# บทที่ 2

# ทฤษฎีและทบทวนวรรณกรรม

## 2.1 ทฤษฎีเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด (Compression Ignition Engine)

กระบวนการเผาไหม้ของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด สามารถสรุปได้ว่า เริ่มจากเชื้อเพลิงถูกฉีดเข้าห้องเผาไหม้ที่ปลายจังหวะอัด ณ ตำแหน่งก่อนศูนย์ตายบนเล็กน้อย ซึ่งเชื้อเพลิงที่ถูกฉีดเข้าไปนั้นจะมีความดันสูงมากเมื่อผ่านพ้นปลายหัวฉีดก็จะแตกเป็นละอองฝอยเข้าสู่ห้องเผาไหม้ แล้วจะระเหยอย่างรวดเร็วและผสมกับอากาศที่อยู่ภายในกระบอกสูบซึ่งมีอุณหภูมิและความดันสูง หลังจากนั้นจะเกิดการจุดระเบิดของเชื้อเพลิงและอากาศที่ผสมกันในอัตราส่วนที่สามารถติดไฟได้ เมื่อการเผาไหม้เกิดขึ้น ทำให้ความดันและอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้สูงขึ้น ซึ่งจะช่วยให้เชื้อเพลิงในส่วนที่เหลือระเหยและผสมกับอากาศได้เร็วมากขึ้น ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่เร็วและรุนแรงต่อเนื่องจนกระทั่งเชื้อเพลิงที่ถูกฉีดเข้าห้องเผาไหม้ถูกเผาไหม้จนหมด

### 2.1.1 ระบบการเผาไหม้ของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด

ระบบการเผาไหม้ของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด แบ่งออกเป็น 2 ระบบตามการออกแบบห้องเผาไหม้ ดังนี้

#### 2.1.1.1 ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง (Direct-Injection System, DI Systems)

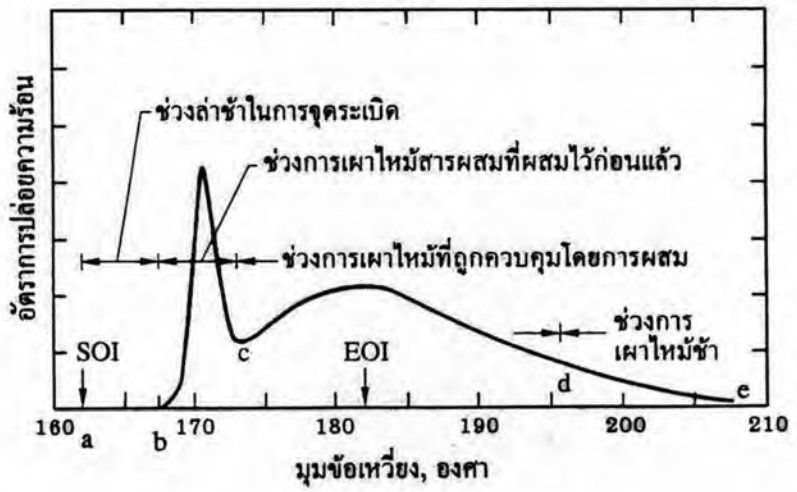
เป็นระบบที่มีห้องเผาไหม้แบบเปิดห้องเดียว(open chamber) และเชื้อเพลิงจะถูกฉีดเข้าห้องเผาไหม้โดยตรง ระบบนี้มีโมเมนตัมและพลังงานของเชื้อเพลิงที่ถูกฉีดเพียงพอต่อการกระจายของเชื้อเพลิง และเพียงพอสำหรับการผสมเชื้อเพลิงกับอากาศที่เหมาะสม จึงไม่ต้องอาศัยการเคลื่อนที่ของอากาศเข้ามาช่วยในการผสมอีก ระบบนี้เหมาะสำหรับเครื่องยนต์ขนาดใหญ่ที่มีความเร็วรอบต่ำ

#### 2.1.1.2 ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยอ้อม ( Indirect-Injection System, IDI Systems)

เป็นระบบที่ห้องเผาไหม้ถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ห้องเผาไหม้ล่วงหน้า (pre-chamber) และห้องเผาไหม้หลัก (main-chamber) โดยเชื้อเพลิงจะถูกฉีดผ่านทางหัวฉีดเข้าไปในห้องเผาไหม้ล่วงหน้า ซึ่งจะจุดระเบิดและเผาไหม้เชื้อเพลิงบางส่วนภายในห้องเผาไหม้ล่วงหน้านี้ หลังจากนั้นเปลวไฟจะลามออกมาที่ห้องเผาไหม้หลักซึ่งอยู่เหนือหัวลูกสูบและเผาไหม้เชื้อเพลิงส่วนที่เหลือต่อไปจนสิ้นสุดกระบวนการเผาไหม้ ระบบนี้เหมาะสำหรับเครื่องยนต์ขนาดเล็กความเร็วรอบสูง

### 2.1.2 ปรากฏการณ์ของการเผาไหม้ในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด

อัตราการปล่อยความร้อน (Heat-Release rate) เป็นหลักการสำคัญที่นำมาใช้อธิบายปรากฏการณ์การเผาไหม้ภายในกระบอกสูบ ซึ่งอัตราการปล่อยความร้อนนี้ก็คือพลังงานเคมีของเชื้อเพลิงที่ปล่อยออกมาขณะเกิดการเผาไหม้ โดยสามารถแบ่งกระบวนการของอัตราการปล่อยความร้อนออกเป็น 4 ช่วง คือ ช่วงล่าช้าการจุดระเบิด, ช่วงการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ผสมไว้ก่อนแล้ว, ช่วงการเผาไหม้ที่ควบคุมโดยการผสมและช่วงการเผาไหม้ช้า ซึ่งแต่ละช่วงจะถูกควบคุมโดยกระบวนการทางฟิสิกส์และเคมีที่แตกต่างกัน ดังเช่นรูปที่ 2-1 แสดงแผนภูมิอัตราการปล่อยความร้อนในเครื่องยนต์แบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง (DI) โดยสามารถอธิบายขั้นตอนการเกิดได้ดังนี้




รูปที่ 2-1 แสดงอัตราการปล่อยความร้อนของเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงและช่วงการเผาไหม้แบบต่างๆ [1]

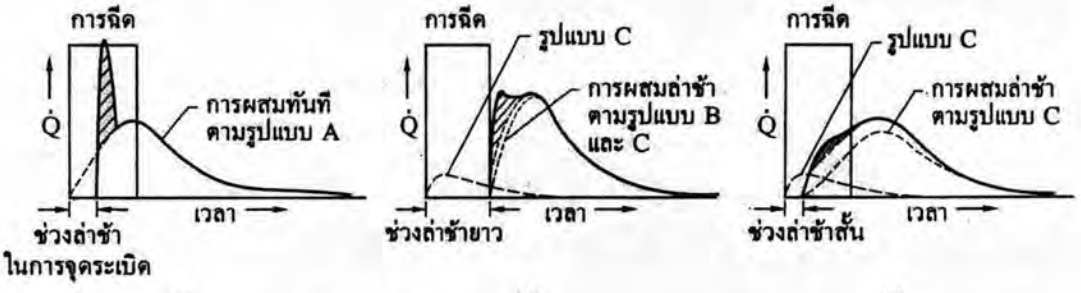
- ช่วงล่าช้าการจุดระเบิด (Ignition delay, a-b) คือช่วงระหว่างการเริ่มต้นฉีดเชื้อเพลิง (SOI, Start of injection)เข้าสู่ห้องเผาไหม้จนถึงจุดเริ่มต้นของการเผาไหม้
- ช่วงการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ผสมกันก่อนแล้ว(Premixed combustion phase, b-c) ซึ่งเป็นช่วงเวลาของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ผสมกับอากาศกันก่อนในช่วงล่าช้าการจุดระเบิด ซึ่งจะเกิดการเผาไหม้อย่างรวดเร็วและพร้อมกัน ส่งผลให้อัตราการปล่อยความร้อนในช่วงนี้มีค่าสูงสุด
- ช่วงการเผาไหม้ที่ควบคุมโดยการผสม (Mixing combustion phase, c-d) เมื่อเชื้อเพลิงและอากาศที่ผสมกันก่อนแล้วถูกเผาไหม้จนหมดอัตราการเผาไหม้จะถูกควบคุมโดยอัตราการเกิดของสารผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศที่พร้อมจะเผาไหม้

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นแต่อาจจะไม่สูงถึงค่าแรกแล้วจะลดลงเมื่อกระบวนการเผาไหม้ดำเนินต่อไป

- ช่วงการเผาไหม้ล่าช้า (Late combustion phase, d-e) เป็นช่วงที่การปล่อยความร้อนเกิดขึ้นในอัตราที่ต่ำในจังหวะขยายตัว ซึ่งเป็นการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่เหลืออยู่เล็กน้อยและเป็นการเผาไหม้ในส่วนของเขม่าที่เกิดจากการเผาไหม้ของส่วนผสมหนาที่เกิดขึ้นก่อนหน้านี้

แต่สำหรับในระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงแบบ M (ระบบที่มีห้องเผาไหม้แบบหลุมในลูกสูบ) และระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยอ้อม (IDI) นั้นอัตราการปล่อยความร้อนจะต่างจากระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงดังในรูปที่ 2-2




รูปที่ 2-2 แสดงอัตราการฉีดเชื้อเพลิงและอัตราการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซล 3 แบบ [1]

(ก) แสดงอัตราการเผาไหม้ของระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงที่ใช้หัวฉีดแบบหลายรู ติดไว้ตรงกลาง

(ข) แสดงอัตราการเผาไหม้ของระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงแบบ M ที่ฉีดเชื้อเพลิงเข้าผนัง

(ค) แสดงอัตราการเผาไหม้ของระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยอ้อมแบบห้องเผาไหม้ก่อนไหลวน

โดยจากการศึกษารูปแบบของการเผาไหม้ต่างๆ ได้มีการนำเสนอกลไกหรือรูปแบบการฉีด การผสมและการเผาไหม้ที่สำคัญในเครื่องยนต์ดีเซลไว้ 3 รูปแบบ คือ

- รูปแบบ A เกิดจากการฉีดเชื้อเพลิงเข้าไปทันทีโดยโมเมนตัมที่มากพอควร และเกิดการผสมทันทีของเชื้อเพลิงกับอากาศ ทำให้เกิดส่วนผสมล่วงหน้า (Premix)
- รูปแบบ B เชื้อเพลิงจะไปเกาะที่ผนัง การผสมในช่วงล่าช้าเกือบจะไม่มีเนื่องจากการระเหยของเชื้อเพลิงถูกจำกัด แต่หลังจากการจุดระเบิดการระเหยจะรวดเร็วและจะถูกควบคุมโดยอัตราการเข้าถึงผิวของแก๊สร้อน (เพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับผิวซึ่งจะทำให้เชื้อเพลิงระเหยเร็วขึ้น) และจะเกิดการผสมในแนวรัศมีจากแรงหนีศูนย์กลางที่ต่างกัน
- รูปแบบ C เชื้อเพลิงถูกกระจายไปใกล้กับผนัง และมีการผสมเกิดในช่วงล่าช้าแต่ใน

อัตราที่น้อยกว่าแบบ A เมื่อเกิดการจุดระเบิดจะเกิดการผสมขึ้นอย่างรวดเร็วเช่นเดียวกับรูปแบบ B

สำหรับเครื่องยนต์แบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงจะมีรูปแบบตามรูปแบบ A ส่วนระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงแบบ M นั้นจะมีรูปแบบตามรูปแบบ B และ C ซึ่งจะช่วยให้อัตราการเผาไหม้ในช่วงแรกไม่สูงเกินไป ส่วนระบบฉีดเชื้อเพลิงแบบฉีดเชื้อเพลิงโดยอ้อม ช่วงล่าช้าการจุดระเบิดจะสั้น หลังจากนั้นจะเป็นการผสมของรูปแบบ C

### 2.1.3 ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ใช้กำหนดสมรรถนะของเครื่องยนต์

พารามิเตอร์สำคัญที่เกี่ยวข้องกับสมรรถนะของเครื่องยนต์ได้แก่ กำลังเบรก, แรงบิดเบรก และ brake specific fuel consumption

กำลังเบรกของเครื่องยนต์สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$P_b = T_b \omega = \frac{2\pi N T_b}{6000} \tag{2-1}$$

Brake Fuel Conversion Efficiency

$$\eta_{f_b} = \frac{P_b}{\dot{m}_f Q_{HV}} \tag{2-2}$$

อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก

$$bsfc = \frac{\dot{m}_f}{P_b} \tag{2-3}$$

ความดันยังผลเฉลี่ยเบรก สำหรับเครื่องยนต์ 4 จังหวะ คือ

$$bmep = 4\,\pi\, T_b \,/\, V_d \tag{2-4}$$

Volumetric Efficiency

$$\eta_v = \frac{2\dot{m}_a x10^3}{60\rho_{a,i} V_d N} \tag{2-5}$$

โดยที่ $P_b$ = กำลังเบรก (kW)

$T_b$ = แรงบิดเบรก (N-m)

bmep = Brake Mean Effective Pressure (kPa)

N = ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ (rev/min)

$V_d$ = Displacement Volume ($dm^3$)

$Q_{HV}$ = ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (kJ/kg)

$\dot{m}_f$ = อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (g/s)

$\dot{m}_a$ = อัตราการไหลของอากาศ (g/s)

$\rho_{a,i}$ = ความหนาแน่นของอากาศที่ไหลเข้าเครื่องยนต์ (kg/m$^3$)

bsfc = อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (mg/J)

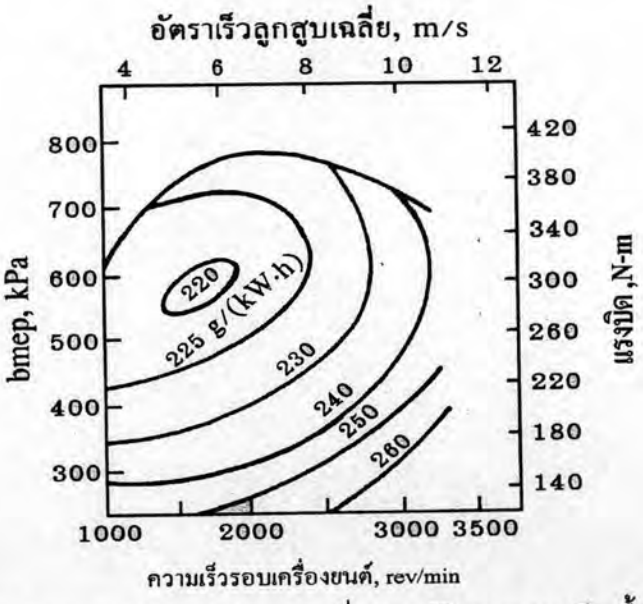
$\eta_{f_b}$ = Brake Fuel Conversion Efficiency

$\omega$ = ความเร็วเชิงมุม (rad/s)

### 2.1.4 แผนภูมิสมรรถนะ(Performance Map) ของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด

ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อสมรรถนะ ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด คือ ภาระ และ ความเร็วรอบของเครื่องยนต์

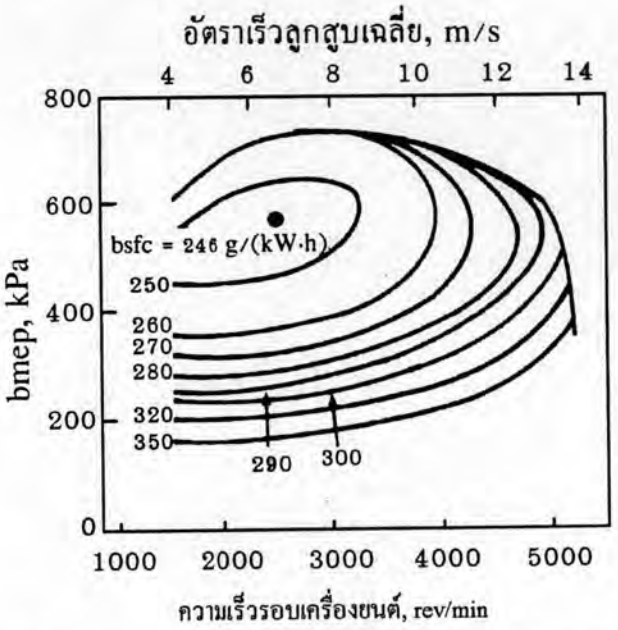
สมรรถนะและประสิทธิภาพของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดที่ภาระและความเร็วรอบต่างๆ จะแสดงในรูปแผนภูมิสมรรถนะดังตัวอย่างในรูปที่ 2-3 ซึ่งเป็นการแสดงค่า bsfc ที่เท่ากันบนกราฟของ bmep (หรือค่าแรงบิด) กับ ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ (หรือความเร็วเฉลี่ยของลูกสูบ)




รูปที่ 2-3 แสดงแผนภูมิสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซล ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง [1]

รูปที่ 2-3 แสดงแผนภูมิสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซล ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง โดยแสดงการนำอากาศเข้าโดยธรรมชาติมีการไหลวนปานกลาง สี่จังหวะ ระบายความร้อนด้วยอากาศ ปริมาตรกระจัด 6.54 ลูกบาศก์เดซิเมตร ให้กำลังสูงสุด 119 กิโลวัตต์ ที่ความเร็วรอบ

3200 รอบต่อนาที ค่า bmep สูงสุด 784 kPa ที่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที และค่า bsfc ต่ำสุดเกิดที่ความเร็วรอบ 1600 รอบต่อนาที และ bmep เท่ากับ 580 kPa มีค่าเท่ากับ 220 g/kW-h ซึ่งตรงกับประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงเบรกเท่ากับร้อยละ 38.5 และประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงบ่งชี้มีค่าประมาณร้อยละ 48

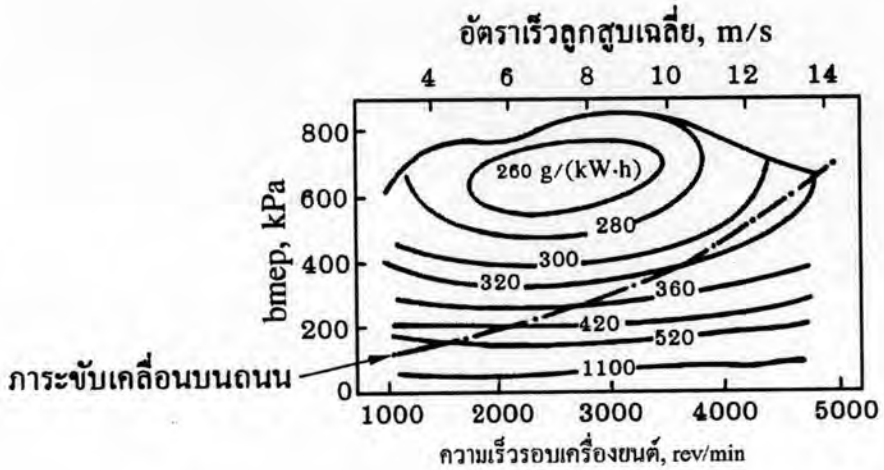



รูปที่ 2-4 แสดงแผนภูมิสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซลระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง แบบ M [1]

รูปที่ 2-4 ได้แสดงแผนภูมิสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซลระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง ซึ่งมีการไหลวนสูง ที่ใช้ระบบการเผาไหม้ แบบ M ซึ่งเชื้อเพลิงถูกฉีดเข้าในแนวสัมผัสกับผนังของหลุมในลูกสูบไปในอากาศที่ไหลวน เนื่องจากความเร็วสูงกว่าและการไหลวนสูงกว่าเครื่องยนต์ดีเซลระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงในรูปที่ 2-3 ค่า bmep สูงสุดของเครื่องในรูปที่ 2-4 จึงมีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย และค่า bsfc ที่ดีที่สุดมีค่าสูงกว่าประมาณร้อยละ 10 เนื่องจาก fmep (Friction mean effective pressure) มีค่าสูงกว่า แต่ส่วนหนึ่งมีสาเหตุมาจาก การสูญเสียความร้อน ที่สูงกว่า เป็นผลมาจากอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรที่ไม่ดีของเครื่องยนต์ ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางกระบอกสูบเล็กกว่า และการไหลวนสูง รวมถึงอัตราการปล่อยความร้อนที่ต่ำของระบบ M

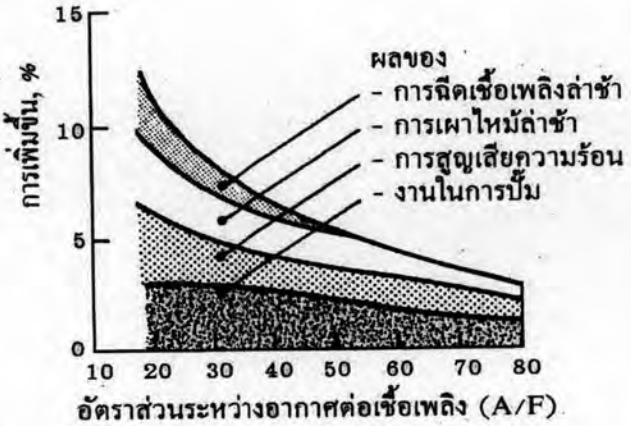
รูปที่ 2-5 แสดงแผนภูมิสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซลระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยอ้อม แบบห้องเผาไหม้ก่อนไหลวน นำอากาศเข้าโดยธรรมชาติ ค่า bmep สูงสุดตามปกติจะสูงกว่าของเครื่องยนต์ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงที่มีขนาดเทียบเท่ากัน เนื่องจากไม่จำเป็นต้องทำให้เกิดการไหลวนในช่วงกระบวนการดูด การกีดขวางโดยช่องไอดีและวาล์วไอดีน้อยกว่า และประสิทธิภาพเชิงปริมาตรสูงกว่า และเนื่องจากเครื่องยนต์ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยอ้อม สามารถทำงานที่อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ต่ำกว่าโดยค่าควันดำน้อยกว่า ค่า bsfc ที่ดีที่สุดตามปกติจะสูง

กว่าค่าทั่วไปของเครื่องยนต์ดีเซลระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงที่เทียบเท่ากันประมาณ ร้อยละ 15 ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงเบรก ที่ดีที่สุดของเครื่องยนต์ ตามรูปที่ 2-5 จะมีค่าเท่ากับร้อยละ 32.5




รูปที่ 2-5 แสดงแผนภูมิสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซลระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยอ้อมแบบห้องเผาไหม้ก่อนไหลวน [1]

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเครื่องยนต์ดีเซลระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงและระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยอ้อมที่นำอากาศเข้าโดยธรรมชาติที่มีการออกแบบและขนาดใกล้เคียงกันแล้วจะเห็นว่าเครื่องยนต์ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง จะมีค่าประสิทธิภาพสูงกว่าเสมอ ซึ่งประสิทธิภาพที่สูงกว่านี้จะแปรผันกับภาระ โดยที่ภาระเต็มที่ ความแตกต่างของค่า bsfc ของเครื่องยนต์ทั้งสองแบบจะสูงถึงร้อยละ 20 และที่ภาระบางส่วนค่าความแตกต่างจะน้อยลง เหลือประมาณร้อยละ 10 รูปที่ 2-6 แสดงปัจจัยที่ทำให้เกิดความแตกต่างของประสิทธิภาพบ่งชี้ของเครื่องยนต์ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงและระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยอ้อม ซึ่งจะพบว่าที่ภาระเต็มที่ (อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงเท่ากับ 18 ถึง 20) เครื่องยนต์ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยอ้อมจะมีประสิทธิภาพบ่งชี้น้อยกว่าประมาณร้อยละ 15 ถึง17 ซึ่งเป็นผลมาจากการฉีดเชื้อเพลิงที่ล่าช้า การเผาไหม้ที่ยาวและล่าช้า การสูญเสียความร้อน ที่ภาระบางส่วน เมื่อค่า bmep มีค่าประมาณ 300 kPa (อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงเท่ากับ 50) เครื่องยนต์ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยอ้อมจะมีประสิทธิภาพบ่งชี้น้อยกว่าประมาณร้อยละ 5 ถึง 7 ซึ่งส่วนใหญ่เป็นผลมาจากการสูญเสียความร้อนที่สูงกว่าเนื่องจากพื้นที่ผิวที่ใหญ่กว่า และความเร็วในการไหลผ่านช่องที่ต่อระหว่างห้องเผาไหม้หลักกับห้องเผาไหม้ล่วงหน้าที่สูงกว่า รวมทั้งเป็นผลมาจากการสูญเสียความดันในการอัดอากาศระหว่างห้องเผาไหม้หลักและห้องเผาไหม้ล่วงหน้า




รูปที่ 2-6 แผนภูมิแสดงปัจจัยที่เพิ่มประสิทธิภาพบ่งชี้ของเครื่องยนต์ดีเซลระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงเมื่อเทียบกับเครื่องยนต์ดีเซลระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยอ้อมแบบห้องเผาไหม้ก่อนไหลวนซึ่งเป็นฟังก์ชันของ อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงหรือภาระ [1]

แผนภูมิสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซลทุกแบบโดยทั่วไปจะมีลักษณะคล้ายกัน และเมื่อเขียนแทนด้วยความเร็วเฉลี่ยของลูกสูบ ก็จะมีค่าสมมูลกัน การเพิ่มขึ้นของ bsfc จากค่าต่ำสุดเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นที่ภาระคงตัวจะเป็นผลมาจากการเพิ่มของ friction mean effective pressure แต่ส่วนหนึ่งจะถูกชดเชยโดยผลจากการลดความสำคัญของการสูญเสียความร้อนต่อวัฏจักรลง การเพิ่มขึ้น ของ bsfc กับภาระที่ลดลงที่ความเร็วคงตัวจะเป็นผลมาจากการลดลงของประสิทธิภาพเชิงกลเมื่อ bmep ลดลงเป็นหลัก แต่ส่วนหนึ่งจะถูกชดเชยด้วยประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงบ่งชี้ที่เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนสมมูลระหว่างเชื้อเพลิงต่ออากาศลดลง

การเพิ่มของ bsfc จากค่าต่ำสุดจะไม่มากนักเมื่อภาระเพิ่มขึ้นที่ความเร็วคงตัวและเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นที่ภาระคงตัวโดยจะเป็นผลสุทธิของ

1. การเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพเชิงกลและการลดลงของประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงบ่งชี้เมื่อภาระมากขึ้น

2. การลดลงของประสิทธิภาพบ่งชี้เนื่องจากการทวีความสำคัญของการสูญเสียความร้อนและการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงกลเนื่องจากความเร็วลดลง

## 2.2 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงดีเซล

คุณสมบัติของเชื้อเพลิง และผลกระทบต่อสมรรถนะและการใช้งานของเครื่องยนต์ดีเซล ประกอบด้วย

### 2.2.1 เลขซีเทน (Cetane Number)

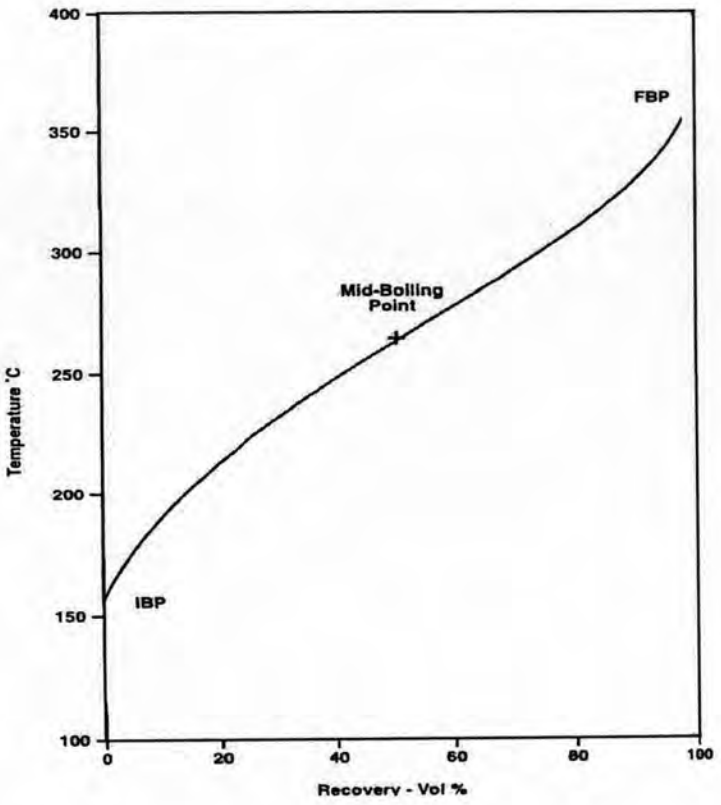
การวัดคุณภาพการจุดระเบิดของเชื้อเพลิงดีเซลซึ่งเป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปคือเลขซีเทน การกำหนดค่าของเลขซีเทนถูกนิยามโดยการผสมกันของเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนบริสุทธิ์อ้างอิง 2 ชนิด ซึ่งได้แก่ cetane(n-hexadecane) ที่มีคุณสมบัติการจุดระเบิดสูงให้มีเลขซีเทนเป็น 100 และ isocetane หรือ heptamethyl nonane เป็น paraffin ที่มีกิ่งสาขามาก มีคุณสมบัติการจุดระเบิดต่ำ กำหนดให้มีเลขซีเทนเป็น 15 โดยใช้มาตรฐาน ASTM D613 ในการทดสอบ

$$\text{cetane number} = \%\ \text{n-cetane} + 0.15\ (\%\text{heptamethyl nonane}) \qquad (2\text{-}6)$$

เลขซีเทนนี้มีผลต่อคุณสมบัติต่างๆ ของเชื้อเพลิง เช่น คุณสมบัติการสตาร์ทเครื่อง, มลภาวะ, ความดันในห้องเผาไหม้สูงสุด และเสียงของเครื่องยนต์ เป็นต้น ผลดีของการที่เชื้อเพลิงมีเลขซีเทนสูงได้แก่ เครื่องยนต์มีสมรรถนะสูง, เพิ่มคุณสมบัติการสตาร์ทเครื่องในขณะเย็น, ลดควันดำในช่วงการอุ่นเครื่องยนต์ , ลดเสียงดัง , ลดอัตราการสึ้นเปลืองเชื้อเพลิงและมลพิษ แต่เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการทดสอบเพื่อหาค่าเลขซีเทนนั้นสูง จึงได้มีการคำนวณ cetane index (CCI) ขึ้นมาเพื่อประมาณค่าคุณสมบัติการจุดระเบิดแทน โดยใช้ค่า API gravity และ mid-boiling temperature (50 % evaporated) ตามมาตรฐาน ASTM D976

### 2.2.2 ค่าการกลั่น (Distillation)

รายละเอียดที่ได้ระหว่างการกลั่นเชื้อเพลิง ได้แก่ initial boiling point (IBP), end point (EP) หรือ final boiling point (FBP), percent of condensate recovered และ percent residue of nonvolatile matter โค้งการกลั่นตัวของเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไปแสดงในรูปที่ 2-7




รูปที่ 2-7 โค้งการกลั่น(Distillation curve) ของเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป [2]

Distillation (การกลั่น หรือช่วงการเดือดของเชื้อเพลิง) มีผลต่อคุณสมบัติอื่นๆ รวมถึง ความหนาแน่น, จุดวาบไฟ, อุณหภูมิการจุดระเบิดด้วยตัวเอง, ความหนืด และเลขซีเทน Distillation ที่สูงจะทำให้เกิด vapor lock และจุดวาบไฟที่ต่ำลง vapor lock จะทำให้เครื่องยนต์ misfire หรือเกิดความล้มเหลวในการติดเครื่องยนต์ใหม่หลังจากดับเครื่องยนต์ลงในช่วงเวลาสั้นใน สภาวะร้อน แต่อย่างไรก็ตาม Distillation ที่สูงก็ยิ่งทำให้เชื้อเพลิงระเหยได้อย่างสมบูรณ์ในห้อง เผาไหม้ แต่ผลที่ตามมาคือส่วนที่มีจุดเดือดสูงอาจเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ทำให้เกิดการสะสมรวมตัวใน เครื่องยนต์และเพิ่มระดับควัน แต่อย่างไรก็ตาม ภายในช่วง 350 °C ถึง 400 °C ผลของ Distillation ที่ต่ำต่อไอเสียจะมีค่าน้อย อุณหภูมิที่กลั่นตัวไปแล้ว ร้อยละ50 (mid-boiling point) ของเชื้อเพลิงดีเซลมีผลอย่างชัดเจนต่อแนวโน้มของควันโดยผ่านทางผลต่อการฉีดและการผสม ของเชื้อเพลิง และใช้สำหรับการคำนวณ cetane index ตามมาตรฐาน ASTM D976

ส่วนที่ Distillation สูงซึ่งอยู่ที่จุดต่ำสุดในโค้งในรูปที่ 2-7 ช่วยปรับปรุงการติดเครื่องขณะ เย็น และการอุ่นเครื่อง ในขณะที่ส่วนที่ Distillation ต่ำที่ปลายด้านสูงมีแนวโน้มที่จะเพิ่มการ สะสมรวมตัว, ควัน และการสึกหรอ เนื่องจากเชื้อเพลิงระเหยยาก ทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์

### 2.2.3 **ความหนาแน่น** (Density)

ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงดีเซลให้ประโยชน์ในการบ่งชี้องค์ประกอบ และคุณลักษณะที่สัมพันธ์กับสมรรถนะ เช่น คุณภาพการจุดระเบิด, กำลัง, การประหยัดเชื้อเพลิง, คุณสมบัติที่อุณหภูมิต่ำ และแนวโน้มของควัน บางครั้งอาจแสดงความหนาแน่นเป็นความถ่วงจำเพาะ หรือ API gravity ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงที่ได้จากกระบวนการกลั่นต่างๆ โดยประมาณแสดงดังต่อไปนี้ [2]

| | |
|---|---|
| Straight-run distilled | 805 – 870 kg/m$^3$ |
| Hydrocracked gas oil | 815 – 840 kg/m$^3$ |
| Thermally cracked gas oil | 835 – 875 kg/m$^3$ |
| Catalytically cracked gas oil | 930 – 965 kg/m$^3$ |

### 2.2.4 **ความหนืด** (Viscosity)

ความหนืดของของไหลบ่งบอกถึงความต้านทานการไหลของของไหลซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของเชื้อเพลิงดีเซลเนื่องมาจากมันมีอิทธิพลต่อสมรรถนะของอุปกรณ์ฉีดเชื้อเพลิงโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิต่ำ เมื่อความหนืดเพิ่มขึ้นมุมกรวยสเปรย์ของหัวฉีดจะลดลง, การกระจายเชื้อเพลิง และ การพุ่งของสเปรย์ (spray penetration) ก็จะลดลงไปด้วย ในขณะที่ขนาดของหยดเชื้อเพลิง (droplet) ใหญ่ขึ้น ดังนั้นความหนืดจะมีผลต่อ injection timing ที่เหมาะสมสำหรับรูปร่างหัวฉีดและความดันการฉีดเชื้อเพลิงหนึ่งๆ นอกจากนี้ความหนืดจะมีอิทธิพลต่อปริมาณของเชื้อเพลิงที่ฉีดด้วย

เชื้อเพลิงดีเซลมักจะมีการกำหนดคุณสมบัติขอบเขตบนของความหนืดเพื่อให้แน่ใจว่ามีการไหลของเชื้อเพลิงที่เพียงพอสำหรับการติดเครื่องขณะเย็นและยังมีการกำหนดความหนืดต่ำสุดเพื่อปกป้องการสูญเสียกำลังที่อุณหภูมิสูงด้วย เนื่องจากหากว่าเชื้อเพลิงมีค่าความหนืดต่ำมากเกินไปจะทำให้การพุ่งของสเปรย์ยาวเกินไป ซึ่งจะทำให้เกิดการเปียกที่ผนังห้องเผาไหม้ทำให้สูญเสียกำลังของเครื่องยนต์ได้

### 2.2.5 **จุดไหลเท** (Pour Point)

จุดไหลเท คือจุดที่อุณหภูมิต่ำสุดของเชื้อเพลิงที่ยังสามารถไหลได้ โดยอาศัยแรงโน้มถ่วง ซึ่งการวัดนั้นใช้วิธี ASTM D-97 โดยมาตรฐานค่าจุดไหลเทของประเทศ ไทย ที่กำหนดโดยกระทรวงพาณิชย์นั้นกำหนดไว้ว่า จุดที่น้ำมันดีเซลต้องไหลได้ที่ อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสเป็นอย่างต่ำ

2.2.6 **จุดหมอก** (Cloud Point)

จุดหมอกเป็นค่าที่บอกถึงอุณหภูมิต่ำสุดที่เชื้อเพลิงเริ่มเป็นไขขัดขวางการไหลของน้ำมัน ซึ่งทำให้เกิดการอุดตันที่ไส้กรองน้ำมันได้ ทดสอบด้วยวิธี ASTM D2500

2.2.7 **คุณสมบัติการหล่อลื่น** (Lubricity)

คุณสมบัติการหล่อลื่นของเชื้อเพลิงดีเซล โดยการทดสอบด้วยวิธี high frequency reciprocating rig (HFRR) ตามวิธีการทดสอบของ CEC F-06-A-96 ซึ่งจะทดสอบคุณสมบัติการหล่อลื่นของน้ำมัน ซึ่งช่วยลดการสึกหรอที่เกิดจากการใช้งานในชิ้นส่วนที่สัมผัสกับเชื้อเพลิงโดยตรง

2.2.8 **คุณสมบัติที่อุณหภูมิต่ำของเชื้อเพลิงดีเซล**

เชื้อเพลิงดีเซล อาจประกอบด้วย heavy pariffinic hydrocarbons ซึ่งมีความสามารถในการละลายที่จำกัดในเชื้อเพลิง Paraffins จะสะสมรวมตัวกันเป็นไข(wax) เมื่ออยู่ในสภาวะที่เย็นเพียงพอ ซึ่งนั่นเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ การเกิดในระบบเชื้อเพลิงในยานพาหนะเป็นแหล่งของปัญหาในการทำงานต่างๆ เช่นทำให้เกิดการอุดตันในระบบเชื้อเพลิง

2.2.9 **เสถียรภาพของเชื้อเพลิงดีเซล**

คุณสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งของเชื้อเพลิงคือ ความมีเสถียรภาพไม่เปลี่ยนแปลงระหว่างช่วงเวลาระหว่างการผลิต การใช้งานในเครื่องยนต์ และการก่อตัวของตะกอนระหว่างการเก็บเชื้อเพลิงดีเซลในระยะยาว ไนโตรเจน และสารประกอบที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบมักจะเกี่ยวข้องอย่างมากในกระบวนการเสื่อมสภาพของเชื้อเพลิง เนื่องจากองค์ประกอบเหล่านี้มีแนวโน้มที่จะรวมตัวกันเป็นตะกอนเชื้อเพลิง กลไกที่การเผาไหม้ของไฮโดรคาร์บอนเกิดขึ้นในหลายขั้นตอน เริ่มต้นด้วยการเริ่มเกิดโซ่ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเกิดอนุมูลอิสระ เมื่ออนุมูลอิสระของไฮโดรคาร์บอนก่อตัวขึ้น มันจะสามารถรวมตัวกับออกซิเจนเพื่อก่อให้เกิดอนุมูล peroxide ซึ่งในทางกลับกันสามารถทำปฏิกิริยากับโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนอื่นโดยการกำเนิดอนุมูลอิสระของไฮโดรคาร์บอนอื่น และ hydroperoxide ดังนั้นกระบวนการเผาไหม้จึงไม่สูญสลายไปได้ด้วยตัวเอง อนุมูลอิสระยังสามารถเป็นเหตุให้เกิด polymerization และ ปฏิกิริยาการเผาไหม้เพื่อก่อให้เกิดวัสดุที่น้ำหนักโมเลกุลสูง ซึ่งสามารถสะสมรวมตัวในระบบเชื้อเพลิง ขั้นตอนสุดท้ายคือ chain termination เมื่อ antioxidant หายไป เป็นปฏิกิริยาซึ่งนำไปสู่ผลิตภัณฑ์ที่ไร้อนุมูลอิสระ

ความสามารถของเชื้อเพลิงในการรักษาเสถียรภาพในถังเก็บขึ้นอยู่กับตัวแปรซึ่งควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาด้วยตัวเอง อาทิ oxidation ผลิตภัณฑ์สุดท้ายของการเกิดปฏิกิริยาด้วย

ตัวเองที่ซับซ้อนปรากฏออกมาโดยทั่วไปมี 2 ชนิด ได้แก่ soluble gum ซึ่งเป็นพวก nonvolatile และ insoluble gum ซึ่งมักถูกเรียกว่าเป็นตะกอน และเป็นผลิตภัณฑ์ที่อันตรายที่สุดของการเสื่อมสภาพของเชื้อเพลิงในถังเก็บ การเกิดผลิตภัณฑ์ที่เสื่อมสภาพในระบบเชื้อเพลิงถูกสังเกตเห็นได้จากการอุดตันที่ไส้กรอง และการสะสมรวมตัวของสารเหนียวๆ (gum) ในระบบจุดระเบิดและหัวฉีด สาเหตุหลักของปัญหาการทำงานเหล่านี้ อาจเป็นเพราะความจริงที่ว่าเชื้อเพลิงดีเซลทำหน้าที่เป็นตัวหล่อเย็นหัวฉีด ซึ่งเป็นไปได้มากที่สุดที่จะเสื่อมสภาพที่อุณหภูมิสูง ในส่วนของถังเชื้อเพลิงเมื่อเชื้อเพลิงถูกทำให้เย็นลงและให้ความร้อนอีกครั้ง การเกิดวัฏจักรการให้ความร้อนและการทำให้เย็นต่อเนื่องกันอาจทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของเชื้อเพลิงดีเซลที่ไม่มีเสถียรภาพทางความร้อน

### 2.2.10 ปริมาณกำมะถัน (Sulphur Content)

วิธีหนึ่งในการลดระดับไอเสียทั้งหมดของ particulate matter (TPM) จากเครื่องยนต์ดีเซล คือ การใช้เชื้อเพลิงดีเซลที่มีกำมะถันต่ำ (<ร้อยละ0.05 โดยน้ำหนัก) ระหว่างกระบวนการเผาไหม้ กำมะถันส่วนใหญ่ในเชื้อเพลิงถูกเปลี่ยนเป็น sulphur dioxide ($SO_2$) ซึ่งส่วนมากถูกปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม ที่ซึ่งอาจเกิดปฏิกิริยาทางเคมีเพิ่มเติม นำไปสู่มลภาวะทางอากาศ $SO_2$ ที่เหลือจะถูกเผาไหม้ในไอเสียดีเซลที่มีออกซิเจนหนา และเกิดเป็น sulphur trioxide ($SO_3$) อุณหภูมิไอเสียดีเซลที่สูงจะรักษา $SO_3$ ไว้ในสภาวะไอ ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับน้ำ โดยปฏิกิริยาคายความร้อนนำไปสู่การก่อตัวของละอองกรดกำมะถันในอากาศ ซึ่งเมื่อรวมตัวกับน้ำโดยพันธะทางเคมีจะถูกปล่อยออกมาเป็น particulate matter

ประโยชน์อื่นของการลดระดับกำมะถันในเชื้อเพลิงดีเซลคือ การลดการกัดกร่อน เป็นที่รู้กันว่าระดับกำมะถันที่สูงในเชื้อเพลิงทำให้เกิดการกัดกร่อนที่แหวนลูกสูบและ liners ของกระบอกสูบ การที่กำมะถันทำให้เกิดการกัดกร่อน ซึ่งขึ้นอยู่กับระดับกำมะถันของเชื้อเพลิงและสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์โดยตรง

สำหรับในประเทศไทยค่ามากที่สุดของกำมะถันในดีเซลถูกกำหนดไว้คือ ร้อยละ0.05 ในการผลิตเชื้อเพลิงที่มีกำมะถันน้อยกว่า 50 ppm และปริมาณ aromatic ร้อยละ5 โดยปริมาตร (ตามที่ระบุสำหรับเชื้อเพลิงดีเซล class 1) จำเป็นที่จะต้องใช้สภาวะ hydro-processing ที่รุนแรงขึ้นหรือเทคโนโลยี hydro-processing ที่แตกต่างออกไป

2.2.11 **ปริมาณอะโรมาติก** (Aromatics Content)

ส่วนประกอบ aromatics ในเชื้อเพลิงดีเซลเป็นปัญหาที่สำคัญเพราะว่าทำให้เกิดการปล่อย particulate emission แต่อย่างไรก็ตาม aromatics มีส่วนช่วยในการหล่อลื่นของเชื้อเพลิง ดังนั้นการกำจัดสารเหล่านี้จะทำให้เกิดอัตราการสึกหรอของปั๊มหัวฉีดสูงอย่างผิดปกติ

2.2.12 **ปริมาณน้ำและตะกอน** (Water and Sediment Content)

เราไม่สามารถที่จะกำจัดน้ำออกจากเชื้อเพลิงดีเซลได้หมด เนื่องจากขั้นตอนแรกที่มีน้ำเข้ามาคือระหว่างกระบวนการผลิต นอกจากนั้นยังมีความเสี่ยงของการมีน้ำปะปนมาระหว่างการขนส่งและการเก็บในถัง การเกิดขึ้นของน้ำในถังเก็บอาจทำให้เกิดการเติบโตของราและแบคทีเรีย การปนเปื้อนจุลินทรีย์ทำให้เกิดปัญหาสำคัญกับเครื่องยนต์โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบเชื้อเพลิง เช่น เกิดการอุดตันที่ไส้กรอง

ตะกอนที่พบในเชื้อเพลิงดีเซลส่วนใหญ่เป็นอนินทรีย์โดยกำเนิด เช่น สนิม, อนุภาคโลหะ และฝุ่นละออง บางส่วนสามารถเป็นสารอินทรีย์จากการเสื่อมสภาพขององค์ประกอบเชื้อเพลิงที่ไม่เสถียร และการกระทำของแบคทีเรียที่รอยต่อของน้ำมัน-น้ำ หรือ ไขจากเชื้อเพลิง

ตะกอนสามารถนำไปสู่การอุดตันไส้กรองในยานพาหนะ และน้ำยังช่วยเพิ่มสภาวะกรดทำให้เกิดปัญหาเนื่องมาจากการกัดกร่อนและความสึกหรอในเครื่องยนต์และระบบฉีดเชื้อเพลิง การทดสอบมาตรฐานสำหรับปริมาณน้ำและตะกอนทำได้โดยวิธีการเหวี่ยง

2.2.13 **จุดวาบไฟ** (Flash Point)

จุดวาบไฟคือการวัดอุณหภูมิที่ต่ำที่สุดซึ่งเชื้อเพลิงจะเกิดการลุกไหม้ได้จากแหล่งกำเนิดประกายไฟภายใต้สภาวะห้องปฏิบัติการที่ได้มาตรฐาน จุดวาบไฟนี้จะมีผลต่อเชื้อเพลิงในการพิจารณาด้านการขนส่ง, รูปแบบการจัดเก็บ และการระวังดูแลรักษา

## 2.3 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงน้ำมันเตา (Fuel Oil) [3]

น้ำมันเตาเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่นปิโตรเลียม เป็นส่วนที่เหลือตกค้างอยู่หลังจากส่วนเบา ๆ เช่น น้ำมันเบนซิน น้ำดีเซล เป็นต้น ได้ระเหยและกลั่นตัวไปแล้ว จึงเรียกน้ำมันเตาว่า Residual Fuel Oil น้ำมันเตา มีส่วนผสมของน้ำมันหนัก ๆ ที่เหลือด้านล่างหอกลั่นจึงต้องมีการอุ่นให้ความร้อนก่อนที่จะนำไปใช้งาน น้ำมันเตาทั่วไปสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ

1. ชนิดเบาหรือใส (Light Fuel Oil) มีความข้นใส (Viscosity) ต่ำ ส่วนมากใช้เผาไหม้ให้ความร้อนกับหม้อน้ำขนาดเล็กทั่วไป เพื่อใช้ในการผลิตไอน้ำแล้วนำไปใช้งานต่าง ๆ
2. ชนิดปานกลาง (Medium Fuel Oil) น้ำมันชนิดนี้มีความความข้นใสปานกลาง ส่วนมากจะใช้เผาให้ความร้อนแก่หม้อน้ำ (Boiler) เตาเผาขนาดกลาง หรือขนาดเล็กที่มีอุปกรณ์อุ่นน้ำมัน
3. ชนิดหนักหรือข้น (Heavy Fuel Oil) น้ำมันชนิดนี้จะมีค่าความหนืดหรือความข้นใสสูง ส่วนมากจะนำไปใช้กับเตาเผาขนาดใหญ่ในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น เตาเผาของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์

คุณสมบัติที่สำคัญของน้ำมันเตา ได้แก่

### 2.3.1 ความถ่วงจำเพาะ(Specific Gravity)

ความถ่วงจำเพาะเป็นค่าที่ระบุความหนักเบาของน้ำมันโดยทั่วไปจะนิยมระบุค่า Gravity อุณหภูมิ 60 องศาฟาเรนไฮต์ ซึ่งค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำมันยังมีความสัมพันธ์กับ

1. ปริมาณของไฮโดรเจนในน้ำมัน คือน้ำมันที่หนักขึ้น จะมีร้อยละไฮโดรเจนในน้ำมันน้อยลง
2. ค่าความร้อนของน้ำมัน คือ ค่าความร้อนของน้ำมันต่อหน่วยน้ำมันจะลดลง เมื่อน้ำมันหนักขึ้น

### 2.3.2 จุดวาบไฟ (Flash point)

จุดวาบไฟ คือ การวัดอุณหภูมิที่ต่ำที่สุดซึ่งเชื้อเพลิงจะเกิดการลุกไหม้ได้ ซึ่งน้ำมันเตาโดยทั่วไปจะมีจุดวาบไฟสูง (ไม่ต่ำกว่า 150 องศาฟาเรนไฮต์)

### 2.3.3 ความหนืด (Viscosity)

ความหนืด เป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของน้ำมันเตาที่จะต้องคำนึงถึงในการเก็บ การส่งและการเผาไหม้ของน้ำมัน ความหนืดเป็นคุณสมบัติที่แสดงถึงอัตราการไหลของน้ำมันในระบบ

น้ำมันเชื้อเพลิง และความยากง่ายต่อการที่น้ำมันจะถูกฉีดออกจากหัวฉีดให้เป็นฝอยละเอียด ซึ่งความความหนืดของน้ำมันเตาจะลดลงเมื่ออุณหภูมิของน้ำมันสูงขึ้น

2.3.4 **จุดไหลเท** (Pour Point)

จุดไหลเทของน้ำมันเตาโดยปกติค่าของจุดไหลเทจะขึ้นอยู่กับแหล่งน้ำมันดิบที่จะมีขี้ผึ้ง (Wax) มากหรือน้อย และยังขึ้นอยู่กับกรรมวิธีการกลั่นที่จะแยกเอาขี้ผึ้งออกหรือไม่ด้วย

2.3.5 **ปริมาณของตะกอนและน้ำ** (Sediment and water content)

ตะกอน (Sediment) ได้แก่ สารหรือของแข็งที่ไม่ละลาย เช่น เกลือ ทราย สิ่งสกปรก และเส้นใยของสารต่างๆ เป็นต้น สิ่งเหล่านี้จะติดมากับน้ำมันดิบ และเหลือจากการตกค้างอยู่กับน้ำมันเตา ส่วนน้ำอาจจะเกิดขึ้นได้ในระหว่างการขนส่งทางเรือหรือความชื้นในอากาศ

2.3.6 **ปริมาณกำมะถัน** (Sulfur Content)

ปริมาณกำมะถันในน้ำมันเตาขึ้นอยู่กับแหล่งน้ำมันดิบ และเกรดของน้ำมันเตา ซึ่งน้ำมันเตาเกรดที่หนักที่สุดอาจมีกำมะถันถึง ร้อยละ 5

2.3.7 **ปริมาณเถ้า** (Ash Content)

เถ้าคือสารอนินทรีย์ (Inorganic matters) ที่เหลือตกค้างอยู่หลังจากการเผาไหม้ของน้ำมัน ซึ่งเป็นสารที่ไม่สามารถเผาไหม้ให้หมดไปได้ (Non-Combustible matters) สารประกอบที่จะทำให้เกิดเถ้าจะมาจากพวกเกลือของโลหะ (Metallic Salt) ที่มีอยู่ในน้ำมันดิบตามธรรมชาติ หรืออาจมาจากน้ำทะเลในระหว่างการขนส่งน้ำมันเตาทางทะเล หรือจากสนิมในถังน้ำมันและจากพวกของแข็งต่างๆ ที่อาจติดมากับน้ำมันเตาในระหว่างกรรมวิธีการผลิตน้ำมัน

## 2.4 **คุณสมบัติของเชื้อเพลิงเคโรซีน** (Kerosene)

เคโรซีน หรือ น้ำมันก๊าด มีคุณสมบัติที่สำคัญดังนี้

2.4.1 **ความถ่วงจำเพาะ** (Specific Gravity. API Gravity)

คือค่าความถ่วงจำเพาะของสารใดๆ ที่มีอัตราส่วนโดยน้ำหนักกับน้ำซึ่งมีปริมาตรเท่ากันและชั่งที่อุณหภูมิที่กำหนดเดียวกัน ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำมันก๊าดไม่ควรสูงเกิน 0.84

2.4.2 **จุดควันหรือให้ควัน** (Smoke Point)

คือความสูงของเปลวไฟในตะเกียงมาตรฐานก่อนเริ่มเกิดควันจุดให้ควันสูงหมายความ ว่า น้ำมันก๊าดให้แสงสว่างได้ดีโดยไม่มีควัน ค่าจุดให้ควันของน้ำมันก๊าดไม่ควรต่ำกว่า 22 มิลลิเมตร

2.4.3 **จุดวาบไฟ** (Flash Point)

คือจุดที่อุณหภูมิต่ำสุด ที่น้ำมันเกิดไอน้ำมันขึ้นจำนวนหนึ่งเมื่อมีเปลวไฟผ่านเข้ามาจะเกิดลุกขึ้นวาบหนึ่งแล้วดับไป ถ้าสูงกว่าจุดนี้จะเกิดการลุกไหม้อย่างต่อเนื่อง เรียกว่าจุดติดไฟ (Fire Point) ค่าจุดวาบไฟของน้ำมันก๊าดไม่ควรต่ำกว่า 38 องศาเซลเซียส

2.4.4 **ปริมาณกำมะถัน** (Sulfur Content)

บ่งบอกปริมาณกำมะถันในน้ำมันก๊าด เมื่อรวมตัวกับน้ำจะมีสภาพเป็นกรดกำมะถัน ซึ่งมีอำนาจในการกัดกร่อนอย่างรุนแรง ค่าปริมาณกำมะถันของน้ำมันก๊าดไม่ควรสูงเกิน ร้อยละ 0.20 ของน้ำหนัก

## 2.5 การเสื่อมสภาพของเครื่องจักร [4]

เมื่อมีการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนใดชิ้นส่วนหนึ่งสัมพัทธ์กับอีกชิ้นส่วนหนึ่งจะเกิดความเสียดทานขึ้นไม่ว่าจะเป็นความเสียดทานจากการลื่นไถลหรือความเสียดทานแบบกลิ้งตัว แม้จะมีการลดความเสียดทานเหล่านี้ด้วยการใช้สารหล่อลื่น ซึ่งจะส่งผลให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำลงและลดความร้อนที่เกิดขึ้นจากความเสียดทาน แต่สุดท้ายตามกฎเกณฑ์ของธรรมชาติ สิ่งของต่างๆ ยังคงเกิดการสึกหรอและเสื่อมสภาพ เพื่อให้เข้าใจถึงลักษณะของการเสื่อมสภาพและหาสาเหตุหลักของการเสื่อมสภาพเพื่อทำการแก้ไข จึงต้องศึกษาทราบถึงประเภทของการเสื่อมสภาพและกลไกของการสึกหรอโดยสังเขปดังนี้

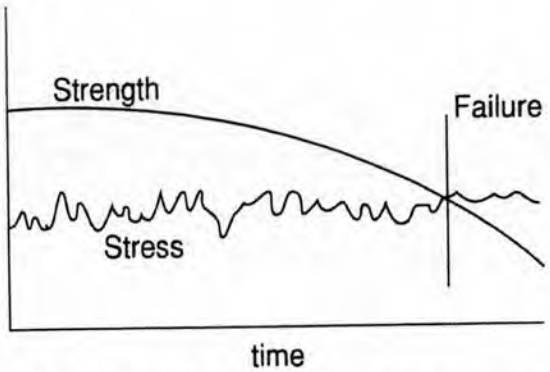
### 2.5.1 ประเภทของการเสื่อมสภาพ

ประเภทของการเสื่อมสภาพอาจแบ่งได้ตามลักษณะของการชำรุด ดังนี้

#### 2.5.1.1 การเสื่อมสภาพตามเวลา (Time dependent degradation)

ลักษณะของกราฟในรูปที่ 2-8 แสดงให้เห็นถึงลักษณะการเสื่อมสภาพ (การสึกหรอของวัสดุ) ของชิ้นส่วนอุปกรณ์ตามระยะเวลาการใช้งาน ซึ่งมีผลทำให้มิติ หรือขนาดของชิ้นส่วนเปลี่ยนไปมีผลทำให้ความแข็งแรง (Strength) ของชิ้นส่วนดังกล่าวมีค่าลดลงไปตามเวลาใช้งาน และสุดท้ายเมื่อค่าความแข็งแรงมีค่าลดลงจนใกล้ หรือต่ำกว่าค่าภาระ

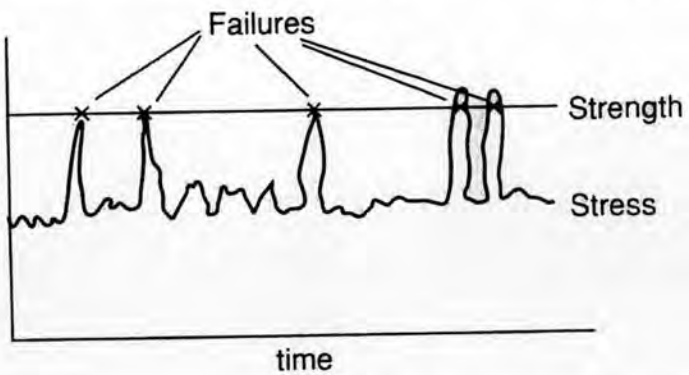
ใช้งาน ก็จะเป็นจุดที่เส้นกราฟ 2 เส้นนี้มาบรรจบกัน ซึ่งเป็นจุดที่ชิ้นส่วนจะชำรุด หรือแตกหักเสียหาย




รูปที่ 2-8 กราฟแสดงการเสื่อมสภาพตามเวลา

2.5.1.2 **การเสื่อมสภาพที่ไม่ขึ้นกับเวลา** (Time independent degradation)

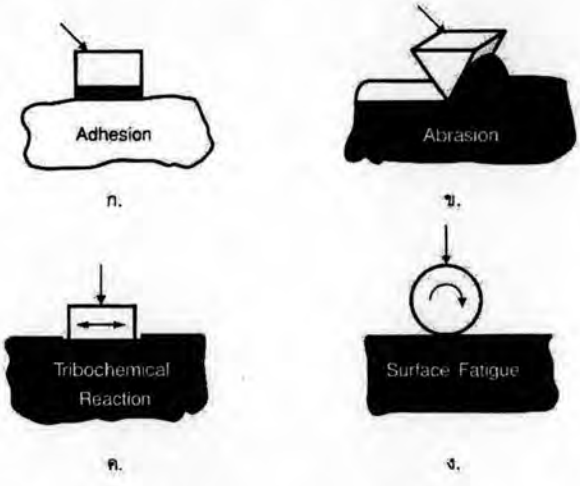
ในการเสื่อมสภาพจนชำรุดในลักษณะนี้เป็นการชำรุดโดยไม่เกี่ยวข้องกับช่วงระยะเวลาใช้งานอาจจะเป็นช่วงเวลาสั้นๆ ก็มีผลทำให้เกิดการชำรุดได้ (การชำรุดแบบ "แบบทันทีทันใด") ซึ่งกรณีนี้ตรงกันข้ามกับกรณีแรก (กรณีแรกเป็นแบบการชำรุด "แบบค่อยเป็นค่อยไป") หากดูจากกราฟในรูปที่ 2-9 จะเห็นว่าค่าอัตราส่วนระหว่างค่าความแข็งแรงวัสดุต่อภาระใช้งานซึ่งเรียกว่า "ปัจจัยความปลอดภัย" (Safety Factor : SF) โดยทั่วไปวิศวกรออกแบบมักกำหนดให้มีค่ามากกว่า 1 หากแต่ว่าเมื่อใดที่มีการใช้เครื่องจักรผิดวิธี หรือการเกิดภาระกระแทกหรือช็อค (Shock or Impact load) ที่อาจเกิดจากอุบัติเหตุหรือใช้เครื่องจักรผิดวิธี ก็จะทำให้ภาระที่กระทำต่อชิ้นส่วนดังกล่าวพุ่งขึ้นสูงมากจนไปบรรจบกับค่าความแข็งแรงของวัสดุ จนทำให้วัสดุทนภาระดังกล่าวไม่ได้ และเกิดการชำรุดหรือแตกหัก ในที่สุด




รูปที่ 2-9 กราฟแสดงการเสื่อมสภาพที่ไม่ขึ้นกับเวลา

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย


จากทั้งสองหัวข้อ คือ การชำรุดหรือการเสื่อมสภาพตามเวลา (Time dependent) มักจะเกี่ยวข้องกับการสึกหรอ (Wear) ส่วนการชำรุดแบบไม่ขึ้นกับเวลา (Time independent) จะเกี่ยวข้องกับการแตกหัก ในการป้องกันการสึกหรอจำเป็นที่วิศวกรบำรุงรักษาต้องเข้าใจเสียก่อนว่า การสึกหรอของชิ้นส่วนเครื่องจักรมีรูปแบบหรือกลไกการสึกหรอ (Wear mechanisms) อย่างใดบ้าง แล้วจึงสามารถหาแนวทางดำเนินการในการป้องกันการเสื่อมสภาพได้ ตามมาตรฐานด้านอุตสาหกรรมของประเทศเยอรมันหมายเลข 50320 (DIN 50320) ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันว่าแบ่งกลไกการสึกหรอไว้อย่างเหมาะสม 4 รูปแบบดังรูปที่ 2-10




ก. กลไกการสึกหรอแบบยึดติด ข. กลไกการสึกหรอแบบขูดขีด
ค. กลไกการสึกหรอแบบไทรโบเคมีคอล ง. กลไกการสึกหรอแบบล้าตัว

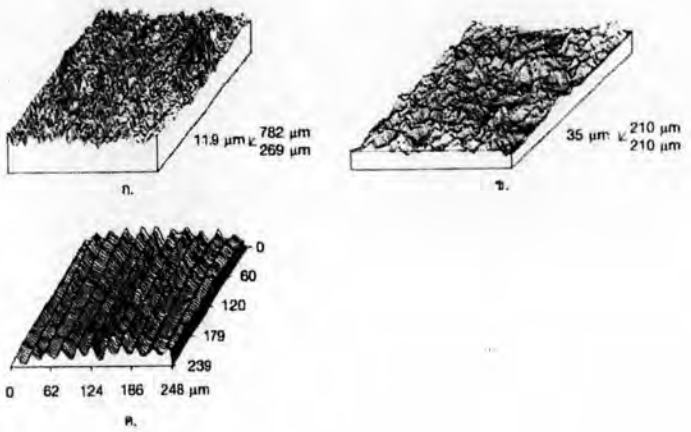
รูปที่ 2-10 แสดงกลไกการสึกหรอแบบต่าง ๆ

### 2.5.2 การจำแนกกลไกการสึกหรอ

ก่อนที่จะกล่าวถึงกลไกการสึกหรอ (Wear mechanisms) จะอธิบายโดยสังเขปว่าเพราะเหตุใดจึงเกิดการสึกหรอขึ้น ทั้ง ๆ ที่มีบางคนแย้งว่าเครื่องจักรหรือชิ้นส่วนเครื่องจักรไม่ควรเกิดการสึกหรอเพราะไม่ได้ใช้งานให้ภาระหรือความเค้น (Stress) ที่มากเกินไปกว่าค่าความแข็งแรงของวัสดุ (Strength) ซึ่งก็คือ วิศวกรออกแบบไว้ให้มีค่าปัจจัยความปลอดภัย (ความแข็งแรง/ความเค้น>1) แต่สุดท้ายชิ้นส่วนก็ยังสึกหรอและแตกหักตามระยะเวลา เหตุผลที่สามารถอธิบายได้คือ การที่วิศวกรออกแบบคำนวณค่าความเค้น (Stress) ไว้คือ

$$\text{ความเค้น} = \frac{\text{แรงที่กระทำ}}{\text{พื้นที่รับแรงกระทำ}}$$

โดยที่พื้นที่รับแรงกระทำที่ใช้จะเป็นการใช้ค่าพื้นที่รับแรงกระทำที่เรามองเห็นหรือวัดได้ (Apparent area of contact) แต่ที่จริงแล้วพื้นที่รับแรงดังกล่าวอยู่บนสมมุติฐานว่า พื้นผิวชิ้นงานมีความเรียบ และรับภาระเต็มหน้าสัมผัส หากทว่าในระดับจุลภาคแล้วมนุษย์ยังไม่สามารถทำให้เกิดความเรียบของผิวดังกล่าวได้ ดังแสดงในรูปที่ 2-11



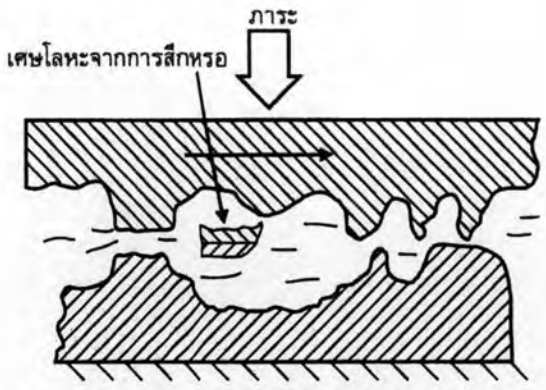

รูปที่ 2-11 แสดงพื้นผิวที่แท้จริงในระดับจุลภาค

จะเห็นได้ว่าเมื่อหาค่าความเค้นในระดับจุลภาคแล้ว จะทำให้ค่าความเค้นจริงที่เกิดขึ้นมีค่าสูงมากเกินค่าความแข็งแรงของวัสดุ (Yield strength) โดยที่ยอดแหลม ๆ ที่เห็นจากภาพขยายของผิวงานถูกเรียกกันว่า "Asperities" เมื่อมีการสัมผัสกันของชิ้นงานจุดที่จะรับภาระจริง ในระดับจุลภาค คือ Asperities ซึ่งมีพื้นที่เล็กๆ และเมื่อค่าภาระสูงเกิดค่าความแข็งแรง Asperities เหล่านี้จะเสียรูป/ยุบตัวโดยถาวรในขณะที่ชิ้นส่วนเหล่านี้หยุดนิ่ง เมื่อเริ่มมีการเคลื่อนที่ Asperities ที่เสียรูปโดยถาวรดังกล่าวจะถูกเฉือนตัวออกไป และกลายไปเป็นเศษโลหะจากการสึกหรอที่ปะปนอยู่ในน้ำมันหล่อลื่นนั่นเอง ดังนั้นไม่ว่าจะใช้ภาระต่ำหรือสูง ก็จะทำให้เกิดการสึกหรอเสมอ โดยทั่วไปเราสามารถจำแนกกลไกการสึกหรอได้เป็น 4 กลไก คือ

### 2.5.2.1 **กลไกการสึกหรอแบบยึดติด** (Adhesive wear)

เป็นกลไกที่เกิดขึ้นจากการที่มีการเกิดพันธะยึดติดกันของ Asperities และมีการฉีกขาดตัวออกไปของพันธะที่เกิดขึ้นที่ในขณะที่ชิ้นงานมีการเคลื่อนที่ พันธะที่เกิดการ "เยิ้มติด" หรือ "เชื่อมติดกัน" ของ Asperities นี้เรียกกันว่า "การเชื่อมเย็น" (Cold-welded) ลักษณะการเกิดการสึกหรอแบบยึดติดแสดงในรูปที่ 2-12

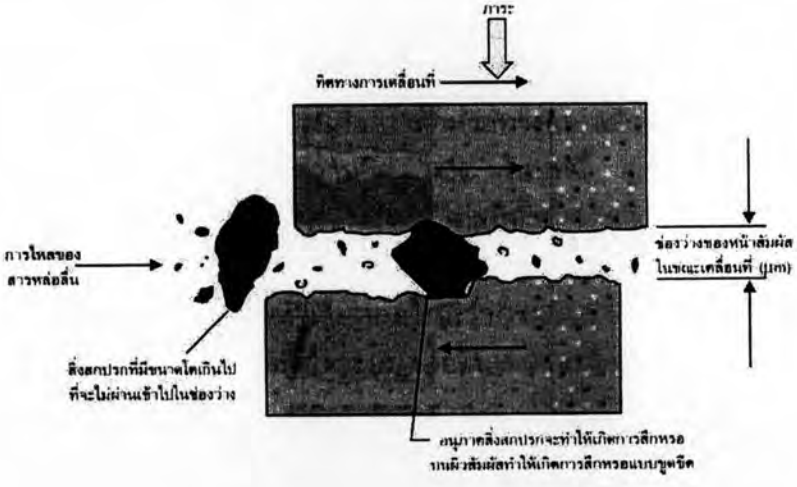
โดยที่สาเหตุที่เร่งให้เกิดการสึกหรอแบบยึดติด คือ สารหล่อลื่นมีความหนืดน้อยเกินไป ภาระมีค่าสูงมากเกินไปจนสารหล่อลื่นรับไม่ได้หรือใช้ความเร็วต่ำเกินไป




รูปที่ 2-12 แสดงลักษณะการสึกหรอแบบยึดติด

2.5.2.2 **การสึกหรอแบบขูดขีด** (Abrasive wear)

เป็นการสึกหรอที่เกิดขึ้นจากการที่เนื้อวัสดุ ถูกเฉือนออกไปจากการถูกขูดขีดโดยสสารที่มีความแข็งสูงมาก เช่น ฝุ่นละออง เม็ดทราย หรือกากเพชร เป็นต้น ลักษณะของการสึกหรอประเภทนี้ดังรูปที่ 2-13 การเร่งให้เกิดการสึกหรอประเภทนี้ คือ การใช้สารหล่อลื่นที่สกปรก การขุบแข็งคู่ผิดสัมผัสที่มีความแข็ง (Hardness) แตกต่างกันมากเกินไป

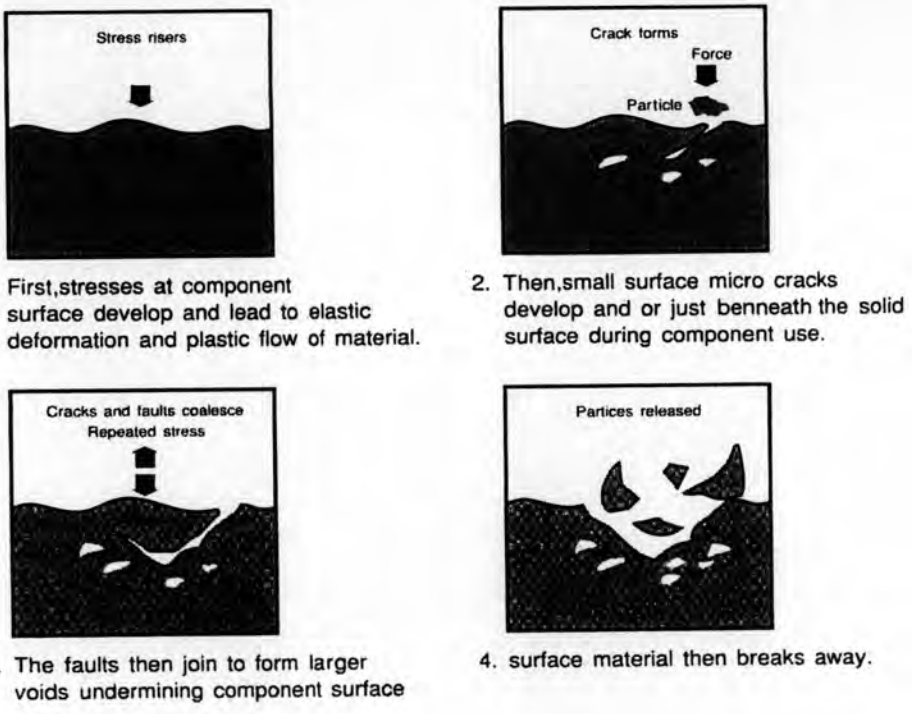



รูปที่ 2-13 แสดงลักษณะการสึกหรอแบบขูดขีด

2.5.2.3 **การสึกหรอจากการล้าตัวของวัสดุ** (Fatigue wear)

เป็นการล้าตัวและเกิดรอยแตกหรือหลุมบนผิวหน้าวัสดุบริเวณที่มีการล้าตัว ทั้งนี้เนื่องมาจากว่าชิ้นงานมีการรับภาระเป็นวงรอบ (Stress cycles) การล้าตัวของวัสดุจะมีโอกาสเกิดขึ้นน้อยมาก หากชิ้นงานรับภาระเพียงการกด (Compressive stress) หรือการดึง (Tensile stress) เพียงอย่างใดอย่างหนึ่ง แต่จะมีโอกาสเกิดการล้าตัวได้เร็วมากๆ หากมีการรับภาระ

สลับกันไปมาระหว่างการกดกับการดึง หรือการรับภาระแบบเป็นวงรอบ ซึ่งท้ายที่สุดจะส่งผลให้ผิววัสดุหลุดร่อนออกไปและทำให้มีรอยสึกหลงเหลือไว้บนผิวชิ้นงาน ลักษณะการเกิดการล้าตัวอีกแบบหนึ่งเกิดจากการมีสิ่งสกปรกในสารหล่อลื่นและทำให้เกิดรอยกด (Dents) ขึ้นบนผิวชิ้นงานก่อนและเมื่อใช้งานไปนาน ๆ รอยกดจะค่อยๆ แพร่กระจายออกไปเป็นรอยแตก (Crack) เนื่องจากน้ำมันหล่อลื่นเข้าไปอยู่ในรอยกดนั้น ๆ ครั้งแล้วครั้งเล่า และเกิดเป็นหลุมในที่สุดดังแสดงในรูปที่ 2-14




1. First,stresses at component surface develop and lead to elastic deformation and plastic flow of material.
2. Then,small surface micro cracks develop and or just benneath the solid surface during component use.
3. The faults then join to form larger voids undermining component surface
4. surface material then breaks away.

รูป 2-14 แสดงลักษณะการสึกหรอแบบล้าตัว

### 2.5.2.4 **การสึกหรอแบบปฏิกิริยาไทรโบเคมี** (Tribochemical reaction)

บางครั้งถูกเรียก ว่าการสึกหรอแบบไป ๆ กลับ ๆ หรือเฟล็ตติ้ง (Fretting wear) จากชื่อ Tribochemical reaction มีความหมายเบื้องต้น คือ การที่ชิ้นงานต้องมีการขัดสี (Tribo) และเกิดผลพวงจากปฏิกิริยาเคมี (Reaction) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง "ปฏิกิริยาออกซิเดชั่น" สามารถอธิบายโดยง่าย ๆ จากการเกิดไทรโบเคมิคอลรีแอคชันที่ข้อต่อโซ่ จะมีผลทำให้บริเวณข้อต่อโซ่ดังกล่าวมีการสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive) เมื่อมีการใช้งาน จะทำให้บริเวณข้อต่อโซ่มีการขัดสีกัน (Tribo) ก่อให้เกิดเศษเหล็กตรงจุดนั้น ผนวกเข้ากับเกิดความร้อนจากการขัดสี ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี (Catalyst) โดยที่ผงเหล็กที่เกิดขึ้นก็เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีเช่นกัน เพราะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิว (Surface area) ให้ออกซิเจนในอากาศ สามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น เมื่อมีองค์ประกอบหลักคือ เศษเหล็กหลักคือ เศษเหล็ก ความร้อน ความชื้น

(หรือไอน้ำในอากาศ) กับออกซิเจนก็จะทำให้ปฏิกิริยาเคมีที่เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชั่น ซึ่งจะทำให้เกิดเป็นสนิมเหล็ก (Rusty wear powder) และสนิมเหล็กจะมีคุณสมบัติคล้าย ๆ กับฝุ่นละออง คือ มีความแข็งแต่เปราะและจะทำให้เกิดการขูดขีด (abrasive) ตรงบริเวณข้อต่อโซ่ตามมาจนทำให้ข้อต่อโซ่ลดขนาดลงและทนภาระไม่ได้ในที่สุดก็จะขาดชำรุดไป นอกจากข้อต่อโซ่แล้วอาจจะเกิดกลไกการสึกหรอชนิดนี้ได้กับเพลา เฟืองแบบเลื่อนได้(Spline) แหนบรถยนต์ และผิวนอกของแบริ่งที่สัมผัสกับตัวเรือน เป็นต้น

## 2.6 วิธีการทดสอบความทนทาน [6]

การทดสอบความทนทาน จะทำให้เราทราบถึงผลกระทบที่จะเกิดขึ้นกับเครื่องยนต์เมื่อนำเครื่องยนต์ไปใช้งานจริง โดยการทดสอบจะให้เครื่องยนต์ทำงานจริงภายใต้สภาวะจำลองในระยะเวลาที่กำหนด

การจำลองการทำงานเพื่อการทดสอบจะกำหนดเป็นวัฏจักร ซึ่งตามมาตรฐาน EMA วัฏจักรที่ใช้ทดสอบ 1 วัฏจักรจะใช้เวลารวม 3 ชั่วโมง โดยในหนึ่งวันจะทำการทดสอบ 4 วัฏจักร รวมเป็นเวลาในการทดสอบ 12 ชั่วโมงต่อวัน ซึ่งแต่ละวัฏจักรที่ใช้ทดสอบสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 สภาวะการทำงาน ดังนี้

1. Rate Condition (60 minutes) จะเปิดคันเร่งสุด เพิ่มภาระ จนกระทั่งความเร็วรอบลดลงจนถึงความเร็วรอบที่กำหนดไว้
2. Maximun Torque (60 minutes) เปิดคันเร่งสุด เพิ่มภาระ จนกระทั่งความเร็วรอบลดลงถึงจุดที่เป็นภาระสูงสุด ณ ความเร็วรอบที่กำหนด
3. High Idle (30 minutes) ภาระจะตั้งไว้ที่ ร้อยละ25 ของ Maximun torque และปรับคันเร่งจนกระทั่งความเร็วรอบอยู่ที่ ร้อยละ90 ของความเร็วรอบที่กำหนด
4. Low Idle (30 minutes) ไม่มีภาระ ปรับคันเร่งไปที่ความเร็วรอบที่กำหนด

หลังการทดสอบชั่วโมงการทำงานที่ 50 จะทำการตรวจสอบเครื่องยนต์ เช่น กำลังอัดของลูกสูบ, และ หัวฉีด เป็นต้น และหลังการทดสอบชั่วโมงการทำงานที่ 100 จะทำการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันเครื่อง, Filter และตัวอย่างน้ำมัน พร้อมทำการเก็บตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นเพื่อนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติและตรวจหาโลหะตกค้างในน้ำมันหล่อลื่นต่อไป

## 2.7 สารหล่อลื่น [4]

องค์ประกอบซึ่งเป็นหน้าที่หลักประการสำคัญของสารหล่อลื่นคือ ลดแรงเสียดทาน (Reduces Friction) ซึ่งมีผลต่อเนื่องคือ เป็นการลดการสึกหรอ (Reduces Wear) ประหยัดพลังงาน (Saves Power) ลดความร้อน (Reduces Heat) และเป็นการช่วยให้เกิดฟิล์มน้ำมันที่รองรับภาระที่ใช้งาน (Load-Carrying Lubricant Film)

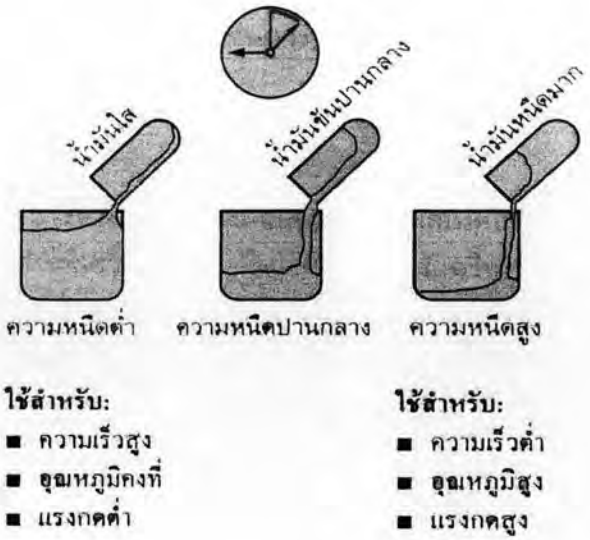
หน้าที่ที่สำคัญของสารหล่อลื่นยังรวมไปถึง ก.) ทำหน้าที่เสมือนสารหล่อเย็นที่นำพาความร้อนออกไป (Carries Away Heat) จากชิ้นส่วนที่มีการเคลื่อนที่ ข.) ทำหน้าที่เสมือนซีล (Sealing) ป้องกันสิ่งสกปรกเข้าไปสู่ชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ เช่น ในกรณีของจารบี ค.) ป้องกันการกัดกร่อนและสนิม (Preventing Corrosion and Rust) ของผิวชิ้นงานที่เป็นเหล็ก ง.) ในบางกรณีก็จะทำหน้าที่ในการส่งถ่ายกำลังเช่นน้ำมันไฮดรอลิกและเนื่องจากว่าสารหล่อลื่นที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งจำเป็น และสำคัญ สิ่งที่สำคัญสูงสุดนั้นคือว่าสารหล่อลื่นต้องถูกออกแบบให้ใช้งานในช่วงการทำงานของเครื่องจักรโดยที่มีการเสื่อมหรือสึกหรอ และการสูญเสียคุณสมบัติของสารหล่อลื่นให้น้อยที่สุด

### 2.7.1 คุณสมบัติที่สำคัญ ๆ ของสารหล่อลื่น

คุณสมบัติที่สำคัญของสารหล่อลื่นประกอบด้วย ค่าความหนืด จุดไหลเท การต่อต้านการเกิดออกซิเดชั่น แต่คุณสมบัติที่จะนำมากล่าวถึงในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย คุณสมบัติทางความหนืด และ คุณสมบัติในการต่อต้านการเกิดออกซิเดชั่น

#### 2.7.1.1 ความหนืด (Viscosity)

ความหนืดถูกให้ความหมายว่า "เป็นการต้านทานต่อการไหล" ซึ่งเป็นคุณสมบัติหลักที่สำคัญของน้ำมันหล่อลื่น ยิ่งน้ำมันหล่อลื่นมีความสามารถในการต้านทานการไหลมากเท่าใดก็จะมีความหนืดมากเท่านั้น สามารถกล่าวได้ว่าค่าความหนืดเป็นตัวบ่งบอกถึงความสามารถในการไหล (Flowability) ซึ่งโดยเฉพาะน้ำมันหล่อลื่นปิโตรเลียมนั้น ค่าความหนืดจะแปรเปลี่ยนไปตามค่าอุณหภูมิ ยิ่งค่าอุณหภูมิสูงค่าความหนืดจะยิ่งน้อยลง และค่าความสามารถในการไหลจะยิ่งดีขึ้น วิธีการที่ใช้ในการวัดค่าความหนืดในห้องทดลองนั้นก็จะใช้วิธีการตามมาตรฐานขององค์การระหว่างประเทศที่เกิดขึ้นโดยความร่วมมือของ ASTM (American Society for Testing and Materials) และ STLE (Society of Tribologists and Lubrication Engineers) จนปัจจุบันใช้กันโดยทั่วไปในหน่วยของ SI ซึ่งตั้งอยู่บนพื้นฐานของการวัดค่าความหนืดในหน่วยเซนติสโตค (cSt.) ที่อุณหภูมิ 40°C




รูปที่ 2-15 ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นกับการใช้งาน

น้ำมันหล่อลื่นที่หนืดมาก ๆ จะถูกใช้กับชิ้นส่วนเครื่องจักรที่เคลื่อนที่ช้า ๆ ภายใต้ภาระสูงๆ ทั้งนี้เนื่องจากน้ำมันหล่อลื่นจะทนทานต่อการถูกบีบดันออกไปจากผิวสัมผัส ส่วนน้ำมันที่มีความหนืดน้อยๆ จะถูกนำมาใช้กับชิ้นงานที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง ๆ ที่ค่าภาระต่ำ (รูปที่ 2-15 )

2.7.1.2 **การต่อต้านการเกิดออกซิเดชั่น** (Oxidation resistance)

น้ำมันหล่อลื่นเป็นส่วนผสมที่ซับซ้อนระหว่างอะตอมของไฮโดรเจนกับคาร์บอน (ไฮโดรคาร์บอน) เรียกว่าส่วนผสมของไฮโดรคาร์บอน ส่วนใหญ่แล้วแบ่งเป็น 3 ส่วนใหญ่ ๆ คือ แบบพาราฟินิก แนพทานิก และอะโรมาติก ซึ่งแต่ละแบบจะมีคุณสมบัติแตกต่างกัน นักเคมีมักเรียกน้ำมันปิโตรเลียมฐานแร่นี้ซึ่งส่วนใหญ่เป็น 2 ส่วนหลัก คือ พาราฟินิก และแนพทานิก ว่า "สารหล่อลื่นอิ่มตัว" (Saturated) และสำหรับ อะโรแมติกว่าเป็น "สารหล่อลื่นไม่อิ่มตัว" (Unsaturated)

สารไฮโดรคาร์บอนที่อยู่ในชั้นหรือระดับเดียวกันจะมีโครงสร้างทางเคมีเหมือนกัน แต่จะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันไปเป็นอย่างมาก ในแต่ละกลุ่มอาจจะมีสภาวะเป็นของแข็ง ของเหลวและก๊าซได้ สภาวะที่เป็นของเหลว ซึ่งเป็นส่วนที่นำมาใช้ประโยชน์มากที่สุดและมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติไปมากในสภาวะต่างๆ อาจจะมีผลต่อสมรรถนะในการหล่อลื่น โดยที่ไม่ต้องพิจารณาถึงองค์ประกอบน้ำมันหล่อลื่นที่จะถูกใช้งานในอนาคต ความร้อน และออกซิเจนทำให้เกิดปฏิกิริยาที่เกิดองค์ประกอบที่ไม่ดีต่อน้ำมันหล่อลื่น กระบวนการดังกล่าวนี้ถูกเรียกว่าปฏิกิริยาออกซิเดชั่น และสารประกอบที่เกิดขึ้นก็เป็นผลผลิตของปฏิกิริยาออกซิเดชั่น ออกซิเดชั่นจะเกิดขึ้นช้าๆ อย่างต่อเนื่องตลอดเวลาใช้งานของน้ำมันหล่อลื่น อย่างไรก็ตาม การเกิดการปั่นกวนจนเกิดฟอง การฉีดพ่น และการที่เกิดมีค่าอุณหภูมิสูงๆ โดยเฉพาะจุดที่มีความร้อนสูงเพียง

จุดเล็ก ๆ จะมีผลทำให้ปฏิกิริยาออกซิเดชั่นยิ่งเกิดเร็วขึ้น ทำให้เกิดสารประกอบที่เป็นกรดและทำให้เกิดตะกอนและคราบเหนียว

โดยความเป็นจริงแล้วทุก ๆ 10°C (18°F) ที่เพิ่มขึ้นของอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นที่เกินกว่า 70°C อัตราการเกิดออกซิเดชั่นจะเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า การที่จะลดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นลงนั้น ต้องพยายามควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ระหว่าง 60 ถึง 70°C (140 ถึง 150°F) ดังนั้นจึงเป็นข้อแนะนำให้ใช้น้ำมันหล่อลื่นที่มีความสามารถในการต่อต้านออกซิเดชั่นกับเครื่องยนต์เทอร์ไบน์และระบบการไหลเวียนน้ำมันหล่อลื่นขนาดใหญ่ๆ ทั้งนี้เพราะว่าน้ำมันหล่อลื่นจะสามารถทนได้กับระดับอุณหภูมิสูงๆ ภายในช่วงเวลายาวนานกว่าการใช้น้ำมันแบบธรรมดา น้ำมันหล่อลื่นดังกล่าวมักมีราคาแพง ทั้งนี้เนื่องจากว่าต้องถูกกลั่นด้วยกรรมวิธีพิเศษและมีการเติมด้วยสารปรุงแต่งที่รู้จักกันในชื่อ Oxidation Inhibitor เพื่อเพิ่มความสามารถในการต่อต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่น น้ำมันหล่อลื่นที่มีความสามารถในการต่อต้านออกซิเดชั่นต่ำนั้น ควรถูกเลือกใช้กับการหล่อลื่นในช่วงสั้นๆ เช่น กรณีการหล่อลื่นแบบใช้แล้วทิ้งไป หรือเมื่อมีการเติมน้ำมันหล่อลื่นลงไปบ่อยๆ ปกติแล้ว Additive Packages นี้มักรวมอยู่ในน้ำมันที่มี R & O Inhibitor อยู่แล้ว

## 2.8 การวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว

สารหล่อลื่นที่ใช้ในเครื่องยนต์หรือในที่นี้จะเรียกว่า น้ำมันหล่อลื่น จากการวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วและน้ำมันหล่อลื่นที่อยู่ระหว่างการใช้งาน จะทำให้ทราบว่าน้ำมันหล่อลื่นยังอยู่ในเกณฑ์ที่ใช้งานได้หรือไม่ และจะทำให้ทราบถึงช่วงเวลาในการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ ผลการวิเคราะห์จะบ่งถึงสภาวะที่อาจจะทำให้เกิดอันตรายแก่เครื่องยนต์รวมทั้งระยะเวลาที่เหมาะสมในการเปลี่ยนถ่าย นอกจากนี้ยังทำให้ทราบถึงสาเหตุของปัญหาของความเสียหายที่เกิดขึ้นและทำให้แก้ปัญหาและป้องกันได้อย่างถูกต้อง

### 2.8.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วจากเครื่องยนต์ [5]

แบ่งตามขั้นตอนได้ดังนี้

#### (1) ขั้นตอนการสุ่มตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นจากเครื่องยนต์

การสุ่มตัวอย่างจะต้องกระทำขณะเครื่องยนต์ทำงาน และมีอุณหภูมิถึงระดับอุณหภูมิการใช้งานของเครื่องยนต์ เพื่อให้น้ำมันหล่อลื่นมีการชโลมเข้ากับส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องยนต์และไหลเวียนไปทั่วระบบหล่อลื่น ส่วนขวดพลาสติกที่ใช้ในการสุ่มตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นควรจะใช้ขวดชนิดที่ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำมันหล่อลื่น แห้งและสะอาด ฝาปิดขวดจะต้องทำด้วยวัสดุที่ไม่หลุดร่อน (Non shedding material) การเก็บน้ำมันหล่อลื่นลงในขวด

พลาสติกจะต้องไม่เก็บจนเต็มขวด เนื่องจากจะต้องมีช่องว่างให้น้ำมันหล่อลื่นไหลผสมตัวของน้ำมันหล่อลื่นเองได้

(2) **วิธีการตรวจสอบคุณสมบัติเบื้องต้น** เช่น สี กลิ่น ความหนืดและปริมาณน้ำที่ปนในน้ำมันหล่อลื่น ด้วยวิธีการทดสอบเบื้องต้นในภาคสนาม

(3) **ขั้นตอนในการวิเคราะห์ตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ** เพื่อหาค่า

ก. หาค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น

ข. หาตัวเลขรวมของความเป็นด่าง (TBN)

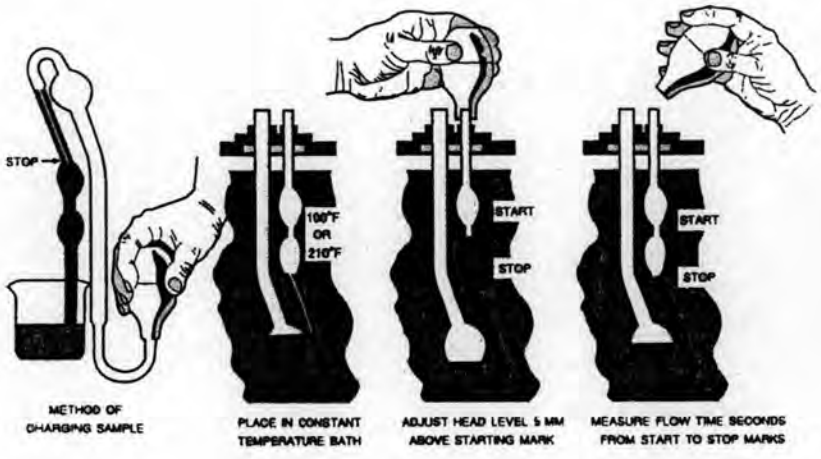
ค. หาค่าปริมาณธาตุกลุ่มที่มาจากการสึกหรอและจากสารปรุงแต่งที่อยู่ในน้ำมันหล่อลื่น โดยวิธีสเปกโตรมิเตอร์

ง. หาค่าปริมาณการเกิดออกซิเดชั่น และสารปนเปื้อน โดยวิธี FTIR

จ. หาลักษณะรูปร่างและขนาดของเศษเหล็กโดยเทคนิคเฟอร์โรกราฟฟี่

### 2.8.2 การทดสอบหาค่าความหนืด

ค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น คือการวัดความต้านทานในการไหลของน้ำมันหล่อลื่นนั้นๆสำหรับน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์จะมีข้อกำหนดจำเพาะมาตรฐานระหว่างประเทศอยู่หลายมาตรฐาน ซึ่งอาจจะต้องทำการวัดค่าความหนืดคิเนเมติคเพิ่มเติมอีกหลายช่วงอุณหภูมิ เช่นที่ 20 °C, -10 °C และ 100 °C (เช่น กรณีของการกำหนดเกรดน้ำมันของ SAE : Society of Automotive Engineers) แต่อย่างไรก็ตามการทดสอบความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วสำหรับเครื่องยนต์และเครื่องจักรกลทั่วไปนั้นก็จะทำเฉพาะที่ 40° C และ 100°C เท่านั้น ค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นที่เปลี่ยนไปนั้นมีผลมาจากหลายองค์ประกอบ ซึ่งอาจจะทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ได้ ตัวอย่างเครื่องมือวัดความหนืดน้ำมันหล่อลื่นแสดงดังรูปที่ 2-16




รูปที่ 2-16 แสดงเครื่องมือวัดความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น (ASTM D-445)

**กรณีที่ความหนืดเพิ่มขึ้น**

สำหรับในน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์นั้นเมื่อมีคราบสิ่งสกปรกหรือสารประกอบที่เกิดจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่น จะทำให้น้ำมันหล่อลื่นมีค่าความหนืดเพิ่มสูงขึ้น หากมีการปะปนเข้ามาด้วยสิ่งสกปรกแขวนลอยที่เป็นของแข็งในน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ก็จะทำให้ค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มสูงขึ้น เช่น ของแข็งแขวนลอยที่มีปริมาณเกินกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ดีเซลจะทำให้น้ำมันมีความหนืดสูงมากและทำให้เกิดปัญหาในการสตาร์ท การอุดตันในไส้กรองและส่งผลต่อการขาดสารหล่อลื่นจนทำให้เครื่องยนต์ชำรุดได้

**กรณีที่ความหนืดลดลง**

ในกรณีของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์หากมีการเจือจางด้วยน้ำมันเชื้อเพลิง จะทำให้มีการลดค่าความหนืดของน้ำมันลงเป็นอย่างมาก หรือการเกิดการตัดเฉือนตัวของสายใยโพลีเมอร์ในน้ำมันหล่อลื่นชนิดเกรดรวมในกรณีการใช้งานของเครื่องยนต์หนัก ก็จะมีผลในการที่ทำให้ความหนืดของน้ำมันลดลงได้เช่นเดียวกัน

### 2.8.3 ค่าตัวเลขรวมความเป็นด่าง (TBN)

ค่าตัวเลขรวมความความเป็นด่าง (TBN = Total Base Number) (ASTM D664 D2896, IP177, IP276) ค่า TBN เป็นการวัดค่าความเป็นด่างที่ยังคงมีอยู่ในน้ำมันหล่อลื่น เช่น น้ำมันหล่อลื่นในอ่างน้ำมันเครื่อง ควรต้องถูกตรวจสอบและติดตามโดยต่อเนื่องสำหรับค่า TBN โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเรือเดินทะเลและเครื่องยนต์ เมื่อมีความสงสัยว่าคุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิงหรือก๊าซธรรมชาติมีคุณภาพไม่ดี หากใช้น้ำมันเชื้อเพลิงประเภทที่มีค่าปริมาณกำมะถัน

สูงจะทำให้ค่าความเป็นด่างของน้ำมันถูกทำลายลงไปและจะเป็นอันตรายต่อเครื่องยนต์เมื่อน้ำมันเครื่องยนต์ไม่มีความสามารถในการต่อต้านกรดที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสันดาปภายใน ในกรณีของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ค่ารวมความเป็นด่าง ระหว่างการใช้งานนั้น ค่าของตัวเลขรวมความเป็นด่างจะมีการลดระดับลงแสดงให้เห็นว่าน้ำมันมีความเป็นกรดสูงขึ้นซึ่งจะทำให้สามารถคาดคะเนได้ว่าควรจะทำการเปลี่ยนน้ำมันเครื่องยนต์เมื่อใด

### 2.8.4 การวิเคราะห์ด้วยสเปคโตรมิเตอร์

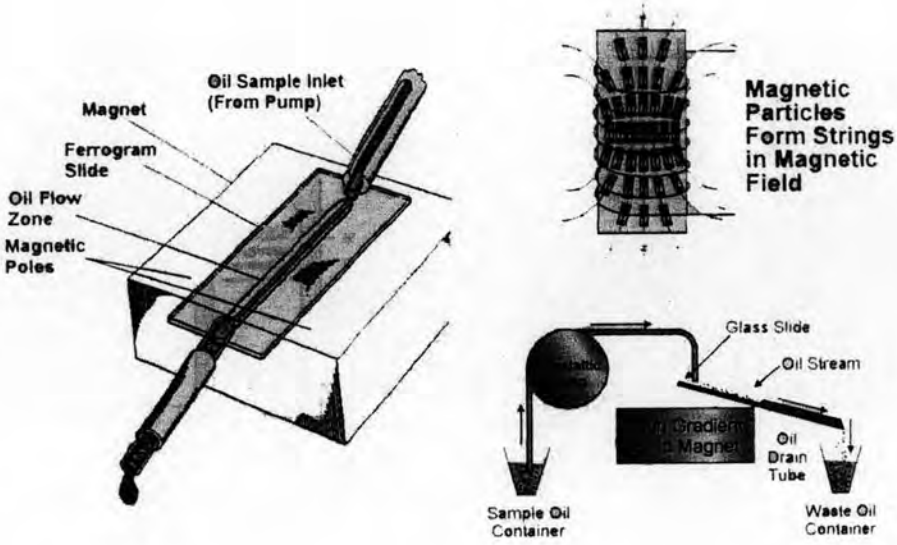
ในการวิเคราะห์ด้วยสเปคโตรมิเตอร์จะสามารถหาธาตุในน้ำมันหล่อลื่นได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งจะทำให้ได้ค่าความแม่นยำอยู่ที่ระดับ ร้อยละ± 10 ของค่าที่ระบุเอาไว้ในการทดสอบ ซึ่งจะเป็นค่าที่ยอมรับได้สำหรับในการทดสอบโดยทั่วไป

สเปคโตรมิเตอร์จะถูกนำเอาไปใช้ในการตรวจวิเคราะห์หาค่าโลหะจากสารปรุงแต่ง (Additives) ได้แก่ แบเรี่ยม ,แคลเซียม ,สังกะสี ,ฟอสฟอรัสและโบรอน และโลหะหรือธาตุที่มาจากการสึกหรอ (Wear Metals) จะสามารถวิเคราะห์หาค่าธาตุ ซึ่งธาตุเหล่านั้นได้แก่ เหล็ก ,อลูมิเนียม และทองแดง ซึ่งการสรุปความหมายจากปริมาณที่วิเคราะห์ได้มีดังนี้

หากพบปริมาณเหล็กในระดับสูงๆ ย่อมเป็นสิ่งที่แสดงว่ามีระดับการสึกหรอของแหวนลูกสูบและปลอกแหวนซึ่งหากระดับของค่าเหล็กมีค่าสูงเกินกว่า 600 ppm ซึ่งจะทำให้เกิดอันตรายต่อชิ้นส่วนในระดับการทำงานปกติ หากพบปริมาณอลูมิเนียมในระดับสูงๆ ย่อมเป็นสิ่งที่แสดงว่ามีระดับการสึกหรอของลูกสูบและหากมีค่าของอลูมิเนียมเกินกว่า 75 ppm จะทำให้เกิดอันตรายต่อชิ้นส่วนในระดับการทำงานปกติ หากพบปริมาณทองแดงในระดับสูงๆ ย่อมเป็นสิ่งที่แสดงว่ามีระดับการสึกหรอของแบริ่งที่มีส่วนผสมของทองแดงและตะกั่ว และหากมีค่าของทองแดงและตะกั่วที่สูงกว่า 75 ppm ถือได้ว่าการสึกหรออยู่ในระดับค่อนข้างที่จะเป็นอันตรายต่อชิ้นส่วน ส่วนปริมาณของตะกั่วในน้ำมันหล่อลื่นของเครื่องยนต์ดีเซลควรจะมีค่าต่ำกว่า 25 ppm

### 2.8.5 การวิเคราะห์ด้วยวิธีเฟอร์โรกราฟฟี (Ferrography)

เทคนิคเฟอร์โรกราฟฟี เป็นหลักในการวิเคราะห์เศษโลหะ (โดยเฉพาะที่เป็นเหล็กหรือวัสดุที่แม่เหล็กดูดได้) ที่ปะปนอยู่ในน้ำมันหล่อลื่น วิธีการนี้สามารถใช้เพื่อระบุ แยกแยะ และวิเคราะห์เศษโลหะจากการสึกหรอในน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วโดยหลักการของการใช้อำนาจสนามแม่เหล็กดูดเศษเหล็กจากลำการไหลของน้ำมันหล่อลื่นที่ไหลผ่านสไลด์ ดังแสดงในรูปที่ 2-17

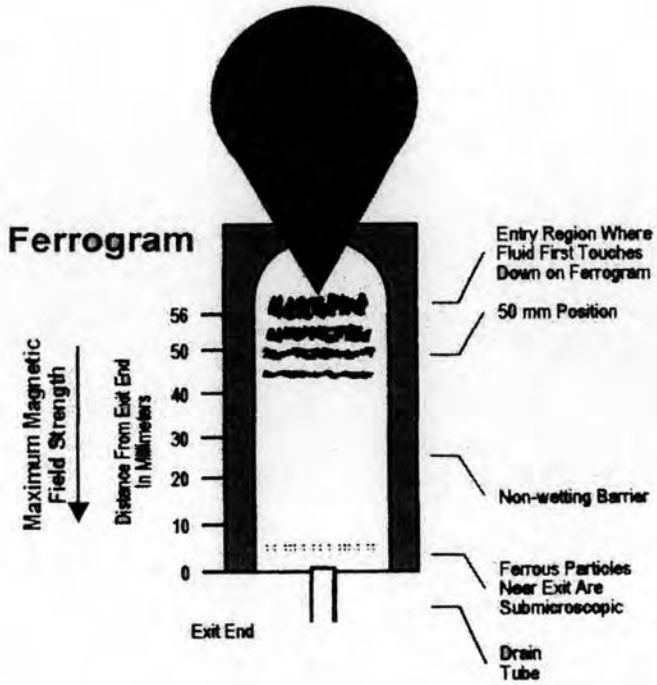



รูปที่ 2-17 แสดงกระบวนการเฟอร์โรกราฟฟี [5]

โดยเศษเหล็กจะถูกแยกออกด้วยสนามแม่เหล็ก ซึ่งจะเรียงตัวตามขนาดใหญ่ไปหาเล็ก และมีแนวโน้มการวางตัวตามทิศทางของสนามแม่เหล็ก ซึ่งเศษโลหะที่มีขนาดใหญ่จะเกาะติดบนแผ่นสไลด์ก่อนและไล่เรียงขนาดจนถึงขนาดเล็กที่สุดตรงปลายของแผ่นสไลด์ดังแสดงในรูปที่ 2-18

การวิเคราะห์ขั้นตอนต่อไปคือการนำแผ่นสไลด์ มาส่องโดยกล้องจุลทรรศน์เพื่อการศึกษาถึงขนาดและรูปร่างของเศษโลหะ ทำให้ทราบถึงระดับความรุนแรงของการสึกหรอจากขนาดของอนุภาคและกลไกการสึกหรอ เช่น การสึกหรอแบบยึดติด แบบขูดขีด แบบล้าตัว หรือแบบการกัดกร่อน เป็นต้น

เฟอร์โรกราฟฟีเป็นวิธีการอย่างหนึ่งที่ง่ายและรวดเร็วในการแยกเอาเศษอนุภาคการสึกหรอออกจากน้ำมันหล่อลื่น อนุภาคการสึกหรอจากกลไกการสึกหรอชนิดต่างๆ จะมีคุณลักษณะหรือรูปร่างเฉพาะตัวจึงสามารถที่จะระบุได้ว่าเป็นกลไกการสึกหรอประเภทใด เช่น




รูปที่ 2-18 แสดงแผ่นสไลด์ที่ใช้ในกระบวนการเฟอร์โรแกรม [5]

ก. กรณีที่อนุภาคการสึกหรอที่เกิดขึ้นจากการขัดถูหรือการยึดติด (Rubbing and Adhesive wear) จะมีลักษณะรูปร่างเป็นแผ่นๆ ซึ่งจะบอกให้ทราบว่าเป็นสภาวะปกติของเครื่องยนต์

ข. กรณีที่อนุภาคการสึกหรอจากการมีกลไกการขูดขีดแบบเป็นร่องหรือการขูดตัด (Abrasive or cutting wear) จะทำให้เกิดอนุภาคสึกหรอที่มีรูปร่างเป็นขดหรือเส้นเหมือนเส้นด้าย ซึ่งจะบอกให้ทราบว่าเป็นสภาวะของการสึกหรอของเครื่องยนต์

ค. กรณีที่อนุภาคการสึกหรอจากลักษณะของเศษโลหะที่มีรูปร่างเป็นเส้นด้ายเพิ่มขึ้นมากๆก็แสดงว่าเครื่องยนต์จะมีโอกาสชำรุดใกล้เข้ามาแล้ว

2.8.5.1 **การวิเคราะห์อนุภาคการสึกหรอ** (Wear Particle Analysis)

การตรวจสอบอนุภาคจากการสึกหรอแบ่งออกได้เป็น 4 ลักษณะใหญ่ๆ คือ

ก. ตรวจสอบขนาดของอนุภาค

อนุภาคการสึกหรอที่เกิดขึ้นเนื่องจากกลไกการสึกหรอชนิดต่างๆกัน จะมีขนาดที่แตกต่างกันไป ขนาดที่แตกต่างกันนี้พอที่จะนำมาเป็นข้อวินิจฉัยในการประเมินสภาพของเครื่องยนต์ได้

ข. ตรวจสอบรูปร่างของอนุภาค

รูปร่างของอนุภาคการสึกหรอจะเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญในการบ่งชี้ให้เห็นถึงกลไกการสึกหรอ ซึ่งกลไกการสึกหรอที่แตกต่างกันจะทำให้เกิดอนุภาคการสึกหรอที่แตกต่างกันไป

ค. ตรวจสอบการกระจายทางสถิติของขนาดของอนุภาคการสึกหรอ

การศึกษาถึงลักษณะของ Particle Size Distribution ซึ่งถือได้ว่ามีความสำคัญอย่างยิ่งในการศึกษาอนุภาคการสึกหรอ และการกระจายตัวของขนาดของอนุภาคการสึกหรอ ก็ถือได้ว่าเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญในการประเมินประสิทธิภาพของเครื่องยนต์

ง. ตรวจสอบองค์ประกอบของอนุภาค

การตรวจสอบองค์ประกอบของอนุภาคการสึกหรอนั้นนับได้ว่าเป็นสิ่งที่มีความสำคัญที่ทำให้ได้ทราบว่าอุปกรณ์หรือชิ้นส่วนใดของเครื่องยนต์สึกหรอบ้าง

2.8.5.2 **การศึกษาอนุภาคการสึกหรอเชิงจุลภาค** (Wear Particle Microscopic Examination)

ก. การศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Optical Microscope) ใช้ในการตรวจตัวอย่างของอนุภาคการสึกหรอที่เก็บตัวอย่างสารหล่อลื่นที่สุ่มมาจากเครื่องยนต์

ข. การศึกษาด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเลคตรอน (Scanning Electron Microscope: SEM) เหตุผลที่ใช้กล้องชนิดนี้มาแทนกล้องจุลทรรศน์ชนิดธรรมดา เนื่องจากกล้องจุลทรรศน์โดยทั่วไปจะมีจุดด้อยตรงที่ไม่สามารถให้กำลังขยายที่สูงมากๆได้ และยังไม่สามารถที่จะขยายภาพเพื่อศึกษา ณ จุดใดๆที่ต้องการได้อย่างชัดเจนเท่าที่ต้องการ

ค. การศึกษาด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ (Image Analysis) ซึ่งนับได้ว่าการศึกษาชนิดนี้เป็นการรวมเอาเทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีด้านการใช้กล้องจุลทรรศน์เข้าด้วยกัน โดยจะตรวจตัวอย่างอนุภาคการสึกหรอด้วยกล้องจุลทรรศน์และจะถ่ายทอดสัญญาณภาพไปยังคอมพิวเตอร์ที่มีโปรแกรมในการวิเคราะห์ผล

2.8.5.3 **ชนิดของอนุภาคการสึกหรอ**

ชนิดอนุภาคการสึกหรอแบ่งออกได้เป็น 7 ชนิดดังนี้

1. **การเสียดสีกันของโลหะกับโลหะ** (Rubbing Wear Particle) อนุภาคจะมีลักษณะอัตราส่วนระหว่างความยาวกับความหนาที่มีค่าสูง ซึ่งถือได้ว่าเป็นการสึกหรอที่น้อยมาก อนุภาคโดยทั่วไปจะมีขนาดเล็กกว่า 15 ไมครอน หากระบบหล่อลื่นเกิดความสกปรกจะทำให้เกิดการเสียดสีกันของโลหะกับโลหะโดยจะทำให้อัตราการเกิดเพิ่มอย่างทันทีทันใด อาจจะอยู่ในรูปของขนาดอนุภาคที่เพิ่มขึ้นในบางครั้งอนุภาคที่โตกว่า 100 ไมครอนซึ่งถือได้ว่าเป็นอนุภาคการสึกหรอชนิดที่เกิดขึ้นสำหรับเครื่องจักรที่มีการหล่อลื่นด้วย น้ำมันหล่อลื่นดังรูปที่ 2-19

รูปที่ 2-19 แสดงอนุภาคการสึกหรอที่เกิดจากการเสียดสีกันของโลหะกับโลหะ

2. **การสึกหรอที่เกิดจากการเสียสมดุลในเครื่องจักร** (Severe Sliding Wear Particle)

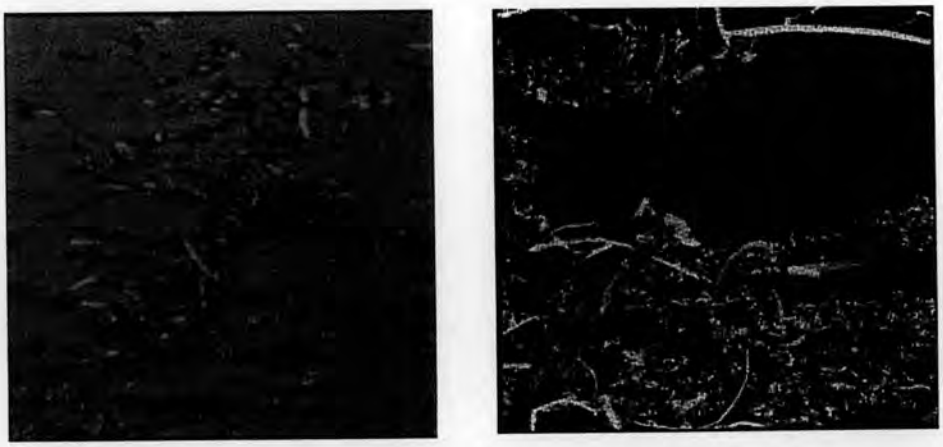
ดังรูปที่ 2-20 ซึ่งมีสาเหตุมาจาก การใช้ภาระที่สูงเกินไป การใช้ความเร็วที่สูงเกินไป การขาดสารหล่อลื่น ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดการยึดติดของวัสดุ อนุภาคการสึกหรอแบบนี้จะมีขนาดโตกว่า 100 ไมครอน หากเครื่องจักรทำงานภายใต้สภาวะที่รับภาระมากเกินไป ความเร็วในการเสียดสีเพิ่มขึ้น และหากระบบการหล่อลื่นที่ไม่ดี อนุภาคจะมีขนาดโตกว่าอนุภาคของการเสียดสีของโลหะกับโลหะ ซึ่งมีขนาดโตกว่า 20 ไมครอน อนุภาคที่เกิดขึ้นจะเป็นสีน้ำเงิน สีน้ำตาล สาเหตุที่เกิดเป็นสีน้ำเงินและสีน้ำตาลเนื่องมาจากความร้อนที่มากเกินไปจึงทำให้สีของอนุภาคจะเริ่มเปลี่ยนจากสีฟางข้าวไปเป็นสีน้ำตาลและกลายเป็นสีน้ำเงิน

I23805365

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2-20 แสดงอนุภาคการสึกหรอที่เกิดจากการเสียสมดุลในเครื่องจักร (Severe Sliding Wear Particle)

3. **อนุภาคการสึกหรอจากการขูดขีดของเศษโลหะ** (Cutting Wear Particles) เป็นผลสืบเนื่องมาจากที่มีการสึกหรอแบบ Abrasive ซึ่งทำให้เกิดอนุภาคการสึกหรอที่มีลักษณะเป็นเส้นคล้ายเศษกลึง เกิดจากผิวถูกการทะลุผ่าน การถูด้วยวัสดุคล้ายคันไถหรืออาจถูกตัดด้วยสิ่งหนึ่งทำให้เกิดค่าความแข็งที่แตกต่างกัน อนุภาคจะมีความยาวเฉลี่ยตั้งแต่ 5 ไมครอนจนถึงความยาวมากกว่า 100 ไมครอน และมีความกว้างเฉลี่ยตั้งแต่ 2 ไมครอนจนถึง 15 ไมครอน ดังรูปที่ 2-21 อนุภาคจะมีสีที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากความร้อน สีที่เกิดได้แก่ น้ำเงิน แดง และสีฟ้า ซึ่งอนุภาคชนิดนี้จะเป็นสิ่งที่จะบ่งบอกถึงอนุภาคที่ไม่ปกติ และสามารถที่จะบ่งบอกถึงสภาพการชำรุดของเครื่องจักรว่าจะถึงเวลาที่ชำรุดแล้ว



รูปที่ 2-21 แสดงอนุภาคการสึกหรอจากการขูดขีดของเศษโลหะ (Cutting Wear Particles)

**4. อนุภาคการสึกหรอจากการล้าที่เกิดกับเฟืองและพื้นที่สัมผัสของตลับลูกปืน** (Ferro Fatigue Particle)

ก. อนุภาคการสึกหรอที่เกิดจากการล้าบนเฟือง (Gear Fatigue Particle) ดังรูปที่ 2-22 แบ่งออกเป็นการกลิ้งและการถูไปบนผิวของฟันเฟือง ซึ่งในตอนแรกอนุภาคการสึกหรอที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นผิวเรียบ รูปร่างของอนุภาคจะมีลักษณะที่ผิดปกติโดยมีขอบที่คม และมีอัตราส่วนของความยาวต่อความหนาประมาณ 10:1 หากความเค้น (Stress) บนผิวสัมผัสเพิ่มขึ้น อัตราส่วนของความยาวต่อความหนาจะมีค่าลดลง ซึ่งจะทำให้ปริมาณการเกิดก้อนอนุภาคลดลงด้วย ซึ่งอนุภาคจะมีขนาดเล็กมากและเป็นการยากที่จะทำการหาจุดโฟกัส ในการดูอนุภาคที่เกิดขึ้นด้วยกล้องจุลทรรศน์

รูปที่ 2-22 แสดงอนุภาคการสึกหรอที่เกิดจากการล้าบนเฟือง (Gear Fatigue Particle)

ข. อนุภาคสึกหรอที่เกิดจากการล้าตัวของวัสดุ (Rolling Fatigue Wear Particle) ดังรูปที่ 2-23 การล้าตัวของวัสดุจะมีการหลุดร่อนออกมาเป็นอนุภาคการสึกหรอเช่นการเกิดการล้าตัวของเม็ดลูกปืนหรือรางในของเสื้อตลับลูกปืน ซึ่งโดยปกติจะมีขนาดโตกว่า 75 ไมครอน และจะมีลักษณะรูปร่างที่แตกต่างไป จากอนุภาคสึกหรอดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

อนุภาคที่เกิดขึ้นในลักษณะที่แตกต่างกันเช่นอนุภาคทรงกลม อนุภาคที่เป็นชิ้นเล็กๆซึ่งอนุภาคที่เป็นทรงกลมจะเกิดมาจากความล้าที่เกิดขึ้นภายในตลับลูกปืน แล้วจึงเกิดการแตกออกมาเป็นชิ้นเล็กๆ ซึ่งมีขนาดของอนุภาคประมาณ 1 ถึง 10 ไมครอน และจะทำให้ปริมาณของอนุภาคมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในขณะที่เครื่องยนต์กำลังทำงาน ซึ่งจะเป็นสิ่งที่บ่งบอกให้รู้ว่าจะเกิดการเสียหายขึ้นในไม่ช้า อนุภาคที่เป็นทรงกลมเกิดขึ้นได้จากการกัดกร่อนเป็นโพรง (Cavitations Erosion) กระบวนการเชื่อม กระบวนการขบกันของเฟือง ซึ่งขนาดของอนุภาคที่เกิดขึ้นมาจากกระบวนการดังที่ได้กล่าวมาแล้วจะมีขนาดใหญ่ ซึ่งจะอยู่ในช่วง 10 ถึง 100 ไมครอน

อนุภาคการล้าที่มีลักษณะเป็นชิ้นเล็กๆ จะหลุดแยกตัวออกมาจากผิวที่เป็นหลุมนั้น จะมีขนาดค่อนข้างโตถึงประมาณ 100 ไมครอน

อนุภาคที่เป็นแผ่นบางๆจะเกิดมาจากช่องว่างระหว่างผิวในของแบริ่ง จะมีขนาดของอนุภาคประมาณไม่เกิน 70 ไมครอน และมีอัตราส่วนของความยาวต่อความหนาประมาณ 40:1

รูปที่ 2-23 แสดงอนุภาคสึกหรอที่เกิดจากการล้าตัวของวัสดุ (Rolling Fatigue Wear Particle)

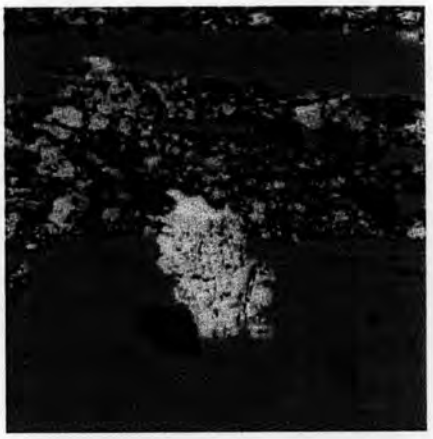
5. **อนุภาคการสึกหรอที่เกิดจากการล้าตัวของระบบเกียร์** (Combined Rolling and Sliding Wear Particles)

การที่อนุภาคการสึกหรอแบบนี้มีความแตกต่างจากอนุภาคการสึกหรอแบบอื่นๆ เนื่องจากเกียร์มีการเคลื่อนที่ทั้งแบบไถล และแบบหมุน (Both Sliding and Rolling Mode)

6. **อนุภาคของโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก**

ลักษณะการเกิดอนุภาคการสึกหรอจากโลหะที่ไม่ใช่เหล็กนั้น บ่อยครั้งที่มีลักษณะพิเศษคล้ายกับการเกิดอนุภาคของโลหะที่เป็นเหล็ก เช่นการสังเกตเห็นลักษณะเด่นของ Rubbing Wear, Cutting Wear และการเสียดสีกันภายใต้ความเค้นสูง (High Stress Sliding) แต่มีสิ่งหนึ่งที่สามารถทำการแยกแยะให้เห็นได้อย่างชัดเจนสำหรับอนุภาคของโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก คือสีของอนุภาค

ก. **อนุภาคของทองแดง** แสงสะท้อนที่ปรากฏของอนุภาคของทองแดงจะเป็นสีชมพู ซึ่งขนาดของอนุภาคจะอยู่ในช่วง 2 ถึง 100 ไมครอน และรูปร่างของอนุภาคการสึกหรอจะขึ้นอยู่กับวิธีการเกิดอนุภาค ดังรูปที่ 2-24 ในบางครั้งอนุภาคของทองแดงจะพบว่าเชื่อมติดกับวัสดุทั้งสองที่สัมผัสกัน



รูปที่ 2-24 แสดงอนุภาคการสึกหรอของทองแดง

**ข. อนุภาคของทองเหลือง** หรืออาจเรียกว่าทองสัมฤทธิ์ (Bronize) แสงสะท้อนที่ปรากฏของอนุภาคทองเหลืองจะเป็นสีเหลืองทอง ส่วนอนุภาคของทองสัมฤทธิ์ สีจะมืดกว่าเป็นสีเหลือง – ชมพู

**ค. อนุภาคโครเมียม** แสงสะท้อนที่ปรากฏของอนุภาคจะเป็นสีเงิน โดยปกติแล้วอนุภาคที่เกิดขึ้นจะมีผิวเรียบ และจะมีขนาดของอนุภาคที่ต่ำกว่า 50 ไมครอน

**ง. อนุภาคของนิเกิล** จะมีลักษณะคล้ายกับอนุภาคของโครเมียม แสงสะท้อนที่ปรากฏของอนุภาคจะมีสีเงิน แต่เนื่องจากอนุภาคของนิเกิลมีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็ก ฉะนั้นเราจึงพบอนุภาคของนิคเกิลในวงแหวนของแบริ่ง

**จ. อนุภาคของอลูมิเนียม** แสงสะท้อนที่ปรากฏของอนุภาค จะมีสีเทาเงิน อนุภาคจะมีผิวที่หยาบ และขนาดของอนุภาคไม่อาจจะระบุได้ ซึ่งโดยปกติแล้วจะมีขนาดใหญ่ประมาณ 25 ถึง 500 ไมครอน

7. **อนุภาคการสึกหรอจากวัสดุอื่น ๆ**

อนุภาคการสึกหรอจากวัสดุอื่นๆ เช่นออกไซด์ของโลหะผลึกที่ไม่ใช่โลหะ และอโลหะอสัณฐาน ซึ่งคุณสมบัติและลักษณะอนุภาคได้แสดงไว้ในตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 แสดงคุณสมบัติของอนุภาคการสึกหรอจากวัสดุชนิดอื่นๆ ที่ไม่ใช่โลหะ และอโลหะอสัณฐาน [5]

| ชนิดของอนุภาค | ผลจากแสงสะท้อนของอนุภาค | การกระจายแสงบนฉากรองรับสีเทา | การกระจายแสงบนฉากรองรับสีดำ |
|---|---|---|---|
| ออกไซด์ (เหล็ก) | แสงสะท้อนเป็นสีน้ำตาลบนฉากรองรับสีขาว | เกิดสีส้ม - น้ำตาลบนฉากรองรับสีเทา | แสงสว่างสีส้ม-น้ำตาลบนฉากรองรับสีดำ |
| ผลึกของอโลหะ (ซิลิกา [silica]) | แสงสะท้อนเป็นสีเทาบนฉากรองรับสีขาว | เกิดสีขาว/เงินบนฉากรองรับสีเทา | เกิดสีขาว/เงินบนฉากรองรับสีดำ |
| วัสดุโพลิเมอร์ (Polymer Material) | แสงสะท้อนเป็นสีครีม/น้ำตาลบนฉากรองรับสีขาว | เกิดสีอย่างขนสัตว์บนฉากรองรับสีเทา | แสงสีขนสัตว์บนฉากรองรับสีดำ |

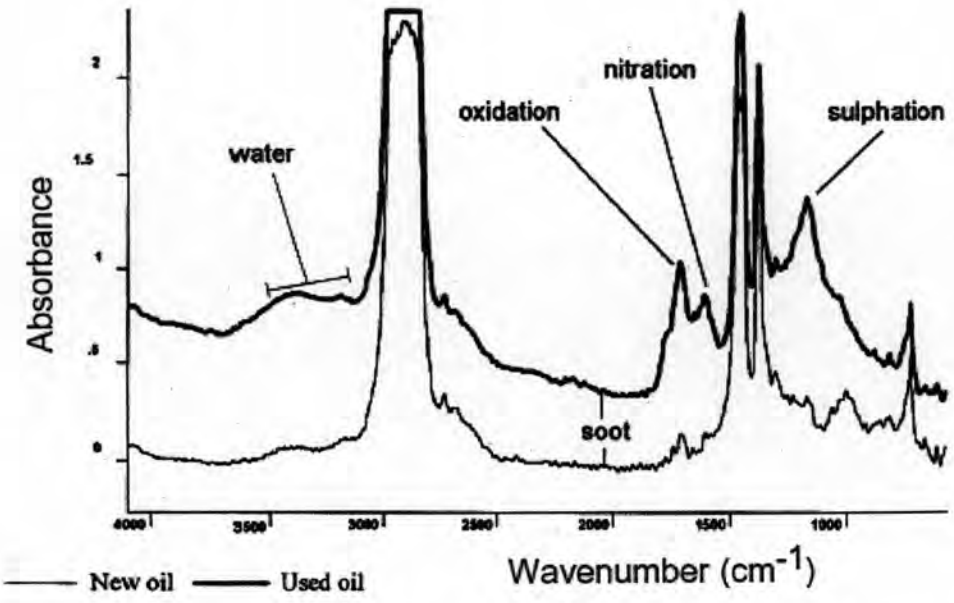
### 2.8.6 การวิเคราะห์ด้วยวิธี FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) [5]

การวิเคราะห์ FTIR เป็นการวิเคราะห์ในระดับโมเลกุล เป็นวิธีการที่ใช้หาปริมาณขององค์ประกอบต่างๆ ของน้ำมันหล่อลื่นได้อย่างรวดเร็วเพื่อใช้ในการตรวจสอบสภาพน้ำมันหลักสภาพสารเคมีเพิ่มคุณภาพ และสิ่งสกปรกปนเปื้อน โดยให้ค่าที่แม่นยำและเชื่อถือได้ หลักการในการวัดจะทำการผ่านรังสีอินฟาเรด ซึ่งมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 0.00008 เซนติเมตรถึง 0.04 เซนติเมตร ไปยังน้ำมันหล่อลื่นที่จะทำการทดสอบ ส่วนประกอบของน้ำมันที่เป็นสารประกอบต่างๆ ก็จะดูดซับปริมาณรังสีที่ช่วงความถี่จำเพาะที่ต่างกันไว้ เนื่องจากแต่ละพันธะในโมเลกุลจะดูดซับรังสีที่ช่วงความถี่ที่ต่างกัน ผลที่ได้จะแสดงในรูปความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับรังสี(Abs) กับส่วนกลับของความยาวคลื่น ( Wave Number , $cm.^{-1}$) ซึ่งจะทำให้ทราบถึงปริมาณและองค์ประกอบต่างๆ ที่อยู่ในน้ำมันหล่อลื่นเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 2-25

**ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี FTIR**

**1. ค่าออกซิเดชั่น**

ในระบบหล่อลื่น สารอินทรีย์จะเกิดการแยกตัวที่สภาวะอุณหภูมิและความดันที่สูง ประกอบกับการมีออกซิเจนอยู่บริเวณรอบ ในกระบวนการ FTIR จะหาค่าออกซิเดชั่นจากพันธะคาร์บอนิล (Carbonyl) ซึ่งมีช่วงความถี่จำเพาะของการดูดซับรังสีอินฟาเรดระหว่าง 1,800 ถึง 1,670 เซนติเมตร$^{-1}$




รูปที่ 2-25 แสดงปริมาณการดูดซับรังสีอินฟาเรดในแต่ละช่วงความถี่ ของน้ำมันหล่อลื่น [5]

**2. ค่าไนเตรชั่น**

ลักษณะการเกิดไนเตรชั่น จะเกิดทีสภาวะอุณหภูมิและความดันที่สูงเช่นเดียวกับการเกิดออกซิเดชั่น ประกอบกับการมีไนโตรเจนและออกซิเจนอยู่บริเวณรอบ โดยทั่วไปการเกิดไนเตรชั่นจะอยู่ในรูปของ NO , $NO_2$ และ $N_2O_4$ ซึ่งมีช่วงความถี่จำเพาะของการดูดซับรังสีอินฟาเรด ระหว่าง 1,650 ถึง 1,600 เซนติเมตร$^{-1}$ การเกิดไนเตรชั่นเป็นสาเหตุทำให้เกิดคราบยางเหนียวและ Lacquer สาเหตุของการเกิดไนเตรชั่นมาจาก การปรับอัตราส่วนผสมของเชื้อเพลิงต่ออากาศที่ไม่ถูกต้อง การปรับจังหวะการจุดระเบิดที่ไม่เหมาะสม หรือมาจากสภาวะการทำงานที่ภาระสูง ซึ่งจะทำให้เกิดอุณหภูมิการทำงานและปริมาณ Blow – by ที่สูงตามไปด้วย

**3. ค่าซัลเฟชั่น**

เกิดจากกำมะถัน (Sulphur) ซึ่งพบได้ในน้ำมันเชื้อเพลิง และอาจพบได้ในสารเติมแต่งบางชนิดในน้ำมันหล่อลื่น การเกิดซัลเฟชั่น จะอยู่ในรูปของ $SO_3$ และ $SO_2$ ซึ่งช่วงความถี่จำเพาะของการดูดซับรังสีอินฟาเรด อยู่ระหว่าง 1,180 ถึง 1,120 เซนติเมตร$^{-1}$ การเกิดซัลเฟชั่นจะทำให้เกิด คราบยางเหนียว กากตะกอน และทำให้น้ำมันหล่อลื่นเสื่อมคุณภาพลง นอกจากนั้นสารประกอบที่เกิดขึ้นยังสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำซึ่งเกิดระหว่างการเผาไหม้ กลายเป็นกรดซัลฟูริก ซึ่งจะทำลายการรวมตัวของสารเติมแต่งในน้ำมันหล่อลื่น

**4. ปริมาณเขม่า**

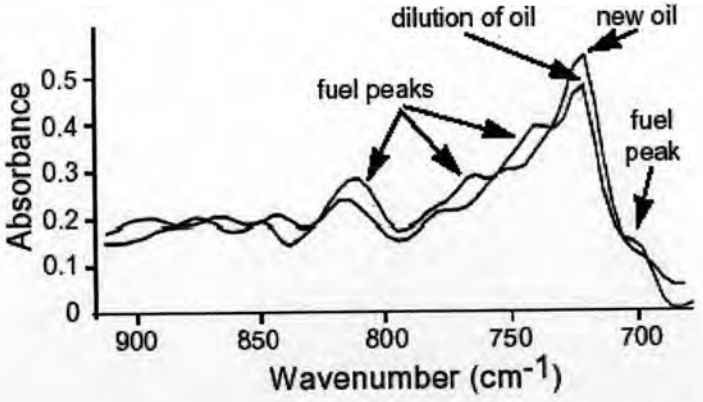
เขม่า เกิดจากอัตราส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศมีค่าสูง การเพิ่มปริมาณของเขม่าในน้ำมันหล่อลื่นแสดงให้เห็นถึงปัญหาจากการเผาไหม้ หรือช่วงเวลาการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันเครื่องและไส้กรองที่นานเกินไป ปริมาณเขม่าที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำมันหล่อลื่นยังทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนืดและทำให้เกิดการอุดตันที่ไส้กรอง และอ่างน้ำมันหล่อลื่น

การวิเคราะห์ปริมาณเขม่าจะต่างจากวิธีที่ได้กล่าวมาข้างต้นซึ่งใช้เทคนิคการหาพื้นที่ใต้กราฟ เนื่องจากเขม่าจะไม่มีช่วงความถี่จำเพาะของการดูดซับรังสีอินฟาเรดที่แน่นอน ดังนั้นเพื่อให้สะดวกต่อการวัด จึงทำการวัดปริมาณการดูดซับที่ความถี่ 2,000 เซนติเมตร$^{-1}$

**5. ปริมาณเชื้อเพลิง**

ปริมาณเชื้อเพลิงที่พบในน้ำมันหล่อลื่นมีสาเหตุมาจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ เนื่องจากเชื้อเพลิงทั่วไป จะประกอบด้วยโมเลกุลของของสารประกอบมากมาย ทั้งสารประกอบแอลิแฟติก เช่น ออกเทน และสารประกอบอโรมาติก เช่น เบนซีน และอีกมากรวมกันเพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆของน้ำมันเชื้อเพลิง

การวิเคราะห์ปริมาณเชื้อเพลิงที่ปนเปื้อนในน้ำมันหล่อลื่น ด้วยวิธี FTIR สามารถทำได้โดย หาช่วงความถี่ของการดูดซับในแต่ละส่วนประกอบของเชื้อเพลิง แล้วนำช่วงความถี่ที่ได้มาเปรียบเทียบในช่วงการดูดซับของน้ำมันหล่อลื่น ดังแสดงในรูปที่ 2-26 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าน้ำมันเชื้อเพลิงมีหลายช่วงความถี่ตามสารประกอบมากมายที่พบในน้ำมันเชื้อเพลิง

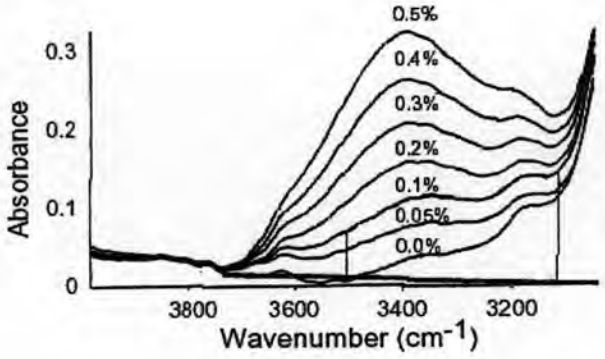



รูปที่ 2-26 แสดงการเปรียบเทียบค่าการดูดซับของน้ำมันใหม่กับน้ำมันที่มีเชื้อเพลิงปนเปื้อน [5]

**6. ปริมาณน้ำ**

ปริมาณที่พบในน้ำมันหล่อลื่นใช้ในการตรวจสอบการรั่วของน้ำจากระบบหล่อเย็น โดยน้ำจะดูดซับรังสีอินฟาเรดในปริมาณที่มาก ซึ่งทำให้ง่ายต่อการตรวจพบ ดังแสดงในรูปที่

2-27 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ช่วงความถี่ของน้ำที่ดูดซับรังสีอินฟาเรด เป็นช่วงที่มีปริมาณการดูดซับรังสีของน้ำมันหล่อลื่นน้อย




รูปที่ 2-27 แสดงช่วงความถี่จำเพาะที่น้ำสามารถดูดซับรังสีอินฟาเรดได้ [5]

ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี FRIT สามารถ แสดงผลออกมาเป็น Absorbance Unit (Abs) ยกเว้นค่า การปนเปื้อนของน้ำ,ไกลคอล,เชื้อเพลิง และเขม่า ซึ่งแสดงผลเป็นร้อยละของการปนเปื้อน

## 2.9 งานวิจัยเกี่ยวกับน้ำมันเตา และการศึกษาผลกระทบจากการใช้เชื้อเพลิงทดแทนดีเซล และการทดสอบความทนทาน

การที่จะนำน้ำมันเตาหนักมาใช้ในเครื่องยนต์ดีเซล มักพบปัญหาการเสียหายของวาล์วไอเสียซึ่งเกิดจากการกัดกร่อนจากหยดน้ำมันเตาหนักที่สะสมอยู่บนวาล์วไอเสีย จึงได้มีการศึกษาเพื่อหาผลกระทบต่อการเกิดอนุภาค, การเพิ่มขึ้นของอนุภาค, การสะสมของอนุภาค และองค์ประกอบทางเคมีของอนุภาคขี้เถ้าในไอเสีย ซึ่ง J.Lyyranen , J.Jokiniemi , E. Kauppinen , J.Joutsensaari และ A. Auvinen [7] ได้ทำการศึกษาโดยใช้เครื่องมือวัดการเกิดอนุภาค โดยทำการศึกษาทั้งในเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก, เครื่องยนต์ดีเซลขนาดใหญ่ที่ใช้กับเรือดำน้ำ, เครื่องยนต์โรงจักรต้นกำลัง โดยทำการเก็บตัวอย่างอนุภาคจากท่อไอเสียด้านหลังเทอร์โบชาร์จ การวิเคราะห์อนุภาคซึ่งมีการเคลื่อนที่ที่แตกต่างกันจะใช้วิธีการวัดจำนวนของอนุภาคที่กระจายตัว และใช้ Berner type low – pressure impactor (BLPI) สำหรับวัดมวลของอนุภาคที่กระจายตัว และได้ศึกษาถึงองค์ประกอบของธาตุที่สำคัญ ขนาดการกระจายตัวของมวลธาตุ V, Na, Ni, S และ Zn โดยได้ทำการทดสอบเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กที่ใช้น้ำมันเตาหนักที่ภาระร้อยละ 100, เครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กที่ใช้น้ำมันเตาหนักที่มีขี้เถ้าปริมาณมากเป็นองค์ประกอบที่ภาระร้อยละ

100 และร้อยละ110, เครื่องยนต์ดีเซลขนาดใหญ่ที่ใช้น้ำมันเตาหนักที่มีขี้เถ้าปริมาณมากเป็นองค์ประกอบที่ภาระร้อยละ50 และร้อยละ110

จากปัญหาที่เกิดขึ้นจากการใช้น้ำมันเตา จากปัญหาดังกล่าว J. Lyyranen, J. Jokiniemi, E. Kurkela, A. Auvinen and E. Norrmen [8] จึงได้หาทางแก้ไขปัญหาโดยการเติมสารปรุงแต่งลงไปในน้ำมันเตา แล้วทำการศึกษาเพื่อหาผลกระทบต่อการเกิดอนุภาค, การเพิ่มขึ้นของอนุภาค, การสะสมของอนุภาค และ องค์ประกอบทางเคมีของอนุภาคขี้เถ้าในไอเสีย นอกจากนั้นยังได้ศึกษาวาล์วไอเสีย ในเรื่องการสะสมของหยดน้ำมันบนวาล์วไอเสีย และโครงสร้างของหยดน้ำมัน จากการศึกษาจะพบว่าขนาดมวลของอนุภาคที่กระจายตัวของน้ำมันเตาที่เติมสารปรุงแต่งจะมีขนาดเล็กกว่าขนาดมวลที่การกระจายตัวของน้ำมันเตาที่ไม่ได้เติมสารปรุงแต่งมาก

มหาวิทยาลัย Idaho คณะวิศวกรรมศาสตร์ภาควิชาการเกษตร [6] ได้ทำการทดสอบความทนทานของเครื่องยนต์จากการใช้เชื้อเพลิง 4 ชนิด คือ Hydrogenated Soybean Ethyl Ester (HySEE), HySEE ร้อยละ80 ผสมกับน้ำมันดีเซล ร้อยละ20 ( HySEE80), HySEE ร้อยละ 20 ผสมกับน้ำมันดีเซล ร้อยละ80 ( HySEE20) และน้ำมันดีเซล โดยการทดสอบความทนทานทำตามมาตรฐานการทดสอบ EMA จำนวนชั่วโมงการทดสอบ 200 ชั่วโมง ผลการทดสอบความทนทานที่ได้คือ

1. ผลการวิเคราะห์น้ำมันเครื่องของเครื่องยนต์ที่ใช้ HySEE เป็นเชื้อเพลิงมีผลคล้ายกับเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง
2. น้ำหนักลูกสูบของเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิง HySEE, HySEE(80)และ HySEE(20) มีน้ำหนักเพิ่มขึ้น ร้อยละ12, ร้อยละ15 และร้อยละ6 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับน้ำหนักลูกสูบของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง
3. คาร์บอนที่สะสมในวาล์วไอดีของเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิง HySEEและ HySEE(80)มีคาร์บอนลดลง ร้อยละ44 และร้อยละ34 เมื่อเทียบกับเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง ตามลำดับ แต่เมื่อใช้เชื้อเพลิง HySEE(20) คาร์บอนเพิ่มขึ้น ร้อยละ15 เมื่อเทียบกับเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง
4. คาร์บอนที่สะสมในวาล์วไอเสียของเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิง HySEE, HySEE(80)และHySEE(20) มีปริมาณลดลง ร้อยละ8, ร้อยละ19 และ ร้อยละ16 ตามลำดับเมื่อเทียบกับเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง

ปีการศึกษา 2546 คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย[9] ได้ทำการศึกษาถึงความเหมาะสมของการใช้น้ำมันปาล์มดิบผสมดีเซลเป็นเชื้อเพลิงแทนน้ำมันดีเซลในเครื่องยนต์การเกษตรขนาดเล็กชนิดห้องเผาไหม้ล่วงหน้าแบบหมุนวน พบว่าส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่

น้ำมันปาล์มดิบ 10% ซึ่งผ่านการอุ่นให้มีอุณหภูมิ 60°C ผสมกับน้ำมันดีเซล 90% จากนั้นทำการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์และทดสอบความทนทานของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันปาล์มดิบผสมดีเซล เปรียบเทียบกับเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซล ในการทดสอบความทนทานนี้ใช้ปั๊มน้ำเป็นอุปกรณ์สร้างภาระให้กับเครื่องยนต์ตลอดการทดสอบความทนทาน การทดสอบจะทำพร้อมกันทั้งสองเครื่องยนต์ภายใต้วัฏจักรภาระเดียวกัน เครื่องยนต์ที่หนึ่งใช้น้ำมันปาล์มดิบผสมดีเซลเป็นเชื้อเพลิง เครื่องยนต์ที่สอง ใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง โดยได้ทำการกำหนดวัฏจักรจำลองการทำงานที่ใช้ในการทดสอบซึ่งดัดแปลงจาก EMA Test ในการทดสอบความทนทาน 1 วัฏจักร ใช้เวลารวม 5 ชั่วโมง โดยในหนึ่งวันทำการทดสอบ 3 วัฏจักรรวมเป็นเวลาในการทดสอบ 15 ชั่วโมงต่อวัน ซึ่งใน 1 วัฏจักรกำหนดให้เครื่องยนต์ทำงาน 3 สภาวะ คือ 1.)ที่ภาระสูงสุดความเร็วรอบ 2400 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง 2.)ที่ 90 % ของภาระสูงสุดความเร็วรอบ 2400 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 3.)ที่ 80 % ของภาระสูงสุดความเร็วรอบ 2400 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

จากการทดสอบความทนทานของเครื่องยนต์ภายใต้ภาระจำลองเป็นเวลา 320 ชั่วโมง พบว่าสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันปาล์มดิบผสมดีเซลหลังผ่านการทดสอบความทนทานมีแรงบิดเบรกที่ลดลงชัดเจน bsfc มีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย ค่าควันดำมีค่าสูงขึ้นตามอายุการใช้งาน ผลจากการวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นพบความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นมีค่าเกินระดับการเตือนขั้นวิกฤตในชั่วโมงการใช้งานน้ำมันหล่อลื่นที่ 100 และ 110 พบปริมาณโลหะตกค้างในน้ำมันหล่อลื่นสูงกว่าและมีค่าสูงเพิ่มขึ้นเมื่อใกล้จุดสิ้นสุดอายุน้ำมันหล่อลื่นคือ 100 ชั่วโมงในทุกค่าที่ทำการตรวจวัด และพบปริมาณเหล็กและตะกั่วในปริมาณที่สูงมากเมื่อใช้งานเกินอายุ พบสภาพการสึกหรอในแบริ่งก้านสูบ ปริมาณเขม่าจับตัวหนาที่ปลายหัวฉีด คราบตะกอนสีแดงที่ฝาสูบในเครื่องยนต์ และปริมาณตะกอนในกระบอกไส้กรองน้ำมันเชื้อเพลิงในปริมาณที่มากกว่าอีกด้วย

สรุป จากข้อมูลทบทวนวรรณกรรมข้างต้น งานวิจัยนี้จึงได้ประยุกต์ใช้ เคโรซีน และ Additive มาผสมกับน้ำมันเตาเพื่อช่วยให้คุณสมบัติของน้ำมันเตาเข้าใกล้ดีเซล และช่วยเพิ่มการละลายมวลของน้ำมันเตา อันจะส่งผลให้การเกิดขึ้นของอนุภาคในไอเสีย และการสะสมของอนุภาคในชิ้นส่วนต่างๆลดลง และศึกษาผลจากการใช้เชื้อเพลิงดีเซลทางเลือกนี้ในเครื่องยนต์ดีเซล