

การผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว

ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสต้นแบบ

PRODUCTION OF LIQUID FUEL FROM USED LUBE OIL

BY PROTOTYPE PYROLYSIS REACTOR



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2556

KMITL-2013-SC-M-016-041

การผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว

ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสต้นแบบ

PRODUCTION OF LIQUID FUEL FROM USED LUBE OIL

BY PROTOTYPE PYROLYSIS REACTOR



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2556

KMITL-2013-SC-M-016-041

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**PRODUCTION OF LIQUID FUEL FROM USED LUBE OIL
BY PROTOTYPE PYROLYSIS REACTOR**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN ENVIRONMENTAL CHEMISTRY
FACULTY OF SCIENCE**

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2013

KMITL-2013--SC-M-016-041

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2013

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยเครื่องไพโรไลซิส
ต้นแบบ

Production of Liquid Fuel from Used Lube Oil by Prototype
Pyrolysis Reactor

นักศึกษา

นางสาววิสาข์ มานะสมบุรณ์พันธ์

รหัสประจำตัว

51609854

ปริญญา

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

เคมีสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ผศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์	
ดร.ณัฐวุฒิ เริงขัน	
ดร.เสาวภาค สุขตระกูลเวศ	
ผศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ 4 ตุลาคม พ.ศ. 2556 เวลา 09.30 - 12.00 น.

สถานที่สอบ ณ ห้อง 502 ชั้น 5 อาคารจุฬารามวลัยลักษณ์ 1

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.สุวรรณี จรรยาพูน)

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่ 28 เดือน ๑๐ พ.ศ. 56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสต้นแบบ
นักศึกษา	นางสาววิสาข์ มานะสมบูรณ์พันธ์
รหัสประจำตัว	51609854
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขา	เคมีสิ่งแวดล้อม
พ.ศ.	2556
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วในการผลิตเชื้อเพลิงเหลวโดยใช้เครื่องไพโรไลซิสต้นแบบ ทดลองโดยไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว 1 ลิตรในเครื่องไพโรไลซิสที่มีการกวนอย่างต่อเนื่อง 60 รอบต่อนาที ภายใต้สภาวะสุญญากาศ ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณเชื้อเพลิงเหลว โดยแปรค่าอุณหภูมิที่ 200, 300, 350, 400, 500 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนที่ 0.1, 0.45, 0.75, 1.0 ลิตรต่อนาที และเวลาที่ใช้ในการไพโรไลซิส 1, 2, 3 ชั่วโมง วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีโดยใช้วิธี ASTM และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิงเหลวและน้ำมันหล่อลื่นที่เหลือด้วย GC-MS จากผลการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว คือ ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 0.45 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ได้ผลิตผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว 54.53% โดยปริมาตร จากผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี พบว่าเชื้อเพลิงเหลวมีค่าความร้อนสูง และมีค่าจุดวาบไฟ ค่าความหนืด ค่าซัลเฟอร์ ปริมาณน้ำและตะกอน และปริมาณเถ้าลดลงจากค่าของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิงด้วย GC-MS พบว่าเชื้อเพลิงเหลวที่ได้มีองค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอนชนิดเบา อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน และ PAHs สูงกว่าค่าของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว จากการคำนวณจุดคุ้มทุนของการไพโรไลซิสพบว่าได้กำไร 2.80 บาทต่อลิตร

คำสำคัญ : กระบวนการไพโรไลซิส, น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว, เชื้อเพลิงเหลว

Thesis Title	Production of liquid fuel from used lube oil by prototype pyrolysis reactor
Student	Wisa Manasomboonphan
Student ID	51609854
Degree	Master of Science
Program	Environmental Chemistry
Year	2013
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Suwannee Junyapoon

ABSTRACT

This thesis studied a pyrolysis of waste lube oil to produce liquid fuel using a prototype pyrolysis reactor. The experiment was carried out in a stirred tank reactor at 60 rpm under vacuum conditions. Factors affecting on the yield of liquid fuel were investigated by varying pyrolytic temperatures at 200, 300, 350, 400, 500 °C, purge nitrogen gas flow rates at 0.1, 0.45, 0.75, 1.0 L/min and pyrolytic times at 1, 2, 3 hrs. Physical and chemical characteristics of the obtained liquid fuel and the remained waste lube oil were analyzed using ASTM methods and their chemical compositions were examined by GC-MS. The experimental results showed that pyrolytic temperature at 350 °C, nitrogen gas flow rate at 0.45 L/min and pyrolytic time for 2 hours were the optimum conditions for producing liquid fuel from used lube oil. 54.53 % by vol of liquid fuel were obtained from this study. It was found that liquid fuel contained high heating value. Flash point, viscosity, sulfur content, water and sediment content and ash content of liquid fuel were less than those of used lube oil. Components of liquid fuel contained more light hydrocarbons, aromatic hydrocarbons, PAHs than those of used lube oil. According to break-even point calculation, recycling used lube oil to liquid fuel earned a profit of 2.80 bath/Lit

Keywords : pyrolysis, waste lube oil, liquid fuel

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ดังนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน อาจารย์ประจำสาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำ และคำปรึกษาอย่างใกล้ชิด และเสนอแนะแนวทางแก้ปัญหา รวมทั้งตรวจแก้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้หลายรอบเพื่อให้เกิดความสมบูรณ์เพิ่มขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชมนพูนุท ไชยรักษ์ และดร.ณัฐวุฒิ เชิงชั้น อาจารย์ประจำสาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้คำแนะนำ และคำปรึกษา เสนอแนะแนวทางแก้ปัญหา และช่วยตรวจสอบความสมบูรณ์ของวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ ดร.เสาวภาค สุขตระกูลเวช อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้ให้คำแนะนำและคำปรึกษา และเสนอแนะแนวทางแก้ปัญหของวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ประจำสาขาวิชาเคมี รวมทั้งเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือบริการวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความร่วมมือ และอำนวยความสะดวกในการทำการทดลองให้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้มอบทุนวิจัยในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณบริษัท ที โอ อาร์ อินดัสตรี จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว และทุนวิจัยบางส่วน เป็นอย่างยิ่ง ทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำ ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และบุคคลในครอบครัวที่ได้ให้ความช่วยเหลือทุกๆด้าน รวมทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ ที่ให้กำลังใจตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์

นางสาววิสาข์ มานะสมบูรณ์พันธ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	X

บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 น้ำมันหล่อลื่น.....	4
2.1.1 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน.....	4
2.1.2 กระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่น.....	6
2.1.3 คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน.....	8
2.1.4 กลุ่มของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน.....	9
2.1.5 ปริมาณการใช้ น้ำมันหล่อลื่น.....	9
2.1.6 มาตรฐานน้ำมันหล่อลื่น.....	10
2.1.7 การใช้ประโยชน์ของน้ำมันหล่อลื่น.....	12
2.2 น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว.....	13
2.2.1 คุณสมบัติ น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว.....	13
2.2.2 ผลกระทบของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว.....	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา แะ IV ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.3	กระบวนการนำน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่.....	14
2.3	กระบวนการไฟโรไลซิส.....	16
2.3.1	สถานะที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ในกระบวนการไฟโรไลซิส.....	17
2.3.2	ปฏิกิริยาในการไฟโรไลซิส.....	18
2.3.3	ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์ไฟโรไลซิส.....	18
2.4	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	24
บทที่ 3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	27
3.1	สารเคมีและอุปกรณ์.....	27
3.2	ตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว.....	28
3.3	วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	29
3.3.1	การสร้างเครื่องปฏิกรณ์ไฟโรไลซิส.....	30
3.3.2	ศึกษาสถานะและการสลายตัวของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วโดย TGA.....	32
3.3.3	ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการไฟโรไลซิส.....	32
3.3.4	ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วและเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไฟโรไลซิส.....	33
3.3.5	การคำนวณหาจุดคุ้มทุน.....	34
บทที่ 4	ผลการวิจัยและการอภิปราย.....	36
4.1	ตั้งปฏิกรณ์ไฟโรไลซิส.....	36
4.2	ผลการสลายตัวของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยTGA.....	37
4.3	ผลของการศึกษาสถานะที่เหมาะสมในไฟโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว.....	38
4.3.1	ผลของอุณหภูมิและอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนต่อปริมาณเชื้อเพลิงเหลวที่ได้.....	38
4.3.2	ผลของเวลาในการไฟโรไลซิสต่อปริมาณเชื้อเพลิงเหลวที่ได้.....	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ V ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วและ ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้.....	41
4.4.1 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วและเชื้อเพลิงเหลวที่ได้ จากการไพโรไลซิส.....	41
4.4.2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว และเชื้อเพลิงเหลวจากการไพโรไลซิส.....	45
4.5 การคำนวณหาจุดคุ้มทุน.....	46
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	48
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	48
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	49
บรรณานุกรม.....	50
ภาคผนวก ก การพัฒนาชั้นคุณภาพของน้ำมันเครื่องตามมาตรฐาน API.....	54
ภาคผนวก ข ผลการทดลองสถานะที่เหมาะสมในการไพโรไลซิส.....	64
ภาคผนวก ค ผลทางการวิเคราะห์ทางสถิติ.....	77
ภาคผนวก ง การคำนวณหาจุดคุ้มทุน.....	81
ประวัติผู้เขียน.....	84

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันดิบมาตรฐาน.....6
2.2	ระบบ หน่วย และอุณหภูมิที่ใช้ในการวัดความข้นใสของน้ำมันหล่อลื่น.....8
2.3	ประเภทน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานแบ่งกลุ่มตามคุณสมบัติ API.....9
2.4	สมบัติทางกายภาพของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว.....13
3.1	ส่วนประกอบและหน้าที่ของเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว.....30
3.2	วิธีมาตรฐานในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว.....32
3.3	สถานะที่ใช้วิเคราะห์ห้องค้ำประกอบทางเคมีของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วและเชื้อเพลิงเหลว ด้วย GC-MS.....34
4.1	ผลการวิเคราะห์ห้องค้ำประกอบทางเคมีของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว.....42
4.2	ผลการวิเคราะห์ห้องค้ำประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากกระบวนการ ไพโรไลซิส.....42
4.3	คุณสมบัติทางกายภาพ และเคมีของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วก่อนและหลังไพโรไลซิส และ ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสตามวิธีมาตรฐาน ASTM.....45
4.4	องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วและผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จาก กระบวนการไพโรไลซิสที่วิเคราะห์ด้วย GC-MS.....46
4.5	ความคุ้มค่าของการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว.....47
ก-1	สรุปการพัฒนาขึ้นคุณภาพของน้ำมันเครื่องตามมาตรฐาน API สำหรับเครื่องยนต์เบนซิน 4 จังหวะ.....55
ก-2	สรุปการพัฒนาขึ้นคุณภาพน้ำมันเครื่องตามมาตรฐาน API สำหรับเครื่องยนต์ดีเซล.....59
ข-1.1	ปริมาณของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 200–500 °C อัตราการไหล ของก๊าซไนโตรเจน 0.1 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....65
ข-1.2	ปริมาณของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 200–500 °C อัตราการไหล ของก๊าซไนโตรเจน 0.45 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....65
ข-1.3	ปริมาณของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 200–500 °C อัตราการไหล ของก๊าซไนโตรเจน 0.75 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VII อังอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข-1.4 ปริมาณของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 200 – 500 °C อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 1.0 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	66
ข-1.5 ปริมาณของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 350°C อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 0.45 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง.....	67
ข-1.6 ปริมาณของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช่แล้วที่เหลือ จากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 350°C อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 0.1 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง.....	67
ข-1.7 ปริมาณของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช่แล้วที่เหลือ จากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 350°C อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 0.45 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง.....	68
ข-1.8 ปริมาณของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช่แล้วที่เหลือ จากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 350°C อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 0.75 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง.....	68
ข-1.9 ปริมาณของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช่แล้วที่เหลือ จากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 350°C อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 1.0 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง.....	69
ข-1.10 ปริมาณของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช่แล้วที่เหลือ จากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 350°C อัตราการไหลของก๊าซ 0.45 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	69
ข-1.11 ปริมาตรของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช่แล้วที่เหลือ และเชื้อเพลิงเหลวที่ได้ จากกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 200 - 500 °C และอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 0.1, 0.45, 0.75 และ 1.0 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	70
ข-2.1 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้วิเคราะห์โดยใช้ GC-MS.....	71
ข-2.2 องค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช่แล้ววิเคราะห์โดยใช้ GC-MS.....	73
ค-1 ข้อมูลทางสถิติของปริมาณเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 200, 300, 350, 400, 500 °C และอัตราการไหล ของก๊าซไนโตรเจนที่ 0.1, 0.45, 0.75, 1.0 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	78
ค-2 ข้อมูลทางสถิติของปริมาณเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 350 °C และอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 0.45 ลิตรต่อนาที ที่เวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง.....	79

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่

หน้า

- ก-3 ข้อมูลทางสถิติของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วที่เหลือจากการไพโรไลซิสอุณหภูมิ 350 °C และ อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 0.45 ลิตรต่ออนาที ที่เวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง.....80



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ขั้นตอนการกลั่นน้ำมันดิบ.....5
2.2	กระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่น.....7
2.3	API Oil Service Ratings.....10
2.4	กระบวนการจัดการน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วภาพรวม.....15
2.5	กระบวนการไพโรไลซิส.....16
2.6	ผลิตภัณฑ์ต่างๆที่เกิดจากการเปลี่ยนน้ำมันหล่อลื่นเป็นน้ำมัน โดยกระบวนการไพโรไลซิส.....17
2.7	เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่แสดงในระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง.....20
2.8	เครื่องปฏิกรณ์แบบถ่วง.....21
2.9	เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล.....22
2.10	เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคซ์แบบฟองก๊าซ.....23
2.11	เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคซ์แบบไหลเวียน.....24
2.12	เครื่องปฏิกรณ์แบบเครื่องอัดรีดแบบเตาหมุน.....24
3.1	ตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว.....28
3.2	แผนภูมิขั้นตอนการทดลอง.....29
3.3	ระบบการไพโรไลซิสต้นแบบ.....33
4.1	เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบถ่วงต้นแบบ.....36
4.2	การแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วโดยใช้ TGA.....37
4.3	ปริมาณของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้และน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วที่เหลือจากการไพโรไลซิส แปรค่าอุณหภูมิที่ 200, 300, 350, 400 และ 500 °C และอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 0.1, 0.45, 0.75, 1.0 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....38
4.4	ปริมาณของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้และน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วที่เหลือจากการไพโรไลซิส ที่อุณหภูมิ 350 °C และอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 0.45 ลิตรต่อนาที แปรค่าเวลาใน การไพโรไลซิสที่ 1, 2, 3 ชั่วโมง.....40

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5	โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้และน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วจากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 350 °C และอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 0.45 ลิตรต่อนาทีเป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....41
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่าง % ของพื้นที่ใต้กราฟ กับจำนวนของคาร์บอนใน องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วและเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จาก กระบวนการไพโรไลซิส.....44



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปี พ.ศ.2555 ประเทศไทยมีการใช้น้ำมันหล่อลื่นในยานพาหนะ อุตสาหกรรม และกิจกรรมอื่นๆประมาณ 1,000 ล้านลิตร และเกิดน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้น้ำมันแล้วปริมาณกว่า 300 ล้านลิตรต่อปี (สำนักงานกากอุตสาหกรรม, 2555) โดยทั่วไปน้ำมันหล่อลื่นประกอบด้วยน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานและสารเพิ่มคุณภาพ เมื่อถูกใช้งานแล้วคุณสมบัติการหล่อลื่นของน้ำมันจะลดลง และมีการปนเปื้อนของโลหะจากเครื่องยนต์ ดังนั้นน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้น้ำมันแล้ว จึงมีความสกปรก และมีความหนืดสูงประกอบด้วยสารอินทรีย์ประเภทไฮโดรคาร์บอน สารตัวทำละลาย โลหะหนัก เป็นต้น จัดเป็นของเสียอันตราย จำเป็นต้องมีการกำจัดอย่างถูกวิธี โดยทั่วไปนิยมกำจัดโดยวิธีการเผาในเตาเผา ซึ่งก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ และต้องเสียค่าใช้จ่ายในการบำบัดสูง ทำให้เกิดการลักลอบทิ้งสู่สิ่งแวดล้อม น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้น้ำมันแล้วทั่วประเทศถูกจัดเก็บอย่างเป็นระบบเชิงพาณิชย์มีเพียง 25 % ส่วนที่เหลืออีก 75 % ถูกจัดเก็บอย่างไม่เป็นระบบและมีการซื้อขายและใช้ประโยชน์อย่างไม่ถูกหลักวิชาการ (สิริพร, 2546) ทำให้เกิดปัญหาในการใช้งานและก่อให้เกิดมลพิษและอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม

จากการที่น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้น้ำมันแล้วประกอบด้วย อะลิฟาติก และอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน และยังมีค่าความร้อนสูง จึงสามารถนำน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้น้ำมันแล้วกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ นอกจากจะเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์แล้ว ยังเป็นการลดปริมาณมลพิษและปัญหาสิ่งแวดล้อม ปัจจุบันน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้น้ำมันแล้วที่มีการจัดเก็บเบื้องต้น โดยผู้ประกอบการจะถูกจัดเก็บอย่างเป็นระบบโดยมีผู้รับขนส่งหรือผู้จัดเก็บรายย่อย เพื่อที่จะนำเข้าสู่คลังจัดเก็บน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้น้ำมันแล้ว ซึ่งคลังจะมีกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้น้ำมันแล้วให้มีคุณสมบัติที่สามารถนำไปใช้ใหม่ได้ โดยทั่วไป นิยมใช้วิธีบำบัดโดยการเติมกรดซัลฟิวริก และฟลูออรีนเออร์ท และวิธีการบำบัดด้วยไฮโดรเจน โดยผ่านกระบวนการบำบัดเบื้องต้นด้วยการแยกน้ำและการกรองเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกออกก่อนที่จะนำไปบำบัดต่อไป อย่างไรก็ตาม พบว่า ขั้นตอนบำบัดเหล่านี้สามารถกำจัดสิ่งเจือปนได้บางส่วน ได้แก่ ขยะ ตะกอนต่างๆที่ติดมาจากการจัดเก็บ และน้ำ เป็นต้น เมื่อนำน้ำมันหล่อลื่นหลังผ่านการบำบัดดังกล่าวไปใช้เป็นเชื้อเพลิงจะก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ กระบวนการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้น้ำมันแล้ว เป็นวิธีที่ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้น เนื่องจากจะได้ก๊าซ เชื้อเพลิงเหลว และผลิตภัณฑ์ของแข็ง ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง โดยมีการศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการไพโรไลซิส Moliner *et al.*(1997) ได้รายงานว่าการเพิ่มอุณหภูมิในการไพโรไลซิสจะเพิ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลผลิตก๊าซอินทรีย์ระเหยง่าย โดยจะพบมีเทน โอลิฟินเบา เบนซีน โทลูอิน ไซลีนส่วนใหญ่ อุตสาหกรรมคาร์ไรโซเคิลน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วในประเทศไทย จำเป็นต้องนำเข้าเทคโนโลยีจากต่างประเทศ ซึ่งต้องเสียค่าใช้จ่ายสูง

งานวิจัยนี้ศึกษาการสร้างถังปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบถ่วงถ่วงแบบ และศึกษาสภาวะที่มีผลต่อปริมาณและสมบัติของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาถังปฏิกรณ์ไพโรไลซิส สำหรับผลิตเชื้อเพลิงเหลวในระดับอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นการช่วยลดต้นทุนการนำเข้าเทคโนโลยีจากต่างประเทศ นอกจากนี้ ยังเป็นการนำของเสียกลับมาใช้ให้เป็นประโยชน์

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อสร้างถังปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบถ่วงถ่วงแบบสำหรับไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว
- 1.2.2 เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว
- 1.2.3 เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว
- 1.2.4 เพื่อศึกษาจุดคุ้มทุนในการผลิตเชื้อเพลิงเหลวโดยกระบวนการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 สร้างถังปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบถ่วงถ่วงขนาด 10 ลิตร ประกอบด้วยชุดควบคุมแรงดัน ถังรองรับเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส
- 1.3.2 ศึกษาการสลายตัวของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วโดยใช้เทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (TGA)
- 1.3.3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว โดยแปรค่าอุณหภูมิที่ 200, 300, 350, 400 และ 500 องศาเซลเซียส และแปรค่าอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนที่ 0.1, 0.45, 0.75 และ 1.0 ลิตรต่อนาที จากนั้นนำสภาวะอุณหภูมิและอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนที่เหมาะสมไปแปรค่าเวลาในการไพโรไลซิสที่ 1, 2 และ 3 ชั่วโมง
- 1.3.4 ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว และเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส และน้ำมันหล่อลื่นที่เหลือจากกระบวนการไพโรไลซิส ได้แก่ ความหนืด ความหนาแน่น จุดวาบไฟ ค่าความร้อน และวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้โดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี – แมสสเปคโตรเมตรี (GC – MS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.5 จำนวนจุดคุ้มทุนในการผลิตเชื้อเพลิงเหลวโดยกระบวนการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้เครื่องไพโรไลซิสแบบถังกวนต้นแบบสำหรับไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วเพื่อนำไปใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงเหลว

1.4.2 ได้สภาวะที่เหมาะสมในการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วเพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นพลังงานทดแทน

1.4.3 เป็นการเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์

1.4.4 เป็นการลดของเสียอันตราย และลดปัญหาสิ่งแวดล้อม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำมันหล่อลื่น (Lubricating oil)

น้ำมันหล่อลื่น เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่นปิโตรเลียม เป็นวัสดุหล่อลื่นที่มีลักษณะเป็นของเหลว การผลิตน้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูปคุณภาพดี และเหมาะกับการใช้งานสำหรับเครื่องยนต์และเครื่องจักรกลแต่ละชนิด ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน และขั้นตอนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูป โดยการเติมสารเพิ่มคุณภาพต่างๆลงในน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน โดยทั่วไปน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานทำหน้าที่หล่อลื่นเครื่องจักรกลที่มีลักษณะปิด และส่วนที่เคลื่อนไหวในเครื่องยนต์ เช่น ภายในห้องเพลลา ข้อเหวี่ยง ห้องเกียร์ และเฟืองท้าย เป็นต้น เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการสึกหรออันเนื่องมาจากการเสียดสีกัน ส่วนสารเติมแต่งจะช่วยป้องกันไม่ให้น้ำมันเสื่อมคุณภาพจากการทำงานของเครื่องยนต์ที่มีอุณหภูมิสูงมาก (ปานเพชร, 2554)

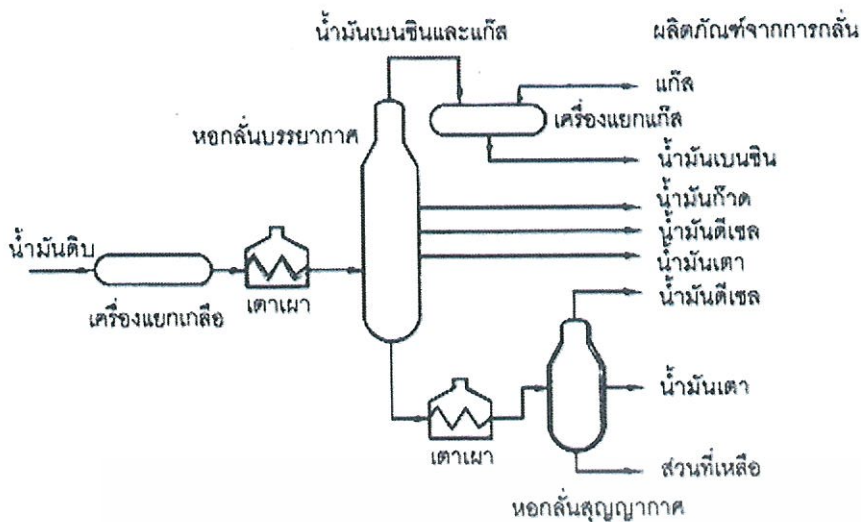
2.1.1 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน (Base Oil) (ปานเพชร, 2554)

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่

2.1.1.1 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากพืช หรือสัตว์ (Vegetable or Animal Base Oil) ปัจจุบันมีการใช้น้อยมาก เนื่องจากมีความคงตัวทางเคมีต่ำ เสื่อมสภาพได้ง่ายในขณะที่ใช้งาน เมื่อนำมาใช้งานจะต้องผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ ทำให้มีราคาแพงมาก แต่จะใช้เฉพาะงานที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษบางอย่างเท่านั้น ส่วนใหญ่มักใช้เป็นตัวเติมสำหรับเพิ่มคุณภาพให้น้ำมันหล่อลื่นที่ผลิตจากน้ำมันปิโตรเลียมเพื่อเพิ่มความข้นและความสามารถในการผสมเข้ากับน้ำได้ ตัวอย่างน้ำมันพืชและสัตว์ที่ถูกนำมาใช้ ได้แก่ น้ำมันละหุ่ง น้ำมันปาล์ม น้ำมันหมู น้ำมันปลา เป็นต้น

2.1.1.2 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากปิโตรเลียมหรือน้ำมันแร่ (Mineral Base Oil) เป็นน้ำมันพื้นฐานที่นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากมีคุณภาพดีและราคาถูก น้ำมันหล่อลื่นชนิดนี้เป็นผลผลิตที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบในหอกกลั่น ส่วนเบาที่มีจุดเดือดต่ำ ได้แก่ แก๊ส น้ำมันเบนซิน น้ำมันก๊าด น้ำมันดีเซล จะระเหยเป็นไอแยกออกมา ส่วนหนักที่มีจุดเดือดสูงจะไม่ระเหยเป็นไอและเหลือพวกน้ำมันเตา ไช และยางมะตอย ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นตัวเติมในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการกลั่นน้ำมันดิบ (ปรับปรุงจาก <http://www.chaiwbi.com>)

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากปิโตรเลียมสามารถแยกตามคุณสมบัติได้ 3 ประเภท ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของน้ำมันดิบที่นำมาใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน ที่มีสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอนประเภทไม่อิ่มตัว (Unsaturated Cyclic Hydrocarbons) คือ 1) น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันดิบมาตรฐานพาราฟินิก (Paraffinic Base Oil) 2) น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันดิบมาตรฐานแนฟทีนิก (Naphthenic Base Oil) 3) น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันดิบมาตรฐานอะโรมาติก (Aromatic Base Oil) มีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 2.1

2.1.1.3 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันสังเคราะห์ (Synthetic Base Oil) เป็นน้ำมันที่สังเคราะห์ขึ้นโดยกระบวนการทางเคมี วัสดุที่นำมาสังเคราะห์มักนำมาจากน้ำมันปิโตรเลียม ส่วนใหญ่ใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานในงานพิเศษเฉพาะที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษในด้านดัชนีความข้นใสสูง จุดไหลเทต่ำ และมีการระเหยต่ำ เป็นต้น น้ำมันสังเคราะห์ที่ใช้กันมากมีอยู่หลายชนิด และมีราคาค่อนข้างแพงมาก เช่น พวกลีโธแอลฟาโอลิฟิน (PAO), พวกลีโธเอสเตอร์ ไดเอสเตอร์ และคอมเพล็กซ์เอสเตอร์ เป็นต้น

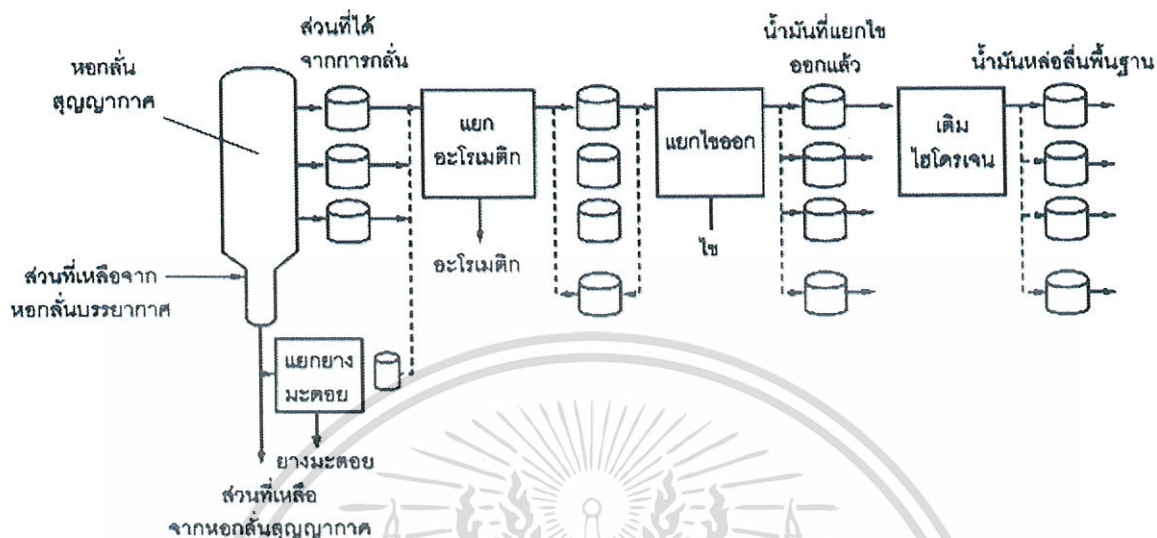
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันดิบมาตรฐาน (ประเสริฐ, 2554)

คุณสมบัติ	ประเภทของน้ำมันดิบมาตรฐาน		
	พาราฟินิก	แนพทินิก	อะโรมาติก
จุดวาบไฟ	สูง	ต่ำ	-
การระเหยตัว	ต่ำ	ต่ำ	-
รักษาคุณสมบัติ โครงสร้างทางเคมี	ดี	พอสมควร	ไม่มี
จุดไหลเท	สูง	ต่ำ	ต่ำ
ความถ่วงจำเพาะ	ต่ำ	สูง และรวมตัวได้ดี	สูง
คุณสมบัติหล่อลื่น	ดี	ต่ำ	ไม่ดี
การเกิดไข	ดี	-	ไม่มี
ดัชนีความข้นใส	สูง	ต่ำ	ต่ำ
การเผาไหม้	เขม่าแข็ง แต่หลุด ค่อนข้างง่าย	เขม่าอ่อนตัว	-
การยึดเกาะของ โมเลกุล	เหนียวแน่น	ดีบางส่วน	ไม่เสถียร
สารประกอบ ไฮโดรคาร์บอน			
เสถียรภาพต่อการ เกิดปฏิกิริยา ออกซิเดชัน	ดี	ต่ำ	ต่ำ
ฟิล์มน้ำมัน	เหนียว และแข็งแรง	-	-

2.1.2 กระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่น

กระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่น ดังแสดงในรูปที่ 2.2 เป็นการนำน้ำมันแร่ที่ได้จากการนำส่วนที่อยู่ก้นหอกลั่นบรรยากาศมาผ่านกระบวนการกลั่นภายใต้สุญญากาศ เพื่อแยกน้ำมันหล่อลื่นชนิดใสและชั้นออกมา ที่เหลือเป็นกากสามารถนำไปผลิตเป็นยางมะตอยได้ ชนิดและปริมาณของน้ำมันแร่ที่แยกออกมาได้ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันดิบที่นำมากลั่น น้ำมันดิบบางชนิดไม่เหมาะที่จะนำมาผลิตน้ำมันแร่ น้ำมันแร่ที่ได้จากน้ำมันดิบพวกพาราฟินจะมีไขสูง จะต้องผ่านกระบวนการกำจัดไขออก น้ำมันแร่ที่ได้จากการกลั่นภายใต้สุญญากาศนี้ ปกติคุณภาพจะไม่ดีพอที่จะนำมาใช้ผลิตเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่นอญญาติเหินาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำมันหล่อลื่น ต้องผ่านกระบวนการต่างๆ เพื่อกำจัดสารที่ไม่ต้องการออก และเพื่อให้มีความคงตัว เชิงเคมีและเชิงความร้อนที่ดี



รูปที่ 2.2 กระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่น (ปรับปรุงจาก <http://www.chaiwbi.com>)

จากรูป 2.2 แสดงกระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่น ซึ่งน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่ใช้เป็นส่วนที่แยกจากหอกลั่นน้ำมันดิบ (หอกลั่นบรรยากาศ) แล้วนำมากลั่นต่อในหอกลั่นสุญญากาศ หลังจากนั้นจึงทำให้น้ำมันหล่อลื่นมีความบริสุทธิ์และคุณภาพดีขึ้นด้วยการแยกส่วนที่ไม่ต้องการออก โดยผ่านกระบวนการต่างๆ ซึ่งอาจจะต่อเนื่องกันหรือไม่ก็ได้ กระบวนการต่างๆมีดังนี้

1. การกลั่น (Distillation) ในหอกลั่นน้ำมันเชื้อเพลิงจะมีการแยกผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงต่างๆ ออกด้วยหอกลั่นบรรยากาศ ส่วนในโรงกลั่นน้ำมันหล่อลื่นจะนำส่วนที่เหลือนี้ไปผ่านหอกลั่นสุญญากาศ เพื่อที่จะทำให้ส่วนหนักๆที่เป็นน้ำมันหล่อลื่นระเหยตัวแล้วกลั่นออกไปได้
2. การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction) คือการกำจัดพวกละอองอะโรมาติกด้วยตัวทำละลาย โดยส่วนใหญ่ใช้ฟินอล เพื่อทำให้น้ำมันมีค่าดัชนีความข้นใสสูงขึ้น สีสดใสขึ้น และไม่เกิดการรวมตัวกับออกซิเจน
3. ไฮโดรรีไฟนิง (Hydrotreating) คือการเติมไฮโดรเจนสำหรับเปลี่ยนแปลงรูปโมเลกุลของสารประกอบของกำมะถัน ไนโตรเจน กรด และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัวเพื่อทำให้น้ำมันหล่อลื่นมีสีสวยขึ้น สีสดตัวได้นาน เข้มลางลง และมีอายุการใช้งานยาวนาน
4. การแยกไข (Dewaxing) เพื่อให้มีจุดไหลเทต่ำ (pour point) สามารถใช้งานในบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ หรือใช้ในฤดูหนาวได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. การแยกแอสฟัลต์ (Asphalt Separation) คือการแยกเอาสารจำพวกยางมะตอยออกจากน้ำมันหล่อลื่นส่วนหนักรๆ

2.1.3 คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน เมื่อผ่านออกมาจากโรงกลั่นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจะมีคุณสมบัติที่สำคัญบางอย่างในตัวเองอยู่แล้ว ซึ่งคุณสมบัติต่างๆเหล่านี้ ได้แก่

1. ความหนืด หรือความข้นใส หมายถึงความใส และความข้นของน้ำมัน โดยวัดที่อุณหภูมิหนึ่ง น้ำมันที่มีความข้นใสต่ำจะไหลง่าย แต่เชื้อหล่อลื่นก็บางมากเช่นกัน สำหรับน้ำมันที่มีความข้นใสสูงจะไหลยาก แต่จะมีเชื้อหล่อลื่นหนา หรือแข็งกว่าน้ำมันที่มีความข้นใสต่ำ หน่วยวัดความข้นใสมีหลายระบบ และอุณหภูมิที่วัดก็ต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ระบบ หน่วย และอุณหภูมิที่ใช้ในการวัดความข้นใสของน้ำมันหล่อลื่น

ลำดับ	ประเภท หรือระบบ	หน่วยความข้นใส	อุณหภูมิที่ใช้วัด
*1	ระบบสากล (เมตริก)	เซนติสโตก (cSt)	40°C และ 100°C
2	สหรัฐอเมริกา	วินาทีเซย์โบลต์ (SUS) หรือ (SSU)	100°F และ 210°F
3	สหราชอาณาจักร	เรตวูด No.1(RW1)	70 °F, 100°F, 140 °F และ 200°F
4	เยอรมนี และหลายประเทศในแถบยุโรป	อิงเลอร์ (E°)	20°C, 50°C และ 100°C

* หมายเหตุ ปัจจุบันนิยมใช้หน่วยวัดความหนืด หรือความข้นใสเป็นเซนติสโตก (cSt)

2. ความต้านทานการรวมตัวกับออกซิเจน น้ำมันเป็นส่วนผสมที่ซับซ้อนของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เมื่อสารไฮโดรคาร์บอนสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศจะเกิดการทำปฏิกิริยา ทำให้เกิดสิ่งไม่พึงประสงค์ เช่น กรด ความเหนียว นอกจากนี้ถ้าอุณหภูมิสูง อัตราการรวมตัวก็ยิ่งเกิดเร็วขึ้น สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ดีจะรวมตัวกับออกซิเจนได้ยาก

3. จุดวาบไฟ คืออุณหภูมิของน้ำมันที่ได้รับความร้อนจนกลายเป็นไอ แล้วลุกวาบเมื่อโดนเปลวไฟ จุดวาบไฟมีความสำคัญเกี่ยวกับความปลอดภัย

4. จุดไหลเท คืออุณหภูมิต่ำสุดที่น้ำมันจะไหลได้โดยไม่มีอะไรรบกวน สำหรับในการทำงานที่อุณหภูมิต่ำ จำเป็นที่จะต้องเลือกใช้น้ำมันที่มีจุดไหลเทต่ำ

5. ดัชนีความหนืด หรือดัชนีความข้นใส ความข้นใสของน้ำมันจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ ดังนั้นน้ำมันจะไหลเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และจะข้นขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำลง จึงมีการวัดอัตราการเปลี่ยนแปลงนี้ออกมาเป็นค่าดัชนีความข้นใส (viscosity index) หรือที่เรียกกันย่อว่า VI ถ้า

น้ำมันหล่อลื่นมีความข้นใสเปลี่ยนแปลงน้อยเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงมาก แสดงว่าน้ำมันหล่อลื่นไม่ผ่านการไหม้ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั้นมีค่า VI สูง แต่ถ้าความข้นใสของน้ำมันเปลี่ยนแปลงมากเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงน้อยแสดงว่าน้ำมันนั้นมีค่า VI ต่ำ ซึ่งน้ำมันที่มีค่าดัชนีความข้นใสสูง จะเป็นน้ำมันที่มีคุณภาพดีทางด้านความข้นใส เหมาะสมกับอุณหภูมิการใช้งาน น้ำมันหล่อลื่นที่มีความข้นใสต่ำจะใช้ในเครื่องยนต์ที่ทำงานรอบสูง อุณหภูมิต่ำ แรงกดต่ำ ส่วนน้ำมันหล่อลื่นที่มีความข้นใสสูงจะใช้ในเครื่องยนต์ที่ทำงานรอบต่ำ อุณหภูมิสูง แรงกดสูง

2.1.4 กลุ่มของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน

ในปัจจุบันน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานมีอยู่ 5 กลุ่มใหญ่ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.3 แต่สำหรับเครื่องยนต์เบนซินและเครื่องยนต์ดีเซล นิยมใช้น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานกลุ่มที่ 2 และ 3 ซึ่งมีความสมบัติที่ใกล้เคียงกันมาพัฒนาปรับปรุงให้เข้ากับเทคโนโลยีต่างๆ ทางด้านเครื่องยนต์ น้ำมันพื้นฐานกลุ่ม 2 และ 3 สามารถผลิตได้มากในแถบเอเชีย ถึงแม้ว่ายุโรปจะผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานได้เองแต่ก็ยังต้องการน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานกลุ่มที่ 2 และ 3 จากเอเชีย เนื่องจากน้ำมันพื้นฐานกลุ่ม 2 และ 3 นั้นมีปริมาณกำมะถันที่น้อย และมีความอิมิตัวสูงกว่ากลุ่มที่ 1, 4 และ 5 จึงเป็นที่นิยมใช้กันทั่วโลก

ตารางที่ 2.3 ประเภทน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน แบ่งกลุ่มตามคุณสมบัติใน API (ดัดแปลงจาก <http://www.vcharkarn.com/vblog/39949/2>)

กลุ่ม	ปริมาณกำมะถัน (Sulphur, % wt)	ความอิมิตัว (Saturated, % wt)	ดัชนีความหนืด (Viscosity Index)
1	> 0.03	< 90	80 – 119
2	≤ 0.03	≥ 90	80 – 119
3	≤ 0.03	≥ 90	120
4	All Polyalphaolefins (PAO)		
5	Other base oils		

2.1.5 ปริมาณการใช้น้ำมันหล่อลื่น

จากข้อมูลกรมโรงงานอุตสาหกรรม พบว่า ในปี พ.ศ. 2555 มีการใช้น้ำมันหล่อลื่นประมาณ 1,000 ล้านลิตร เมื่อคำนวณจากสมมติฐานว่าเกิดการสูญเสียในการใช้งานไป 30 เปอร์เซ็นต์ จะมีน้ำมันเครื่องที่ใช้แล้วซึ่งเกิดขึ้นในขณะที่นารถไปเปลี่ยนถ่ายน้ำมันเครื่องใหม่ประมาณ 300 ล้านลิตรต่อปี ในปริมาณนี้ได้มีการนำไปรีไซเคิลอย่างถูกวิธีและกลับไปใช้ใหม่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

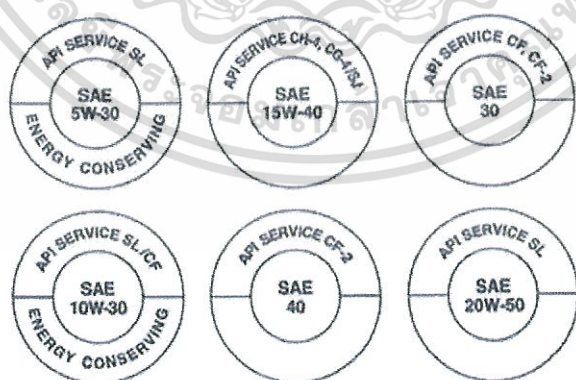
147 ล้านลิตรต่อปี น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วถูกนำไปกำจัดทิ้งอย่างถูกต้องตามกรรมวิธี 69 ล้านลิตรต่อปี ดังนั้นยังคงเหลือปริมาณน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วที่ไม่สามารถตรวจสอบได้ว่ามีการกำจัดอย่างถูกวิธีหรือไม่อีก 84 ล้านลิตรต่อปี คิดเป็นร้อยละ 28 ของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว (สำนักงานกาคอุตสาหกรรม, 2555)

2.1.6 มาตรฐานน้ำมันหล่อลื่น (สำนักงานน้ำมันเชื้อเพลิง, 2010)

2.1.6.1 มาตรฐานของสมาคมวิศวกรรถยนต์ (Society of Automotive Engineer, SAE) ใช้ระบุความหนืด (ความข้นใส) ของน้ำมันหล่อลื่น ค่ายิ่งมากแสดงว่ามีความหนืดมาก โดยแบ่งน้ำมันหล่อลื่นออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ

1) **เกรดเดียว (monograde)** คือน้ำมันหล่อลื่นที่มีค่าความหนืดค่าเดียวที่อุณหภูมิสูง เมื่ออุณหภูมิต่ำลงจะมีความหนืดเพิ่มขึ้น เช่น SAE 40 (รูปที่ 2.3) หมายความว่า ณ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส น้ำมันจะมีค่าความหนืดอยู่ที่เบอร์ 40 ปัจจุบันน้ำมันเครื่องชนิดนี้หาซื้อได้ยาก เนื่องจากเหมาะกับเครื่องยนต์รอบต่ำ หรือเครื่องยนต์เก่า และอยู่ในประเทศเขตร้อน

2) **เกรดรวม (multigrade)** คือน้ำมันหล่อลื่นที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดได้ เช่น เมื่ออุณหภูมิสูง น้ำมันจะมีความใส เมื่ออุณหภูมิต่ำลงยังสามารถคงความข้นใสเอาไว้ได้ นั่นคือมีช่วงอุณหภูมิการใช้งานที่กว้างขึ้น เพื่อเหมาะกับการเลือกใช้ทุกอุณหภูมิ ซึ่งระบุเป็น 2 ตัวเลข จะมีอักษร W เป็นตัวคั่นกลาง เช่น SAE 20W-50 (รูปที่ 2.3) หมายความว่า เกรดอุณหภูมิหนาววัดที่อุณหภูมิ -25 องศาเซลเซียส น้ำมันจะมีค่าความหนืดอยู่ที่ เบอร์ 20 แต่เมื่อวัดอุณหภูมิที่ 100 องศาเซลเซียส (เกรดฤดูร้อน) น้ำมันจะมีค่าความหนืดอยู่ที่เบอร์ 50



รูปที่ 2.3 API Oil Service Ratings (ดัดแปลงจาก

http://www.aalcar.com/library/api_motor_oil_classifications.htm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.6.2 มาตรฐานของสถาบันปิโตรเลียมอเมริกัน (The American Petroleum Institute : API) ใช้ระบุประเภทของเครื่องยนต์ และสมรรถนะในการปกป้องชิ้นส่วนของเครื่องยนต์

1) น้ำมันหล่อลื่นสำหรับหล่อลื่นยนต์เบนซิน 4 จังหวะ ใช้อักษร "S" นำหน้า (Service station - spark ignition) API ได้จำแนกคุณภาพน้ำมันหล่อลื่นสำหรับเครื่องยนต์เบนซิน 4 จังหวะ ออกเป็น 12 ชั้นคุณภาพ คือ SA, SC, SD, SE, SF, SG, SH, SI, SJ, SL, SM, SN ซึ่ง SA เป็นมาตรฐานน้ำมันเครื่องรุ่นเก่าสมัยแรกๆ ต่อมาพัฒนาและปรับเปลี่ยนมาตรฐานให้สูงขึ้นตามเทคโนโลยีจนปัจจุบัน SN เป็นชั้นคุณภาพใหม่ล่าสุดสำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้กับเครื่องยนต์เบนซิน API ประกาศใช้ในวันที่ 1 ตุลาคม พ.ศ. 2553 เป็นการพัฒนาต่อจากชั้นคุณภาพ SM โดยเพิ่มความสามารถด้านการชะล้างทำความสะอาดเครื่องยนต์ (detergency) และด้านการกระจายสิ่งสกปรก (dispersancy)

ก) ด้านการชะล้าง น้ำมันหล่อลื่น API SN มีการประเมินผลการเกิดคราบเขม่าคาร์บอนสะสมที่ลูกสูบ (weighted piston deposits) ที่เข้มงวดขึ้น ซึ่งหากเกิดคราบสกปรก (deposits) มากเกินไป จะทำให้ลูกสูบติดขัด ส่งผลต่อการทำงานของเครื่องยนต์ ประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลง และสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง

ข) ด้านการกระจายสิ่งสกปรก น้ำมันหล่อลื่น SN เข้มงวดในการวัดค่าตม (Sludge) ที่เกิดขึ้นในเครื่องยนต์และบริเวณกระเดื่องวาล์ว (rocker arm) การวัดค่าคราบสกปรกภายในเครื่องยนต์และบริเวณเสื้อสูบ (piston skirt) วัดการติดขัดของแหวนลูกสูบ และการสึกหรอของลูกเบี้ยว ภายใต้อุณหภูมิต่ำ ซึ่งจะช่วยควบคุมการสะสมของตม (sludge) และตะกอนได้มากขึ้น ซึ่งตะกอนเหล่านี้เป็นสาเหตุให้เกิดการอุดตันในเครื่องยนต์ และน้ำมันเครื่องเปลี่ยนสภาพ ซึ่งการพัฒนาชั้นคุณภาพของน้ำมันหล่อลื่นตามมาตรฐาน API สำหรับเครื่องยนต์เบนซิน 4 จังหวะ (สำนักงานน้ำมันเชื้อเพลิง, 2010) แสดงในภาคผนวก ก

2) น้ำมันหล่อลื่นสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล ใช้อักษร "C" นำหน้า (Commercial service - compress ignition) เริ่มจากมาตรฐาน CA – CB จนในปัจจุบันมาตรฐานสูงสุดของน้ำมันหล่อลื่นสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล คือ CJ-4 ในปี พ.ศ. 2553 เลข 4 หมายถึงใช้กับเครื่องยนต์แบบ 4 จังหวะ ยังไม่มีการประกาศชั้นคุณภาพใหม่สำหรับเครื่องยนต์ดีเซล แต่ API ได้ยุติการออกเครื่องหมายรับรอง (API Donut) สำหรับชั้นคุณภาพ CF-2 ในวันที่ 1 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2553 และ CF ในวันที่ 30 ธันวาคม พ.ศ. 2553 เนื่องจากเครื่องยนต์ Detroit Diesel 6V – 92TA ที่ใช้ทดสอบชั้นคุณภาพ CF-2 และ Caterpilla 1M-PC ที่ใช้ทดสอบชั้นคุณภาพ CF หาได้ยากขึ้น API จึงยุติการรับรองชั้นคุณภาพดังกล่าว รวมระยะเวลาประมาณ 16 ปีนับตั้งแต่ประกาศใช้ในปี พ.ศ. 2537 (สำนักงานน้ำมันเชื้อเพลิง, 2010)

จะเห็นว่าการพัฒนาชั้นคุณภาพน้ำมันหล่อลื่นสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลจาก CC มาเป็น CE เป็นไปอย่างช้าๆ ระยะเวลาการพัฒนานถึง 22 ปี ทั้งนี้เนื่องจากเครื่องยนต์ดีเซลในช่วงแรกๆเป็นแบบ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นฐานง่าย ๆ ไม่ซับซ้อน เน้นความทนทานมากกว่า กำลังเครื่องไม่สูงมาก จำนวนรอบการทำงานน้อย จึงไม่ต้องการน้ำมันหล่อลื่นที่ตึ้นัก แต่หลังจากนั้นเครื่องยนต์ดีเซลมีความทันสมัย เน้นเพิ่มกำลัง และจำนวนรอบสูงขึ้น จึงเริ่มมีการพัฒนาน้ำมันหล่อลื่นให้รองรับกับสภาวะการใช้งานที่หนักขึ้น โดยมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก) ปัจจัยสำคัญที่มีส่วนผลักดันได้แก่ มาตรฐานด้านสิ่งแวดล้อมที่เข้มงวด ส่งผลต่อการพัฒนาเทคโนโลยียานยนต์ นอกจากนี้ การตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภค อาทิ การประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิง ก็มีผลสำคัญต่อการพัฒนาคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น (สำนักงานน้ำมันเชื้อเพลิง, 2010)

2.1.7 การใช้ประโยชน์ของน้ำมันหล่อลื่น (ปานเพชร, 2554) มีดังนี้

2.1.7.1 ช่วยหล่อลื่น (lubricate) ฟิล์มหรือเยื่อบางๆของน้ำมันหล่อลื่นจะทำหน้าที่เคลือบผิวโลหะหรือชิ้นงานที่มีการเคลื่อนที่ เพื่อไม่ให้เกิดการเสียดสีกัน โดยตรง หรือเพื่อเป็นการลดการสึกหรอของชิ้นงาน น้ำมันหล่อลื่นที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติในการคงความหนาของเยื่อน้ำมันและฟิล์มน้ำมันให้เกือบคงที่ตลอดเวลา แม้เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป นั่นคือจะต้องไม่บางเกินไปเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และไม่หนาเกินไปเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง ซึ่งคุณสมบัติต่างๆเหล่านี้ เรียกว่าดัชนีความข้นใส (viscosity index)

2.1.7.2 ช่วยระบายความร้อน (coolant) คุณสมบัตินี้เป็นสิ่งสำคัญอีกข้อหนึ่งของน้ำมันหล่อลื่นสำหรับเครื่องยนต์ ซึ่งจะต้องลดอุณหภูมิหรือระบายความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในกระบอกสูบ และระบายความร้อนอันเกิดจากการเสียดสีของชิ้นส่วนต่างๆในเครื่องยนต์ เช่น ระบบเกียร์หรือเฟืองท้าย เป็นต้น

2.1.7.3 ช่วยรักษาความสะอาด (clean) ขณะที่น้ำมันหล่อลื่นทำหน้าที่หล่อลื่นก็จะต้องเป็นตัวทำความสะอาดชิ้นงานนั้นไปด้วย นั่นคือจะต้องสามารถชะล้างหรือขจัดคราบสกปรกต่างๆจากผิวชิ้นงานได้อย่างดี

2.1.7.4 ช่วยป้องกันการเกิดสนิมและการกัดกร่อน (protect) น้ำมันหล่อลื่นที่ดีจะต้องไม่มีสารที่เป็นอันตรายในการกัดกร่อนเสียเอง นอกจากนี้ เมื่อมีสารจากภายนอกที่อาจทำให้เกิดกรดได้ เช่น ก๊าซไอเสีย ละอองน้ำ หรือไอน้ำ น้ำมันหล่อลื่นที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติในการทำให้กรดนั้นเจือจางลง และไม่กัดกร่อนโลหะของชิ้นงาน

2.1.7.5 ช่วยกระจายความสกปรก (dispersancy) น้ำมันหล่อลื่นที่ดีต้องมีคุณสมบัติในการกระจายสิ่งสกปรกต่างๆที่ปนในน้ำมันหล่อลื่นซึ่งเกิดจากการกำจัดสิ่งสกปรกออกจากชิ้นงาน เพื่อไม่ให้สิ่งสกปรกต่างๆเหล่านั้นรวมตัวกันได้ง่าย เพราะหากสิ่งสกปรกในน้ำมันหล่อลื่นเกิดการรวมตัวกันมากขึ้นจะทำให้เกิดเป็นยางเหนียว

2.2 น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว

น้ำมันหล่อลื่น หรือน้ำมันเครื่องนิยมใช้ในยานพาหนะ อุตสาหกรรมและกิจกรรมอื่นๆ ทำให้เกิดน้ำมันที่ใช้แล้วเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก โดยมีปริมาณมากกว่า 300 ล้านลิตรต่อปี โดยทั่วไป น้ำมันหล่อลื่นจะประกอบด้วยน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน และสารเพิ่มคุณภาพ เมื่อน้ำมันหล่อลื่นที่ถูกใช้งานแล้วคุณสมบัติการหล่อลื่นของน้ำมันจะลดลง และมีการปนเปื้อนของโลหะจากเครื่องยนต์ ซึ่งน้ำมันหล่อลื่นเสื่อมคุณภาพเหล่านี้ ประกอบด้วยสารอินทรีย์ประเภทไฮโดรคาร์บอน สารตัวทำละลาย โลหะหนัก ฯลฯ การถ่ายเททิ้งและกำจัดอย่างไม่ถูกวิธีจะเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม สัตว์พืช และมนุษย์ (สิริพร, 2546)

2.2.1 คุณสมบัติน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว จากการเก็บตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วทั่วประเทศ ได้แก่ สถานีบริการในร้านค้า/จำหน่ายน้ำมันหล่อลื่น ในอู่ซ่อมหรือศูนย์บริการ และในแหล่งจัดเก็บรวบรวม ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วก่อนบำบัด และภายหลังบำบัด พบว่าคุณสมบัติรวมของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วก่อนการบำบัด โดยเฉลี่ยยังมีคุณสมบัติในการหล่อลื่นดี สามารถใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดน้ำมันเตาเกรด A ซึ่งสมบัติทางกายภาพของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วแสดงในตารางที่ 2.4 (สิริพร, 2546)

ตารางที่ 2.4 สมบัติทางกายภาพของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว (สิริพร, 2546)

คุณสมบัติทางกายภาพ	ค่ามาตรฐาน
ค่าความร้อน (Heating Value)	~ 9,500 kcal/kg
ปริมาณกำมะถัน	≤ 1 %
จุดไหลเท	~ 72 cst.
น้ำ (H ₂ O Content)	น้อยมาก

ผลการศึกษาพบว่าสามารถนำน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วเหล่านี้ไปใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันเตาได้เป็นอย่างดี สามารถใช้ในด้านอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น เตาเผา เมื่อทำการบำบัด คุณสมบัติการหล่อลื่นน้ำมันที่ผ่านการบำบัดแล้วจะมีคุณสมบัติสำคัญ คือ ความหนืดในมาตรฐานช่วง SAE 20-30 มีแนวโน้มไปทางด้านต่ำ และมีค่าความหนืดที่ 40 °C- 100 °C และจุดไหลเท 100 °C อยู่ในมาตรฐานน้ำมันหล่อลื่นทั่วไป นอกจากนี้ ยังมีจุดวาบไฟต่ำกว่ามาตรฐาน (220 °C) และมีความเป็นกรดสูง (Total Acid Number, TAN)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปว่าแม้น้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านกระบวนการบำบัดเบื้องต้นอย่างง่าย ๆ นิยมใช้วิธีต้มด้วยกรดผลที่ได้จะมีค่าหล่อลื่นที่เหมาะสม แต่ไม่ควรนำไปใช้หล่อลื่นอีก เพราะมีค่าความเป็นกรดสูงมากอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อเครื่องยนต์จากการกัดกร่อนของกรด และมีจุดวาบไฟต่ำ และความใสของน้ำมันหล่อลื่นต่ำ แสดงว่าอาจมีสารละลายอินทรีย์บางประเภทปนเปื้อนอยู่ สามารถนำ น้ำมันที่ได้ไปใช้ประโยชน์ในการหล่อลื่นเครื่องจักรบางประเภทในลักษณะหยอดทิ้ง หรือการทาแผ่นแบบของการหล่อคอนกรีต (สิริพร, 2546)

2.2.2 ผลกระทบของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว (สิริรัตน์, 2553)

1) ผลกระทบต่อมนุษย์

- หากต้องสัมผัสกับน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วเป็นประจำ ผิวจะแห้งแตก ระคายเคือง เป็นผื่นแดง เนื่องจากน้ำมันจะไปชะล้างไขมันธรรมชาติออกจากผิวหนัง ทำให้เกิดการติดเชื้อและแพ้ได้ง่าย หากสูดดมรับไอระเหยของหล่อลื่น ในกรณีมีการใช้งานของเครื่องยนต์ จะเกิดอาการวิงเวียนคลื่นไส้ อ่อนเพลีย ง่วงนอน ระคายเคืองต่อหลอดลมและปอด

- หากรับประทานอาหารหรือน้ำที่น้ำมันหล่อลื่นปนเปื้อนเข้าสู่ร่างกาย สารเพิ่มคุณภาพในน้ำมันหล่อลื่นจะทำให้เกิดอาการคลื่นไส้ ปวดท้องและท้องเสีย

2) อันตรายต่อสิ่งแวดล้อม

- การทิ้งน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วลงท่อน้ำสาธารณะหรือแหล่งน้ำ เป็นการทำลายระบบนิเวศวิทยาในแหล่งน้ำ เพราะน้ำมันจะลอยตัวและรวมตัวบนผิวน้ำกั้นไม่ให้ออกซิเจนและแสงอาทิตย์ผ่านไปได้ เป็นการทำลายแหล่งอาหาร การวางไข่ของสัตว์น้ำและทำลายทัศนียภาพที่ดี

- การเก็บหรือทิ้งน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว และภาชนะบรรจุที่ไม่ถูกวิธี ทำให้น้ำมันหล่อลื่นเกิดการรั่วไหลลงดิน ทำให้พื้นดินบริเวณนั้นเสียคุณค่าในการเพาะปลูก และถ้าซึมลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน จะทำให้น้ำมีกลิ่นเหม็นนำไปบริโภคและใช้สอยไม่ได้

- การเผา น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว และภาชนะบรรจุทำให้เกิดไอควันพิษที่มีโลหะหนักและออกไซด์ของโลหะฟุ้งกระจายสู่บรรยากาศ

2.2.3 กระบวนการนำน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่

1) น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว ที่มีการจัดเก็บในเบื้องต้นโดยผู้ประกอบการ และถูกจัดส่งอย่างเป็นระบบ โดยผู้รับขนส่ง/ผู้จัดเก็บรายย่อย (Collector) เพื่อที่จะนำเข้คลังจัดเก็บน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว ซึ่งคลังจัดเก็บจะมีกระบวนการบำบัดในเบื้องต้น เช่น แยกน้ำ และกรองสิ่งสกปรก ก่อนที่จะนำไปเก็บยังถังพัก (Storage Tank) และหลังจากนั้นจะถูกลำเลียงเข้ายังส่วนกำจัด/บำบัดน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว ซึ่งเป็นส่วนสุดท้ายที่จะทำการกำจัด เช่น เผาเป็นเชื้อเพลิงในเตาเผาปูน หรือเผาทำลายในเตาเผาขยะ (Incinerator) (ถ้ามีสาร โลหะต่างๆ ตกค้างมาก) หรือนำไปบำบัดโดยผ่าน

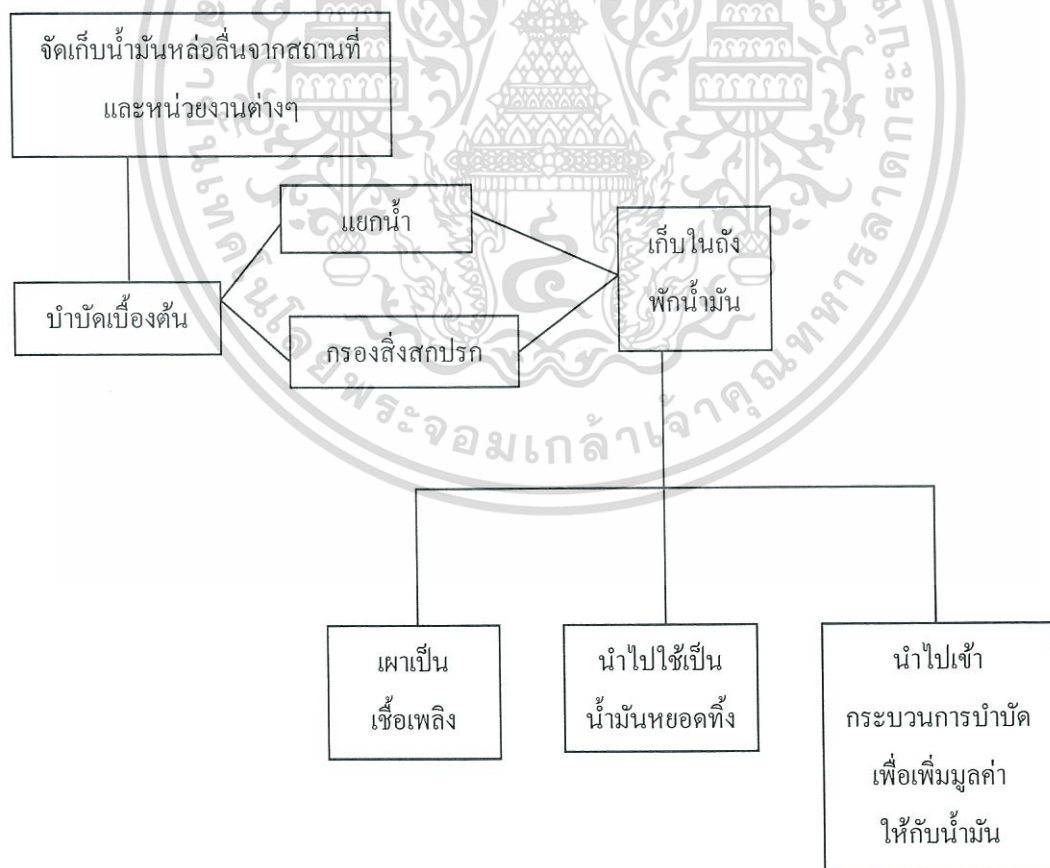
เอกสารนี้เป็นเอกสารของบริษัทเอกชนที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการบำบัดต่างๆ ที่ได้มาตรฐานเพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว เช่น Re-Refining Plant ดังแสดงในรูปที่ 2.4

ในปัจจุบันสามารถนำน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วให้มีคุณสมบัติที่สามารถนำไปใช้ใหม่ได้โดยผ่านกรรมวิธี 2 วิธี (ศิริรัตน์, 2553) คือ

1) การบำบัดทางกายภาพและทางเคมี โดยใช้กรดซัลฟิวริก 10 % โดยปริมาตร และ ฟูลเลอร์เอิร์ท 10 % โดยน้ำหนัก เป็นการฟอกสีและกำจัดองค์ประกอบต่างๆ ที่ไม่เสถียรตลอดจนสิ่งเจือปนอื่นๆ ซึ่งทำให้น้ำมันเสื่อมคุณภาพ

2) การบำบัดด้วยไฮโดรเจน ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้มี 3 ชนิด ได้แก่ 1) ตัวเร่งปฏิกิริยาเรนี-นิกเกิล 2) นิกเกิลออกไซด์ โมลิบดีนัม ไตรออกไซด์บนตัวรองรับอลูมินา และ 3) ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์ ทั้งสแตนไดรออกไซด์บนตัวรองรับอลูมินา สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา เรนี-นิกเกิลมีราคาสูงสามารถใช้บำบัดน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วได้ดีและสามารถแยกออกจากน้ำมันได้ง่าย น้ำมันหล่อลื่นที่ได้จากกรรมวิธีดังกล่าวมีคุณภาพดีโดยเฉพาะอย่างยิ่งในการลดปริมาณซัลเฟอร์ และเพิ่มดัชนีความข้นใสของน้ำมัน

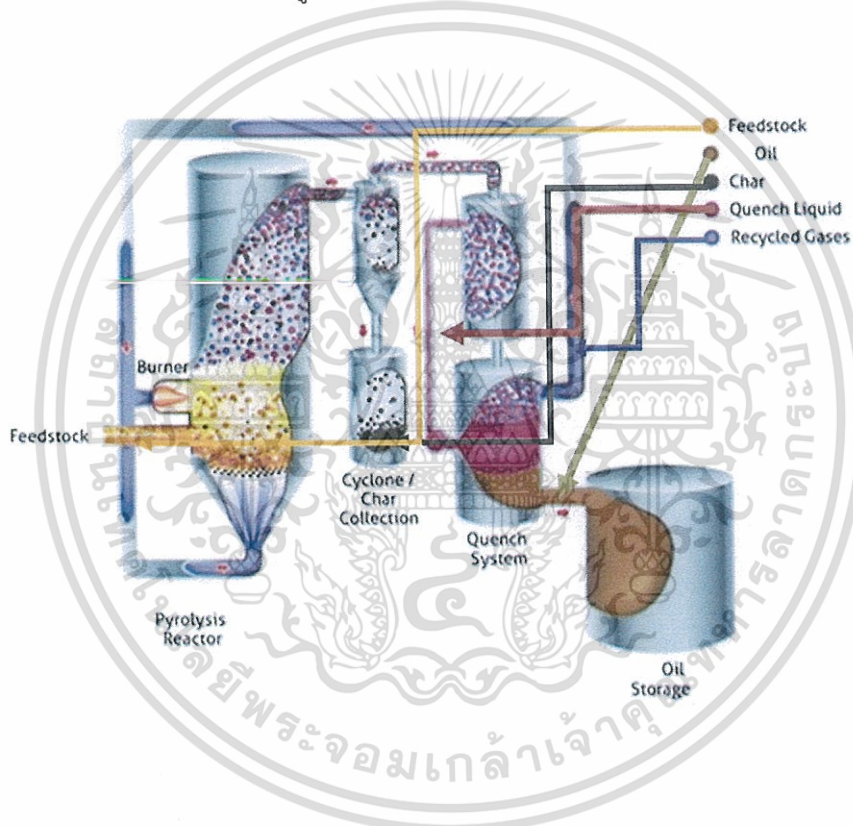


รูปที่ 2.4 กระบวนการจัดการน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วภาพรวม (ดัดแปลงจาก สิริพร, 2546)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) (ศิริรัตน์, 2553)

กระบวนการไพโรไลซิส คือ กระบวนการแตกตัวหรือสลายตัวของสารประกอบหรือวัสดุต่างๆด้วยความร้อน ในบรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจน หรือมีออกซิเจนในปริมาณที่น้อยมาก โดยทั่วไป ผลผลิตที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส สามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิดตามสถานะ คือ 1) ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง (Char) 2) ของเหลว (ทั่วไปมีคุณสมบัติคล้ายน้ำมัน) และ 3) ก๊าซ เป็นผลิตภัณฑ์ขั้นปฐมภูมิ (primary products) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 อัตราส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นอยู่กับสถานะที่ใช้ เช่น อุณหภูมิ อัตราเร็วในการให้ความร้อน เป็นต้น (ศิริรัตน์, 2553) โดยทั่วไป ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิส น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว คือของเหลวหรือน้ำมัน ส่วนก๊าซที่ได้ นิยมนำเข้ามาเป็นเชื้อเพลิง ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 กระบวนการไพโรไลซิส (ดัดแปลงจาก

<http://www.oknation.net/blog/print.php?id=19337>)

ข้อดี และข้อเสียของกระบวนการไพโรไลซิส

ข้อดี

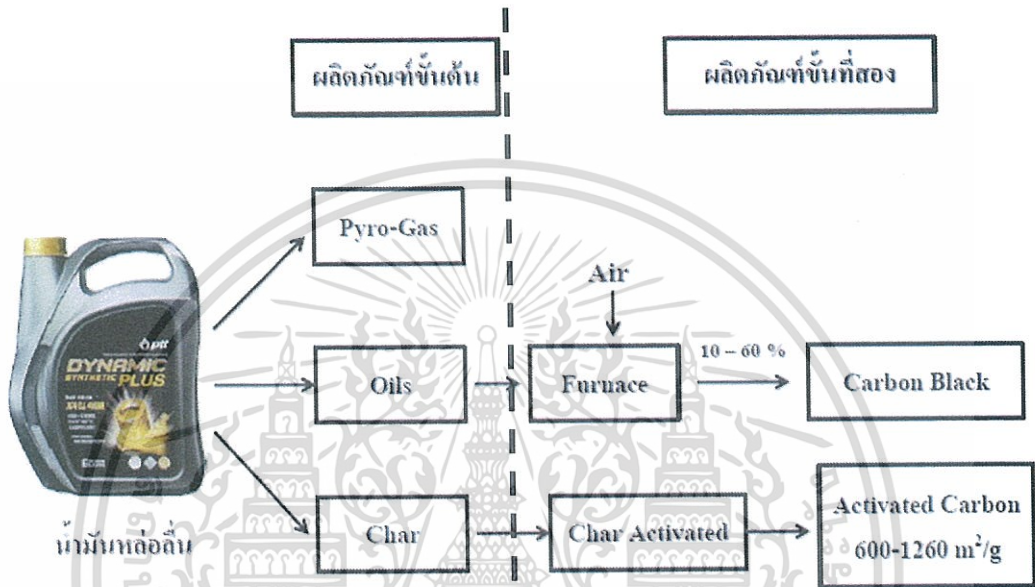
1) การไพโรไลซิสจะได้น้ำมันประมาณ 40-60% และได้ก๊าซประมาณ 10-30% ส่วนที่เหลือเป็นของแข็ง

2) โอกาสในการเกิดไดออกซินฟิวรานน้อยกว่าการเผาไหม้โดยตรงในเตาเผาขยะทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อเสีย

- 1) มีน้ำมันดิน หรือทาร์ (tar) ผสมในก๊าซเชื้อเพลิง ทำให้ต้องหาทางกำจัดหรือทำให้น้อยลงเพื่อไม่ให้มีปัญหาต่อการทำงานของเครื่องยนต์
- 2) มีการลงทุนค่อนข้างสูง
- 3) การควบคุมระบบมีความยุ่งยาก



รูปที่ 2.6 ผลิตภัณฑ์ต่างๆที่เกิดจากการเปลี่ยนน้ำมันหล่อลื่นเป็นน้ำมันโดยกระบวนการไพโรไลซิส (ดัดแปลงจาก)

<http://www.siam Pattana.com/index.php?lay=show&ac=article&Id=539203276&Ntype=1>

2.3.1 สภาวะที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ในกระบวนการไพโรไลซิส โดยสภาวะทั่วไปที่ใช้นั้น ได้แก่

- 1) อุณหภูมิ มีผลต่อการแตกตัวของวัตถุดิบ และปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้
- 2) ความดัน มีผลต่อการแตกตัวของวัตถุดิบ และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ
- 3) ความเร็วในการให้ความร้อน มีผลต่อเวลาที่ใช้ และการแตกตัวของวัตถุดิบในกระบวนการ
- 4) เวลาที่ใช้ในการเผา มีผลต่อปริมาณการใช้เชื้อเพลิง และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ
- 5) ชนิดของถังปฏิกรณ์ มีผลต่ออัตราเร็วในการให้ความร้อนและเวลาที่ใช้ในกระบวนการ
- 6) บรรยากาศในถังปฏิกรณ์ เป็นสูญญากาศ เพื่อช่วยในการแตกตัวของวัตถุดิบในกระบวนการ
- 7) ระบบการป้อนสารตั้งต้น มีผลต่อการแตกตัวของวัตถุดิบที่ป้อนเข้ากระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 ปฏิกริยาในการไพโรไลซิส

ปฏิกริยาที่เกิดในกระบวนการไพโรไลซิสประกอบด้วย 2 ขั้นตอนคือ ขั้นแรก การสลายตัวของสารที่ระเหยง่ายออกจากวัตถุดิบ (devolatilization) ขั้นที่สอง เป็นการแตกตัวของวัตถุดิบเอง โดยองค์ประกอบที่สามารถแตกตัวได้ที่สภาวะที่ใช้ จะแตกตัวออกมาเป็น โมเลกุลที่เล็กลงตามเวลา ที่ให้หรืออุณหภูมิที่กำหนด จนกระทั่งเกิดการแตกตัวที่สมบูรณ์ของวัตถุดิบ โดยอุณหภูมิในแต่ละขั้นจะแตกต่างกันไปขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบ อย่างไรก็ตาม ถ้ามีการให้ความร้อนและเวลายาวเกินไป สารที่ได้จากการแตกตัวของวัตถุดิบจะกลับมารวมตัวกันเป็น โมเลกุลขนาดใหญ่ ซึ่งอาจกลายเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าที่ได้จากกระบวนการ หรือเป็นของแข็งชั้นเหนียวติดอยู่ตามอุปกรณ์ต่างๆ ได้ ดังนั้น สภาวะที่ใช้ในการไพโรไลซิสจะต้องขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ด้วย การมีความรู้ที่ดีเกี่ยวกับวัตถุดิบที่ป้อนเข้ากระบวนการ จะทำให้ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพในปริมาณที่สูง และไม่ก่อให้เกิดผลผลิตที่ไม่ต้องการ หรือก่อให้เกิดผลผลิตที่ทำให้ต้องหยุดการผลิตชั่วคราวเพื่อทำการซ่อมแซมอุปกรณ์ (ศิริรัตน์, 2553)

ในบางครั้งอาจมีการเติมไฮโดรเจนหรือไอน้ำเข้าไปในกระบวนการไพโรไลซิสด้วย ทั้งนี้เพื่อเปลี่ยนการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์และบางครั้งทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมันมีความเสถียรมากขึ้น เนื่องจากไฮโดรเจนจะเข้าไปรบกวนการเกิดปฏิกริยาออกซิเดชัน โดยออกซิเจนที่มีอยู่ในเนื้อของวัตถุดิบ การเติมน้ำในปริมาณไม่มากเกินไป เข้าไปเป็นตัวกลางในกระบวนการไพโรไลซิส จะไปเพิ่มความดันให้กับกระบวนการ ทำให้วัตถุดิบเกิดเป็นของไหลได้ง่าย และทำให้ถ่านที่ได้จากกระบวนการมีค่าพื้นที่ผิวสูงขึ้น (ในกรณีที่ต้องการผลิตถ่านกัมมันต์ หรือถ่านดูดซับ) เป็นต้น (ศิริรัตน์, 2553)

2.3.3 ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิส

กระบวนการไพโรไลซิสเป็นเทคโนโลยีที่ถูกนำมาพัฒนาใช้มากที่สุด โดยเฉพาะกับขยะพลาสติก หรือของเสียปิโตรเคมี ทั้งนี้เนื่องจากโดยหลักการแล้ว เป็นเทคโนโลยีที่ใช้อุณหภูมิไม่สูงนัก และได้ทั้งแก๊ส น้ำมัน และสารปิโตรเคมีอื่นๆ เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณค่าและคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ กระบวนการไพโรไลซิสสามารถได้ผลผลิตภายในเครื่องปฏิกรณ์เดียวโดย ไม่ต้องใช้เงินลงทุนสูงมากนัก นอกจากนี้ ของเสียปิโตรเคมีเป็นของเสียที่ย่อยสลายยาก หรือใช้เวลานานในการย่อยสลายจำเป็นต้องใช้เทคโนโลยีเปลี่ยนของเสียให้เป็นพลังงานมากำจัดเพื่อให้ได้ประโยชน์มากที่สุด (ศิริรัตน์, 2553)

2.3.3.1 ลักษณะการให้ความร้อนแก่เครื่องปฏิกรณ์

เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้กับวัตถุดิบที่มีสภาพเป็นของเหลว หรือใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงนั้น มีความแตกต่างกันออกไปตามชนิดและองค์ประกอบของวัตถุดิบ รวมถึงเทคโนโลยีที่ใช้ เครื่อง

ปฏิกรณ์ไฟโรไลซิสสามารถแบ่งตามลักษณะการให้ความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ออกเป็น 4 ลักษณะ (ศิริรัตน์, 2553)

ลักษณะที่ 1 เป็นการให้ความร้อนในปริมาณหนึ่ง ทำให้ส่วนหนึ่งของวัตถุดิบแตกตัวได้ และคายความร้อนออกมาเพื่อให้ความร้อนแก่วัตถุดิบในส่วนที่เหลือ ใช้ในการแตกตัวต่อเนื่องภายในเครื่องปฏิกรณ์เดียวกัน

ลักษณะที่ 2 เป็นการให้ความร้อนโดยตรงจากก๊าซร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ หรือการแตกตัวของวัตถุดิบในลักษณะต่างๆจากเครื่องปฏิกรณ์อื่นๆมาที่เครื่องปฏิกรณ์หลัก

ลักษณะที่ 3 เป็นการให้ความร้อนโดยตรงผ่านตัวกลางเฉื่อยที่ป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์หลัก เช่น การป้อนก๊าซเฉื่อยเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์หลักร่วมกับวัตถุดิบ

ลักษณะที่ 4 เป็นการให้ความร้อนผ่านผนังของเครื่องปฏิกรณ์หลักที่บรรจุวัตถุดิบ และให้ความร้อนถ่ายเทสู่วัตถุดิบโดยผ่านผนังปฏิกรณ์

2.3.3.2 ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์ไฟโรไลซิส

เครื่องปฏิกรณ์ไฟโรไลซิสสามารถแบ่งออกเป็น 5 ชนิดใหญ่ๆ ตามลักษณะองค์ประกอบและการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ (ศิริรัตน์, 2553) ได้แก่

(ก) เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่ (Fixed-Bed Reactor)

เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่ที่เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการออกแบบอย่างง่ายให้มีการบรรจุวัตถุดิบแบบคงที่ภายในเครื่อง โดยวัตถุดิบจะไม่มีเคลื่อนที่ขณะให้ความร้อนจนกระทั่งแตกตัวหมด สิ่งที่เคลื่อนที่ในเครื่องปฏิกรณ์ คือ ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของไหล ซึ่งไหลออกจากปฏิกรณ์ได้โดยการนำพาของก๊าซเฉื่อย ความดันภายใน หรือการดูดออกโดยใช้ปั๊มสุญญากาศ ดังรูปที่ 2.7 เนื่องจากการใช้ปริมาตรคงที่คือ ขนาดของถังปฏิกรณ์ไม่สามารถขยายตัว มีเพียงสิ่งเดียวที่สามารถเคลื่อนที่ได้ภายในถังปฏิกรณ์ คือผลิตภัณฑ์ที่เป็นของไหล ดังนั้นเครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้เป็นปฏิกรณ์อย่างง่ายที่สุด จึงนิยมใช้กันมากในห้องปฏิบัติการ (ศิริรัตน์, 2553)

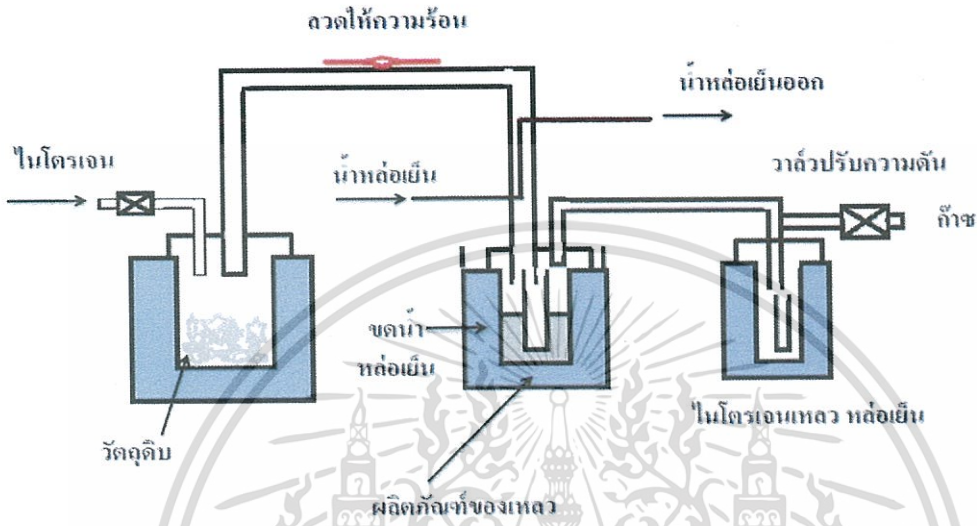
(ข) เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน (Continuous Stirred Tank Reactor)

เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนเป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการกวนวัตถุดิบที่ป้อนเข้าภายในปฏิกรณ์ด้วยใบกวนที่อยู่ด้านในของเครื่องปฏิกรณ์ เพื่อให้เกิดการเคลื่อนตัวของวัตถุดิบภายในปฏิกรณ์ตลอดเวลา ดังรูปที่ 2.8 และมีการถ่ายเทความร้อนได้มากขึ้น วัตถุดิบแตกตัวอย่างรวดเร็วภายในปฏิกรณ์ขณะเคลื่อนตัวด้วยใบกวน การป้อนวัตถุดิบมักจะทำโดยเครื่องป้อนแบบสกรู ซึ่งมีข้อดี คือ ทำให้สามารถป้อนวัตถุดิบครั้งละน้อยๆ และอย่างต่อเนื่องรวดเร็ว ทำให้วัตถุดิบแตกตัวได้อย่างรวดเร็วทันทีที่เข้าถึงปฏิกรณ์ เมื่อรวมกับข้อดีของการมีใบกวนแล้ว ทำให้วัตถุดิบยังสามารถแตกตัวได้อย่างรวดเร็วมากขึ้น และสามารถผลิตผลิตภัณฑ์ได้อย่างรวดเร็วและต่อเนื่องมากขึ้น อย่างไรก็ตามการออกแบบใบกวนมีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ และการกำจัดผลิตภัณฑ์ของแข็งออกจากปฏิกรณ์

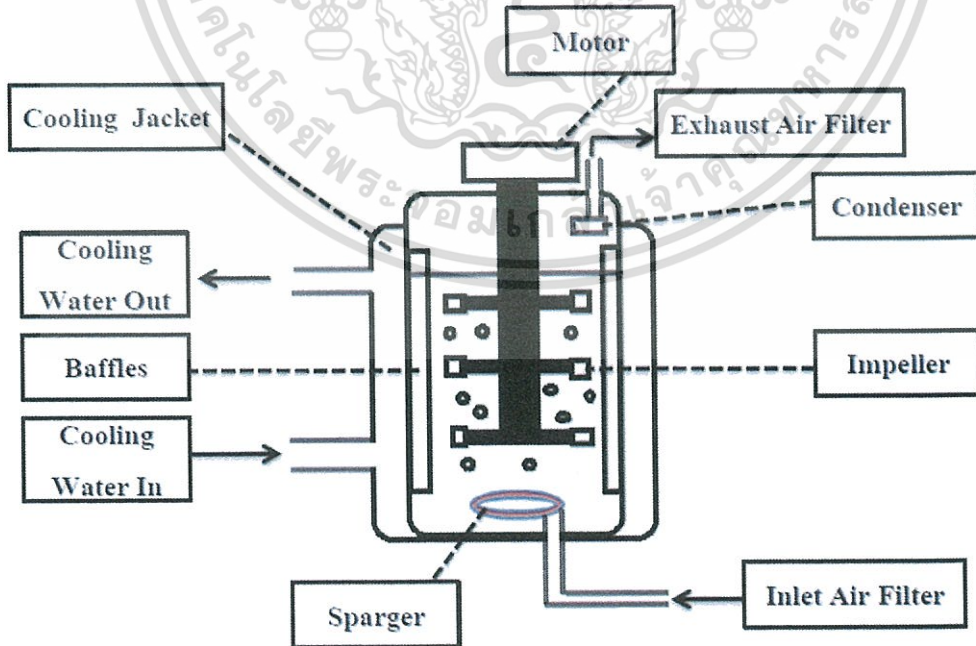
ในบางครั้ง ดังนั้นผู้ใช้ควรต้องเลือกชนิดของใบกวนให้เหมาะสมกับวัตถุดิบ ผลิตภัณฑ์ที่ได้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถไหลออกจากปฏิกิริยาได้โดยการนำพาของก๊าซเฉื่อย ความดันภายใน หรือการดูดออกโดยการใช้ปั๊มสุญญากาศ นอกจากนี้ทำให้ค่าคอนเวอร์ชันของสารตั้งต้นต่อปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์มีค่าน้อยสุดเมื่อเทียบกับปฏิกิริยาไหลต่อเนื่อง



รูปที่ 2.7 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่แสดงในระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (ดัดแปลงจาก Miller *et al.*, 2006)

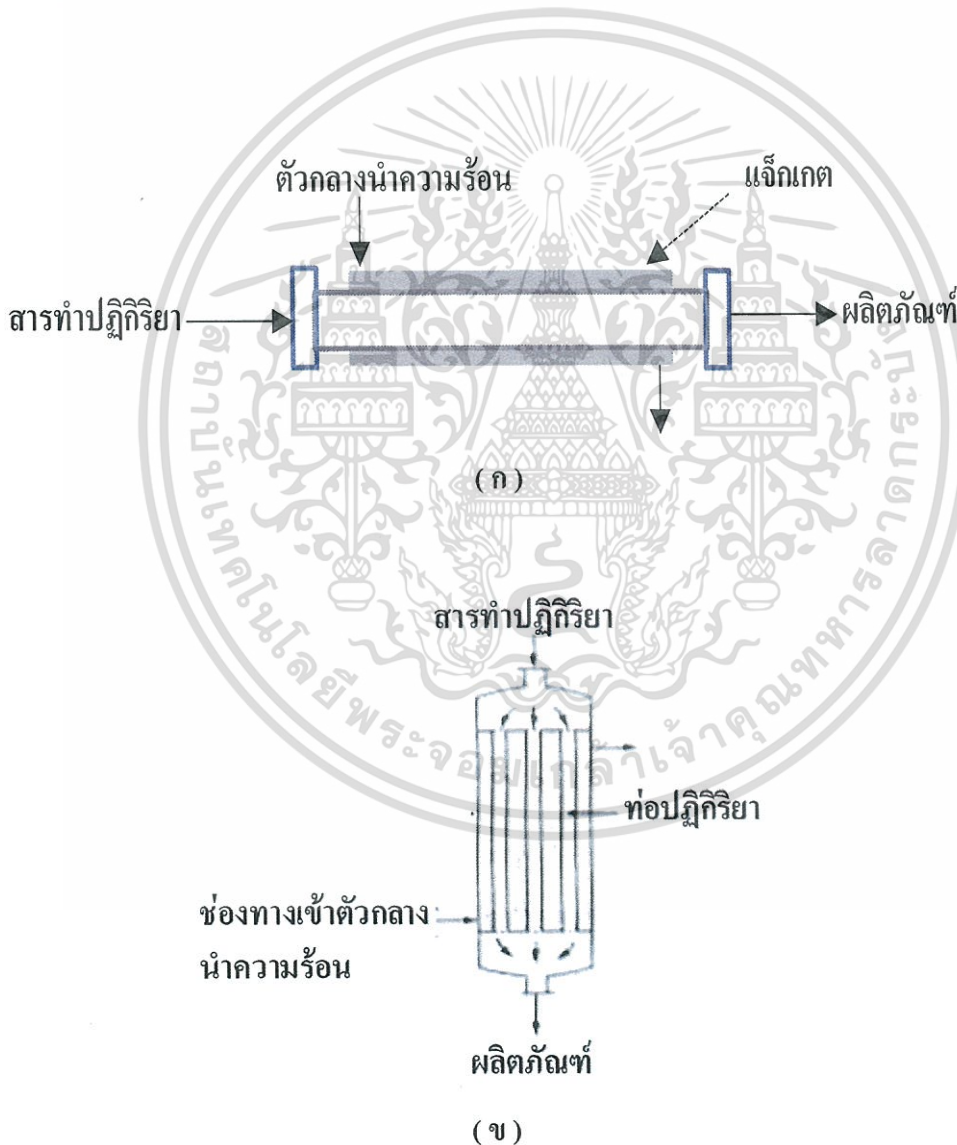


รูปที่ 2.8 เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน (ดัดแปลงจาก Sheirs, 2006)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ค) เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล (Flow Reactor)

เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลเป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ออกแบบให้มีการเคลื่อนตัวหรือการไหลของวัตถุดิบตามแนวแกนของปฏิกรณ์ขณะที่เกิดการแตกตัวด้วยความร้อน วัตถุดิบจะแตกตัวอย่างสมบูรณ์เมื่อเคลื่อนตัวมาถึงทางออกของเครื่องปฏิกรณ์ เช่นเดียวกับแบบเบดคงที่ ดังรูปที่ 2.9 โดยวัตถุดิบจะถูกป้อนอย่างต่อเนื่องจากด้านบนของปฏิกรณ์ด้วยเครื่องป้อนแบบสกรู เมื่อวัตถุดิบเข้าสู่ปฏิกรณ์ก็จะเคลื่อนตัวและตกลงไปตามแนวแกนของปฏิกรณ์ด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกขณะที่ตกลงไปก็จะเกิดการแตกตัวเป็นผลิตภัณฑ์ตลอดเวลา สภาวะที่ใช้ในปฏิกรณ์จะต้องทำให้วัตถุดิบแตกตัวอย่างสมบูรณ์เมื่อเคลื่อนตัวมาถึงทางออกของปฏิกรณ์ ลักษณะการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์นี้เป็นการทำงานแบบต่อเนื่อง



รูปที่ 2.9 เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล (ดัดแปลงจาก Bilgesü *et al.*, 2006)

(ก) แบบท่อเดี่ยว

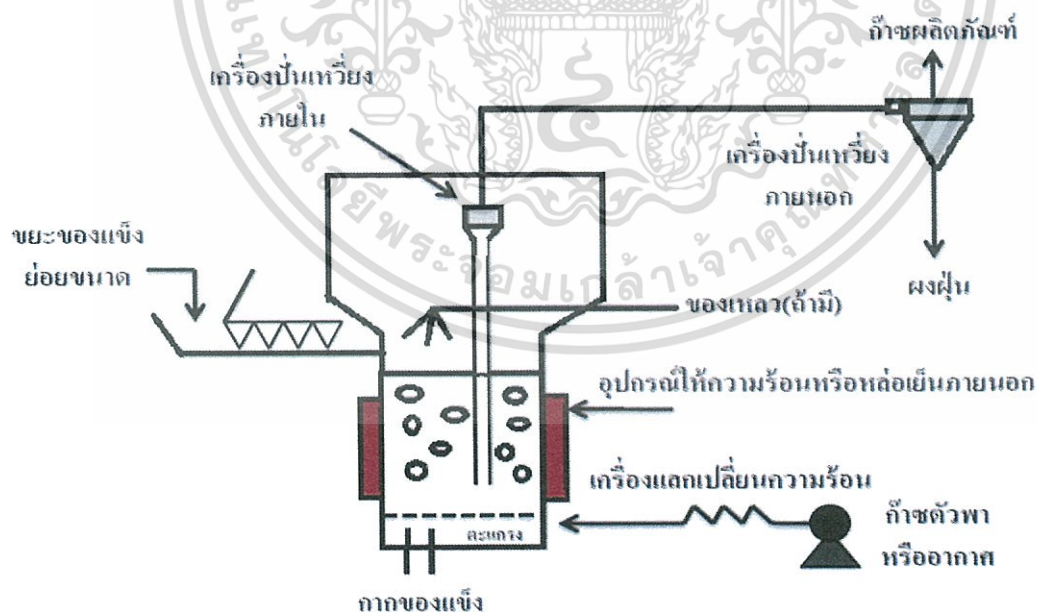
(ข) แบบหลายท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ง) เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคซ์ (Fluidized Bed Reactors)

เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคซ์เป็นปฏิกรณ์ที่ออกแบบให้วัสดุเกิดเคลื่อนตัวในปฏิกรณ์แบบปั่นป่วน (turbulent) จนกระทั่งแตกตัวหมด วัสดุที่จะป้อนเข้าจะถูกย่อยให้มีขนาดเล็กเพียงพอที่จะสามารถเคลื่อนที่แบบปั่นป่วนได้อย่างอิสระ และไม่ใช้พลังงานในการทำให้ปั่นป่วนมากเกินไป จากนั้นวัสดุจะถูกป้อนเข้าปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่องเป็นครั้งๆ ตามปริมาณที่ต้องการในครั้งหนึ่งๆ เมื่อวัสดุเข้าถึงภายในปฏิกรณ์ที่มีการป้อนก๊าซตัวพาด้วยความเร็วสูงพอที่จะทำให้วัสดุเคลื่อนตัวภายในปฏิกรณ์ (ระบบนี้เป็นระบบการปั่นป่วนของก๊าซ - ของแข็ง) จากนั้นให้ความร้อนแก่ปฏิกรณ์จนกระทั่งวัสดุแตกตัวหมด แล้วจึงป้อนวัสดุเข้าอีกครั้งหนึ่ง การทำงานของเครื่องปฏิกรณ์นี้จึงเป็นแบบต่อเนื่อง เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคซ์สามารถแบ่งออกตามลักษณะการเคลื่อนตัวของวัสดุในเครื่องปฏิกรณ์ได้เป็น 2 ประเภท คือ

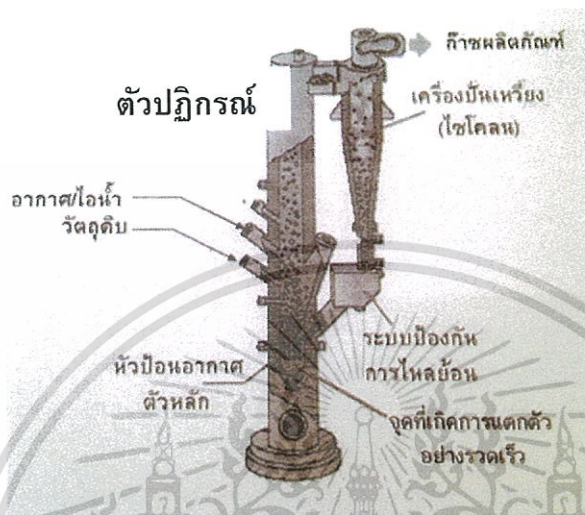
1) เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคซ์แบบฟองก๊าซ (Bubbling Fluidized Bed) เป็นปฏิกรณ์ที่ออกแบบมาเพื่อทำให้เกิดการไหลของวัสดุแบบปั่นป่วน ตามการเคลื่อนที่ของฟองก๊าซที่ป้อนเข้าสู่ปฏิกรณ์ ดังรูปที่ 2.10 การทำงานเริ่มจากการป้อนก๊าซที่ใช้เป็นตัวพาเข้าไปในปฏิกรณ์พร้อมกับวัสดุ และตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าสู่ปฏิกรณ์ ความเร็วของก๊าซที่ใช้จะทำให้เกิดการรวมตัวของวัสดุ และก๊าซ ทำให้วัสดุเคลื่อนตัวแบบปั่นป่วน และเกิดการยกตัวขึ้นไปตามทิศทางของก๊าซ และเคลื่อนที่แบบปั่นป่วนภายในปฏิกรณ์อย่างต่อเนื่องจนกระทั่งแตกตัวหมด



รูปที่ 2.10 เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคซ์แบบฟองก๊าซ (Yang, 1995)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไอซ์แบบไหลเวียน (Circulating Fluidized Bed) เป็นปฏิกรณ์ที่ ออกแบบมาเพื่อทำให้เกิดการไหลเวียนของวัสดุคิบในปฏิกรณ์แบบปั่นป่วน ดังรูปที่ 2.11 การ ทำงานจะคล้ายกับเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไอซ์แบบฟองก๊าซ มีข้อแตกต่างกันคือ มีการไหลเวียน ของวัฏภาคของแข็ง ซึ่งในที่นี้ หมายถึง ตัวเร่งปฏิกิริยา

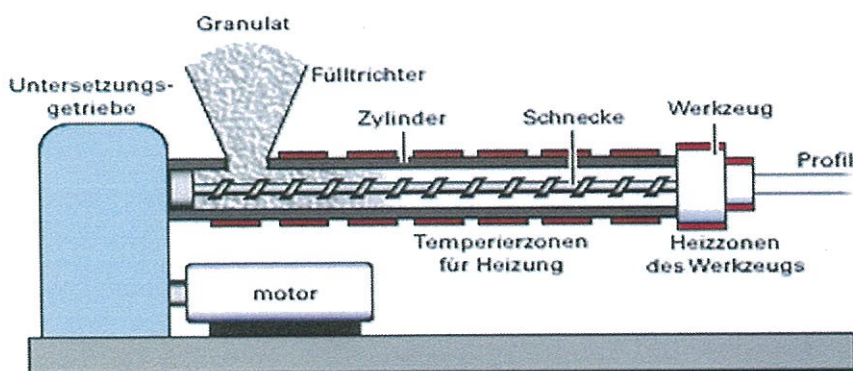


รูปที่ 2.11 เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไอซ์แบบไหลเวียน (ปรับปรุงจาก <http://www.jfe-rd.co.jp>)

(จ) เครื่องปฏิกรณ์แบบเครื่องอัดรีด และแบบเตาหมุน (Extruders and Rotary Kilns)

เครื่องปฏิกรณ์แบบเครื่องอัดรีด เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการหมุนกวนของวัสดุคิบภายในตัว ปฏิกรณ์โดยใช้สกรู หรืออุปกรณ์ที่คล้ายสกรู ในระหว่างการให้ความร้อน เพื่อให้เกิดการถ่ายเท ความร้อน ไปสู่วัสดุคิบได้อย่างสม่ำเสมอในขณะที่วัสดุคิบเดินทางไปตามสกรู ความเร็วในการหมุน ของสกรูต้องพอดีกับการแตกตัวหมดของวัสดุคิบ เมื่อวัสดุคิบเดินทางมาถึงปลายเครื่องปฏิกรณ์ ด้านท้ายของเครื่องปฏิกรณ์มีทางออกของทั้งผลิตภัณฑ์ที่เป็นของไหลและของแข็ง นอกจากนี้ยังมี เครื่องปฏิกรณ์แบบเครื่องอัดรีดแบบเตาหมุนที่มีการหมุนกวนของวัสดุคิบภายในเครื่องปฏิกรณ์โดย ใช้สกรูหรืออุปกรณ์ที่คล้ายสกรู ในระหว่างการให้ความร้อน เพื่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อนไปสู่ วัสดุคิบได้อย่างสม่ำเสมอในขณะที่วัสดุคิบเดินทางไปตามสกรู แต่มีความแตกต่างตรงที่เครื่อง ปฏิกรณ์แบบเตาหมุน มีการหมุนเตาปฏิกรณ์ตามแนวรัศมีของเครื่องปฏิกรณ์ (โดยใช้มอเตอร์ที่มี แกนขับเคลื่อนร่วมกันระหว่างเครื่องปฏิกรณ์และสกรู) ร่วมกับการใช้สกรูในการเคลื่อนตัวของ วัสดุคิบผ่านตามแนวแกนของปฏิกรณ์ ดังรูปที่ 2.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 เครื่องปฏิกรณ์แบบเครื่องอัดรีดแบบเตาหมุน (ปรับปรุงจาก

<http://www.google.com/patents/US8067047>)

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Lazaro and Herod (2001) ศึกษาผลผลิตที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วร่วมกับถ่านหินในสัดส่วน 50:50 โดยศึกษาผลของอุณหภูมิที่ 600, 650, 700 องศาเซลเซียส ความดันที่ 0.1, 0.5, 1 MPa และชนิดของถ่านหิน ผลการทดลอง พบว่า การไพโรไลซิส น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วร่วมกับถ่านหิน จะช่วยในการเปลี่ยนไฮโดรเจนในถ่านหินให้เป็นผลผลิตทางปิโตรเคมี ซึ่งแตกต่างจากการไพโรไลซิสถ่านหินเพียงอย่างเดียวซึ่งจะได้โมเลกุลไฮโดรเจนเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับค่าทางทฤษฎีพบว่าก๊าซมีเทน อัลเคนชนิดเบา เอทิลีน โพรพิลีน จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิและความดันเพิ่มขึ้น แต่ไม่ช่วยเปลี่ยนโมเลกุลของไฮโดรเจนเป็นสารประกอบที่มีคาร์บอนมากกว่า 4 ($>C_4$)

อัญญาธณี (2546) ศึกษากระบวนการแตกตัวด้วยไฮโดรเจนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนอะลูมินา ในการทดลองนี้ใช้เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กขนาด 70 มิลลิลิตร โดยใช้ความดันก๊าซไฮโดรเจนที่ 0–200 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อุณหภูมิ 400–470 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาระหว่าง 30–120 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่าง 0.0–5.0% โดยน้ำหนัก ผลิตภัณฑ์น้ำมันเบาที่ได้สามารถนำมาวิเคราะห์หาองค์ประกอบโดยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี ด้วยวิธี Simulated Distillation Gas Chromatography (SDGC) พบว่า ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ความดันก๊าซไฮโดรเจนที่ใช้ 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 90 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ 1.0% ให้ปริมาณน้ำมันเบาที่ได้ 85.64% ซึ่งประกอบด้วย แนฟทา 36.15%, เคนโซลิน 11.49%, ก๊าซออยล์ชนิดเบา 11.21%, ก๊าซออยล์ชนิดหนัก 8.77% และไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาว 18.02%

Gómez-Rico *et al.* (2003) ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการสลายตัวด้วยความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว โดย TGA ภายใต้สภาวะก๊าซฮีเลียม และก๊าซไนโตรเจน : ออกซิเจน โดยทำการทดลองโดยกระบวนการไพโรไลซิสใน Tubular reactor ที่ 723 และ 1,123 K วิเคราะห์สารอินทรีย์ระเหยง่ายและสารอินทรีย์ที่ระเหยง่ายด้วย GC จากการวิเคราะห์ TGA พบว่าไม่มีความแตกต่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับวิชาการเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างการใช้ก๊าซฮีเลียม และการใช้ก๊าซฮีเลียม:ออกซิเจน และพบว่าน้ำมันหล่อลื่นจะเริ่มสลายตัวด้วยความร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง 450 ถึง 700 K เมื่อวิเคราะห์หาองค์ประกอบ โดย GC-MS ของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วกับน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสที่ 773 K พบว่ามีองค์ประกอบส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง C_{21} - C_{37}

Kim *et al.* (2003) ศึกษาการสลายตัวของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วโดยใช้ TGA ที่อัตราการความร้อน 0.5, 1.0 และ 2.0 °C/min ในถังกวนแบบเบดคงที่ อุณหภูมิที่ใช้ในการสลายตัวอยู่ระหว่าง 400 ถึง 460 °C และมีการเพิ่มขึ้นของพลังงาน ซึ่งพลังงานเฉลี่ยที่ได้คือ 322.69 kJ/mol น้ำมันผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองค่อนข้างที่จะมีปริมาณจำนวนคาร์บอนที่สูง และพลังงานลดลงเมื่อจำนวนคาร์บอนมากขึ้น

Mascolo (2004) ศึกษาการสลายตัวของก๊าซจากน้ำมันหล่อลื่นสังเคราะห์ภายใต้กระบวนการไพโรไลซิสใช้น้ำมันหล่อลื่นในตลาด 3 ยี่ห้อ โดยใช้ System for thermal diagnostic study (STDS) อุณหภูมิระหว่าง 400 และ 1,000 °C ศึกษาแบบจำลองของจุด hot spot ของน้ำมันหล่อลื่น จากการทดลองเริ่มต้นในการสลายที่อุณหภูมิ 600-700 °C จนถึง 900-1,000 °C ผลิตภัณฑ์ขั้นแรกที่ได้เป็นสารจำพวกอะโรมาติก และ PAHs จะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 700 °C ขั้นที่ 2 ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นเบนซีนในรูปของ aryl moieties

Conesa *et al.* (2009) ศึกษาอัตราการปล่อยมลพิษจากการไพโรไลซิสและเผาไหม้ของเสียต่างๆ ได้แก่ พอลิเอทิลีน ยางรถยนต์ สลัดจ์น้ำทิ้งชุมชน พีวีซี ผ้าฝ้าย ผ้าพอลิเอสเตอร์ ของเหลือทิ้งจากเศษเนื้อและกระดูก ของเสียจากโพลีฟอยล์ น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว และของเสียกระดาษ โดยทดลองในถังปฏิกรณ์แบบนอนภายใต้สภาวะ Fuel-rich จากผลการทดลองพบว่า สารประกอบอินทรีย์กึ่งระเหยง่ายจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทั้งการไพโรไลซิสและการเผาไหม้ ส่วนสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดเบา (light hydrocarbons) สารประกอบอินทรีย์กึ่งระเหยง่าย สารประกอบโมโน และโพลีอะโรแมติก จะเกิดมากที่สภาวะอุณหภูมิปานกลาง (intermediate temperature)

Lam *et al.* (2012) ศึกษาการนำน้ำมันเครื่องรถยนต์ที่ใช้แล้วมาทวนอย่างต่อเนื่องในถังปฏิกรณ์ให้ความร้อนด้วยเตาไมโครเวฟ ทำให้ได้ก๊าซกลับมา 41% พบว่ามีความเข้มข้นของ light aliphatic hydrocarbons มากถึง 86% สามารถนำไปใช้เป็นตัวเติมหรือเชื้อเพลิงในกระบวนการต่างๆ หรือนำมาเปลี่ยนสภาพเป็นไฮโดรเจนสำหรับเป็นเชื้อเพลิงสำรอง จากการทดลองพบว่ายังมีการรวมตัวของไฮโดรเจนอะตอมเป็นก๊าซไฮโดรเจนมากกว่า 19% และ CO สามารถนำมาใช้เป็นแก๊สสังเคราะห์ (H_2+CO มากกว่า 35% โดยปริมาตร) ปริมาณของก๊าซไฮโดรคาร์บอนที่สูงสามารถนำมาใช้รวมกับการให้ความร้อนร่วมกับเตาไมโครเวฟได้ การใช้เตาไมโครเวฟให้ความร้อนมีผลดีต่อการเปลี่ยนสภาพของน้ำมันเครื่องรถยนต์ที่ใช้แล้วเป็นก๊าซที่มีประโยชน์ ด้วยเหตุนี้ของเสียที่ไม่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมนั้นสามารถเปลี่ยนสภาพเป็นสิ่งที่มีความปลอดภัยและเป็นทางเลือกของไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฮโดรเจน หรือพลังงาน ไฮโดรคาร์บอน ซึ่งกระบวนการนี้ทำให้ได้ก๊าซที่มีประโยชน์มากกว่าการ
กำจัดของเสียแบบเดิม และแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการรีไซเคิลน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วที่เป็น
ปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมได้ดี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์

3.1.1 สารเคมี

1. แก๊สไนโตรเจนความบริสุทธิ์ 99 % บริษัท Praxair ประเทศไทย
2. อะซีโตน (C_3H_6O) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Merck, ประเทศเยอรมนี
3. โทลูอีน (C_7H_8) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Merck, ประเทศเยอรมนี
4. 2-โพรพานอล (C_3H_8O) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Merck, ประเทศเยอรมนี
5. เอทานอล (C_2H_6O) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Merck, ประเทศเยอรมนี
6. เมทานอล (CH_4O) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Merck, ประเทศเยอรมนี
7. กรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้น 6 M เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ Lab Scan บริษัท Analytical Science, ประเทศโปแลนด์
8. โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Ajax Finechem, ประเทศออสเตรเลีย
9. สารละลายมาตรฐานกรดเบนโซอิก (C_6H_5COOH) บริษัท Merck, ประเทศเยอรมนี
10. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Ajax Finechem, ประเทศออสเตรเลีย

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้

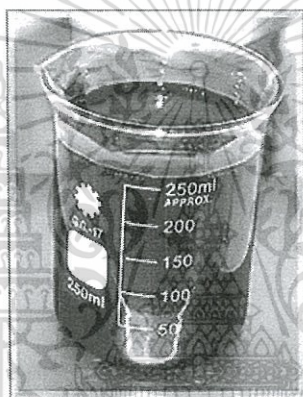
1. เครื่องปฏิกรณ์ไฟโรไลซิสแบบถ่วงน้ำหนักแบบ พร้อมระบบควบคุมไฟฟ้า
2. เทอร์โมกราวิเมตริก แอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric Analyzer, TGA) รุ่น TGA Pyris1, บริษัท Perkin Elmer, ประเทศอังกฤษ
3. แก๊สโครมาโทกราฟ - แมสสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (GC-MS) รุ่น Agilent Technologies GC-MS 6890, บริษัท Palo Alto, ประเทศสหรัฐอเมริกา
4. เครื่องวัดความหนืด (Viscometer) รุ่น SpectroVISC Q300, Semi-Automatic Kinematic Viscometer, บริษัท Spectro Inc, ประเทศสหรัฐอเมริกา
5. เตาเผาไฟฟ้า (Electric Muffle Furnace) รุ่น 6000, บริษัท Thermolyne, ประเทศสหรัฐอเมริกา
6. เครื่องปั่นเหวี่ยงตะกอน (Centrifuge) รุ่น EBA 20, บริษัท Hettich, ประเทศเยอรมนี
7. เทอร์โมมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ตะแกรงกรองตะกอนขนาด 100 เมช
9. เครื่องแก้วต่างๆ
10. หน้ากากกันสารเคมี, บริษัท 3M, ประเทศไทย
11. ถุงมือไนไตร (Disposable nitrile glove), บริษัท Touch N Tuff , ประเทศไทย

3.2 ตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว

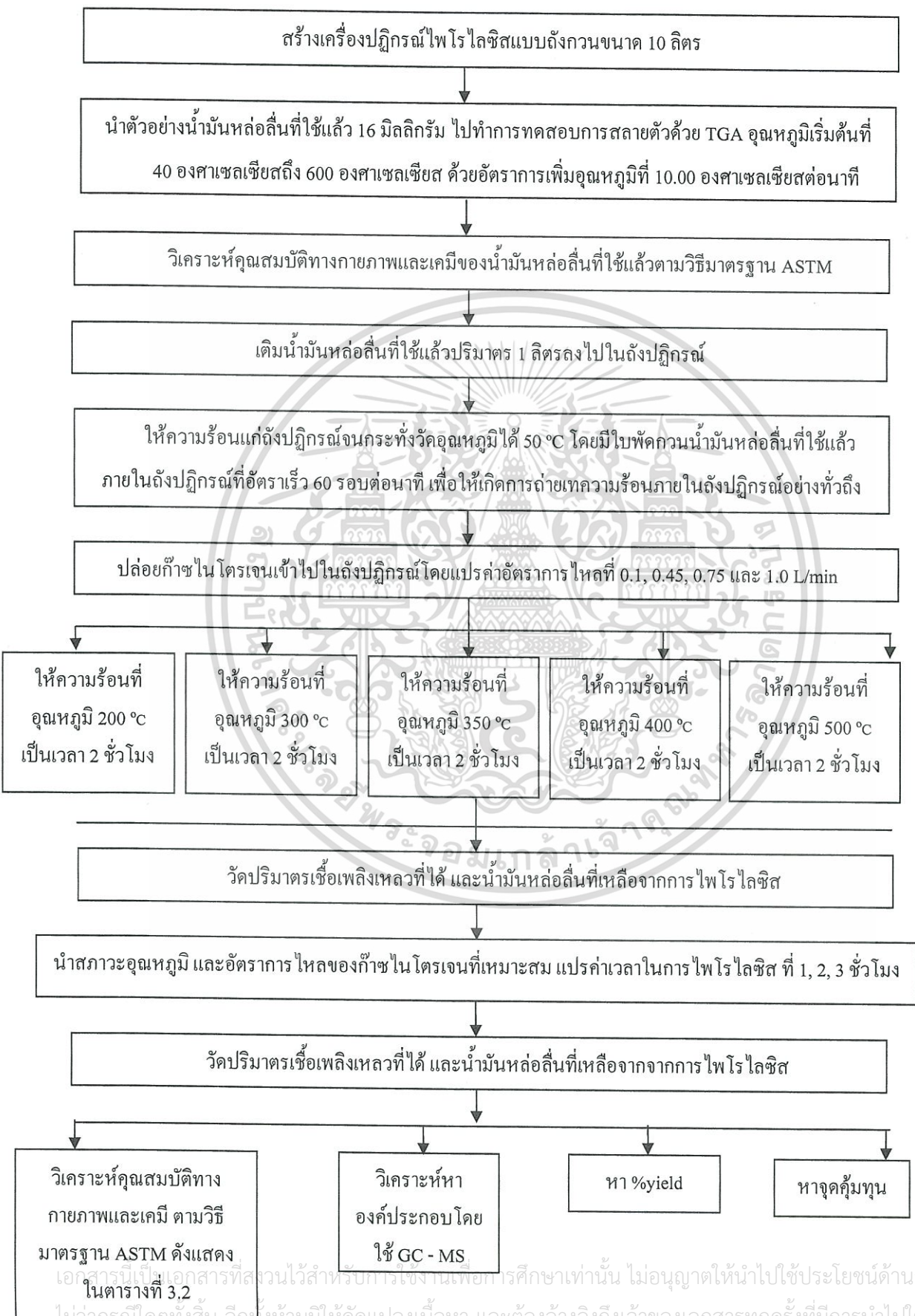
น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วได้รับความอนุเคราะห์ตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นประเภทที่ใช้กับยานยนต์ (น้ำมันดำ) จากบริษัท ที โอ อาร์ อินดัสตรี จำกัด ซึ่งเก็บรวบรวมน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วจากศูนย์รถยนต์ต่างๆ และจากยานยนต์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ผ่านการบำบัดเบื้องต้นโดยการตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน แล้วกรองด้วยตะแกรงขนาด 100 เมช เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกออก (รูปที่ 3.1)



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว

3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนในการทดลองสรุปได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนภูมิขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 การสร้างเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิส

ในการทดลองนี้เลือกใช้เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบถังกวน เนื่องจากวัตถุดิบที่ใช้เป็นของเหลว โดยมีการกวนวัตถุดิบที่ป้อนเข้าภายในปฏิกรณ์ด้วยใบกวนที่อยู่ด้านในของเครื่องปฏิกรณ์ เพื่อให้เกิดการเคลื่อนตัวของวัตถุดิบภายในปฏิกรณ์ตลอดเวลาและมีการถ่ายเทความร้อนได้มากขึ้น วัตถุดิบแตกตัวอย่างรวดเร็วภายในปฏิกรณ์ขณะเคลื่อนตัวด้วยใบกวน จึงเหมาะสมที่จะใช้เป็นเครื่องปฏิกรณ์ในกระบวนการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว

เครื่องปฏิกรณ์ในการไพโรไลซิสขนาดความจุ 10 ลิตร (รูปที่ 3.3) สร้างโดยใช้สแตนเลสเกรด 304 เป็นวัสดุ มีส่วนประกอบดังแสดงในตารางที่ 3.1

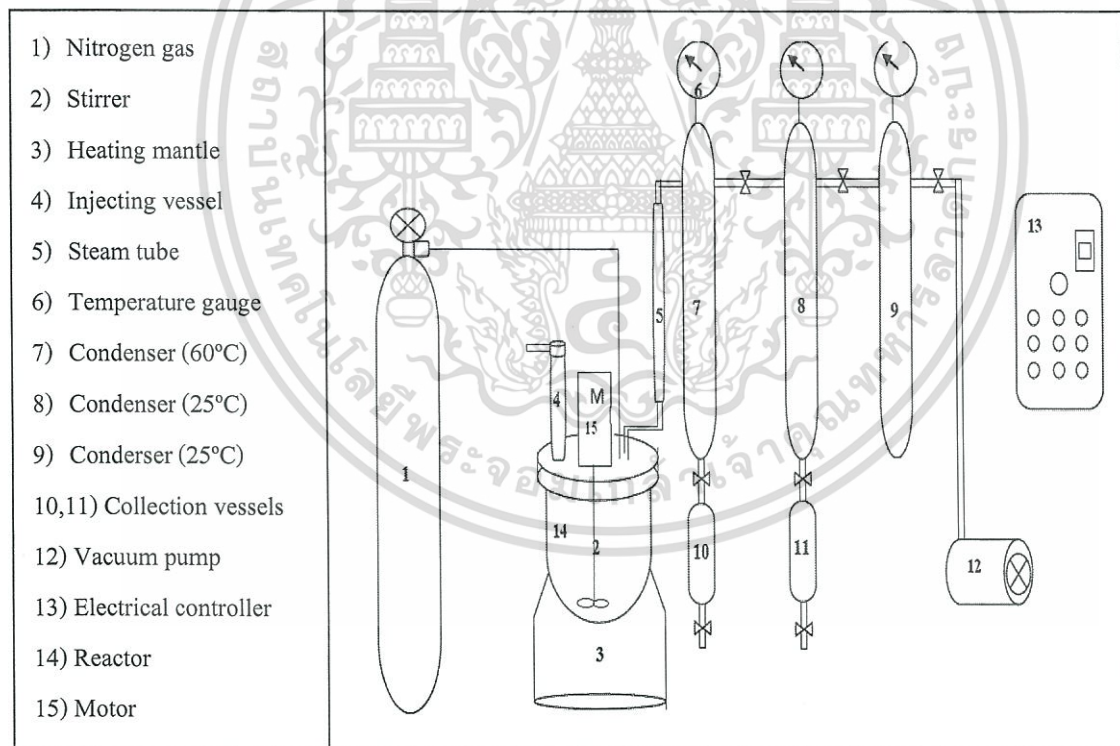
ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบและหน้าที่ของเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว

หมายเลข	ส่วนประกอบ	ขนาด	หน้าที่
1	ก๊าซไนโตรเจน	ความบริสุทธิ์ 99 %	ไล่น้ำออกจากน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วในขณะที่ให้ความร้อน
2	ใบพัดกวน	ขนาดยาว 25 cm ความกว้าง 1.5 cm	ช่วยกระจายความร้อนให้แก่วัตถุดิบที่อยู่ภายในถังปฏิกรณ์
3	เตาให้ความร้อนไฟฟ้า	กำลังไฟฟ้า 700 วัตต์	ให้ความร้อนแก่วัตถุดิบในถังปฏิกรณ์
4	ท่อสำหรับเติมวัตถุดิบ	ความสูง 30 cm เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 3 cm	เป็นตัวส่งวัตถุดิบเข้าสู่ถังปฏิกรณ์
5	ท่อส่งไอระเหย	ความสูง 60 cm เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 5 cm	ส่งไอระเหยที่ได้จากการให้ความร้อนในถังปฏิกรณ์ไปสู่ถังควบแน่น
6	เทอร์โมมิเตอร์	0 – 250 °c	วัดอุณหภูมิไอระเหย
7, 8, 9	ถังควบแน่น	ความสูง 60 cm เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 9.5 cm	ควบแน่นไอระเหย
10, 11	ถังรองรับผลิตภัณฑ์	ความสูง 30 cm เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 9.5 cm	รองรับผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 (ต่อ) ส่วนประกอบและหน้าที่ของเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว

หมายเลข	ส่วนประกอบ	ขนาด	หน้าที่
12	ปั๊มสุญญากาศ	-	ดูดอากาศออกจากถังปฏิกรณ์และช่วยในการเคลื่อนที่ของไอระเหย
13	ตู้ควบคุม	-	ควบคุมระบบไพโรไลซิสด้วยระบบไฟฟ้า
14	ถังปฏิกรณ์	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20.5 cm สูง 30 cm	เป็นถังปฏิกริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการไพโรไลซิส
15	มอเตอร์	Max.vacuum 33 mbar Max.capacity 24 m ³ /hr	หมุนกวนสารตั้งต้นในถังปฏิกรณ์ไพโรไลซิส



รูปที่ 3.3 ระบบการไพโรไลซิสต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 ศึกษาสถานะและการสลายตัวของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วโดย TGA

- 1) เตรียมน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วตามขั้นตอนในหัวข้อ 3.2
- 2) ชั่งตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วประมาณ 16 มิลลิกรัม
- 3) นำตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วไปทำการทดสอบการสลายตัวด้วย TGA ที่อุณหภูมิเริ่มต้นที่ 40 องศาเซลเซียสถึง 600 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ 10.00 องศาเซลเซียสต่อนาที
- 4) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-3 ซ้ำ อีก 2 ซ้ำ

3.3.3 ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการไฟโรไลซิส

- 1) วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วตามวิธีมาตรฐาน ASTM ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 วิธีมาตรฐานในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว

การทดสอบ	วิธีมาตรฐาน
ความถ่วงจำเพาะ ที่ 15.6/15.6°C	ASTM D 4052-09
จุดวาบไฟ (°C)	ASTM D 93-10a
ค่าความจุความร้อน (Cal/g)	ASTM D 240-09
ค่าความหนืดที่ 50 °C (mm ² /s)	ASTM D 445-11
ปริมาณคลอไรด์ (mg/kg)	ASTM D 4929-07
ปริมาณซัลเฟอร์ (% wt)	ASTM D 4294-10
ปริมาณน้ำ และตะกอน (% vol)	ASTM D 1796-04
ปริมาณเถ้า (% wt)	ASTM D 482-07

- 2) เติมน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วปริมาตร 1 ลิตรลงไปในถังปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตร
- 3) ให้ความร้อนแก่ถังปฏิกรณ์จนกระทั่งวัดอุณหภูมิได้ 50 °C (ขณะให้ความร้อนมีการกวนด้วยใบพัดกวนที่ความเร็ว 60 รอบต่อนาที ภายในถังปฏิกรณ์ เพื่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อนภายในถังปฏิกรณ์อย่างทั่วถึง)
- 4) ทำการทดลองหาอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน และอุณหภูมิไฟโรไลซิสที่เหมาะสมของถังปฏิกรณ์ไฟโรไลซิสโดยแปรค่าอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนที่ 0.1, 0.45, 0.75 และ 1.0 ลิตรต่อนาที และแปรค่าอุณหภูมิ 200, 300, 350, 400 และ 500 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ภายใต้ระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) ไอร่หะเหยของน้ำมันจะถูกควบแน่นในถังควบแน่นภายใต้ระบบสุญญากาศโดยใช้ปั้มสุญญากาศ ช่วยในการเคลื่อนที่ของไอร่หะเหย ดังแสดงในรูปที่ 3.3

6) วัดปริมาตรเชื้อเพลิงเหลวที่ได้ และปริมาตรน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วที่เหลือจากกระบวนการไพโรไลซิส

7) นำสภาวะอุณหภูมิไพโรไลซิส และอัตราการไหลของก๊าซในโตรเจนที่เหมาะสมไปแปรค่าเวลาการไพโรไลซิสที่ 1, 2 และ 3 ชั่วโมง

8) วัดปริมาตรเชื้อเพลิงเหลวที่ได้ และปริมาตรน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วที่เหลือจากการไพโรไลซิส

9) วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของเชื้อเพลิงเหลว และน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วที่เหลือจากกระบวนการไพโรไลซิสที่สภาวะอุณหภูมิ อัตราการไหลของก๊าซในโตรเจน และเวลาในการไพโรไลซิสที่เหมาะสม ดังแสดงในตารางที่ 3.2

10) ทำการทดลอง 2 ซ้ำ

3.3.4 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว และเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิส

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว และเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส โดยใช้ GC – MS ตามมาตรฐาน ASTM D 2887 – 08 (2008) ดังนี้

- 1) นำตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว 1 มิลลิลิตร ใส่ลงไปในหลอดทดลอง
- 2) เติมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 1 โมลต่อลิตร 10 มิลลิลิตรแล้วเขย่าที่ความเร็ว 60 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที
- 3) ตั้งทิ้งไว้ให้เกิดการแยกชั้นด้วยกรวยแยก
- 4) นำส่วนที่อยู่ข้างบนนำมาชะล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริก เข้มข้น 6 โมลต่อลิตร 10 มิลลิลิตร
- 5) จากนั้นนำน้ำมันหลังจากล้างกรดไฮโดรคลอริก 0.5 มิลลิลิตรมาเติมเมทานอล 0.5 มิลลิลิตรในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดยปริมาตร
- 6) เขย่าให้เข้ากัน แล้วนำไปทำการวิเคราะห์ด้วย GC-MS ดังสภาวะในตารางที่ 3.3
- 7) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-6 อีก 2 ซ้ำ
- 8) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-7 แต่ใช้ตัวอย่างเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแทน

ตารางที่ 3.3 สภาวะที่ใช้วิเคราะห์ห้วงศ์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว และน้ำมันเชื้อเพลิงเหลวด้วย GC-MS

พารามิเตอร์	สภาวะในการเดินระบบ
Gas Chromatograph	Agilent Technologies GC-MS 6890 (Agilent Technologies, USA)
Mobile phase	He Flow rate 10 ml/min (99.999% purity) (Praxair Co., Ltd., Thailand)
Injector Mode	1 μ l Splitless
Injector temperature	250 °C
Column	HP-5 GC (5% - Diphenyl) - Dimethyl Siloxane capillary column, 10 m x 0.53 mm I.D.x 0.25 μ m (film thickness) (J&W Scientific, USA)
Temperature Program	Oven temp program : Initial temp. 40 °C , Final temp. 300 °C, Heating rate 5 °C/min, holding at 300 °C for 5 mins
Detector	Mass Spectrometer 5973 N (Agilent Technologies, USA)
Type of sample analyzer	Ion trap
Mass Detector Mode	EI 70 eV
Detection Mode	TIC
Mass range	30-500 amu
Scan time	1 s
Transfer line between GC and MS temperature	300 °C

3.3.5 การคำนวณหาจุดคุ้มทุน

1) ระบบไฟโรไลซิสมีการใช้กำลังไฟฟ้าทั้งหมด 700 วัตต์ คำนวณจากสูตร 3.1

$$\text{จำนวนหน่วย (Unit) ใน 1 วัน} = \frac{\text{กำลังไฟฟ้า (วัตต์)} \times \text{จำนวนเครื่องใช้ไฟฟ้า}}{1,000} \times \text{จำนวนชั่วโมงที่ใช้งาน ใน 1 วัน} \quad (3.1)$$

2) คำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไป (หาจากอัตราการคิดค่าไฟฟ้าโรงงานขนาดกลาง) คิด

อัตราต่อหน่วยเป็น 1.6660 บาทต่อหน่วย จากสูตร 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไป = จำนวนหน่วยที่ใช้ x อัตราการคิดค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วย (3.2)

- 3) คำนวณค่าแรงงานและขนส่ง
- 4) รวมค่าใช้จ่ายค่าไฟฟ้า และทุนการจัดเก็บน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว
- 5) คำนวณหาจุดคุ้มทุน โดยคำนวณจากสภาวะเหมาะสมที่ได้จากการทดลอง

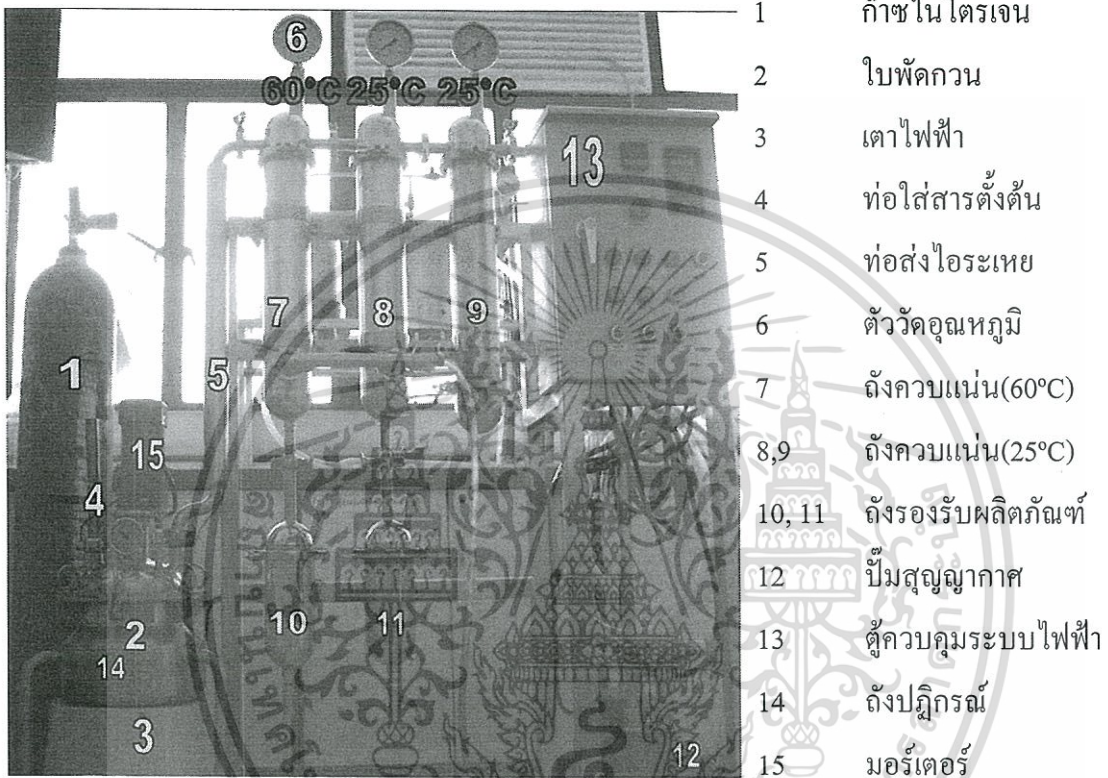


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัย และการอภิปรายผล

4.1 ถังปฏิกรณ์ไพโรไลซิส



รูปที่ 4.1 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบถังกวนต้นแบบ

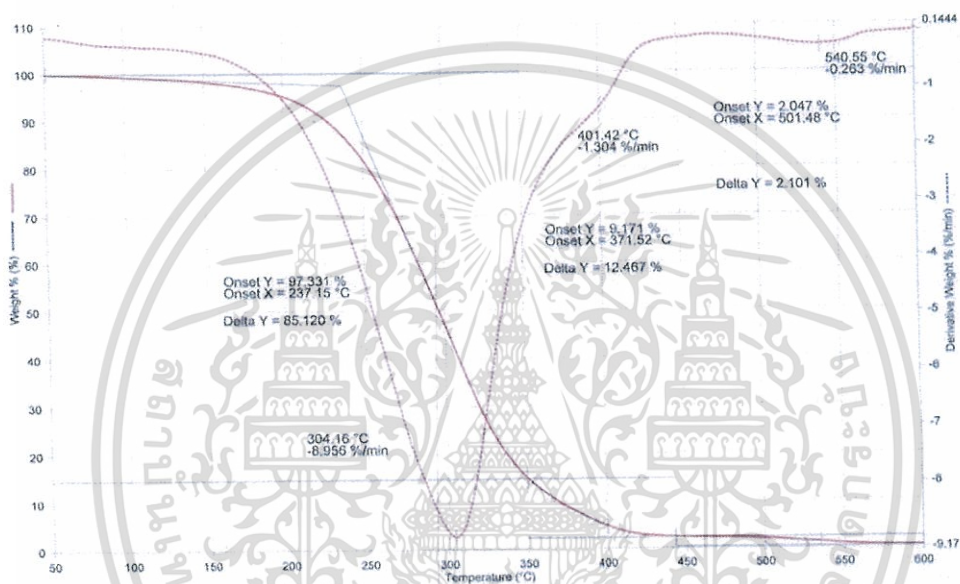
จากรูปที่ 4.1 แสดงระบบไพโรไลซิสที่สร้างขึ้นด้วยสแตนเลส เกรด 304 ประกอบด้วยถังปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20.5 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร ภายในประกอบด้วยใบกวน เทอร์โมมิเตอร์ไฟฟ้า ท่อนำไอ ถังควบคุมแรงดันขนาดความสูง 60 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 9.5 เซนติเมตรจำนวน 3 คอลัมน์ มีเทอร์โมมิเตอร์ติดอยู่, ถังรองรับเชื้อเพลิงเหลวขนาดความสูง 30 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 9.5 เซนติเมตร 2 คอลัมน์ ระบบที่สร้างขึ้นถูกทำให้เป็นระบบสุญญากาศโดยใช้ปั๊มสุญญากาศ (ความดันสูงสุด 33 มิลลิบาร์และประสิทธิภาพสูงสุด 24 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง) ซึ่งระบบนี้ถูกควบคุมด้วยระบบไฟฟ้า โดยใช้กำลังไฟฟ้า 770 วัตต์ และกระแสไฟฟ้า 220 โวลต์

เอเจนซีที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวัดอุณหภูมิการควบแน่นในถังควบแน่น พบว่าในถังควบแน่นหมายเลข 7 มีค่าอุณหภูมิประมาณ 60 °C, หมายเลข 8 และ 9 มีค่าอุณหภูมิประมาณ 25 °C จากการทดลองพบว่า ถังควบแน่นหมายเลข 9 ไม่มีการควบแน่นของเชื้อเพลิงเหลว

4.2 ผลการสลายตัวของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วย TGA

การทดสอบการสลายตัวของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วย TGA ที่สภาวะอุณหภูมิ 40-600 °C ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10.00 °C / min แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 การแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วโดยใช้ TGA

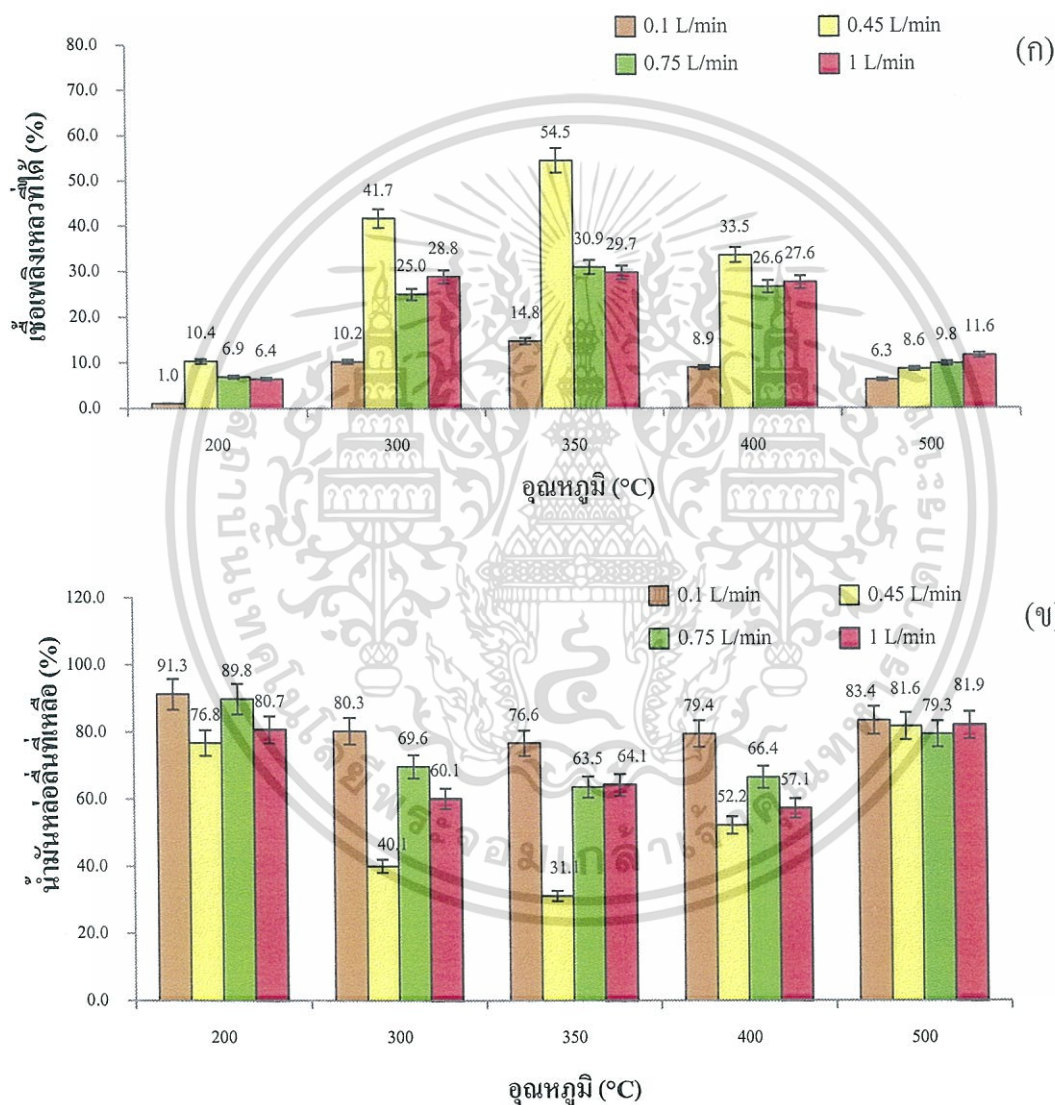
จากรูปที่ 4.2 พบว่าการแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วเกิดขึ้น 2 ช่วง คือจะเกิดพีคขนาดใหญ่ระหว่างช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 420 °C มีการแตกตัวสูงสุดที่อุณหภูมิ 304.16 °C และพีคขนาดเล็กระหว่างช่วงอุณหภูมิ 480 - 560 °C มีการแตกตัวที่อุณหภูมิ 540.55 °C ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับงานวิจัยของ Gómez-Rico และคณะ (2003) พบว่าอุณหภูมิในการแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นอยู่ระหว่าง 227-477 °C โดยมีอุณหภูมิ 2 ช่วงคือ ช่วงแรกที่อุณหภูมิ 227-352 °C และช่วงที่สองที่อุณหภูมิ 477 °C ตามหลักการแตกตัวที่แตกต่างกันของสาร การแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วในอุณหภูมิแรกอาจเกิดจากการระเหย (evaporation) ของสารไฮโดรคาร์บอนในองค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลว ส่วนการแตกตัวในช่วงอุณหภูมิที่สอง อาจเกิดจากการแตกตัวโดยความร้อน (decomposition) ของสารประกอบในน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว ได้ผลิตภัณฑ์ก๊าซ (Gómez-Rico *et al.*, 2003)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว

4.3.1 ผลของอุณหภูมิและอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนต่อปริมาณเชื้อเพลิงเหลวที่ได้

จากการศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการไพโรไลซิสใช้น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วปริมาณ 1 ลิตร โดยแปรค่าอุณหภูมิที่ 200, 300, 350, 400 และ 500 °C และอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนที่ 0.1, 0.45, 0.75 และ 1.0 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-1.1-1.4 ภาคผนวก ข)



รูปที่ 4.3 ปริมาตรของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้ (ก) และน้ำมันหล่อลื่นที่เหลือ (ข) จากการไพโรไลซิส แปรค่าอุณหภูมิที่ 200, 300, 350, 400 และ 500 °C และอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนที่ 0.1, 0.45, 0.75, 1.0 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

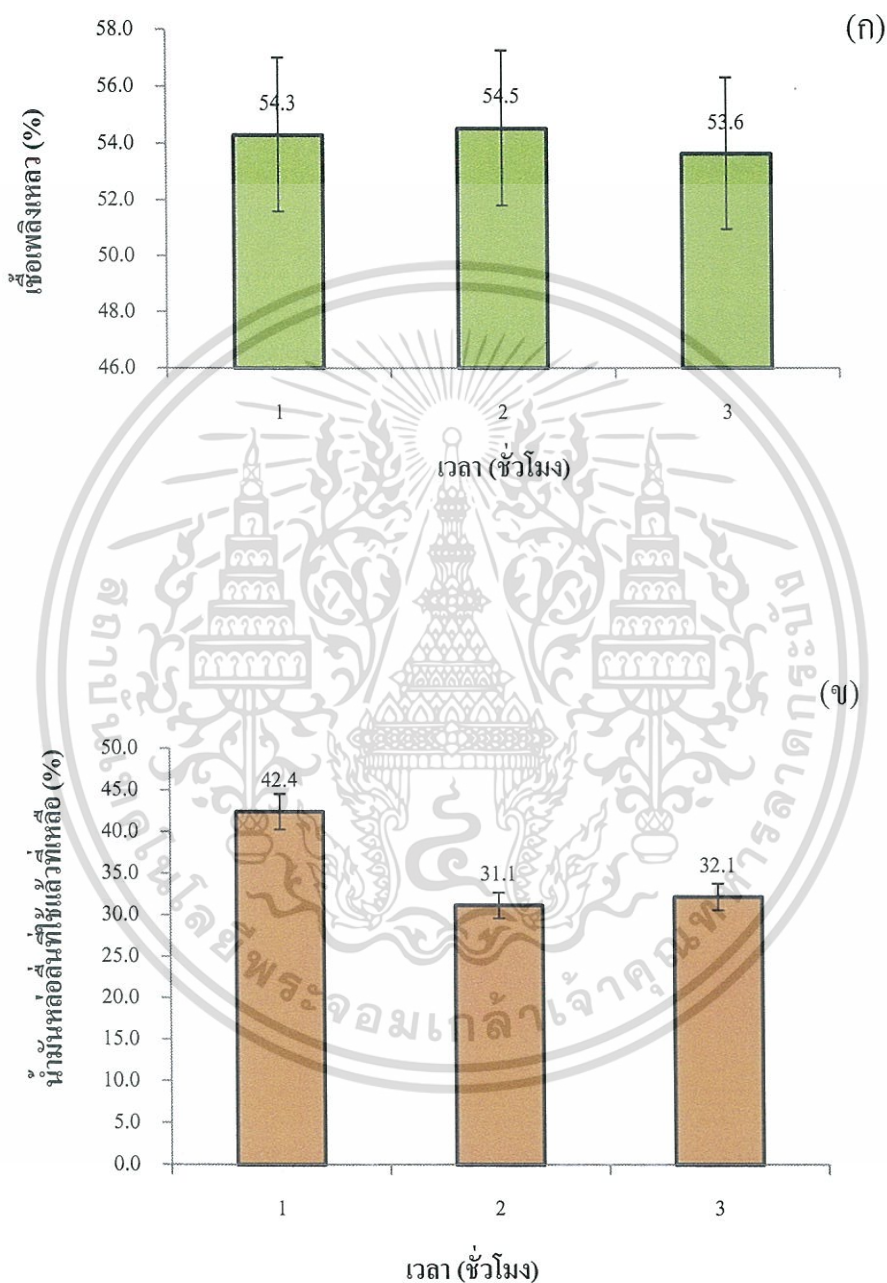
จากรูปที่ 4.3ก พบว่าปริมาตรของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิในการไพโรไลซิส อย่างไรก็ตาม ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 400 °C ขึ้นไป ปริมาตรของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้มีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิการระเหยของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวน้อย อุณหภูมิในช่วง 300 °C ถึง 400 °C เป็นช่วงที่มีการระเหยของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว จึงทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวสูง ส่วนที่อุณหภูมิ 500 °C สารไฮโดรคาร์บอนในน้ำมันหล่อลื่นส่วนใหญ่ถูกแตกตัวไปเป็นผลิตภัณฑ์ก๊าซ ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวน้อย ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองการสลายตัวของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วย TGA ที่พบว่าอุณหภูมิในการระเหยเป็นของเหลวของน้ำมันหล่อลื่นอยู่ระหว่างอุณหภูมิ 200 ถึง 420 °C และน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วมีการสลายตัวสูงสุดที่อุณหภูมิ 304.16 °C และสอดคล้องกับผลการทดลอง ปริมาตรของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วที่เหลือหลังจากการไพโรไลซิส (รูปที่ 4.3 ข) ในขณะที่อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนที่เหมาะสมคือที่ 0.45 ลิตรต่อนาที อย่างไรก็ตาม ที่อัตราการไหลต่ำกว่าหรือสูงกว่า 0.45 ลิตรต่อนาที ปริมาตรของเชื้อเพลิงที่ได้จะมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากที่อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนต่ำกว่า 0.45 ลิตรต่อนาที อาจไม่เพียงพอต่อการพาไอของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้ออกจากถังปฏิกรณ์ ในขณะที่อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนสูงกว่า 0.45 ลิตรต่อนาที อาจทำให้เวลาที่ใช้ในการควบแน่นไอรระเหยให้เป็นเชื้อเพลิงเหลวน้อยเกินไป ไอรระเหยจึงถูกพาออกจากระบบในรูปของก๊าซ จากการทดสอบความแตกต่างทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และเปรียบเทียบหาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้ Multiple Comparison ด้วยวิธี Tukey's Test พบว่าที่อุณหภูมิ 350°C และอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 0.45 ลิตรต่อนาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงเหลวโดยกระบวนการไพโรไลซิสสามารถผลิตเชื้อเพลิงเหลวได้ 545.33 ± 15.95 มิลลิลิตร ซึ่งผลที่ได้แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับที่สภาวะอุณหภูมิและอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนอื่นๆ (ดูรายละเอียดในตารางที่ ค 1 ภาคผนวก ค)

4.3.2 ผลของเวลาในการไพโรไลซิสต่อปริมาณเชื้อเพลิงเหลวที่ได้

จากการนำสภาวะที่เหมาะสมของอุณหภูมิไพโรไลซิสที่ 350 °C และอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนที่ 0.45 ลิตรต่อนาที แปรค่าเวลาในการไพโรไลซิสที่ 1, 2 และ 3 ชั่วโมง ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.4 (รายละเอียดในตารางที่ ข-1.5 ภาคผนวก ข)

จากผลการทดลองพบว่า ที่เวลาในการไพโรไลซิส 1, 2 และ 3 ชั่วโมงได้ปริมาตรเชื้อเพลิงเหลวเท่ากับ 54.3% (543 ± 19.08 มิลลิลิตร), 54.5% (545.33 ± 15.95 มิลลิลิตร) และ 53.6 (536.33 ± 9.71 มิลลิลิตร) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ก จากการทดสอบความแตกต่างทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่าที่เวลาในการไพโรไลซิส 1, 2 และ 3 ชั่วโมงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (ดูรายละเอียดในตารางที่ ค-2 ภาคผนวก ค) อย่างไรก็ตาม จากปริมาตรไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วที่เหลือ (รูปที่ 4.4 ข) ที่ไพโรไลซิสที่เวลา 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (ดูรายละเอียดในตารางที่ ค-3 ภาคผนวก ค) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะอุณหภูมิในถังควบคุมยังไม่เพียงพอในการควบคุมไอระเหย ซึ่งในการทดลองนี้ได้เลือกเวลาที่ 2 ชั่วโมง



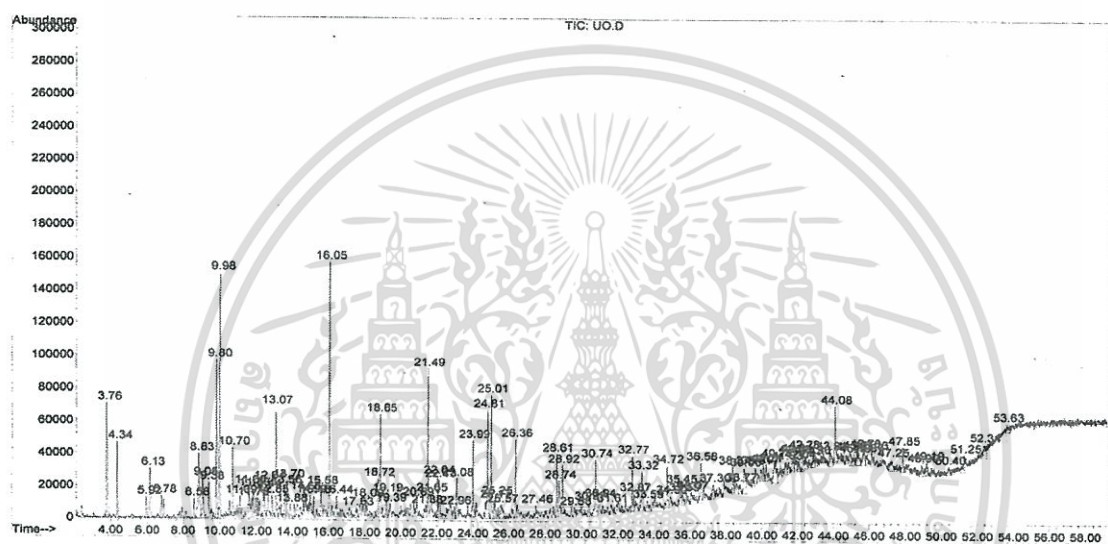
รูปที่ 4.4 ปริมาตรของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้ (ก) และน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วที่เหลือ (ข) จากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 350 °C และอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 0.45 ลิตรต่อนาที แปรค่าเวลาในการไพโรไลซิสที่ 1, 2, 3 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

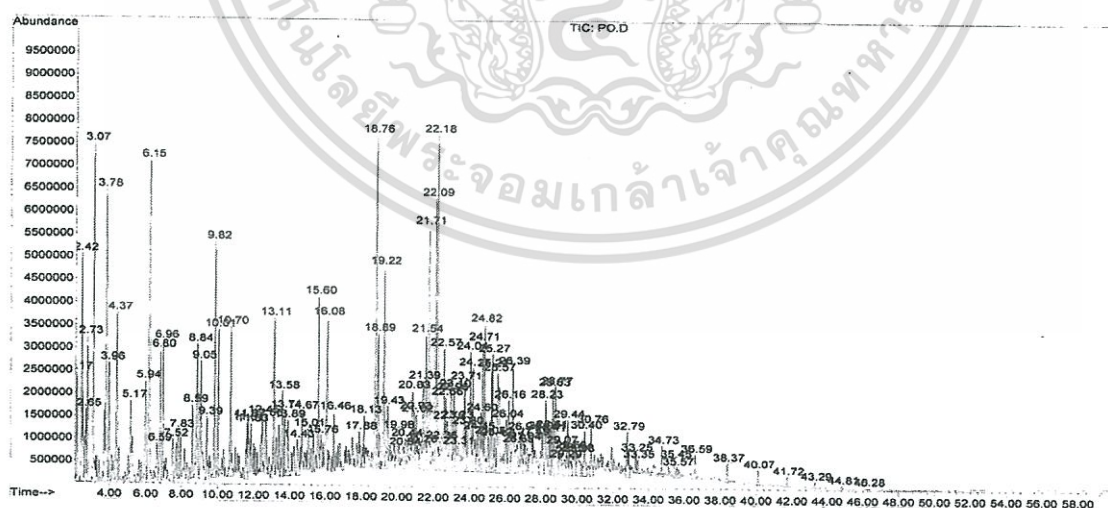
4.4 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วและผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้

4.4.1 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วและเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิส

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว และผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 350 °C อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนที่ 0.45 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยใช้ GC-MS วิเคราะห์เชิงคุณภาพด้วย NIST library ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.5 และตารางที่ 4.1 และ 4.2 (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ข 2.1-2.2)



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.5 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้ (ก) และน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว (ข)

จากกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 350 °C และอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 0.45 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว

Retention time (min)	สารประกอบ	% Corr. Area
6.13	p-Xylene	2.07
9.8	Benzene, 1, 2, 3 - trimethyl -	3.87
9.98	Decane	6.10
13.07	Undecane	2.61
15.58	Naphthalene	0.97
16.05	Dodecane	6.00
18.85	Tridecane	2.99
21.49	Tetradecane	3.45
23.99	Pentadecane	2.3
26.36	Hexadecane	2.05
28.61	Heptadecane	2.89
30.74	Octadecane	1.97
32.77	Nonadecane	1.43
34.72	Eicosane	1.79
36.58	Heneicosane	1.94

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส

Retention time (min)	สารประกอบ	% Corr. Area
2.73	Heptane	0.97
4.37	Octane	1.52
6.8	p-Xylene	1.34
6.96	Nonane	1.19
9.82	Benzene, 1, 2, 3 - trimethyl -	1.96
10.01	Decane	1.20
13.11	Undecane	1.78
15.6	Naphthalene	1.60
16.08	Dodecane	1.66
18.89	Tridecane	1.15
21.54	Tetradecane	1.55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

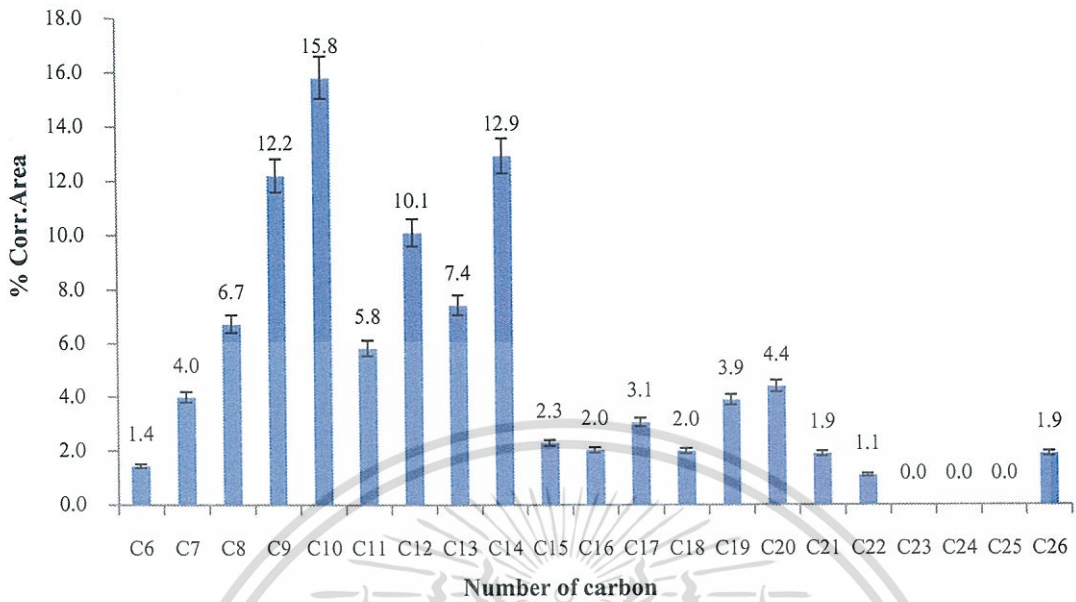
ตารางที่ 4.2 (ต่อ) ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการกระบวนการไพโรไลซิส

Retention time (min)	สารประกอบ	% Corr. Area
26.39	Hexadecane	1.75
28.63	Heptadecane	0.94
30.76	Octadecane	0.64
32.79	Nonadecane	0.85
36.59	Heneicosane	0.21
38.37	Docosane	0.16
41.71	Tetracosane	0.09
43.29	Pentacosane	0.05
44.81	Hexacosane	0.03

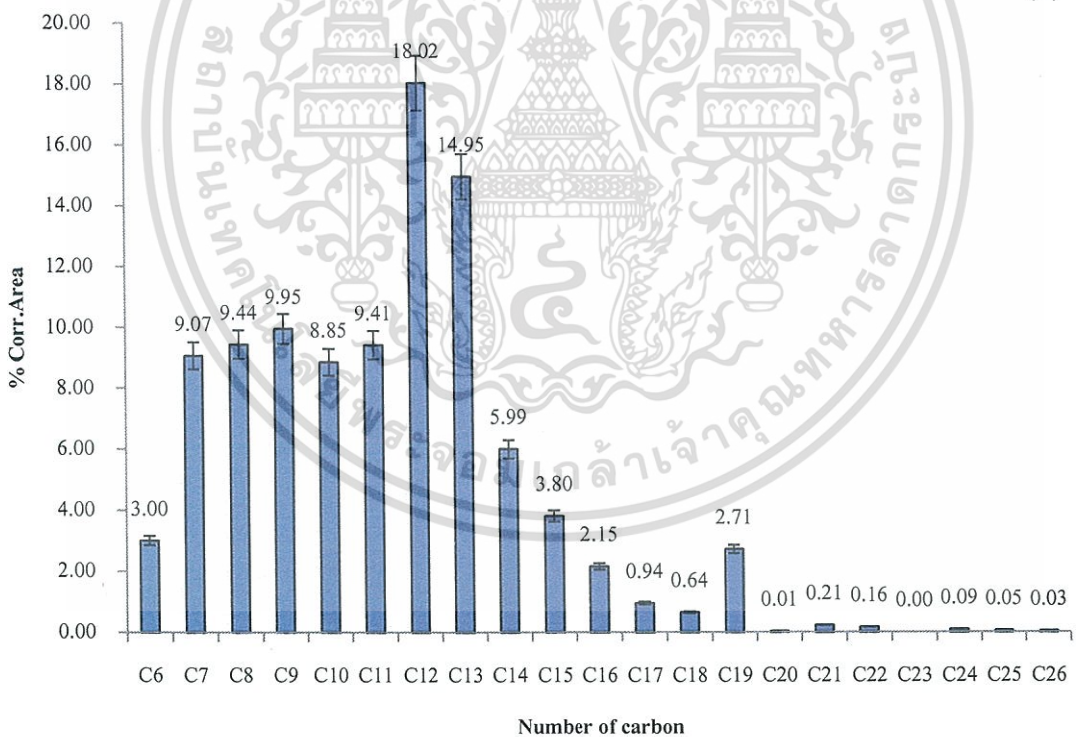
จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วและเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสเมื่อนำมาจัดกลุ่มตามจำนวนคาร์บอน ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.6

จากรูปที่ 4.6 พบว่าการแพร่กระจายขององค์ประกอบในน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว (รูปที่ 4.6ก) มีความแตกต่างกับในเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส (รูปที่ 4.6ข) โดยองค์ประกอบของคาร์บอนในเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสมีปริมาณโมเลกุลคาร์บอนสายสั้น (short chain carbons) มากกว่าในน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว เนื่องจากโมเลกุลคาร์บอนสายยาว (long chain carbons) ในน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วถูกแตกพันธะด้วยความร้อนทำให้กลายเป็นโมเลกุลคาร์บอนสายสั้น

(ก)



(ข)



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง % ของพื้นที่ที่ได้กราฟกับจำนวนของคาร์บอนในองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว (ก) และ เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว และเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิส

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วก่อนและหลังการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 350 °C อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนที่ 0.45 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสที่สภาวะดังกล่าว ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติทางกายภาพ และเคมีของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วก่อนและหลังจากการไพโรไลซิส และผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิส ตามวิธีมาตรฐาน ASTM

คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี	น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วก่อนไพโรไลซิส	น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วที่เหลือหลังไพโรไลซิส	เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิส	มาตรฐานน้ำมันดีเซลหมุนเร็ว ^a
ความถ่วงจำเพาะ 15.6/15.6 °C	0.88	0.86	0.81	0.81–0.87
จุดวาบไฟ (°C)	<40	<40	<20	>52
ค่าความร้อน (Cal/g)	10,741	10,728	11,067	-
ค่าความหนืดที่ 50 °C (mm ² /s)	46.74	18.08	6.2	1.8–4.1
ปริมาณคลอไรด์ (mg/kg)	63	63	-	-
ปริมาณซัลเฟอร์ (% wt)	0.438	0.438	0.02	<0.005
ปริมาณน้ำและตะกอน (% vol)	1.20	1.20	<0.001	<0.05
ปริมาณเถ้า (% wt)	0.7	0.574	0.13	<0.01

^a ข้อมูลจากมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 1267–2537 น้ำมันดีเซลสำหรับเครื่องยนต์หมุนเร็ว กระทรวงอุตสาหกรรม

จากผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีพบว่า เชื้อเพลิงเหลวที่ผ่านการบำบัดโดยกระบวนการไพโรไลซิส มีค่าความถ่วงจำเพาะและค่าความร้อนใกล้เคียงกับค่าของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วก่อนและหลังการไพโรไลซิส แต่มีจุดวาบไฟ ความหนืด ปริมาณซัลเฟอร์ ปริมาณน้ำและตะกอน และปริมาณเถ้า น้อยกว่าค่าของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วก่อนและหลังการไพโรไลซิส ซึ่งจากค่าความร้อนสูง ค่าความหนืดลดลง และมีปริมาณซัลเฟอร์ ปริมาณน้ำและตะกอน และปริมาณเถ้า ต่ำ ดังนั้นคุณสมบัติเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำไปปรับปรุงคุณภาพไปเป็นน้ำมันดีเซลหมุนเร็วเพื่อเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์ อย่างไรก็ตาม การที่มีจุดวาบไฟต่ำ อาจทำให้เกิดอันตรายในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้งาน จึงจำเป็นต้องปรับปรุงคุณสมบัตินี้ให้เหมาะสมสำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วที่เหลือ หลังการไพโรไลซิส มีค่าความหนืด และปริมาณต่ำกว่าน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วก่อนการไพโรไลซิส จากค่าความร้อนที่สูงของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วที่เหลือหลังจากการไพโรไลซิส ทำให้สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรม

ตารางที่ 4.4 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว และผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส ที่วิเคราะห์ด้วย GC-MS

องค์ประกอบทางเคมี	น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว (%)	เชื้อเพลิงเหลวที่ได้ (%)
Alkanes	39.01	18.23
<i>Carbon Compounds</i>		
Light Hydrocarbons (C ₆ - C ₁₂)	56.31	67.74
Heavy Hydrocarbons (C ₁₃ - C ₂₆)	43.69	32.26
Aromatics	46.66	66.91
PAHs	0.73	0.87

หมายเหตุ : คำนวณจากความสัมพันธ์ระหว่าง % ของพื้นที่ใต้กราฟ (relative percent)

จากตารางที่ 4.4 แสดงคุณภาพเชิงปริมาณของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว และเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส โดยการวิเคราะห์หาองค์ประกอบด้วย GC-MS พบว่ามีกลุ่มของสารอินทรีย์ต่างๆประกอบอยู่ ได้แก่ อัลเคน, ไฮโดรคาร์บอนชนิดเบา (light hydrocarbons), ไฮโดรคาร์บอนชนิดหนัก (heavy hydrocarbons), อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน และ PAHs จากการศึกษาพบว่าเชื้อเพลิงเหลวที่ได้มีอัลเคน และไฮโดรคาร์บอนชนิดหนักลดลง และมีไฮโดรคาร์บอนชนิดเบา, อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน และ PAHs เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lam *et al.*, (2012) และสอดคล้องกับหลักการการแตกตัวของโมเลกุลคาร์บอนสายยาวเมื่อได้รับความร้อนทำให้เกิดการแตกตัวเป็นโมเลกุลคาร์บอนสายสั้น ซึ่งจากผลการทดลองผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้มีปริมาณของโมเลกุลคาร์บอนสายสั้นเพิ่มขึ้น

4.5 การคำนวณหาจุดคุ้มทุน

ความคุ้มทุนของการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว 1 ลิตร ที่อุณหภูมิ 350 °C อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 0.45 ลิตรต่อนาที และเวลาในการไพโรไลซิส 2 ชั่วโมง ได้ผลิตภัณฑ์

เชื้อเพลิงเหลว 545.33 มิลลิลิตร และน้ำมันหล่อลื่นที่เหลือจากกระบวนการไพโรไลซิส 311 มิลลิลิตร ดังแสดงในตารางที่ 4.5 (ดูรายละเอียดการคำนวณในภาคผนวก ง)

ตารางที่ 4.5 ความคุ้มทุนของการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว ที่อุณหภูมิ 350 °C อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 0.45 ลิตรต่อนาที และเวลาในการไพโรไลซิส 2 ชั่วโมง

สาร	ปริมาตร (มิลลิลิตร)	ราคา (บาท/ลิตร)	ราคารวม (บาท/ลิตร)
รายรับ			
เชื้อเพลิงเหลว	545.33	20	10.91
น้ำมันหล่อลื่นที่เหลือ	311	17	5.29
รวม			16.2
รายจ่าย			
น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว	1,000	11	11
ค่าไฟฟ้าในการไพโรไลซิส			2.33
ค่าขนส่ง+ค่าแรง	1,000	1	0.07
รวม			13.40
กำไร			2.80

หมายเหตุ : อ้างอิงราคาจาก www.eppo.go.th เมื่อวันที่ 18 ตุลาคม 2556

จากการคำนวณพบว่าคาร์ไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว 1 ลิตร จะได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว 545.33 มิลลิลิตร มีราคาขายที่ 20 บาทต่อลิตร คิดเป็นเงิน 10.91 บาท ส่วนน้ำมันหล่อลื่นที่เหลือ 311 มิลลิลิตร ขายได้ในราคา 17 บาทต่อลิตร คิดเป็นเงิน 5.29 บาท เมื่อหักกับค่าใช้จ่ายของวัตถุดิบ ค่าไฟฟ้า และค่าแรงงานที่คำนวณได้ 13.40 บาท จะได้ผลกำไร 2.80 บาทต่อลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาสภาวะที่มีผลต่อปริมาณ และลักษณะของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว โดยการนำน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว และผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสที่มีการกวนแบบต่อเนื่อง 60 รอบต่อนาที โดยแปรอุณหภูมิที่ 200, 300, 350, 400 และ 500 °C ภายใต้ระบบสูญญากาศ อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนที่ 0.1, 0.45, 0.75 และ 1.0 ลิตรต่อนาที และเวลาในการไพโรไลซิสที่ 1, 2 และ 3 ชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการไพโรไลซิส คือไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 350 °C อัตราการไหลก๊าซไนโตรเจน 0.45 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้ปริมาณผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว 545.33 ± 15.95 มิลลิลิตร คิดเป็น 54.53% ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์การสลายตัวของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วย TGA พบว่าน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วสามารถสลายตัวได้ดีที่อุณหภูมิ 304.16°C

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีตามวิธีมาตรฐาน ASTM พบว่าคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วหลังกระบวนการไพโรไลซิส มีค่าความถ่วงจำเพาะ จุดวาบไฟ ค่าความร้อน ปริมาณคลอไรด์ ปริมาณซัลเฟอร์ ปริมาณน้ำและตะกอนไม่แตกต่างจากน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วก่อนผ่านการบำบัด แต่มีค่าความหนืดและปริมาณเถ้าลดลง เชื้อเพลิงเหลวที่ผ่านการบำบัดโดยกระบวนการไพโรไลซิสมีค่าความร้อนสูง และจุดวาบไฟ ค่าความหนืด ค่าซัลเฟอร์ ปริมาณน้ำและตะกอน และปริมาณเถ้าลดลง สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเหลว หรือนำไปพัฒนาปรับปรุงให้เชื้อเพลิงเหลวมีคุณสมบัติดีขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ สำหรับการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว และเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสด้วย GC-MS พบว่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้นั้นมีองค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอนชนิดเบา อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน และ PAHs สูงกว่าองค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว แต่มีองค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอนชนิดหนัก และอัลเคนต่ำกว่า

จากการประเมินผลความคุ้มค่าต่อการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว 1 ลิตร พบว่าน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสจะได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว 545.33 มิลลิลิตร ซึ่งขายได้ราคา 20 บาทต่อลิตร คิดเป็นเงิน 10.91 บาท ส่วนน้ำมันหล่อลื่นที่เหลือจากกระบวนการไพโรไลซิส 311 มิลลิลิตรซึ่งขายได้ราคา 17 บาทต่อลิตร คิดเป็นเงิน 5.29 บาท เมื่อหักค่าต้นทุน

น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว 11 บาทต่อลิตร ค่าแรงคนงานรวมค่าขนส่ง 0.07 บาท และค่าไฟฟ้าที่ใช้ 2.33 บาท จะได้ผลกำไร 2.80 บาทต่อลิตร

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เพิ่มระบบหล่อเย็นในถังควบแน่น เพื่อให้ก๊าซที่กลั่นตัวเป็นเชื้อเพลิงเหลวเพิ่มขึ้น
2. ควรเก็บตัวอย่างก๊าซที่เกิดขึ้น และศึกษาองค์ประกอบของก๊าซที่ได้
3. ควรศึกษาการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อให้ได้ปริมาณผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเพิ่มขึ้น
4. ควรศึกษาเวลาที่ใช้ในการไพโรไลซิสเพิ่มเติม เพื่อให้ได้เวลาที่เหมาะสมยิ่งขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- ประเสริฐ เทียนนิมิตร. 2554. เชื้อเพลิงและสารหล่อลื่น. ซีเอ็ดยูเคชั่น. กรุงเทพฯ.
- ปานเพชร ชินินทร. 2554. เชื้อเพลิงและสารหล่อลื่น. ซีเอ็ดยูเคชั่น. กรุงเทพฯ.
- มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.1267-2537. น้ำมันดีเซลสำหรับเครื่องยนต์หมุนเร็ว.
สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. กระทรวงอุตสาหกรรม.
- ราชกิจจานุเบกษา. 2550. ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล (ฉบับที่ 2) พ.ศ 2550
- ศิริรัตน์ จิตการคำ. 2553. จากขยะสู่น้ำมัน เทคโนโลยีผลิตพลังงานทางเลือกที่ดูแลสิ่งแวดล้อม.
สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.
- สิริพร แก่นสียา, 2546. แนวทางการจัดการน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว. วารสารสิ่งแวดล้อม, ปีที่ 7 ฉบับที่ 26.
- สำนักงานกากอุตสาหกรรม. 2555. ปริมาณน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว. กรมโรงงานอุตสาหกรรม.
กระทรวงอุตสาหกรรม.
- สำนักงานกากอุตสาหกรรม. 2555. รายงานวัตถุอันตรายที่เป็นของเสียเคมีวัตถุที่มีการนำเข้า ปีพ.ศ. 2555. กระทรวงอุตสาหกรรม.
- สำนักงานน้ำมันเชื้อเพลิง. 2010. มาตรฐานน้ำมันเครื่อง. กรมธุรกิจพลังงาน. กระทรวงอุตสาหกรรม.
- อัยยัชฎณี แก้วไทร้อย. 2546. การแตกตัวด้วยไฮโดรเจนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัม/อะลูมินา และ HZSM-5. วิทยานิพนธ์บัณฑิตวิทยาลัย. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Ali, M.F., Rahman, F., Hamdan, A.J. 1995. Techno-economic evaluation of waste lube oil refining. *International Journal of Production Economics*, 42, 263-273.
- ASTM Standard D 1796-04. 2008. Standard Test Method Water and Sediment in Fuel Oil by the Centrifuge Method (Laboratory Procedure). West Conshohocken, PA, ASTM International.
- ASTM Standard D 240-09. 2008. Standard Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter. West Conshohocken, PA, ASTM International.
- ASTM Standard D 2887-08. 2008. Standard Test Method for Boiling Range Distribution of Petroleum Fraction by Gas Chromatography. West Conshohocken, PA, ASTM International.
- ASTM Standard D 4052-09. 2008. Standard Test Method for Density, Relative Density, and API Gravity of Liquids by Digital Density Meter. West Conshohocken, PA, ASTM International.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม (ต่อ)

- ASTM Standard D 4294-10. 2008. Standard Test Method for Sulfur in Petroleum and Petroleum Products by Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometry. West Conshohocken, PA, ASTM International.
- ASTM Standard D 445-11. 2008. Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity). West Conshohocken, PA, ASTM International.
- ASTM Standard D 482-07. 2008. Standard Test Method for Ash from Petroleum Products. West Conshohocken, PA, ASTM International.
- ASTM Standard D 4929-07. 2008. Standard Test Method for Determination of Organic Chloride Content in Crude Oil. West Conshohocken, PA, ASTM International.
- ASTM Standard D 93-10a. 2008. Standard Test Method for Flash Point by Pensky-Martens Closed Cup Tester. West Conshohocken, PA, ASTM International.
- Bilgesü, A.Y., Çetin Koçak, M., Karaduman, A. 2006. Waste plastic pyrolysis in free fall reactor. In : Scheirs, J., and Kaminsky, W. (eds.), *Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastics: Converting Plastics into Diesel and Other Fuels*. John Wiley & Sons. UK., 605-623
- Conesa J.A., Font, R., Fullana, A. 2009. Comparison between emissions from the pyrolysis and combustion of different waste. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 84, 95-102.
- Founded, 1862 A.B.S. 2001. Marine fuel oil properties and characteristics and their impact on the diesel engine. *Note on Heavy Fuel*, 84, 17-31.
- Gómez-Rico, M.F., Martín-Gullón, I., Fullana, A., Conesa, J.A., Font, R. 2003. Pyrolysis and combustion kinetics and emissions of waste lube oils. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 68-69, 527-546.
- Kim S.S., Kim S.H., 2000. Pyrolysis kinetics of waste automobile lubricating oil. *Fuel*, 79, 1943-1949.
- Kim S.S., Kim S.H., Chun B.H., 2003. Non-isothermal pyrolysis of waste automobile lubricating oil in a stirred batch reactor. *Chemical Engineering Journal*, 93, 225-231.
- Lam, S.S., Russell, A.D., Lee, C.L., Chase, H.A. 2011. Production of hydrogen and light hydrocarbons as a potential gases fuel from microwave-heated pyrolysis of waste automotive engine oil. *International Journal of Hydrogen Energy*, 1-2, 1-11.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Lam, S.S., Russell, A.D., Lee, C.L., Chase, H.A. 2012. Microwave-heated pyrolysis of waste automotive engine oils : Influence of operation parameters on the yield, composition, and fuel properties of pyrolysis oil. *Fuel*, 91, 327-339.
- Lazaro M.-J., Herod A.A. 2001. Characterisation of tars from the co-pyrolysis of waste lubricating oils with coal. *Fuel*, 80, 179-194.
- Mascolo, G. 2004. The gas phase decomposition of synthetic lubricants under pyrolytic condition. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 71, 165-178.
- Miller, S.J., Shah, N., Huffman, G.P. 2006. Production of premium oil products from waste plastics by pyrolysis and hydroprocessing, In : Scheirs, J., Kaminsky, W. (eds.), *Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastics: Converting Plastics into Diesel and Other Fuels*, 345-361.
- Moliner, R., Lázaro, M., Suelves, I. 1998. Synergetic effects in the copyrolysis of coal/petroleum residue mixtures by pyrolysis/gas chromatography: Influence of temperature, pressure and coal nature . *Energy Fuels*, 12, 963-968.
- Ramasamy, K.K., T-Raissi, A. 2007. Hydrogen production from used lubricating oils. *Coal Today*, 129, 365-371.
- Shen, L., Zhang, D.K., 2003. An experimental study of oil recovery from sewage sludge by low-temperature pyrolysis in a fluidized-bed. *Fuel*, 82, 465-472.
- Sheirs, J. 2006. Overview of commercial pyrolysis processes for waste plastics. In : Scheirs, J., and Kaminsky, W. (eds.), *Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastics: Converting Plastics into Diesel and Other Fuels*, 384-433.
- Suat Uc, ar, Karagöz. 2005. Copyrolysis of scrap tires with waste lubricant oil. *Fuel Processing Technology*, 87, 53-58.
- Wen-Tien, T. 2011, An analytical of used lubricant recycling, energy utilization and its environmental benefit in Taiwan. *Energy*, 36, 4333-4339.
- Yang, R.T. 1995. Ion-exchanged pillared-clays: A new class of catalysts for selective catalytic reduction of NO by hydrocarbon and by ammonia. *Journal of Catalysis*, 155, 414-417.
- http://www.aalcar.com/library/api_motor_oil_classifications.htm
- <http://www.chaiwbi.com>
- <http://www.eppo.go.th>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม (ต่อ)

<http://www.google.com/patents/US8067047>

<http://www.jfe-rd.co.jp>

<http://www.oknation.net/blog/print.php?id=19337>

<http://www.siam Pattana.com/index.php?lay=show&ac=article&Id=539203276&Ntype=1>

<http://www.vcharkarn.com/vblog/39949/2>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก
การพัฒนาชั้นคุณภาพของน้ำมันเครื่องตามมาตรฐาน API

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-1 สรุปการพัฒนาชั้นคุณภาพของน้ำมันเครื่องตามมาตรฐาน API สำหรับเครื่องยนต์เบนซิน 4 จังหวะ (สำนักงานน้ำมันเชื้อเพลิง, 2010)

ชั้นคุณภาพเบนซิน	API	ประเทศไทย	ปีที่เริ่มใช้ และคุณสมบัติการใช้งาน
SA	ไม่ออกเครื่องหมายรับรองคุณภาพแล้ว	ห้ามจำหน่าย	ไม่มีการเติมสารเพิ่มคุณภาพ และไม่ได้กำหนดการทดสอบทางเครื่องยนต์ไว้ชั้นคุณภาพนี้ไม่แนะนำแล้วสำหรับเครื่องยนต์เบนซินปัจจุบัน
SB	ไม่ออกเครื่องหมายรับรองคุณภาพแล้ว	ห้ามจำหน่าย	ใช้กับเครื่องยนต์เบาตั้งแต่ช่วงทศวรรษ 1930 มีสารเพิ่มคุณภาพเล็กน้อยในการป้องกันการสึกหรอ และการกัดกร่อนชั้นคุณภาพนี้ไม่แนะนำแล้วสำหรับเครื่องยนต์เบนซินในปัจจุบัน
SC	ไม่ออกเครื่องหมายรับรองคุณภาพแล้ว	ขอความเห็นชอบ	ใช้กับเครื่องยนต์ปี ค.ศ. 1964 – 1967 (พ.ศ. 2507 - 2510) เริ่มพัฒนาคุณสมบัติด้านการรักษาความสะอาดป้องกันการสะสมของคราบเขม่ากระจายสิ่งสกปรกป้องกันการสึกหรอการเกิดสนิม และการกัดกร่อน
SD	ไม่ออกเครื่องหมายรับรองคุณภาพแล้ว	ขอความเห็นชอบ	ใช้กับเครื่องยนต์ปี ค.ศ. 1968 – 1970 (พ.ศ. 2511 - 2513) และบางรุ่นสำหรับปี 1971 (พ.ศ. 2514) มีการเติมสารเพิ่มคุณภาพมากกว่า SC เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในด้านการรักษาความสะอาดป้องกันการสะสมของคราบเขม่า กระจายสิ่งสกปรก ป้องกันการสึกหรอ การเกิดสนิม และการกัดกร่อน
SE	ไม่ออกเครื่องหมายรับรองคุณภาพแล้ว	ขอความเห็นชอบ	ใช้กับเครื่องยนต์ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1972 (พ.ศ. 2515) และ 1971-1979 (พ.ศ. 2514 - 2522) บางรุ่น มีการเติมสารเพิ่มคุณภาพมากกว่า SC และ SD พัฒนาในด้านความต้านทานการรวมตัวกับออกซิเจน (Antioxidation) เพิ่มประสิทธิภาพป้องกันสนิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-1 (ต่อ) สรุปการพัฒนาชั้นคุณภาพของน้ำมันเครื่องตามมาตรฐาน API สำหรับเครื่องยนต์เบนซิน 4 จังหวะ

ชั้นคุณภาพเบนซิน	API	ประเทศไทย	ปีที่เริ่มใช้ และคุณสมบัติการใช้งาน
SF	ไม่ออกเครื่องหมายรับรองคุณภาพแล้ว	ขอความเห็นชอบ	ประกาศใช้ปี ค.ศ 1980 (พ.ศ. 2523) มีสารเพิ่มคุณภาพสำหรับด้านทางการรวมตัวกับออกซิเจนในอากาศ คุณสมบัติการรักษาความสะอาด การป้องกันคราบสกปรกด้านทานการสึกหรอได้ดีกว่า SE
SG	ไม่ออกเครื่องหมายรับรองคุณภาพแล้ว	ขอความเห็นชอบ	ประกาศใช้ปี ค.ศ 1988 (พ.ศ. 2531) เป็นช่วงปีที่มีการพัฒนาอย่างชัดเจน เนื่องจากขณะนั้นเครื่องยนต์ถูกพัฒนาให้ประหยัดเชื้อเพลิงมากขึ้น การเผาไหม้จึงต้องสมบูรณ์ส่งผลให้อุณหภูมิเครื่องยนต์สูงขึ้น น้ำมันเครื่องจึงเสื่อมสภาพเร็ว ปัญหาที่พบ คือการเกิดคราบเหนียว และตะกอน ดังนั้นการพัฒนาคุณภาพน้ำมันเครื่องชั้นคุณภาพนี้จึงต้องป้องกันการเกิดตะกอน (Sludge) ได้ดี สารเติมแต่งต้องสามารถกระจายสิ่งสกปรก (Dispersancy) ด้านทานการรวมตัวกับออกซิเจน และด้านทานการสึกหรอ
SH	ไม่ออกเครื่องหมายรับรองคุณภาพแล้ว	ขอความเห็นชอบ	ประกาศใช้ปี ค.ศ. 1994 (พ.ศ. 2537) เริ่มเข้มงวดในเรื่องปริมาณธาตุฟอสฟอรัส (P) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของสาร Antiwear และ Antioxidant แม้ว่าการพัฒนาสารเติมแต่งจำเป็นต้องเพิ่มประสิทธิภาพในด้านนี้ แต่ก็ต้องควบคุมปริมาณธาตุ P ไม่เกินร้อยละ 0.12 โดยน้ำหนัก เนื่องจากธาตุ P จะไปขัดขวางประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ลดมลพิษในไอเสีย (Catalytic Convertor) ที่ติดตั้งมากับรถยนต์ตามมาตรฐานมลพิษ โดยกำหนดเฉพาะน้ำมันเครื่องชนิดความหนืดได้ในขณะนั้นได้แก่ SAE 5W-30 และ 10W-30 เนื่องจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-1 (ต่อ) สรุปการพัฒนาชั้นคุณภาพของน้ำมันเครื่องตามมาตรฐาน API สำหรับเครื่องยนต์เบนซิน 4 จังหวะ

ชั้นคุณภาพเบนซิน	API	ประเทศไทย	ปีที่เริ่มใช้ และคุณสมบัติการใช้งาน
			น้ำมันใสจะมีโอกาสที่จะไหลลงไปเผาไหม้ร่วมกับน้ำมันเชื้อเพลิงได้ง่ายกว่า และธาตุ P ก็จะไปปนออกมามากพอไอเสียเข้าสู่อุปกรณ์กำจัดไอเสีย ใดๆ ก็ตาม เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการลดปริมาณธาตุ P มากเกินไป จนเกิดผลกระทบต่อประสิทธิภาพในด้านป้องกันการสึกหรอ จึงได้กำหนดอัตราขั้นต่ำไว้ไม่ให้ต่ำกว่าร้อยละ 0.06 โดยน้ำหนัก
SL	ออกเครื่องหมายรับรองคุณภาพแล้ว	ขอความเห็นชอบ	ประกาศใช้วันที่ 1 กรกฎาคม ค.ศ. 2001 (พ.ศ. 2544) มีการพัฒนาด้านการทำความสะอาดของเครื่องยนต์เกณฑ์การทดสอบเข้มงวดขึ้น ด้านการสะสมคราบสกปรกในอุณหภูมิสูง เน้นการประหยัด และยืดอายุของน้ำมันเครื่อง (Extended Drain Interval) สำหรับการกำหนดปริมาณธาตุ P ยังคงเดิม เพราะหากลดไปมากกว่านี้จะมีปัญหาเรื่อง wear
SM	ออกเครื่องหมายรับรองคุณภาพแล้ว	ขอความเห็นชอบ	ประกาศใช้วันที่ 30 พฤศจิกายน ค.ศ. 2004 (พ.ศ. 2547) เป็นชั้นคุณภาพที่พัฒนาต่อมาจาก SL เพิ่มเติมการกำหนดค่ากำมะถัน ในด้านการป้องกันผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นกับอุปกรณ์กำจัดไอเสียเช่นกัน รวมทั้งพัฒนาคุณสมบัติด้านการระเหย การต้านทานการรวมตัวกับออกซิเจน และการป้องกันการสึกหรอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-1 (ต่อ) สรุปการพัฒนาชั้นคุณภาพของน้ำมันเครื่องตามมาตรฐาน API สำหรับเครื่องยนต์เบนซิน 4 จังหวะ

ชั้นคุณภาพ เบนซิน	API	ประเทศไทย	ปีที่เริ่มใช้ และคุณสมบัติการใช้งาน
SN	ออก เครื่องหมาย รับรอง คุณภาพแล้ว	ขอความ เห็นชอบ	ประกาศใช้วันที่ 1 ตุลาคม ค.ศ. 2010 (พ.ศ. 2553) พัฒนาต่อจาก SM โดยเพิ่มความสามารถด้านการชะล้าง ทำความสะอาดเครื่องยนต์ (Detergency) มีการประเมินผลการเกิดคราบเขม่าคาร์บอนสะสมที่ลูกสูบ (Weighted Piston Deposits) ที่เข้มงวดขึ้น ด้านทานการกระจายสิ่งสกปรก (Dispersancy) และเข้มงวดในการวัดค่าตมที่เกิดขึ้นในเครื่องยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้.

ตารางที่ ก-2 สรุปการพัฒนาชั้นคุณภาพน้ำมันเครื่องตามมาตรฐาน API สำหรับเครื่องยนต์ดีเซล (สำนักงานน้ำมันเชื้อเพลิง, 2010)

ชั้นคุณภาพดีเซล	API	ประเทศไทย	ปีที่เริ่มใช้ และคุณสมบัติการใช้งาน
CA	ไม่ออกเครื่องหมายรับรองคุณภาพแล้ว	ห้ามจำหน่าย	ใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลธรรมดา ปี ค.ศ. 1940-1950 (พ.ศ. 2483-2493) สภาวะการทำงานเบาถึงปานกลาง มีการเติมสารเพิ่มคุณภาพบ้างเล็กน้อย ชั้นคุณภาพนี้ ไม่แนะนำแล้วสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลในปัจจุบัน
CB	ไม่ออกเครื่องหมายรับรองคุณภาพแล้ว	ห้ามจำหน่าย	ใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลธรรมดา ปี ค.ศ. 1949-1960 (พ.ศ. 2492-2503) สภาวะการทำงานเบาถึงปานกลาง มีการเติมสารเพิ่มคุณภาพบ้างเล็กน้อย เพื่อป้องกันการกัดกร่อน มีสารชะล้าง และกระจายตะกอน ชั้นคุณภาพนี้ ไม่แนะนำแล้วสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลในปัจจุบัน
CC	ไม่ออกเครื่องหมายรับรองคุณภาพแล้ว	ขอความเห็นชอบ	ใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลธรรมดา หรือที่ติดระบบเพิ่มแรงอัดอากาศซูเปอร์ชาร์จ เทอร์โบชาร์จ ปี ค.ศ. 1961 (พ.ศ. 2504) ใช้กับทุกสภาวะการทำงานปานกลาง ถึงหนักได้ มีคุณสมบัติด้านอื่นๆดีขึ้นเล็กน้อย
CD	ไม่ออกเครื่องหมายรับรองคุณภาพแล้ว	ขอความเห็นชอบ	ใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลธรรมดา ปี ค.ศ. 1955 (พ.ศ. 2498) ในสภาวะการทำงานความเร็วรอบสูง และสามารถใช้น้ำมันดีเซลที่มีค่ากำมะถันสูงได้ น้ำมันเครื่องจึงต้องมีการพัฒนาคุณสมบัติด้านการป้องกันคราบสกปรก ชะล้าง และกระจายเขม่าได้ดี รวมทั้งป้องกันการสึกหรอ และการกัดกร่อน
CD II	ไม่ออกเครื่องหมายรับรองคุณภาพแล้ว	ขอความเห็นชอบ	สมรรถนะเทียบเท่า CD แต่ใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลสองจังหวะ ประกาศปี ค.ศ. 1987 (พ.ศ. 2530)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-2 (ต่อ) สรุปการพัฒนาชั้นคุณภาพของน้ำมันเครื่องตามมาตรฐาน API สำหรับเครื่องยนต์ดีเซล

ชั้นคุณภาพ ดีเซล	API	ประเทศไทย	ปีที่เริ่มใช้ และคุณสมบัติการใช้งาน
CE	ไม่ออก เครื่องหมาย รับรอง คุณภาพแล้ว	ขอความ เห็นชอบ	ใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลปี ค.ศ. 1983 (พ.ศ. 2526) น้ำมันเครื่อง ชั้นคุณภาพนี้พัฒนาขึ้นเพื่อรับรองเครื่องยนต์ดีเซลรุ่นใหม่ที่มี กำลังมากขึ้น อาจติดซูเปอร์ชาร์จ หรือเทอร์โบชาร์จ สภาพ การทำงานหนักภายใต้ความเร็วรอบต่ำ ภาระสูง(high load) โดยเพิ่มคุณสมบัติการรวมตัวกับออกซิเจน ป้องกันการเกิด คราบเขม่า ลดการสึกหรอ และเพิ่มการทดสอบกับเครื่องยนต์ หนัก อาทิ Caterpillar, Mack และ Cummins
CF-4	ไม่ออก เครื่องหมาย รับรอง คุณภาพแล้ว (30 มิ.ย.51)	ขอความ เห็นชอบ	ประกาศใช้ปี ค.ศ. 1990 (พ.ศ. 2533) พัฒนาขึ้นแทนชั้น คุณภาพ CE เน้นสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลที่มีความเร็วรอบสูง บรรทุกหนัก และวิ่งระยะไกล มีคุณสมบัติในการควบคุม ความเปลี่ยนแปลงของน้ำมันเครื่อง และควบคุมคราบสกปรกที่ ถูกสุขเข้มงวดกว่า CE แต่ API ก็ได้ยุติการออกเครื่องหมาย รับรองสำหรับชั้นคุณภาพนี้แล้ว ตั้งแต่วันที่ 30 มิถุนายน พ.ศ. 2551 เนื่องจากสามารถใช้น้ำมันเครื่องชั้นคุณภาพที่สูงกว่า แทน
CF-2	ไม่ออก เครื่องหมาย รับรอง คุณภาพแล้ว (1 ก.พ. 53)	ขอความ เห็นชอบ	ประกาศใช้ปี ค.ศ. 1994 (พ.ศ. 2537) ใช้แทน CD II สำหรับ เครื่องยนต์ดีเซล 2 จังหวะ ที่ใช้งานทั่วไป สามารถป้องกันการ เกิดคราบสกปรกได้ดี ปัจจุบัน API ได้ยุติการออกเครื่องหมาย รับรองสำหรับชั้นคุณภาพนี้แล้ว ในวันที่ 1 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2553 เนื่องจากเครื่องยนต์ Detroit Diesel 6V-92T และอะไหล่ ชิ้นส่วนที่ใช้ทดสอบ จัดหาได้ยากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-2 (ต่อ) สรุปการพัฒนาชั้นคุณภาพของน้ำมันเครื่องตามมาตรฐาน API สำหรับเครื่องยนต์ดีเซล

ชั้นคุณภาพ ดีเซล	API	ประเทศไทย	ปีที่เริ่มใช้ และคุณสมบัติการใช้งาน
CF	ไม่ออก เครื่องหมาย รับรอง คุณภาพแล้ว (ในวันที่ 30 ธ.ค. 53)	ขอความ เห็นชอบ	ประกาศใช้ปี ค.ศ. 1994 (พ.ศ. 2537) ใช้แทน CD โดยสามารถ ใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลที่มีห้องเผาไหม้แบบ Indirect Injection เครื่องยนต์ดีเซลธรรมดา ดิเซลเทอร์โบชาร์จ หรือซูเปอร์ชาร์จ และสามารถใช้ได้กับน้ำมันดีเซล ทั้งที่มีค่ากำมะถันต่ำ และ สูงกว่าร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก มีคุณสมบัติควบคุมการเกิด คราบสกปรกที่ลูกสูบ ป้องกันการสึกหรอ และการกัดกร่อน ของแบร็งได้ดี โดยเฉพาะแบร็งที่มีทองแดงผสมอยู่ ทั้งนี้ใน วันที่ 30 ธันวาคม พ.ศ. 2553 API จะยุติการออกเครื่องหมาย รับรองสำหรับชั้นคุณภาพนี้เนื่องจากเครื่องยนต์ Caterpillar 1 M-PC และอะไหล่ชิ้นส่วนที่ใช้ทดสอบ จัดหาได้ยากขึ้น
CG-4	ไม่ออก เครื่องหมาย รับรอง คุณภาพแล้ว (31 ส.ค. 52)	ขอความ เห็นชอบ	ประกาศใช้ปี ค.ศ. 1994 (พ.ศ. 2537) สำหรับเครื่องยนต์ดีเซล ที่ใช้งานหนัก ความเร็วรอบสูง สามารถใช้กับน้ำมันดีเซลที่มี ค่ากำมะถันสูง มีคุณสมบัติลดคราบสกปรกที่ลูกสูบเมื่อใช้ งานที่อุณหภูมิสูง ป้องกันการสึกหรอ และกัดกร่อน ป้องกัน การรวมตัวกับออกซิเจน และควบคุมการสะสมของเขม่า น้ำ มันเครื่องชั้นคุณภาพนี้ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับเครื่องยนต์ที่ผ่าน มาตรฐานมลพิษไอเสียปี ค.ศ. 1994 (พ.ศ. 2537) สามารถใช้ แทน CD, CE และ CF-4 ได้ แต่ปัจจุบัน API ได้ยุติการออก เครื่องหมายรับรองสำหรับชั้นคุณภาพนี้ตั้งแต่วันที่ 31 สิงหาคม ค.ศ. 2009 (พ.ศ. 2552)
CH-4	ออก เครื่องหมาย รับรอง คุณภาพแล้ว	ขอความ เห็นชอบ	ประกาศใช้เดือนธันวาคม ค.ศ. 1998 (พ.ศ. 2541) สามารถใช้ กับน้ำมันดีเซลที่มีค่ากำมะถันสูง เพิ่มประสิทธิภาพจาก CG-4 ในด้านการควบคุมการกระจายเขม่า ลดคราบสกปรกที่ลูกสูบ เมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูง น้ำมันชั้นคุณภาพนี้ถูกพัฒนาขึ้น สำหรับเครื่องยนต์ที่ผ่านมาตรฐานมลพิษไอเสียปี ค.ศ. 1998 (พ.ศ. 2541) สามารถใช้แทนน้ำมันมาตรฐาน CD, CE, CF-4 และ CG-4 ที่ API Non-Licensed ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-2 (ต่อ) สรุปการพัฒนาชั้นคุณภาพของน้ำมันเครื่องตามมาตรฐาน API สำหรับเครื่องยนต์ดีเซล

ชั้นคุณภาพดีเซล	API	ประเทศไทย	ปีที่เริ่มใช้ และคุณสมบัติการใช้งาน
CI-4	ออกเครื่องหมายรับรองคุณภาพแล้ว	ขอความเห็นชอบ	ประกาศใช้วันที่ 5 กันยายน ค.ศ. 2002 (พ.ศ. 2545) น้ำมันเครื่องชั้นคุณภาพนี้ได้พัฒนาขึ้นเพื่อเตรียมรับมาตรฐานมลพิษ ปี ค.ศ. 2004 (พ.ศ. 2547) เนื่องจากสถาบันสิ่งแวดล้อมของประเทศสหรัฐอเมริกา (EPA) ได้กำหนดมาตรฐานไอเสียที่เข้มงวดขึ้น โดยลดปริมาณก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ลงครึ่งหนึ่งจากปี ค.ศ. 1998 (พ.ศ. 2541) ส่งผลให้ผู้ผลิตรถยนต์ต้องติดตั้งระบบกำจัดไอเสีย EGR (Exhaust Gas Recirculation) ซึ่งเป็นระบบที่นำไอเสียไปหมุนเวียนใหม่ เพื่อลดส่วนผสมระหว่างอากาศและไอดี เพื่อลดปริมาณออกซิเจน และอุณหภูมิการเผาไหม้ลง ส่งผลให้การรวมตัวระหว่างไนโตรเจนและออกซิเจนลดลงด้วย แต่การนำไอเสียมาหมุนเวียนใหม่ เป็นการนำความร้อนเข้าสู่ระบบ ทำให้น้ำมันเครื่องมีอุณหภูมิสูงขึ้น เข้มข้นมากขึ้น และเสื่อมสภาพเร็ว ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงคุณสมบัติด้านการชะล้าง ทำความสะอาด รักษาความสะอาดบริเวณลูกสูบและร่องแหวนให้ดีขึ้น ควบคุมการกระจายเขม่า นอกจากนี้ ยังต้องสามารถต้านกรดที่เกิดจากกำมะถันในน้ำมันเชื้อเพลิง อย่างเพียงพอ จึงจะป้องกันการกัดกร่อนได้ รวมทั้งป้องกันการสึกหรอที่เกิดจากการขัดสีบริเวณชุดขับเคลื่อนวาล์ว (Valve train) มีเสถียรภาพต่ออุณหภูมิการใช้งาน ทั้งสูงมากและต่ำมาก ทั้งคงความหนืดได้ดีตลอดอายุการใช้งาน
CI-4 PLUS	ออกเครื่องหมายรับรองคุณภาพแล้ว	ขอความเห็นชอบ	ประกาศใช้เดือนกันยายน ค.ศ. 2004 (พ.ศ. 2547) เหมาะกับเครื่องยนต์ที่ติดตั้ง EGR เช่นเดียวกับ CI-4 แต่ปรับปรุงในเรื่องการกระจายเขม่า และต้านทานการเพิ่มขึ้นของความหนืด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-2 (ต่อ) สรุปรูปการพัฒนาระดับคุณภาพของน้ำมันเครื่องตามมาตรฐาน API สำหรับเครื่องยนต์ดีเซล

ระดับคุณภาพ ดีเซล	API	ประเทศไทย	ปีที่เริ่มใช้ และคุณสมบัติการใช้งาน
CJ-4	ออก เครื่องหมาย รับรอง คุณภาพแล้ว	ขอความ เห็นชอบ	ประกาศใช้เดือนกันยายน ค.ศ. 2006 (พ.ศ. 2549) มีการกำหนด อัตราสูงต่ำของปริมาณธาตุกำมะถัน (S), ธาตุฟอสฟอรัส (P) และปริมาณเถ้าเพิ่มเติม เพื่อป้องกันอุปกรณ์กำจัดมลพิษที่ ติดตั้งมากับยานยนต์ เพื่อรองรับมาตรฐานมลพิษที่เข้มงวดขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข
ผลการทดลองสถานะที่เหมาะสมในการไฟโรไลซิส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข -1 ผลการทดลองจากการศึกษาสถานะที่เหมาะสมของกระบวนการไพโรไลซิส
 ตารางที่ ข-1.1 ปริมาณของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิส ที่อุณหภูมิ 200 – 500 °C อัตรา
 การไหลของก๊าซไนโตรเจน 0.1 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณเชื้อเพลิงเหลวที่ได้ (ml)				SD	%RSD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
200	11	12	8	10.33	2.08	20.15
300	102	95	110	102.33	7.51	7.33
350	148	139	156	147.67	8.5	5.76
400	96	80	92	89.33	8.33	9.32
500	52	68	68	62.67	9.24	14.74

ตารางที่ ข-1.2 ปริมาณของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิส ที่อุณหภูมิ 200 – 500 °C อัตรา
 การไหลของก๊าซไนโตรเจน 0.45 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณเชื้อเพลิงเหลวที่ได้ (ml)				SD	%RSD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
200	113	96	102	103.67	8.62	8.32
300	417	426	408	417	9.00	2.16
350	541	532	563	545.33	15.95	2.92
400	325	322	359	335.33	20.55	6.13
500	98	86	74	86	12.00	13.95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-1.3 ปริมาณของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิส ที่อุณหภูมิ 200 – 500 °C อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 0.75 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณเชื้อเพลิงเหลวที่ได้ (ml)				SD	%RSD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
200	75	64	68	69	5.57	8.07
300	280	215	255	250	32.79	13.11
350	308	298	321	309	11.53	3.73
400	255	267	275	265.67	10.07	3.79
500	105	97	93	98.33	6.11	6.21

ตารางที่ ข-1.4 ปริมาณของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิส ที่อุณหภูมิ 200 – 500 °C อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 1.0 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณเชื้อเพลิงเหลวที่ได้ (ml)				SD	%RSD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
200	70	60	63	64.33	5.13	7.98
300	260	290	315	288.33	27.54	9.55
350	290	283	318	297	18.52	6.24
400	240	312	275	275.67	36.00	13.06
500	118	105	125	116	10.15	8.75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-1.5 ปริมาณของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิส ที่อุณหภูมิ 350°C อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 0.45 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง

เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณเชื้อเพลิงเหลวที่ได้ (ml)				SD	%RSD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
1	523	561	545	543	19.08	3.52
2	541	532	563	545.33	15.95	2.92
3	534	528	547	536.33	9.71	1.81

ภาคผนวก ข-1.6 ปริมาณของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วที่เหลือจากการไพโรไลซิส ที่อุณหภูมิ 200 – 500 °C อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 0.1 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วที่เหลือ (ml)				SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
200	912	898	928	912.67	15.01
300	818	801	789	802.67	14.57
350	766	775	758	766.33	8.50
400	795	798	789	794.00	4.58
500	841	832	828	833.67	6.66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข-1.7 ปริมาณของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วที่เหลือจากการไพโรไลซิส ที่อุณหภูมิ 200 – 500 °C อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 0.45 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วที่เหลือ (ml)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
200	767	783	754	768.00	14.53
300	408	396	398	400.67	6.43
350	300	289	344	311.00	29.10
400	548	516	501	521.67	24.01
500	798	814	837	816.33	19.60

ภาคผนวก ข-1.8 ปริมาณของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วที่เหลือจากการไพโรไลซิส ที่อุณหภูมิ 200 – 500 °C อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 0.75 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วที่เหลือ (ml)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
200	911	897	887	898.33	12.06
300	697	704	688	696.33	8.02
350	636	645	625	635.33	10.02
400	685	649	658	664.00	18.73
500	797	800	781	792.67	10.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข-1.9 ปริมาณของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วที่เหลือจากการไฟโรไลซิส ที่อุณหภูมิ 200 – 500 °C อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 1.0 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วที่เหลือ (ml)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
200	818	797	807	807.33	10.50
300	600	598	604	600.67	3.06
350	653	647	624	641.33	15.31
400	621	508	585	571.33	57.73
500	811	848	799	819.33	25.54

ตารางที่ ข-1.10 ปริมาณของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วที่เหลือจากการไฟโรไลซิส ที่อุณหภูมิ 350 °C อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 0.45 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง

ชั่วโมง	ปริมาณน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วที่เหลือ (ml)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
1	453	395	424	424.00	29.00
2	300	289	344	311.00	29.10
3	294	389	281	321.33	58.96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-1.11 ปริมาตรของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว, เชื้อเพลิงเหลวที่ได้ และก๊าซทิ้งจากกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 200, 300, 350, 400 และ 500 °C และอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 0.1, 0.45, 0.75 และ 1.0 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณที่ได้จากการทดลองที่อัตราการไหลต่างๆ (มิลลิลิตร)											
	0.1 L/min			0.45 L/min			0.75 L/min			1 L/min		
	น้ำมัน หล่อลื่นที่ เหลือ	เชื้อเพลิง เหลวที่ ได้	ก๊าซ ทิ้ง ^a	น้ำมัน หล่อลื่นที่ เหลือ	เชื้อเพลิง เหลวที่ ได้	ก๊าซ ทิ้ง ^a	น้ำมัน หล่อลื่นที่ เหลือ	เชื้อเพลิง เหลวที่ ได้	ก๊าซ ทิ้ง ^a	น้ำมัน หล่อลื่นที่ เหลือ	เชื้อเพลิง เหลวที่ ได้	ก๊าซ ทิ้ง ^a
200	912.7±15.01	10.3±2.1	77	768±14.5	103.7±8.6	128.3	898.3±12.1	69±5.6	32.7	807.3±10.5	64.3±5.1	128.3
300	802.7±14.6	102.3±7.5	95	400.7±6.4	417±9.0	182.3	696.3±8.0	250±32.8	53.77	600.7±316	288.3±27.5	111
350	766.3±8.5	147.7±8.5	86	311.±29.1	545.3±15.9	143.7	635.3±10.0	309±11.5	55.7	641.3±15.3	297±18.5	61.7
400	794±4.6	89.3±8.3	116.7	521.7±24.0	335.3±20.6	143	664±18.73	265.7±10.1	70.3	571.3±57.7	275.7±36.0	153
500	833.7±6.7	62.7±9.2	103.7	816.3±19.6	86±12.0	97.7	792.7±10.2	98.3±6.116	109	819.3±25.5	116±10.2	64.7

หมายเหตุ :^a ปริมาตรก๊าซทิ้งที่คำนวณจากปริมาตรน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วเริ่มต้น 1,000 มิลลิลิตร ลบปริมาตรเชื้อเพลิงเหลวที่ได้ และปริมาตรน้ำมันหล่อลื่นที่เหลือ

ตารางที่ ข-2.1 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้วิเคราะห์โดยใช้ GC-MS

No.	RT	Name	Corr. Area	% Corr. Area
1	2.17	Cyclopentane, methyl	4789914	0.62
2	2.42	Benzene	18280184	2.38
3	2.65	Cyclopentane, 1,2-dimethyl	6701602	0.87
4	2.73	n-Heptane	7493806	0.97
5	3.07	Cyclohexane, methyl	23256047	3.02
6	3.78	Benzene, methyl	32314556	4.20
7	3.96	Cyclohexane, 1,3-dimethyl	10012647	1.30
8	4.37	Octane	11677482	1.52
9	5.17	Cyclohexane, ethyl	11540722	1.50
10	6.15	Benzene, 1,3-dimethyl	29023181	3.77
11	6.59	1-Ethyl-4-methylcyclohexane	4135695	0.54
12	6.8	P-Xylene	10348954	1.34
13	6.96	Nonane	9152341	1.19
14	7.83	Cyclohexane, propyl	3756226	0.49
15	8.84	Benzene, 1-ethyl-3-methyl	14818480	1.93
16	9.05	Benzene, 1,2,4-trimethyl	12912971	1.68
17	9.39	Benzene, 1-ethyl-2-methyl	4890330	0.64
18	9.82	Benzene, 1,2,3-trimethyl	15072301	1.96
19	10.01	Decane	9254525	1.20
20	10.7	Benzene, 1-ethyl-3-methyl	11857640	1.54
21	11.61	Benzene, 1-methyl-3-propyl	5277191	0.69
22	11.67	Naphthalene, decahydro	6270254	0.81
23	11.83	Benzene, 4-ethyl-1,2-dimethyl	3771130	0.49
24	12.45	Benzene, 1,2,3,4-tetramethyl	6000414	0.78
25	12.65	Benzene, 4-ethyl-1,2-dimethyl	5394040	0.70
26	13.11	Undecane	13732093	1.78
27	13.58	Benzene, 1,2,3,4-tetramethyl	6770904	0.88
28	13.71	Benzene, 1,2,4,5-tetramethyl	3824620	0.50
29	13.89	1-methyldecahydronaphthalene	4959276	0.64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2.1 (ต่อ) องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้วิเคราะห์โดยใช้ GC-MS

No.	RT	Name	Corr. Area	% Corr. Area
30	14.43	Benzene,ethyl-1,2,4 trimethyl	4370094	0.57
31	14.67	Benzene,1,2,4,5-tetramethyl	5755230	0.75
32	15.6	Naphthalene	12305033	1.60
33	15.76	1H-Indene,2,3-dihydro-4,7-dimethyl	3501455	0.46
34	16.08	Dodecane	12799085	1.66
35	17.88	1H-Indene,2,3-dihydro-4,6-dimethyl	3734908	0.49
36	18.76	Naphthalene,2-methyl	27346865	3.55
37	18.89	Tridecane	8828488	1.15
38	19.22	Naphthalene,2-methyl	14782030	1.92
39	19.43	Benzene,cyclohexyl	6415046	0.83
40	19.98	1H-Indene,2,3-dihydro-1,1,1,4,6	5306970	0.69
41	20.44	Naphthalene,1,2,3,4-tetrahydro	3472852	0.45
42	20.83	Acridine,9-methyl-	8633890	1.12
43	20.93	Dodecane,2,6,10-trimethyl	4560283	0.59
44	21.02	1,1-Biphenyl	7320309	0.95
45	21.39	Naphthalene,1-ethyl	7300625	0.95
46	21.54	Tetradecane	11950391	1.55
47	21.71	Naphthalene,2,7-dimethyl	26361739	3.43
48	22.09	Naphthalene,1,7-dimethyl	23068228	3.00
49	22.18	Naphthalene,2,6-dimethyl	26217833	3.41
50	22.57	Naphthalene,1,2-dimethyl	13083031	1.70
51	22.66	Naphthalene,1,3-dimethyl	5344664	0.69
52	22.96	Naphthalene,1,4-dimethyl	10757643	1.40
53	23.71	1,1-Biphenyl,4-methyl	8803273	1.14
54	24.04	Pentadecane	16282139	2.12
55	24.17	Naphthalene,1,4,6-trimethyl	11966572	1.56
56	24.6	4,6,8-trimethyl azulene	5152641	0.67
57	24.71	Naphthalene,2,3,6-trimethyl	9301273	1.21
58	24.82	Naphthalene,1,6,7-trimethyl	11672810	1.52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2.1 (ต่อ) องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้วิเคราะห์โดยใช้ GC-MS

No.	RT	Name	Corr. Area	% Corr. Area
59	25.21	Naphthalene,2,3,6-trimethyl	8651999	1.12
60	25.27	Naphthalene,1,6,7-trimethyl	9332280	1.21
61	25.57	Naphthalene,2,3,6-trimethyl	18275753	2.38
62	26.04	9H-Fluorene	5493934	0.71
63	26.16	Naphthalene,2,3,6-trimethyl	8715027	1.13
64	26.39	Hexadecane	13437647	1.75
65	26.94	9H-Fluorene-9-ol	3546190	0.46
66	27.04	Azulene,7-ethyl-1,4-dimethyl	5320284	0.69
67	28.06	Naphthalene,1,2,3,4-tetramethyl	6515068	0.85
68	28.23	Naphthalene,1,6-dimethyl-4	7091591	0.92
69	28.41	Azulene,7-ethyl-1,4-dimethyl	3467464	0.45
70	28.63	Heptadecane	7237661	0.94
71	28.77	Pentadecane,2,6,10,14-tetramethyl	13332659	1.73
72	29.44	Azulene,7-ethyl-1,4-dimethyl	4469231	0.58
73	30.4	Phenanthrene	5702921	0.74
74	30.76	Octadecane	4946090	0.64
75	32.79	Nonadecane	6574242	0.85
76	33.25	Phenanthrene,4-methyl	2323545	0.30
77	33.35	Anthracene,2-methyl	1311046	0.17
78	34.73	Octadecane	1819447	0.24
79	35.1	Phenanthrene,3,6-Dimethyl	892841	0.12
80	35.45	Phenanthrene,2,5-dimethyl	1415567	0.18
81	35.57	Phenanthrene,2,7-Dimethyl	776704	0.10
82	36.59	Heneicosane	1650396	0.21
83	38.37	Docosane	1233557	0.16
84	40.07	Nonadecane	918754	0.12
85	41.71	Tetracosane	658291	0.09
86	43.29	Pentacosane	368608	0.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2.1 (ต่อ) องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้วิเคราะห์โดยใช้ GC-MS

No.	RT	Name	Corr. Area	% Corr. Area
87	44.81	Hexacosane	195543	0.03
88	46.28	Eicosane	99153	0.01

ตารางที่ ข-2.2 องค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ววิเคราะห์โดยใช้ GC-MS

No.	RT	Name	Corr. Area	% Corr. Area
1	3.76	Toluene	275817	4.00
2	4.34	Octane	123008	1.78
3	6.13	p-Xylene	141810	2.06
4	6.78	Benzene, 1, 3-dimethyl	54887	0.80
5	8.83	Benzene, 1-ethyl -3-methyl	205793	2.98
6	9.05	Benzene, 1, 2, 4-trimethyl	111752	1.62
7	9.38	Benzene, 1-ethyl -2-methyl	64508	0.94
8	9.8	Benzene, 1, 2, 3-trimethyl	265257	3.85
9	9.98	Decane	418243	6.06
10	10.07	Benzene, 1, 3, 5-trimethyl	122250	1.77
11	11.6	Benzene, 1-methyl-2-propyl	98817	1.43
12	11.83	Benzene, 1-ethyl -3, 5-dimethyl	64528	0.94
13	12.44	Benzene, 4-ethyl -1, 2-dimethyl	87102	1.26
14	12.64	Benzene, 1-ethyl -2, 3-dimethyl	94049	1.36
15	12.85	endo-tricyclo 5.2.1.0(2.6) decane	38470	0.56
16	13.07	Undecane	178791	2.59
17	13.56	1, 3-Cyclopentadiene, 1, 2, 3, 4-tetramethyl	63777	0.92
18	13.7	Benzene, 1, 2, 3, 4-tetramethyl	67772	0.98
19	14.66	Benzene, 1-ethyl-2,3-dimethyl	109364	1.59
20	14.99	Tridecane, 6-propyl	90046	1.31
21	15.18	Undecane, 3-methyl	39601	0.57
22	15.58	Naphthalene	66656	0.97

ตารางที่ ข-2.2 (ต่อ) องค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นที่วิเคราะห์โดยใช้ GC-MS

No.	RT	Name	Corr. Area	% Corr. Area
23	16.05	Dodecane	411572	5.97
24	16.44	Hexadecane,2,6,11,15-tetramethyl	68518	0.99
25	18.09	Dodecane,4,6-dimethyl	37415	0.54
26	18.72	Naphthalene,1-methyl	95413	1.38
27	18.85	Tridecane	205114	2.97
28	19.19	Naphthalene,2-methyl	59834	0.87
29	19.39	Naphthalene,1,2,3,4-tetrahydro	45488	0.66
30	20.89	Hexadecane,2,6,10,14-tetramethyl	49669	0.72
31	21.49	Tetradecane	236894	3.43
32	21.65	Naphthalene,1,6-dimethyl	75687	1.10
33	22.04	Naphthalene,2,6-dimethyl	73792	1.07
34	22.13	Naphthalene,1,7-dimethyl	93082	1.35
35	23.08	Tetradecane	97929	1.42
36	23.99	pentadecane	157740	2.29
37	24.81	Benzene,1-methyl-2-phenyl methyl	289974	4.20
38	25.01	Benzene,1-methyl-4-(phenylmethyl)	216562	3.14
39	25.17	4,6,8-Trimethylazulene	45742	0.66
40	25.25	Naphthalene,2,3,6-trimethyl	49045	0.71
41	25.57	Naphthalene,2,3,6-trimethyl	72758	1.05
42	26.36	Hexadecane	140494	2.04
43	27.46	Tridecane	50468	0.73
44	28.61	Heptdecane	106908	1.55
45	28.74	Pentadecane,2,6,10,14-tetramethyl	84966	1.23
46	28.92	5,6-dihydro-5,6-dimethylbenzo	86361	1.25
47	30.37	Phenanthrene	50343	0.73
48	30.74	Octadecane	135092	1.96
49	30.94	Hexatriacontane	41908	0.61
50	32.77	Nonadecane	98027	1.42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2.2 (ต่อ) องค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ววิเคราะห์โดยใช้ GC-MS

No.	RT	Name	Corr. Area	% Corr. Area
51	33.32	Hexadecanoic acid,methyl ester	104787	1.52
52	34.72	Eicosane	122999	1.78
54	36.07	Eicosane,9-cyclohexyl	53105	0.77
55	36.58	Heneicosane	133063	1.93
58	41.33	Borane,diethymethyl	77377	1.12
59	42.28	Eicosane	57698	0.84
60	44.08	1,2-Benzenedicarboxylic acid	144585	2.10
61	45.7	Heneicosane,3-methyl	75839	1.10
62	47.25	Hexahydropyridine,1-methyl-4	68165	0.99
63	48.9	Cyclotrisiloxane,hexamethyl	44669	0.65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค
ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-1 ข้อมูลทางสถิติของปริมาตรเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 200, 300, 350, 400 และ 500 °C และอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนที่ 0.1, 0.45, 0.75 และ 1.0 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

General Linear Model: C3 versus C1, C2

Factor	Type	Levels	Values
C1	fixed	5	1, 2, 3, 4, 5
C2	fixed	4	1, 2, 3, 4

Analysis of Variance for c, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
C1	4	628846	628846	157211	608.36	0.000
C2	3	350098	350098	116699	451.59	0.000
C1*C2	12	163032	163032	13586	52	0.000
Error	40	10337	10337	258		
Total	59	1152312				

S = 16.0753

R-sq = 99.10 %

R-sq (adj) = 98.68 %

Grouping Information Using Tuekey Method and 95.0 % Confidence

อัตราการไหลของก๊าซ ไนโตรเจน (L/min)	อุณหภูมิ (°C)				
	200	300	350	400	500
0.1	10.33 ⁱ	102.33 ^{gh}	147.67 ^f	89.33 ^{gh}	62.67 ^h
0.45	103.67 ^{gh}	417.00 ^b	545.33 ^a	335.33 ^c	86.00 ^{gh}
0.75	69.00 ^{gh}	250 ^e	309.00 ^{cd}	265.67 ^{de}	98.33 ^{gh}
1	64.33 ^h	288.33 ^{cde}	297.00 ^{cde}	275.67 ^{de}	116.00 ^{fg}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-2 ข้อมูลทางสถิติของปริมาตรเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 350°C ที่ อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนที่ 0.45 ลิตรต่อนาทีที่เวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง

One-way ANOVA : C3 versus C1

Source	DF	Seq SS	Adj MS	F	P
C1	2	131	65	0.28	0.768
Error	6	1425	238		
Total	8	1556			

S=15.41 R-Sq = 8.41% R-Sq (adj) = 0.00 %

Individual 95% CIs For Mean Base on

Level	N	Mean	St Dev
1	3	543.00	19.08
2	3	545.33	15.095
3	3	536.33	9.71

Pooled StDev = 15.41

Grouping Information Using Turkey Method

C1	N	Mean	Grouping
2	3	545.33	A
1	3	543.00	A
3	3	536.33	A

Turkey 95% Simultaneous Confidence Intervals

All Pairwise Comparisons among Levels of C1

Individual confidence level = 97.80%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-3 ข้อมูลทางสถิติของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วที่เหลือจากการไฟโรไลซิสอุณหภูมิ 350°C ที่อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนที่ 0.45 ลิตรต่อนาทีที่เวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง

One-way ANOVA : C3 versus C1

Source	DF	Seq SS	Adj MS	F	P
C1	2	23416	11708	6.80	0.029
Error	6	10329	1721		
Total	8	33745			

S=41.49 R-Sq = 69.39% R-Sq (adj) = 59.19 %

Individual 95% CIs For Mean Base on

Level	N	Mean	St Dev
1	3	424.00	29.00
2	3	311.00	29.10
3	3	321.33	58.96

Pooled StDev = 15.41

Grouping Information Using Turkey Method

C1	N	Mean	Grouping
1	3	424.00	A
3	3	311.00	A B
2	3	321.33	B

Turkey 95% Simultaneous Confidence Intervals

All Pairwise Comparisons among Levels of C1

Individual confidence level = 97.80%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง-1 การคำนวณหาจุดคุ้มทุนเชิงเศรษฐศาสตร์

1) ระบบไฟโรไลซิสมีการใช้กำลังไฟฟ้าทั้งหมด 700 วัตต์ คำนวณจากสูตร

$$\text{จำนวนหน่วย(Unit) 1 วัน} = \frac{(\text{กำลังไฟฟ้า (วัตต์)} * \text{จำนวนเครื่องใช้ไฟฟ้า})}{1000} * \text{จำนวนชั่วโมงที่ใช้งาน (ง-1)}$$

จากการทดลองพบว่าระบบไฟโรไลซิสมีการใช้กำลังไฟฟ้าทั้งหมด 700 วัตต์ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อเทียบกับปริมาณสารตั้งต้นปริมาณ 1 ลิตร คำนวณได้ดังนี้

$$\text{จำนวนหน่วย(Unit) 1 วัน} = \frac{(700 \text{ วัตต์} * 1 \text{ เครื่อง})}{1000} * 2 \text{ ชั่วโมง} = 1.4 \text{ หน่วย}$$

2) คำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไป (หากจากอัตราการคิดค่าไฟฟ้าโรงงานขนาดกลาง) คิดอัตราต่อหน่วยเป็น 1.6660 บาทต่อหน่วย จากสูตร

$$\text{ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไป} = \text{จำนวนหน่วยที่ใช้} * \text{อัตราการคิดค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วย (ง-2)}$$

คำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไป} &= \text{จำนวนหน่วยที่ใช้} * \text{อัตราการคิดค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วย} \\ &= 1.4 \text{ หน่วย} * 1.6660 \text{ บาท ต่อหน่วย} \\ &= 2.3324 \text{ บาท} \end{aligned}$$

3) ค่าใช้จ่ายในการขนส่งรวมค่าแรง 1 รอบในการจัดเก็บ (หากจากราคาน้ำมันอ้างอิงวันที่ 18 ตุลาคม พ.ศ.2556 และใช้รถบรรทุกขนาด 6 ล้อ ในการขนส่ง ใช้ระยะทางในการขนส่งไปกลับ 100 กิโลเมตรต่อรอบ)

รถบรรทุก 6 ล้อ สามารถบรรทุกน้ำมันได้ 7000 ลิตรต่อรอบ	
รถบรรทุก 6 ล้อ มีอัตราการใช้น้ำมัน	13.50 กิโลเมตรต่อลิตร
รถบรรทุก 6 ล้อ เดินทาง	100.00 กิโลเมตร
คิดการใช้น้ำมันเป็น	<u>7.41</u> ลิตรต่อรอบ
ราคาน้ำมันลิตรละ	29.99 บาท
คิดเป็นเงิน	<u>222.15</u> บาท
ค่าแรง	300.00 บาท
รวมค่าใช้จ่ายเป็น	<u>522.15</u> บาทต่อรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเดินทางขนส่งจัดเก็บน้ำมัน 1 รอบได้น้ำมัน 7,000 ลิตรต่อรอบ ใช้เงิน 522.15 บาท
 ถ้าน้ำมัน 1 ลิตร คิดเงินค่าใช้จ่ายเป็น 0.07 บาท

4) รวมค่าใช้จ่ายค่าไฟฟ้า และทุนการจัดเก็บน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว		
ต้นทุนน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว ลิตรละ	11.00	บาท
ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไป	<u>2.33</u>	บาท
ค่าขนส่งรวมค่าแรง	0.07	บาท
รวมทุน	<u>13.40</u>	บาท

- 5) ราคาขายเชื้อเพลิงเหลวที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสอยู่ที่ 20 บาทต่อลิตร
 ราคาน้ำมันหล่อลื่นที่เหลือจากกระบวนการไพโรไลซิส 17 บาทต่อลิตร

6) คำนวณหาจุดคุ้มทุน โดยคำนวณจากผลการทดลองที่ได้ ที่อุณหภูมิ 350°C โดยอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนด้วยอัตราการไหล 0.45 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง คำนวณได้ดังนี้

- ปริมาณเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส 545.33 มิลลิลิตร
- ปริมาณน้ำมันหล่อลื่นที่เหลือจากกระบวนการไพโรไลซิส 311.00 มิลลิลิตร

คิดเป็นเงิน = $(545.33/1000 * 20 \text{ บาท}) + (311/1000 * 17 \text{ บาท})$

$$= 10.91 + 5.29 \quad \text{บาท}$$

$$= 16.20 \quad \text{บาท}$$

- 7) ถ้าไรจากการบำบัดน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยกระบวนการไพโรไลซิสจะได้ 16.20 – 13.40 เท่ากับ 2.80 บาทต่อลิตร

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาววิสาข์ มานะสมบุญพันธ์
วัน เดือน ปีเกิด	22 พฤษภาคม พ.ศ. 2529
ที่อยู่	99/59 หมู่บ้านเดอะแกรนด์พระราม 2 หมู่ 6 ตำบลพันท้ายนรสิงห์ ถนนพระราม 2 อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรสาคร 74000
ประวัติการศึกษา	2550 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรมและเครื่องมือวิเคราะห์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 2551 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้