	81.08	81.00	80.14	80.00	78.87	77.23	76.56	75.54	75.12
	ครั้งที่ 2	82.87	81.88	81.90	81.66	81.48	79.64	78.10	77.47	76.71	76.77
	ครั้งที่ 3	84.45	82.12	82.09	82.09	82.63	80.11	78.89	78.10	78.90	77.74
	เฉลี่ย	83.13	81.69	81.66	81.30	81.37	79.54	78.07	77.38	77.05	76.54
ปริมาณ TBHQ 2,000 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	82.07	82.00	81.45	80.90	79.15	79.06	78.70	77.11	76.56	75.45
	ครั้งที่ 2	82.87	82.12	81.65	81.00	80.00	80.15	79.60	78.65	77.10	77.80
	ครั้งที่ 3	84.45	82.89	81.90	81.87	81.00	81.11	80.45	78.61	77.89	77.91
	เฉลี่ย	83.13	82.34	81.67	81.26	80.05	80.11	79.58	78.12	77.18	77.05

ตารางผนวกที่ ง29 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนืดของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน ที่เติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 2 พีพีเอ็ม และเติมสารต้านอนุมูลอิสระ TBHQ ในปริมาณความเข้มข้น 0-2,000 พีพีเอ็ม

ระยะเวลาในการจัดเก็บ		ค่าความหนืด (cSt)									
(สัปดาห์)	จำนวนการทดลอง	0	14	15	16	17	18	19	20	21	22
ปริมาณ TBHQ 0 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	4.193	4.511	4.587	4.637	4.700	4.823	4.938	4.953	4.966	4.975
	ครั้งที่ 2	4.194	4.529	4.590	4.648	4.715	4.879	4.957	4.978	4.968	4.985
	ครั้งที่ 3	4.195	4.543	4.595	4.665	4.770	4.882	4.963	4.989	4.969	4.998
	เฉลี่ย	4.194	4.528	4.591	4.650	4.728	4.861	4.953	4.973	4.968	4.986
ปริมาณ TBHQ 1,000 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	4.193	4.210	4.220	4.231	4.310	4.400	4.452	4.568	4.788	4.900
	ครั้งที่ 2	4.194	4.215	4.225	4.238	4.312	4.414	4.455	4.610	4.812	4.915
	ครั้งที่ 3	4.195	4.218	4.228	4.240	4.329	4.425	4.460	4.620	4.832	4.925
	เฉลี่ย	4.194	4.214	4.224	4.236	4.317	4.413	4.456	4.599	4.811	4.913
ปริมาณ TBHQ 2,000 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	4.193	4.200	4.230	4.312	4.319	4.412	4.450	4.611	4.744	4.897
	ครั้งที่ 2	4.194	4.212	4.235	4.317	4.326	4.420	4.455	4.612	4.752	4.903
	ครั้งที่ 3	4.195	4.219	4.245	4.320	4.350	4.433	4.462	4.621	4.765	4.910
	เฉลี่ย	4.194	4.210	4.237	4.316	4.332	4.422	4.456	4.615	4.754	4.903

ตารางผนวกที่ 30 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนืดของไบโอดีเซลจากน้ำมันสุญุดำ ที่เติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 2 พีพีเอ็ม และเติมสารต้านอนุมูลอิสระ TBHQ ในปริมาณความเข้มข้น 0-2,000 พีพีเอ็ม

ระยะเวลาในการจัดเก็บ		ค่าความหนืด (cSt)									
(สัปดาห์)	จำนวนการทดลอง	0	14	15	16	17	18	19	20	21	22
ปริมาณ TBHQ 0 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	4.402	4.527	4.536	4.603	4.643	4.691	4.726	4.728	4.733	4.737
	ครั้งที่ 2	4.405	4.530	4.536	4.608	4.645	4.698	4.732	4.735	4.741	4.745
	ครั้งที่ 3	4.407	4.533	4.541	4.623	4.652	4.705	4.740	4.744	4.745	4.755
	เฉลี่ย	4.405	4.530	4.538	4.611	4.647	4.698	4.733	4.736	4.740	4.746
ปริมาณ TBHQ 1,000 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	4.402	4.412	4.420	4.452	4.510	4.532	4.567	4.612	4.623	4.660
	ครั้งที่ 2	4.405	4.420	4.423	4.455	4.521	4.541	4.577	4.615	4.632	4.671
	ครั้งที่ 3	4.407	4.425	4.433	4.461	4.528	4.549	4.589	4.620	4.644	4.688
	เฉลี่ย	4.405	4.419	4.425	4.456	4.520	4.541	4.578	4.616	4.633	4.673
ปริมาณ TBHQ 2,000 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	4.402	4.410	4.422	4.447	4.512	4.522	4.530	4.540	4.565	4.610
	ครั้งที่ 2	4.405	4.415	4.428	4.456	4.515	4.532	4.540	4.558	4.578	4.621
	ครั้งที่ 3	4.407	4.416	4.431	4.462	4.520	4.535	4.545	4.568	4.582	4.632
	เฉลี่ย	4.405	4.414	4.427	4.455	4.516	4.530	4.538	4.555	4.575	4.621

ตารางผนวกที่ 31 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนืดของไบโอดีเซลจากน้ำมันทานตะวัน ที่เติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 2 พีพีเอ็ม และเติมสารต้านอนุมูลอิสระ TBHQ ในปริมาณความเข้มข้น 0-2,000 พีพีเอ็ม

ระยะเวลาในการจัดเก็บ		ค่าความหนืด (cSt)									
(สัปดาห์)	จำนวนการทดลอง	0	14	15	16	17	18	19	20	21	22
ปริมาณ TBHQ 0 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	4.747	4.764	4.783	4.768	4.880	4.945	5.023	5.023	5.040	5.043
	ครั้งที่ 2	4.748	4.779	4.788	4.789	4.882	4.948	5.028	5.024	5.042	5.045
	ครั้งที่ 3	4.749	4.800	4.812	4.815	4.883	4.950	5.031	5.025	5.044	5.050
	เฉลี่ย	4.748	4.781	4.794	4.791	4.882	4.948	5.027	5.024	5.042	5.046
ปริมาณ TBHQ 1,000 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	4.747	4.747	4.750	4.756	4.760	4.778	4.814	4.848	4.898	4.989
	ครั้งที่ 2	4.748	4.756	4.761	4.787	4.769	4.818	4.830	4.890	4.980	4.990
	ครั้งที่ 3	4.749	4.763	4.766	4.812	4.817	4.823	4.856	4.901	4.988	4.995
	เฉลี่ย	4.748	4.755	4.759	4.785	4.782	4.806	4.833	4.880	4.955	4.991
ปริมาณ TBHQ 2,000 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	4.747	4.745	4.752	4.771	4.779	4.788	4.798	4.799	4.902	4.900
	ครั้งที่ 2	4.748	4.747	4.755	4.768	4.785	4.790	4.800	4.813	4.905	4.911
	ครั้งที่ 3	4.749	4.781	4.765	4.785	4.788	4.799	4.815	4.825	4.905	4.912
	เฉลี่ย	4.748	4.758	4.757	4.775	4.784	4.792	4.804	4.812	4.904	4.908

ตารางผนวกที่ 32 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนืดของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน ที่เติมน้ำในปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 1 และเติมสารต้านอนุมูลอิสระ TBHQ ในปริมาณความเข้มข้น 0-2,000 พีพีเอ็ม

ระยะเวลาในการจัดเก็บ		ค่าความหนืด (cSt)									
(สัปดาห์)	จำนวนการทดลอง	0	14	15	16	17	18	19	20	21	22
ปริมาณ TBHQ 0 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	4.192	4.437	4.504	4.519	4.580	4.748	4.760	4.769	4.802	4.814
	ครั้งที่ 2	4.194	4.441	4.510	4.525	4.589	4.754	4.763	4.773	4.810	4.816
	ครั้งที่ 3	4.196	4.450	4.513	4.529	4.592	4.755	4.772	4.779	4.816	4.823
	เฉลี่ย	4.194	4.443	4.509	4.524	4.587	4.752	4.765	4.774	4.809	4.818
ปริมาณ TBHQ 1,000 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	4.192	4.310	4.330	4.412	4.450	4.512	4.566	4.611	4.645	4.780
	ครั้งที่ 2	4.194	4.317	4.335	4.420	4.455	4.518	4.575	4.628	4.656	4.788
	ครั้งที่ 3	4.196	4.325	4.339	4.430	4.462	4.523	4.589	4.632	4.667	4.793
	เฉลี่ย	4.194	4.317	4.335	4.421	4.456	4.518	4.577	4.624	4.656	4.787
ปริมาณ TBHQ 2,000 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	4.192	4.230	4.312	4.344	4.412	4.476	4.511	4.550	4.588	4.740
	ครั้งที่ 2	4.194	4.253	4.320	4.354	4.423	4.487	4.526	4.563	4.594	4.745
	ครั้งที่ 3	4.196	4.261	4.322	4.365	4.433	4.496	4.534	4.576	4.610	4.755
	เฉลี่ย	4.194	4.248	4.318	4.354	4.423	4.486	4.524	4.563	4.597	4.747

ตารางผนวกที่ 33 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนืดของไบโอดีเซลจากน้ำมันสุปุดำ ที่เติมน้ำในปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 1 และเติมสารต้านอนุมูลอิสระ TBHQ ในปริมาณความเข้มข้น 0-2,000 พีพีเอ็ม

ระยะเวลาในการจัดเก็บ		ค่าความหนืด (cSt)									
(สัปดาห์)	จำนวนการทดลอง	0	14	15	16	17	18	19	20	21	22
ปริมาณ TBHQ 0 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	4.401	4.474	4.466	4.566	4.620	4.619	4.765	4.834	4.865	4.915
	ครั้งที่ 2	4.406	4.477	4.473	4.570	4.620	4.620	4.769	4.840	4.869	4.917
	ครั้งที่ 3	4.409	4.482	4.477	4.578	4.628	4.627	4.774	4.848	4.876	4.922
	เฉลี่ย	4.405	4.478	4.472	4.571	4.623	4.622	4.769	4.841	4.870	4.918
ปริมาณ TBHQ 1,000 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	4.401	4.523	4.556	4.575	4.589	4.603	4.620	4.687	4.765	4.890
	ครั้งที่ 2	4.406	4.553	4.573	4.577	4.597	4.612	4.625	4.712	4.798	4.895
	ครั้งที่ 3	4.409	4.563	4.598	4.587	4.605	4.622	4.639	4.745	4.823	4.900
	เฉลี่ย	4.405	4.546	4.576	4.580	4.597	4.612	4.628	4.715	4.795	4.895
ปริมาณ TBHQ 2,000 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	4.401	4.498	4.505	4.555	4.562	4.600	4.625	4.677	4.710	4.865
	ครั้งที่ 2	4.406	4.510	4.512	4.567	4.579	4.611	4.629	4.681	4.715	4.870
	ครั้งที่ 3	4.409	4.523	4.526	4.588	4.583	4.620	4.630	4.693	4.723	4.872
	เฉลี่ย	4.405	4.510	4.514	4.570	4.575	4.610	4.628	4.684	4.716	4.869

ตารางผนวกที่ 34 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนืดของไบโอดีเซลจากน้ำมันทานตะวัน ที่เติมน้ำในปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 1 และเติมสารต้านอนุมูลอิสระ TBHQ ในปริมาณความเข้มข้น 0-2,000 พีพีเอ็ม

ระยะเวลาในการจัดเก็บ		ค่าความหนืด (cSt)									
(สัปดาห์)	จำนวนการทดลอง	0	14	15	16	17	18	19	20	21	22
ปริมาณ TBHQ 0 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	4.746	4.753	4.755	4.753	4.765	4.779	4.779	4.810	4.848	4.896
	ครั้งที่ 2	4.747	4.759	4.762	4.769	4.773	4.795	4.798	4.823	4.852	4.909
	ครั้งที่ 3	4.750	4.762	4.769	4.770	4.785	4.804	4.812	4.835	4.856	4.918
	เฉลี่ย	4.748	4.758	4.762	4.764	4.774	4.793	4.796	4.823	4.852	4.908
ปริมาณ TBHQ 1,000 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	4.746	4.745	4.765	4.768	4.770	4.787	4.800	4.810	4.827	4.834
	ครั้งที่ 2	4.747	4.761	4.776	4.719	4.771	4.810	4.815	4.811	4.845	4.856
	ครั้งที่ 3	4.750	4.766	4.789	4.723	4.775	4.825	4.825	4.832	4.859	4.858
	เฉลี่ย	4.748	4.757	4.777	4.737	4.772	4.807	4.813	4.818	4.844	4.849
ปริมาณ TBHQ 2,000 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	4.746	4.750	4.756	4.760	4.781	4.803	4.811	4.810	4.814	4.820
	ครั้งที่ 2	4.747	4.755	4.761	4.765	4.790	4.808	4.815	4.818	4.815	4.834
	ครั้งที่ 3	4.750	4.759	4.765	4.768	4.795	4.810	4.820	4.822	4.825	4.840
	เฉลี่ย	4.748	4.755	4.761	4.764	4.789	4.807	4.815	4.817	4.818	4.831

ตารางผนวกที่ 35 ผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน ที่เติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 2 พีพีเอ็ม และเติมสารต้านอนุมูลอิสระ TBHQ ในปริมาณความเข้มข้น 0-2,000 พีพีเอ็ม

ระยะเวลาในการจัดเก็บ		ความเป็นกรด (g KOH/g)									
(สัปดาห์)	จำนวนการทดลอง	0	14	15	16	17	18	19	20	21	22
ปริมาณ TBHQ 0 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	0.178	0.186	0.278	0.278	0.28	0.32	0.32	0.322	0.377	0.379
	ครั้งที่ 2	0.178	0.186	0.28	0.28	0.284	0.32	0.322	0.325	0.379	0.379
	ครั้งที่ 3	0.178	0.186	0.282	0.28	0.284	0.324	0.324	0.328	0.38	0.384
	เฉลี่ย	0.178	0.186	0.280	0.279	0.283	0.321	0.322	0.325	0.379	0.381
ปริมาณ TBHQ 1,000 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	0.178	0.186	0.192	0.202	0.215	0.237	0.265	0.310	0.345	0.365
	ครั้งที่ 2	0.178	0.188	0.195	0.205	0.219	0.245	0.270	0.325	0.365	0.368
	ครั้งที่ 3	0.178	0.189	0.199	0.209	0.225	0.268	0.281	0.340	0.369	0.370
	เฉลี่ย	0.178	0.188	0.195	0.205	0.220	0.250	0.272	0.325	0.360	0.368
ปริมาณ TBHQ 2,000 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	0.178	0.188	0.201	0.206	0.220	0.245	0.259	0.279	0.301	0.349
	ครั้งที่ 2	0.178	0.189	0.205	0.210	0.229	0.252	0.266	0.282	0.315	0.355
	ครั้งที่ 3	0.178	0.190	0.206	0.211	0.231	0.265	0.272	0.293	0.325	0.357
	เฉลี่ย	0.178	0.189	0.204	0.209	0.227	0.254	0.266	0.285	0.314	0.354

ตารางผนวกที่ 36 ผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลจากน้ำมันสนดำ ที่เติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 2 พีพีเอ็ม และเติมสารต้านอนุมูลอิสระ TBHQ ในปริมาณความเข้มข้น 0-2,000 พีพีเอ็ม

ระยะเวลาในการจัดเก็บ		ความเป็นกรด (g KOH/g)									
(สัปดาห์)	จำนวนการทดลอง	0	14	15	16	17	18	19	20	21	22
ปริมาณ TBHQ 0 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	0.278	0.279	0.278	0.279	0.28	0.322	0.362	0.373	0.402	0.41
	ครั้งที่ 2	0.279	0.279	0.28	0.281	0.284	0.324	0.373	0.379	0.41	0.413
	ครั้งที่ 3	0.28	0.282	0.286	0.288	0.29	0.328	0.378	0.379	0.412	0.422
	เฉลี่ย	0.279	0.280	0.281	0.283	0.285	0.325	0.371	0.377	0.408	0.415
ปริมาณ TBHQ 1,000 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	0.278	0.280	0.281	0.285	0.295	0.300	0.311	0.320	0.355	0.370
	ครั้งที่ 2	0.279	0.285	0.285	0.289	0.299	0.305	0.315	0.334	0.367	0.376
	ครั้งที่ 3	0.28	0.288	0.289	0.293	0.301	0.310	0.325	0.345	0.372	0.381
	เฉลี่ย	0.279	0.284	0.285	0.289	0.298	0.305	0.317	0.333	0.365	0.376
ปริมาณ TBHQ 2,000 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	0.278	0.277	0.282	0.289	0.299	0.300	0.305	0.310	0.316	0.320
	ครั้งที่ 2	0.279	0.280	0.285	0.293	0.301	0.301	0.306	0.311	0.318	0.325
	ครั้งที่ 3	0.28	0.281	0.288	0.296	0.302	0.302	0.308	0.315	0.320	0.326
	เฉลี่ย	0.279	0.279	0.285	0.293	0.301	0.301	0.306	0.312	0.318	0.324

ตารางผนวกที่ 37 ผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลจากน้ำมันทานตะวัน ที่เติมโลหะทองแดงในปริมาณความเข้มข้น 2 พีพีเอ็ม และเติมสารต้านอนุมูลอิสระ TBHQ ในปริมาณความเข้มข้น 0-2,000 พีพีเอ็ม

ระยะเวลาในการจัดเก็บ		ความเป็นกรด (g KOH/g)									
(สัปดาห์)	จำนวนการทดลอง	0	14	15	16	17	18	19	20	21	22
ปริมาณ TBHQ 0 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	0.233	0.322	0.320	0.325	0.326	0.373	0.368	0.373	0.383	0.416
	ครั้งที่ 2	0.234	0.324	0.325	0.325	0.326	0.373	0.373	0.375	0.385	0.420
	ครั้งที่ 3	0.235	0.326	0.325	0.325	0.328	0.373	0.374	0.378	0.386	0.422
	เฉลี่ย	0.234	0.324	0.323	0.325	0.327	0.373	0.372	0.375	0.385	0.419
ปริมาณ TBHQ 1,000 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	0.233	0.244	0.252	0.265	0.270	0.270	0.275	0.305	0.331	0.335
	ครั้งที่ 2	0.234	0.244	0.256	0.269	0.272	0.276	0.285	0.323	0.335	0.338
	ครั้งที่ 3	0.235	0.244	0.256	0.271	0.275	0.281	0.288	0.335	0.340	0.345
	เฉลี่ย	0.234	0.244	0.255	0.268	0.272	0.276	0.283	0.321	0.335	0.339
ปริมาณ TBHQ 2,000 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	0.233	0.235	0.238	0.240	0.244	0.268	0.280	0.311	0.310	0.320
	ครั้งที่ 2	0.234	0.237	0.240	0.242	0.250	0.277	0.288	0.315	0.320	0.335
	ครั้งที่ 3	0.235	0.244	0.244	0.244	0.251	0.281	0.290	0.320	0.325	0.345
	เฉลี่ย	0.234	0.239	0.241	0.242	0.248	0.275	0.286	0.315	0.318	0.333

ตารางผนวกที่ 38 ผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโอเลอิน ที่เติมน้ำในปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 1 และเติมสารต้านอนุมูลอิสระ TBHQ ในปริมาณความเข้มข้น 0-2,000 พีพีเอ็ม

ระยะเวลาในการจัดเก็บ		ความเป็นกรด (g KOH/g)									
(สัปดาห์)	จำนวนการทดลอง	0	14	15	16	17	18	19	20	21	22
ปริมาณ TBHQ 0 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	0.178	0.220	0.262	0.260	0.262	0.280	0.300	0.320	0.320	0.370
	ครั้งที่ 2	0.178	0.232	0.276	0.277	0.277	0.280	0.324	0.325	0.326	0.379
	ครั้งที่ 3	0.178	0.238	0.288	0.293	0.296	0.298	0.330	0.330	0.328	0.386
	เฉลี่ย	0.178	0.238	0.275	0.277	0.278	0.286	0.318	0.325	0.326	0.378
ปริมาณ TBHQ 1,000 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	0.178	0.205	0.218	0.230	0.249	0.265	0.281	0.301	0.330	0.360
	ครั้งที่ 2	0.178	0.210	0.225	0.239	0.256	0.271	0.288	0.315	0.345	0.371
	ครั้งที่ 3	0.178	0.213	0.235	0.245	0.262	0.278	0.292	0.328	0.352	0.377
	เฉลี่ย	0.178	0.209	0.226	0.238	0.256	0.271	0.287	0.315	0.342	0.369
ปริมาณ TBHQ 2,000 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	0.178	0.200	0.219	0.230	0.245	0.265	0.286	0.305	0.312	0.335
	ครั้งที่ 2	0.178	0.210	0.225	0.239	0.252	0.275	0.295	0.310	0.320	0.337
	ครั้งที่ 3	0.178	0.215	0.232	0.244	0.256	0.285	0.302	0.311	0.332	0.344
	เฉลี่ย	0.178	0.208	0.225	0.238	0.251	0.275	0.294	0.309	0.321	0.339

ตารางผนวกที่ 39 ผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลจากน้ำมันสุญ์ดำ ที่เติมน้ำในปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 1 และเติมสารต้านอนุมูลอิสระ TBHQ ในปริมาณความเข้มข้น 0-2,000 พีพีเอ็ม

ระยะเวลาในการจัดเก็บ		ความเป็นกรด (g KOH/g)									
(สัปดาห์)	จำนวนการทดลอง	0	14	15	16	17	18	19	20	21	22
ปริมาณ TBHQ 0 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	0.278	0.277	0.288	0.318	0.320	0.370	0.377	0.380	0.381	0.396
	ครั้งที่ 2	0.279	0.280	0.292	0.323	0.325	0.379	0.379	0.382	0.384	0.396
	ครั้งที่ 3	0.28	0.282	0.296	0.325	0.330	0.380	0.386	0.384	0.386	0.396
	เฉลี่ย	0.279	0.280	0.292	0.322	0.325	0.376	0.381	0.382	0.384	0.396
ปริมาณ TBHQ 1,000 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	0.278	0.285	0.301	0.335	0.340	0.345	0.355	0.362	0.371	0.380
	ครั้งที่ 2	0.279	0.290	0.321	0.335	0.341	0.352	0.359	0.368	0.375	0.384
	ครั้งที่ 3	0.28	0.296	0.334	0.338	0.344	0.356	0.360	0.372	0.385	0.388
	เฉลี่ย	0.279	0.290	0.319	0.336	0.342	0.351	0.358	0.367	0.377	0.384
ปริมาณ TBHQ 2,000 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	0.278	0.288	0.301	0.305	0.312	0.321	0.328	0.331	0.334	0.335
	ครั้งที่ 2	0.279	0.290	0.302	0.310	0.315	0.325	0.330	0.331	0.335	0.342
	ครั้งที่ 3	0.28	0.299	0.305	0.315	0.320	0.327	0.331	0.335	0.338	0.344
	เฉลี่ย	0.279	0.292	0.303	0.310	0.316	0.324	0.330	0.332	0.336	0.340

ตารางผนวกที่ 40 ผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลจากน้ำมันทานตะวัน ที่เติมน้ำในปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 1 และเติมสารต้านอนุมูลอิสระ TBHQ ในปริมาณความเข้มข้น 0-2,000 พีพีเอ็ม

ระยะเวลาในการจัดเก็บ		ความเป็นกรด (g KOH/g)									
(สัปดาห์)	จำนวนการทดลอง	0	14	15	16	17	18	19	20	21	22
ปริมาณ TBHQ 0 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	0.233	0.322	0.322	0.321	0.372	0.370	0.368	0.410	0.420	0.460
	ครั้งที่ 2	0.234	0.325	0.326	0.326	0.373	0.372	0.372	0.417	0.420	0.468
	ครั้งที่ 3	0.235	0.328	0.329	0.330	0.374	0.376	0.375	0.423	0.420	0.476
	เฉลี่ย	0.234	0.325	0.326	0.326	0.373	0.373	0.372	0.417	0.420	0.468
ปริมาณ TBHQ 1,000 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	0.233	0.240	0.240	0.260	0.272	0.288	0.310	0.320	0.330	0.380
	ครั้งที่ 2	0.234	0.248	0.250	0.266	0.278	0.298	0.322	0.322	0.350	0.390
	ครั้งที่ 3	0.235	0.248	0.255	0.270	0.280	0.300	0.328	0.330	0.361	0.400
	เฉลี่ย	0.234	0.245	0.248	0.265	0.277	0.295	0.320	0.324	0.347	0.390
ปริมาณ TBHQ 2,000 พีพีเอ็ม	ครั้งที่ 1	0.233	0.234	0.235	0.240	0.242	0.255	0.260	0.278	0.310	0.320
	ครั้งที่ 2	0.234	0.235	0.240	0.242	0.250	0.264	0.266	0.285	0.315	0.325
	ครั้งที่ 3	0.235	0.235	0.242	0.245	0.255	0.268	0.270	0.290	0.325	0.330
	เฉลี่ย	0.234	0.235	0.239	0.242	0.249	0.262	0.265	0.284	0.317	0.325

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นางสาวสุกานดา เชิงคำ
เกิดวันที่	วันที่ 23 พฤษภาคม 2529
สถานที่เกิด	ชลบุรี
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (วิศวกรรมเคมี) สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์