

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำมันหล่อลื่น (Lubricating oil)

น้ำมันหล่อลื่นเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่นปิโตรเลียม เป็นวัสดุหล่อลื่นที่มีลักษณะเป็นของเหลว การผลิตน้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูปคุณภาพดี และเหมาะกับการใช้งานสำหรับเครื่องยนต์และเครื่องจักรกลแต่ละชนิดประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน และขั้นตอนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูป โดยการเติมสารเพิ่มคุณภาพต่างๆลงในน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน โดยทั่วไปน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานทำหน้าที่หล่อลื่นเครื่องจักรกลที่มีลักษณะปิด และส่วนที่เคลื่อนไหวในเครื่องยนต์เช่น ภายในห้องเพลาคอเหวี่ยง ห้องเกียร์ และเฟืองท้าย เป็นต้น เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการสึกหรออันเนื่องมาจากการเสียดสีกัน ส่วนสารเติมแต่งจะช่วยป้องกันไม่ให้น้ำมันเสื่อมคุณภาพจากการทำงานของเครื่องยนต์ที่มีอุณหภูมิสูงมาก (ปานเพชร, 2554)

2.1.1 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน (Base Oil) (ปานเพชร, 2554)

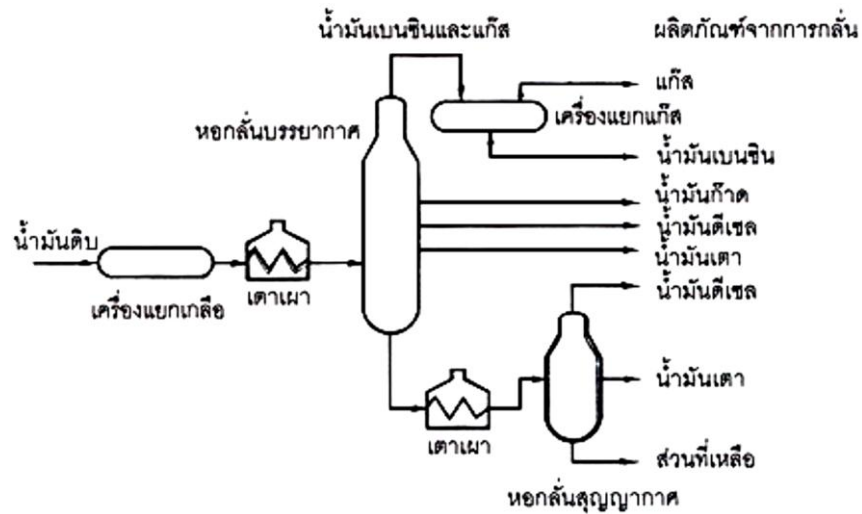
น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่

2.1.1.1 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากพืชหรือสัตว์ (Vegetable or Animal Base Oil) ปัจจุบันมีการใช้น้อยมาก เนื่องจากมีความคงตัวทางเคมีต่ำเสื่อมสภาพได้ง่ายในขณะใช้งาน เมื่อนำมาใช้งานจะต้องผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ ทำให้มีราคาแพงมาก แต่จะใช้เฉพาะงานที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษบางอย่างเท่านั้น ส่วนใหญ่มักใช้เป็นตัวเติมสำหรับเพิ่มคุณภาพให้น้ำมันหล่อลื่นที่ผลิตจากน้ำมันปิโตรเลียมเพื่อเพิ่มความข้นและความสามารถในการผสมเข้ากับน้ำได้ ตัวอย่างน้ำมันพืชและสัตว์ที่ถูกนำมาใช้ได้แก่ น้ำมันละหุ่ง น้ำมันปาล์ม น้ำมันหมู น้ำมันปลา เป็นต้น

2.1.1.2 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากปิโตรเลียมหรือน้ำมันแร่ (Mineral Base Oil) เป็นน้ำมันพื้นฐานที่นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากมีคุณภาพดีและราคาถูก น้ำมันหล่อลื่นชนิดนี้เป็นผลผลิตที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบในหอกลั่น ส่วนเบาที่มีจุดเดือดต่ำ ได้แก่ แก๊ส น้ำมันเบนซิน น้ำมันก๊าด น้ำมันดีเซล จะระเหยเป็นไอแยกออกมา ส่วนหนักที่มีจุดเดือดสูงจะไม่ระเหยเป็นไอและเหลือพวกน้ำมันเตา ไข และยางมะตอยซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.1

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากปิโตรเลียมสามารถแยกตามคุณสมบัติได้ 3 ประเภทขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของน้ำมันดิบที่นำมาใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่มีสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอนประเภทไม่อิ่มตัว (Unsaturated Cyclic Hydrocarbons) คือ 1) น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันดิบมาตรฐานพาราฟินิก (Paraffinic Base Oil) 2) น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันดิบมาตรฐาน

แนฟทินิก (Naphthenic Base Oil) 3) น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันดิบมาตรฐานอะโรมาติก (Aromatic Base Oil) มีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 2.1



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

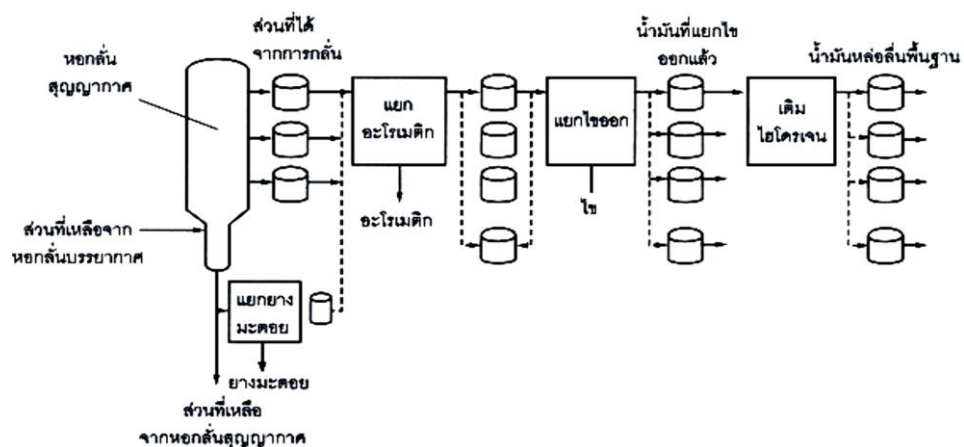
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันดิบมาตรฐาน (ประเสริฐ, 2554)

คุณสมบัติ	ประเภทของน้ำมันดิบมาตรฐาน		
	พาราฟินิก	แนฟทินิก	อะโรมาติก
จุดวาบไฟ	สูง	ต่ำ	-
การระเหยตัว	ต่ำ	ต่ำ	-
รักษาคุณสมบัติโครงสร้างทางเคมี	ดี	พอสมควร	ไม่มี
จุดไหลเท	สูง	ต่ำ	ต่ำ
ความถ่วงจำเพาะ	ต่ำ	สูง และ รวมตัวได้ดี	สูง
คุณสมบัติหล่อลื่น	ดี	ต่ำ	ไม่ดี
การเกิดไข	ดี	-	ไม่มี
ดัชนีความข้นใส	สูง	ต่ำ	ต่ำ
การเผาไหม้	เขม่าแข็ง แต่หลุด ล่อนง่าย	เขม่าอ่อนตัว	-
การยืดเกาะของโมเลกุลสารประกอบ ไฮโดรคาร์บอน	เหนียวแน่น	ดีบางส่วน	ไม่เสถียร
เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน	ดี	ต่ำ	ต่ำ
ฟิล์มน้ำมัน	เหนียวและแข็งแรง	-	-

2.1.1.3 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันสังเคราะห์ (Synthetic Base Oil) เป็นน้ำมันที่สังเคราะห์ขึ้นโดยกระบวนการทางเคมี วัสดุที่นำมาสังเคราะห์มักนำมาจากน้ำมันปิโตรเลียม ส่วนใหญ่ใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานในงานพิเศษเฉพาะที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษในด้านดัชนีความข้นใสสูง จุดไหลเทต่ำ และมีการระเหยต่ำ เป็นต้น น้ำมันสังเคราะห์ที่ใช้กันมากมีอยู่หลายชนิด และมีราคาค่อนข้างแพงมาก เช่น พวกลีโพลแอลฟาโอเลฟิน (PAO), พวกลีโธเออร์ ไคเอสเตอร์ และคอมเพล็กซ์เอสเตอร์ เป็นต้น

2.1.2 กระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่น

กระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นดังแสดงในรูปที่ 2.2 เป็นการนำน้ำมันแร่ที่ได้จากการนำส่วนที่อยู่ก้นหอกลั่นบรรยากาศมาผ่านกระบวนการกลั่นภายใต้สุญญากาศ เพื่อแยกน้ำมันหล่อลื่นชนิดใสและข้นออกมา ส่วนที่เหลือเป็นกากสามารถนำไปผลิตเป็นยางมะตอยได้ ชนิดและปริมาณของน้ำมันแร่ที่แยกออกมาได้ ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันดิบที่นำมากลั่น น้ำมันดิบบางชนิดไม่เหมาะที่จะนำมาผลิตน้ำมันแร่ น้ำมันแร่ที่ได้จากน้ำมันดิบพาราฟินจะมีไขสูง จะต้องผ่านกระบวนการกำจัดไขออก น้ำมันแร่ที่ได้จากการกลั่นภายใต้สุญญากาศนี้ ปกติคุณภาพจะไม่ดีพอที่จะนำมาใช้ผลิตน้ำมันหล่อลื่นต้องผ่านกระบวนการต่างๆ เพื่อกำจัดสารที่ไม่ต้องการออก และเพื่อให้มีความคงตัวเชิงเคมีและเชิงความร้อนที่ดี



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

จากรูปที่ 2.2 แสดงกระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่น ซึ่งน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่ใช้เป็นส่วนที่แยกจากหอกลั่นน้ำมันดิบ (หอกลั่นบรรยากาศ) แล้วนำมากลั่นต่อในหอกลั่นสุญญากาศ หลังจากนั้นจึงทำให้น้ำมันหล่อลื่นมีความบริสุทธิ์และคุณภาพดีขึ้นด้วยการแยกส่วนที่ไม่ต้องการออก โดยผ่านกระบวนการต่างๆ ซึ่งอาจจะต่อเนื่องกันหรือไม่ก็ได้ กระบวนการต่างๆ มีดังนี้

1. การกลั่น (Distillation) ในหอกลั่นน้ำมันเชื้อเพลิงจะมีการแยกผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงต่างๆ ออกด้วยหอกลั่นบรรยากาศ ส่วนในโรงกลั่นน้ำมันหล่อลื่นจะนำส่วนที่เหลือนี้ไปผ่านหอกลั่นสุญญากาศ เพื่อที่จะทำให้ส่วนหนักๆ ที่เป็นน้ำมันหล่อลื่นระเหยตัวแล้วกลั่นออกไปได้

2. การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction) คือการกำจัดพวกละอองไขมันออกจากน้ำมันดิบด้วยตัวทำละลาย โดยส่วนใหญ่ใช้ฟีนอล เพื่อให้น้ำมันมีค่าดัชนีความข้นใสสูงขึ้น สีคล้ำขึ้น และไม่เกิดการรวมตัวกับออกซิเจน

3. ไฮโดรรีไฟนิง (Hydrotreating) คือการเติมไฮโดรเจนสำหรับเปลี่ยนแปลงรูปโมเลกุลของสารประกอบของกำมะถัน ไนโตรเจน กรด และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัวเพื่อให้น้ำมันหล่อลื่นมีสีสวยขึ้น สีคงตัวได้นาน เขม่าลดลง และมีอายุการใช้งานยาวนาน

4. การแยกไข (Dewaxing) เพื่อให้มีจุดไหลเทต่ำ (pour point) สามารถใช้งานในบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ หรือใช้ในฤดูหนาวได้ดี

5. การแยกแอสฟัลต์ (Asphalt Separation) คือการแยกแอสฟัลต์ออกจากน้ำมันหล่อลื่นส่วนหนักๆ

2.1.3 คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน

เมื่อผ่านออกมาจากโรงกลั่นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจะมีคุณสมบัติที่สำคัญบางอย่างในตัวอยู่แล้ว ซึ่งคุณสมบัติต่างๆเหล่านี้ได้แก่

1. ความหนืด หรือความข้นใส หมายถึงความใส และความข้นของน้ำมัน โดยวัดที่อุณหภูมิหนึ่ง น้ำมันที่มีความข้นใสต่ำจะไหลง่าย แต่เมื่อหล่อลื่นก็บางมากเกินไป สำหรับน้ำมันที่มีความข้นใสสูงจะไหลยาก แต่จะมีเยื่อหล่อลื่นหนา 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	เรดวูด 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 คืออุณหภูมิต่ำสุดที่น้ำมันจะไหลได้โดยไม่มีอะไรบกวน สำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ จำเป็นที่จะต้องเลือกใช้น้ำมันที่มีจุดไหลเทต่ำ

5. ดัชนีความหนืด หรือดัชนีความข้นใส ความข้นใสของน้ำมันจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ ดังนั้นน้ำมันจะไหลเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และจะข้นขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำลง จึงมีการวัดอัตราการเปลี่ยนแปลงนี้ออกมาเป็นค่าดัชนีความข้นใส (viscosity index) หรือที่เรียกกันว่าค่า VI ถ้าน้ำมันหล่อลื่นมีความข้นใสเปลี่ยนแปลงน้อยเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงมาก แสดงว่าน้ำมันหล่อลื่นนั้นมีค่า VI สูง แต่ถ้าความข้นใสของน้ำมันเปลี่ยนแปลงมากเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงน้อยแสดงว่าน้ำมันนั้นมีค่า VI ต่ำ ซึ่งน้ำมันที่มีค่าดัชนีความข้นใสสูง จะเป็นน้ำมันที่มีคุณภาพดีทางด้านความข้นใส เหมาะสมกับอุณหภูมิการใช้งาน น้ำมันหล่อลื่นที่มีความข้นใสต่ำจะใช้ในเครื่องยนต์ที่ทำงานรอบสูง อุณหภูมิต่ำ แรงกดต่ำส่วนน้ำมันหล่อลื่นที่มีความข้นใสสูงจะใช้ในเครื่องยนต์ที่ทำงานรอบต่ำ อุณหภูมิสูง แรงกดสูง

2.1.4 กลุ่มของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน

ในปัจจุบันน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานมีอยู่ 5 กลุ่มใหญ่ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.3 แต่สำหรับเครื่องยนต์เบนซินและเครื่องยนต์ดีเซล นิยมใช้น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานกลุ่มที่ 2 และ 3 ซึ่งมีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกันมาพัฒนาปรับปรุงให้เข้ากับเทคโนโลยีต่างๆ ทางด้านเครื่องยนต์ น้ำมันพื้นฐานกลุ่ม 2 และ 3 สามารถผลิตได้มากในแถบเอเชีย ถึงแม้ว่ายุโรปจะผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานได้เองแต่ก็ยังต้องการน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานกลุ่มที่ 2 และ 3 จากเอเชีย เนื่องจากน้ำมันพื้นฐานกลุ่ม 2 และ 3 นั้นมีปริมาณกำมะถันที่น้อย และมีความอึดตัวสูงกว่ากลุ่มที่ 1, 4 และ 5 จึงเป็นที่นิยมนำใช้กันทั่วโลก

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

กลุ่ม	ปริมาณกำมะถัน (Sulphur, % wt)	ความอึดตัว (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

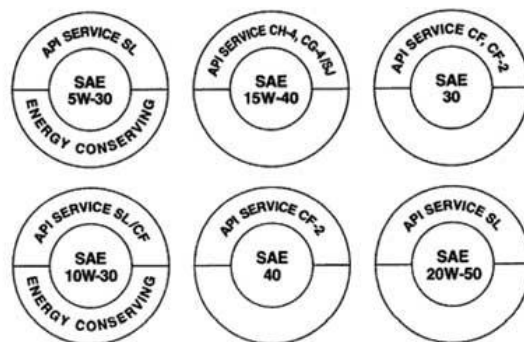
จากข้อมูลกรมโรงงานอุตสาหกรรมพบว่า ในปี พ.ศ. 2555 มีการใช้น้ำมันหล่อลื่นประมาณ 1,000 ล้านลิตร เมื่อคำนวณจากสมมติฐานว่าเกิดการสูญเสียในการใช้งานไป 30 เปอร์เซ็นต์ จะมีน้ำมันเครื่องที่ใช้แล้วซึ่งเกิดขึ้นในขณะที่น่ารถไปเปลี่ยนถ่ายน้ำมันเครื่องใหม่ประมาณ 300 ล้านลิตรต่อปี ในปริมาณนี้ได้มีการนำไปรีไซเคิลอย่างถูกวิธีและกลับไปใช้ใหม่ได้ 147 ล้านลิตรต่อปี น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วถูกนำไปกำจัดทิ้งอย่างถูกต้องตามกรรมวิธี 69 ล้านลิตรต่อปี ดังนั้นยังคงเหลือปริมาณน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วที่ไม่สามารถตรวจสอบได้ว่าการกำจัดอย่างถูกวิธีหรือไม่อีก 84 ล้านลิตรต่อปี คิดเป็นร้อยละ 28 ของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว (สำนักงานกากอุตสาหกรรม, 2555)

2.1.6 มาตรฐานน้ำมันหล่อลื่น (สำนักงานน้ำมันเชื้อเพลิง, 2010)

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

1) เกรดเดี่ยว (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 เมื่ออุณหภูมิสูงน้ำมันจะมีความใส เมื่ออุณหภูมิต่ำลงยังสามารถคงความข้นใสเอาไว้ได้ นั่นคือมีช่วงอุณหภูมิการใช้งานที่กว้างขึ้น เพื่อเหมาะกับการเลือกใช้ทุกอุณหภูมิ ซึ่งระบุเป็น 2 ตัวเลข จะมีอักษร W เป็นตัวคั่นกลาง เช่น SAE 20W-50 (รูปที่ 2.3) หมายความว่า เกรดฤดูหนาววัดที่อุณหภูมิ -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)

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

1) น้ำมันหล่อลื่นสำหรับหล่อลื่นเครื่องยนต์เบนซิน 4 จังหวะ ใช้อักษร "S" นำหน้า (Service station - spark ignition) API ได้จำแนกคุณภาพน้ำมันหล่อลื่นสำหรับเครื่องยนต์เบนซิน 4 จังหวะ ออกเป็น 12 ชั้นคุณภาพคือ 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) มากเกิน จะทำให้ลูกสูบติดขัด ส่งผลต่อการทำงานของเครื่องยนต์ประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลง และสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง

ข) ด้านการกระจายสิ่งสกปรกน้ำมันหล่อลื่น SN เข้มงวดในการวัดค่าตม (sludge) ที่เกิดขึ้นในเครื่องยนต์และบริเวณกระเดื่องวาล์ว (rocker arm) การวัดค่าคราบสกปรกภายในเครื่องยนต์และบริเวณเสื้อสูบ (piston skirt) วัดการติดขัดของแหวนลูกสูบ และการสึกหรอของลูกเบี้ยว ภายใต้อุณหภูมิต่ำ ซึ่งจะช่วยควบคุมการสะสมของตมและตะกอนได้มากขึ้น ซึ่งตะกอนเหล่านี้เป็นสาเหตุให้เกิดการอุดตันในเครื่องยนต์และน้ำมันเครื่องเปลี่ยนสภาพ ซึ่งการพัฒนาชั้นคุณภาพของน้ำมันหล่อลื่นตามมาตรฐาน API สำหรับเครื่องยนต์เบนซิน 4 จังหวะ (สำนักงานน้ำมันเชื้อเพลิง, 2010)

2) น้ำมันหล่อลื่นสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลใช้อักษร "C" นำหน้า (Commercial service - compress ignition) เริ่มจากมาตรฐาน CA-CB จนในปัจจุบันมาตรฐานสูงสุดของน้ำมันหล่อลื่นสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล คือ CJ-4 ในปีพ.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 Caterpillar 1M-PC ที่ใช้ทดสอบชั้นคุณภาพ CF หาได้ยากขึ้น API จึงยุติการรับรองชั้นคุณภาพดังกล่าว รวมระยะเวลาประมาณ 16 ปีนับตั้งแต่ประกาศใช้ในปี พ.ศ. 2537 (สำนักงานน้ำมันเชื้อเพลิง, 2010)

จะเห็นว่าการพัฒนาชั้นคุณภาพน้ำมันหล่อลื่นสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลจาก CC มาเป็น CE เป็นไปอย่างช้าๆ ระยะเวลาการพัฒนาดังกล่าวถึง 22 ปี ทั้งนี้เนื่องจากเครื่องยนต์ดีเซลในช่วงแรกๆเป็น

แบบพื้นฐานง่ายๆ ไม่ซับซ้อน เน้นความทนทานมากกว่า กำลังเครื่องไม่สูงมาก จำนวนรอบการทำงานน้อย จึงไม่ต้องการน้ำมันหล่อลื่นที่ตึงหนืด แต่หลังจากนั้นเครื่องยนต์ดีเซลมีความทันสมัย เน้นเพิ่มกำลัง และจำนวนรอบสูงขึ้น จึงเริ่มมีการพัฒนาน้ำมันหล่อลื่นให้รองรับกับสถานะการใช้งานที่หนักขึ้น โดยมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ปัจจัยสำคัญที่มีส่วนผลักดันได้แก่ มาตรฐานด้านสิ่งแวดล้อมที่เข้มงวด ส่งผลต่อการพัฒนาเทคโนโลยียานยนต์ นอกจากนี้การตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภค อาทิ การประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิง ก็มีส่วนสำคัญต่อการพัฒนาคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น (สำนักงานน้ำมันเชื้อเพลิง, 2010)

2.1.7 การใช้ประโยชน์ของน้ำมันหล่อลื่น (ปานเพชร, 2554) มีดังนี้

2.1.7.1 ช่วยหล่อลื่น (lubricate) ฟิล์มหรือเยื่อบางๆ ของน้ำมันหล่อลื่นจะทำหน้าที่เคลือบผิวโลหะหรือชิ้นงานที่มีการเคลื่อนที่ เพื่อไม่ให้เกิดการเสียดสีกันโดยตรง หรือเพื่อเป็นการลดการสึกหรอของชิ้นงาน น้ำมันหล่อลื่นที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติในการคงความหนาของเยื่อน้ำมัน และฟิล์มน้ำมันให้เกือบคงที่ตลอดเวลา แม้เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป นั่นก็จะต้องไม่บางเกินไปเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และไม่หนาเกินไปเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง ซึ่งคุณสมบัติต่างๆ เหล่านี้ เรียกว่าดัชนีความข้นใส (viscosity index)

2.1.7.2 ช่วยระบายความร้อน (coolant) คุณสมบัตินี้เป็นสิ่งสำคัญอีกข้อหนึ่งของน้ำมันหล่อลื่นสำหรับเครื่องยนต์ ซึ่งจะต้องลดอุณหภูมิหรือระบายความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในกระบอกสูบ และระบายความร้อนอันเกิดจากการเสียดสีของชิ้นส่วนต่างๆ ในเครื่องยนต์ เช่น ระบบเกียร์หรือเฟืองท้าย เป็นต้น

2.1.7.3 ช่วยรักษาความสะอาด (clean) ขณะที่น้ำมันหล่อลื่นทำหน้าที่หล่อลื่นก็จะต้องเป็นตัวทำความสะอาดชิ้นงานนั้นไปด้วย นั่นก็จะต้องสามารถชะล้างหรือขจัดคราบสกปรกต่างๆ จากผิวชิ้นงานได้อย่างดี

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

2.1.7.5 ช่วยกระจายความสกปรก (dispersancy) น้ำมันหล่อลื่นที่ดีต้องมีคุณสมบัติในการกระจายสิ่งสกปรกต่างๆ ที่ปนในน้ำมันหล่อลื่นซึ่งเกิดจากการกำจัดสิ่งสกปรกออกจากชิ้นงาน เพื่อไม่ให้สิ่งสกปรกต่างๆ เหล่านี้รวมตัวกันได้ง่าย เพราะหากสิ่งสกปรกในน้ำมันหล่อลื่นเกิดการรวมตัวกันมากขึ้นจะทำให้เกิดเป็นยางเหนียว

2.2 น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว

น้ำมันหล่อลื่น หรือน้ำมันเครื่องนิยมใช้ในยานพาหนะ อุตสาหกรรมและกิจกรรมอื่นๆ ทำให้เกิดน้ำมันที่ใช้แล้วเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก โดยมีปริมาณมากกว่า 300 ล้านลิตรต่อปี โดยทั่วไป น้ำมันหล่อลื่นจะประกอบด้วยน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานและสารเพิ่มคุณภาพ เมื่อน้ำมันหล่อลื่นที่ถูกใช้งานแล้วคุณสมบัติการหล่อลื่นของน้ำมันจะลดลง และมีการปนเปื้อนของโลหะจากเครื่องยนต์ซึ่ง น้ำมันหล่อลื่นเสื่อมคุณภาพเหล่านี้ ประกอบด้วยสารอินทรีย์ประเภทไฮโดรคาร์บอน สารตัวทำละลาย โลหะหนัก ฯลฯ การถ่ายเททิ้งและกำจัดอย่างไม่ถูกวิธีจะเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม สัตว์พืช และมนุษย์ (สิริพร, 2546)

2.2.1 คุณสมบัติน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว จากการเก็บตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วทั่วประเทศได้แก่ สถานีบริการในร้านค้า/จำหน่ายน้ำมันหล่อลื่น ในอู่ซ่อมหรือศูนย์บริการ และในแหล่งจัดเก็บรวบรวม ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว ก่อนบำบัดและภายหลังบำบัดพบว่าคุณสมบัติรวมของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วก่อนการบำบัดโดยเฉลี่ยยังมีคุณสมบัติในการหล่อลื่นดี สามารถใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดน้ำมันเตาเกรด A ซึ่งสมบัติทางกายภาพของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วแสดงในตารางที่ 2.4 (สิริพร, 2546)

ตารางที่ 2.4 สมบัติทางกายภาพของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว (สิริพร, 2546)

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

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

สรุปว่าแม้ว่าน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านกระบวนการบำบัดเบื้องต้นอย่างง่าย ๆ นิยมใช้วิธีต้มด้วยกรดผลที่ได้จะมีค่าหล่อลื่นที่เหมาะสม แต่ไม่ควรนำไปใช้หล่อลื่นอีก เพราะมีค่าความเป็นกรดสูง

มากอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อเครื่องยนต์จากการกัดกร่อนของกรด และมีจุดวาบไฟต่ำ และความใสของน้ำมันหล่อลื่นต่ำ แสดงว่าอาจมีสารละลายอินทรีย์บางประเภทปนเปื้อนอยู่ สามารถนำ น้ำมันที่ได้ไปใช้ประโยชน์ในการหล่อลื่นเครื่องจักรบางประเภทในลักษณะหยอดทิ้ง หรือการทาแผ่นแบบของการหล่อคอนกรีต (สิริพร, 2546)

2.2.2 ผลกระทบของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว (สิริรัตน์, 2553)

1) ผลกระทบต่อมนุษย์

- หากต้องสัมผัสกับน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วเป็นประจำ ผิวจะแห้งแตก ระคายเคืองเป็นผื่นแดง เนื่องจากน้ำมันจะไปชะล้างไขมันธรรมชาติออกจากผิวหนัง ทำให้เกิดการติดเชื้อและแพ้ได้ง่าย หากสูดดมรับไอระเหยของหล่อลื่น ในกรณีมีการใช้งานของเครื่องยนต์ จะเกิดอาการวิงเวียน คลื่นไส้ อ่อนเพลีย ง่วงนอน ระคายเคืองต่อหลอดลมและปอด

- หากรับประทานอาหารหรือน้ำที่น้ำมันหล่อลื่นปนเปื้อนเข้าสู่ร่างกาย สารเพิ่มคุณภาพในน้ำมันหล่อลื่นจะทำให้เกิดอาการคลื่นไส้ ปวดท้องและท้องเสีย

2) อันตรายต่อสิ่งแวดล้อม

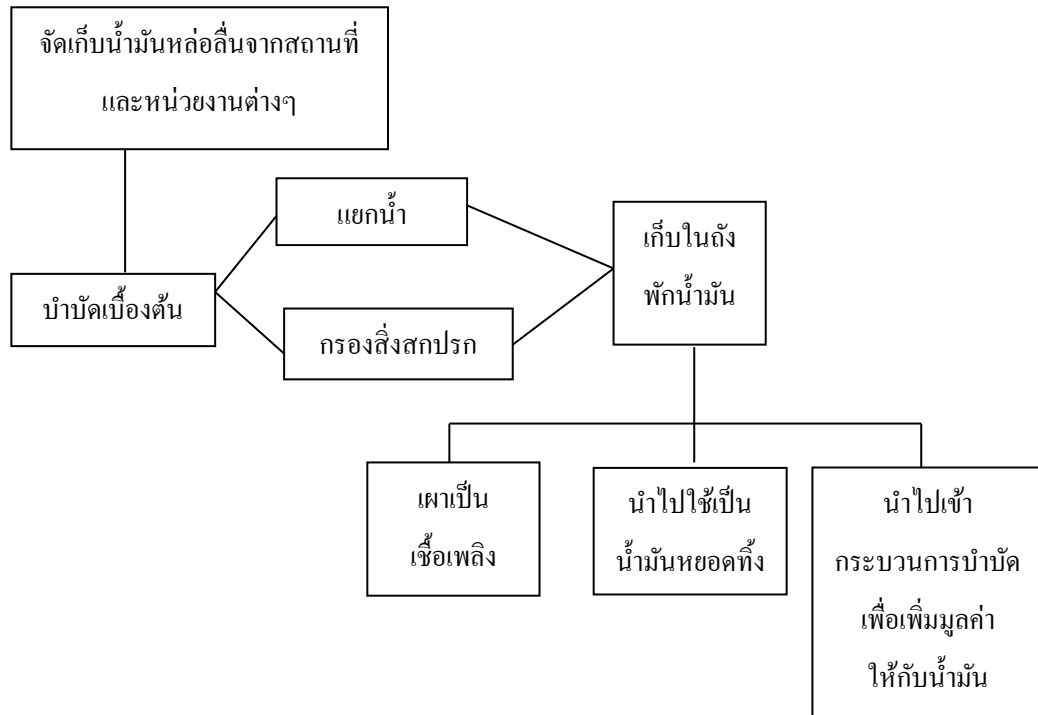
- การทิ้งน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วลงท่อน้ำสาธารณะหรือแหล่งน้ำ เป็นการทำลายระบบนิเวศวิทยาในแหล่งน้ำ เพราะน้ำมันจะลอยตัวและรวมตัวบนผิวน้ำกั้นไม่ให้ออกซิเจนและแสงอาทิตย์ผ่านไปได้ เป็นการทำลายแหล่งอาหาร การวางไข่ของสัตว์น้ำและทำลายทัศนียภาพที่ดี

- การเก็บหรือทิ้งน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วและภาชนะบรรจุที่ไม่ถูกวิธีทำให้น้ำมันหล่อลื่นเกิดการรั่วไหลลงดิน ทำให้พื้นดินบริเวณนั้นเสียคุณค่าในการเพาะปลูก และถ้าซึมลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน จะทำให้น้ำมีกลิ่นเหม็นนำไปบริโภคและใช้สอยไม่ได้

- การเผาน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วและภาชนะบรรจุทำให้เกิดไอควันพิษที่มีโลหะหนักและออกไซด์ของโลหะฟุ้งกระจายสู่บรรยากาศ

2.2.3 กระบวนการนำน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่

1) น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว ที่มีการจัดเก็บในเบื่องตันโดยผู้ประกอบการและถูกจัดส่งอย่างเป็นระบบโดยผู้รับขนส่ง/ผู้จัดเก็บรายย่อย (collector) เพื่อที่จะนำเข้คลังจัดเก็บน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว ซึ่งคลังจัดเก็บจะมีกระบวนการบำบัดในเบื่องตัน เช่น แยกน้ำ และกรองสิ่งสกปรก ก่อนที่จะนำไปเก็บยังถังพัก (storage tank) และหลังจากนั้นจะถูกลำเลียงเข้ายังส่วนกำจัด/บำบัดน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว ซึ่งเป็นส่วนสุดท้ายที่จะทำการกำจัด เช่น เผาเป็นเชื้อเพลิงในเตาเผาปูน หรือเผาทำลายในเตาเผาขยะ (incinerator) (ถ้ามีสารโลหะต่างๆ ตกค้างมาก) หรือนำไปบำบัดโดยผ่านกระบวนการบำบัดต่างๆ ที่ได้มาตรฐานเพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว เช่น Re-Refining Plant ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กระบวนการจัดการน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วภาพรวม (ดัดแปลงจาก สิริพร, 2546)

ในปัจจุบันสามารถนำน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วให้มีคุณสมบัติที่สามารถนำไปใช้ใหม่ได้โดยผ่านกรรมวิธี 2 วิธี (ศิริรัตน์, 2553) คือ

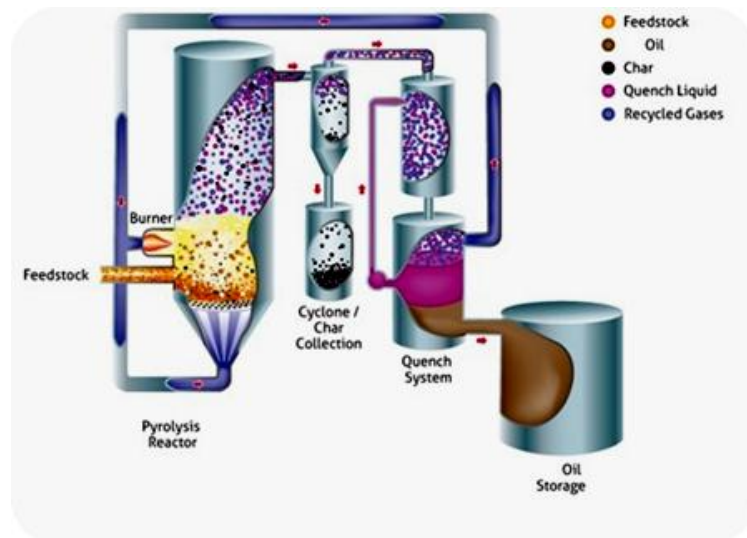
1) การบำบัดทางกายภาพและทางเคมี โดยใช้กรดซัลฟิวริก 10 % โดยปริมาตรและฟูลเลอร์เอิร์ท 10 % โดยน้ำหนัก เป็นการฟอกสีและกำจัดองค์ประกอบต่างๆ ที่ไม่เสถียรตลอดจนสิ่งเจือปนอื่นๆ ซึ่งทำให้น้ำมันเสื่อมคุณภาพ

2) การบำบัดด้วยไฮโดรเจน ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้มี 3 ชนิด ได้แก่ 1) ตัวเร่งปฏิกิริยา แร่-นิกเกิล 2) นิกเกิลออกไซด์-โมลิบดีนัม-ไดรอกไซด์บนตัวรองรับอลูมินา และ 3) ตัวเร่งปฏิกิริยา นิกเกิลออกไซด์-ทังสเตน-ไดรอกไซด์บนตัวรองรับอลูมินา สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา แร่-นิกเกิลมีราคาถูก สามารถใช้บำบัดน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วได้ดีและสามารถแยกออกจากน้ำมันได้ง่าย น้ำมันหล่อลื่นที่ได้จากกรรมวิธีดังกล่าวมีคุณภาพดีโดยเฉพาะอย่างยิ่งในการลดปริมาณซัลเฟอร์และเพิ่มดัชนีความข้นใสของน้ำมัน

2.3 กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) (ศิริรัตน์, 2553)

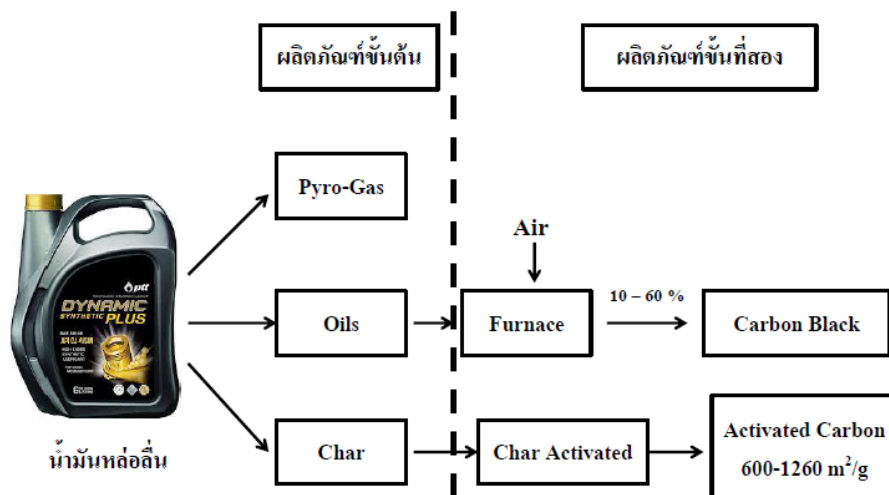
กระบวนการไพโรไลซิส คือกระบวนการแตกตัวหรือสลายตัวของสารประกอบหรือวัสดุต่างๆด้วยความร้อน ในบรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจน หรือมีออกซิเจนในปริมาณที่น้อยมาก โดยทั่วไปผลผลิตที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส สามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิดตามสถานะ คือ

1) ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง (char) 2) ของเหลว (ทั่วไปมีคุณสมบัติคล้ายน้ำมัน) และ 3) ก๊าซ เป็นผลิตภัณฑ์ขั้นปฐมภูมิ (primary products) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 อัตราส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นอยู่กับสภาวะที่ใช้ เช่น อุณหภูมิ อัตราเร็วในการให้ความร้อน เป็นต้น (ศิริรัตน์, 2553) โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว คือของเหลวหรือน้ำมัน ส่วนก๊าซที่ได้ นิยมนำใช้มาเป็นเชื้อเพลิงดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 กระบวนการไพโรไลซิส (ดัดแปลงจาก

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



รูปที่ 2.6 ผลิตภัณฑ์ต่างๆที่เกิดจากการเปลี่ยนน้ำมันหล่อลื่นเป็นน้ำมันโดยกระบวนการไพโรไลซิส (ดัดแปลงจาก

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

ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการไพโรไลซิส

ข้อดี

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

2) โอกาสในการเกิดไดออกซินฟูรานน้อยกว่าการเผาไหม้โดยตรงในเตาเผาขยะทั่วไป

ข้อเสีย

1) มีน้ำมันดิน หรือทาร์ (tar) ผสมในก๊าซเชื้อเพลิง ทำให้ต้องหาทางกำจัดหรือทำให้มันน้อยลงเพื่อไม่ให้มีปัญหาต่อการทำงานของเครื่องยนต์

2) มีการลงทุนค่อนข้างสูง

3) การควบคุมระบบมีความยุ่งยาก

2.3.1 สภาวะที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ในกระบวนการไพโรไลซิส โดยสภาวะทั่วไปที่ใช้นั้นได้แก่

- 1) อุณหภูมิ มีผลต่อการแตกตัวของวัตถุดิบ และปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้
- 2) ความดัน มีผลต่อการแตกตัวของวัตถุดิบ และผลิตภัณฑ์ที่ได้
- 3) ความเร็วในการให้ความร้อน มีผลต่อเวลาที่ใช้ และการแตกตัวของวัตถุดิบ
- 4) เวลาที่ใช้ในการเผา มีผลต่อปริมาณการใช้เชื้อเพลิง และผลิตภัณฑ์ที่ได้
- 5) ชนิดของถังปฏิกรณ์ มีผลต่ออัตราเร็วในการให้ความร้อนและเวลาที่ใช้
- 6) บรรยากาศในถังปฏิกรณ์ เป็นสุญญากาศ เพื่อช่วยในการแตกตัวของวัตถุดิบ
- 7) ระบบการป้อนสารตั้งต้น มีผลต่อการแตกตัวของวัตถุดิบที่ป้อนเข้ากระบวนการ

2.3.2 ปฏิกริยาในการไพโรไลซิส

ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการไพโรไลซิสประกอบด้วย 2 ขั้นตอนคือ ขั้นแรก การสลายตัวของสารที่ระเหยง่ายออกจากวัตถุดิบ (devolatilization) ขั้นที่สอง เป็นการแตกตัวของวัตถุดิบเองโดยองค์ประกอบที่สามารถแตกตัวได้ที่สภาวะที่ใช้จะแตกตัวออกมาเป็นโมเลกุลที่เล็กลงตามเวลาที่ใช้หรืออุณหภูมิที่กำหนด จนกระทั่งเกิดการแตกตัวที่สมบูรณ์ของวัตถุดิบ โดยอุณหภูมิในแต่ละขั้นจะแตกต่างกันไปขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบ อย่างไรก็ตาม ถ้ามีการให้ความร้อนและเวลามากเกินไป สารที่ได้จากการแตกตัวของวัตถุดิบจะกลับมารวมตัวกันเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ ซึ่งอาจกลายเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าที่ได้จากกระบวนการ หรือเป็นของแข็งขั้นเหนียวติดอยู่ตามอุปกรณ์ต่างๆ ได้ ดังนั้น สภาวะที่ใช้ในการไพโรไลซิสจะต้องขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ด้วย การมีความรู้อย่างดีเกี่ยวกับวัตถุดิบที่ป้อนเข้ากระบวนการ จะทำให้ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพในปริมาณที่สูง และไม่ก่อให้เกิดผลผลิตที่ไม่ต้องการ หรือก่อให้เกิดผลผลิตที่ทำให้ต้องหยุดการผลิตชั่วคราวเพื่อทำการซ่อมแซมอุปกรณ์ (ศิริรัตน์, 2553)

ในบางครั้งอาจมีการเติมไฮโดรเจนหรือไอน้ำเข้าไปในกระบวนการไพโรไลซิสด้วย ทั้งนี้เพื่อเปลี่ยนการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์และบางครั้งทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมันมีความเสถียรมากขึ้น เนื่องจากไฮโดรเจนจะเข้าไปรบกวนการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยออกซิเจนที่มีอยู่ในเนื้อของวัตถุดิบ 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 นอกจากนี้ของเสียปิโตรเคมีเป็นของเสียที่ย่อยสลายยาก หรือใช้เวลานานในการย่อยสลายจำเป็นต้องใช้เทคโนโลยีเปลี่ยนของเสียให้เป็นพลังงานมากำจัดเพื่อให้ได้ประโยชน์มากที่สุด (ศิริรัตน์, 2553)

2.3.3.1 ลักษณะการให้ความร้อนแก่เครื่องปฏิกรณ์

เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้กับวัตถุดิบที่มีสภาพเป็นของเหลว หรือใช้ในการผลิตเชื้อเพลิง นั้น มีความแตกต่างกันออกไปตามชนิดและองค์ประกอบของวัตถุดิบ รวมถึงเทคโนโลยีที่ใช้เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสสามารถแบ่งตามลักษณะการให้ความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ออกเป็น 4 ลักษณะ (ศิริรัตน์, 2553)

ลักษณะที่ 1 เป็นการให้ความร้อนในปริมาณหนึ่ง ทำให้ส่วนหนึ่งของวัตถุดิบแตกตัวได้และคายความร้อนออกมาเพื่อให้ความร้อนแก่วัตถุดิบในส่วนที่เหลือใช้ในการแตกตัวต่อเนื่องภายในเครื่องปฏิกรณ์เดียวกัน

ลักษณะที่ 2 เป็นการให้ความร้อนโดยตรงจากก๊าซร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ หรือการแตกตัวของวัตถุดิบในลักษณะต่างๆจากเครื่องปฏิกรณ์อื่นๆมาที่เครื่องปฏิกรณ์หลัก

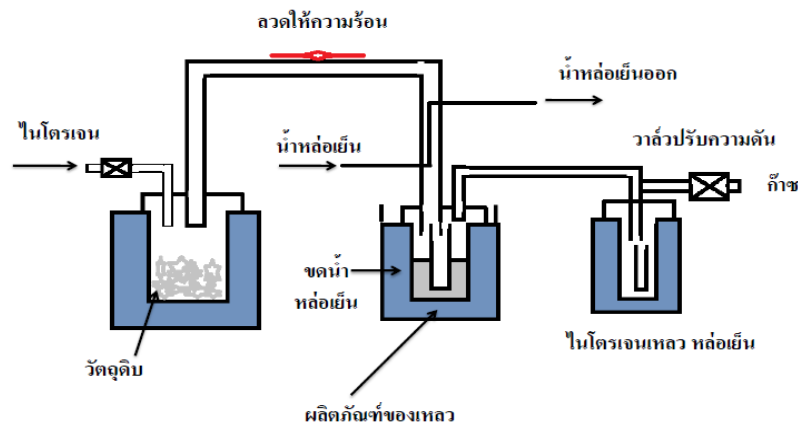
ลักษณะที่ 3 เป็นการให้ความร้อนโดยตรงผ่านตัวกลางเฉื่อยที่ป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์หลักเช่น การป้อนก๊าซเฉื่อยเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์หลักร่วมกับวัตถุดิบ

ลักษณะที่ 4 เป็นการให้ความร้อนผ่านผนังของเครื่องปฏิกรณ์หลักที่บรรจุวัตถุดิบ และให้ความร้อนถ่ายเทสู่วัตถุดิบโดยผ่านผนังปฏิกรณ์

2.3.3.2 ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิส

เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสสามารถแบ่งออกเป็น 5 ชนิดใหญ่ๆ ตามลักษณะองค์ประกอบและการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ (ศิริรัตน์, 2553) ได้แก่

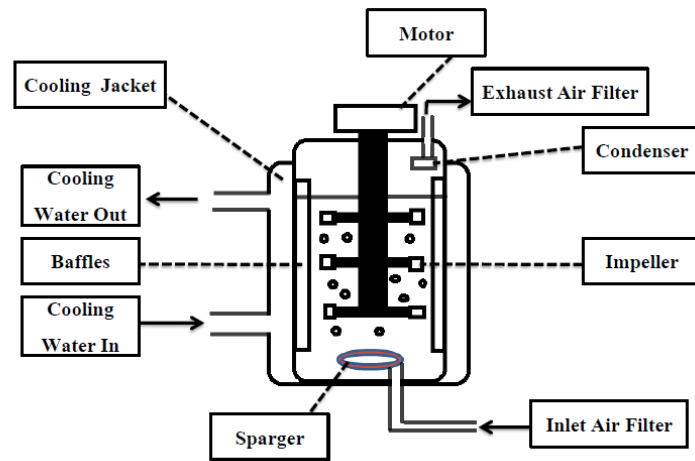
(ก) เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่ (Fixed-Bed Reactor) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการออกแบบอย่างง่ายให้มีการบรรจุวัตถุดิบแบบคงที่ภายในเครื่อง โดยวัตถุดิบจะไม่มีการเคลื่อนที่ขณะให้ความร้อนจนกระทั่งแตกตัวหมด สิ่งที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ คือ ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของไหล ซึ่งไหลออกจากปฏิกรณ์ได้โดยการนำพาของก๊าซเฉื่อยความดันภายใน หรือการดูดออกโดยใช้ปั๊มสุญญากาศ ดังรูปที่ 2.7 เนื่องจากการใช้ปริมาตรคงที่คือ ขนาดของถังปฏิกรณ์ไม่สามารถขยายตัว มีเพียงสิ่งเดียวที่สามารถเคลื่อนที่ได้ภายในถังปฏิกรณ์ คือ ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของไหล ดังนั้นเครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้เป็นปฏิกรณ์อย่างง่ายที่สุด จึงนิยมใช้กันมากในห้องปฏิบัติการ (ศิริรัตน์, 2553)



รูปที่ 2.7 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่แสดงในระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง

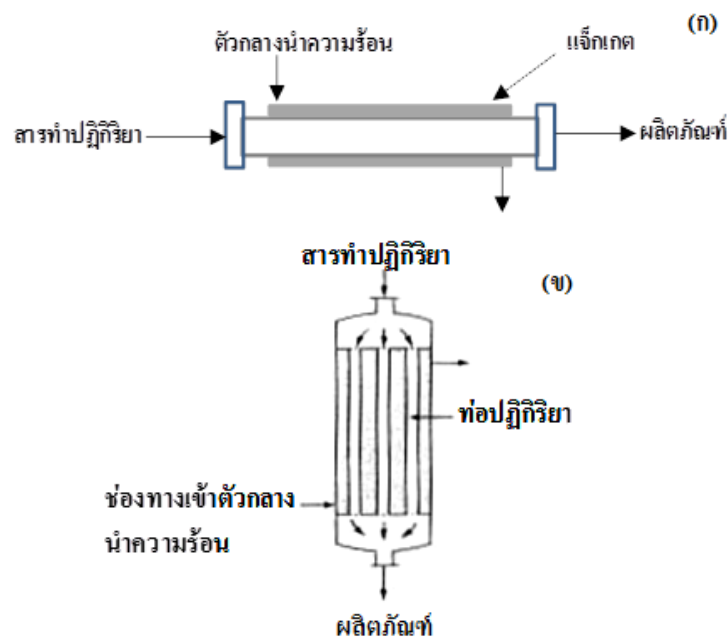
(ดัดแปลงจาก Miller *et al.*, 2006)

(ข) เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน (Continuous Stirred Tank Reactor) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการกวนวัตถุดิบที่ป้อนเข้าภายในปฏิกรณ์ด้วยใบกวนที่อยู่ด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ เพื่อให้เกิดการเคลื่อนตัวของวัตถุดิบภายในปฏิกรณ์ตลอดเวลา ดังรูปที่ 2.8 และมีการถ่ายเทความร้อนได้มากขึ้น วัตถุดิบแตกตัวอย่างรวดเร็วภายในปฏิกรณ์ขณะเคลื่อนตัวด้วยใบกวน การป้อนวัตถุดิบมักจะทำโดยเครื่องป้อนแบบสกรู ซึ่งมีข้อดี คือ ทำให้สามารถป้อนวัตถุดิบครั้งละน้อยๆ และอย่างต่อเนื่องรวดเร็ว ทำให้วัตถุดิบแตกตัวได้อย่างรวดเร็วทันทีที่เข้าถึงปฏิกรณ์ เมื่อรวมกับข้อดีของการมีใบกวนแล้ว ทำให้วัตถุดิบยังสามารถแตกตัวได้อย่างรวดเร็วมากขึ้น และสามารถผลิตผลิตภัณฑ์ได้อย่างรวดเร็วและต่อเนื่องมากขึ้น อย่างไรก็ตามการออกแบบใบกวนมีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ และการกำจัดผลิตภัณฑ์ของแข็งออกจากปฏิกรณ์ในบางครั้ง ดังนั้นผู้ใช้ควรต้องเลือกชนิดของใบกวนให้เหมาะสมกับวัตถุดิบ ผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถไหลออกจากปฏิกรณ์ได้โดยการนำพาของก๊าซเฉื่อย ความดันภายใน หรือการดูดออกโดยใช้ปั๊มสุญญากาศ นอกจากนี้ทำให้ค่าคอนเวอร์ชันของสารตั้งต้นต่อปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์มีค่าน้อยสุดเมื่อเทียบกับปฏิกิริยาไหลต่อเนื่อง



รูปที่ 2.8 เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน (ดัดแปลงจาก Sheirs, 2006)

(ค) เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล (Flow Reactor) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ออกแบบให้มีการเคลื่อนตัวหรือการไหลของวัตถุดิบตามแนวแกนของปฏิกรณ์ขณะที่เกิดการแตกตัวด้วยความร้อน วัตถุดิบจะแตกตัวอย่างสมบูรณ์เมื่อเคลื่อนตัวมาถึงทางออกของเครื่องปฏิกรณ์ เช่นเดียวกับแบบเบดคงที่ ดังรูปที่ 2.9 โดยวัตถุดิบจะถูกป้อนอย่างต่อเนื่องจากด้านบนของปฏิกรณ์ด้วยเครื่องป้อนแบบสกรู เมื่อวัตถุดิบเข้าสู่ปฏิกรณ์ก็จะเคลื่อนตัวและตกลงไปตามแนวแกนของปฏิกรณ์ด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกขณะที่ตกลงไปก็จะเกิดการแตกตัวเป็นผลิตภัณฑ์ตลอดเวลา สภาวะที่ใช้ในปฏิกรณ์จะต้องทำให้วัตถุดิบแตกตัวอย่างสมบูรณ์เมื่อเคลื่อนตัวมาถึงทางออกของปฏิกรณ์ ลักษณะการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์นี้เป็นการทำงานแบบต่อเนื่อง

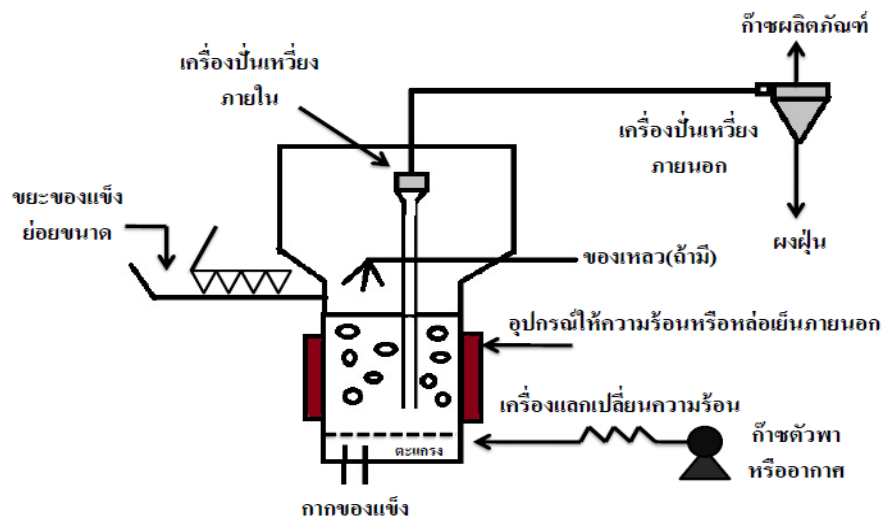


รูปที่ 2.9 เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล (ดัดแปลงจาก Bilgesü *et al.*, 2006)

(ก) แบบท่อเดี่ยว

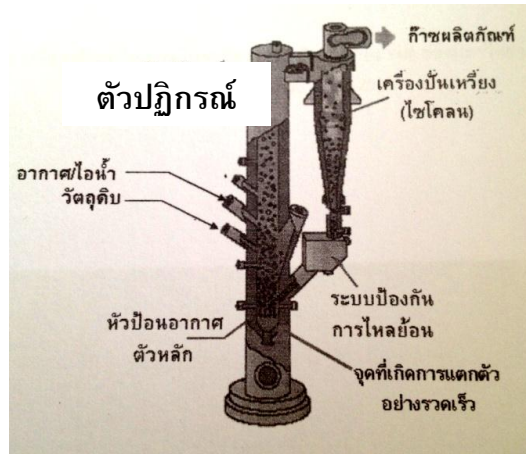
(ข) แบบหลายท่อ

1) เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดाइซ์แบบฟองก๊าซ (Bubbling Fluidized Bed) เป็นปฏิกรณ์ที่ออกแบบมาเพื่อทำให้เกิดการไหลของวัตถุดิบแบบปั่นป่วน ตามการเคลื่อนที่ของฟองก๊าซที่ป้อนเข้าสู่ปฏิกรณ์ ดังรูปที่ 2.10 การทำงานเริ่มจากการป้อนก๊าซที่ใช้เป็นตัวพาเข้าไปในปฏิกรณ์พร้อมกับวัตถุดิบ และตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าสู่ปฏิกรณ์ ความเร็วของก๊าซที่ใช้จะทำให้เกิดการรวมตัวของวัตถุดิบ และก๊าซ ทำให้วัตถุดิบเคลื่อนตัวแบบปั่นป่วน และเกิดการยกตัวขึ้นไปตามทิศทางของก๊าซ และเคลื่อนที่แบบปั่นป่วนภายในปฏิกรณ์อย่างต่อเนื่องจนกระทั่งแตกตัวหมด



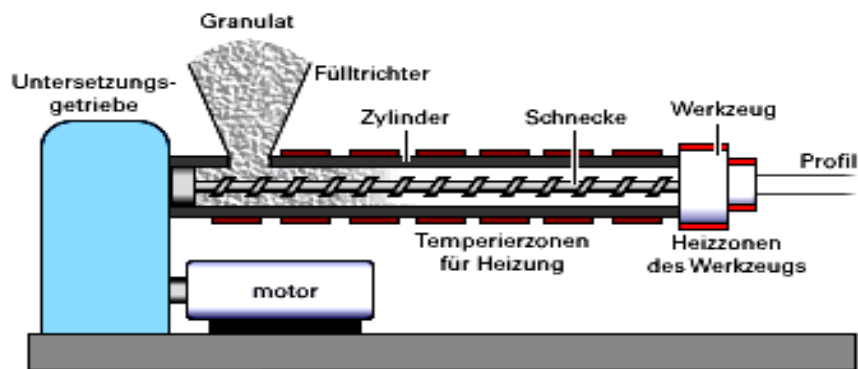
รูปที่ 2.10 เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคซ์แบบพองก๊าซ (Yang, 1995)

2) เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไชน์แบบไหลเวียน (Circulating Fluidized Bed) เป็นปฏิกรณ์ที่ออกแบบมาเพื่อทำให้เกิดการไหลเวียนของวัสดุคืบในปฏิกรณ์แบบปั่นป่วน ดังรูปที่ 2.11 การทำงานจะคล้ายกับเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไชน์แบบฟองก๊าซ มีข้อแตกต่างกันคือ มีการไหลเวียนของวัฏภาคของแข็ง ซึ่งในที่นี้ หมายถึง ตัวเร่งปฏิกิริยา



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

(จ) เครื่องปฏิกรณ์แบบเครื่องอัดรีดและแบบเตาหมุน (Extruders and Rotary Klines) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการหมุนของวัตถุดิบภายในตัวปฏิกรณ์โดยใช้สกรู หรืออุปกรณ์ที่คล้ายสกรูในระหว่างการให้ความร้อน เพื่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อนไปสู่วัตถุดิบได้อย่างสม่ำเสมอในขณะที่วัตถุดิบเดินทางไปตามสกรู ความเร็วในการหมุนของสกรูต้องพอดีกับการแตกตัวหมดของวัตถุดิบ เมื่อวัตถุดิบเดินทางมาถึงปลายเครื่องปฏิกรณ์ ด้านท้ายของเครื่องปฏิกรณ์มีทางออกของทั้งผลิตภัณฑ์ที่เป็นของไหลและของแข็ง นอกจากนี้ยังมีเครื่องปฏิกรณ์แบบเครื่องอัดรีดแบบเตาหมุนที่มีการหมุนของวัตถุดิบภายในเครื่องปฏิกรณ์ โดยใช้สกรูหรืออุปกรณ์ที่คล้ายสกรูในระหว่างการให้ความร้อน เพื่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อนไปสู่วัตถุดิบได้อย่างสม่ำเสมอในขณะที่วัตถุดิบเดินทางไปตามสกรู แต่มีความแตกต่างตรงที่เครื่องปฏิกรณ์แบบเตาหมุน มีการหมุนเตาปฏิกรณ์ตามแนวรัศมีของเครื่องปฏิกรณ์ (โดยใช้มอเตอร์ที่มีแกนขับเคลื่อนร่วมกันระหว่างเครื่องปฏิกรณ์และสกรู) ร่วมกับการใช้สกรูในการเคลื่อนตัวของวัตถุดิบผ่านตามแนวแกนของปฏิกรณ์ ดังรูปที่ 2.12



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 ผลการทดลองพบว่า การไพโรไลซิส น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วร่วมกับถ่านหิน จะช่วยในการเปลี่ยนไฮโดรเจนในถ่านหินให้เป็นผลผลิตทางปิโตรเคมี ซึ่งแตกต่างจากการไพโรไลซิสถ่านหินเพียงอย่างเดียวซึ่งจะได้โมเลกุลไฮโดรเจนเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับค่าทางทฤษฎีพบว่าก๊าซมีเทน อัลเคนชนิดเบา เอทิลีน โพรพิลีน จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิและความดันเพิ่มขึ้น แต่ไม่ช่วยเปลี่ยนโมเลกุลของไฮโดรเจนเป็นสารประกอบที่มีคาร์บอนมากกว่า 4 ($>C_4$)

อัยญาฤทธิ์ (2546) ศึกษากระบวนการแตกตัวด้วยไฮโดรเจนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนอะลูมินา ในการทดลองนี้ใช้เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กขนาด 70 มิลลิลิตร โดยใช้ความดันก๊าซไฮโดรเจนที่ 0–200 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อุณหภูมิ 400–470 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาระหว่าง 30–120 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่าง 0.0–5.0% โดยน้ำหนัก ผลิตภัณฑ์น้ำมันเบาที่ได้สามารถนำมาวิเคราะห์หาองค์ประกอบโดยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟีด้วยวิธี Simulated Distillation Gas Chromatography (SDGC) พบว่าที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ความดันก๊าซไฮโดรเจนที่ใช้ 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 90 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ 1.0% ให้ปริมาณน้ำมันเบาที่ได้ 85.64% ซึ่งประกอบด้วยเนฟทา 36.15%, เกลโรซีน 11.49%, ก๊าซออยล์ชนิดเบา 11.21%, ก๊าซออยล์ชนิดหนัก 8.77% และไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาว 18.02%

Gómez-Rico *et al.* (2003) ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการสลายตัวด้วยความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วโดย TGA ภายใต้สภาวะก๊าซฮีเลียม และก๊าซฮีเลียม:ออกซิเจน โดยทำการทดลองโดยกระบวนการไพโรไลซิสใน Tubular reactor ที่ 723 และ 1,123 K วิเคราะห์สารอินทรีย์ระเหยง่ายและสารอินทรีย์กึ่งระเหยง่ายด้วย GC จากการวิเคราะห์ TGA พบว่าไม่มีความแตกต่างระหว่างการใช้อากาศฮีเลียม และการใช้อากาศฮีเลียม:ออกซิเจน และพบว่าน้ำมันหล่อลื่นจะเริ่มสลายตัวด้วยความร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง 450 ถึง 700 K เมื่อวิเคราะห์หาองค์ประกอบโดย GC-MS ของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วกับน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสที่ 773 K พบว่ามีองค์ประกอบส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง C_{21} – C_{37}

Kim *et al.* (2003) ศึกษาการสลายตัวของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วโดยใช้ TGA ที่อัตราความร้อน 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) ศึกษาการสลายตัวของก๊าซจากน้ำมันหล่อลื่นสังเคราะห์ภายใต้กระบวนการไพโรไลซิส ใช้น้ำมันหล่อลื่นในตลาด 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 ผลิตภัณฑ์ขั้นแรกที่ได้เป็นสารจำพวกอะโรมาติกและ PAHs จะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 700 °C ผลิตภัณฑ์ขั้นที่ 2 ที่ได้เป็นเบนซีนในรูปของ aryl moieties

Conesa *et al.* (2009) ศึกษาอัตราการปล่อยมลพิษจากการไพโรไลซิสและเผาไหม้ของเสียต่างๆ ได้แก่ พอลิเอทิลีน ยางรถยนต์ สลัดจ์น้ำทิ้งชุมชน พีวีซี ผ้าฝ้าย ผ้าพอลิเอสเตอร์ ของเหลือทิ้งจากเศษเนื้อและกระดูก ของเสียจากโอดีฟอยล์น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว และของเสียกระดาษ โดยทดลองในถังปฏิกรณ์แนวนอนภายใต้สภาวะ Fuel-rich จากผลการทดลองพบว่า สารประกอบอินทรีย์ที่ระเหยง่ายจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทั้งการไพโรไลซิสและการเผาไหม้ ส่วนสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดเบา (light hydrocarbons) สารประกอบอินทรีย์ที่ระเหยง่าย สารประกอบโมโนและโพลีอะโรแมติก จะเกิดมากที่สภาวะอุณหภูมิปานกลาง (intermediate temperature)

Lam *et al.* (2012) ศึกษาการนำน้ำมันเครื่องรถยนต์ที่ใช้แล้วมาควมอย่างต่อเนื่องในถังปฏิกรณ์ให้ความร้อนด้วยเตาไมโครเวฟ ทำให้ได้ก๊าซกลับมา 41% พบว่ามีความเข้มข้นของ light aliphatic hydrocarbons มากถึง 86% สามารถนำไปใช้เป็นวัตถุดิบหรือเชื้อเพลิงในกระบวนการต่างๆ หรือนำมาเปลี่ยนสภาพเป็นไฮโดรเจนสำหรับเป็นเชื้อเพลิงสำรอง จากการทดลองพบว่ายังมีการรวมตัวของไฮโดรเจนอะตอมเป็นก๊าซไฮโดรเจนมากกว่า 19% และ CO สามารถนำมาใช้เป็นแก๊สสังเคราะห์ (H_2+CO มากกว่า 35% โดยปริมาตร) ปริมาณของก๊าซไฮโดรคาร์บอนที่สูงสามารถนำมาใช้รวมกับการให้ความร้อนร่วมกับเตาไมโครเวฟได้ การใช้เตาไมโครเวฟให้ความร้อนมีผลดีต่อการเปลี่ยนสภาพของน้ำมันเครื่องรถยนต์ที่ใช้แล้วเป็นก๊าซที่มีประโยชน์ ด้วยเหตุนี้ของเสียที่ไม่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมนั้นสามารถเปลี่ยนสภาพเป็นสิ่งที่มีความประโยชน์และเป็นทางเลือกของไฮโดรเจน หรือพลังงานไฮโดรคาร์บอน ซึ่งกระบวนการนี้ทำให้ได้ก๊าซที่มีประโยชน์มากกว่าการกำจัดของเสียแบบเดิม และแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการรีไซเคิลน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วที่เป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมได้ดี