

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

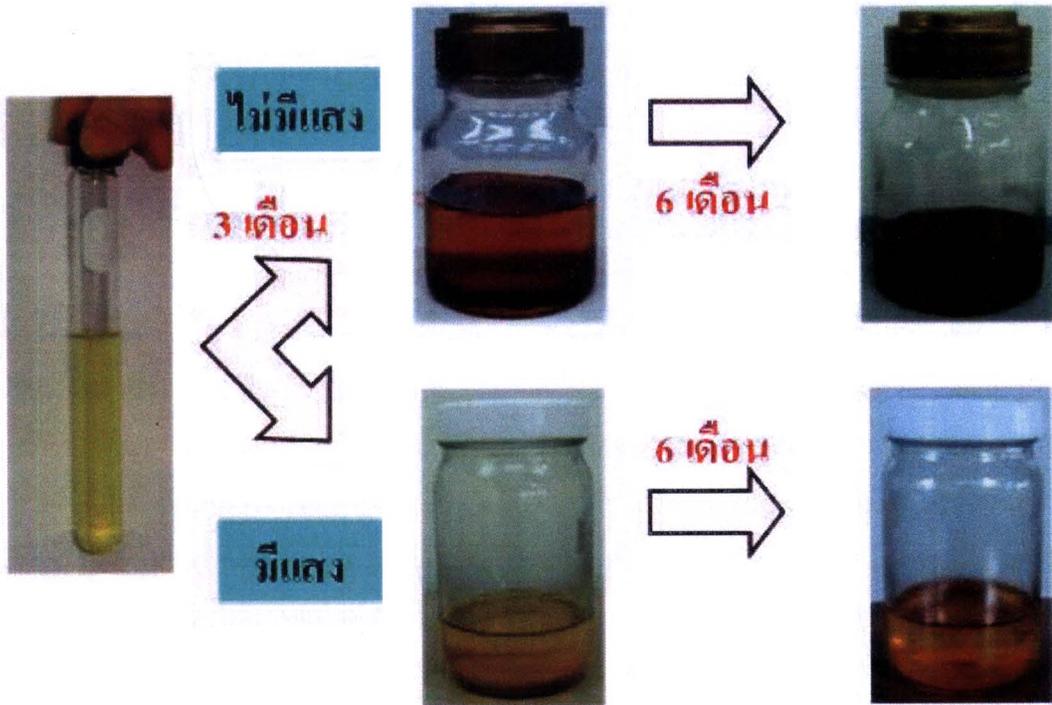
งานวิจัยนี้ศึกษาปริมาณของน้ำมันที่ผลิตได้จากกระบวนการไพโรไลซิสขยะพลาสติก และลักษณะภายนอกโดยเบื้องต้นของน้ำมันที่เปลี่ยนแปลงไป ตลอดจนการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่าง ๆ ทั้งทางด้านกายภาพและทางด้านเคมีของน้ำมันที่เก็บรักษาไว้ในสภาวะที่มีแสง และไม่มีแสงตามระยะเวลาต่าง ๆ โดยในที่นี้จะขอนำเสนอคุณสมบัติทางด้านเคมีก่อนทางด้านกายภาพ ซึ่งผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลทั้งหมด เป็นดังนี้

#### 4.1 ปริมาณของน้ำมันที่ผลิตได้จากกระบวนการไพโรไลซิสขยะพลาสติก

ปริมาณของน้ำมันที่ผลิตได้จากกระบวนการไพโรไลซิสสูงเย็นประเภทพอลิเอธิลีน ชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene; LDPE) โดยใช้คาโบลินเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า จากการไพโรไลซิสทั้งหมดจำนวน 70 ครั้ง (Batch) ผลได้ของน้ำมัน (%Yield) อยู่ในช่วงร้อยละ 61.68-84.60 ซึ่งคิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 71.83 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 4.27

#### 4.2 ลักษณะภายนอกโดยเบื้องต้นของน้ำมันที่ผลิตจากกระบวนการไพโรไลซิสขยะพลาสติก

ลักษณะสีของน้ำมันที่เก็บไว้ในที่ไม่มีแสงและมีแสงด้วยระยะเวลาต่าง ๆ พบว่า น้ำมันที่ผลิตได้ใหม่ ๆ จะมีสีเหลืองอ่อน ในช่วงแรกของการเก็บรักษาน้ำมัน เมื่อนำน้ำมันไปเก็บไว้ในที่ไม่มีแสง สีของน้ำมันจะค่อย ๆ กลายเป็นสีน้ำตาล ชื้นขึ้นเล็กน้อย และเริ่มมีตะกอนอยู่บ้าง และเมื่อระยะเวลาการเก็บมากขึ้น สีของน้ำมันก็จะค่อย ๆ เข้มขึ้นจนกลายเป็นสีน้ำตาลเข้ม ชื้นมากขึ้น และมีตะกอนมากขึ้น ส่วนน้ำมันที่เก็บไว้ในที่มีแสง สีจะค่อย ๆ เปลี่ยนไปจนสุดท้าย กลายเป็นสีเหลืองเข้ม ในช่วงแรกของการเก็บ น้ำมันจะใสมากขึ้น และเริ่มมีตะกอนเกิดขึ้น ในช่วงหลัง น้ำมันจะมีความชื้นมากขึ้น และมีตะกอนอยู่เล็กน้อย ซึ่งปริมาณตะกอนจะเพิ่มขึ้นจากช่วงแรกแต่น้อยกว่าปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นในน้ำมันที่เก็บในที่ไม่มีแสง กล่าวคือ อัตราการเกิดตะกอนในน้ำมันที่เก็บไว้ในที่มีแสงจะช้ากว่าในน้ำมันที่เก็บไว้ในที่ไม่มีแสง สรุปได้ดังตารางที่ 4.1



ภาพที่ 4.1

ความเปลี่ยนแปลงของน้ำมันที่เก็บไว้ในที่ไม่มีแสงและที่มีแสงเป็นระยะเวลา 3 และ 6 เดือน

ตารางที่ 4.1

การเปลี่ยนแปลงลักษณะภายนอกของน้ำมันที่เก็บไว้ในสภาวะที่ไม่มีแสงและมีแสง

ลักษณะภายนอก ของน้ำมัน	เริ่มต้น	ไม่มีแสง		มีแสง	
		3 เดือน	6 เดือน	3 เดือน	6 เดือน
สี	เหลืองอ่อน	น้ำตาล	น้ำตาลเข้ม	เหลือง	เหลืองเข้ม
ความขุ่น	ใส	ขุ่นขึ้น	ขุ่นมากขึ้น	ใสขึ้น	ขุ่นขึ้น
การเกิดตะกอน	ไม่มี	น้อยมาก	มากขึ้น	น้อยมากๆ	มากขึ้น

### 4.3 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านเคมีของน้ำมันที่ผลิตจากกระบวนการไพโรไลซิสของพลาสติก

#### 4.3.1 ค่าไอโอดีน

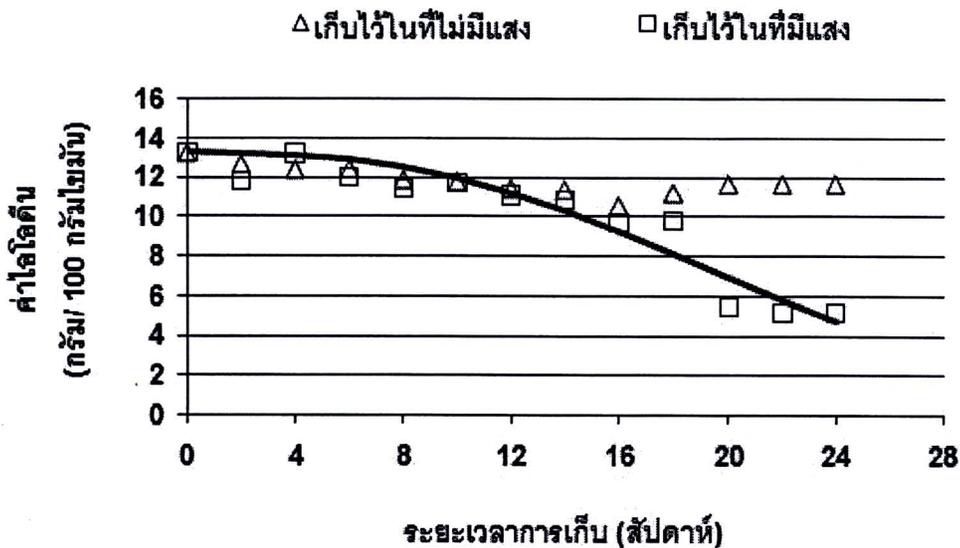
การวิเคราะห์ค่าไอโอดีน ค่าไอโอดีนบ่งบอกถึงจำนวนพันธะคู่ของน้ำมัน จากภาพที่ 4.2 จะเห็นว่า ค่าไอโอดีนของน้ำมันที่เก็บไว้ในที่มีแสงจะมีอัตราการลดลงเร็วกว่าน้ำมันที่เก็บไว้ในที่ไม่มีแสงซึ่งไม่ค่อยเกิดการเปลี่ยนแปลงมากนัก จากการวิเคราะห์พบว่า เมื่อระยะเวลาผ่านไป ค่าไอโอดีนของน้ำมันที่เก็บไว้ในที่มีแสงมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน ซึ่งเกิดจากการเสื่อมสภาพของน้ำมันโดยออกซิเจนในอากาศเข้าทำปฏิกิริยากับไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัวในน้ำมันตรงตำแหน่งพันธะคู่ ซึ่งเรียกปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้พันธะคู่แตกออกเกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (ROOH) ซึ่งเป็นสารประกอบที่ไม่คงสภาพ เมื่อจำนวนพันธะคู่ในโมเลกุลของน้ำมันลดลงจะทำให้ค่าไอโอดีนที่วัดได้มีค่าลดลง (Bouaid et al., 2007)

ภาพที่ 4.2 จึงแสดงให้เห็นว่า แสงส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยการทำปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนและบริเวณที่ไม่อิ่มตัวของโมเลกุลของสาร (Mark et al., 1986) ซึ่งเป็นสาเหตุให้น้ำมันเกิดการเสื่อมสภาพลง

นอกจากนี้ยังสามารถหาความสัมพันธ์ของน้ำมันที่เก็บไว้ในที่มีแสง โดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการเก็บรักษาน้ำมันกับค่าไอโอดีน ซึ่งหาได้จากกราฟที่พล็อตได้จากผลการทดลอง โดยสามารถเขียนเป็นสมการเอ็กซ์โพเนนเชียลได้ตามสมการที่ (1) ดังนี้

$$W_I = (W_I)_0 e^{-at^b} \quad (4.1)$$

โดยที่	$W_I$	=	ค่าไอโอดีน (Iodine Value), g / 100 g fat
	$(W_I)_0$	=	ค่าไอโอดีนตอนเริ่มต้น หรือค่าไอโอดีนของน้ำมันที่ผลิตได้ใหม่, g / 100 g fat
	$t$	=	เวลา, สัปดาห์
	$a$	=	ค่าสัมประสิทธิ์, 0.00027
	$b$	=	ค่าคงที่, 2.60107



ภาพที่ 4.2

การเปลี่ยนแปลงค่าไอโอดีนของน้ำมันที่เก็บไว้ในที่ไม่มีแสงและที่มีแสงในระยะเวลาต่าง ๆ

#### 4.3.2 ค่าเปอร์ออกไซด์

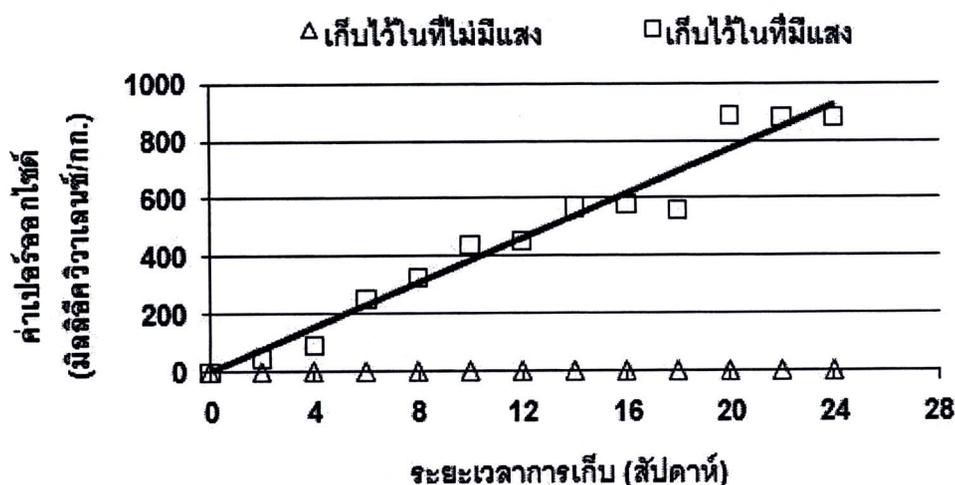
การวิเคราะห์ค่าเปอร์ออกไซด์ ค่าเปอร์ออกไซด์บ่งบอกถึงปริมาณของสารเปอร์ออกไซด์ (ROOH) ที่มีอยู่ในน้ำมัน จากการวิเคราะห์พบว่า เมื่อระยะเวลาผ่านไป การเกิดสารเปอร์ออกไซด์ของน้ำมันที่เก็บไว้ในที่ไม่มีแสงแตกต่างกับน้ำมันที่เก็บไว้ในที่มีแสงเป็นอย่างมาก ค่าเปอร์ออกไซด์ของน้ำมันที่เก็บไว้ในที่ไม่มีแสงแทบจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ เลย สำหรับค่าเปอร์ออกไซด์ของน้ำมันที่เก็บไว้ในที่มีแสงนั้นจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว (Mittelbach et al., 2001; Bouaid et al., 2007) เนื่องจากแสงเป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้เร็วขึ้น ทำให้น้ำมันผ่านขั้นตอนที่เรียกว่าขั้นเหนี่ยวนำ หรือ Induction phase ซึ่งเป็นช่วงเริ่มแรกของการเกิดสารเปอร์ออกไซด์ จนกระทั่งเข้าสู่ขั้นตอน Peroxide formation ได้เร็วกว่าน้ำมันที่ไม่ได้รับแสง เมื่อนำค่าเปอร์ออกไซด์ของน้ำมันทั้งสองที่เกิดขึ้นในระยะเวลาต่าง ๆ มาเขียนกราฟเปรียบเทียบกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.3 จะเห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าเปอร์ออกไซด์ของน้ำมันทั้งสองแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยแนวโน้มของน้ำมันที่เก็บไว้ในที่ไม่มีแสงนั้นจะไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับน้ำมันที่เก็บไว้ในที่มีแสงซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก แสดงให้เห็นว่า น้ำมันที่เก็บไว้ในที่มีแสงมีสารเปอร์ออกไซด์อันเกิดขึ้นจากการเสื่อมสภาพโดยปฏิกิริยา

ออกซิเดชันที่มีมากขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งสอดคล้องกับการที่ปริมาณพันธะคู่ในน้ำมันนั้นลดลงไปเรื่อย ๆ เพื่อไปเกิดเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน ตามที่ได้กล่าวไว้แล้วดังภาพที่ 4.2

นอกจากนี้ยังสามารถหาความสัมพันธ์ของน้ำมันที่เก็บไว้ในที่มีแสง โดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการเก็บรักษาน้ำมันกับค่าเปอร์ออกไซด์ ซึ่งหาได้จากกราฟที่พล็อตได้จากผลการทดลอง โดยสามารถเขียนเป็นสมการเส้นตรงได้ตามสมการที่ (2) ดังนี้

$$P = \delta t \quad (4.2)$$

โดยที่  $P$  = ค่าเปอร์ออกไซด์ (Peroxide Value), g / 100 g fat  
 $\delta$  = ค่าสัมประสิทธิ์, 38.453



ภาพที่ 4.3

การเปลี่ยนแปลงค่าเปอร์ออกไซด์ของน้ำมันที่เก็บไว้ในที่ไม่มีแสงและที่มีแสงในระยะเวลาต่าง ๆ

#### 4.3.3 การวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลของน้ำมัน

การวิเคราะห์โมเลกุลของสารในน้ำมัน สามารถทำได้โดยใช้เครื่อง FT-IR โดยอาศัยเทคนิคที่เรียกว่า Fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopy แสดงผลออกมาเป็นอินฟราเรดสเปกตรัมของสาร พิกที่ เกิดขึ้นจะบอกถึงโครงสร้างโมเลกุลของสาร โดยการสั้นของ



พันธะแต่ละแบบก็จะมีลักษณะเฉพาะของพีคที่แตกต่างกันออกไป รวมถึงปริมาณพื้นที่ใต้กราฟของแต่ละพีคยังสามารถบอกความมากน้อยของจำนวนพันธะนั้น ๆ ได้อย่างคร่าว ๆ อีกด้วย

จากการวิเคราะห์ น้ำมันที่ผลิตได้ใหม่ซึ่งยังไม่มีอายุการเก็บรักษา แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมดังภาพที่ 4.4 จะเห็นได้ว่า น้ำมันที่ผลิตได้ใหม่นี้ แสดงพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น 2925, 1464, 1378, 966 และ 722 ซม.<sup>-1</sup> ซึ่งแสดงถึงชนิดของพันธะเคมีในโมเลกุลน้ำมันได้ ดังนี้

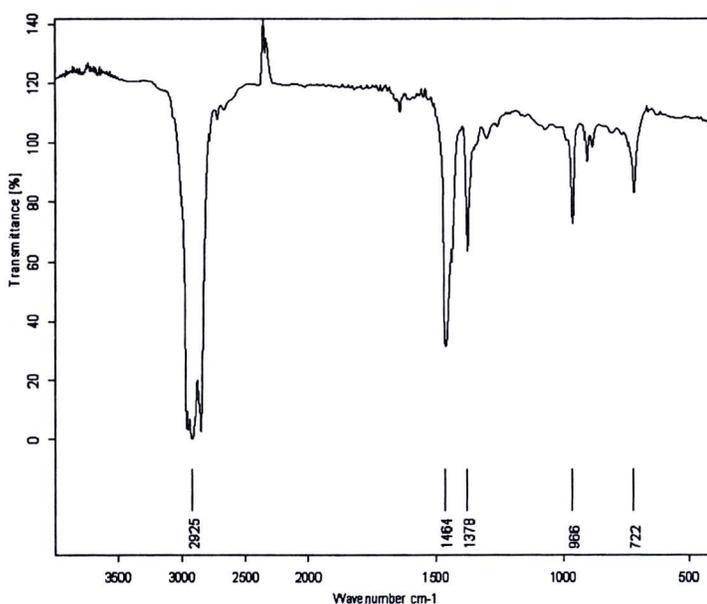
- 2925 แสดงถึงพันธะ  $sp^3$  C-H stretching ของสารประกอบแอลเคนหรือสารประกอบที่มีหมู่แอลคิล
- 1464 แสดงถึงพันธะ C-H bending ของ  $CH_2$  ซึ่งเกิดการเคลื่อนที่ในระนาบเดียวกัน (in-plane bending) ในรูปแบบ scissoring ของสารประกอบแอลเคน
- 1378 แสดงถึงพันธะ C-H bending ของ  $CH_3$  ( $CH_3$  deformation) ของสารประกอบแอลเคน
- 966 แสดงถึงพันธะ C-H bending ของ  $-CH=CH-$  (trans-disubstituted alkenes) ของสารประกอบแอลคีน
- 722 แสดงถึงพันธะ C-H bending ของ  $-CH=CH-$  (cis-disubstituted alkenes) ของสารประกอบแอลคีน

เมื่อนำน้ำมันที่เก็บไว้ในที่ไม่มีแสงเป็นเวลา 45 สัปดาห์ ไปทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR จะได้อินฟราเรดสเปกตรัมของน้ำมันที่เก็บไว้ในที่ไม่มีแสงเป็นระยะเวลา 45 สัปดาห์ แสดงไว้ดังภาพที่ 4.5 น้ำมันที่เก็บไว้ในที่ไม่มีแสงนี้แสดงพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น 2924, 1464, 1378, 966 และ 722 ซม.<sup>-1</sup> ซึ่งค่าทั้งหมดนี้เป็นค่าในช่วงของเลขคลื่นเดียวกันกับค่าที่เกิดขึ้นจากน้ำมันที่ผลิตได้ใหม่

ส่วนน้ำมันที่เก็บไว้ในที่มีแสงเป็นเวลา 45 สัปดาห์ เมื่อนำไปทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR จะได้อินฟราเรดสเปกตรัมของน้ำมันที่เก็บไว้ในที่มีแสงเป็นระยะเวลา 45 สัปดาห์ แสดงไว้ดังภาพที่ 4.6 น้ำมันที่เก็บไว้ในที่มีแสงนี้แสดงพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3442, 2926, 1714, 1464, 1378, 967 และ 722 ซม.<sup>-1</sup> จะเห็นว่า นอกจากพีคที่เกิดขึ้นในช่วงของเลขคลื่นเดียวกันกับพีคที่เกิดขึ้นจากน้ำมันที่ผลิตได้ใหม่และน้ำมันที่เก็บไว้ในที่ไม่มีแสงตามที่ได้กล่าวมาแล้วก่อนหน้านี้ ยังพบว่า อินฟราเรดสเปกตรัมมีพีคใหม่เกิดขึ้นมา นั่นคือ ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3442, 1714 และ 1175 ซม.<sup>-1</sup> ซึ่งแสดงถึงชนิดของพันธะเคมีในโมเลกุลน้ำมันได้ ดังนี้

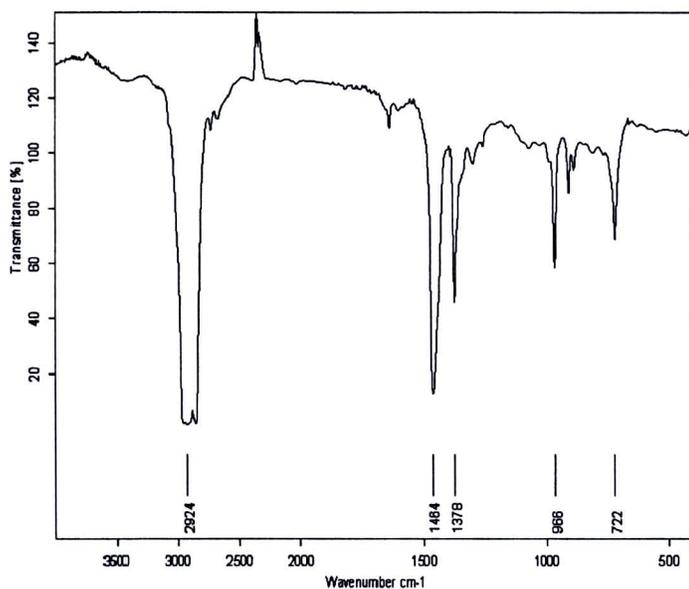
- 3442 แสดงถึงพันธะ O-H stretching (Intermolecular H-bonds) เป็นหมู่ไฮดรอกซิลที่เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลกับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลอื่น โดยในที่นี้แสดงถึงพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของน้ำ ซึ่งโมเลกุลของน้ำที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลจากการสลายตัวของสารประกอบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
- 1714 แสดงถึงพันธะ C=O stretching ของคีโตน (Ketone) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในน้ำมัน (Dantas, 2011)
- 1175 แสดงถึงพันธะ C-O stretching ของอีเทอร์ (Ether) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการออกซิเดชันที่เกิดขึ้นภายในน้ำมัน โดยจะเกิดขึ้นในขั้นยุติ (Termination) ซึ่งจะได้กล่าวถึงในรายละเอียดต่อไป

จะเห็นว่าผลการวิเคราะห์ที่ได้นี้ สอดคล้องกับการวิเคราะห์ค่าเปอร์ออกไซด์ที่ตรวจพบว่า มีสารเปอร์ออกไซด์เกิดขึ้นในน้ำมันที่เก็บไว้ในที่มีแสง โดยจะได้กล่าวถึงรายละเอียดและปฏิกิริยาทางเคมีต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นภายในน้ำมันตามลำดับในหัวข้อที่ 4.4.2



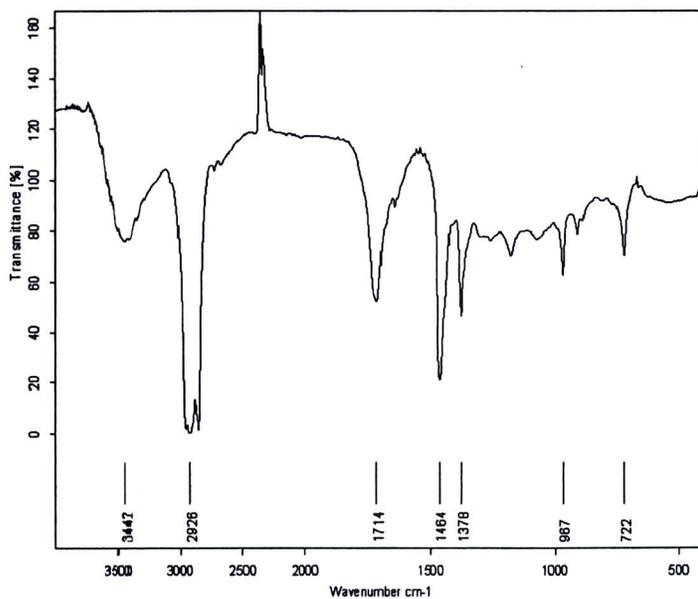
ภาพที่ 4.4

อินฟราเรดสเปกตรัมของน้ำมันที่ผลิตได้ใหม่



ภาพที่ 4.5

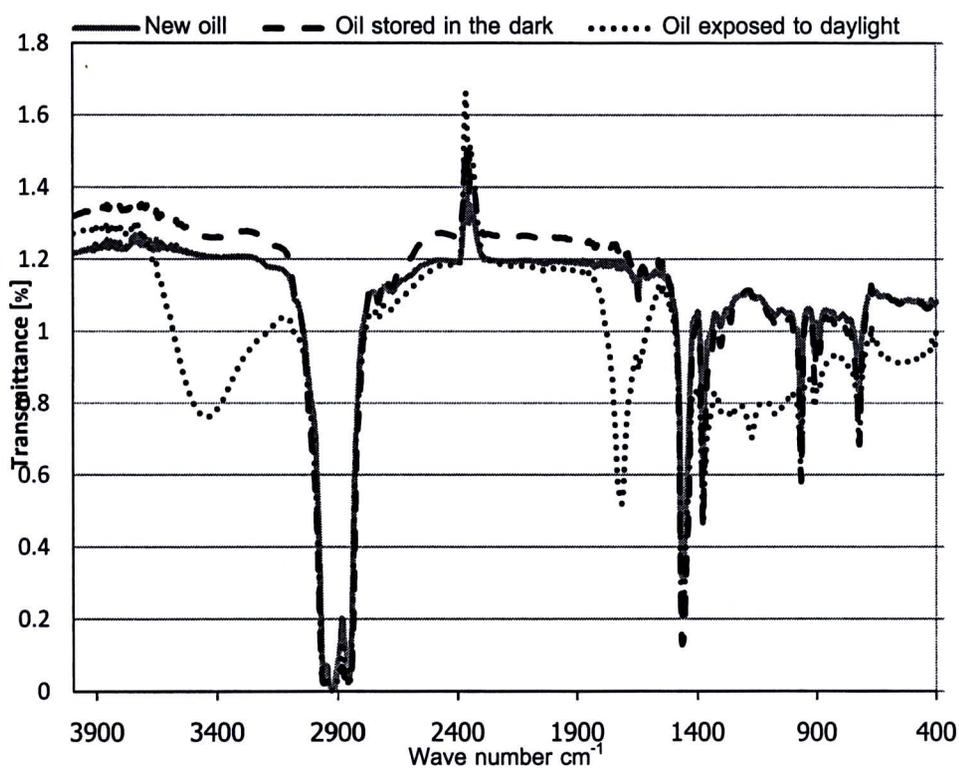
อินฟราเรดสเปกตรัมของน้ำมันที่เก็บไว้ในที่ไม่มีแสงเป็นระยะเวลา 45 สัปดาห์



ภาพที่ 4.6

อินฟราเรดสเปกตรัมของน้ำมันที่เก็บไว้ในที่มีแสงเป็นระยะเวลา 45 สัปดาห์

เมื่อนำอินฟราเรดสเปกตรัมของน้ำมันที่ผลิตได้ใหม่ น้ำมันที่เก็บไว้ในที่ไม่มีแสง และ น้ำมันที่เก็บไว้ในที่มีแสงมาเปรียบเทียบกัน โดยนำเส้นกราฟจากภาพที่ 4.4, 4.5 และ 4.6 มาซ้อนทับกัน ดังแสดงไว้ในภาพที่ 4.7 จะเห็นการเปรียบเทียบการเกิดพีคของน้ำมันแต่ละตัวอย่างได้ชัดเจนขึ้น



ภาพที่ 4.7

เปรียบเทียบระหว่างอินฟราเรดสเปกตรัมของน้ำมันที่ผลิตได้ใหม่, น้ำมันที่เก็บไว้ในที่ไม่มีแสง และน้ำมันที่เก็บไว้ในที่มีแสง ซึ่งมีอายุการเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 45 สัปดาห์

## ตารางที่ 4.2

วิเคราะห์การดูดกลืนสัญญาณอินฟราเรดที่ตรวจพบในตัวอย่างน้ำมันที่นำมาทำการทดสอบ

เลขคลื่น (cm. <sup>-1</sup> )	ชนิดของพันธะเคมีในโมเลกุลน้ำมัน
3442	O-H stretching (Intermolecular H-bonds)
2926-2924	sp <sup>3</sup> C-H stretching
1714	C=O stretching (Ketone)
1464	C-H bending ของ CH <sub>2</sub> (scissoring)
1378	C-H bending ของ CH <sub>3</sub> (CH <sub>3</sub> deformation)
967-966	C-H bending ของ -CH=CH- (trans-disubstituted alkenes)
722	C-H bending ของ -CH=CH- (cis-disubstituted alkenes)

#### 4.4 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านกายภาพของน้ำมันที่ผลิตจากกระบวนการไพโรไลซิสขยะพลาสติก

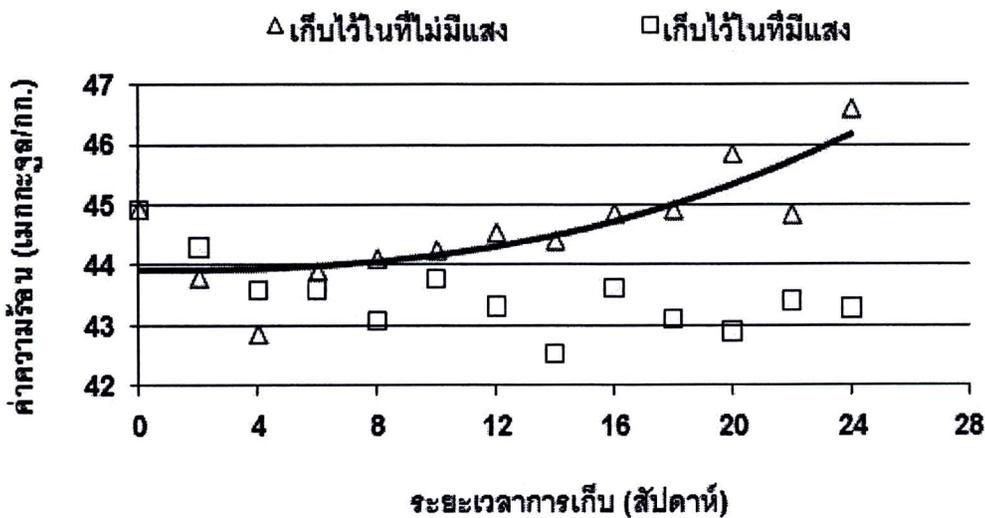
##### 4.4.1 ค่าความร้อน

การวิเคราะห์ค่าความร้อน ค่าความร้อนเป็นค่าพลังงานที่ปล่อยออกมาในระหว่างการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง 1 กรัม จากภาพที่ 4.8 พบว่า เมื่อระยะเวลาผ่านไป ค่าความร้อนของน้ำมันที่เก็บไว้ในที่ไม่มีแสงนั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากโมเลกุลที่ไม่อิ่มตัวโดยเฉพาะสารแอลฟา-โอเลฟินส์ที่อยู่ภายในน้ำมันเกิดปฏิกิริยาการรวมตัวกันแบบพอลิเมอไรเซชัน (ศิริรัตน์ จิตการคำ, 2551) ทำให้เกิดเป็นโมเลกุลที่มีสายโซ่ยาวมากขึ้นหรือมีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่ขึ้น เป็นผลทำให้จำนวนคาร์บอนในโมเลกุลมากขึ้น ค่าความร้อนของน้ำมันจึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น (Demirbag, 1998; Knothe, 2005) ส่วนค่าความร้อนของน้ำมันที่เก็บไว้ในที่มีแสงนั้นไม่ค่อยเกิดการเปลี่ยนแปลงมากนัก การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของน้ำมันที่เก็บไว้ในที่มีแสงอาจเป็นผลจากปัจจัยด้านอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมที่ใช้เก็บรักษาน้ำมันหรือความร้อน (Thermal) นั้นเอง ซึ่งอาจส่งผลให้น้ำมันมีค่าความร้อนลดลงได้ (Lin, 2010) ดังนั้น จากการวิเคราะห์จะเห็นว่า การเก็บน้ำมันไม่ให้ถูกแสงนั้น มีผลทำให้น้ำมันมีค่าความร้อนเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจน

นอกจากนี้ยังสามารถหาความสัมพันธ์ของน้ำมันที่เก็บไว้ในที่ไม่มีแสง โดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการเก็บรักษาน้ำมันกับค่าความร้อน ซึ่งหาได้จากกราฟที่พล็อตได้จากผลการทดลอง โดยสามารถเขียนเป็นสมการเอ็กซ์โพเนนเชียลได้ตามสมการที่ (3) ดังนี้

$$Q = Q_0 e^{\alpha t^\beta - \gamma} \quad (4.3)$$

- โดยที่
- $Q$  = ค่าความร้อน ( Heating / Calorific Value ), MJ/kg
  - $Q_0$  = ค่าความร้อนตอนเริ่มต้น หรือค่าความร้อนของน้ำมันที่ผลิตได้ใหม่, MJ/kg
  - $\alpha$  = ค่าสัมประสิทธิ์,  $1.795 \times 10^{-5}$
  - $\beta$  = ค่าคงที่, 2.498
  - $\gamma$  = ค่าคงที่, 0.023



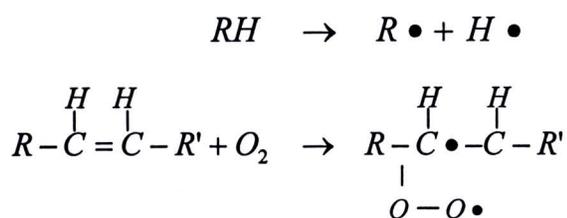
ภาพที่ 4.8

การเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนของน้ำมันที่เก็บไว้ในที่ไม่มีแสงและที่มีแสงในระยะเวลาต่าง ๆ

#### 4.4.2 ค่าความหนืดเชิงจลน์ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

การวิเคราะห์ค่าความหนืดเชิงจลน์ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เนื่องจากสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (ROOH) ซึ่งเป็นสารผลิตภัณฑ์ขั้นต้นของปฏิกิริยาออกซิเดชันในน้ำมัน สารประกอบเหล่านี้เป็นสารประกอบที่ไม่คงสภาพ อาจเกิดปฏิกิริยาฟิชชัน (Fission) กลายสภาพเป็นสารที่มีโมเลกุลเล็กลง หรืออาจมาจับตัวรวมกัน (Combination) กลายเป็นพอลิเมอร์ต่อไป จากภาพที่ 4.9 พบว่า เมื่อระยะเวลาผ่านไป น้ำมันที่เก็บไว้ในที่ไม่มีแสงมีค่าความหนืดเชิงจลน์ที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องมาจากเกิดปฏิกิริยาการรวมตัวกันแบบพอลิเมอไรเซชัน (Repolymerization) ของสารประกอบที่ไม่อิ่มตัวซึ่งมีอยู่มากในน้ำมัน ทำให้โมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้น (ศิริรัตน์ จิตการคำ, 2551) กอปรกับสารประกอบจำพวก trans-disubstituted alkenes ที่ตรวจวัดได้จากเครื่อง FT-IR สารกลุ่มดังกล่าวนี้สามารถมีผลทำให้น้ำมันมีลักษณะขุ่นขึ้น ความหนืดเชิงจลน์จึงสูงขึ้น (Knothe, 2005; <http://opac.tistr.or.th/Multimedia/STJN/4904/4904-10.pdf>, 2010) ส่วนน้ำมันที่เก็บไว้ในที่มีแสงมีแนวโน้มของค่าความหนืดเชิงจลน์ลดลงเรื่อย ๆ โดยจะมีอัตราการลดลงค่อย ๆ น้อยลง จนกระทั่งสัปดาห์ที่ 20 ค่าความหนืดเชิงจลน์เริ่มที่จะสูงขึ้น สาเหตุมาจากสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันสามารถแตกตัวให้อนุมูลอิสระได้ ทำให้มีจำนวนอนุมูลอิสระเพิ่มมากขึ้นในน้ำมัน ซึ่งสามารถดูดซึมเอาออกซิเจนจากอากาศจึงเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องไปเรื่อย ๆ เมื่ออนุมูลอิสระมีอยู่เป็นจำนวนมากและทำปฏิกิริยากันเอง จะเกิดเป็นสารประกอบใหม่ที่ไม่ใช้อนุมูลอิสระและมีความคงตัว ซึ่งส่งผลให้ปฏิกิริยาต่อเนื่องยุติลงได้ กลไกที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้แบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอน (Singh et al., 2008) ดังนี้

ขั้นเริ่มต้น (Initiation) :

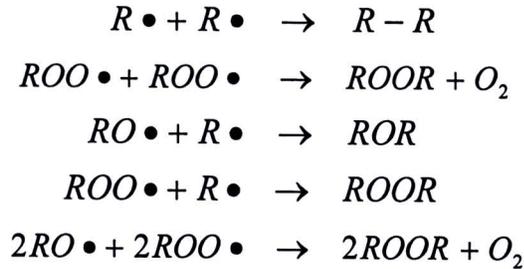


ขั้นเพิ่มจำนวน (Propagation) :





ขั้นยุติ (Termination) :



โดยอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นในช่วง 16 สัปดาห์แรกนั้น สามารถทำปฏิกิริยาเกิดเป็นโมเลกุลสายโซ่สั้น อาทิ อีเทอร์ คีโตน เป็นต้น ทำให้ค่าความหนืดเชิงจลน์ในช่วงแรกนี้มีค่าลดลงอย่างชัดเจน ในเวลาต่อมา อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นนั้นมีมากเพียงพอที่จะเกิดเป็นสารพอลิเมอร์ที่มีสายโซ่ยาวหรือมีมวลโมเลกุลสูงมากพอที่จะทำให้ค่าความหนืดเชิงจลน์ของน้ำมันกลับกลายมามีค่าเพิ่มสูงขึ้น (Mittelbach et al., 2001; Knothe., 2005; Bouaid et al., 2007) โดยจะเห็นได้จากค่าความหนืดเชิงจลน์ที่วัดได้ในสัปดาห์ที่ 20 ทั้งนี้เนื่องมาจากแสงไปช่วยเร่งให้โมเลกุลของไขมันเกิดการแตกพันธะคู่ออกแล้วเกิดการรวมตัวกับออกซิเจน นำไปสู่การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เนื่องจากค่าความหนืดเชิงจลน์ของน้ำมันสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ จึงทำให้เป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการใช้ของน้ำมัน

นอกจากนี้ยังสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการเก็บรักษาน้ำมันกับค่าความหนืดเชิงจลน์จากกราฟที่พล็อตได้จากผลการทดลอง ทำให้สามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ได้ ดังต่อไปนี้

สำหรับน้ำมันที่เก็บไว้ในที่ไม่มีแสง ค่าความหนืดเชิงจลน์จะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ทำให้สามารถเขียนเป็นสมการเส้นตรงได้ตามสมการที่ (4) ดังนี้

$$v_d = \phi t + \psi \quad (4.4)$$

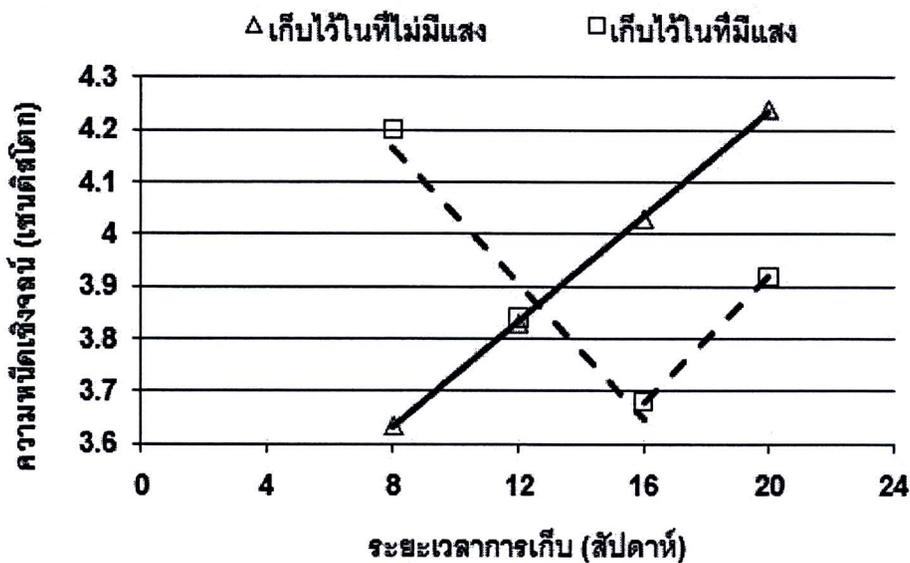
โดยที่  $v_d$  = ค่าความหนืดเชิงจลน์ (Kinematics Viscosity), cSt  
 $\phi$  = ค่าสัมประสิทธิ์, 0.0504

$$\psi = \text{ค่าคงที่, } 3.2285$$

สำหรับน้ำมันที่เก็บไว้ในที่มีแสง ในช่วง 16 สัปดาห์แรกนั้น ค่าความหนืดเชิงจลน์จะมีแนวโน้มลดลง สามารถเขียนเป็นสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ (5) แต่ในช่วงสัปดาห์ต่อมา ค่าความหนืดเชิงจลน์จะเริ่มมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

$$v_t = -\sigma t + \tau \tag{4.5}$$

- โดยที่
- $v_t$  = ค่าความหนืดเชิงจลน์ (Kinematics Viscosity), cSt
  - $\sigma$  = ค่าสัมประสิทธิ์, 0.065
  - $\tau$  = ค่าคงที่, 4.6867



ภาพที่ 4.9

การเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดเชิงจลน์ที่อุณหภูมิ 40 °C ของน้ำมันที่เก็บไว้ในที่ไม่มีแสงและที่มีแสงในระยะเวลาต่าง ๆ

#### 4.4.3 สี ความขุ่น และการเกิดตะกอน

ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของ สี ความขุ่น และการเกิดตะกอนของน้ำมัน ซึ่งได้สรุปไว้ดังตารางที่ 4.1 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้ น้ำมันที่เก็บไว้ในที่ไม่มีแสงเกิดการรวมตัวกันขององค์ประกอบภายในน้ำมัน ทำให้โมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้น บางส่วนจึงเกิดเป็นตะกอนตกลงมา บางส่วนยังคงลอยอยู่ในน้ำมันจึงมีผลทำให้น้ำมันมีลักษณะขุ่นขึ้น และยังเป็นผลทำให้น้ำมันมีสีที่เข้มขึ้นอีกด้วย (ศิริรัตน์ จิตการคำ, 2551) กอปรกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปคโตรสโคปี ซึ่งพบว่า ภายในน้ำมันที่ผลิตได้นั้นมีสารประกอบจำพวก Disubstituted alkenes เป็นส่วนประกอบ ทำให้น้ำมันเกิดการเปลี่ยนแปลงของสี โดยเฉพาะสารประกอบจำพวก trans-disubstituted alkenes ซึ่งนอกจากจะส่งผลกระทบต่อสีของน้ำมันแล้ว ยังมีผลทำให้น้ำมันมีลักษณะขุ่นขึ้นด้วย ความหนืดเชิงจลน์จึงสูงขึ้น (<http://opac.tistr.or.th/Multimedia/STJN/4904/4904-10.pdf>, 2010) ในการที่สารประกอบอินทรีย์มีส่วนของโครงสร้างที่ทำให้มองเห็นเป็นสี ซึ่งเรียกว่า โครโมฟอร์ (Chromophore) จะสามารถทำให้อุดกสีแสงได้ในช่วงความยาวคลื่นมากกว่าปกติ ซึ่งโดยปกติสารประกอบอินทรีย์จะสามารถดูดกลืนแสงได้ในช่วงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet light) เท่านั้น แต่เมื่อมีโครโมฟอร์เป็นองค์ประกอบจะทำให้สามารถดูดกลืนในช่วงแสงที่มองเห็นได้ (Visible light) อีกด้วย โครโมฟอร์ส่วนมากจะมีพันธะไม่อิ่มตัว การที่มีพันธะไม่อิ่มตัวนี้ ทำให้น้ำมันสามารถดูดกลืนรังสีหรือแสงได้ เมื่อน้ำมันดูดกลืนรังสีหรือแสงเข้าไปก็จะไปทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่หรือเปลี่ยนสถานะไปสู่สถานะกระตุ้น (Excited state) เกิดปฏิกิริยาเคมีต่อไปได้ เป็นผลทำให้สีของน้ำมันเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นการมีพันธะคู่หรือสารประกอบแอลคีนที่มากขึ้น มีผลทำให้อุดกสีแสงได้มากขึ้นหรือมีสีเข้มขึ้นนั่นเอง ([http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/color-light/page3\\_4.html](http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/color-light/page3_4.html), 2010) สำหรับการวิเคราะห์ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปคโตรสโคปีในน้ำมันที่เก็บไว้ในที่มีแสง พบว่า นอกจากจะมีสารประกอบจำพวก Disubstituted alkenes อยู่แล้ว ยังมีสารประกอบกลุ่มคาร์บอนิล (C=O) ในหมู่ของคีโตน ซึ่งจัดเป็นโครโมฟอร์อยู่ด้วย จึงทำให้น้ำมันที่เก็บไว้ในที่มีแสงมีสีเข้มขึ้นเมื่อเทียบกับน้ำมันที่ผลิตได้ใหม่ กอปรกับในช่วงแรกของการเก็บน้ำมันไว้ในที่มีแสง ได้เกิดปฏิกิริยาขึ้นภายในน้ำมันจนเกิดเป็นสารโมเลกุลสายโซ่สั้น จึงส่งผลทำให้น้ำมันใสมากขึ้นในช่วงแรกและเริ่มมีตะกอนเกิดขึ้น แต่เมื่อระยะเวลาการเก็บมากขึ้นปฏิกิริยาดำเนินไป ทำให้ภายในน้ำมันเกิดเป็นสารพอลิเมอร์ที่มีสายโซ่ยาวหรือมีมวลโมเลกุลสูงมากพอ จึงทำให้น้ำมันที่เก็บไว้ในที่มีแสงในช่วงหลังมีลักษณะขุ่นขึ้น และเกิดมีตะกอนเพิ่มมากขึ้น (Mittelbach et al., 2001; Bouaid et al., 2007)