

## บทที่ 4

### คุณสมบัติเชื้อเพลิง สารหล่อลื่น และทบทวนวรรณกรรม

#### 4.1 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงดีเซล

คุณสมบัติของเชื้อเพลิง และผลกระทบต่อสมรรถนะและการใช้งานของเครื่องยนต์ดีเซล ประกอบด้วย

##### 4.1.1 เลขซีเทน (Cetane Number, CN) [9]

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

$$\text{cetane number} = \% \text{ n-cetane} + 0.15 (\% \text{ heptamethyl nonane}) \quad (4-1)$$

เลขซีเทนนี้มีผลต่อคุณสมบัติต่างๆ ของเชื้อเพลิง เช่น คุณสมบัติการสตาร์ท, มลภาวะ, ความดันในห้องเผาไหม้สูงสุด และระดับความดังเสียงของเครื่องยนต์ เป็นต้น ผลดีของการที่เชื้อเพลิงมีเลขซีเทนสูงได้แก่ เครื่องยนต์มีสมรรถนะสูง, เพิ่มคุณสมบัติการสตาร์ทเครื่องยนต์ ในขณะที่เย็น, ลดควันทาในช่วงการอุ่นเครื่องยนต์, ลดเสียงดัง, ลดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและมลพิษ แต่เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการทดสอบเพื่อหาค่าเลขซีเทนนั้นสูงจึงได้มีการคำนวณ cetane index (CCI) ขึ้นมาเพื่อประมาณค่าคุณสมบัติการจุดระเบิดแทน โดยใช้ค่า API gravity และ mid-boiling temperature (50 % evaporated) ตามมาตรฐาน ASTM D976

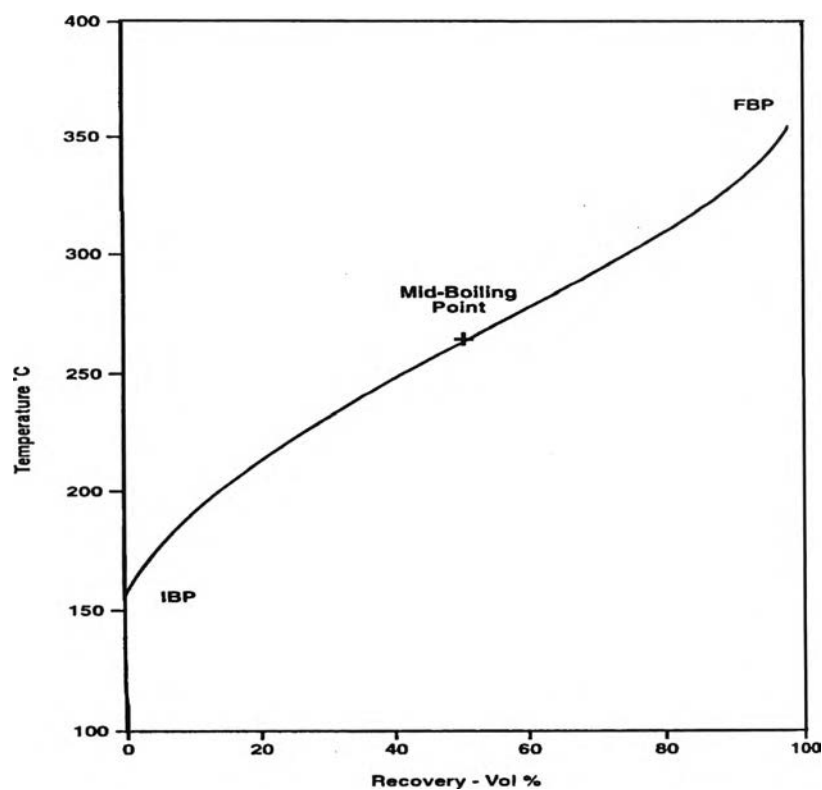
##### 4.1.2 ค่าการระเหย (Volatility)

รายละเอียดที่ได้ระหว่างการกลั่นเชื้อเพลิง ได้แก่ initial boiling point (IBP), end point (EP) หรือ final boiling point (FBP), percent of condensate recovered และ percent residue of nonvolatile matter ได้จากการกลั่นตัวของเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไปแสดงในรูปที่ 4-1

Volatility (การกลั่น หรือช่วงการเดือดของเชื้อเพลิง) มีผลต่อคุณสมบัติอื่นๆ รวมถึง ความหนาแน่น, จุดวาบไฟ, อุณหภูมิการจุดระเบิดด้วยตัวเอง, ความหนืด และเลขซีเทน

volatility ที่สูงจะทำให้เกิด vapor lock และจุดวาบไฟที่ต่ำลง vapor lock จะทำให้เครื่องยนต์ misfire หรือเกิดความล้มเหลวในการติดเครื่องยนต์ใหม่หลังจากดับเครื่องยนต์ลงในเวลาสั้นในสภาวะร้อน แต่อย่างไรก็ตาม volatility ที่สูงก็ยิ่งทำให้เชื้อเพลิงระเหยได้อย่างสมบูรณ์ในห้องเผาไหม้ แต่ผลที่ตามมาคือส่วนที่มีจุดเดือดสูงอาจเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ทำให้เกิดการสะสมรวมตัวในเครื่องยนต์และเพิ่มระดับควัน แต่อย่างไรก็ตาม ภายในช่วง 350 °C ถึง 400 °C สำหรับเชื้อเพลิงที่มีค่า volatility ต่ำจะทำให้ปริมาณไอเสียลดน้อยลง อุณหภูมิที่กลั่นตัวไปแล้ว 50% (mid-volatility) ของเชื้อเพลิงดีเซลมีผลอย่างชัดเจนต่อแนวโน้มของควันดำ ซึ่งมีผลกระทบโดยตรงต่อการฉีดและการผสมเชื้อเพลิงกับอากาศ และใช้สำหรับการคำนวณ cetane index ตามมาตรฐาน ASTM D976

ส่วนที่ volatility สูงซึ่งอยู่ที่จุดต่ำสุดในโค้งในรูปที่ 4-1 ช่วยปรับปรุงการติดเครื่องยนต์ขณะเย็น และการอุ่นเครื่อง ในขณะที่ส่วนที่ volatility ต่ำที่ปลายด้านสูงมีแนวโน้มที่จะเพิ่มการสะสมรวมตัว, ควัน และการสึกหรอ เนื่องจากเชื้อเพลิงระเหยยาก ทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์



รูปที่ 4-1 โค้งการกลั่น(Distillation curve) ของเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป [9]

#### 4.1.3 ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงดีเซลให้ประโยชน์ในการบ่งชี้องค์ประกอบ และคุณลักษณะที่สัมพันธ์กับสมรรถนะ เช่น คุณภาพการจุดระเบิด, กำลัง, การประหยัดเชื้อเพลิง, คุณสมบัติที่อุณหภูมิต่ำ และแนวโน้มของควัน บางครั้งอาจแสดงความหนาแน่นเป็นความถ่วงจำเพาะ หรือ API gravity ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงที่ได้จากกระบวนการกลั่นต่างๆ โดยประมาณแสดงดังต่อไปนี้ [5]

Straight-run distilled	805 – 870 kg/m <sup>3</sup>
Hydrocracked gas oil	815 – 840 kg/m <sup>3</sup>
Thermally cracked gas oil	835 – 875 kg/m <sup>3</sup>
Catalytically cracked gas oil	930 – 965 kg/m <sup>3</sup>

#### 4.1.4 ความหนืด (Viscosity)

ความหนืดของของไหลบ่งบอกถึงความต้านทานการไหลของของไหลซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของเชื้อเพลิงดีเซล เนื่องจากจะมีผลกระทบโดยตรงต่อการฉีดเชื้อเพลิงไม่ว่าจะเป็น รูปร่างของ spray, การแตกเป็นละอองฝอยของเชื้อเพลิง, ปริมาณเชื้อเพลิง และผลกระทบต่อหัวฉีด โดยเหตุผลที่กล่าวมานี้จะส่งผลกระทบต่อเนื่องไปยังลักษณะการเผาไหม้และสมรรถนะของเครื่องยนต์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิต่ำ เมื่อความหนืดเพิ่มขึ้นมุมกรวยสเปรย์ของหัวฉีดจะลดลง, การกระจายเชื้อเพลิง และ การพุ่งของสเปรย์ (spray penetration) ก็จะลดลงไปด้วย ในขณะที่ขนาดของหยดเชื้อเพลิง (droplet) ใหญ่ขึ้น ดังนั้นความหนืดจะมีผลต่อ injection timing ที่เหมาะสมสำหรับรูปร่างหัวฉีดและความดันการฉีดเชื้อเพลิงหนึ่งๆ นอกจากนี้ความหนืดจะมีอิทธิพลต่อปริมาณของเชื้อเพลิงที่ฉีดด้วย

เชื้อเพลิงดีเซลมักจะมีการกำหนดคุณสมบัติขอบเขตบนของความหนืดเพื่อให้แน่ใจว่ามีการไหลของเชื้อเพลิงที่เพียงพอสำหรับการติดเครื่องขณะเย็นและยังมีการกำหนดความหนืดต่ำสุดเพื่อปกป้องการสูญเสียกำลังที่อุณหภูมิสูงด้วย ถ้าเชื้อเพลิงมีค่าความหนืดต่ำมากเกินไปจะทำให้ penetration ของสเปรย์ยาวเกินไป ซึ่งจะทำให้เกิดการ wet ที่ผนังห้องเผาไหม้ทำให้สูญเสียกำลังของเครื่องยนต์ได้

#### 4.1.5 คุณสมบัติการหล่อลื่น (Lubricity)

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

#### 4.1.6 คุณสมบัติที่อุณหภูมิต่ำของเชื้อเพลิงดีเซล

เชื้อเพลิงดีเซล อาจประกอบด้วย heavy paraffinic hydrocarbons ซึ่งมีความสามารถในการละลายที่จำกัดในเชื้อเพลิง Paraffin จะสะสมรวมตัวกันเป็นไข (wax) เมื่ออยู่ในสภาวะที่เย็นเพียงพอ ซึ่งเป็นต้นเหตุของปัญหาต่างๆ ระหว่างการทำงานของเครื่องยนต์ เช่น เกิดการอุดตันในระบบเชื้อเพลิง

#### 4.1.7 เสถียรภาพของเชื้อเพลิงดีเซล

คุณสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งของเชื้อเพลิงคือ ความมีเสถียรภาพไม่เปลี่ยนแปลงระหว่างช่วงเวลาระหว่างการผลิต การใช้งานในเครื่องยนต์ และการก่อดังของตะกอนระหว่างการเก็บเชื้อเพลิงดีเซลในระยะยาว ไนโตรเจน และสารประกอบที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบมักจะเกี่ยวข้องอย่างมากในกระบวนการเสื่อมสภาพของเชื้อเพลิง เนื่องจากองค์ประกอบเหล่านี้มีแนวโน้มที่จะรวมตัวกันเป็นตะกอนเชื้อเพลิง กลไกการเผาไหม้ของไฮโดรคาร์บอนเกิดขึ้นหลายขั้นตอน เริ่มต้นด้วยการเกิดโซ่ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเกิดอนุมูลอิสระ เมื่ออนุมูลอิสระของไฮโดรคาร์บอนก่อตัวขึ้น จะรวมตัวกับออกซิเจนเพื่อก่อให้เกิดอนุมูล peroxide ซึ่งในทางกลับกันสามารถทำปฏิกิริยากับโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนอื่นโดยการกำเนิดอนุมูลอิสระของไฮโดรคาร์บอนอื่น และ hydroperoxide ดังนั้นกระบวนการเผาไหม้จึงไม่สูญสลายไปได้ด้วยตัวเอง อนุมูลอิสระยังเป็นเหตุให้เกิด polymerization และ ปฏิกิริยาการเผาไหม้เพื่อก่อให้เกิดวัสดุที่น้ำหนักโมเลกุลสูง ซึ่งสามารถสะสมรวมตัวในระบบเชื้อเพลิง ขั้นตอนสุดท้ายคือ chain termination เมื่อ antioxidant หายไป เป็นปฏิกิริยาซึ่งนำไปสู่ผลิตภัณฑ์ที่ไร้อนุมูลอิสระ

ความสามารถของเชื้อเพลิงในการรักษาเสถียรภาพในถังเก็บขึ้นอยู่กับตัวแปรซึ่งควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาด้วยตัวเอง อาทิ oxidation ซึ่งผลิตภัณฑ์สุดท้ายของการเกิดปฏิกิริยาด้วยตัวเอง โดยทั่วไปมี 2 ชนิด ได้แก่ soluble gum ซึ่งเป็นพวก nonvolatile และ insoluble gum ซึ่งมักถูกเรียกว่าเป็นตะกอน และเป็นผลิตภัณฑ์ที่อันตรายที่สุดของการเสื่อมสภาพของเชื้อเพลิงในถังเก็บ การเสื่อมสภาพในระบบเชื้อเพลิงสังเกตได้จากการอุดตันที่ไส้กรอง และการสะสมของสารเหนียว (gum) ในระบบจุดระเบิดและหัวฉีด สาเหตุหลักของปัญหาเหล่านี้ อาจเป็นเพราะเชื้อเพลิงดีเซลซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวหล่อเย็นหัวฉีดเสื่อมสภาพที่อุณหภูมิสูง ใน

ส่วนของด่างเชื้อเพลิงเมื่อเชื้อเพลิงถูกทำให้เย็นลงและให้ความร้อนอีกครั้ง การเกิดวัฏจักรการให้ความร้อนและการทำให้เย็นต่อเนื่องกันอาจทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของเชื้อเพลิงดีเซลที่ไม่มีเสถียรภาพทางความร้อน

#### 4.1.8 ปริมาณซัลเฟอร์ (Sulphur Content)

วิธีหนึ่งในการลดระดับไอเสียทั้งหมดของ total particulate matter (TPM) จากเครื่องยนต์ดีเซลคือ การใช้เชื้อเพลิงดีเซลที่มีกำมะถันต่ำ (<0.05% โดยน้ำหนัก) ระหว่างกระบวนการเผาไหม้ กำมะถันส่วนใหญ่ในเชื้อเพลิงถูกเปลี่ยนเป็น sulphur dioxide ( $\text{SO}_2$ ) ซึ่งส่วนมากถูกปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม ที่ซึ่งอาจเกิดปฏิกิริยาทางเคมีเพิ่มเติม นำไปสู่มลภาวะทางอากาศ  $\text{SO}_2$  ที่เหลือจะถูกเผาไหม้ในไอเสียดีเซลที่มีออกซิเจนหนา และเกิดเป็น sulphur trioxide ( $\text{SO}_3$ ) อุณหภูมิไอเสียดีเซลที่สูงจะรักษา  $\text{SO}_3$  ไว้ในสถานะไอ ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับน้ำ โดยปฏิกิริยาคายความร้อนนำไปสู่การก่อตัวของละอองกรดกำมะถันในอากาศ

ประโยชน์อื่นของการลดระดับกำมะถันในเชื้อเพลิงดีเซลคือ การลดการกัดกร่อนระดับกำมะถันที่สูงในเชื้อเพลิงทำให้เกิดการกัดกร่อนที่แหวนลูกสูบและ liner ของกระบอกสูบ การกัดกร่อนจึงขึ้นอยู่กับระดับกำมะถันของเชื้อเพลิงและสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์โดยตรง

สำหรับในประเทศไทยค่ามากที่สุดของกำมะถันในดีเซลถูกกำหนดไว้ที่ 0.05% โดยมวล ในการผลิตเชื้อเพลิงที่มีกำมะถันน้อยกว่า 50 ppm และปริมาณ aromatic 5% โดยปริมาตร (ตามที่ระบุสำหรับเชื้อเพลิงดีเซล class 1) จำเป็นที่จะต้องใช้สภาวะ hydro-processing ที่รุนแรงขึ้นหรือเทคโนโลยี hydro-processing ที่แตกต่างกันออกไป

#### 4.1.9 ปริมาณอะโรมาติก (Aromatic Content)

ส่วนประกอบ Aromatic ในเชื้อเพลิงดีเซลเป็นปัญหาที่สำคัญเพราะทำให้เกิดการปล่อย particulate emission แต่อย่างไรก็ตาม aromatics มีส่วนช่วยในการหล่อลื่นของเชื้อเพลิง ดังนั้นการกำจัดสารเหล่านี้จะทำให้เกิดอัตราการสึกหรอของปั๊มหัวฉีดสูงอย่างผิดปกติ

#### 4.1.10 ปริมาณน้ำและตะกอน (Water and Sediment Content)

เราไม่สามารถที่จะกำจัดน้ำออกจากเชื้อเพลิงดีเซลได้หมด เนื่องจากขั้นตอนแรกที่มีน้ำเข้ามาคือระหว่างกระบวนการผลิต นอกจากนั้นยังมีความเสี่ยงของการมีน้ำปะปนในระหว่างการขนส่งและการเก็บในถัง การเกิดขึ้นของน้ำในถังเก็บอาจทำให้เกิดการเติบโตของราและแบคทีเรีย การปนเปื้อนจุลินทรีย์ทำให้เกิดปัญหาสำคัญกับเครื่องยนต์โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบเชื้อเพลิง เช่น เกิดการอุดตันที่ไส้กรอง

ตะกอนที่พบในเชื้อเพลิงดีเซลส่วนใหญ่เป็นอนินทรีย์โดยกำเนิดเช่น สนิม, อนุภาคโลหะและฝุ่นละอองบางส่วนสามารถเป็นสารอินทรีย์จากการเสื่อมสภาพขององค์ประกอบเชื้อเพลิงที่ไม่เสถียร, การกระทำของแบคทีเรียที่รอยต่อของน้ำมัน-น้ำ หรือ ไซจากเชื้อเพลิง

ตะกอนสามารถนำไปสู่การอุดตันไส้กรองในยานพาหนะ และน้ำยังช่วยเพิ่มสภาวะกรดทำให้เกิดปัญหาการกัดกร่อนและความสึกหรอในระบบฉีดเชื้อเพลิงและเครื่องยนต์ การทดสอบมาตรฐานสำหรับปริมาณน้ำและตะกอนทำได้โดยวิธีการเหวี่ยง

#### 4.1.11 จุดวาบไฟ (Flash Point)

จุดวาบไฟคืออุณหภูมิต่ำสุดที่เชื้อเพลิงสามารถเกิดการลุกไหม้ได้จากแหล่งกำเนิดประกายไฟภายใต้สภาวะห้องปฏิบัติการที่ได้มาตรฐาน จุดวาบไฟนี้จะมีผลต่อเชื้อเพลิงในการพิจารณาด้านการขนส่ง, รูปแบบการจัดเก็บและการระมัดระวัง

## 4.2 ก๊าซชีวภาพ (Biogas)

ก๊าซชีวภาพเป็นก๊าซที่เกิดขึ้นมาจากการย่อยสลายระดับโมเลกุลของสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะที่ปราศจากออกซิเจนโดยแบคทีเรียบางชนิด ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ

4.1.1 ขั้นตอนการย่อยสลายเปลี่ยนสภาพจากสารจำพวก คาร์โบไฮเดรต, โปรตีน, ไขมัน ให้เป็นสารจำพวกกรดไขมัน, แอลกอฮอล์, คาร์บอนไดออกไซด์, ไฮโดรเจน, แอมโมเนียและซัลไฟด์

4.1.2 แบคทีเรียจำพวก acetogenic bacteria จะย่อยสลายสารที่ได้จากขั้นต้นต่อไปอีกและเปลี่ยนสภาพเป็นสารจำพวก กรดแอสिटิก, ไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์

4.1.3 ขั้นตอนนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ 1) การเปลี่ยนสภาพสารจำพวกไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ให้เป็นมีเทนกับออกซิเจน 2) การเปลี่ยนสภาพสารจำพวกกรดแอสिटิกให้เป็นมีเทนกับคาร์บอนไดออกไซด์

โดยกระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพสิ่งที่ต้องการนั้นก็คือ ก๊าซมีเทน แต่ก๊าซชนิดอื่นที่เป็นส่วนประกอบ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, ไนโตรเจนและก๊าซอื่นๆ เป็นก๊าซที่ไม่ต้องการเนื่องจากเป็นตัวหน่วงพลังงานรวมของก๊าซและเป็นผลเสียต่อการเผาไหม้จำเป็นที่ต้องลดลงให้มากที่สุด

#### 4.2.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของก๊าซชีวภาพ [10],

คุณสมบัติเบื้องต้นของก๊าซชีวภาพ(ดังแสดงในตารางที่ 4-1 ส่วนใหญ่จะประกอบด้วยก๊าซมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) 50-70 % ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) 30-50%, ส่วนที่เหลือจะเป็นก๊าซไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ), ก๊าซไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ ) ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) และน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) มีค่าความร้อนประมาณ  $23.3 \text{ MJ/m}^3$  โดยได้มาจากการบำบัดของเสียของโรงงานแปรรูปสินค้าทางการเกษตรและฟาร์มเลี้ยงสัตว์ เช่น ฟาร์มสุกร, โรงงานแปรงมันสำปะหลัง, โรงงานน้ำมันปาล์ม

ตารางที่ 4-1 แสดงส่วนประกอบและคุณสมบัติบางประการของ Biogas (Biogas ที่  $\text{CH}_4 \approx 65\%$  ,  $\text{CO}_2 \approx 35\%$ ) [10]

Key numbers	unit	Biogas
$\text{CH}_4$ (methane)	[vol%]	55-70
$\text{CO}_2$ (carbon dioxide)	[vol%]	30-45
$\text{N}_2$ (nitrogen)	[vol%]	0-2
$\text{H}_2\text{S}$ (hydrogen sulphide)	ppm	~500
$\text{NH}_3$ (ammoniac)	ppm	~100
Water dew point	[°C]	saturated
Net calorific value	[MJ/nm <sup>3</sup> ]	23.3
	[kWh/nm <sup>3</sup> ]	6.5
	[MJ/kg]	20.2
Density	[kg/ nm <sup>3</sup> ]	1.16
Relative density	[-]	0.863
	[MJ/nm <sup>3</sup> ]	27.3
Wobbe index (W)	[MJ/nm <sup>3</sup> ]	27.3
Methane number	[-]	~135
Stoichiometric mixtures		
Air requirement	[nm <sup>3</sup> /nm <sup>3</sup> gas]	6.22
Flame temperature*)	[°C]	1911
Water dew point (flue gas)	[°C]	59.2
Water vapour (flue gas)	vol%	19.3

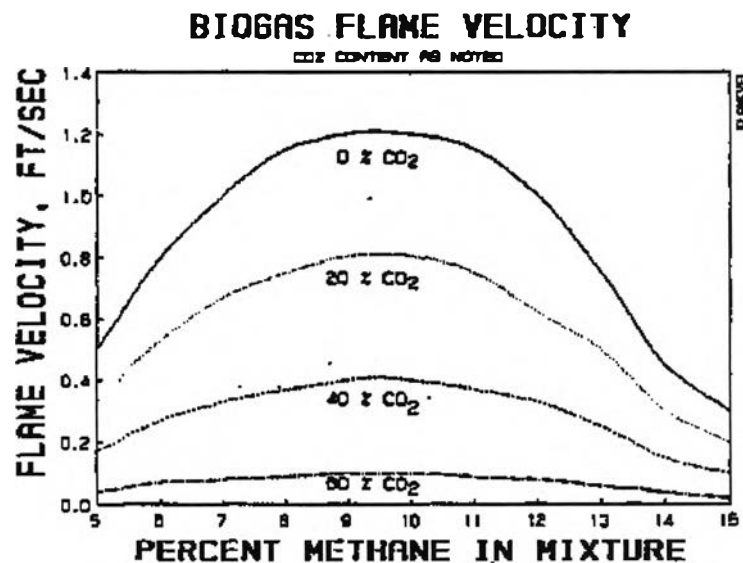
\*) Adiabatic flame temperature

#### 4.2.2 Flame Velocities [11]

Flame Velocities เป็นการหาอัตราเร็วของความคืบหน้าการเกิดเปลวไฟของส่วนผสมก๊าซกับอากาศสัมพันธ์กับความเร็วของการผสมก๊าซกับอากาศ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งของเชื้อเพลิง โดยเฉพาะเชื้อเพลิงก๊าซชีวภาพซึ่งมีส่วนประกอบของก๊าซที่มีคุณสมบัติเชื้อเพลิงให้พลังงานคือ ก๊าซมีเทน และมีคุณสมบัติไม่เป็นเชื้อเพลิงคือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นตัวหน่วงพลังงานภายใน และเป็นตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบระบบการป้อนเชื้อเพลิงและการกำหนดช่วงเวลาการจุดระเบิดของเครื่องยนต์ โดยรูปที่ 4-2 แสดงอัตราเร็วของเปลวไฟที่อัตราส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และอัตราส่วนผสมก๊าซกับอากาศต่างๆ กัน โดยจากกราฟจะเห็นว่าเมื่ออัตราส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้นความเร็วของเปลวไฟจะลดลง และจะมีความเร็วสูงที่สุดที่ส่วนผสมประมาณ 9-10 เปอร์เซ็นต์ของก๊าซกับอากาศ

#### 4.2.3 Flammability Limit

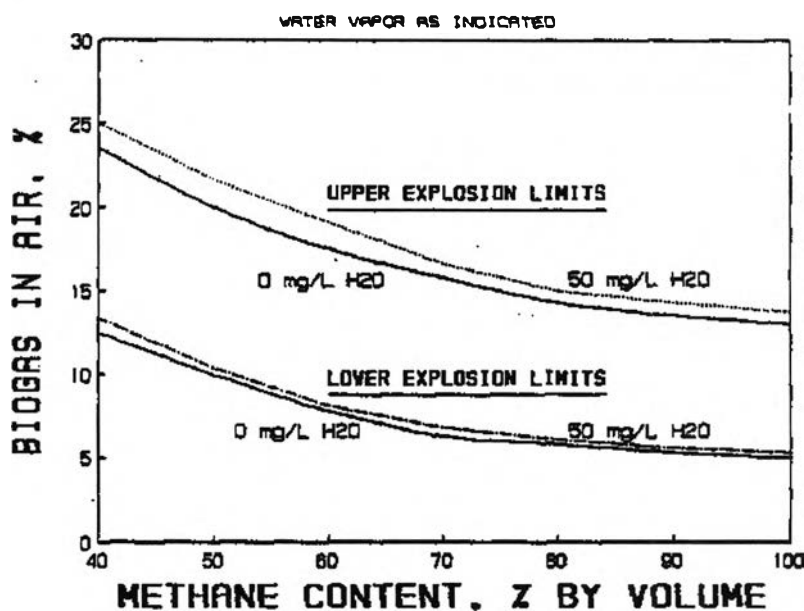
Flammability Limit (หรือ limit of inflammability) เป็นข้อจำกัดของการติดไฟของเชื้อเพลิง ซึ่งแต่ละชนิดมีคุณสมบัติแตกต่างกันไป โดยจะบ่งบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ของส่วนผสมเชื้อเพลิงกับอากาศค่ามากที่สุด UEL (upper explosive limit) และน้อยที่สุด LEL (lower explosive limit).



รูปที่ 4-2 แสดง Flame Velocities ที่เปอร์เซ็นต์ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และอัตราส่วนของมีเทนกับอากาศที่ต่างๆ กัน [11]



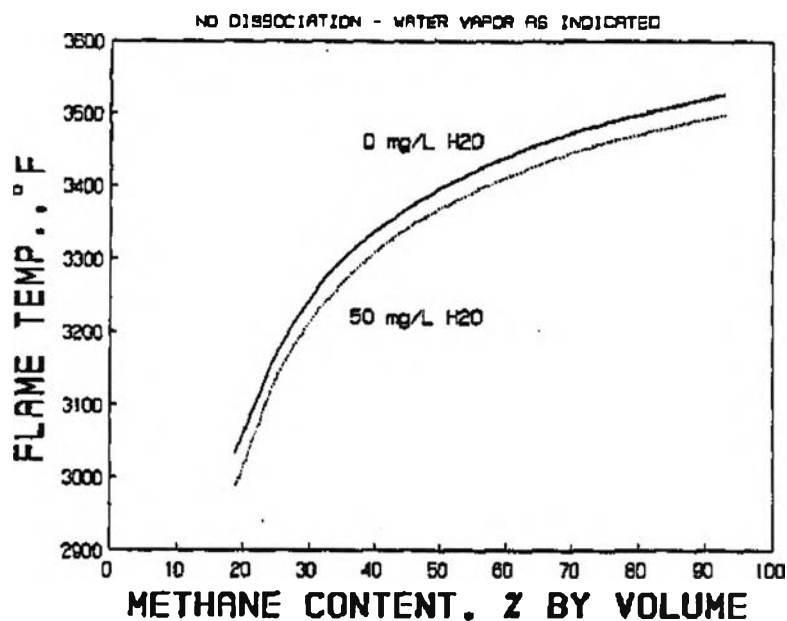
โดยผลกระทบของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นส่วนประกอบที่ต่างกัน แสดงในรูปที่ 4-3 ซึ่งบ่งบอกว่าที่ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่า Flame velocity ลดลง ทำให้ UEL และ LEL สูงขึ้น และที่ปริมาณไอน้ำสูงกว่า ค่า Flammability Limit ก็สูงขึ้นเช่นกัน



รูปที่ 4-3 แสดง UEL กับ LEL ของ Flammability Limit ที่เปอร์เซ็นต์ของก๊าซมีเทน และปริมาณไอน้ำในก๊าซชีวภาพต่างกัน [11]

#### 4.2.4 Flame Temperature

Flame Temperature อุณหภูมิด้านหน้าเปลวไฟของการเผาไหม้ส่วนผสมก๊าซกับอากาศเป็นตัวแปรที่สำคัญอีกตัวหนึ่งที่จะบ่งบอกถึงสมรรถนะ ในทุกๆ รูปแบบของการเผาไหม้ รวมไปถึงประสิทธิภาพทางความร้อน และยังส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิของไอเสียซึ่งเมื่อสูงขึ้นก็จะทำให้ปริมาณ  $\text{NO}_x$  สูงขึ้นเช่นกัน โดยอุณหภูมิของเปลวไฟของก๊าซมีเทนผสมกับอากาศทางทฤษฎี (stoichiometric) อยู่ที่ประมาณ  $3484^\circ\text{F}$  แต่ถึงอย่างไรในทางทฤษฎีค่าของอุณหภูมิของเปลวไฟจะลดลงเมื่อในองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพมีก๊าซที่ไม่ติดไฟมากขึ้น และขึ้นอยู่กั ก๊าซมีเทนที่เป็นองค์ประกอบหลัก รวมไปถึงปริมาณไอน้ำที่ผสมอยู่ด้วยเช่นกัน ดังที่แสดงในรูปที่ 4-4



รูปที่ 4-4 แสดง Flame Temperature ที่เปอร์เซ็นต์ของก๊าซมีเทน และปริมาณไอน้ำในก๊าซชีวภาพต่างกัน [11]

#### 4.2.5 Fuel Energy Value

ค่าพลังงานรวมและค่าพลังงานสุทธิ (gross and net energy) เป็นค่าคุณสมบัติพื้นฐานที่สำคัญของเชื้อเพลิงทุกชนิด รวมไปถึงเชื้อเพลิงก๊าซซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของเชื้อเพลิง โดยก๊าซชีวภาพมีส่วนประกอบของก๊าซหลายชนิดมีทั้งก๊าซมีเทนที่ให้พลังงานรวมทั้งก๊าซอื่นๆ เป็นก๊าซที่ให้พลังงานและไม่ให้พลังงาน ซึ่งค่า HHV (high heating value) เป็นค่าความร้อนที่ปลดปล่อยจากเชื้อเพลิงโดยจะรวมเอาพลังงานที่ใช้ในการระเหยของน้ำขณะเผาไหม้ด้วย ค่า HHV ของก๊าซมีเทนมีค่าประมาณ 55.5 MJ/kg และค่า LHV (low heating value) เป็นค่าความร้อนที่ปลดปล่อยออกมา ซึ่งไม่รวมเอาพลังงานที่ใช้ในการระเหยของน้ำ ค่า LHV ของก๊าซมีเทนมีค่าประมาณ 50 MJ/kg และค่าพลังงานของก๊าซอื่นๆ แสดงในตารางที่ 4-2

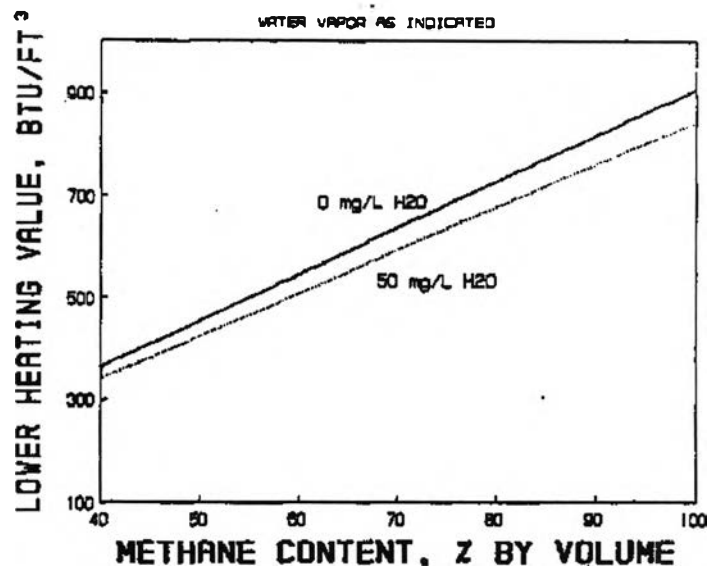
ตารางที่ 4-2 แสดงปริมาณค่าความร้อนของก๊าซชนิดต่างๆ [11]

Fuel	Chemical Formula	Heating Value		Air/Fuel Ratio (Stoichiometric)	
		HHV [kJ/kg]	LHV [kJ/kg]	Vol.Air/Vol.Fuel	Wt.Fuel/Wt.Air
Butane	n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	49,593	45,771	31.0	15.50
Hydrogen	H <sub>2</sub>	142,107	120,075	2.38	34.50
Hydrogen Sulphide	H <sub>2</sub> S	16,508	15,205	7.15	6.08
Methane	CH <sub>4</sub>	55,533	49,997	9.53	17.2
Octane	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	48,372	44,871	-	15.1
Propane	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	50,402	46,374	23.80	15.70

ตารางที่ 4-3 แสดงปริมาณค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ [11]

Fuel	Heating Value		Air/Fuel Ratio
	HHV [kJ/kg]	LHV [kJ/kg]	Wt.Fuel/Wt.Air
Natural Gas	50,776	45,811	15.73
Gasoline	46,952	43,706	14.80
Diesel	44,177	41,531	14.35
Fuel Oil	43,924	41,380	13.99
Propane	50,179	46,255	15.35

ค่าความร้อนของก๊าซชีวภาพขึ้นอยู่กับปริมาณของก๊าซมีเทนที่เป็นส่วนประกอบหลัก ซึ่งเมื่อก๊าซมีเทนมีปริมาณสูงขึ้นค่าความร้อนก็จะสูงขึ้นตาม และที่ปริมาณของไอน้ำต่ำค่าความร้อนก็จะสูง ดังกราฟในรูปที่ 4-5



รูปที่ 4-5 แสดง low heating value ที่เปอร์เซ็นต์ของก๊าซมีเทน และปริมาณไอน้ำในก๊าซชีวภาพต่างกัน [11]

#### 4.2.6 Fuel Mixture

อัตราส่วนผสมเชื้อเพลิงก๊าซกับอากาศนั้นต้องอยู่ภายใต้ Flammability Limit ซึ่งก๊าซมีเทนมีค่าอยู่ระหว่างประมาณ 5-15 % โดยมวลของอากาศ โดยค่าที่ดีที่สุดอยู่ที่ค่า stoichiometric (หรือค่าอัตราส่วนผสมเชื้อเพลิงกับอากาศทางทฤษฎี) มีค่าอยู่ที่ประมาณ 9.4% หรือสามารถหาได้ในรูปของ Air-Fuel Ratio จากสมการนี้ สำหรับก๊าซมีเทนค่า stoichiometric, A/F ประมาณ 17.21 kg air/kg CH<sub>4</sub>

Equivalence ratio เป็นค่าที่อธิบายอัตราความแตกต่างไปจากค่า stoichiometric ซึ่งจะบ่งบอกส่วนผสมหนาหรือบางไปจากค่าส่วนผสมในทางทฤษฎี โดยสามารถหาได้จากสมการ

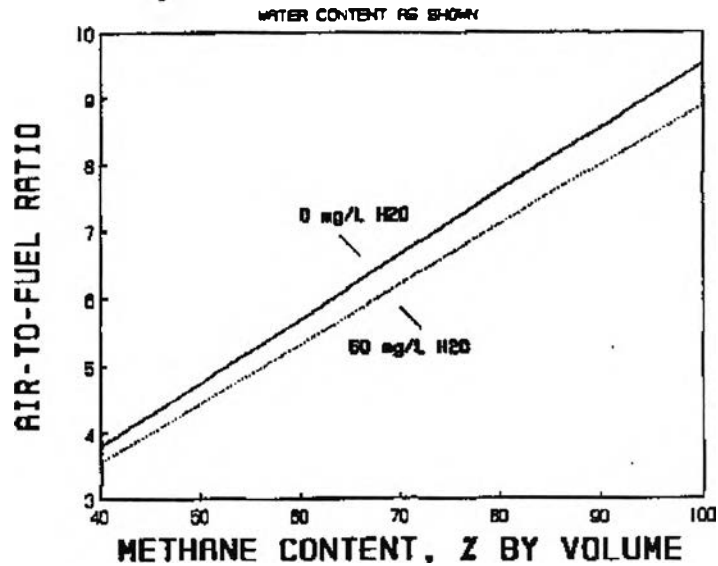
$$\text{Equivalence Ratio } (\phi) = \frac{\text{AF Stoichiometric}}{\text{AF Actual}} \quad (4-2)$$

เมื่อ  $\phi = 1$  stoichiometric ratio

$\phi < 1$  lean mixture, excess air

$\phi > 1$  rich mixture, excess fuel

สำหรับก๊าซชีวภาพค่า stoichiometric ratio นั้นแปรผันไปตามสัดส่วนของก๊าซที่ไม่สามารถเผาไหม้ที่ผสมอยู่กับก๊าซมีเทน ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4-6



รูปที่ 4-6 แสดง Air-to-Fuel Ratio ที่เปอร์เซ็นต์ของก๊าซมีเทน และปริมาณไอน้ำในก๊าซชีวภาพต่างกัน [11]

#### 4.2.7 Water Vapor

ไอน้ำเป็นตัวแปรสำคัญที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อคุณลักษณะการเผาไหม้มาก จากที่ได้นำเสนอมาข้างต้น ถึงแม้ว่าไอน้ำในก๊าซชีวภาพจะมีปริมาณน้อย ประมาณ 50 mg/L แต่ก็ยังมีผลกระทบต่อ flame temperature, flammability limit, lower heating value และ Air-Fuel ratio ของก๊าซชีวภาพ ทั้งนี้ยังไม่รวมผลการทำปฏิกิริยาเกิดการกัดกร่อน ดังนั้นไอน้ำจึงมีผลเสียมาก

#### 4.2.8 Hydrogen Sulphide (H<sub>2</sub>S)

ก๊าซชีวภาพมีปริมาณของไฮโดรเจนซัลไฟด์แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อม โดยส่วนใหญ่มีอัตราส่วนประมาณ 0.1-0.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ซึ่งเป็นตัวแปรที่ก่อให้เกิดการกัดกร่อนโลหะ โดยเฉพาะส่วนที่สัมผัสกับความชื้น และน้ำ

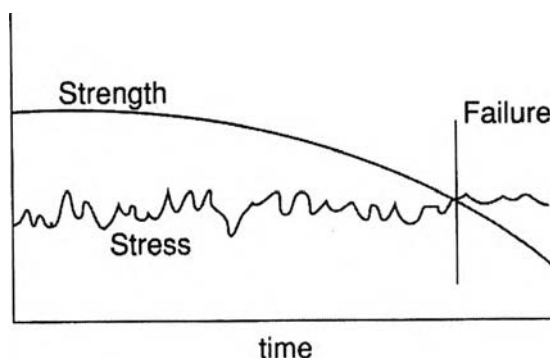
### 4.3 การเสื่อมสภาพของเครื่องจักร [12]

เมื่อมีการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วน ในชิ้นส่วนหนึ่งสัมผัสกับอีกชิ้นส่วนหนึ่งจะเกิดความเสียหายขึ้นไม่ว่าจะเป็นความเสียหายจากการสั่นไถลหรือความเสียหายแบบบดลึงตัว แม้จะมีการลดความเสียหายเหล่านี้ด้วยการใช้สารหล่อลื่น ซึ่งจะส่งผลให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำลงและลดความร้อนที่เกิดขึ้นจากความเสียหาย แต่สุดท้ายตามกฎเกณฑ์ของธรรมชาติ สิ่งของต่างๆ ยังคงเกิดการสึกหรอและเสื่อมสภาพ เพื่อให้เข้าใจถึงลักษณะของการเสื่อมสภาพและหาสาเหตุหลักของการเสื่อมสภาพเพื่อทำการแก้ไข จึงต้องศึกษาประเภทของการเสื่อมสภาพและกลไกของการสึกหรอโดยสังเขปดังนี้

#### 4.3.1 ประเภทของการเสื่อมสภาพ

ประเภทของการเสื่อมสภาพอาจแบ่งได้ตามลักษณะของการชำรุด ดังนี้

##### 4.3.1.1 การเสื่อมสภาพตามเวลา (Time dependent degradation)

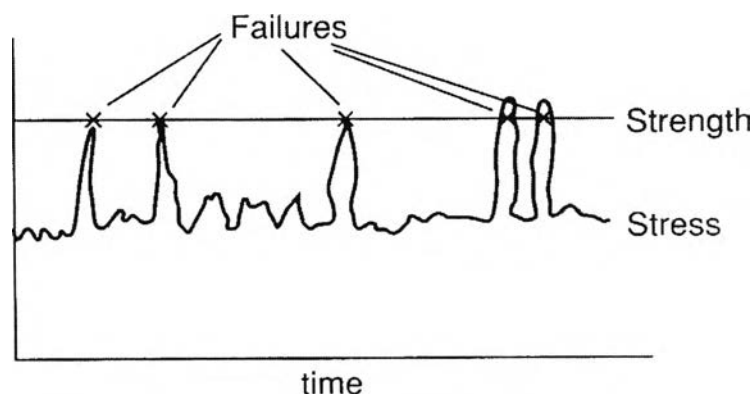


รูปที่ 4-7 กราฟแสดงการเสื่อมสภาพตามเวลา [12]

ลักษณะของกราฟในรูปที่ 4-7 แสดงให้เห็นถึงลักษณะการเสื่อมสภาพ (การสึกหรอของวัสดุ) ของชิ้นส่วนอุปกรณ์ตามระยะเวลาการใช้งาน ซึ่งมีผลทำให้มิติ หรือขนาดของชิ้นส่วนเปลี่ยนไปมีผลทำให้ความแข็งแรง (Strength) ของชิ้นส่วนดังกล่าวมีค่าลดลงไปตามเวลาใช้งาน และสุดท้ายเมื่อค่าความแข็งแรงมีค่าลดลงจนใกล้ หรือต่ำกว่าค่าภาระใช้งาน ก็จะเป็นจุดที่เส้นกราฟ 2 เส้นนี้มาบรรจบกัน ซึ่งเป็นจุดที่ชิ้นส่วนชำรุด หรือแตกหักเสียหาย

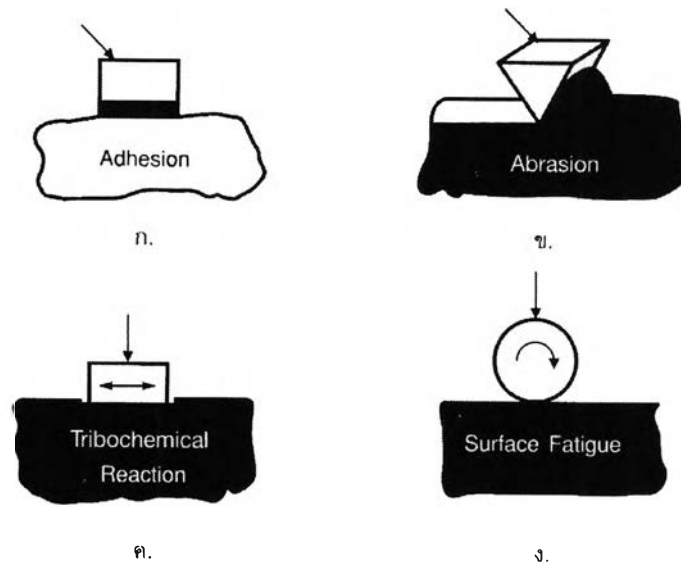
#### 4.3.1.2 การเสื่อมสภาพที่ไม่ขึ้นกับเวลา (Time independent degradation)

ในการเสื่อมสภาพจนชำรุดในลักษณะนี้เป็นการชำรุดโดยไม่เกี่ยวข้องกับช่วงระยะเวลาใช้งานอาจจะเป็นช่วงเวลาสั้นๆ แต่มีผลทำให้เกิดการชำรุดได้ (การชำรุดแบบทันทีทันใด) ซึ่งกรณีนี้ตรงกันข้ามกับกรณีแรก (กรณีแรกเป็นแบบการชำรุดแบบค่อยเป็นค่อยไป) หากดูจากกราฟในรูปที่ 4-8 จะเห็นว่าค่าอัตราส่วนระหว่างค่าความแข็งแรงวัสดุต่อภาระใช้งานซึ่งเรียกว่า ปัจจัยความปลอดภัย (Safety Factor : SF) โดยทั่วไปวิศวกรออกแบบมักกำหนดให้มีค่ามากกว่า 1 หากแต่ถ้าเมื่อใดที่มีการใช้เครื่องจักรผิดวิธี หรือการเกิดภาระกระทันหันหรือช็อค (Shock or Impact load) ที่อาจเกิดจากอุบัติเหตุหรือใช้เครื่องจักรผิดวิธี ก็จะทำให้ภาระที่กระทำต่อชิ้นส่วนดังกล่าวพุ่งขึ้นสูงมากจนไปบรรจบกับค่าความแข็งแรงของวัสดุ จนทำให้วัสดุทนภาระดังกล่าวไม่ได้ และเกิดการชำรุดหรือแตกหักในที่สุด



รูปที่ 4-8 กราฟแสดงการเสื่อมสภาพที่ไม่ขึ้นกับเวลา [12]

จากทั้งสองหัวข้อ คือ การชำรุดหรือการเสื่อมสภาพตามเวลา (Time dependent) มักจะเกี่ยวข้องกับการสึกหรอ (Wear) ส่วนการชำรุดแบบไม่ขึ้นกับเวลา (Time independent) จะเกี่ยวข้องกับการแตกหัก ในการป้องกันการสึกหรอจำเป็นที่วิศวกรบำรุงรักษาต้องเข้าใจเสียก่อนว่า การสึกหรอของชิ้นส่วนเครื่องจักรมีรูปแบบหรือกลไกการสึกหรอ (Wear mechanisms) อย่างไรบ้าง แล้วจึงสามารถหาแนวทางดำเนินการในการป้องกันการเสื่อมสภาพได้ ตามมาตรฐานด้านอุตสาหกรรมของประเทศเยอรมันหมายเลข 50320 (DIN 50320) ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันว่าแบ่งกลไกการสึกหรอไว้อย่างเหมาะสม 4 รูปแบบดังรูปที่ 4-9



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

รูปที่ 4-9 แสดงกลไกการสึกหรอแบบต่าง ๆ [12]

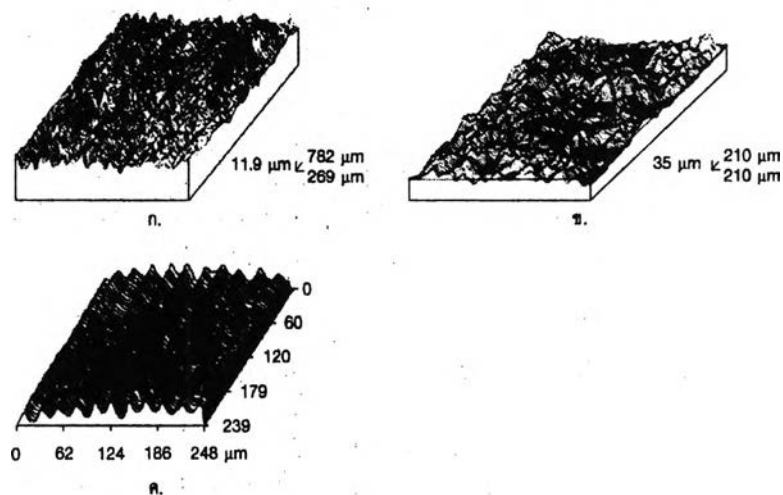
#### 4.3.2 การจำแนกกลไกการสึกหรอ

ก่อนที่จะกล่าวถึงกลไกการสึกหรอ (Wear mechanisms) จะอธิบายโดยสังเขปว่า เพราะเหตุใดจึงเกิดการสึกหรอขึ้น ทั้ง ๆ ที่มีบางคนแย้งว่าเครื่องจักรหรือชิ้นส่วนเครื่องจักรไม่ควรเกิดการสึกหรอเพราะไม่ได้ใช้งาน ให้ภาระหรือความเค้น (Stress) ที่มากเกินไปกว่าค่าความแข็งแรงของวัสดุ (Strength) ซึ่งก็คือ วิศวกรออกแบบไว้ให้มีค่าปัจจัยความปลอดภัย (ความแข็งแรง/ความเค้น > 1) แต่สุดท้ายชิ้นส่วนก็ยังสึกหรอและแตกหักตามระยะเวลา เหตุผลที่สามารถอธิบายได้คือ การที่วิศวกรออกแบบคำนวณค่าความเค้น (Stress) ไว้คือ

$$\text{ความเค้น} = \frac{\text{แรงที่กระทำ}}{\text{พื้นที่รับแรง}} \quad (4-3)$$

โดยที่พื้นที่รับแรงกระทำที่ใช้จะเป็นการใช้ค่าพื้นที่รับแรงกระทำที่เรามองเห็นหรือวัดได้ (Apparent area of contact) แต่ที่จริงแล้วพื้นที่รับแรงดังกล่าวอยู่บนสมมติฐานว่า พื้นผิวชิ้นงานมีความเรียบ และรับภาระเต็มหน้าสัมผัส หากทว่าในระดับจุลภาคแล้วมนุษย์ยังไม่สามารถทำให้เกิดความเรียบของผิวดังกล่าวได้ ดังแสดงในรูปที่ 4-10





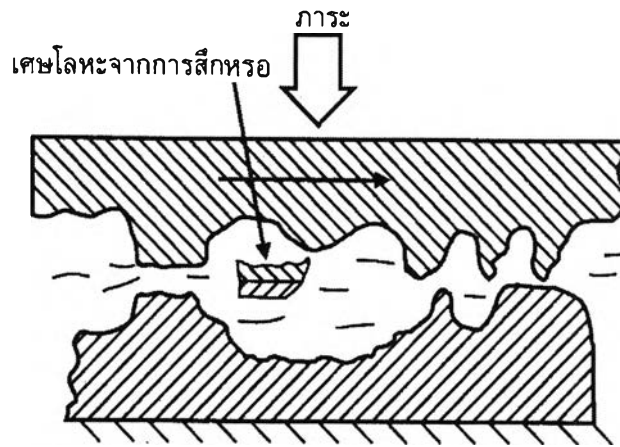
รูปที่ 4-10 แสดงพื้นผิวที่แท้จริงในระดับจุลภาค [12]

จะเห็นได้ว่าเมื่อหาค่าความเค้นในระดับจุลภาคแล้ว จะทำให้ค่าความเค้นจริงที่เกิดขึ้นมีค่าสูงมากเกินค่าความแข็งแรงของวัสดุ (Yield strength) โดยที่ยอดแหลม ๆ ที่เห็นจากภาพขยายของผิวงานถูกเรียกกันว่า “Asperities” เมื่อมีการสัมผัสกันของชิ้นงานจุดที่จะรับภาระจริง ในระดับจุลภาค คือ Asperities ซึ่งมีพื้นที่เล็ก ๆ และเมื่อค่าภาระสูงเกินค่าความแข็งแรง Asperities เหล่านี้จะเสียรูปยุบตัวโดยถาวรในขณะที่ชิ้นส่วนเหล่านี้หยุดนิ่ง เมื่อเริ่มมีการเคลื่อนที่ Asperities ที่เสียรูปโดยถาวรดังกล่าวจะถูกเข็นตัวออกไป และกลายเป็นเศษโลหะจากการสึกหรอที่ปะปนอยู่ในน้ำมันหล่อลื่นนั่นเอง ดังนั้นไม่ว่าจะใช้ภาระต่ำหรือสูง ก็จะทำให้เกิดการสึกหรอเสมอ โดยทั่วไปเราสามารถจำแนกกลไกการสึกหรอได้เป็น 4 กลไก คือ

#### 4.3.2.1 กลไกการสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive wear)

เป็นกลไกที่เกิดขึ้นจากการที่มีการเกิดพันธะยึดติดกันของ Asperities และมีการฉีกขาดตัวออกไปของพันธะที่เกิดขึ้นในขณะที่ชิ้นงานมีการเคลื่อนที่ พันธะที่เกิดการ “เชื่อมติด” หรือ “เชื่อมติดกัน” ของ Asperities นี้เรียกกันว่า “การเชื่อมเย็น” (Cold-welded) ลักษณะการเกิดการสึกหรอแบบยึดติดแสดงในรูปที่ 4-11

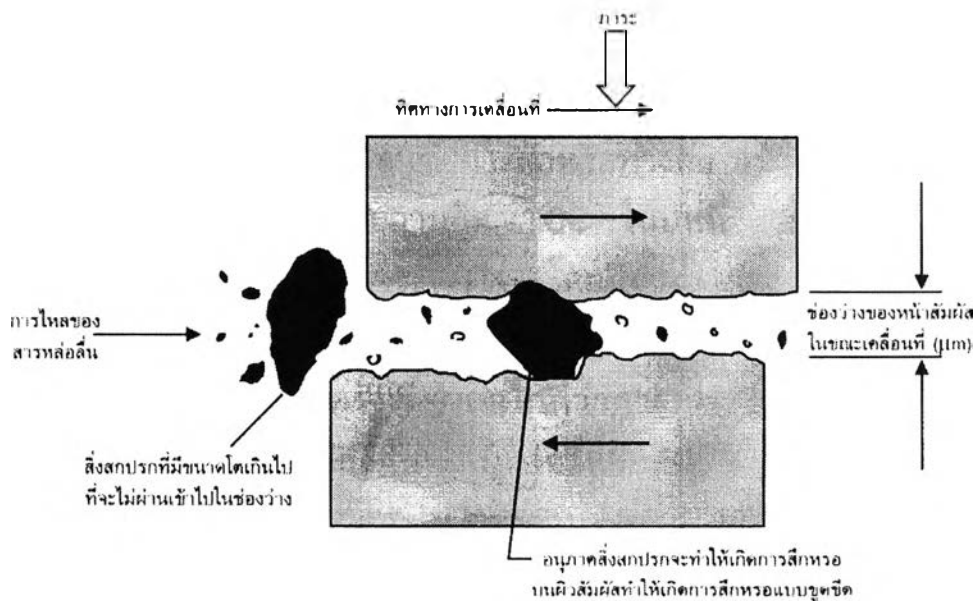
โดยที่สาเหตุที่เร่งให้เกิดการสึกหรอแบบยึดติด คือ สารหล่อลื่นมีความหนืดน้อยเกินไป ภาระมีค่าสูงมากเกินไปจนสารหล่อลื่นรับไม่ได้หรือใช้ความเร็วต่ำเกินไป



รูปที่ 4-11 แสดงลักษณะการสึกหรอแบบยึดติด [12]

#### 4.3.2.2 กลไกการสึกหรอแบบขูดขีด (Abrasive wear)

เป็นการสึกหรอที่เกิดขึ้นจากการที่เนื้อวัสดุ ถูกเฉือนออกไปจากการถูกขูดขีดโดยสสารที่มีความแข็งสูงมาก เช่น ฝุ่นละออง เม็ดทราย หรือกากเพชร เป็นต้น ลักษณะของการสึกหรอประเภทนี้ดังรูปที่ 4-12 การเร่งให้เกิดการสึกหรอประเภทนี้ คือ การใช้สารหล่อลื่นที่สกปรก การขูดขีดผิวสัมผัสที่มีความแข็ง (Hardness) แตกต่างกันอย่างเกินไป



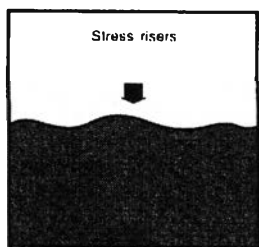
รูปที่ 4-12 แสดงลักษณะการสึกหรอแบบขูดขีด [12]

#### 4.3.2.3 กลไกการสึกหรอจากการล้าตัวของวัสดุ (Fatigue wear)

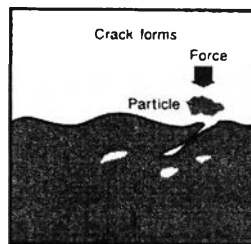
เป็นการล้าตัวและเกิดรอยแตกหรือหลุมบนผิวหน้าวัสดุบริเวณที่มีการล้าตัว ทั้งนี้เนื่องจากชิ้นงานมีการรับภาระเป็นวงรอบ (Stress cycles) การล้าตัวของวัสดุจะมีโอกาสเกิดขึ้นน้อยมาก หากชิ้นงานรับภาระเพียงการกด (Compressive stress) หรือการดึง (Tensile stress) เพียงอย่างเดียวอย่างหนึ่งแต่จะมีโอกาสเกิดการล้าตัวได้เร็วมาก ๆ หากมีการรับภาระสลับกันไปมาระหว่างการกดกับการดึง หรือการรับภาระแบบเป็นวงรอบ ซึ่งท้ายที่สุดจะส่งผลให้ผิววัสดุหลุดร่อนออกไปและทำให้มีรอยสึกหลงเหลือไว้บนผิวชิ้นงาน ลักษณะการเกิดการล้าตัวอีกแบบหนึ่งเกิดจากการมีสิ่งสกปรกในสารหล่อลื่นและทำให้เกิดรอยกด (Dents) ขึ้นบนผิวชิ้นงานก่อนและเมื่อใช้งานไปนาน ๆ รอยกดจะค่อย ๆ แพร่กระจายออกไปเป็นรอยแตก (Crack) เนื่องจากน้ำมันหล่อลื่นเข้าไปอยู่ในรอยกดนั้น ๆ ครั่งแล้วครั่งเล่า และเกิดเป็นหลุมในที่สุดดังแสดงในรูปที่ 4-13

#### 4.3.2.4 กลไกการสึกหรอแบบปฏิกิริยาไทรโบเคมี (Tribochemical reaction)

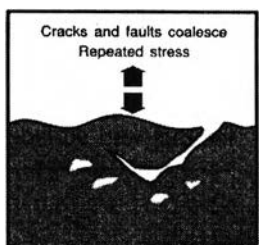
บางครั้งถูกเรียกว่าการสึกหรอแบบไป ๆ กลับ ๆ หรือเฟล็ตติง (Fretting wear) จากชื่อ Tribochemical reaction มีความหมายเบื้องต้น คือ การที่ชิ้นงานต้องมีการขัดสี (Tribo) และเกิดผลพวงจากปฏิกิริยาเคมี (Reaction) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง “ปฏิกิริยาออกซิเดชัน” สามารถอธิบายโดยง่าย ๆ จากการเกิดไทรโบเคมีคอรีแอคชันที่ข้อต่อโซ่ จะมีผลทำให้บริเวณข้อต่อโซ่ดังกล่าวมีการสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive) เมื่อมีการใช้งาน จะทำให้บริเวณข้อต่อโซ่มีการขัดสีกัน (Tribo) ก่อให้เกิดเศษเหล็กตรงจุดนั้น ผ่นวกเข้ากับเกิดความร้อนจากการขัดสี ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี (Catalyst) โดยที่ผงเหล็กที่เกิดขึ้นก็เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีเช่นกัน เพราะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิว (Surface area) ให้ออกซิเจนในอากาศ สามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น เมื่อมีองค์ประกอบหลักคือ เศษเหล็ก ความร้อน ความชื้น (หรือไอน้ำในอากาศ) กับออกซิเจนก็จะทำให้ปฏิกิริยาเคมีที่เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งจะทำให้เกิดเป็นสนิมเหล็ก (Rusty wear powder) และสนิมเหล็กจะมีคุณสมบัติคล้าย ๆ กับฝุ่นละออง คือ มีความแข็งแต่เปราะและจะทำให้เกิดการขูดขีด (abrasive) ตรงบริเวณข้อต่อโซ่ตามมาจนทำให้ข้อต่อโซ่ลดขนาดลงและทนภาระไม่ได้ในที่สุดก็จะขาดชำรุดไป นอกจากข้อต่อโซ่แล้ว อาจเกิดกลไกการสึกหรอชนิดนี้ได้กับเพลลา เฟืองแบบเลื่อนได้ (Spine) แหนบรอกยนต์ และผิวนอกของแบริ่งที่สัมผัสกับตัวเรือน เป็นต้น



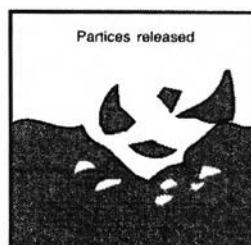
1. First, stresses at component surface develop and lead to elastic deformation and plastic flow of material.



2. Then, small surface micro cracks develop and or just beneath the solid surface during component use.



3. The faults then join to form larger voids undermining component surface



4. surface material then breaks away.

รูปที่ 4-13 แสดงการสึกหรอแบบปฏิกิริยาไตรโบเคมี (Tribochemical reaction) [13]

#### 4.4 สารหล่อลื่น [13]

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

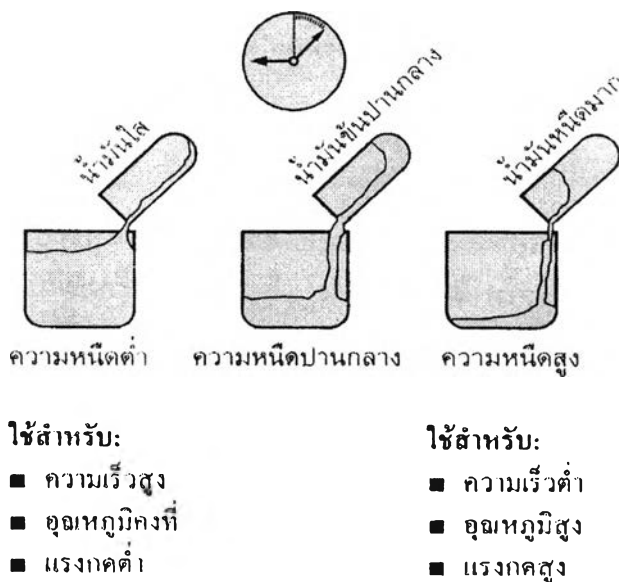
- ก.) ทำหน้าที่เสมือนสารหล่อเย็นที่นำพาความร้อนออกไป (Carries Away Heat) จากชิ้นส่วนที่มีการเคลื่อนที่
- ข.) ทำหน้าที่เสมือนซีล (Sealing) ป้องกันสิ่งสกปรกเข้าไปสู่ชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ เช่น ในกรณีของจาร์บี
- ค.) ป้องกันการกัดกร่อนและสนิม (Preventing Corrosion and Rust) ของผิวชิ้นงานที่เป็นเหล็ก
- ง.) ในบางกรณีก็จะทำหน้าที่ในการส่งถ่ายกำลังเช่นน้ำมันไฮดรอลิกและเนื่องจากสารหล่อลื่นที่เหมาะสมเป็นสิ่งจำเป็นและสำคัญ สิ่งที่สำคัญสูงสุดคือสารหล่อลื่นต้องถูกออกแบบให้ใช้งานในช่วงการทำงานของเครื่องจักรโดยที่มีการเสื่อมหรือสึกหรอ และการสูญเสียคุณสมบัติของสารหล่อลื่นให้น้อยที่สุด

#### 4.4.1 คุณสมบัติที่สำคัญของสารหล่อลื่น

คุณสมบัติที่สำคัญของสารหล่อลื่นประกอบด้วย ค่าความหนืด จุดไหลเท การต่อต้านการเกิดออกซิเดชัน แต่คุณสมบัติที่จะนำมากล่าวถึงในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย คุณสมบัติทางความหนืด และ คุณสมบัติในการต่อต้านการเกิดออกซิเดชัน

##### 4.4.1.1 ความหนืด (Viscosity)

ความหนืดถูกให้ความหมายว่า “เป็นการต้านทานต่อการไหล” ซึ่งเป็นคุณสมบัติหลักที่สำคัญของน้ำมันหล่อลื่น ยิ่งน้ำมันหล่อลื่นมีความสามารถในการต้านทานการไหลมากเท่าใดก็就会有ความหนืดมากเท่านั้น สามารถกล่าวได้ว่าค่าความหนืดเป็นตัวบ่งบอกถึงความสามารถในการไหล (Flowability) ซึ่งโดยเฉพาะน้ำมันหล่อลื่นปิโตรเลียม นั้น ค่าความหนืดจะแปรเปลี่ยนไปตามค่าอุณหภูมิ ยิ่งค่าอุณหภูมิสูงค่าความหนืดจะยิ่งน้อยลง และความสามารถในการไหลจะยิ่งดีขึ้น วิธีการที่ใช้ในการวัดค่าความหนืดในห้องทดลองนั้นก็จะใช้วิธีการตามมาตรฐานขององค์การระหว่างประเทศโดยความร่วมมือของ ASTM (American Society for Testing and Materials) และ STLE (Society of Tribologists and Lubrication Engineers) ใช้กันโดยทั่วไปในหน่วยของ SI ซึ่งตั้งอยู่บนพื้นฐานของการวัดค่าความหนืดในหน่วยเซนติสโตค (cSt.) ที่อุณหภูมิ 40°C



รูปที่ 4-14 ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นกับการใช้งาน [12]

น้ำมันหล่อลื่นที่หนืดมาก ๆ จะถูกใช้กับชิ้นส่วนเครื่องจักรที่เคลื่อนที่ช้า ๆ ภายใต้อภาระสูง ๆ ทั้งนี้เนื่องจากน้ำมันหล่อลื่นจะทนทานต่อการถูกบีบออกไปจากผิวสัมผัส ส่วนน้ำมันที่มีความหนืดน้อย ๆ จะถูกนำมาใช้กับชิ้นงานที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง ๆ ที่ค่าภาระต่ำ (รูปที่ 4-14 )

#### 4.4.1.2 การต่อต้านการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation resistance)

น้ำมันหล่อลื่นเป็นส่วนผสมที่ซับซ้อนระหว่างอะตอมของไฮโดรเจนกับคาร์บอน เรียกว่าส่วนผสมของไฮโดรคาร์บอน ส่วนใหญ่แล้วแบ่งเป็น 3 ส่วนใหญ่ ๆ คือ แบบพาราฟินิก แนพทาสิก และอะโรมาติก ซึ่งแต่ละแบบจะมีคุณสมบัติแตกต่างกัน นักเคมีมักเรียกน้ำมันปิโตรเลียมฐานแร่ที่ส่วนใหญ่เป็น 2 ส่วนหลัก คือ พาราฟินิก และแนพทาสิก ว่า “สารหล่อลื่นอิ่มตัว” (Saturated) และสำหรับ อะโรมาติกว่าเป็น “สารหล่อลื่นไม่อิ่มตัว” (Unsaturated)

สารไฮโดรคาร์บอนที่อยู่ในชั้นหรือระดับเดียวกันจะมีโครงสร้างทางเคมีเหมือนกัน แต่จะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันไปเป็นอย่างมาก ในแต่ละกลุ่มอาจจะมีสถานะเป็นของแข็ง - ของเหลวและก๊าซได้ สถานะที่เป็นของเหลว ซึ่งเป็นส่วนที่นำมาใช้ประโยชน์มากที่สุด และมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติไปมากในสถานะต่างๆ อาจจะมีผลต่อสมรรถนะในการหล่อลื่น โดยที่ไม่ต้องพิจารณาถึงองค์ประกอบน้ำมันหล่อลื่นที่จะถูกใช้งานในอนาคต ความร้อน และออกซิเจนทำให้เกิดปฏิกิริยาที่เกิดองค์ประกอบที่ไม่ดีต่อน้ำมันหล่อลื่น กระบวนการดังกล่าวนี้ถูกเรียกว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชัน และสารประกอบที่เกิดขึ้นก็เป็นผลผลิตของปฏิกิริยาออกซิเดชัน ออกซิเดชันจะเกิดขึ้นช้าๆ อย่างต่อเนื่องตลอดเวลาใช้งานของน้ำมันหล่อลื่น อย่างไรก็ตาม การเกิดการปั่นกววนจนเกิดฟอง การฉีกฟิล์ม และการที่เกิดมีค่าอุณหภูมิสูงๆ โดยเฉพาะจุดที่มีความร้อนสูงเพียงจุดเล็กๆ จะมีผลทำให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันยิ่งเกิดเร็วขึ้น ทำให้เกิดสารประกอบที่เป็นกรดและทำให้เกิดตะกอนและคราบเหนียว

โดยความเป็นจริงแล้วทุก ๆ  $10^{\circ}\text{C}$  ( $18^{\circ}\text{F}$ ) ที่เพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ น้ำมันหล่อลื่นที่เกินกว่า  $70^{\circ}\text{C}$  อัตราการเกิดออกซิเดชันจะเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า การที่จะลดปฏิกิริยาออกซิเดชันลงนั้น ต้องพยายามควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ระหว่าง  $60$  ถึง  $70^{\circ}\text{C}$  ( $140$  ถึง  $150^{\circ}\text{F}$ ) ดังนั้นจึงเป็นข้อแนะนำให้ใช้น้ำมันหล่อลื่นที่มีความสามารถในการต่อต้านออกซิเดชันกับเครื่องยนต์เทอร์โบไบนและระบบการไหลเวียนน้ำมันหล่อลื่นขนาดใหญ่ๆ ทั้งนี้เพราะว่าน้ำมันหล่อลื่นจะสามารถทนได้กับระดับอุณหภูมิสูงๆ ภายในช่วงเวลายาวนานกว่าการใช้น้ำมันแบบธรรมดา น้ำมันหล่อลื่นดังกล่าวมักมีราคาแพง ทั้งนี้เนื่องจากว่าต้องถูกกลั่นด้วยกรรมวิธีพิเศษและมีการเติมด้วยสารปรุงแต่งที่รู้จักกันในชื่อ Oxidation Inhibitor เพื่อเพิ่มความสามารถในการต่อต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน น้ำมันหล่อลื่นที่มีความสามารถในการต่อต้านออกซิเดชันต่ำนั้น ควรใช้กับการหล่อลื่นในช่วงสั้นๆ เช่น กรณีการหล่อลื่นแบบใช้แล้วทิ้งไป หรือเมื่อมีการเติมน้ำมันหล่อลื่นลงไปบ่อยๆ ปกติแล้ว Additive Packages นี้มักรวมอยู่ในน้ำมันที่มี R & O Inhibitor อยู่แล้ว

#### 4.5 การวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว [13]

สารหล่อลื่นที่ใช้ในเครื่องยนต์หรือในที่นี้จะเรียกว่า น้ำมันหล่อลื่น จากการวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วและน้ำมันหล่อลื่นที่อยู่ระหว่างการใช้งาน จะทำให้ทราบว่า น้ำมันหล่อลื่นยังอยู่ในเกณฑ์ที่ใช้งานได้หรือไม่ และจะทำให้ทราบถึงช่วงเวลาในการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ ผลการวิจัยจะบ่งถึงสภาวะที่น่าจะทำให้เกิดอันตรายแก่เครื่องยนต์รวมทั้งระยะเวลาที่เหมาะสมในการเปลี่ยนถ่าย และทำให้ทราบถึงสาเหตุของปัญหาของความเสียหายที่เกิดขึ้นและทำให้แก้ปัญหาและป้องกันได้อย่างถูกต้อง

##### 4.5.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วจากเครื่องยนต์ แบ่งตามขั้นตอนได้ดังนี้

###### 4.5.1.1. การสุ่มตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นจากเครื่องยนต์

การสุ่มตัวอย่างจะต้องกระทำขณะเครื่องยนต์ทำงาน และมีอุณหภูมิถึงระดับอุณหภูมิการใช้งานของเครื่องยนต์ เพื่อให้ น้ำมันหล่อลื่นมีการชะโลมเข้ากับส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องยนต์และไหลเวียนไปทั่วระบบหล่อลื่น ส่วนขวดพลาสติกที่ใช้ในการสุ่มตัวอย่าง น้ำมันหล่อลื่นควรจะใช้ชนิดที่ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำมันหล่อลื่น แห้งและสะอาด ฝาปิดขวดจะต้องทำด้วยวัสดุที่ไม่หลุดร่อน (Non shedding material) การเก็บน้ำมันหล่อลื่นลงในขวดพลาสติกจะต้องไม่เก็บจนเต็มขวด เนื่องจากจะต้องมีช่องว่างในน้ำมันหล่อลื่นไหลผสมตัวของน้ำมันหล่อลื่นเองได้

###### 4.5.1.2 วิธีการตรวจสอบคุณสมบัติเบื้องต้น

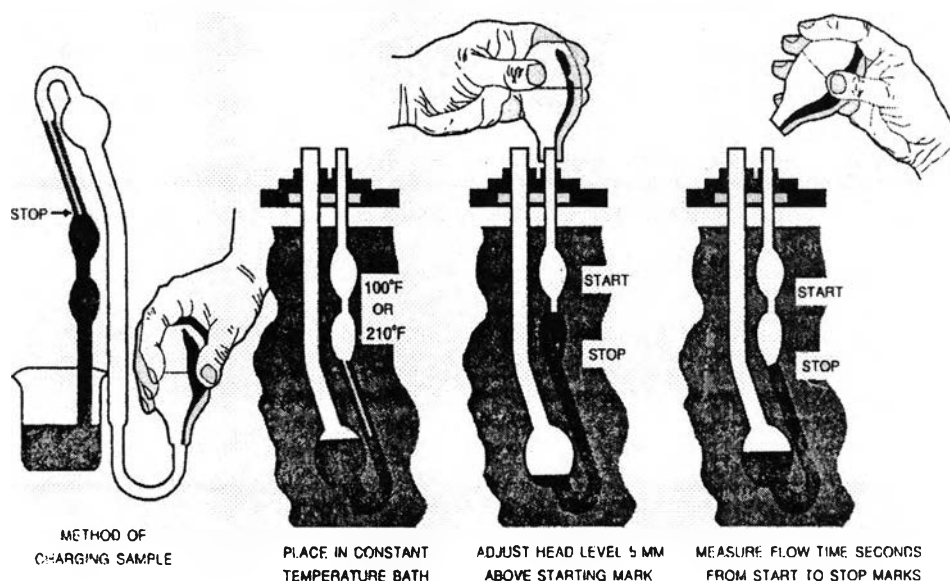
เช่น สี กลิ่น ความหนืดและปริมาณน้ำที่ปนในน้ำมันหล่อลื่น ด้วยวิธีการทดสอบเบื้องต้นในภาคสนาม

###### 4.5.1.3 การวิเคราะห์ตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ เพื่อ

- a) หาค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น
- b) หาตัวเลขรวมของความเป็นด่าง (TBN)
- c) หาค่าปริมาณธาตุกลุ่มที่มาจากการสึกหรอและจากสารปรุงแต่งที่อยู่ในน้ำมันหล่อลื่น โดยวิธีสเปกโตรมิเตอร์
- d) หากการเกิดออกซิเดชัน และสารปนเปื้อน โดยวิธี FTIR
- e) หาลักษณะรูปร่างและขนาดของเศษเหล็กโดยเทคนิคเฟอร์โรกราฟี

#### 4.5.2 การทดสอบหาค่าความหนืด

ค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น คือการวัดความต้านทานในการไหลของน้ำมันหล่อลื่นนั้นๆ สำหรับน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์จะมีข้อกำหนดจำเพาะมาตรฐานระหว่างประเทศอยู่หลายมาตรฐาน ซึ่งอาจจะต้องทำการวัดค่าความหนืดคืนเพิ่มเติมอีกหลายช่วงอุณหภูมิ เช่นที่ 20 °C , -10 °C และ 100 °C (เช่น กรณีของการกำหนดเกรดน้ำมันของ SAE : Society of Automotive Engineers) แต่อย่างไรก็ตามการทดสอบความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วสำหรับเครื่องยนต์และเครื่องจักรกลทั่วไปนั้นก็จะทำเฉพาะที่ 40° C และ 100°C เท่านั้น ค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นที่เปลี่ยนไปนั้นก็มีผลมาจากหลายองค์ประกอบ ซึ่งอาจจะทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ได้ ตัวอย่างเครื่องมือวัดความหนืดน้ำมันหล่อลื่นแสดงดังรูปที่ 4-15



รูปที่ 4-15 แสดงเครื่องมือวัดความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น (ASTM D-445) [13]

#### กรณีที่ความหนืดเพิ่มขึ้น

สำหรับในน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์นั้นเมื่อมีคราบสิ่งสกปรกหรือสารประกอบที่เกิดจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน จะทำให้น้ำมันหล่อลื่นมีค่าความหนืดเพิ่มสูงขึ้น หากมีการปะปนของสิ่งสกปรกแขวนลอยที่เป็นของแข็งในน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์จะทำให้ค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มสูงขึ้น เช่น ของแข็งแขวนลอยที่มีปริมาณเกินกว่า 5% โดยน้ำหนัก ในน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ดีเซลจะทำให้้ำมันมีความหนืดสูงมากและทำให้เกิดปัญหาในการสตาร์ท การอุดตันในไส้กรองและส่งผลต่อการขาดสารหล่อลื่นจนทำให้เครื่องยนต์ชำรุดได้



### กรณีที่มีความหนืดลดลง

ในกรณีของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์หากมีการเจือจางด้วยน้ำมันเชื้อเพลิง จะทำให้มีการลดค่าความหนืดของน้ำมันลดลงเป็นอย่างมาก หรือการเกิดการตัดเฉือนตัวของสายใยโพลีเมอร์ในน้ำมันหล่อลื่นชนิดเกรดรวมในกรณีการใช้งานของเครื่องยนต์หนัก ก็จะมีผลในการที่ทำให้ความหนืดของน้ำมันลดลงได้เช่นเดียวกัน

#### 4.5.3 ค่าตัวเลขความเป็นต่างรวม (TBN)

ค่าตัวเลขความเป็นต่างรวม (TBN = Total Base Number) (ASTM D664 D2896, IP177, IP276) ค่า TBN เป็นการวัดค่าความเป็นต่างที่ยังคงมีอยู่ในน้ำมันหล่อลื่น เช่น น้ำมันหล่อลื่นในอ่างน้ำมันเครื่อง ต้องตรวจสอบค่า TBN และติดตามอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเรือเดินทะเลและเครื่องยนต์ เมื่อมีความสงสัยว่าคุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิงหรือก๊าซธรรมชาติมีคุณภาพไม่ดี หากใช้น้ำมันเชื้อเพลิงประเภทที่มีค่าปริมาณกำมะถันสูงจะทำให้ค่าความเป็นต่างของน้ำมันถูกทำลายลงไปและจะเป็นอันตรายต่อเครื่องยนต์เมื่อน้ำมันเครื่องยนต์ไม่มีความสามารถในการต่อต้านกรดที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสันดาปภายใน ในกรณีของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ค่าความเป็นต่างรวม ระหว่างการใช้งานนั้น ค่าของตัวเลขความเป็นต่างรวมจะมีการลดระดับลงแสดงให้เห็นว่าน้ำมันมีความเป็นกรดสูงขึ้นซึ่งจะทำให้สามารถคาดคะเนได้ว่าควรจะทำกรเปลี่ยนน้ำมันเครื่องยนต์เมื่อใด

#### 4.5.4 การวิเคราะห์ด้วยสเปคโตรมิเตอร์

ในการวิเคราะห์ด้วยสเปคโตรมิเตอร์จะสามารถหาธาตุในน้ำมันหล่อลื่นได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งจะทำให้ได้ค่าความแม่นยำอยู่ที่ระดับ  $\pm 10\%$  ของค่าที่ระบุเอาไว้ในการทดสอบ ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้สำหรับการทดสอบโดยทั่วไป

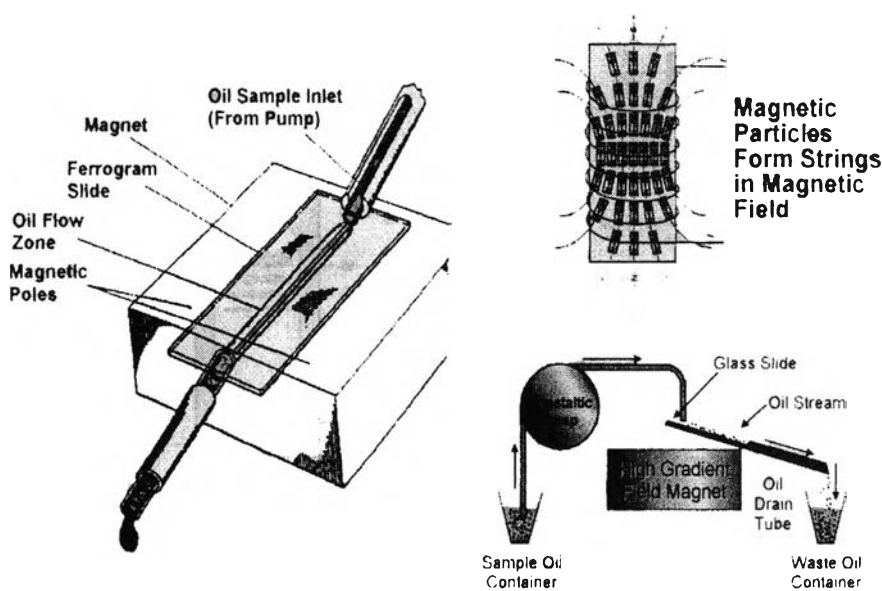
สเปคโตรมิเตอร์จะถูกนำไปใช้ในการตรวจวิเคราะห์หาค่าโลหะจากสารปรุงแต่ง (Additives) ได้แก่ แบริยม, แคลเซียม, สังกะสี, ฟอสฟอรัส, โบรอน และโลหะหรือธาตุที่มาจากการสึกหรอ (Wear Metals) จะสามารถวิเคราะห์หาธาตุ ซึ่งธาตุเหล่านั้นได้แก่ เหล็ก, อลูมิเนียม และทองแดง สรุปความหมายจากปริมาณที่วิเคราะห์ได้ดังนี้

หากพบปริมาณเหล็กในระดับสูงๆ ย่อมเป็นสิ่งที่แสดงว่ามีระดับการสึกหรอของแหวนลูกสูบและปลอกแหวนและหากมีระดับของค่าเหล็กมีค่าสูงเกินกว่า 600 ppm จะทำให้เกิดอันตรายต่อชิ้นส่วนในระดับการทำงานปกติ หากพบปริมาณอลูมิเนียมในระดับสูงๆ แสดงว่ามีระดับการสึกหรอของลูกสูบและหากมีค่าของอลูมิเนียมเกินกว่า 75 ppm จะทำให้เกิดอันตรายต่อชิ้นส่วนในระดับการทำงานปกติ หากพบปริมาณทองแดงในระดับสูงๆ

แสดงว่ามีระดับการสึกหรอของแบร็งที่มีส่วนผสมของทองแดงและตะกั่ว และหากมีค่าของทองแดงและตะกั่วที่สูงกว่า 75 ppm ถือได้ว่าการสึกหรออยู่ในระดับค่อนข้างที่จะเป็นอันตรายต่อชิ้นส่วนส่วนปริมาณของตะกั่วในน้ำมันหล่อลื่นของเครื่องยนต์ดีเซลควรจะมีค่าต่ำกว่า 25 ppm

#### 4.5.5 การวิเคราะห์ด้วยวิธีเฟอร์โรกราฟี (Ferrography)

เทคนิคเฟอร์โรกราฟีเป็นหลักในการวิเคราะห์เศษโลหะ (โดยเฉพาะเหล็กหรือวัสดุที่แม่เหล็กดูดได้) ที่ปะปนอยู่ในน้ำมันหล่อลื่น วิธีการนี้สามารถใช้เพื่อระบุแยกแยะและวิเคราะห์เศษโลหะจากการสึกหรอในน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วโดยหลักการของการใช้อำนาจสนามแม่เหล็กดูดเศษเหล็กจากลำการไหลของน้ำมันหล่อลื่นที่ไหลผ่านสไลด์ ดังแสดงในรูปที่ 4-16

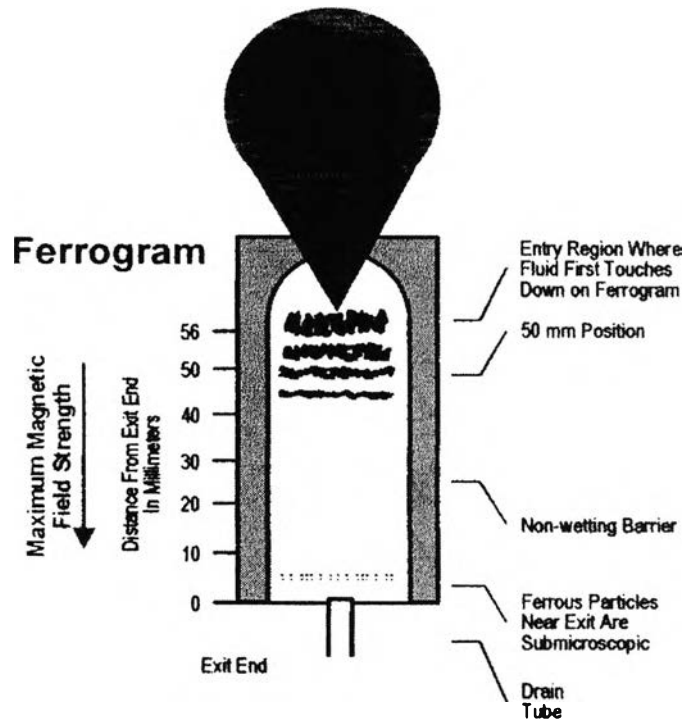


รูปที่ 4-16 แสดงกระบวนการเฟอร์โรกราฟี [13]

โดยเศษเหล็กจะถูกแยกออกด้วยสนามแม่เหล็ก ซึ่งจะเรียงตัวตามขนาดใหญ่ไปหาเล็กและมีแนวโน้มการวางตัวตามทิศทางของสนามแม่เหล็ก ซึ่งเศษโลหะที่มีขนาดใหญ่จะเกาะติดบนแผ่นสไลด์ก่อนและเรียงขนาดจนถึงขนาดเล็กที่สุดตรงปลายของแผ่นสไลด์ แสดงในรูปที่ 4-17

การวิเคราะห์ขั้นตอนต่อไปคือการนำแผ่นสไลด์ มาส่องโดยกล้องจุลทรรศน์เพื่อการศึกษาถึงขนาดและรูปร่างของเศษโลหะ ทำให้ทราบถึงระดับความรุนแรงของการสึกหรอจากขนาดของอนุภาคและกลไกการสึกหรอ เช่น การสึกหรอแบบยึดติด แบบขูดขีด แบบล้าตัว หรือแบบการกัดกร่อน เป็นต้น

เฟอร์โรกราฟฟีเป็นวิธีการอย่างหนึ่งที่ง่ายและรวดเร็วในการแยกเอาเศษอนุภาค การสึกหรอออกจากน้ำมันหล่อลื่น อนุภาคการสึกหรอจากกลไกการสึกหรอชนิดต่างๆ จะมีคุณลักษณะหรือรูปร่างเฉพาะตัวจึงสามารถที่จะระบุได้ว่าเป็นกลไกการสึกหรอประเภทใด เช่น



รูปที่ 4-17 แสดงแผ่นสไลด์ที่ใช้ในกระบวนการเฟอร์โรแกรม [13]

- ก. กรณีที่อนุภาคการสึกหรอที่เกิดขึ้นจากการขัดถูหรือการยึดติด (Rubbing and Adhesive wear) จะมีลักษณะรูปร่างเป็นแผ่นๆ ซึ่งจะบอกให้ทราบว่าเป็นสภาวะปกติของเครื่องยนต์
- ข. กรณีที่อนุภาคการสึกหรอจากการมีกลไกการขูดขีดแบบเป็นร่องหรือการขูดตัด (Abrasive or cutting wear) จะทำให้เกิดอนุภาคสึกหรอที่มีรูปร่างเป็นขีดหรือเส้นเหมือนเส้นด้าย ซึ่งจะบอกให้ทราบว่าเป็นสภาวะของการสึกหรอของเครื่องยนต์
- ค. กรณีที่อนุภาคการสึกหรอจากลักษณะของเศษโลหะที่มีรูปร่างเป็นเส้นด้ายเพิ่มขึ้นมากก็แสดงว่าเครื่องยนต์จะมีโอกาสชำรุดใกล้เข้ามาแล้ว

#### 4.5.5.1 การวิเคราะห์อนุภาคการสึกหรอ (Wear Particle Analysis)

การตรวจสอบอนุภาคจากการสึกหรอแบ่งออกเป็น 4 ลักษณะใหญ่ๆ คือ

- ก. ตรวจสอบขนาดของอนุภาค อนุภาคการสึกหรอที่เกิดขึ้นเนื่องจากกลไกการสึกหรอชนิดต่างๆกัน จะมีขนาดที่แตกต่างกันไป ขนาดที่แตกต่างกันนี้พอที่จะนำมาเป็นข้อวินิจฉัยในการประเมินสภาพของเครื่องยนต์ได้
- ข. ตรวจสอบรูปร่างของอนุภาค รูปร่างของอนุภาคการสึกหรอจะเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญในการบ่งชี้ให้เห็นถึงกลไกการสึกหรอ ซึ่งกลไกการสึกหรอที่ต่างกันจะทำให้เกิดอนุภาคการสึกหรอที่ต่างกัน
- ค. ตรวจสอบการกระจายทางสถิติของขนาดของอนุภาคการสึกหรอ การศึกษาถึงลักษณะของ Particle Size Distribution ซึ่งถือได้ว่ามีความสำคัญอย่างยิ่งในการศึกษาอนุภาคการสึกหรอ และการกระจายตัวของขนาดของอนุภาคการสึกหรอ ก็ถือได้ว่าเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญในการประเมินประสิทธิภาพของเครื่องยนต์
- ง. ตรวจสอบองค์ประกอบของอนุภาคการตรวจสอบองค์ประกอบของอนุภาคการสึกหรอนั้นนับได้ว่าเป็นสิ่งที่มีความสำคัญที่ทำให้ทราบว่าอุปกรณ์หรือชิ้นส่วนใดของเครื่องยนต์สึกหรอบ้าง

#### 4.5.5.2 การศึกษาอนุภาคการสึกหรอเชิงจุลภาค (Wear Particle Microscopic Examination)

- ก. การศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Optical Microscope) ใช้ในการตรวจตัวอย่างของอนุภาคการสึกหรอที่เก็บตัวอย่างสารหล่อลื่นที่สูมมาจากเครื่องยนต์
- ข. การศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope: SEM) เหตุผลที่ใช้กล้องชนิดนี้มาแทนกล้องจุลทรรศน์ชนิดธรรมดา เนื่องจากกล้องจุลทรรศน์โดยทั่วไปจะมีจุดด้อยตรงที่ไม่สามารถให้กำลังขยายที่สูงมากๆได้ และยังไม่สามารถที่จะขยายภาพเพื่อศึกษา ณ จุดใดๆที่ต้องการได้อย่างชัดเจนเท่าที่ต้องการ
- ค. การศึกษาด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ (Image Analysis) ซึ่งนับได้ว่าการศึกษานิดนี้เป็นการรวมเอาเทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีด้านการใช้กล้องจุลทรรศน์เข้าด้วยกัน เช่น สามารถตรวจ

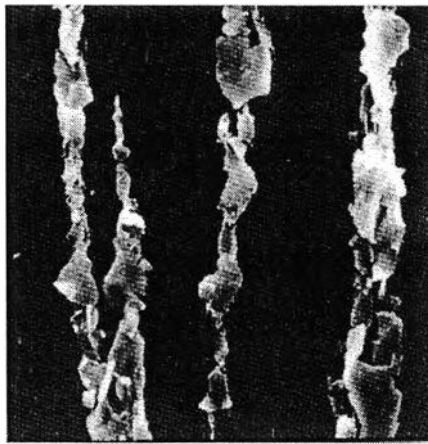
ตัวอย่างอนุภาคการสึกหรอด้วยกล้องจุลทรรศน์และสามารถถ่ายทอดสัญญาณภาพไปยังคอมพิวเตอร์ที่มีโปรแกรมในการวิเคราะห์ผลได้

#### 4.5.5.3 ชนิดของอนุภาคการสึกหรอ

ชนิดอนุภาคการสึกหรอแบ่งออกได้เป็น 7 ชนิดดังนี้

##### ก. การเสียดสีกันของโลหะกับโลหะ (Rubbing Wear Particle)

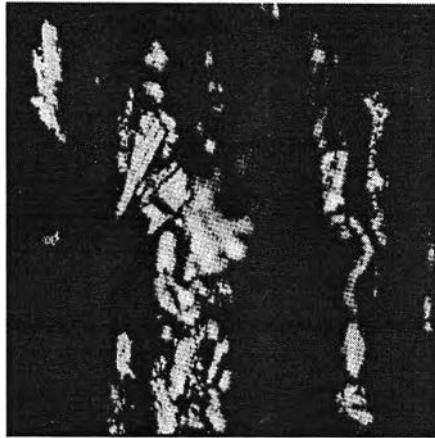
อนุภาคจะมีลักษณะอัตราส่วนระหว่างความยาวกับความหนาที่มีค่าสูง ซึ่งถือได้ว่าเป็นการสึกหรอที่น้อยมาก อนุภาคโดยทั่วไปมีขนาดเล็กกว่า 15 ไมครอน หากระบบหล่อลื่นเกิดความสกปรกจะทำให้เกิดการเสียดสีกันของโลหะกับโลหะโดยจะทำให้อัตราการเกิดเพิ่มอย่างทันทีทันใด อาจจะมีอยู่ในรูปของขนาดอนุภาคที่เพิ่มขึ้นในบางครั้งอนุภาคที่โตกว่า 100 ไมครอน ดังรูปที่ 4-18



รูปที่ 4-18 แสดงอนุภาคการสึกหรอที่เกิดจากการเสียดสีกันของโลหะกับโลหะ [13]

##### ข. การสึกหรอที่เกิดจากการเสียดสีรุนแรงในเครื่องจักร (Severe Sliding Wear Particle)

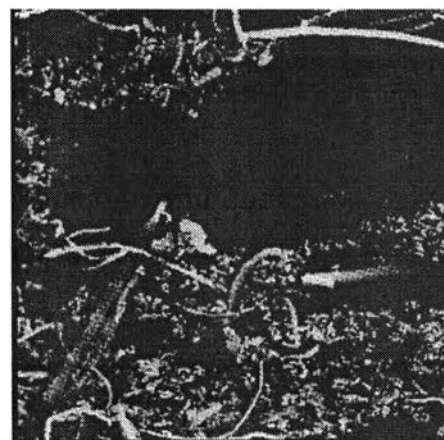
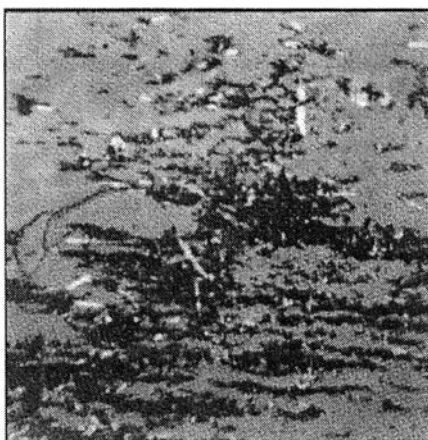
ซึ่งมีสาเหตุมาจากการใช้งานที่ภาระสูงเกินไป การใช้ความเร็วที่สูงเกินไป การขาดสารหล่อลื่น มีผลทำให้เกิดการยึดติดของวัสดุ อนุภาคการสึกหรอแบบนี้จะมีขนาดโตกว่า 100 ไมครอน หากเครื่องจักรทำงานภายใต้สภาวะที่รับภาระมากเกินไป ความเร็วในการเสียดสีเพิ่มขึ้น และหากระบบการหล่อลื่นที่ไม่ดี อนุภาคจะมีขนาดโตกว่าอนุภาคของการเสียดสีของโลหะกับโลหะ ซึ่งมีขนาดโตกว่า 20 ไมครอน อนุภาคที่เกิดขึ้นจะเป็นสีน้ำตาล สีน้ำตาล สาเหตุที่เกิดเป็นสีน้ำตาลและสีน้ำตาลเนื่องมาจากความร้อนที่มากเกินไปจึงทำให้สีของอนุภาคจะเริ่มเปลี่ยนจากสีฟางข้าวไปเป็นสีน้ำตาลและกลายเป็นสีน้ำตาล ดังรูปที่ 4-19



รูปที่ 4-19 แสดงอนุภาคการสึกหรอที่เกิดจากการเสียดสมดุลงในเครื่องจักร  
(Severe Sliding Wear Particle) [13]

ค. อนุภาคการสึกหรอจากการขีดขูดของเศษโลหะ (Cutting Wear Particles)

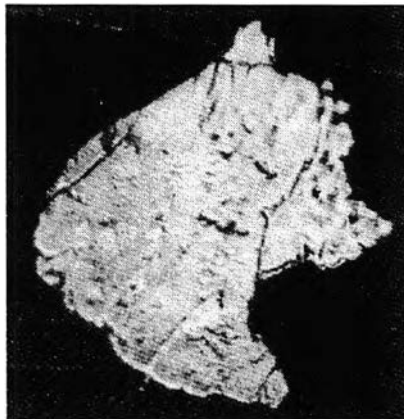
เป็นผลสืบเนื่องมาจากที่มีการสึกหรอแบบ Abrasive ซึ่งทำให้เกิดอนุภาคการสึกหรอที่มีลักษณะเป็นเส้นคล้ายเศษกลิ้ง เกิดจากผิวถูกการทะลุผ่าน การถูด้วยวัสดุคล้ายคันไถหรืออาจถูกตัดด้วยสิ่งหนึ่งทำให้เกิดค่าความแข็งที่แตกต่างกัน อนุภาคจะมีความยาวเฉลี่ยตั้งแต่ 5 ไมครอนจนถึงความยาวมากกว่า 100 ไมครอน และมีความกว้างเฉลี่ยตั้งแต่ 2 ไมครอนจนถึง 15 ไมครอน ดังรูปที่ 4-20 อนุภาคจะมีสีที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากความร้อน สีที่เกิดขึ้นได้แก่ น้ำเงิน แดงและสีฟ้า ซึ่งอนุภาคชนิดนี้จะเป็นสิ่งที่บ่งบอกถึงอนุภาคที่ไม่ปกติ และสามารถที่จะบ่งบอกถึงสภาพการชำรุดของเครื่องจักรว่าจะถึงเวลาที่ชำรุดแล้ว



รูปที่ 4-20 แสดงอนุภาคการสึกหรอแบบ Cutting Wear [13]

### ง. อนุภาคการสึกหรอจากการล้าที่เกิดกับเฟืองและพื้นที่สัมผัสของดัลับลูกปืน (Ferro Fatigue Particle)

อนุภาคการสึกหรอที่เกิดจากการล้าบนเฟือง (Gear Fatigue Particle) ดังรูปที่ 4-21 แบ่งออกเป็นกรกั้งและการถูกไปบนผิวของฟันเฟือง ซึ่งในตอนแรกอนุภาคการสึกหรอที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นผิวเรียบ รูปร่างของอนุภาคจะมีลักษณะที่ผิดปกติโดยมีขอบที่คม และมีอัตราส่วนของความยาวต่อความหนาประมาณ 10:1 หากความเค้น (Stress) บนผิวสัมผัสเพิ่มขึ้นอัตราส่วนของความยาวต่อความหนาจะมีค่าลดลง ซึ่งจะทำให้ปริมาณการเกิดก่อนอนุภาคลดลงด้วย ซึ่งอนุภาคจะมีขนาดเล็กมากและเป็นการยากที่จะทำการหาจุดไฟกัสน์ ในการดูอนุภาคที่เกิดขึ้นด้วยกล้องจุลทรรศน์

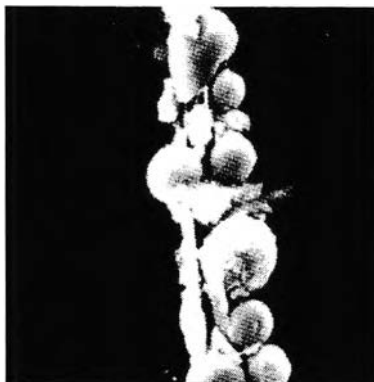


รูปที่ 4-21 แสดงอนุภาคการสึกหรอที่เกิดจากการล้าบนเฟือง (Gear Fatigue Particle) [13]

อนุภาคการสึกหรอที่เกิดจากการล้าตัวของวัสดุ (Rolling Fatigue Wear Particle) ดังรูปที่ 4-22 การล้าตัวของวัสดุจะมีการหลุดร่อนออกมาเป็นอนุภาคการสึกหรอ เช่น การเกิดการล้าตัวของเม็ดลูกปืนหรือรางในของเสื่อดัลับลูกปืน ซึ่งโดยปกติจะมีขนาดโตกว่า 75 ไมครอน และจะมีลักษณะรูปร่างที่แตกต่างไป จากอนุภาคการสึกหรอที่ได้กล่าวมาแล้ว

อนุภาคที่เกิดขึ้นในลักษณะที่แตกต่างกันเช่นอนุภาคทรงกลม อนุภาคที่เป็นชิ้นเล็กๆซึ่งอนุภาคที่เป็นทรงกลมจะเกิดมาจากความล้าที่เกิดขึ้นภายในดัลับลูกปืน แล้วจึงเกิดการแตกออกมาเป็นชิ้นเล็กๆ ซึ่งมีขนาดของอนุภาคประมาณ 1 ถึง 10 ไมครอน และจะทำให้ปริมาณของอนุภาคมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในขณะที่เครื่องยนต์กำลังทำงาน ซึ่งจะเป็นสิ่งที่บ่งบอกให้รู้ว่า จะเกิดการเสียหายขึ้นในไม่ช้า อนุภาคที่เป็นทรงกลมเกิดขึ้นได้จากการกัดกร่อนเป็นโพรง (Cavitations Erosion) กระบวนการเชื่อม กระบวนการขบกันของเฟือง ซึ่งขนาดของอนุภาคที่เกิดขึ้นมาจากกระบวนการดังกล่าวมาแล้วจะมีขนาดใหญ่ ซึ่งจะอยู่ในช่วง 10 ถึง 100 ไมครอน

อนุภาคการล้าที่มีลักษณะเป็นชิ้นเล็กๆ จะหลุดแยกตัวออกมาจากผิวที่เป็นหลุมนั้น จะมีขนาดค่อนข้างโตถึงประมาณ 100 ไมครอน อนุภาคที่เป็นแผ่นบางๆ จะเกิดมาจากช่องว่างระหว่างผิวในของแบร็ง จะมีขนาดของอนุภาคประมาณไม่เกิน 70 ไมครอน และมีอัตราส่วนของความยาวต่อความหนาประมาณ 40:1



รูปที่ 4-22 แสดงอนุภาคสึกหรอที่เกิดจากการล้าตัวของวัสดุ (Rolling Fatigue Wear Particle)[13]

#### จ. อนุภาคการสึกหรอที่เกิดจากการล้าตัวของระบบเกียร์ (Combined Rolling and Sliding Wear Particles)

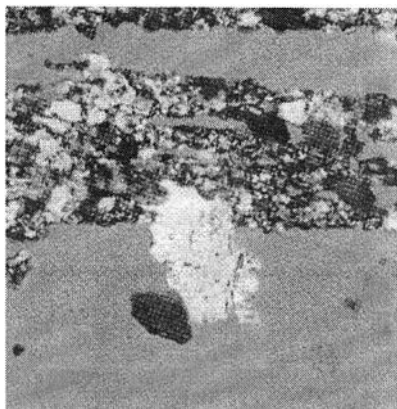
การที่อนุภาคการสึกหรอแบบนี้มีความแตกต่างจากอนุภาคการสึกหรอแบบอื่นๆ เนื่องจากเกียร์มีการเคลื่อนที่ทั้งแบบไถล และแบบหมุน (Both Sliding and Rolling Mode)

#### ฉ. อนุภาคของโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก

ลักษณะการเกิดอนุภาคการสึกหรอจากโลหะที่ไม่ใช่เหล็กนั้น บ่อยครั้งที่มีลักษณะพิเศษคล้ายกับการเกิดอนุภาคของโลหะที่เป็นเหล็ก เช่น การสังเกตเห็นลักษณะเด่นของ Rubbing Wear, Cutting Wear และการเสียดสีกันภายใต้ความเค้นสูง (High Stress Sliding) แต่มีสิ่งหนึ่งที่สามารถทำการแยกแยะให้เห็นได้อย่างชัดเจนสำหรับอนุภาคของโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก คือสีของอนุภาค ดังนี้

อนุภาคของทองแดง แสงสะท้อนที่ปรากฏของอนุภาคของทองแดง จะเป็นสีชมพู ซึ่งขนาดของอนุภาคจะอยู่ในช่วง 2 ถึง 100 ไมครอน และรูปร่างของอนุภาคการสึกหรอจะขึ้นอยู่กับวิธีการเกิดอนุภาค ดังรูปที่ 4-23 ในบางครั้งอนุภาคของทองแดงจะพบว่าเชื่อมติดกับวัสดุทั้งสองที่สัมผัสกัน





รูปที่ 4-23 แสดงอนุภาคการสึกหรอของทองแดง [13]

อนุภาคของทองเหลือง หรืออาจเรียกว่าทองสัมฤทธิ์ (Bronze) แสงสะท้อนที่ปรากฏของอนุภาคทองเหลืองจะเป็นสีเหลืองทอง ส่วนอนุภาคของทองสัมฤทธิ์ สีจะมีดกว่าเป็นสีเหลือง - ชมพู

อนุภาคโครเมียม แสงสะท้อนที่ปรากฏของอนุภาคจะเป็นสีเงิน โดยปกติแล้วอนุภาคที่เกิดขึ้นจะมีผิวเรียบ และจะมีขนาดของอนุภาคที่ต่ำกว่า 50 ไมครอน

อนุภาคของนิกเกิล จะมีลักษณะคล้ายกับอนุภาคของโครเมียม แสงสะท้อนที่ปรากฏของอนุภาคจะมีสีเงิน แต่เนื่องจากอนุภาคของนิกเกิลมีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็ก ฉะนั้นเราจึงพบอนุภาคของนิกเกิลในวงแหวนของแบริ่ง

อนุภาคของอลูมิเนียม แสงสะท้อนที่ปรากฏของอนุภาค จะมีสีเทาเงิน อนุภาคจะมีผิวที่หยาบ และขนาดของอนุภาคไม่อาจจะระบุได้ ซึ่งโดยปกติแล้วจะมีขนาดใหญ่ประมาณ 25 ถึง 500 ไมครอน

#### ซ. อนุภาคการสึกหรอจากวัสดุอื่นๆ

อนุภาคการสึกหรอจากวัสดุอื่นๆ เช่น ออกไซด์ของโลหะผลึกที่ไม่ใช่โลหะ และโลหะอสัณฐาน ซึ่งคุณสมบัติและลักษณะอนุภาคได้แสดงไว้ในตารางที่ 4-4

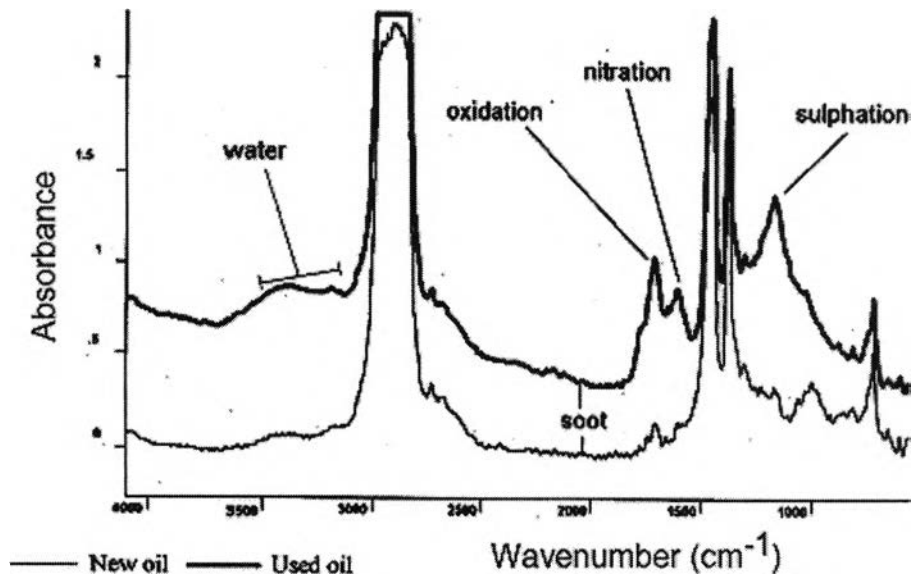
ตารางที่ 4-4 แสดงคุณสมบัติของอนุภาคการสีหรือจากวัสดุชนิดอื่นๆ ที่ไม่ใช่โลหะ และ  
อโลหะอสังฐาน [13]

ชนิดของอนุภาค	ผลจากแสงสะท้อน ของอนุภาค	การกระจายแสงบน ฉากรองรับสีเทา	การกระจายแสงบน ฉากรองรับสีดำ
ออกไซด์ (เหล็ก)	แสงสะท้อนเป็นสี น้ำตาลบนฉากรองรับ สีขาว	เกิดสีส้ม - น้ำตาลบน ฉากรองรับสีเทา	แสงสว่างสีส้ม-น้ำตาล บนฉากรองรับสีดำ
ผลึกของอโลหะ (ซิลิกา [silica])	แสงสะท้อนเป็นสีเทา บนฉากรองรับสีขาว	เกิดสีขาว/เงินบนฉาก รองรับสีเทา	เกิดสีขาว/เงินบนฉาก รองรับสีดำ
วัสดุโพลิเมอร์ (Polymer Material)	แสงสะท้อนเป็นสีครีม/ น้ำตาลบนฉากรองรับ สีขาว	เกิดสีอย่างขนสัตว์บน ฉากรองรับสีเทา	แสงสีขนสัตว์ บนฉากรองรับสีดำ

#### 4.5.6 การวิเคราะห์ด้วยวิธี FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) [13]

การวิเคราะห์ FTIR เป็นการวิเคราะห์ในระดับโมเลกุล เป็นวิธีการที่ใช้หาปริมาณ  
ขององค์ประกอบต่างๆ ของน้ำมันหล่อลื่นได้อย่างรวดเร็วเพื่อใช้ในการตรวจสอบสภาพน้ำมันหลัก  
สภาพสารเคมีเพิ่มคุณภาพ และสิ่งสกปรกปนเปื้อน โดยให้ค่าที่แม่นยำและเชื่อถือได้ หลักการใน  
การวัดจะทำการผ่านรังสีอินฟราเรด ซึ่งมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 0.00008 เซนติเมตรถึง 0.04  
เซนติเมตร ไปยังน้ำมันหล่อลื่นที่จะทำการทดสอบ ส่วนประกอบของน้ำมันที่เป็นสารประกอบ  
ต่างๆ ก็จะดูดซับปริมาณรังสีที่ช่วงความถี่จำเพาะที่ต่างกันไว้ เนื่องจากแต่ละพันธะในโมเลกุลจะ  
ดูดซับรังสีที่ช่วงความถี่ที่ต่างกัน ผลที่ได้จะแสดงในรูปความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับ  
รังสี(abs) กับส่วนกลับของความยาวคลื่น ( Wave Number ,  $\text{cm}^{-1}$ ) ซึ่งจะทำให้ทราบถึงปริมาณ  
และองค์ประกอบต่างๆ ที่อยู่ในน้ำมันหล่อลื่นเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จาก  
น้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 4-24 และผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี  
FTIR มีดังนี้

ค่าออกซิเดชัน ในระบบหล่อลื่น สารอินทรีย์จะเกิดการแยกตัวที่สภาวะอุณหภูมิ  
และความดันที่สูง ประกอบกับการมีออกซิเจนอยู่บริเวณรอบ ในกระบวนการ FTIR จะหาค่า  
ออกซิเดชันจากพันธะคาร์บอนิล (Carbonyl) ซึ่งมีช่วงความถี่จำเพาะของการดูดซับรังสีอินฟราเรด  
ระหว่าง 1,800 ถึง 1,670  $\text{cm}^{-1}$



รูปที่ 4-24 แสดงปริมาณการดูดซับรังสีอินฟราเรดในแต่ละช่วงความถี่ของน้ำมันหล่อลื่น [13]

ค่าไนเตรชัน ลักษณะการเกิดไนเตรชัน จะเกิดที่สภาวะอุณหภูมิและความดันที่สูง เช่นเดียวกับการเกิดออกซิเดชัน ประกอบกับการมีไนโตรเจนและออกซิเจนอยู่บริเวณรอบ โดยทั่วไปการเกิดไนเตรชันจะอยู่ในรูปของ NO, NO<sub>2</sub> และ N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> ซึ่งมีช่วงความถี่จำเพาะของการดูดซับรังสีอินฟราเรด ระหว่าง 1,650 ถึง 1,600 cm.<sup>-1</sup> การเกิดไนเตรชันเป็นสาเหตุทำให้เกิดคราบยางเหนียวและ Lacquer สาเหตุของการเกิดไนเตรชันมาจาก การปรับอัตราส่วนผสมของเชื้อเพลิงต่ออากาศที่ไม่ถูกต้อง การปรับจังหวะการจุดระเบิดที่ไม่เหมาะสม หรือมาจากสภาวะการทำงานที่ภาระสูง ซึ่งจะทำให้เกิดอุณหภูมิการทำงานและปริมาณ Blow – by ที่สูงตามไปด้วย

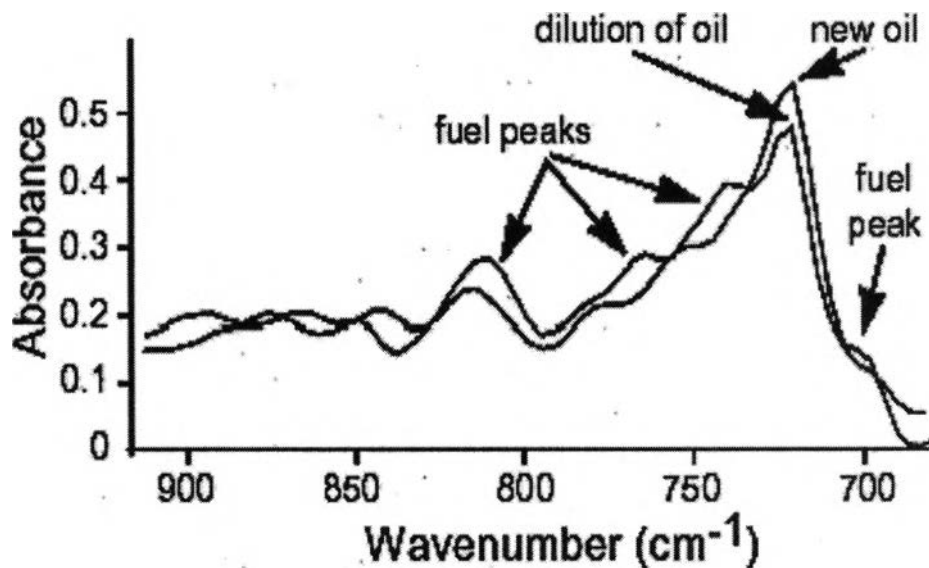
ค่าซัลเฟชัน เกิดจากกำมะถัน (Sulphur) ซึ่งพบได้ในน้ำมันเชื้อเพลิง และอาจพบได้ในสารเติมแต่งบางชนิดในน้ำมันหล่อลื่น การเกิดซัลเฟชัน จะอยู่ในรูปของ SO<sub>3</sub> และ SO<sub>2</sub> ซึ่งช่วงความถี่จำเพาะของการดูดซับรังสีอินฟราเรด อยู่ระหว่าง 1,180 ถึง 1,120 cm.<sup>-1</sup> การเกิดซัลเฟชันจะทำให้เกิด คราบยางเหนียว กากตะกอน และทำให้น้ำมันหล่อลื่นเสื่อมคุณภาพลง นอกจากนั้นสารประกอบที่เกิดขึ้นยังสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำซึ่งเกิดระหว่างการเผาไหม้ กลายเป็นกรดซัลฟูริก ซึ่งจะทำลายการรวมตัวของสารเติมแต่งในน้ำมันหล่อลื่น

**ปริมาณเขม่า** เขม่าเกิดจากอัตราส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศที่หนามาก การเพิ่มปริมาณของเขม่าในน้ำมันหล่อลื่นแสดงให้เห็นถึงปัญหาจากการเผาไหม้ หรือช่วงเวลาการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่นและไส้กรองที่นานเกินไป ปริมาณเขม่าที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำมันหล่อลื่นยังทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนืดและทำให้เกิดการอุดตันที่ไส้กรอง และอ่างน้ำมันหล่อลื่น

การวิเคราะห์ปริมาณเขม่าจะต่างจากวิธีที่ได้กล่าวมาข้างต้นซึ่งใช้เทคนิคการหาพื้นที่ใต้กราฟ เนื่องจากเขม่าจะไม่มีช่วงความถี่จำเพาะของการดูดซับรังสีอินฟราเรดที่แน่นอน ดังนั้นเพื่อให้สะดวกต่อการวัด จึงทำการวัดปริมาณการดูดซับที่ความถี่  $2,000\text{ cm}^{-1}$

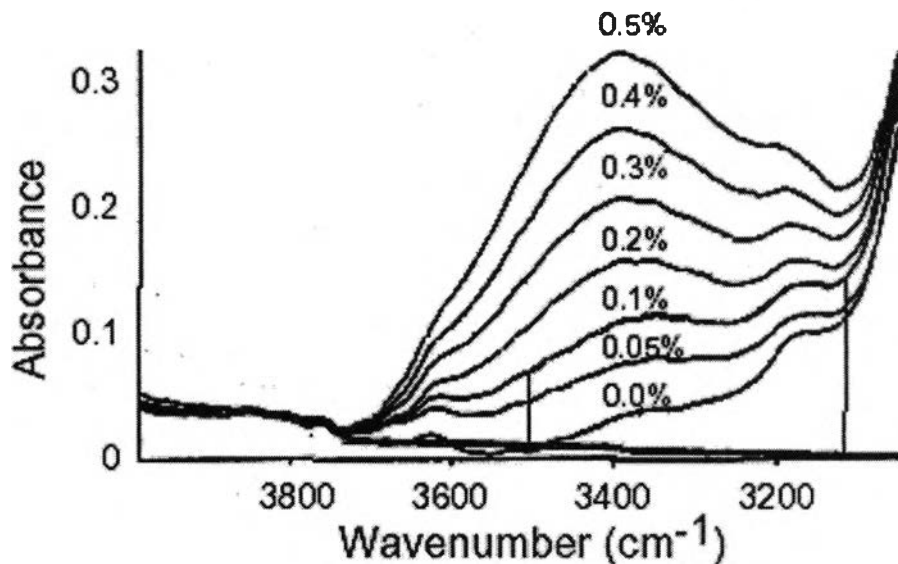
**ปริมาณเชื้อเพลิง** ปริมาณเชื้อเพลิงที่พบในน้ำมันหล่อลื่นมีสาเหตุมาจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ เนื่องจากเชื้อเพลิงทั่วไป จะประกอบด้วยโมเลกุลของสารประกอบมากมาย ทั้งสารประกอบแอลิแฟติก เช่น ออกเทน และสารประกอบอโรมาติก เช่น เบนซีน และอีกมากมายรวมกัน เพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆของน้ำมันเชื้อเพลิง

การวิเคราะห์ปริมาณเชื้อเพลิงที่ปนเปื้อนในน้ำมันหล่อลื่น ด้วยวิธี FTIR สามารถทำได้โดย หาช่วงความถี่ของการดูดซับในแต่ละส่วนประกอบของเชื้อเพลิง แล้วนำช่วงความถี่ที่ได้มาเปรียบเทียบกับในช่วงการดูดซับของน้ำมันหล่อลื่น ดังแสดงในรูปที่ 4-25 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า น้ำมันเชื้อเพลิงมีหลายช่วงความถี่ตามสารประกอบมากมายที่พบในน้ำมันเชื้อเพลิง



รูปที่ 4-25 แสดงการเปรียบเทียบค่าการดูดซับของน้ำมันใหม่กับน้ำมันที่มีเชื้อเพลิงปนเปื้อน [13]

**ปริมาณน้ำ** เป็นปริมาณที่พบในน้ำมันหล่อลื่นใช้ในการตรวจสอบการรั่วของน้ำจากระบบหล่อเย็น โดยน้ำจะดูดซับรังสีอินฟราเรดในปริมาณที่มาก ซึ่งทำให้ง่ายต่อการตรวจพบ ดังแสดงในรูปที่ 4-26 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ช่วงความถี่ของรังสีอินฟราเรดที่น้ำดูดซับ เป็นช่วงความถี่ที่การดูดซับรังสีของน้ำมันหล่อลื่นมีปริมาณน้อยกว่าน้ำ



รูปที่ 4-26 แสดงช่วงความถี่จำเพาะที่น้ำสามารถดูดซับรังสีอินฟราเรดได้ [10]

ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี FTIR (Fourier Transform Infra-Red Spectroscopy) สามารถแสดงผลออกมาเป็น Absorbance Unit (abs) ยกเว้นค่า การปนเปื้อนของน้ำ, ไกลคอล, เชื้อเพลิง และเขม่า ซึ่งแสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อน

#### 4.6 งานวิจัยเกี่ยวกับการนำก๊าซชีวภาพมาใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลในระบบเชื้อเพลิงคู่

การศึกษาเกี่ยวกับการนำก๊าซชีวภาพมาใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลในระบบเชื้อเพลิงคู่ ได้รับความสนใจมากขึ้นในปัจจุบัน สืบเนื่องมาจากปริมาณที่น้อยลงและราคาที่สูงขึ้นของน้ำมันดีเซล Jan K. Jensen และ Anker B. Jensen [10] ได้ศึกษาวิเคราะห์ส่วนประกอบและคุณสมบัติของก๊าซชีวภาพ (ดังแสดงในตารางที่ 4-1) เพื่อพัฒนาและปรับปรุงมาใช้แทนก๊าซธรรมชาติที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงทำความร้อนในประเทศเดนมาร์กและนำมาใช้กับรถยนต์ต่อไป

ในประเทศสวีเดนได้มีการทดลองใช้ก๊าซชีวภาพกับรถยนต์ได้แล้ว แต่เนื่องจากการผลิตก๊าซชีวภาพมากขึ้นแต่ยังมีปัญหาในการทำให้ก๊าซชีวภาพมีความบริสุทธิ์มากขึ้น (ลด  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ )

#### 4.6.1 ผลกระทบของสัดส่วนระหว่างก๊าซชีวภาพกับน้ำมันดีเซล

ผลกระทบของสัดส่วนระหว่างก๊าซชีวภาพกับน้ำมันดีเซลต่อเครื่องยนต์ที่ใช้ระบบเชื้อเพลิงคู่ เชื้อเพลิงที่ใช้ในเครื่องยนต์นั้นจะใช้หัวฉีดในการจ่ายน้ำมันดีเซลเข้าไปในห้องเผาไหม้ เพื่อช่วยในการจุดระเบิด ส่วนก๊าซชีวภาพกับอากาศจะถูกผสมกันที่ท่อร่วมไอดีก่อนเข้าห้องเผาไหม้ และต้องพิจารณาปัจจัยอื่นร่วมด้วย

A.Henham และ M.K.Makkar [15] ได้วิจัยผลของความแตกต่างของสัดส่วนของการใช้เชื้อเพลิงก๊าซชีวภาพต่อน้ำมันดีเซลสามารถสรุปผลที่ได้คือ

- สัดส่วนของก๊าซชีวภาพสูงขึ้นประสิทธิภาพของเครื่องยนต์จะลดลงเนื่องจากการไปแทนที่อากาศของก๊าซชีวภาพ
- อุณหภูมิไอเสียสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับเครื่องยนต์ใช้น้ำมันดีเซลปกติและเมื่อสัดส่วนของก๊าซชีวภาพสูงขึ้น อุณหภูมิไอเสียจะลดลง
- ความดันในลูกสูบสูงขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนของเชื้อเพลิงก๊าซชีวภาพสูงขึ้น
- ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) สูงขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนของเชื้อเพลิงก๊าซชีวภาพสูงขึ้น

#### 4.6.2 ผลกระทบของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ผลกระทบของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในก๊าซชีวภาพต่อเครื่องยนต์ที่ใช้ระบบเชื้อเพลิงคู่ ในก๊าซชีวภาพนั้นองค์ประกอบส่วนใหญ่คือก๊าซมีเทนและนอกจากก๊าซมีเทนแล้วนั้นยังมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบด้วย

Sariful Bari [16] ได้ศึกษาผลกระทบของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ผสมในก๊าซชีวภาพสามารถสรุปได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะทำหน้าที่เป็นก๊าซเฉื่อย ซึ่งเป็นตัวหน่วงการเผาไหม้ และสมรรถนะต่ำกว่าเมื่อเทียบกับก๊าซธรรมชาติ ( $\text{CH}_4$  ประมาณ 96%)

A.Henham และ M.K.Makkar[15] ได้วิจัยผลของความแตกต่างของปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในก๊าซชีวภาพ ได้ทดสอบโดยจำลองก๊าซชีวภาพด้วยการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซมีเทนในปริมาณต่างๆ กัน สามารถสรุปผลที่ได้ คือ

- เมื่อปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้นประสิทธิภาพของเครื่องยนต์จะลดลง
- อุณหภูมิไอเสียสูงขึ้นเมื่อปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น
- ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) สูงขึ้นเมื่อปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้นเล็กน้อย
- ความดันในกะบอกสูบลดลงเมื่อปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น