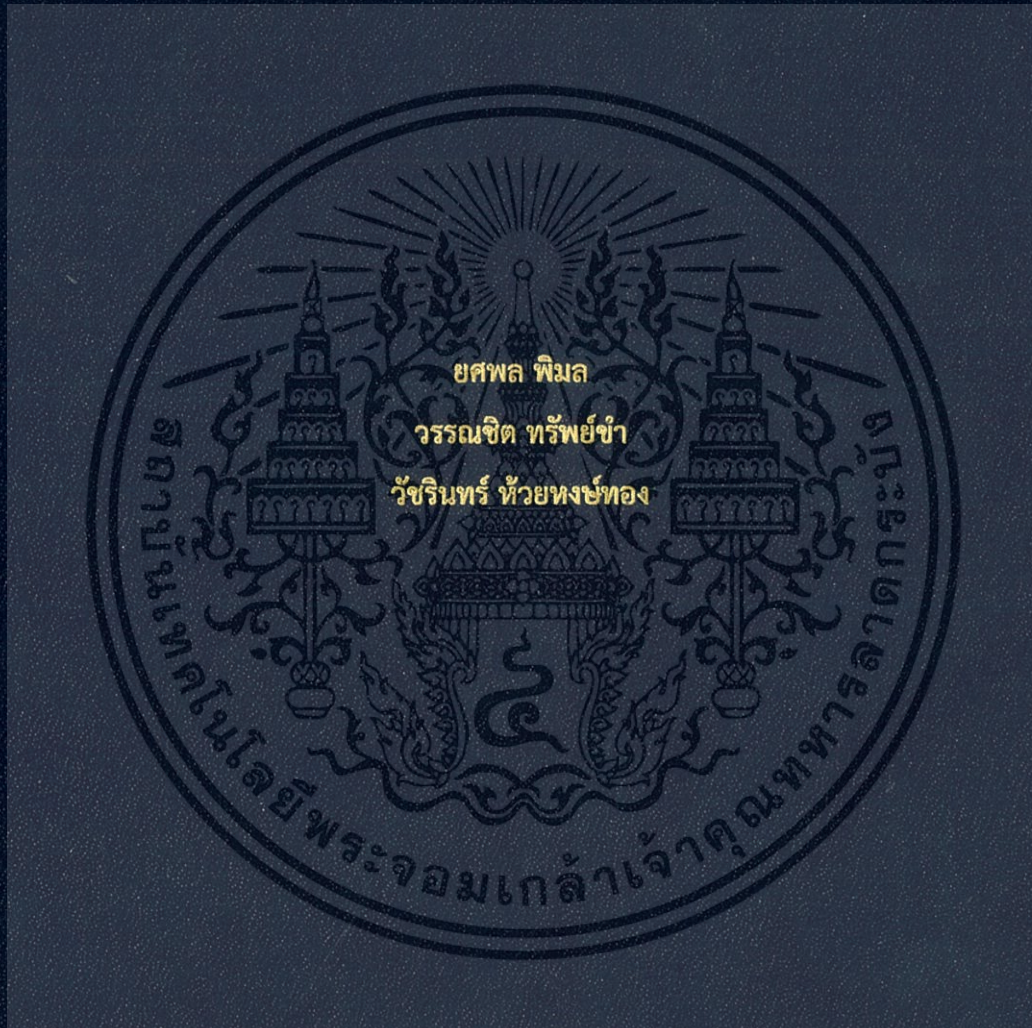


ผลกระทบของไบโอดีเซลต่อมลพิษอนุภาคเครื่องยนต์ที่จุดระเบิดด้วย  
การอัดแบบคอมมอนเรล

Effect of Biodiesel on a common Rail Compression Ignition Engine's  
Particle Emission Characteristics



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2561

ผลกระทบของไบโอดีเซลต่อมลพิษอนุภาคเครื่องยนต์ที่จุดระเบิดด้วย  
การอัดแบบคอมมอนเรล

Effect of Biodiesel on a common Rail Compression Ignition Engine's  
Particle Emission Characteristics



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Effect of Biodiesel on a common Rail Compression Ignition Engine's  
Particle Emission Characteristics



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2561

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ผลกระทบของไบโอดีเซลต่อมลพิษอนุภาคเครื่องยนต์ที่จุดระเบิดด้วยการอัดแบบ  
คอมมอนเรล

Effect of Biodiesel on a common Rail Compression Ignition Engine's  
Particle Emission Characteristics

ผู้จัดทำ

- |                             |              |          |
|-----------------------------|--------------|----------|
| 1. นายยศพล พิมล             | รหัสประจำตัว | 58011028 |
| 2. นายวรรณชิต ทรัพย์ขำ      | รหัสประจำตัว | 58011240 |
| 3. นายวัชรินทร์ ห้วยหงษ์ทอง | รหัสประจำตัว | 58011277 |

อาจารย์ที่ปรึกษา

( ผศ.ดร.ปรีชา การินทร์ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลกระทบของไบโอดีเซลต่อคุณลักษณะอนุภาคเขม่าเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดแบบ  
คอมมอนเรล

|              |             |                                     |
|--------------|-------------|-------------------------------------|
| นายยศพล      | พิมล        | 58011028                            |
| นายวราภรณ์   | ทรัพย์ขำ    | 58011106                            |
| นายวัชรินทร์ | ห้วยหงษ์ทอง | 58011137                            |
| ผศ.ดร.ปรีชา  | การินทร์    | อาจารย์ที่ปรึกษา<br>ปีการศึกษา 2561 |

### บทคัดย่อ

เครื่องยนต์ดีเซลขนาดกลางที่ใช้ระบบคอมมอนเรลมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงเนื่องจากมีอัตราส่วนการอัดสูง แต่อย่างไรก็ตามมันก็มีความเข้มข้นของเขม่าไอเสียสูงด้วยเช่นกัน ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่าเขม่าไอเสียจากเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดสามารถลดลงได้โดยการเปลี่ยนไปใช้หรือผสมไบโอดีเซลลงไปเชื้อเพลิงดีเซล โดยในงานวิจัยนี้อธิบายถึงประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงดีเซลผสมไบโอดีเซลและโครงสร้างสันฐานวิทยาของอนุภาคจากไอเสีย ซึ่งผ่านการตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน จากผลการวิจัยพบว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงดีเซลและไบโอดีเซลมีความแตกต่างเพียงเล็กน้อยแต่ปริมาณเขม่าที่เกิดจากการใช้เชื้อเพลิงไบโอดีเซลน้อยกว่าเชื้อเพลิงดีเซลอย่างชัดเจน ขนาดอนุภาคกลุ่มของเขม่าจากเชื้อเพลิง B7, B20 และ B100 มีค่าประมาณ 540, 500 และ 270 นาโนเมตร ตามลำดับ ขนาดอนุภาคเดี่ยวมีค่า 24, 19 และ 17 นาโนเมตร ตามลำดับ พบว่าขนาดของอนุภาคกลุ่มและอนุภาคเดี่ยวจากไบโอดีเซลมีขนาดเล็กกว่าดีเซลอย่างชัดเจน ความยาวเฉลี่ยผลึกกราฟีนของเขม่าจากเชื้อเพลิง B7, B20 และ B100 มีค่า 1.36, 1.21 และ 1.27 นาโนเมตร ตามลำดับ

**คำหลัก:** เครื่องยนต์ดีเซลคอมมอนเรล, ไบโอดีเซล, เขม่า และอนุภาคดีเซล

## Effect of Biodiesel on a Common Rail Compression Ignition Engine's Particle Emission Characteristics

|                                |               |          |
|--------------------------------|---------------|----------|
| Yodsapol                       | Phimol        | 58011028 |
| Wannachit                      | Subkham       | 58011106 |
| Watcharin                      | Huayhongthong | 58011137 |
| Asst. Prof. Dr. Preechar Karin | Advisor       |          |
| Education Year 2561            |               |          |

### Abstract

Common-rail compression ignition engines have high thermal efficiency because of high compression ratio. In the other hand, its exhaust also has a high concentration of particulate matters. Particulate matter from compression ignition engines can be reduced by blending biodiesel into diesel. This research describes thermal efficiency of the compression ignition engine from each mixed fuel and the morphology of particulate matter using a scanning electron microscope and transmission electron microscopy. The result shows that efficiency of diesel and biodiesel engine are not much different but the smoke intensity can be reduced by blending biodiesel clearly. The agglomerated particles sizes of B7, B20 and B100 are approximately 540, 500 and 270 nm respectively. Primary particle sizes are 24, 19 and 17 nm respectively. The agglomerated particles and the primary particle sizes of biodiesel engine's PM is smaller than that of conventional diesel clearly. The average length of graphene of B7, B20 and B100 are 1.36, 1.21 and 1.27 nm respectively.

**Keywords:** Common-rail compression ignition engines, biodiesel, soot and diesel particulate matter.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดีเพราะด้วยความเอาใจใส่ แนะนำ และช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ เสมอมาจาก ผศ.ดร.ปรีชา การินทร์ อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างมาก

ขอขอบคุณชมรม Automotive ที่เอื้อเพื่อให้ยืมเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการนี้ และขอบคุณ นายวทีญญู ไพโรจน์ (พีเบิร์ด) นายวีรยุทธ วงศ์ภัทรวรกุล (พีตัน) และ Mr.Phyo Zin Ko ko ที่อบรมสั่งสอนและให้ความช่วยเหลือด้านต่างๆในการทำโครงการนี้

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดีพร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่และยังให้กำลังใจเอาใจใส่เสมอมาในทุกๆด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

นายศพล

พิมล

นายวรรณชิต

ทรัพย์ขำ

นายวีชรินทร์

ห้วยหงษ์ทอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

|   | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย _____                       | I    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ _____                    | II   |
| กิตติกรรมประกาศ _____                       | III  |
| สารบัญ _____                                | IV   |
| สารบัญตาราง _____                           | VII  |
| สารบัญรูป _____                             | VIII |
| บทที่ 1 บทนำ _____                          | 1    |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญ _____                 | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย _____           | 2    |
| 1.3 สมมติฐานของการศึกษา _____               | 2    |
| 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย _____                 | 2    |
| 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ _____                 | 3    |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง _____ | 4    |
| 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง _____             | 4    |
| 2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง _____                | 10   |
| 2.2.1 วัฏจักรดีเซล _____                    | 10   |
| 2.2.2 งานของเครื่องยนต์ _____               | 10   |
| 2.2.3 แรงบิดและกำลัง _____                  | 13   |
| 2.2.4 อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง _____     | 14   |
| 2.2.5 ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ _____  | 14   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|  |    |
|--|----|
| 2.2.6 ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์  | 17 |
| 2.2.7 เชื้อเพลิงดีเซล  | 18 |
| 2.2.8 เชื้อเพลิงไบโอดีเซล  | 19 |
| 2.2.9 อนุภาค   | 19 |
| 2.2.10 ไฮโดรคาร์บอน  | 20 |
| 2.2.11 ระบบคอมมอนเรล ไตเร็ค อินเจคชัน  | 22 |
| 2.2.12 ทฤษฎีหลักการทำงานของกล่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน  | 23 |
| 2.2.13 กล่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด   | 24 |
| 2.2.14 กล่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน   | 25 |
| บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย  | 27 |
| 3.1 แนวคิดในการวิจัย   | 27 |
| 3.2 ตัวอย่างและคุณสมบัติของเชื้อเพลิงดีเซลและไบโอดีเซล   | 27 |
| 3.3 คุณสมบัติของเครื่องยนต์ที่ใช้ในการทดสอบ  | 29 |
| 3.4 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก, อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเบรก,<br>ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกและความเข้มข้นของไอเสียจากเครื่องยนต์ | 31 |
| 3.4.1 ระบบควบคุมความเร็วรอบเครื่องยนต์   | 32 |
| 3.4.2 ระบบควบคุมภาระงานของเครื่องยนต์, การจ่ายเชื้อเพลิงและ<br>การวัดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง  | 34 |
| 3.4.3 ระบบในการจัดเก็บไอเสีย   | 40 |
| 3.4.4 วิธีการทดลอง   | 40 |

|   |    |
|---|----|
| 3.5 วิธีการเก็บและศึกษาโครงสร้างของอนุภาคจากเชื้อเพลิงดีเซลและไบโอดีเซล   | 43 |
| 3.5.1 วิธีการเก็บเขม่าไอเสีย  | 43 |
| 3.5.2 วิธีการวัดขนาดและตรวจสอบโครงสร้างของอนุภาคกลุ่มด้วยวิธีการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน (TEM) และกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM)   | 44 |
| บทที่ 4 ผลการวิจัย  | 45 |
| 4.1 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (Brake specific fuel consumption, BSFC), อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเบรก (Brake specific energy consumption, BSEC) และ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก (Brake thermal efficiency, BTE) | 45 |
| 4.2 ปริมาณความเข้มข้นของเขม่าในไอเสีย (Smoke intensity)   | 52 |
| 4.3 สัณฐานวิทยาของเขม่า (Particulate matter's morphology)   | 53 |
| 4.4 โครงสร้างกำลังขยายระดับนาโน (Nanostructure)   | 55 |
| บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัย  | 67 |
| บรรณานุกรม  | 68 |

## สารบัญตาราง

| ตารางที่  | หน้า |
|---|------|
| 2.1 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน | 23   |
| 3.1 คุณสมบัติของเชื้อเพลิง  | 28   |
| 3.2 ENGINE MAIN DATA & SPECIFICATIONS   | 29   |
| 3.3 ตารางบันทึกผลการทดลอง   | 43   |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 2.1 ส่วนประกอบหลักและโครงสร้างของเขม่าจากไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลทั่วไป  | 4    |
| 2.2 ขนาดของอนุภาค (Particulate matter, PM) ของ (ก) เชื้อเพลิงดีเซลและ<br>(ข) เชื้อเพลิงไบโอดีเซล  | 5    |
| 2.3 ความเข้มข้นของเขม่าจากเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กที่ภาระงานของเครื่องยนต์, ความเร็วรอบและ<br>เชื้อเพลิงต่างกัน (a) ดีเซล (b) B20 (c) B60 และ (d) B100                        | 6    |
| 2.4 ภาระงานการวัดขนาดความยาวผลึกกราฟีนของอนุภาค (ก) BE20 (ข) B100 (ค) ดีเซล   | 7    |
| 2.5 ความยาวผลึกกราฟีนของอนุภาคจากเชื้อเพลิง B100, BE20 และดีเซล   | 7    |
| 2.6 ขนาดและจำนวนอนุภาคที่ค่า (a) BMEP = 0.10 MPa และ (b) BMEP = 0.26 MPa  | 8    |
| 2.7 ขนาดจำนวนอนุภาคที่ค่า (a) BMEP = 0.51 MPa และ (b) BMEP = 0.77 MPa   | 8    |
| 2.8 ขนาดและจำนวนอนุภาคจากเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบ 1500 rpm และโหลดดังนี้ (a) no load<br>(b) 50% load (c) 80% load โดยใช้เชื้อเพลิงดีเซล, ไบโอดีเซล (B5) และ ไบโอดีเซล (B100) | 9    |
| 2.9 กราฟ P-V ของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด 4 จังหวะ   | 10   |
| 2.10 กราฟ P-V ของเครื่องยนต์ที่จุดระเบิดด้วยการอัด  | 12   |
| 2.11 กราฟกำลังและแรงบิดบนความเร็วรอบของเครื่องยนต์ในรถยนต์ทั่วไป  | 13   |
| 2.12 กราฟอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเมื่อเทียบบนความเร็วรอบของเครื่องยนต์ (N) กับ<br>อัตราส่วนการอัด ( $r_c$ )   | 15   |
| 2.13 กราฟอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเมื่อเทียบบนอัตราส่วนความเข้มของไอดี ซึ่งมีค่าต่ำสุด<br>เมื่อไอดีค่อนข้างเจือจาง (Lean) และสูงขึ้นเมื่อไอดีจางหรือเข้มกว่าค่านี    | 16   |
| 2.14 กราฟความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกเมื่อเทียบบนความจุของเครื่องยนต์   | 17   |

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 2.15 กราฟมลพิษในไอเสียที่ความเข้มข้นของไอติมากจนออกซิเจนไม่เพียงพอสำหรับทำปฏิกิริยากับคาร์บอนของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด | 21   |
| 2.16 การทำงานของระบบคอมมอนเรลหรือระบบจ่ายน้ำมันแบบรางร่วม (Common rail)  | 22   |
| 2.17 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)                                   | 24   |
| 2.18 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM)                                | 26   |
| 3.1 เชื้อเพลิง B0 และ B100   | 27   |
| 3.2 เครื่องยนต์ ISUZU 4JJ1-TC  | 29   |
| 3.3 กราฟของภาระงานของเครื่องยนต์และกำลังที่มากที่สุดของแต่ละรอบความเร็วรอบที่เครื่องยนต์ทำได้                                  | 30   |
| 3.4 แผนภาพการทำงานโดยรวมของชุดการทดสอบเครื่องยนต์  | 31   |
| 3.5 แผนภาพการทำงานระบบควบคุมความเร็วรอบเครื่องยนต์   | 32   |
| 3.6 คอมพิวเตอร์  | 32   |
| 3.7 กราฟของคันทรง  | 33   |
| 3.8 การ์ดเก็บรวบรวมข้อมูล (Data Acquisition Card)  | 33   |
| 3.9 โปรแกรมควบคุมความเร็วรอบ   | 34   |
| 3.10 แผนภาพการทำงานระบบควบคุมการจ่ายเชื้อเพลิง   | 35   |
| 3.11 ไดนาโมมิเตอร์   | 35   |
| 3.12 ปืนจ่ายเชื้อเพลิง   | 35   |
| 3.13 ตัวกรองน้ำมัน   | 36   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 3.14 เครื่องชั่งน้ำหนัก  | 37   |
| 3.15 กล้องควบคุม   | 37   |
| 3.16 แผนภาพระบบการเก็บข้อมูล   | 38   |
| 3.17 หน้าจอแสดงผลที่ 1   | 38   |
| 3.18 หน้าจอแสดงผลที่ 2   | 39   |
| 3.19 ตารางบันทึกข้อมูล   | 39   |
| 3.20 คอมพิวเตอร์   | 40   |
| 3.21 แผนภาพระบบการจับเก็บไอเสีย  | 41   |
| 3.22 เครื่องวัดประสิทธิภาพควันดำ (Smoke meter)   | 41   |
| 3.23 ท่อวัดของเครื่องวัดประสิทธิภาพควันดำ  | 42   |
| 3.24 อุปกรณ์ที่ใช้ในการดักจับเขม่าโดยต่อบนท่อไอเสีย  | 42   |
| 3.25 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน   | 44   |
| 3.26 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด   | 44   |
| 4.1 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกของเชื้อเพลิง B7 ที่ภาระงานของเครื่องยนต์<br>และความเร็วรอบต่างกัน   | 46   |
| 4.2 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกของเชื้อเพลิง B20 ที่ภาระงานของเครื่องยนต์<br>และความเร็วรอบต่างกัน  | 46   |
| 4.3 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกของเชื้อเพลิง B100 ที่ภาระงานของเครื่องยนต์<br>และความเร็วรอบต่างกัน | 47   |
| 4.4 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกที่ภาระงานของเครื่องยนต์, ความเร็วรอบ<br>และเชื้อเพลิงต่างกัน        | 47   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 4.5 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเบรกของเชื้อเพลิง B7 ที่ภาระงานของเครื่องยนต์<br>และความเร็วรอบต่างกัน _____   | 48   |
| 4.7 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเบรกของเชื้อเพลิง B100 ที่ภาระงานของเครื่องยนต์<br>และความเร็วรอบต่างกัน _____ | 49   |
| 4.8 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเบรกที่ภาระงานของเครื่องยนต์, ความเร็วรอบ<br>และเชื้อเพลิงต่างกัน _____        | 49   |
| 4.9 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกของเชื้อเพลิง B7 ที่ภาระงานของเครื่องยนต์<br>และความเร็วรอบต่างกัน _____           | 50   |
| 4.10 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกของเชื้อเพลิง B20 ที่ภาระงานของเครื่องยนต์<br>และความเร็วรอบต่างกัน _____         | 50   |
| 4.11 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกของเชื้อเพลิง B100 ที่ภาระงานของเครื่องยนต์<br>และความเร็วรอบต่างกัน _____        | 51   |
| 4.12 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกที่ภาระงานของเครื่องยนต์, ความเร็วรอบและเชื้อเพลิงต่างกัน                         | 51   |
| 4.13 ปริมาณความเข้มข้นของเขม่าในไอเสียของที่ภาระงานของเครื่องยนต์, ความเร็วรอบ<br>และเชื้อเพลิงต่างกัน _____      | 52   |
| 4.14 ภาพถ่ายการจับตัวของอนุภาคในกระตาศกรองของเชื้อเพลิง B7 _____  | 53   |
| 4.15 ภาพถ่ายการจับตัวของอนุภาคในกระตาศกรองของเชื้อเพลิง B20 _____   | 53   |
| 4.16 ภาพถ่ายการจับตัวของอนุภาคในกระตาศกรองของเชื้อเพลิง B100 _____  | 54   |
| 4.17 ขนาดของกลุ่มอนุภาคที่ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของทั้งสามเชื้อเพลิง                         | 54   |
| 4.18 ภาพถ่ายอนุภาคกลุ่มโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของเชื้อเพลิง B7 _____                               | 55   |
| 4.19 ภาพถ่ายอนุภาคกลุ่มโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของเชื้อเพลิง B20 _____                              | 55   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 4.20 ภาพถ่ายอนุภาคกลุ่มโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของเชื้อเพลิง B100   | 56   |
| 4.21 ขนาดอนุภาคเดี่ยวของเขม่าจากเชื้อเพลิงที่ต่างกัน                              | 56   |
| 4.24 ภาพถ่ายอนุภาคเดี่ยวจากเชื้อเพลิง B100 โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน | 57   |
| 4.25 แบบจำลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างคาร์บอนอะตอมกับโครงสร้างของผลึกกราฟีน         | 59   |
| 4.26 แบบจำลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระนาบของผลึกกราฟีนในแต่ละชั้น                 | 59   |
| 4.27 กระบวนการวัดขนาดความยาวผลึกกราฟีนของเขม่าจากเชื้อเพลิง B7                    |      |
| (ก) ภาพถ่ายอนุภาคเดี่ยว (ข) ภาพตัดขนาด 10x10 nm (ค) ภาพขาว-ดำ ของอนุภาคเดี่ยว     |      |
| (ง) ภาพเส้นโครงความยาวผลึกกราฟีน (จ) ภาพปรับแก้เส้นโครงความของผลึกกราฟีน          | 61   |
| 4.28 กระบวนการวัดขนาดความยาวผลึกกราฟีนของเขม่าจากเชื้อเพลิง B20                   |      |
| (ก) ภาพถ่ายอนุภาคเดี่ยว (ข) ภาพตัดขนาด 10x10 nm (ค) ภาพขาว-ดำ ของอนุภาคเดี่ยว     |      |
| (ง) ภาพเส้นโครงความยาวผลึกกราฟีน (จ) ภาพปรับแก้เส้นโครงความของผลึกกราฟีน          | 62   |
| 4.29 กระบวนการวัดขนาดความยาวผลึกกราฟีนของเขม่าจากเชื้อเพลิง B100                  |      |
| (ก) ภาพถ่ายอนุภาคเดี่ยว (ข) ภาพตัดขนาด 10x10 nm (ค) ภาพขาว-ดำของอนุภาคเดี่ยว      |      |
| (ง) ภาพเส้นโครงความยาวผลึกกราฟีน (จ) ภาพปรับแก้เส้นโครงความของผลึกกราฟีน          | 63   |
| 4.30 ขนาดความยาวผลึกกราฟีนของอนุภาคจากเชื้อเพลิง B7                               | 64   |
| 4.31 ขนาดความยาวผลึกกราฟีนของอนุภาคจากเชื้อเพลิง B20                              | 65   |
| 4.32 ขนาดความยาวผลึกกราฟีนของอนุภาคจากเชื้อเพลิง B100                             | 65   |
| 4.33 การเปรียบเทียบขนาดความยาวผลึกกราฟีนของอนุภาคจากทั้งสามเชื้อเพลิง             | 66   |

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันเครื่องยนต์ดีเซลถูกใช้อย่างแพร่หลายทั้งในอุตสาหกรรมขนส่งและเครื่องยนต์การเกษตร เนื่องจากเครื่องยนต์ดีเซลมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่สูงเมื่อเทียบกับเครื่องยนต์สันดาปภายในชนิดอื่นในอัตราส่วนของภาระงานของเครื่องยนต์และการใช้งานที่เหมือนกัน แต่อย่างไรก็ตามมลพิษจากเครื่องยนต์ดีเซลกลับมีปริมาณมากตามไปด้วยจึงก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางอากาศ (Air Pollution) ซึ่งถือว่าเป็นเรื่องสำคัญอย่างยิ่งเนื่องจากเป็นปัญหาโดยตรงต่อสุขภาพของมนุษย์เช่น มะเร็งปอด โรคทางเดินหายใจอื่นๆ เป็นต้น

มลพิษของอนุภาคจากเครื่องยนต์ดีเซล (Diesel particulate matter, DPM) มีส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นของแข็ง (Solid organic fraction, SOL) ประกอบด้วยคาร์บอนแข็ง (Carbon) และขี้เถ้าของโลหะ (Metallic ash) และส่วนประกอบที่เป็นของเหลว (Soluble organic fraction, SOF) มีส่วนประกอบหลักคือ ไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon)

ตั้งแต่ปี พ.ศ.2524 ประเทศไทยมีงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้ น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วลิสง น้ำมันสบู่ดำ น้ำมันมะพร้าว และอีกมากมายเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทนน้ำมันดีเซลที่ถูกเรียกว่า น้ำมันไบโอดีเซล ซึ่งมีคุณสมบัติพิเศษคือ มีปริมาณออกซิเจน (Oxygen) อยู่ในโมเลกุลค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซลแบบปกติที่ช่วยทำให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ดังนั้นไบโอดีเซลสามารถช่วยลดปริมาณของมลพิษที่ปล่อยออกมาได้ แต่ข้อเสียของเชื้อเพลิงไบโอดีเซลคือ เชื้อเพลิงไบโอดีเซลมีค่าความร้อนที่ต่ำกว่าเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป ซึ่งในปัจจุบัน (ปี พ.ศ. 2561) พบว่าน้ำมันดีเซลมีการผสมเชื้อเพลิงไบโอดีเซลอยู่ 7% (B7) ตามศูนย์จำหน่ายในสถานีบริการน้ำมันทั่วไป ดังนั้นงานวิจัยผลกระทบของเชื้อเพลิงไบโอดีเซลต่อเครื่องยนต์เกี่ยวกับผลกระทบต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนและโครงสร้างของอนุภาคจากไอเสียของเชื้อเพลิงดีเซลผสมไบโอดีเซลจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจและควรค่าต่อการศึกษา เพื่อค้นหาสภาวะการใช้งานของเชื้อเพลิงผสมระหว่างดีเซลและไบโอดีเซลที่เหมาะสมต่อเครื่องยนต์

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (Brake specific fuel consumption, BSFC) อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเบรก (Brake specific energy consumption, BSEC) ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก (Brake thermal efficiency, BTE) ของเชื้อเพลิงดีเซลผสมไบโอดีเซลในอัตราส่วนปริมาตร 93:7 (B7) 80:20 (B20) และ 0:100 (B100) ต่อเครื่องยนต์ดีเซลแบบคอมมอนเรลขนาด 3000 cc
2. เพื่อศึกษาปริมาณและโครงสร้างอนุภาคของอนุภาคกลุ่มและอนุภาคเดี่ยวที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมระหว่างเชื้อเพลิงไบโอดีเซลและเชื้อเพลิงดีเซลได้แก่ B7, B20 และ B100

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1. กำลังที่ได้จากเครื่องยนต์ต่อปริมาณการใช้เชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงที่มีอัตราส่วนการผสมของไบโอดีเซลมากจะให้กำลังมากกว่าเชื้อเพลิงที่มีส่วนผสมของไบโอดีเซลน้อย
2. ปริมาณของเขม่าไอเสียจากเชื้อเพลิงดีเซลที่มีอัตราส่วนการผสมของไบโอดีเซลมาก มีปริมาณน้อยกว่าเชื้อเพลิงดีเซลที่มีอัตราส่วนการผสมของไบโอดีเซลน้อย

## 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์ ISUZU 4JJ1 ในรอบเครื่องยนต์ 1000, 1500 และ 2000 rpm ภาระงานของเครื่องยนต์ 10%, 20%, 30% และ 40% ของภาระงานสูงสุด วัดค่าโดย EDDY CURRENT DYNAMOMETER ED-150-LC
3. ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของอนุภาค (Particulate Matter) จากเชื้อเพลิงผสมระหว่างดีเซลและไบโอดีเซลได้แก่ B7, B20 และ B100 ในสภาวะการใช้งานของเครื่องยนต์ ISUZU 4JJ1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถวัดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (BSFC) อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเบรก (BSEC) และประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก (BTE) ของเชื้อเพลิงดีเซลผสมไบโอดีเซล
2. เข้าใจลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของอนุภาคจากเครื่องยนต์ดีเซลระบบคอมมอนเรลที่ใช้เชื้อเพลิงดีเซลผสมไบโอดีเซล



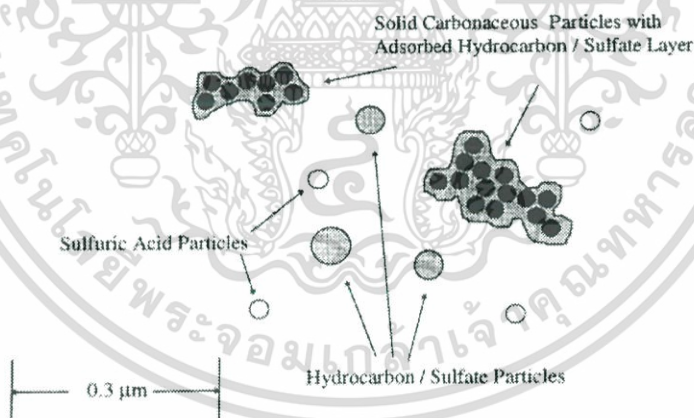
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

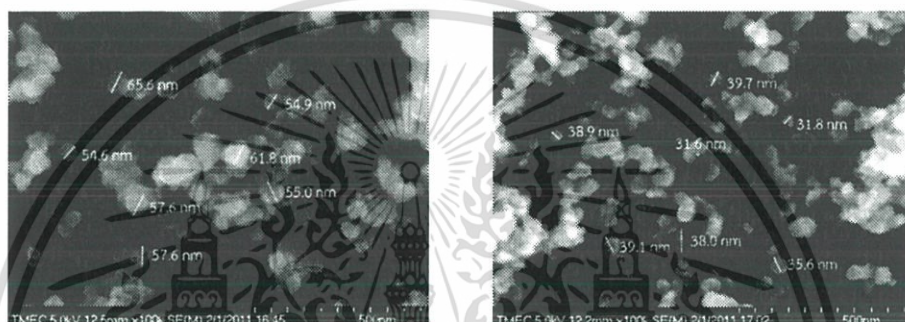
งานวิจัย Engines and nanoparticles จัดทำโดย David B. Kittelson [3] ได้ทำการศึกษาเรื่องอนุภาค (Particulate Matter, PM) ของเขม่าจากเครื่องยนต์ ผลการวิจัยพบว่าส่วนประกอบหลักของเขม่าจากเครื่องยนต์ดีเซลคือคาร์บอนของแข็งที่เกาะกันเป็นกลุ่มก้อน เถ้าโลหะ ไอรระเหย และส่วนประกอบของกำมะถันตามรูปที่ 2.1 แสดงองค์ประกอบของเขม่าประกอบด้วยน้ำมันหล่อลื่นเผาไหม้ไม่หมด (Unburnt oil) 25%, เชื้อเพลิงเผาไหม้ไม่หมด (Unburnt fuel) 7%, อนุภาค 41%, เถ้าและอื่น ๆ (Ash and other) 13%, กำมะถันและน้ำ (Sulfate and water) 14% นอกจากนี้สามารถแบ่งขนาดอนุภาคในบรรยากาศได้เป็น PM10 มีเส้นผ่านศูนย์กลาง  $< 10 \mu\text{m}$ , อนุภาคละเอียด (Fine particles) หรือ PM2.5 มีเส้นผ่านศูนย์กลาง  $< 2.5 \mu\text{m}$ , อนุภาคละเอียดมาก (Ultrafine particles) มีเส้นผ่านศูนย์กลาง  $< 0.10 \mu\text{m}$  และอนุภาคนาโน (Nanoparticles) มีเส้นผ่านศูนย์กลาง  $< 0.05 \mu\text{m}$  หรือ 50 nm



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบหลักและโครงสร้างของอนุภาคจากไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลทั่วไป [3]

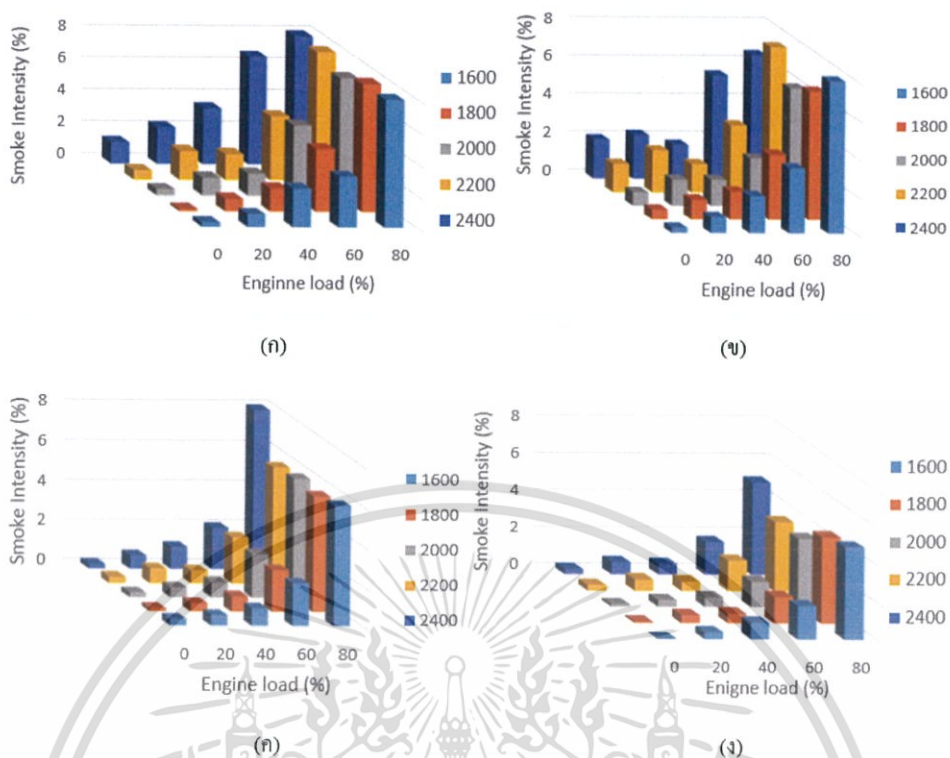
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัย Comparative study of particulate matter characterization under diffusion flame between diesel and biodiesel fuels จัดทำโดย Songtam Laosuwan, Preechar Karin and Chinda Charoenphonphanich จาก King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang [13] ทำการวิจัยเกี่ยวกับการดักจับอนุภาคจากเชื้อเพลิงดีเซลและไบโอดีเซล พฤติกรรมการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation) ภายในตัวกรองอนุภาคดีเซลพบว่าขนาดและการรวมตัวของอนุภาคดีเซล (Diesel particulate matter) มีขนาดใหญ่กว่าไบโอดีเซลตามรูปที่ 2.2 เนื่องจากไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงที่มีองค์ประกอบของออกซิเจนสูงดังนั้นโมเลกุลออกซิเจนในไบโอดีเซลสามารถส่งเสริมกระบวนการเผาไหม้ให้สามารถเผาไหม้ได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น



รูปที่ 2.2 ขนาดของอนุภาคจาก (ก) เชื้อเพลิงดีเซล (ข) เชื้อเพลิงไบโอดีเซล [14]

งานวิจัย Impact of biodiesel on small CI engine combustion behavior and particle emission characteristic จัดทำโดย Preechar Karin, Park Watanawongskorn, Jiramed Boonsakda, Eakkawut Saenkhumvong, Sippakorn Rungsritanapaisan, Settavit Srivarocha, Chinda Charoenphonphanich, Nuwong Chollacoop and Katsunori Hanamur จาก King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang [11] จากรูปที่ 2.3 พบว่าความเข้มข้นของเขม่าที่ออกมาจากเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดขนาดเล็กขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายอย่าง ผลของการวิจัยแสดงให้เห็นถึงตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อความเข้มข้นของเขม่าเรียงจากสูงไปต่ำคือ ภาระงานของเครื่องยนต์, สัดส่วนการผสมไบโอดีเซลและความเร็วรอบของเครื่องยนต์ตามลำดับ เมื่อเพิ่มสัดส่วนการผสมเชื้อเพลิงไบโอดีเซลความเข้มข้นของเขม่าจะลดลงเนื่องจากองค์ประกอบของออกซิเจนในเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นทำให้กระบวนการเผาไหม้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

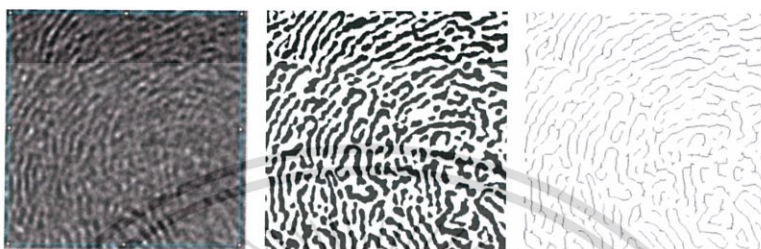


รูปที่ 2.3 ความเข้มข้นของเขม่าจากเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กที่ภาระงานของเครื่องยนต์, ความเร็วรอบและเชื้อเพลิงต่างกัน (a) ดีเซล (b) B20 (c) B60 และ (d) B100 [11]

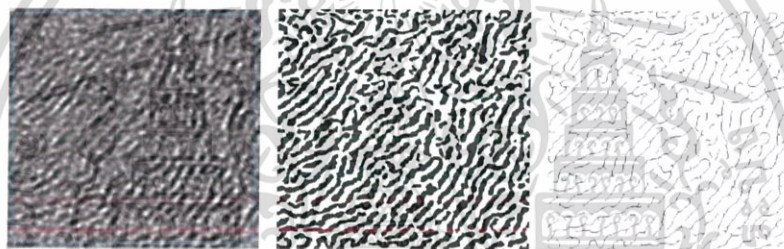
งานวิจัย Characterization of morphology, nanostructure, and oxidation kinetics of biofuel particulate matters จัดทำโดย Park Watanawongskorn, Preechar Karin, Nuwong Chollacoop, Katsunori Hanamura จาก King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang [9] ได้ศึกษาขนาดของความยาวผลึกกราฟีน (Graphene) จากรูปที่ 2.4 โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน พบว่าจากรูปที่ 2.5 ความยาวผลึกกราฟีนของเชื้อเพลิง BE20 มีความยาวที่สั้นที่สุดเมื่อเทียบกับความยาวผลึกกราฟีนของเชื้อเพลิง B100 และดีเซล ความยาวผลึกกราฟีนเฉลี่ยของอนุภาคจากเชื้อเพลิง BE20, B100 และดีเซลมีขนาดเท่ากับ 0.93 nm, 1.35 nm และ 1.45 nm ตามลำดับ



(ก) BE20

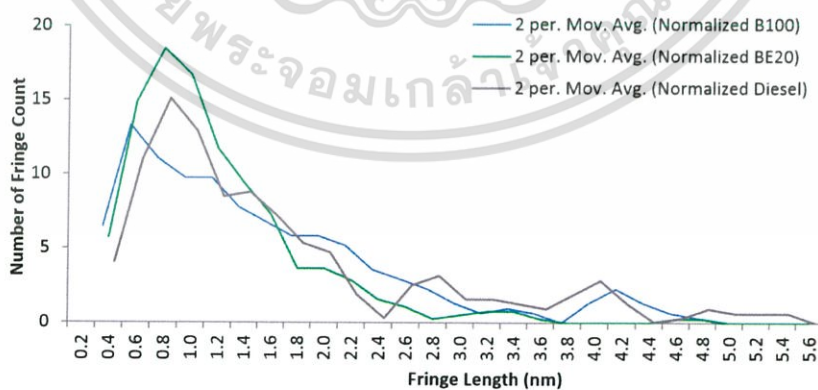


(ข) B100



(ค) ดีเซล

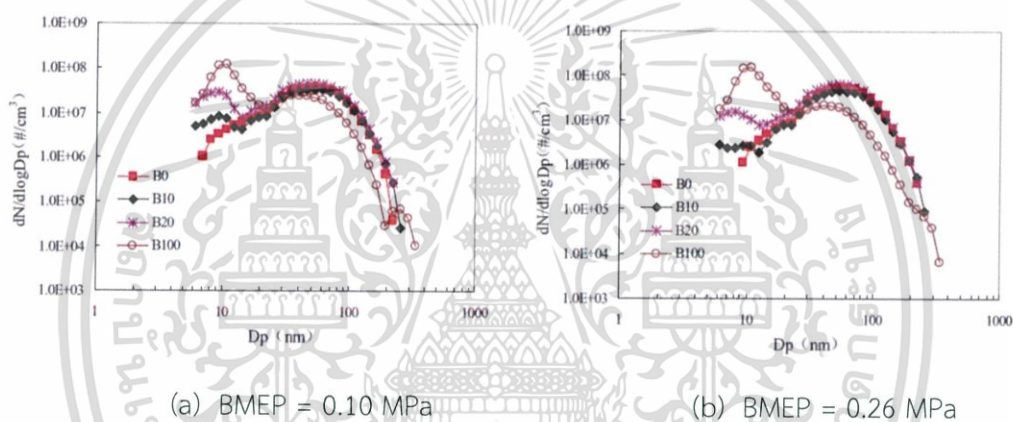
รูปที่ 2.4 กระบวนการวัดขนาดความยาวผลึกกราฟีนของอนุภาค (ก) BE20 (ข) B100 (ค) ดีเซล [9]



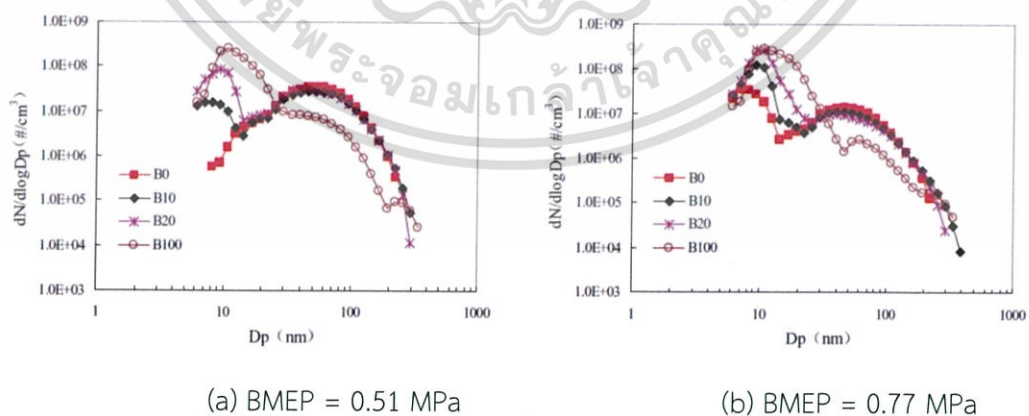
รูปที่ 2.5 ความยาวผลึกกราฟีนของอนุภาคจากเชื้อเพลิง B100, BE20 และดีเซล [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัย Particle number and size distribution from a diesel engine with jatropha biodiesel fuel จัดทำโดย Pi-qiang Tan, Zhi-yuan Hu, Di-ming Lou และ Bo Li [10] ได้ศึกษาเกี่ยวกับขนาดและจำนวนของอนุภาคจากเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้เชื้อเพลิงไบโอดีเซลผลิตจากสบู่ดำ จากงานวิจัยพบว่าขนาดของอนุภาคเดี่ยว (Single primary particle size) และอนุภาคกลุ่ม (Accumulation particle size) ของเชื้อเพลิงดีเซลและไบโอดีเซลจากเครื่องยนต์ดีเซลระบบคอมมอนเรลไคเรคแบบฉีดโดยตรง (Common rail direct injection) โดยใช้เครื่องทดสอบ Engine exhaust particle sizer (EEPS) วัดขนาดอนุภาค จากผลการทดลองในรูปที่ 2.6 พบว่าจำนวนอนุภาคที่ (a) BMEP = 0.10 MPa และ (b) BMEP = 0.26 MPa และรูปที่ 2.7 จำนวนอนุภาคที่ (a) BMEP = 0.51 MPa และ (b) BMEP = 0.77 MPa ที่รอบเครื่องยนต์ 2000 rpm พบว่าจำนวนอนุภาคของไบโอดีเซลน้อยกว่าดีเซลเพราะว่าไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงมีออกซิเจนในโมเลกุลมากทำให้มีการเผาไหม้ได้สมบูรณ์กว่าและมีขนาดเล็กกว่าอนุภาคดีเซล



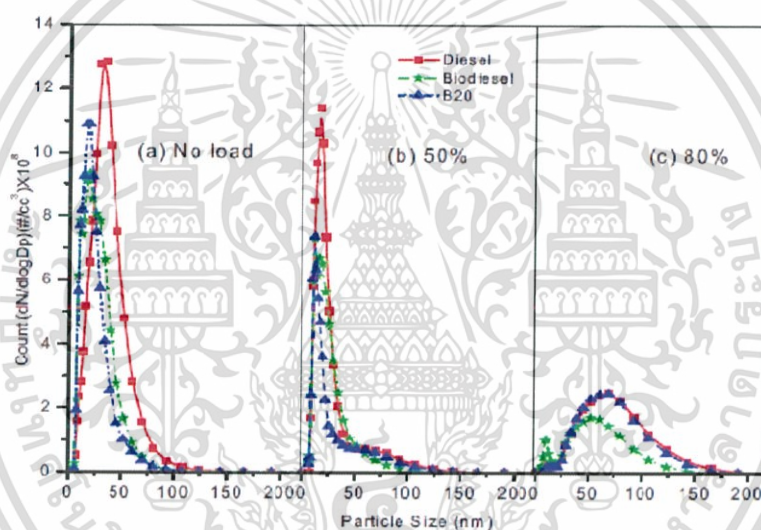
รูปที่ 2.6 ขนาดและจำนวนอนุภาคที่ค่า (a) BMEP = 0.10 MPa และ (b) BMEP = 0.26 MPa [10]



รูปที่ 2.7 ขนาดจำนวนอนุภาคที่ค่า (a) BMEP = 0.51 MPa และ (b) BMEP = 0.77 MPa [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัย Particulate characterization of biodiesel fuelled compression Ignition engine จัดทำโดย Dhananjay Kumer Srivastava และ Avinash Kumer Agarwal [4] ได้ศึกษาลักษณะของอนุภาคจากเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดโดยใช้เชื้อเพลิงไบโอดีเซล ซึ่งหาขนาดของอนุภาคโดยใช้เครื่องวัดขนาดอนุภาคของเครื่องยนต์ดีเซล (Engine Exhaust Particle Sizer : EEPS) ซึ่งสามารถวัดขนาดอนุภาคได้ในช่วง 5.6 ถึง 560 nm จากรูปที่ 2.8 พบว่าจำนวนของอนุภาคดีเซลอยู่ในช่วง 29.4-34 nm จำนวน  $12.8 \times 10^8$  Particle/cc<sup>3</sup> ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคไบโอดีเซลที่อยู่ในช่วง 16.5-19.1 nm จำนวน  $9.23 \times 10^8$  Particle/cc<sup>3</sup> เหตุผลที่ขนาดอนุภาคของไบโอดีเซลเล็กกว่าเนื่องจากเชื้อเพลิงไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงที่มีออกซิเจนเป็นส่วนประกอบที่มากกว่าจึงช่วยให้การเผาไหม้สมบูรณ์ยิ่งขึ้นและทำให้ออกซิเจนเข้าสัมผัสพื้นที่ผิวของอนุภาคได้ง่ายมากกว่าเชื้อเพลิงดีเซลจึงส่งผลให้อนุภาคถูกเผาไหม้ซ้ำ ขนาดอนุภาคไบโอดีเซลจึงมีขนาดเล็กกว่าอนุภาคดีเซล

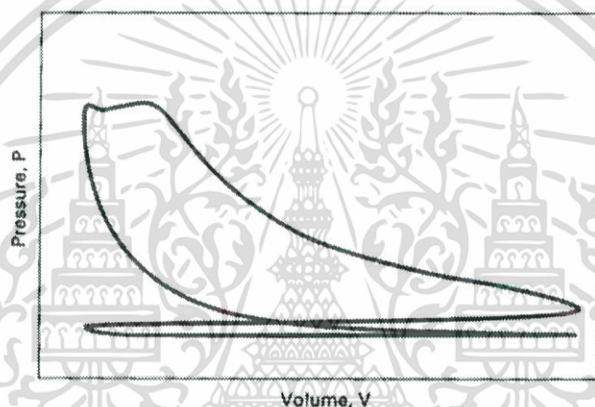


รูปที่ 2.8 ขนาดและจำนวนอนุภาคจากเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบ 1500 rpm และภาระดังนี้ (a) no load (b) 50% load (c) 80% load โดยใช้เชื้อเพลิง ดีเซล, ไบโอดีเซล (B5) และ ไบโอดีเซล (B100) [4]

## 2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.2.1 วัฏจักรดีเซล (Diesel cycle)

เครื่องยนต์ดีเซลยุคเก่าเชื้อเพลิงจะถูกฉีดเข้ามาในช่วงสุดท้ายของจังหวะอัด จะเห็นได้จากกราฟในรูปที่ 2.9 จากการที่ต้องใช้ช่วงเวลาหนึ่งในการฉีดเชื้อเพลิงและการลุกไหม้ที่เกิดขึ้นค่อนข้างล่าช้า ทำให้การเผาไหม้ส่วนหนึ่งเกิดขึ้นในจังหวะทำงานและตำแหน่งความดันสูงสุดเลยผ่านจุดศูนย์กลางตายบนไปเล็กน้อย จึงสามารถที่จะอนุโลมให้การสันดาปของเครื่องยนต์แบบนี้ เป็นการรับพลังงานความร้อนแบบความดันคงที่ตามวัฏจักรเครื่องยนต์ดีเซลสามารถเรียกได้อีกแบบหนึ่งว่า “วัฏจักรความดันคงที่ (Constant-Pressure cycle)”



รูปที่ 2.9 P-V ของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด 4 จังหวะ [16]

### 2.2.2 งานของเครื่องยนต์

งานของเครื่องยนต์สันดาปภายในแบบลูกสูบชักหรือลูกสูบเคลื่อนที่สลับทิศทางคือ งานที่เกิดจากการขยายตัวของก๊าซในห้องเผาไหม้ งานคือผลจากการกระทำของแรงผ่านระยะทางซึ่งเป็นแรงที่เกิดจากความดันที่กระทำต่อลูกสูบที่กำลังเคลื่อนที่ทำให้เกิดงานของเครื่องยนต์สันดาปภายใน

$$W = \int F dx = \int P A_p dx \quad (2-1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย  $P$  = ความดันในห้องเผาไหม้

$A_p$  = พื้นที่หน้าตัดของลูกสูบ

$x$  = ระยะที่ลูกสูบเคลื่อนที่

และ

$$A_p dx = dV \quad (2-2)$$

โดยมี  $dV$  เป็นปริมาตรส่วนที่ลูกสูบแทนที่ เมื่อเคลื่อนที่ไปเป็นระยะทาง  $dx$  จึงสามารถเขียนสมการของงานได้ดังนี้

$$W = \int P dV \quad (2-3)$$

เนื่องจากเครื่องยนต์ส่วนใหญ่มีจำนวนสูบมากกว่าหนึ่งสูบจึงเป็นการสะดวกกว่าหากเราวิเคราะห์วัฏจักรของเครื่องยนต์ต่อหน่วยมวลของก๊าซภายในกระบอกสูบ โดยการใช้ปริมาตรจำเพาะ  $v$  แทนปริมาตร  $V$  และงานจำเพาะ  $w$  แทนงาน  $W$

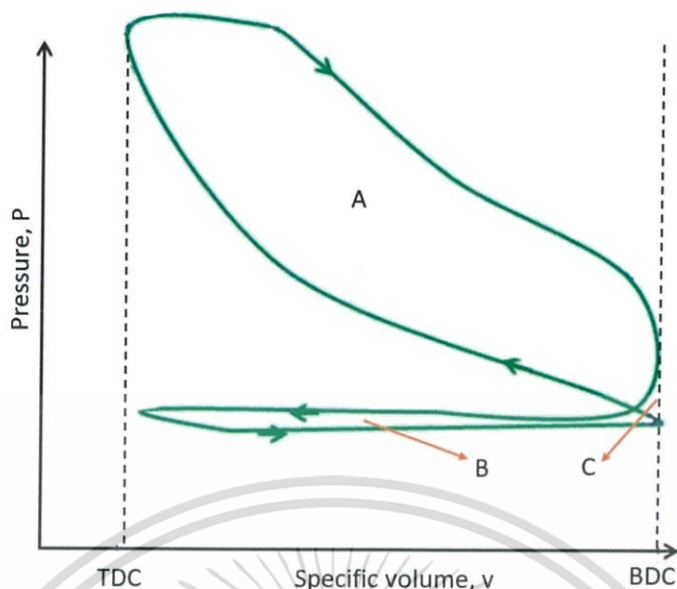
$$w = W/m \quad v = V/m \quad w = \int P dv \quad (2-4)$$

ถ้า  $P$  เป็นค่าความดันในห้องเผาไหม้เรียกงานนี้ว่า งานบ่งชี้ (Indicated work,  $w_i$ ) งานที่ได้จากเพลาคือจะน้อยกว่างานบ่งชี้เสมอเนื่องจากถูกหักล้างด้วยแรงเสียดทานของกลไกและไหลดพ่วงอื่นๆ งานที่เครื่องยนต์ให้กับเพลาคือเรียกว่า งานเพล่า (Brake work,  $w_b$ ) ซึ่งมีหน่วยเป็น kJ/kg

$$w_b = w_i - w_f \quad (2-5)$$

$w_i$  = งานบ่งชี้จำเพาะ

$w_f$  = งานจำเพาะที่เกิดจากแรงเสียดทาน



รูปที่ 2.10 กราฟ P-V ของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด

พื้นที่ในส่วนบนของกราฟวัฏจักรเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดในรูปที่ 2.10 คือ งานที่เกิดจากจังหวะอัดและจังหวะให้กำลังเรียกงานนี้ว่า งานบ่งชี้รวบยอด (Gross indicated work) พื้นที่ A และ C ส่วนพื้นที่ในช่วงล่างเป็นงานที่เกิดจากจังหวะดูดไอดีและคายไอเสียเป็นงานที่เครื่องยนต์ใช้ไป พื้นที่ B และ C เรียกว่างานนี้ว่า งานสูบ (Pump work) เพราะฉะนั้น งานบ่งชี้สุทธิ (Net indicated work) จึงมีค่าเท่ากับ

$$W_{\text{net}} = W_{\text{gross}} + W_{\text{pump}} \quad (2-6)$$

งานสูบ  $w_{\text{pump}}$  ของเครื่องยนต์ที่ไม่ได้ใช้อุปกรณ์ช่วยประจุไอดี (Supercharger) มีค่าเป็นลบ ดังนั้น

$$W_{\text{net}} = (\text{Area A}) - (\text{Area B}) \quad (2-7)$$

ส่วนเครื่องยนต์ที่ใช้อุปกรณ์ช่วยประจุไอดี ความดันของไอดีอาจสูงกว่าความดันไอเสียทำให้งานสูบมีค่าเป็นบวกดังนี้

$$W_{\text{net}} = (\text{Area A}) + (\text{Area B}) \quad (2-8)$$

ซูเปอร์ชาร์เจอร์จึงช่วยเพิ่มงานบ่งชี้ได้แต่เครื่องยนต์ก็ต้องสูญเสียงานส่วนหนึ่งไปเพราะต้องนำงานส่วนหนึ่งจากเพลลาข้อเหวี่ยงไปใช้ในการขับเคลื่อนซูเปอร์ชาร์เจอร์

### 2.2.3 แรงบิดและกำลัง (Torque and power)

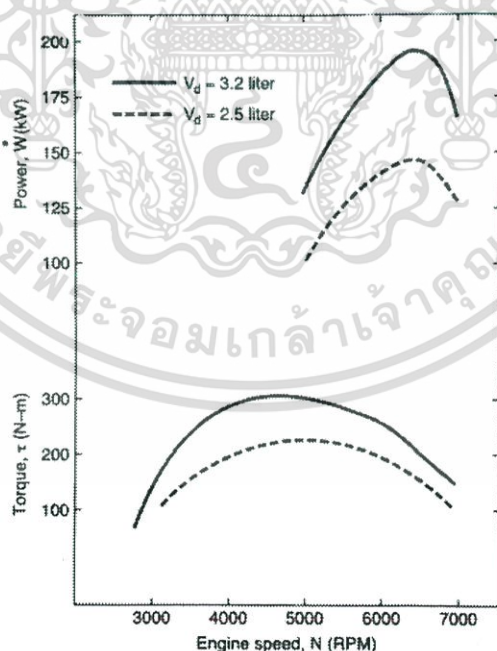
แรงบิด (Torque,  $T$ ) คือ ตัวบ่งชี้ถึงความสามารถในการทำงานของเครื่องยนต์เป็นแรงที่กระทำต่อแกนหมุนมีหน่วยเป็น Nm

แรงบิดมีความสัมพันธ์กับงานเพลาดังนี้

$$W_b = 4\pi T \quad (2-9)$$

โดยที่  $W_b$  = งานเพลาของการทำงาน 2 รอบ หรือ 1 วัฏจักร สำหรับเครื่องยนต์ 4 จังหวะ

ความเร็วรอบที่เครื่องยนต์ให้แรงบิดสูงสุดเรียกว่า ความเร็วรอบแรงบิดสูงสุด (Maximum brake torque speed หรือ MBT) เป้าหมายในการออกแบบเครื่องยนต์คือ การทำให้กราฟแรงบิดจากรูปที่ 2.11 ให้เป็นเส้นแนวราบและมีค่าสูงทั้งช่วงความเร็วรอบสูงและความเร็วรอบต่ำ โดยแรงบิดสูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อมีการประจุไอดีเข้าสู่กระบอกสูบได้มากและมีความดันสูง ส่วนกำลังเพลาของเครื่องยนต์ที่ลดลงในช่วงความเร็วสูงเพราะเวลาที่ลิ้นเปิดให้ไอดีเข้าน้อยลงและแรงเสียดทานที่เพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบของเครื่องยนต์ ส่วนเหตุผลที่ช่วงแรกแรงบิดต่ำกว่าแรงบิดสูงสุดเพราะช่วงเวลาการสูญเสียความร้อนมากจะลดลงเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราส่วนการอัดจะทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 2.11 กำลังและแรงบิดบนความเร็วรอบของเครื่องยนต์ในรถยนต์ทั่วไป [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.4 อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (Air - fuel ratio) และอัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศ (Fuel - air ratio)

ค่าความร้อน ( $Q_{in}$ ) ที่ให้แก่เครื่องยนต์ได้จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนกับออกซิเจนในอากาศซึ่งช่วยให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีขึ้น การเผาไหม้ดังกล่าวนี้จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่ออากาศหรือออกซิเจนกับเชื้อเพลิงผสมกันในสัดส่วนที่พอเหมาะเท่านั้น ดังนั้นอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (AF) และอัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศ (FA) เป็นตัวแปรสำคัญในการกำหนดสัดส่วนหรือความเข้มข้นของไอดี

$$AF = m_a / m_f = \dot{m}_a / \dot{m}_f \quad (2-10)$$

$$FA = m_f / m_a = \dot{m}_f / \dot{m}_a = 1/AF \quad (2-11)$$

โดยที่  $m_a$  = มวลของอากาศ  
 $\dot{m}_a$  = อัตราส่วนการไหลของมวลอากาศ  
 $m_f$  = มวลของเชื้อเพลิง  
 $\dot{m}_f$  = อัตราส่วนการไหลของมวลเชื้อเพลิง

อัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio,  $\phi$ ) ในการเปรียบเทียบสัดส่วนระหว่างอัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศของเครื่องยนต์จริง (Actual) กับอัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศสมมูล (Stoichiometric)

$$\phi = (FA)_{Act} / (FA)_{Stoich} = (AF)_{Stoich} / (AF)_{Act} \quad (2-12)$$

## 2.2.5 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (Specific fuel consumption)

เรากำหนดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ ดังนี้

$$sfc = \dot{m}_f / \dot{W} \quad (2-13)$$

โดย :  $\dot{m}_f$  = อัตราการไหลของเชื้อเพลิง

$\dot{W}$  = กำลังของเครื่องยนต์

หากใช้กำลังเพลลาในการคำนวณจะได้ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (Brake specific fuel consumption)

$$bsfc = \dot{m}_f / \dot{W}_b \quad (2-14)$$

นอกจากนี้เราสามารถให้คำจำกัดความของอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะอื่นๆ ได้อีก เช่น

$fsfc$  = อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเสียดทาน

(Friction specific fuel consumption)

$igsfc$  = อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะสุทธิรวมยอด

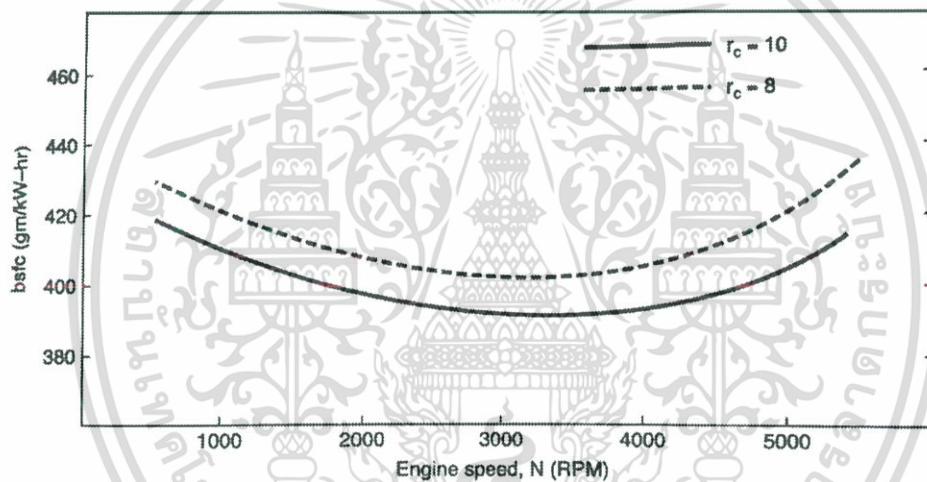
(Indicated gross specific fuel consumption)

$insfc$  = อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะสุทธิ

(Indicated net specific fuel consumption)

$psfc$  = อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะสูบ

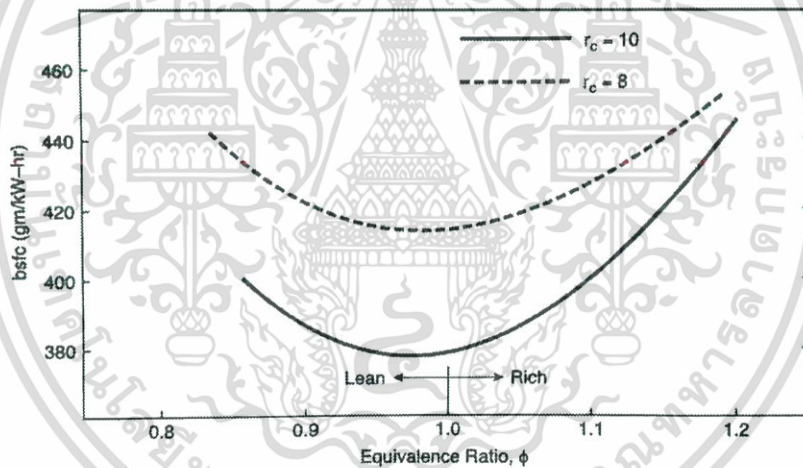
(Pumping specific fuel consumption)



รูปที่ 2.12 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกเมื่อเทียบกับความเร็วรอบของเครื่องยนต์ (N) กับอัตราส่วนการอัด ( $r_c$ ) [16]

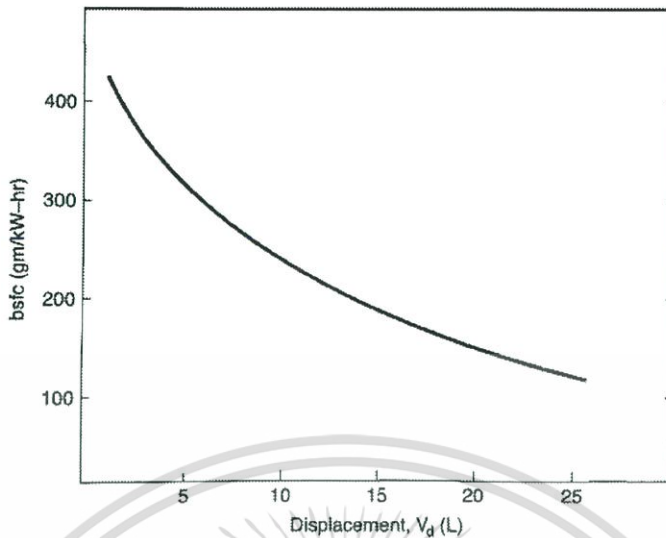
ที่ความเร็วรอบต่ำ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกจะลดลงเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นจนถึงค่าต่ำสุดแล้วจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในย่านความเร็วรอบสูงเนื่องจากต้องใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงส่วนหนึ่งไปชดเชยกับแรงเสียดทานภายในเครื่องยนต์ขณะทำงานซึ่งเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบ ส่วนที่ความเร็วรอบต่ำ ค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงสูงเหตุผลมีดังนี้

- ก. การทำงานต่อหนึ่งวัฏจักรใช้เวลานานเกินไปทำให้สูญเสียพลังงานความร้อนทางผนังกระบอกสูบและผนังห้องเผาไหม้
- ข. การออกแบบลูกเบี้ยวควบคุมลิ้นเน้นการทำงานที่แรงบิดขณะความเร็วปานกลางและกำลังที่ความเร็วสูง ซึ่งจะทำให้การประจุไอดีและการคายไอเสียที่ความเร็วต่ำไม่เหมาะสมเท่าที่ควร
- ค. หากวัดค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่ความเร็วต่ำขณะที่ลิ้นมีเสื่อเปิดเพียงเล็กน้อยจะได้ค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงสูงมากเนื่องจากเครื่องยนต์สูญเสียพลังงานไปในรูปของงานสูบ



รูปที่ 2.13 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกเมื่อเทียบกับอัตราส่วนสมมูลและอัตราส่วนการอัดที่แตกต่างกัน [16]

รูปที่ 2.13 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกเปลี่ยนตามอัตราส่วนการอัดและอัตราส่วนสมมูลจะลดลงเมื่ออัตราส่วนการอัดเพิ่มขึ้นเนื่องจากประสิทธิภาพเชิงความร้อน ( $\eta_r$ ) สูงขึ้นและค่านี้จะมีค่าต่ำสุดในช่วงที่ค่าอัตราส่วนสมมูลประมาณ 1 ( $\phi = 1$ ) ค่อนไปทางไอดีเจือจางเล็กน้อยและจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อออกห่างจากตำแหน่งนี้ไม่ว่าจะไปทางไอดีบางลงหรือไอดีหนาขึ้นก็ตาม



รูปที่ 2.14 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกเมื่อเทียบกับค่าความจุของกระบอกสูบ [16]

อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกมีค่าลดลงเมื่อความจุของเครื่องยนต์เพิ่มขึ้นและมีค่าต่ำกว่ามากสำหรับเครื่องยนต์ขนาดใหญ่เป็นผลมาจากอัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นทำให้การสูญเสียความร้อนน้อยลง นอกจากนี้แรงเสียดทานก็ยังมีย่าน้อยกว่าด้วยเนื่องจากเครื่องยนต์ขนาดใหญ่ส่วนมากออกแบบให้ทำงานที่ความเร็วรอบต่ำ

### 2.2.6 ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ (Engine efficiency)

ช่วงเวลาการสันดาปในแต่ละวัฏจักรของเครื่องยนต์ใช้เวลาที่สั้นมาก ทำให้โมเลกุลของเชื้อเพลิงไม่สามารถจับคู่กับโมเลกุลของออกซิเจนได้อย่างครบถ้วนและอุณหภูมิบางตำแหน่งก็ไม่ได้เอื้ออำนวยให้เกิดปฏิกิริยาดังกล่าวเสมอไปด้วย ดังนั้นเชื้อเพลิงส่วนหนึ่งจึงไม่ถูกเผาไหม้และถูกปล่อยออกจากเครื่องยนต์พร้อมไอเสีย จึงใช้ประสิทธิภาพการสันดาป (Combustion efficiency,  $\eta_c$ ) ในการกำหนดสัดส่วนเชื้อเพลิงที่ถูกเผาไหม้หากเครื่องยนต์ทำงานได้อย่างสมบูรณ์ในสภาวะปกติ ประสิทธิภาพการสันดาปจะมีค่าระหว่าง 0.95 ถึง 0.98 สำหรับการงานต่อหนึ่งสูบและหนึ่งวัฏจักรความร้อนที่ได้จากการสันดาปคือ

$$Q_{in} = m_f Q_{LHV} \eta_c \tag{2-15}$$

ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal efficiency)

$$\eta_t = \frac{W}{Q_{in}} = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_{in}} = \frac{\dot{W}}{m_f Q_{LHV} \eta_c} = \frac{\eta_f}{\eta_c} \tag{2-16}$$

|        |             |                                  |
|--------|-------------|----------------------------------|
| โดยที่ | $W$         | = งานต่อวัฏจักร                  |
|        | $\dot{W}$   | = กำลัง                          |
|        | $m_f$       | = มวลเชื้อเพลิงต่อวัฏจักร        |
|        | $\dot{m}_f$ | = อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง   |
|        | $Q_{LHV}$   | = ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง       |
|        | $\eta_c$    | = ประสิทธิภาพการสันดาป (เผาไหม้) |

สามารถกำหนดประสิทธิภาพเชิงความร้อนได้สองแบบคือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสุทธิโดยใช้กำลังสุทธิแทนค่าและประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกโดยใช้กำลังเบรกแทนค่าในสมการข้างต้นแล้วสัดส่วนของค่าทั้งสองมีค่าเท่ากับประสิทธิภาพเชิงกล

$$\eta_m = (\eta_t)_b / (\eta_t) \quad (2-17)$$

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสุทธิของเครื่องยนต์ทั่วไปมีค่าประมาณ 50% ถึง 60 % ส่วนประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกมีค่าประมาณ 30% เครื่องยนต์ดีเซลหมุนช้าขนาดใหญ่อาจมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกมากกว่า 50%

### 2.2.7 เชื้อเพลิงดีเซล (Diesel fuel)

เชื้อเพลิงดีเซลมีหลายแบบที่มีน้ำหนักโมเลกุลและคุณสมบัติทางฟิสิกส์แตกต่างกันอย่างมาก การแบ่งประเภททำได้โดยการจัดระดับหรือแบ่งตามประเภทใช้งาน ยังมีการบำบัดโดยโรงกลั่นมาก น้ำหนักโมเลกุลก็จะน้อย, ความหนืดน้อยและราคาสูง ลำดับที่แบ่งโดยตัวเลขเริ่มจาก 1 ไปถึง 5 หรือ 6 และควด้วยพยัญชนะ (เช่น A1, 2D) ยิ่งตัวเลขต่อน้ำหนักโมเลกุลก็จะน้อยและความหนืดน้อยด้วย แล้วการแบ่งลำดับโดยคุณสมบัติทางฟิสิกส์เป็นเกณฑ์ เช่น ความหนืด (Viscosity), จุดวาบไฟ (Flash point), จุดไหลเท (Pour point), ค่าซีเทน (Cetane number), ปริมาณกำมะถันและอื่น ๆ

เพื่อความสะดวกเราสามารถแบ่งน้ำมันดีเซลเป็นสองประเภทคือ น้ำมันดีเซลใสหรือน้ำมันดีเซลโมเลกุลเบา (light diesel fuel) มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 170 สูตรทางเคมีโดยประมาณ  $C_{12.3}H_{22.2}$  และน้ำมันดีเซลข้นหรือน้ำมันดีเซลโมเลกุลหนัก (heavy diesel fuel) น้ำหนักโมเลกุลประมาณ 200 สูตรทางเคมีโดยประมาณ  $C_{14.6}H_{24.8}$  น้ำมันดีเซลโมเลกุลเบาจะมีความหนืดต่ำและหัวฉีดสามารถฉีดกระจายเป็นฝอยได้ละเอียดแต่ราคาแพง ส่วนน้ำมันดีเซลโมเลกุลหนักเหมาะกับเครื่องยนต์ขนาดใหญ่ที่มีความดันในการฉีดเชื้อเพลิงสูงและมีระบบอุ่นเชื้อเพลิงเพราะมีความหนืดสูงแต่ราคาถูก

## 2.2.8 เชื้อเพลิงไบโอดีเซล

ไบโอดีเซล (Biodiesel) คือ เชื้อเพลิงที่ได้จากน้ำมันพืชและสัตว์ที่ผ่านกระบวนการทางเคมี เกิดเป็นสารที่เรียกว่า เมทิลเอสเทอร์ (Methyl ester) หรือเอทิลเอสเทอร์ (Ethyl ester) ซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงดีเซลสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลได้เป็นอย่างดีโดยไม่ต้องทำการดัดแปลงเครื่องยนต์มากนัก ซึ่งไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์ต้องผ่านกระบวนการแปรรูปด้วยกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่า ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) นั่นคือ การนำน้ำมันพืชหรือสัตว์ที่มีกรดไขมันไปทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์โดยใช้กรดหรือด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีทำให้ได้เอสเทอร์ โดยจะเรียกชนิดของไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์ตามชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเคมีไบโอดีเซลชนิดเอสเทอร์นี้มีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงเชื้อเพลิงดีเซลมากที่สุด ซึ่งข้อดีของไบโอดีเซลมีดังต่อไปนี้

- 1.สามารถลดการนำเข้าเชื้อเพลิงดีเซลเพราะเป็นเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากพืชในประเทศไทยได้ ซึ่งเป็นการสร้างความมั่นคงทางพลังงานด้านเชื้อเพลิง ความมั่นคงทางภาคเกษตรกรรมไทย เพิ่มการสร้างงานของประชาชนและรายได้ในภาคส่วนที่เกี่ยวข้อง

- 2.สามารถลดมลพิษจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์เช่น สารประกอบไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon, HC) อนุภาคและคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide, CO) เพราะมีส่วนประกอบของออกซิเจนในโมเลกุลของเชื้อเพลิงทำให้มีผลกระทบต่อสภาพสิ่งแวดล้อมและสุขภาพน้อยกว่าเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป

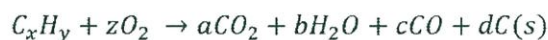
- 3.สามารถลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide, CO<sub>2</sub>) เนื่องจากการใช้ไบโอดีเซลเป็นการใช้พลังงานแบบหมุนเวียนครบกระบวนการ (Carbon Neutral)

## 2.2.9 อนุภาค (Particulate Matter, PM)

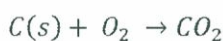
อนุภาคในไอเสียจากเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดคืออนุภาคคาร์บอนสถานะของแข็งเกิดขึ้นบริเวณที่ไอความเข้มข้นสูงภายในกระบอกสูบขณะเกิดการสันดาปซึ่งสามารถสังเกตได้จากควันดำจากท่อไอเสียพร้อมกับกลิ่นไม่พึงประสงค์ต่อสิ่งแวดล้อม อนุภาคคาร์บอนในไอเสียนี้จะมีความเข้มข้นสูงเมื่อเครื่องยนต์มีการทำงานของเครื่องยนต์สูงเพราะเชื้อเพลิงจะถูกฉีดจำนวนมากกว่าปกติเพื่อให้เครื่องยนต์ทำงานได้ตามปกติทำให้ไอมีความเข้มข้นมากและอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงสูง ซึ่งสามารถสังเกตได้จากควันดำที่ออกมาจากปลายท่อไอเสียของรถบรรทุกหรือหัวรถจักรที่กำลังเร่งขึ้นทางชันหรือกำลังออกรถ

อนุภาคเหล่านี้จะรวมตัวเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนในสถานะของแข็งจำนวนมากโดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 10 nm ถึง 80 nm กลุ่มอนุภาคเหล่านี้จะดูดซับไฮโดรคาร์บอนและสารประกอบ

อื่นๆ ไว่ที่ผิว กลุ่มอนุภาคหนึ่งอาจประกอบด้วยอนุภาคเดียวถึง 4,000 เม็ด ซึ่งเม็ดคาร์บอนเหล่านี้เกิดขึ้นบริเวณที่ไอดีซึมภายในห้องเผาไหม้ ซึ่งไม่มีออกซิเจนเพียงพอในการทำปฏิกิริยากับคาร์บอนให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์



หลังจากนั้นเม็ดคาร์บอนเหล่านี้จะถูกก๊าซที่ไหลปั่นป่วนในห้องเผาไหม้คลุกเคล้าให้ผสมกับออกซิเจนส่วนที่เหลือแล้วทำปฏิกิริยากันจนกลายเป็น  $CO_2$



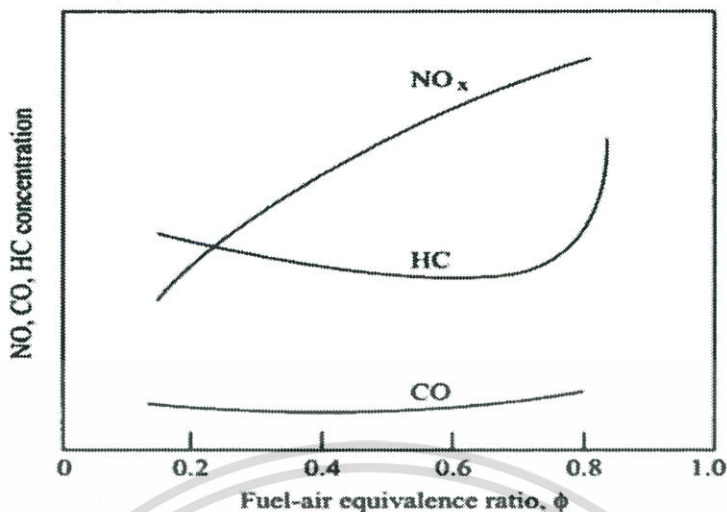
ไม่ต่ำกว่า 90% ของเม็ดคาร์บอนภายในเครื่องยนต์จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนดังกล่าวจึงเหลือส่วนที่ปนมาในไอเสียจำนวนน้อย หากเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดใช้ไอดีความเข้มข้นแบบอัตราส่วนสมมูลย์แทนไอดีจาง ปริมาณอนุภาคในไอเสียจะสูงเกินกว่ามาตรฐานกำหนดไว้

### 2.2.10 ไฮโดรคาร์บอน

ไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon, HC) คือ เชื้อเพลิงที่ไม่ได้เผาไหม้ซึ่งเกิดขึ้นแตกต่างกันไปตามชนิดของเชื้อเพลิง รูปร่างทางเรขาคณิตของห้องเผาไหม้ก็มีผลต่อไฮโดรคาร์บอนในไอเสีย ซึ่งไฮโดรคาร์บอนที่ออกมาจากไอเสียจะผสมกับอากาศและส่งกลิ่นเหม็น ทำให้วัยวะเกิดการระคายเคืองและบางส่วนก็เป็นสารก่อมะเร็ง ไฮโดรคาร์บอนเหล่านี้ (ยกเว้นมีเทน) สามารถทำปฏิกิริยากับอากาศและอาจจะทำให้เกิดหมอกควัน

สาเหตุการเกิดไฮโดรคาร์บอน

1. อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ไม่สมบูรณ์จากรูปที่ 2.15 แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงมีผลอย่างมากกับปริมาณไฮโดรคาร์บอน ไอดีที่เข้มจะขาดออกซิเจนในการทำปฏิกิริยากับคาร์บอนทำให้ปริมาณไฮโดรคาร์บอนและคาร์บอนมอนอกไซด์ในไอเสียสูง แต่ถ้าไอดีเจือจางเกินไปและการสันดาปไม่ทั่วถึงปริมาณไฮโดรคาร์บอนก็จะสูงเช่นเดียวกันและจุดวิกฤติของการสันดาปก็คือการที่ไอดีไม่สามารถถูกจุดระเบิดได้เพราะไอดีเจือจางเกินไป



รูปที่ 2.15 มลพิษในไอเสียที่ความเข้มข้นของไอดีมากจนออกซิเจนไม่เพียงพอสำหรับทำปฏิกิริยากับคาร์บอนของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด [16]

2. การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ในการทำงานของเครื่องยนต์จริงถึงแม้ว่าจะเป็นส่วนผสมที่เหมาะสมแก่การสันดาปที่สุด การสันดาปที่เกิดขึ้นจริงก็ไม่สมบูรณ์ทำให้มีไฮโดรคาร์บอนปนอยู่ในไอเสียอยู่ดี ซึ่งเกิดจากสาเหตุหลายประการด้วยกัน เช่น การผสมระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศที่ไม่ทั่วถึงทำให้เชื้อเพลิงบางส่วนไม่สามารถจับคู่กับออกซิเจนได้และเปลวไฟที่ดับลงเมื่อถึงผนังกระบอกสูบก็ทำให้ไอดีบริเวณผนังกระบอกสูบไม่ถูกสันดาป ไอดีส่วนนี้มีความหนาเพียงไม่ถึงมิลลิเมตรเท่านั้นแม้จะไม่ถูกเผาไหม้โดยตรงแต่บางส่วนก็จะถูกสันดาปจากการหมุนควงและการไหลอย่างปั่นป่วนของก๊าซภายในกระบอกสูบ

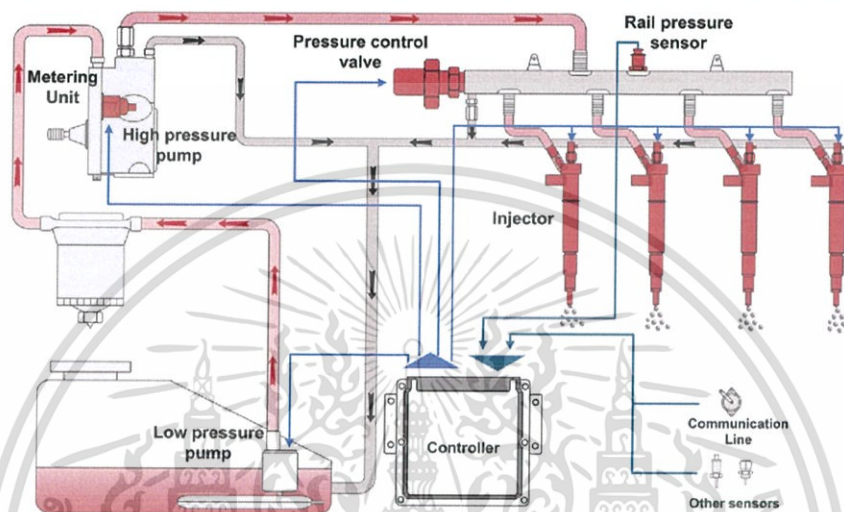
3. ปริมาตรช่องแคบ ในช่วงจังหวะอัดและช่วงเริ่มต้นของการสันดาปอากาศ เชื้อเพลิงภายใต้ความดันสูงจะแทรกเข้าไปในส่วนต่างๆ ของห้องเผาไหม้ ปริมาณเชื้อเพลิงในช่องแคบดังกล่าวนี้อาจมีสัดส่วนได้ถึง 3% ในจังหวะทำงานซึ่งความดันกระบอกลดลงจนต่ำกว่าความดันในช่องแคบ ไอดีส่วนนี้จะไหลกลับมาในห้องเผาไหม้และลุกไหม้เมื่อเปลวไฟลามมาถึงแต่ก็ยังคงมีส่วนหนึ่งซึ่งยังไม่ถูกเผาไหม้เนื่องจากเปลวไฟดับลงก่อน

4. การรั่วผ่านลิ้นไอเสีย ในจังหวะอัดและช่วงที่เกิดการสันดาปซึ่งความดันในกระบอกสูบมีค่าสูง ไอดีบางส่วนจะถูกอัดแทรกตัวอยู่ส่วนขอบของลิ้นไอเสียและรั่วผ่านลิ้นไอเสียสู่ท่อร่วมไอเสีย และเมื่อลิ้นไอเสียเปิดไอดีในช่องแคบบริเวณขอบลิ้นก็จะไหลลงสู่ท่อร่วมไอเสียด้วยเช่นเดียวกันในช่วงแรกของการระบายไอเสียในแต่ละวัฏจักรจึงเป็นช่วงที่มีไฮโดรคาร์บอนในไอเสียสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. การเปิดซ้อนกันของลิ้น (Valve overlap) ในช่วงที่ลิ้นไอดีและลิ้นไอเสียเปิดพร้อมกันไอดีสามารถไหลลัดผ่านลิ้นไอเสียไปสู่ท่อรวมไอเสียได้ ผู้ออกแบบเครื่องยนต์ที่ดีจะมีการป้องกันปัญหานี้ไว้ แต่ก็ยังมีไอดีเล็ดลอดไประดับหนึ่ง โดยเฉพาะที่ความเร็วรอบต่ำซึ่งเวลาที่ลิ้นเปิดซ้อนกันค่อนข้างนานกว่าสภาวะปกติ

### 2.2.11 ระบบคอมมอนเรล ไตเรค อินเจคชั่น (Common rail Direct Injection)



รูปที่ 2.16 การทำงานของระบบคอมมอนเรลหรือระบบจ่ายน้ำมันแบบรางร่วม (Common rail) [1]

ระบบคอมมอนเรลหรือระบบจ่ายน้ำมันแบบรางร่วม (Common rail) ระบบจ่ายเชื้อเพลิงประกอบด้วยปั๊มแรงดันทำหน้าที่อัดน้ำมันเข้าสู่รางร่วม (Common Rail) แล้วรอจังหวะการฉีดที่เหมาะสมที่ประมวลได้จากหน่วยควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Control Unit, ECU) เมื่อถึงจังหวะการฉีดเชื้อเพลิง วาล์วน้ำมันหรือเข็มหัวฉีดจะถูกยกขึ้นด้วยแรงยกจากโซลินอยด์ซึ่งระบบฉีดเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์รุ่นเก่าจะเป็นปั๊มเชื้อเพลิงแบบแถวเรียงหรือจานจ่าย โดยยกเข็มหัวฉีดด้วยแรงดันในตัวน้ำมันที่ปั๊มเชื้อเพลิงอัดเข้ามาและสามารถเอาชนะแรงกดของสปริงที่หัวฉีดแล้วทำให้เข็มหัวฉีดยกเปิดน้ำมันให้ไหลผ่านไปได้ วิธีแบบนี้จะไม่สามารถควบคุมจังหวะการฉีดเชื้อเพลิงให้ยืดหยุ่นได้แตกต่างจากระบบคอมมอนเรลซึ่งใช้ระบบไฟฟ้าในการควบคุม ดังนั้นระบบคอมมอนเรลจึงสามารถฉีดเชื้อเพลิงยืดหยุ่นได้ตามสภาวะการทำงานที่เหมาะสมตามการประมวลผลของ ECU ที่สามารถรับรู้สภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ได้จากเซนเซอร์ต่าง ๆ เช่น ปริมาณออกซิเจนในไอเสีย, แรงดันในรางร่วม, คันเร่งและอื่น ๆ ปัจจุบันจึงสามารถควบคุมให้มีการฉีดแบบหลายครั้ง (Multiple- Injection) ซึ่งสามารถช่วยลดปริมาณมลพิษจากก๊าซไนตริกออกไซด์และช่วยให้มีการเผาไหม้ที่ไม่รุนแรงลดการน็อกของเครื่องยนต์ได้ ปัจจุบันสามารถควบคุมการฉีดสูงสุดได้ถึง 5 ครั้ง คือ การฉีดครั้งที่ 1 เป็นการฉีดล่อ (Pilot Injection) เป็นส่วนช่วยให้เชื้อเพลิงส่วนแรกผสมกับอากาศได้ดีก่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากนั้นจึงฉีดครั้งที่ 2 ตามมาเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของเชื้อเพลิง (Pre-Injection) ในการเริ่มการเผาไหม้ส่วนแรก การฉีดครั้งที่ 3 เป็นการฉีดเชื้อเพลิงหลัก (Main-Injection) เป็นการฉีดที่ควบคุมสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ตามคันเร่ง การฉีดครั้งที่ 4 เป็นการฉีดเพื่อเผาเขม่าหรืออนุภาค (After-Injection) เพื่อให้มีการเผาไหม้สมบูรณ์ที่สุด และการฉีดที่ 5 เป็นการฉีดควบคุมอุณหภูมิไอเสีย (Post-Injection) สำหรับในประเทศไทยส่วนใหญ่จะเป็นการฉีดเชื้อเพลิงแบบ 2 ครั้ง คือ Pilot และ Main-Injection แต่คาดว่าจะพัฒนาเป็นเทคโนโลยีการฉีดแบบ 5 ครั้ง เนื่องจากข้อกำหนดของการปลดปล่อยมลพิษที่เข้มงวดมากขึ้น

### 2.2.12 ทฤษฎีหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนใช้ลำอนุภาคอิเล็กตรอนพลังงานสูงในการตรวจสอบวัตถุแทนแสงธรรมดา เนื่องจากความยาวคลื่นของคลื่นลำอนุภาคอิเล็กตรอนนั้นสั้นกว่าความยาวคลื่นของแสงอยู่ 100,000 เท่า ทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนสามารถให้ประสิทธิภาพการใช้งานด้านกำลังขยายและการแจกแจงรายละเอียดได้เหนือกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง โดยสามารถแยกรายละเอียดของวัตถุที่เล็กขนาด 10 อังสตรอม หรือ 0.1 nm ซึ่งกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงจะแจกแจงรายละเอียดได้ประมาณ 0.2  $\mu\text{m}$  จึงทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมีกำลังขยายสูงมากถึง 500,000 เท่า ดังแสดงในตารางที่ 2.1

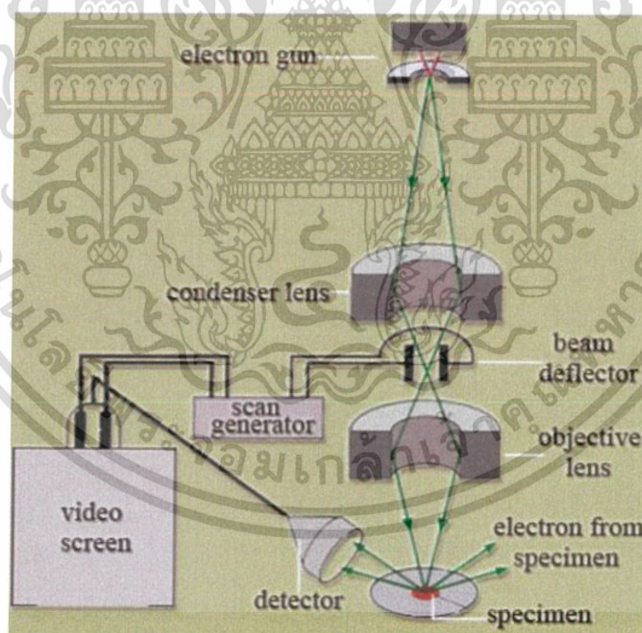
ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน [13]

| ความสามารถของอุปกรณ์ (Capability)           | กล้องจุลทรรศน์แบบแสง | กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) | กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) |
|---|----------------------|---|---|
| Source of illumination                      | Visible light        | Electron beam                             | Electron beam                             |
| การแจกแจงรายละเอียดสูงสุด (Best resolution) | 200 nm               | 3 - 6 nm                                  | 0.2 nm                                    |
| กำลังขยาย (Magnification)                   | 10 - 1,000X          | 20 - 150,000X                             | 500 - 500,000X                            |
| ระยะชัดลึก (Depth of field)                 | 0.002 - 0.05 mm      | 0.003 - 1 mm                              | 0.004 - 6 mm                              |
| ชนิดของเลนส์                                | แก้ว                 | Electromagnetic                           | Electromagnetic                           |
| ลักษณะของภาพ                                | ภาพ 2 มิติ           | ภาพ 3 มิติ                                | ภาพ 3 มิติ                                |
| สภาวะ                                       | บรรยากาศ             | สุญญากาศ                                  | สุญญากาศ                                  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.13 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด หลักการทำงานกล้องประเภทนี้จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบโดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึกและแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ หลังจากนั้นจะถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไปและสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ (Video Screen)



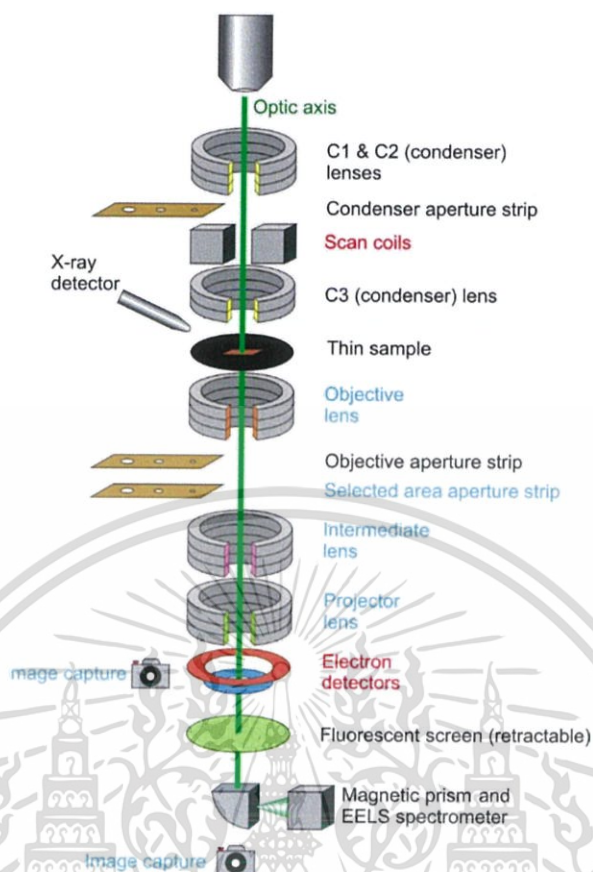
รูปที่ 2.17 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.14 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope : TEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน วิธีการสร้างภาพจากกล้องประเภทนี้จะทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่างซึ่งเหมาะสำหรับศึกษารายละเอียดขององค์ประกอบภายในของตัวอย่าง เช่น องค์ประกอบภายในเซลล์, ลักษณะของเยื่อหุ้มเซลล์, ผนังเซลล์ เป็นต้น ซึ่งให้รายละเอียดสูงกว่ากล้องจุลทรรศน์ชนิดอื่น ๆ เนื่องจากมีกำลังขยายและประสิทธิภาพในการแจกแจงรายละเอียดสูงมาก (กำลังขยายสูงสุดประมาณ 0.1 nm)

หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านจะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบโดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser Lens) เพื่อให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการหลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างที่จะศึกษา (Specimen) ซึ่งตัวอย่างที่จะศึกษาจะต้องมีลักษณะที่แบนและบางมาก (บ่อยครั้งที่พบว่าอยู่ในช่วงระหว่าง 1-100 nm) หลังจากนั้นจะเกิดการกระเจิงของอนุภาคเมื่ออิเล็กตรอนทะลุผ่านตัวอย่างไปและอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่างนี้ก็จะถูกปรับโฟกัสของภาพโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective Lens) ซึ่งเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่ขยายภาพให้ได้รายละเอียดมากที่สุดจากนั้นจะได้รับการขยายด้วยเลนส์ทอดภาพไปสู่จอร์รับ (Projector Lens) และปรับโฟกัสของลำอนุภาคอิเล็กตรอนให้ความยาวพอดีที่จะปรากฏบนฉากเรืองแสงสุดท้ายจะเกิดการสร้างภาพ



รูปที่ 2.18 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM) [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

# วิธีดำเนินการวิจัย (Research Methodology)

### 3.1 แนวคิดในการวิจัย

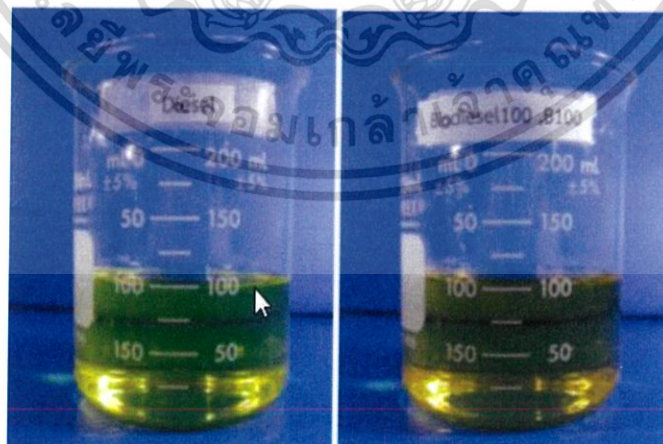
งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมของเชื้อเพลิงดีเซลและไบโอดีเซลที่มีผลกระทบต่อเครื่องยนต์ ทั้งทางด้านประสิทธิภาพของเครื่องยนต์และไอเสีย โดยมีการแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ข้อดังต่อไปนี้

1. ศึกษาอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (Brake specific fuel consumption, BSFC) อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเบรก (Brake specific energy consumption, BSEC) ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก (Brake thermal efficiency, BTE) ของเชื้อเพลิงดีเซลผสมไบโอดีเซลในอัตราส่วนปริมาตร 93:7 (B7), 80:20 (B20) และ 0:100 (B100) ต่อเครื่องยนต์คอมมอนเรล ขนาด 3000 cc

2. ศึกษาเกี่ยวกับมลภาวะที่เกิดจากเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงดีเซลผสมไบโอดีเซลได้แก่ B7, B20 และ B100 โดยใช้เครื่องวัดประสิทธิภาพควันดำ (Smoke meter)

3. ศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างอนุภาคที่เกิดจากเชื้อเพลิงดีเซลและไบโอดีเซลในอัตราส่วนต่างกัน โดยใช้ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

### 3.2 ตัวอย่างและคุณสมบัติของเชื้อเพลิงดีเซลและไบโอดีเซล



รูปที่ 3.1 เชื้อเพลิง B0 และ B100 [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบมี 3 ชนิด ได้แก่ เชื้อเพลิงชนิดที่ 1 คือดีเซลผสมไบโอดีเซลในอัตราส่วน 93 ต่อ 7 โดยปริมาตร (B7) เชื้อเพลิงชนิดที่ 2 คือดีเซลผสมไบโอดีเซลในอัตราส่วน 80 ต่อ 20 โดยปริมาตร (B20) และเชื้อเพลิงชนิดที่ 3 คือ ไบโอดีเซลล้วน (B100) โดยมีค่าคุณสมบัติตามตารางที่ 3.1

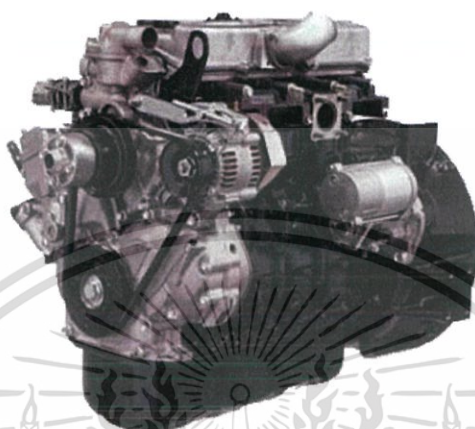
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของเชื้อเพลิง [11]

| Properties                           | diesel           | Biodiesel                 |
|--------------------------------------|------------------|---------------------------|
| Chemical formula                     | $C_{14.2}H_{28}$ | $C_{14.9}H_{29.9}O_{1.9}$ |
| Carbon (% mass)                      | 85.1             | 74.5                      |
| Hydrogen (% mass)                    | 14.0             | 12.5                      |
| Oxygen (% mass)                      | 0.9              | 13.0                      |
| Auto ignition temp (°C)              | 288              | 294                       |
| Calorific value (kJ/kg)              | 46,180           | 39,525                    |
| Heat of vaporization                 | 250              | 300                       |
| Viscosity @40°C (mm <sup>2</sup> /s) | 3.0              | 4.5                       |
| Density @25°C (kg/m <sup>3</sup> )   | 844.8            | 875.3                     |
| Stoichiometric air fuel ratio        | 14.7             | 12.3                      |
| Distillation (°C)                    |                  |                           |
| T10                                  | 214.3            | 336.2                     |
| T30                                  | 250.3            | 339.7                     |
| T50                                  | 281.5            | 341.4                     |
| T70                                  | 312.5            | 345.4                     |
| T90                                  | 352.3            | 351.2                     |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 คุณสมบัติของเครื่องยนต์ที่ใช้ในการทดสอบ

ในการวิจัยนี้จะทำการทดสอบเชื้อเพลิง 3 ชนิดกับเครื่องยนต์ ISUZU D-max 3.0 ซึ่งมีคุณสมบัติของเครื่องยนต์เป็นไปตามตารางที่ 3.2 และ รูปที่ 3.3

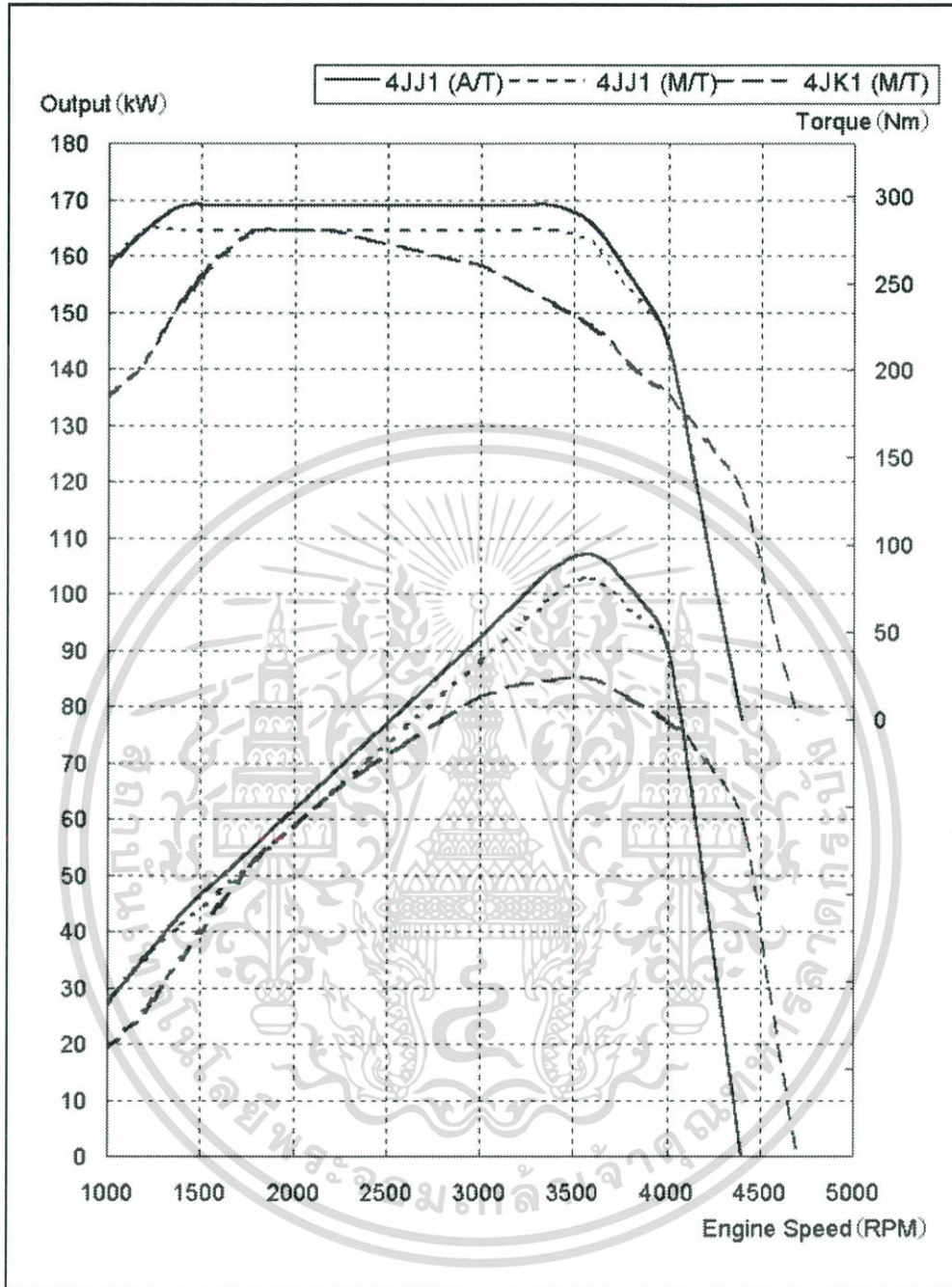


รูปที่ 3.2 เครื่องยนต์ ISUZU 4JJ1-TC [7]

ตารางที่ 3.2 ENGINE MAIN DATA & SPECIFICATIONS [7]

|                                       |                       |
|---------------------------------------|-----------------------|
| Engine Model                          | 4JJ1-TC               |
| Engine Type                           | Diesel, Four Cycle    |
| Cylinder Layout – Number of Cylinders | Inline-Four Cylinders |
| Fuel Injection Order                  | 1-3-4-2               |
| Bore x Stroke (mm)                    | 95.4 x 104.9          |
| Total Displacement (cc)               | 2999                  |
| Compression Ratio                     | 18.3                  |
| Compression Pressure at Cranking      | More than 3Mpa        |
| Combustion Chamber Type               | Direct Injection      |
| Cylinder Liner                        | Liner Less            |
| Engine Idle Speed (RPM)               | 700 ±25               |
| Fast Engine Idle Speed (RPM)          | 750 ±25               |
| No Load Maximum Engine Speed (RPM)    | 4400 ±50              |
| Fuel System                           | Common Rail System    |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

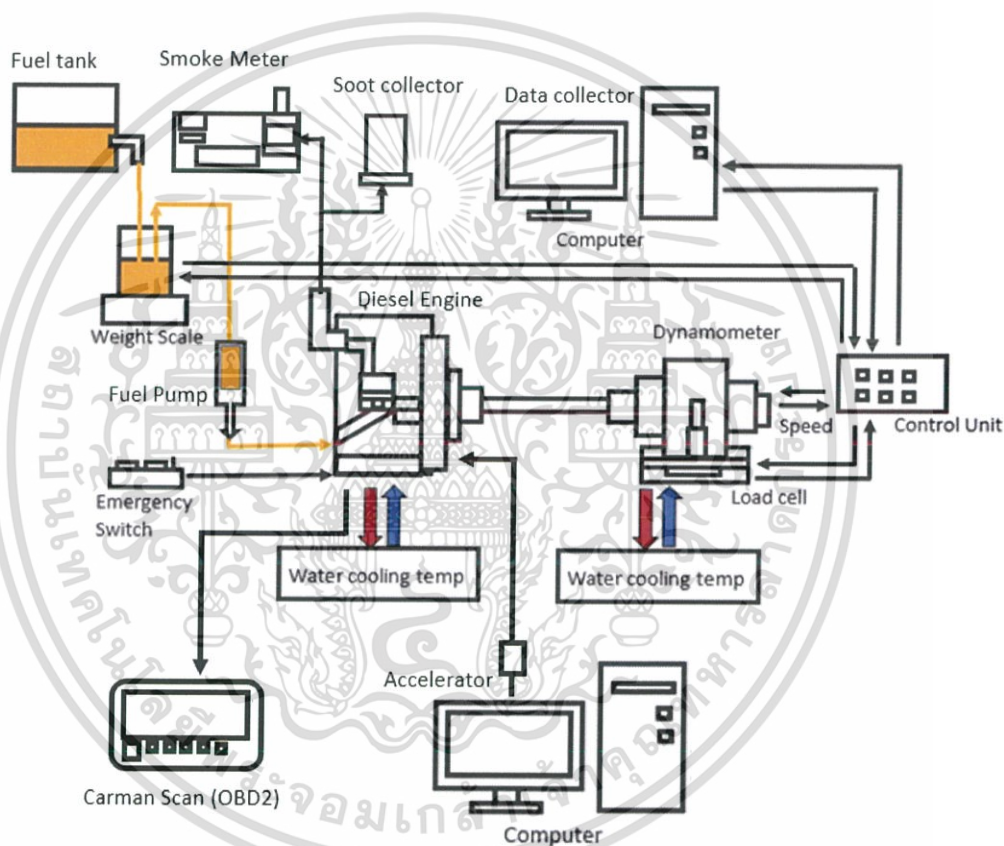


รูปที่ 3.3 ภาระงานของเครื่องยนต์และกำลังของแต่ละรอบความเร็วรอบที่เครื่องยนต์ทำได้ [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก, อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเบรก, ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกและความเข้มข้นของไอเสียจากเครื่องยนต์

ระบบการควบคุมและจัดเก็บข้อมูลการทำงานอาศัยการควบคุมหลายส่วนเพื่อควบคุมและรับสัญญาณจากสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ตามรูปที่ 3.4 โดยมีการทดสอบแบ่งออกเป็นสามส่วน ได้แก่ ระบบควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์ ระบบควบคุมภาระงานของเครื่องยนต์และอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงและระบบการจัดเก็บไอเสีย



รูปที่ 3.4 แผนภาพการทำงานโดยรวมของชุดการทดสอบเครื่องยนต์

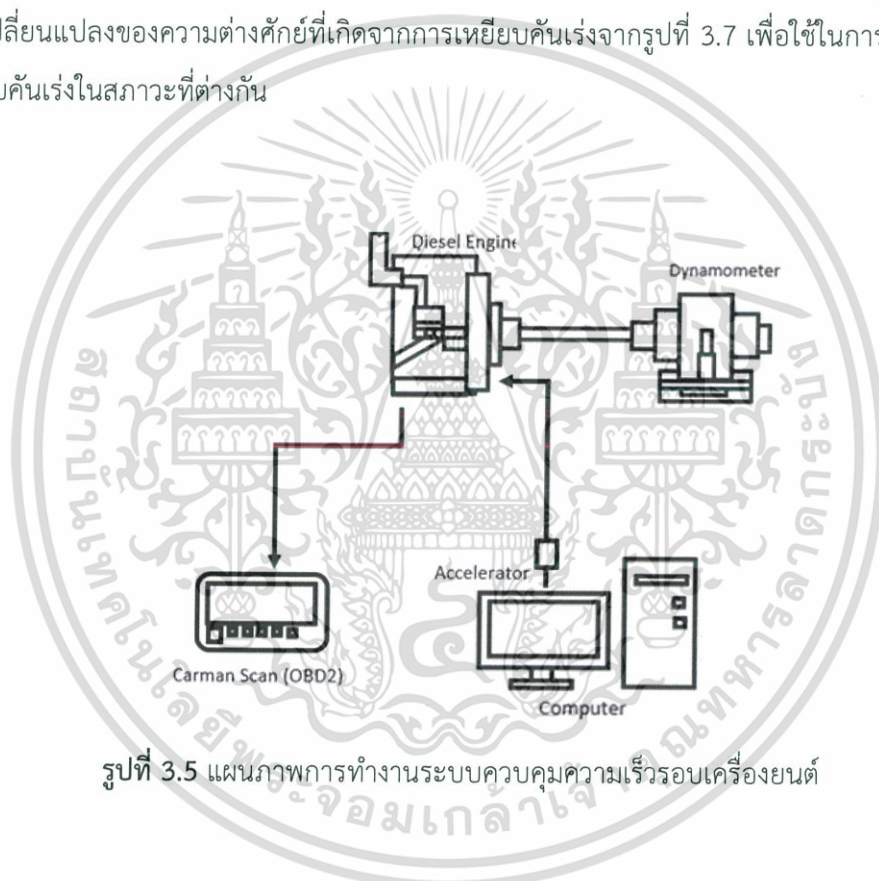
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.1 ระบบควบคุมความเร็วรอบเครื่องยนต์ (Speed Control)

ระบบควบคุมความเร็วรอบเครื่องยนต์เป็นการควบคุมความเร็วของเครื่องยนต์ที่อาศัยหลักการของคันเร่งไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ อุปกรณ์แปลงกระแสไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ควบคุม ทำหน้าที่เสมือนเป็นเท้าเหยียบคันเร่งทำให้เครื่องยนต์มีความเร็วคงที่ตามรูปที่ 3.5

#### 3.4.1.1 คอมพิวเตอร์

อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์ทำหน้าที่ในการควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์ให้คงที่โดยใช้โปรแกรมและการรับส่งสัญญาณไฟฟ้าไปที่การ์ดเก็บรวบรวมข้อมูล ซึ่งอาศัยการเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ที่เกิดจากการเหยียบคันเร่งจากรูปที่ 3.7 เพื่อใช้ในการจำลองการเหยียบคันเร่งในสถานะที่ต่างกัน

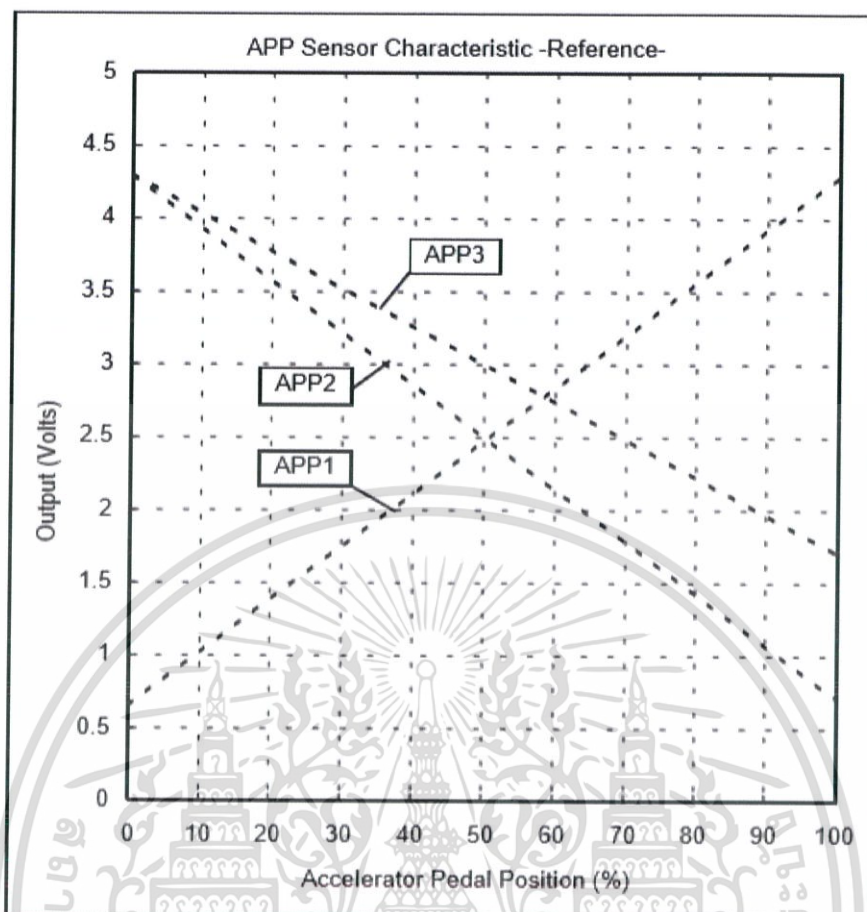


รูปที่ 3.5 แผนภาพการทำงานระบบควบคุมความเร็วรอบเครื่องยนต์



รูปที่ 3.6 คอมพิวเตอร์ควบคุมและจัดเก็บข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 กราฟคั้นแรงไฟฟ้าของเครื่องยนต์ [7]



รูปที่ 3.8 การ์ดเก็บรวบรวมข้อมูล (Data Acquisition Card) [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.1.2 การ์ดเก็บรวบรวมข้อมูล (Data Acquisition Card)

การ์ดเก็บรวบรวมข้อมูลใช้ในการรับส่งค่าสัญญาณของเซนเซอร์ผ่านเข้า Data logger ในการวิจัยนี้ใช้การ์ดรุ่น Ni 6009 USB (14pin) ซึ่งมี AI resolution 14 bits, อัตราในการจัดเก็บข้อมูล เท่ากับ 48 kS/s, มี 8 ช่องสำหรับ Single-ended analog input (AI) และมี 12 digital input/output (DIO) channels ช่วง 10 volt สำหรับ Analog output range ตามรูปที่ 3.8

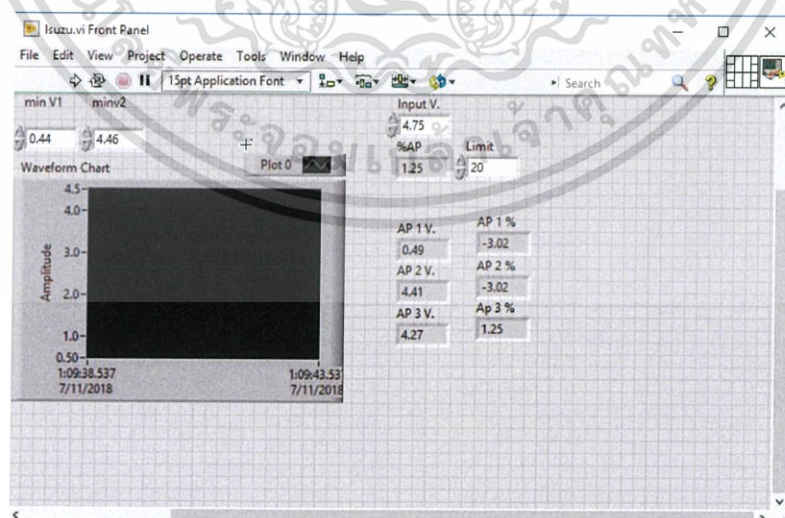
### 3.4.1.3 โปรแกรมควบคุมความเร็วรอบเครื่องยนต์

โปรแกรมควบคุมความเร็วรอบเครื่องยนต์เป็นส่วนควบคุมการจ่ายสัญญาณไฟฟ้าเพื่อทำหน้าที่ควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่ทำการทดลอง ซึ่งสัญญาณที่จ่ายออกไปจะทำให้ความเร็วรอบของเครื่องยนต์แตกต่างกันตามรูปที่ 3.9

## 3.4.2 ระบบควบคุม, ภาระงานของเครื่องยนต์, การจ่ายเชื้อเพลิงและการวัดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง

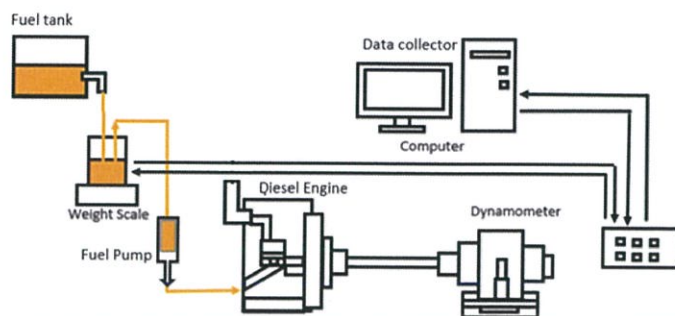
### 3.4.2.1 อุปกรณ์ควบคุมภาระงานของเครื่องยนต์หรือไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer)

ไดนาโมมิเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่สร้างภาระงานของเครื่องยนต์เพื่อดำเนินการหมุนหรือเป็นภาระงานทางกลให้กับเครื่องยนต์ที่นำมาทดสอบตามรูปที่ 3.11 โดยที่ไดนาโมมิเตอร์จะส่งค่าแรงบิดและความเร็ว ณ ขณะทำการเบรกไปยังกล่องควบคุมเพื่อเป็นการควบคุมให้ภาระงานของเครื่องยนต์เป็นไปตามต้องการ



รูปที่ 3.9 โปรแกรมควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์

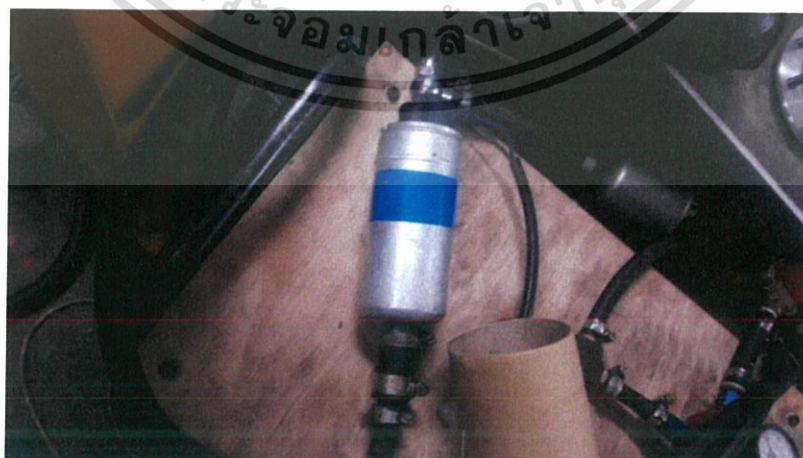
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 แผนภาพการทำงานของระบบควบคุมการจ่ายเชื้อเพลิง



รูปที่ 3.11 ไดนาโมมิเตอร์ [5]



รูปที่ 3.12 ปืนจ่ายเชื้อเพลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.2.2 ป้อนจ่ายเชื้อเพลิง

ป้อนจ่ายเชื้อเพลิงใช้ในการป้อนน้ำมันเชื้อเพลิงจากภาชนะบรรจุเพื่อนำไปป้อนให้กับระบบคอมมอนเรลตามรูปที่ 3.12 ก่อนที่ระบบป้อนแบบคอมมอนเรลจะส่งเชื้อเพลิงไปยังห้องเผาไหม้ในลำดับถัดไป

### 3.4.2.3 ตัวกรองน้ำมัน

ตัวกรองน้ำมันใช้ในการกรองน้ำมันให้สะอาดเพื่อป้องกันสิ่งสกปรกที่อาจตกลงไปในภาชนะบรรจุเชื้อเพลิงมีลักษณะตามรูปที่ 3.13 เพื่อลดปัญหาที่จะเกิดขึ้นในระบบส่งจ่ายเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์

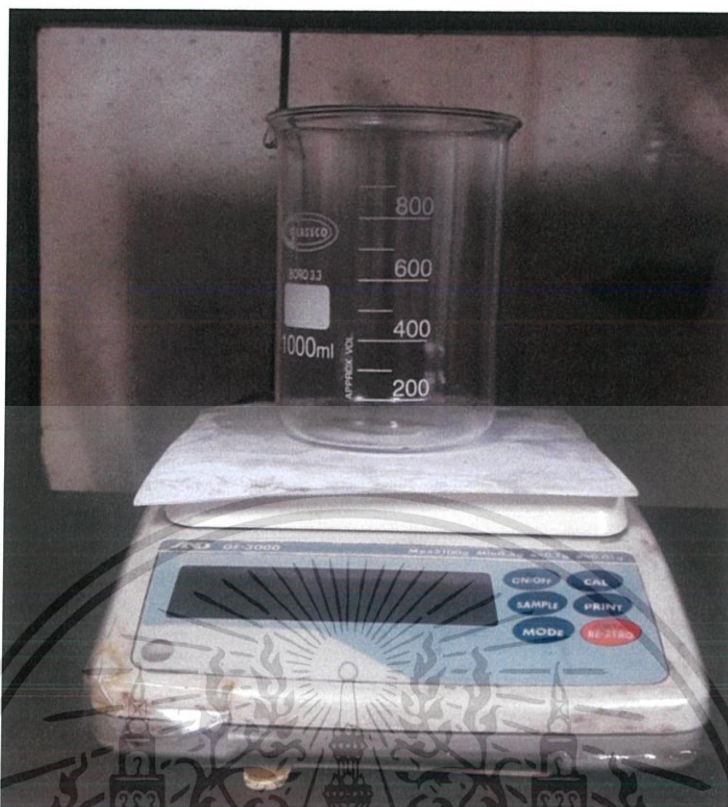
### 3.4.2.4 เครื่องชั่งน้ำหนัก (Digital Weight Meter)

เครื่องชั่งน้ำหนักใช้ในการวัดน้ำหนักเชื้อเพลิงที่ลดลงไปในขณะเครื่องยนต์กำลังเดินเครื่อง โดยที่เครื่องชั่งน้ำหนักจะส่งค่าที่วัดได้ไปที่ระบบจัดเก็บข้อมูลตามรูปที่ 3.14 ซึ่งเป็นเครื่องชั่งน้ำหนักยี่ห้อ AND ความละเอียดในการวัด 0.01 g พิกัดในการวัด 3100 g ใช้ในการเก็บค่าการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง ก่อนที่จะส่งสัญญาณ output ไปยัง Data Acquisition Card เพื่อเก็บข้อมูลใน Data logger มีหลักการทำงานโดยอาศัยความต่างของศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากน้ำหนักที่กดทับลงบน Strain Gauge



รูปที่ 3.13 ตัวกรองน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 เครื่องชั่งน้ำหนัก (Digital Weight Meter)

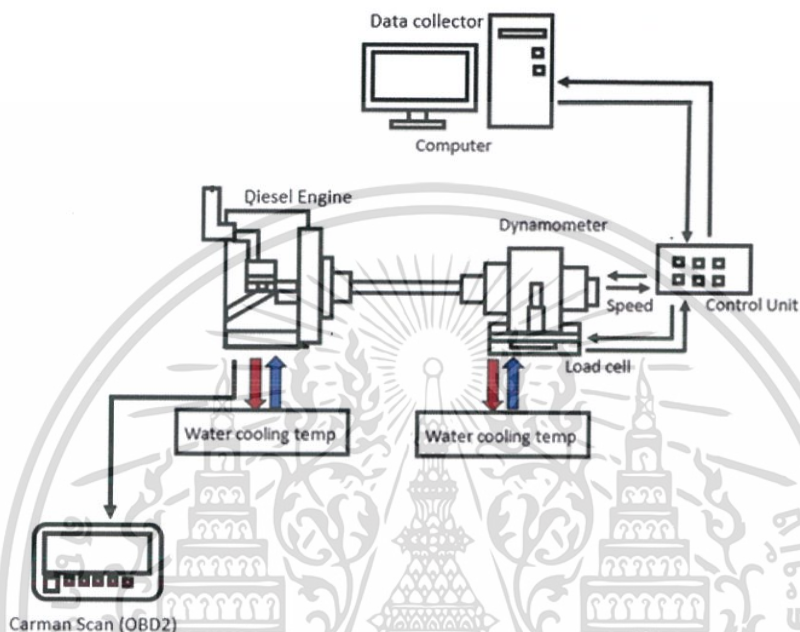


รูปที่ 3.15 กล่องควบคุม (Control Unit)

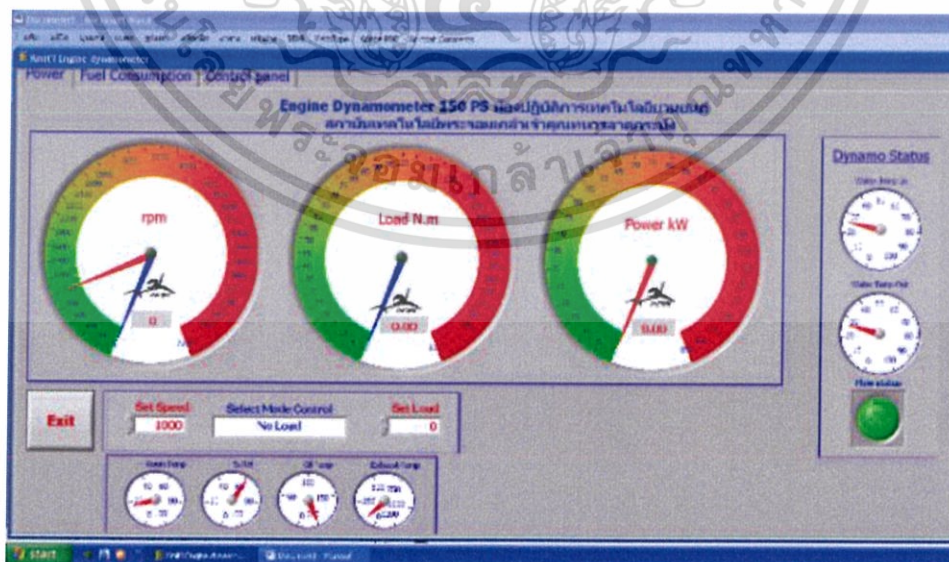
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.2.5 กล้องควบคุม (Control Unit)

กล้องควบคุมเป็นอุปกรณ์ที่รับและส่งสัญญาณจากอุปกรณ์หนึ่งไปยังอีกอุปกรณ์หนึ่งตามรูปที่ 3.15 เพื่อใช้ในการควบคุมอุปกรณ์หรือเครื่องยนต์ให้ทำงานตามสภาวะที่ผู้ทดลองต้องการ

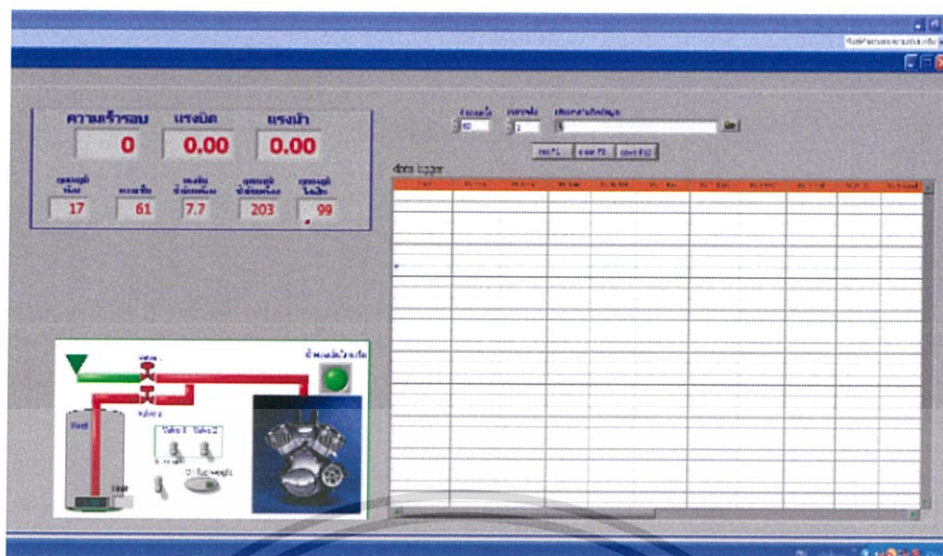


รูปที่ 3.16 แผนภาพระบบการเก็บข้อมูล



รูปที่ 3.17 หน้าจอแสดงผลที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 หน้าจอแสดงผลที่ 2

รูปที่ 3.19 ตารางบันทึกข้อมูล

### 3.4.2.6 โปรแกรมที่ใช้ในการจัดเก็บข้อมูล

โปรแกรมจัดเก็บข้อมูลแบบ Labview ทำหน้าที่ในการเก็บค่าความเร็วรอบ ภาระงานของ เครื่องยนต์และอัตราการใช้เชื้อเพลิงขณะเครื่องยนต์ทำงานเพื่อคำนวณหาอัตราการสิ้นเปลือง เชื้อเพลิงจำเพาะเบรกและค่าอื่นๆ โดยมีเซ็นเซอร์ตรวจสอบวัดค่า ซึ่งจะมีหน้าจอแสดงผลดังรูปที่ 3.17 และ 3.18 โดยมีตารางการบันทึกค่าในรูปแบบของ Excel ตามรูปที่ 3.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.20 คอมพิวเตอร์

### 3.4.2.7 คอมพิวเตอร์

คอมพิวเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่รับข้อมูลมาจากกล่องควบคุมตามรูปที่ 3.20 ซึ่งกล่องควบคุมจะส่งสัญญาณมาในรูปแบบของกระแสไฟฟ้า แปลงสัญญาณไฟฟ้าส่งไปให้กับโปรแกรมควบคุมภายใน เพื่อให้สะดวกต่อการควบคุม

### 3.4.3 ระบบในการจัดเก็บไอเสีย

#### 3.4.3.1 เครื่องวัดประสิทธิภาพควันดำ (Smoke meter)

เครื่องวัดประสิทธิภาพควันดำใช้ทดสอบไอเสียที่ปล่อยออกมาจากเครื่องยนต์ในสภาวะการทำงานที่ต่างกันโดยใช้เครื่องวัดประสิทธิภาพควันดำแบบทึบแสง (OKUDA DSM-240, 0-100%,  $\pm 3\%$  accuracy) ซึ่งประเมินค่าของเขม่าบนตัวกรองกระดาษด้วยวิธีการสะท้อนแสง

### 3.4.4 วิธีการทดลอง

การเก็บค่าในการทดลองได้แก่ อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันของเบรก อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานน้ำมันของเบรก ประสิทธิภาพเชิงความร้อนและปริมาณไอเสียของเครื่องยนต์ในงานวิจัยนี้ ทำตามเงื่อนไขในตารางบันทึกผลการทดลองที่ 3.3

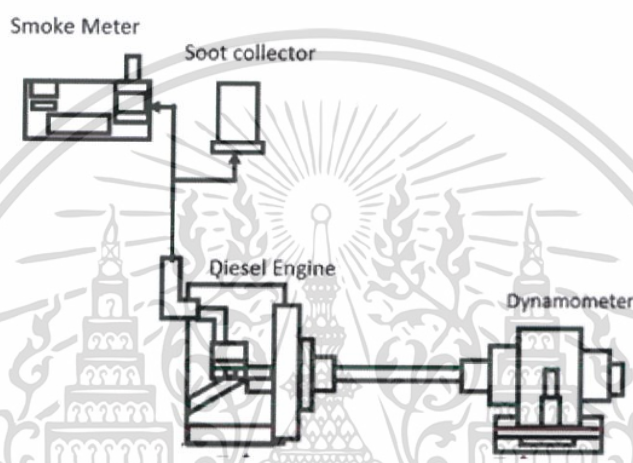
เริ่มแรกทำการทดลองโดยการเลือกใช้น้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล (B7) และกำหนดความเร็วรอบเป็น 1000 rpm โดยจะมีการเลือกภาระงานของเครื่องยนต์ที่มากกระทำโดยอ้างอิงจากตารางที่ 3.3 และรูปที่ 3.3 เมื่อได้ภาระงานของเครื่องยนต์ตามเงื่อนไขที่ต้องการจึงทำการเก็บข้อมูลกำลังของเครื่องยนต์ที่ได้จากไดนาโมมิเตอร์ที่ส่งมาให้กับโปรแกรมแสดงผลของคอมพิวเตอร์ ส่วนน้ำมันที่จ่ายให้กับเครื่องยนต์ตรวจวัดด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักเพื่อจะนำค่าที่ได้ไปแปรผลเป็นอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงในลำดับถัดไป

ส่วนการทดสอบความหนาแน่นของไอเสียทำหลังจากที่เก็บผลค่าในชุดแรกเสร็จ โดยเริ่มแรกติดตั้งกระดาษกรองควันดำที่เครื่องวัดประสิทธิภาพควันดำ จากนั้นนำท่อวัดของเครื่องวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพควันทำไปวางไว้บริเวณท่อไอเสียของเครื่องยนต์โดยทิ้งไว้ 10 วินาทีตามรูปที่ 3.23 เพื่อเก็บรวบรวมเขม่าไอเสียที่ปล่อยออกมา

หลังจากได้กระดาษกรองที่ผ่านการดักจับไอเสียแล้วนำกระดาษกรองที่ดักจับเขม่าจากไอเสียไปวัดค่าความเข้มข้นเขม่าที่เครื่องวัดประสิทธิภาพควันทำ โดยเปรียบเทียบผลของการสะท้อนแสงที่ได้กับค่าเดิมของกระดาษกรองก่อนนำไปดักจับเขม่าเพื่อหาผลลัพธ์ความหนาแน่นของเขม่าในลำดับถัดไป ต่อมาให้ทำการปรับค่าภาระงานของเครื่องยนต์ให้เพิ่มขึ้นและทำการรักษาความเร็วรอบของเครื่องยนต์ให้คงที่ที่ 1000 RPM เพื่อให้เงื่อนไขคงเดิมแล้วทำซ้ำต่อให้ครบทุกเงื่อนไข

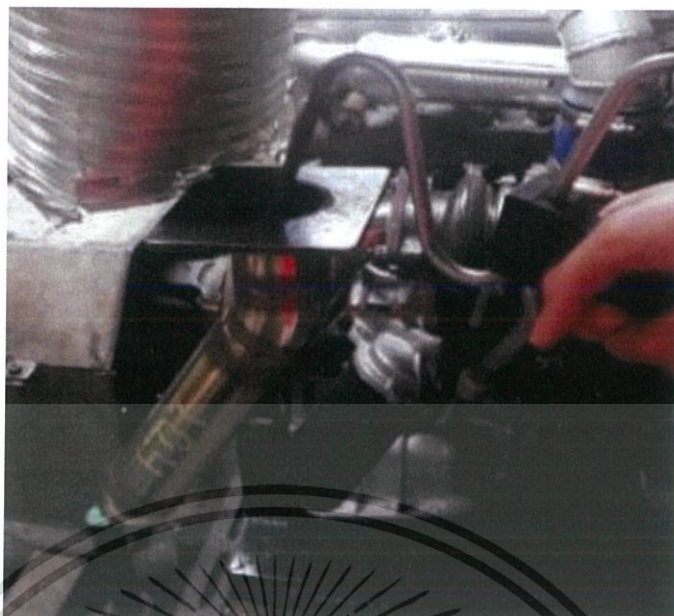


รูปที่ 3.21 แผนภาพระบบการจับไอเสีย



รูปที่ 3.22 เครื่องวัดประสิทธิภาพควันทำ (Smoke meter)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.23 ท่อวัดของเครื่องวัดประสิทธิภาพควันท้ากับท่อไอเสีย



รูปที่ 3.24 อุปกรณ์ที่ใช้ในการดักจับเขม่าโดยต่อบนท่อไอเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ตารางที่ 3.3 ตารางบันทึกผลการทดลอง

| เชื้อเพลิง                         | ค่าที่ใช้วัด                       | ความเร็วรอบ rpm |     |     |     |          |     |     |     |          |     |     |     |
|------------------------------------|------------------------------------|-----------------|-----|-----|-----|----------|-----|-----|-----|----------|-----|-----|-----|
|                                    |                                    | 1000            |     |     |     | 1500     |     |     |     | 2000     |     |     |     |
|                                    |                                    | โหลด N-m        |     |     |     | โหลด N-m |     |     |     | โหลด N-m |     |     |     |
|                                    |                                    | 10%             | 20% | 30% | 40% | 10%      | 20% | 30% | 40% | 10%      | 20% | 30% | 40% |
|                                    |                                    | 26              | 52  | 78  | 104 | 28       | 56  | 84  | 112 | 28       | 56  | 84  | 112 |
| B0                                 | BSFC                               |                 |     |     |     |          |     |     |     |          |     |     |     |
|                                    | BSEC                               |                 |     |     |     |          |     |     |     |          |     |     |     |
|                                    | ประสิทธิภาพเครื่องยนต์เชิงความร้อน |                 |     |     |     |          |     |     |     |          |     |     |     |
|                                    | ความชื้นไอเสีย                     |                 |     |     |     |          |     |     |     |          |     |     |     |
|                                    | B10                                | BSFC            |     |     |     |          |     |     |     |          |     |     |     |
| BSEC                               |                                    |                 |     |     |     |          |     |     |     |          |     |     |     |
| ประสิทธิภาพเครื่องยนต์เชิงความร้อน |                                    |                 |     |     |     |          |     |     |     |          |     |     |     |
| ความชื้นไอเสีย                     |                                    |                 |     |     |     |          |     |     |     |          |     |     |     |
| B20                                |                                    | BSFC            |     |     |     |          |     |     |     |          |     |     |     |
|                                    | BSEC                               |                 |     |     |     |          |     |     |     |          |     |     |     |
|                                    | ประสิทธิภาพเครื่องยนต์เชิงความร้อน |                 |     |     |     |          |     |     |     |          |     |     |     |
|                                    | ความชื้นไอเสีย                     |                 |     |     |     |          |     |     |     |          |     |     |     |

### 3.5 วิธีการเก็บและศึกษาโครงสร้างอนุภาคจากเชื้อเพลิงดีเซลและไบโอดีเซล

#### 3.5.1 วิธีการเก็บเขม่าไอเสีย

การเก็บตัวอย่างอนุภาคเขม่าเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ทำได้โดยเลือกเงื่อนไขที่ความเข้มข้นเขม่ามากที่สุดจากผลการทดสอบของเครื่องวัดประสิทธิภาพควันท้า ส่วนการเก็บรวบรวมเขม่าจะอาศัยอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.24 การติดตั้งอุปกรณ์ดักจับเขม่าบนท่อไอเสียเพื่อใช้ดักจับเขม่าที่ออกมาพร้อมกับไอเสีย เขม่าที่ถูกดักไว้จะถูกนำไปแบ่งใช้ตรวจสอบโครงสร้างด้วยวิธีการตรวจสอบในลำดับถัดไป

### 3.5.2 วิธีการวัดขนาดและตรวจสอบโครงสร้างของอนุภาคเดี่ยวและอนุภาคกลุ่มด้วยวิธีการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

นำเขม่าไอเสียที่เตรียมไว้จากการเก็บรวบรวมนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านตามรูปที่ 3.25 และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดตามรูปที่ 3.26 เพื่อดูโครงสร้างของอนุภาค



รูปที่ 3.25 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน [6]

รูปที่ 3.26 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด [8]

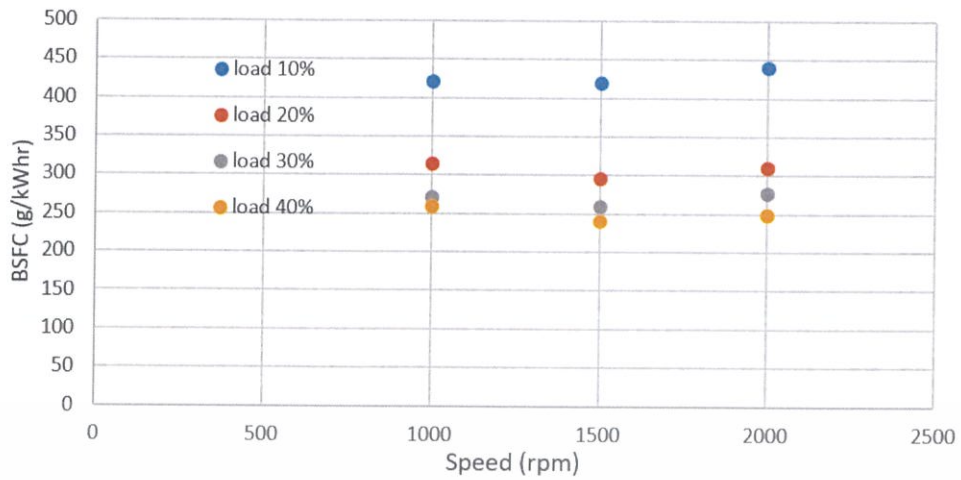
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

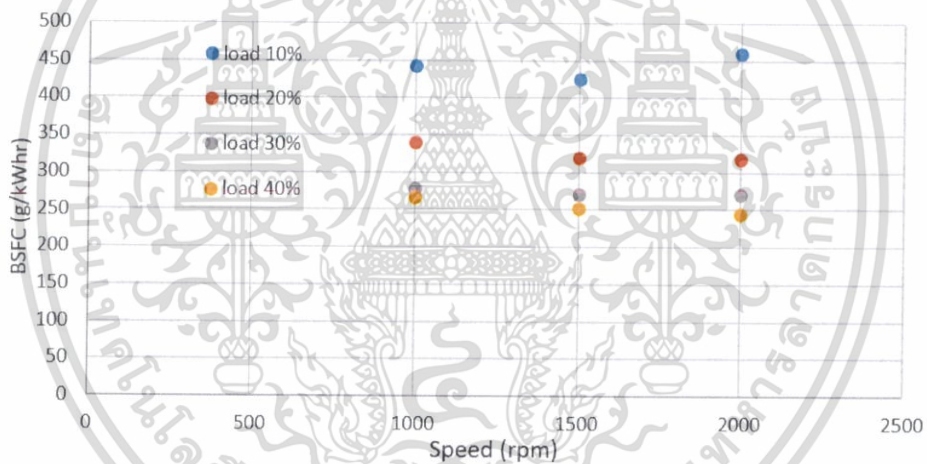
### ผลการวิจัย

4.1 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (Brake specific fuel consumption, BSFC), อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเบรก (Brake specific energy consumption, BSEC) และ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก (Brake thermal efficiency, BTE)

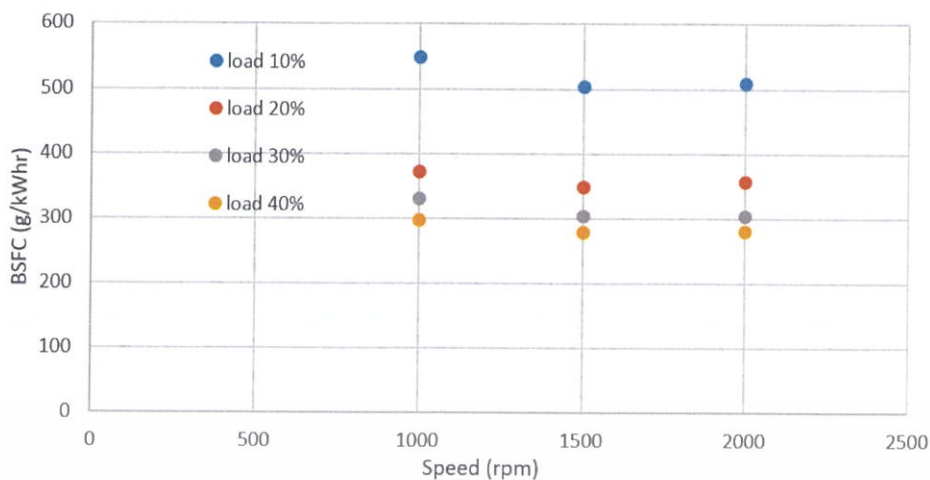
อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกของการทดลองนี้เป็นไปตามรูปที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 ถ้าจะสังเกตเฉพาะการเปลี่ยนแปลงของภาระงานของเครื่องยนต์ (Load) ที่มากระทำต่อเครื่องยนต์ โดยให้ความเร็วรอบคงที่ (Speed, rpm) พบว่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะมีแนวโน้มลดลงในขณะที่ภาระงานของเครื่องยนต์เพิ่มขึ้น แต่แนวโน้มการลดลงของอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะไม่ได้มีขนาดที่เท่ากับการเพิ่มขึ้นของภาระงานของเครื่องยนต์ โดยดูได้จากช่วงการเปลี่ยนแปลงของภาระงานของเครื่องยนต์จาก 10% ไปเป็น 20% และ 30% ไปเป็น 40% ของภาระงานสูงสุด การลดลงของอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงมีอัตราการเปลี่ยนแปลงน้อยลงมากจนแทบไม่ต่างกัน ซึ่งสาเหตุน่าจะมาจากอัตราการเพิ่มขึ้นของการใช้เชื้อเพลิงมีค่าน้อยกว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของงานเพลลา ส่วนสาเหตุอีกประการหนึ่งที่ทำให้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะลดลงอาจมาจากอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิสูงขึ้น [9] การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกับอากาศทำได้ดีสมบูรณ์และปลดปล่อยพลังงานออกมาได้มากกว่า จึงทำให้ใช้เชื้อเพลิงลดลงในขณะที่ได้งานในปริมาณที่เท่าเดิม ทำให้คาดการณ์ได้ว่าการเพิ่มภาระงานของเครื่องยนต์ในช่วงที่ต่ำกว่า 40% ของภาระงานสูงสุด จะทำให้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะมีแนวโน้มลดลง ทางด้านการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบพบว่าไม่มีผลที่ชัดเจนว่าจะทำให้ค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเพิ่มขึ้นหรือลดลง



รูปที่ 4.1 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกของเชื้อเพลิง B7 ที่ภาระงานของเครื่องยนต์และความเร็วรอบต่างกัน

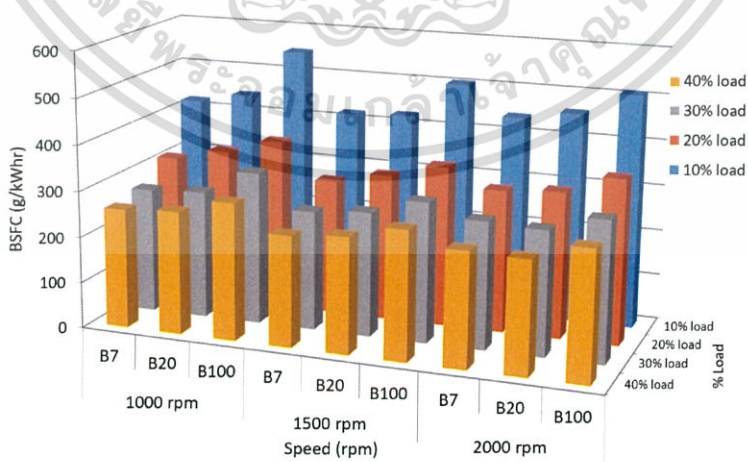


รูปที่ 4.2 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกของเชื้อเพลิง B20 ที่ภาระงานของเครื่องยนต์และความเร็วรอบต่างกัน



รูปที่ 4.3 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกของเชื้อเพลิง B100 ที่ภาระงานของเครื่องยนต์และความเร็วรอบต่างกัน

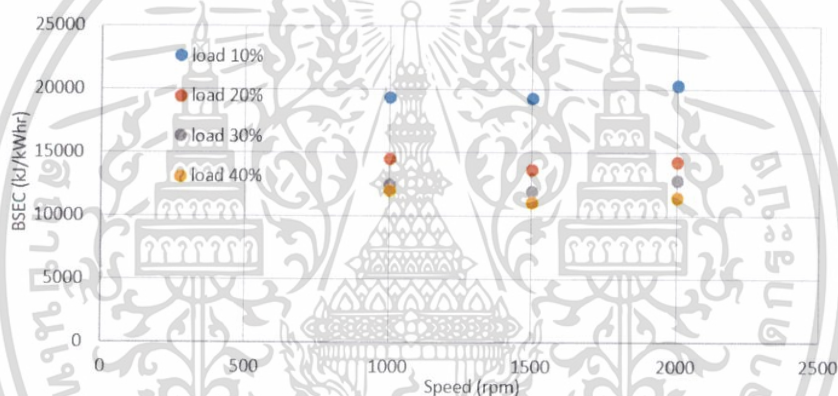
ส่วนการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกของเชื้อเพลิงทั้งสามชนิดจะเห็นได้จากรูปที่ 4.4 ในเงื่อนไขความเร็วรอบและภาระงานของเครื่องยนต์เดียวกัน การเปลี่ยนแปลงการใช้เชื้อเพลิงจาก B7 ไปใช้เชื้อเพลิง B20 และ B100 จะส่งผลให้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ สาเหตุนี้จะมาจากคุณสมบัติของเชื้อเพลิงไบโอดีเซลที่มีค่าความร้อนต่ำกว่าเชื้อเพลิงดีเซล จึงทำให้ต้องฉีดเชื้อเพลิงในปริมาณที่มากกว่าเพื่อให้ได้งานเบรกที่เท่ากัน จึงสรุปได้ว่าการผสมของเชื้อเพลิงไบโอดีเซลลงไปปริมาณที่มากขึ้นทำให้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน



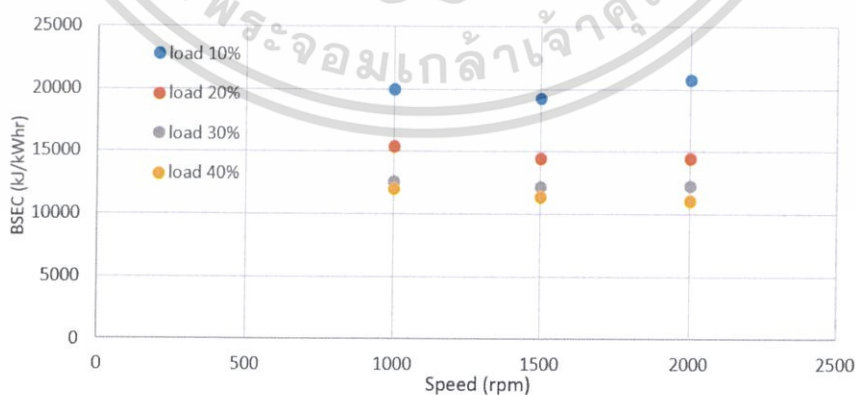
รูปที่ 4.4 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกที่ภาระงานของเครื่องยนต์, ความเร็วรอบและเชื้อเพลิงต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเบรกของการทดลองนี้เป็นไปตามรูปที่ 4.5, 4.6 และ 4.7 ถ้าสังเกตเฉพาะการเปลี่ยนแปลงภาระงานที่มากกระทำต่อเครื่องยนต์โดยให้ความเร็วรอบคงที่ จะสังเกตเห็นได้ว่าถ้าภาระงานของเครื่องยนต์ที่มากกระทำต่อเครื่องยนต์เพิ่มขึ้นในช่วงภาระงานของเครื่องยนต์ต่ำกว่า 40 % ของภาระงานสูงสุด จะส่งผลให้ค่าอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเบรกของเครื่องยนต์ลดลงทุกกรณี แต่ถ้าหากสังเกตเฉพาะที่ความเร็วรอบโดยให้ภาระงานของเครื่องยนต์คงที่ พบว่าแนวโน้มของเชื้อเพลิงทั้งสามชนิดเหมือนกัน ในช่วงเปลี่ยนความเร็วจาก 1000 rpm ไปเป็น 1500 rpm จะทำให้อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานลดลง แต่ช่วงเปลี่ยนความเร็วจาก 1500 rpm ไปเป็น 2000 rpm จะทำให้อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานเพิ่มขึ้น ซึ่งสาเหตุน่าจะมาจากแรงเสียดทานที่เพิ่มขึ้นจากความเร็วรอบและระยะเวลาสูญเสียความร้อนที่อยู่ในห้องเผาไหม้ที่เปลี่ยนแปลงไป จึงทำให้พลังงานที่ต้องใช้ในการทำงานมากขึ้นแตกต่างกัน

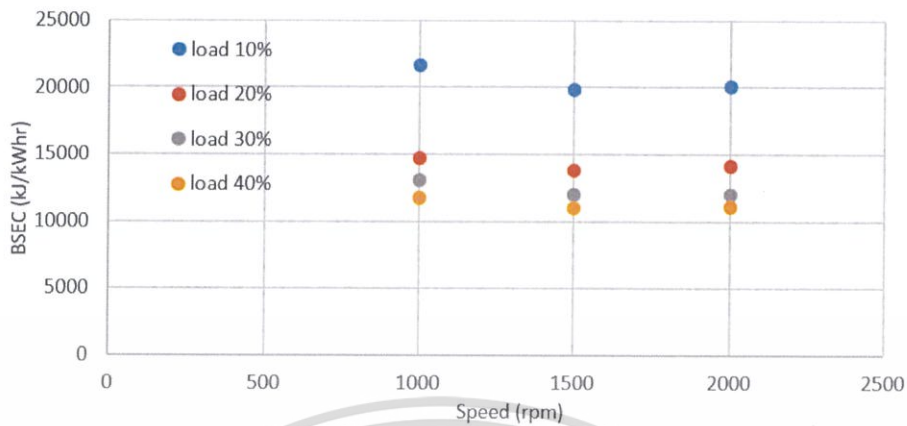


รูปที่ 4.5 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเบรกของเชื้อเพลิง B7 ที่ภาระงานของเครื่องยนต์และความเร็วรอบต่างกัน



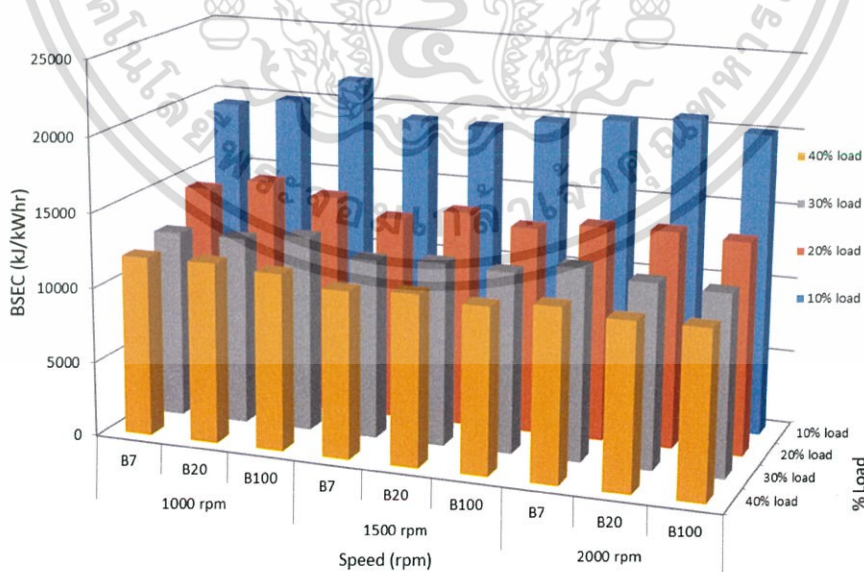
รูปที่ 4.6 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเบรกของเชื้อเพลิง B20 ที่ภาระงานของเครื่องยนต์และความเร็วรอบต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเบรกของเชื้อเพลิง B100 ที่ภาระงานของเครื่องยนต์และความเร็วรอบต่างกัน

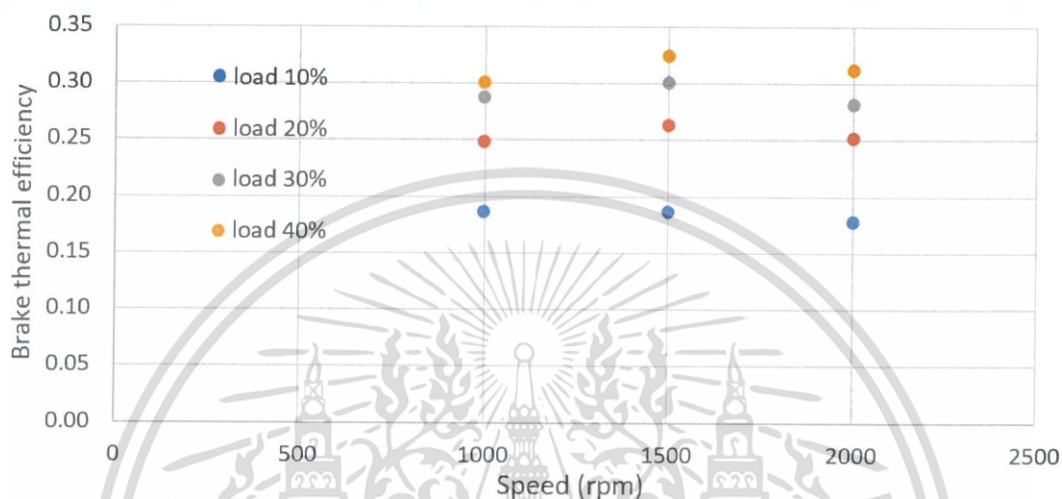
การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเบรกของเชื้อเพลิงทั้งสามชนิดจะเห็นได้จากรูปที่ 4.8 สังเกตในเงื่อนไขความเร็วยรอบและภาระงานของเครื่องยนต์เดียวกัน พบว่าการเปลี่ยนแปลงการใช้เชื้อเพลิงจาก B7 ไปใช้เชื้อเพลิง B20 และ B100 แนวโน้มของอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเบรกไม่มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนต่างจากแนวโน้มของอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก แสดงว่าในการทำงานที่เหมือนกันเครื่องยนต์ต้องการพลังงานความร้อนในปริมาณที่เท่ากัน



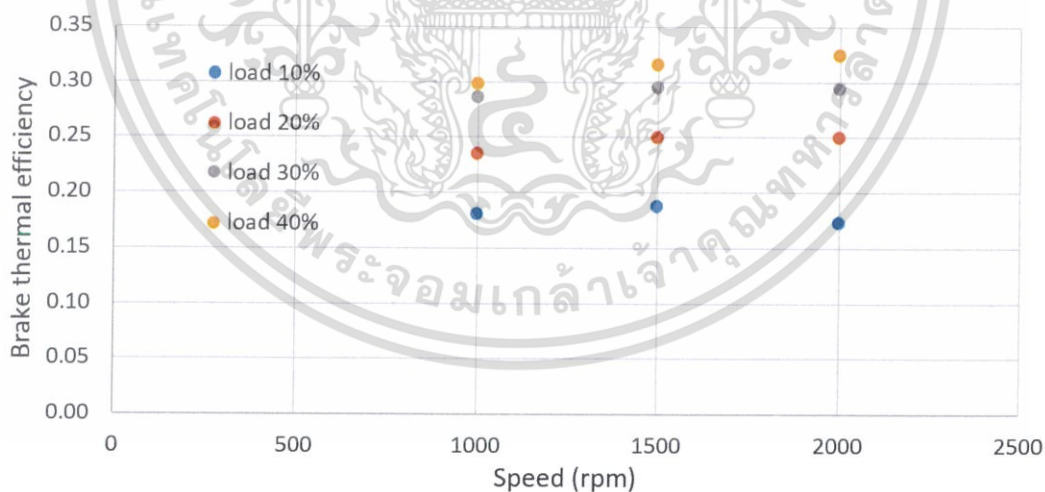
รูปที่ 4.8 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเบรกที่ภาระงานของเครื่องยนต์, ความเร็วยรอบและเชื้อเพลิงต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

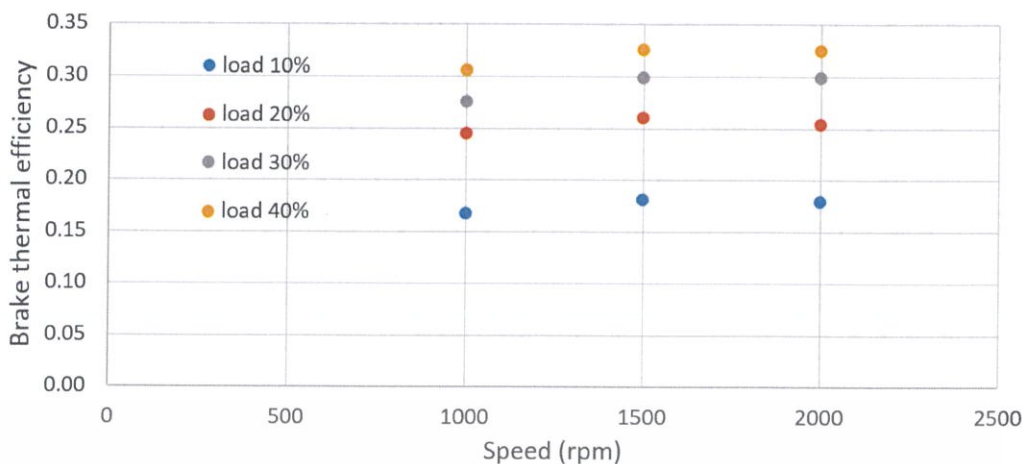
การวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกของการทดลองแต่ละเชื้อเพลิงสามารถดูได้จาก รูปที่ 4.9, 4.10 และ 4.11 จะสามารถเห็นได้ว่าเมื่อภาระงานของเครื่องยนต์เพิ่มขึ้นในช่วงภาระงานของเครื่องยนต์ต่ำกว่า 40 % ของภาระงานสูงสุด จะทำให้ค่าของประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มขึ้นทุกกรณี ส่วนการปรับเปลี่ยนความเร็วรอบนั้นไม่ส่งผลกระทบต่อค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกอย่างชัดเจน



รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกของเชื้อเพลิง B7 ที่ภาระงานของเครื่องยนต์และความเร็วรอบต่างกัน

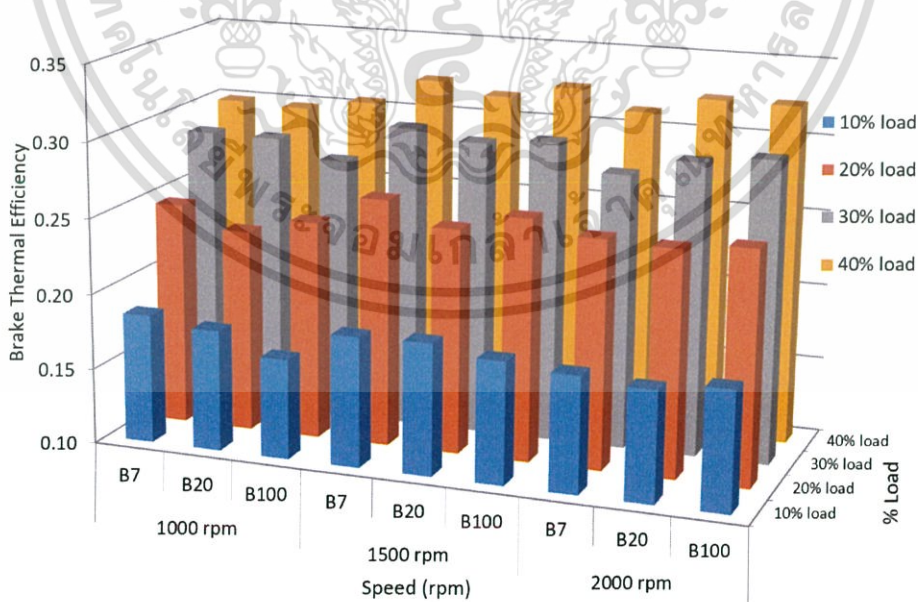


รูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกของเชื้อเพลิง B20 ที่ภาระงานของเครื่องยนต์และความเร็วรอบต่างกัน



รูปที่ 4.11 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกของเชื้อเพลิง B100 ที่ภาระงานของเครื่องยนต์และความเร็วรอบต่างกัน

จากรูปที่ 4.12 แสดงถึงความแตกต่างของค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกของเชื้อเพลิงทั้งสามชนิด เห็นได้ว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกของทั้งสามเชื้อเพลิงไม่ได้มีแนวโน้มอย่างชัดเจน เชื้อเพลิงไบโอดีเซลไม่ได้ทำให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกเพิ่มขึ้นหรือลดลง ทำให้ไม่สามารถสรุปได้ว่า การผสมเชื้อเพลิงไบโอดีเซลลงไปในเชื้อเพลิงดีเซลในอัตราส่วนที่มากขึ้นจะส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกจะเพิ่มขึ้นหรือลดลง

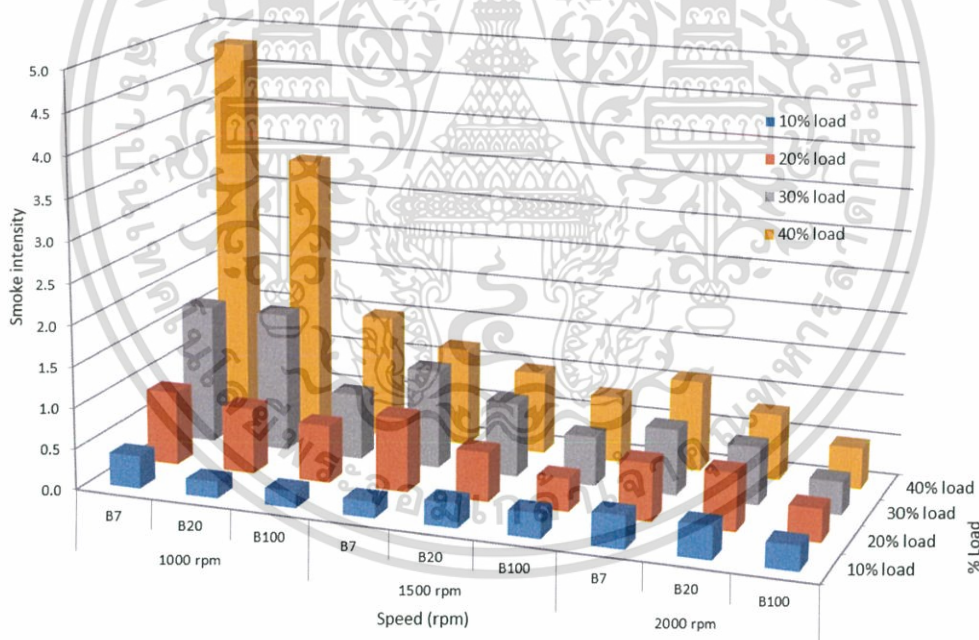


รูปที่ 4.12 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกที่ภาระงานของเครื่องยนต์, ความเร็วรอบและเชื้อเพลิงต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ปริมาณความเข้มข้นของเขม่าในไอเสีย (Smoke intensity)

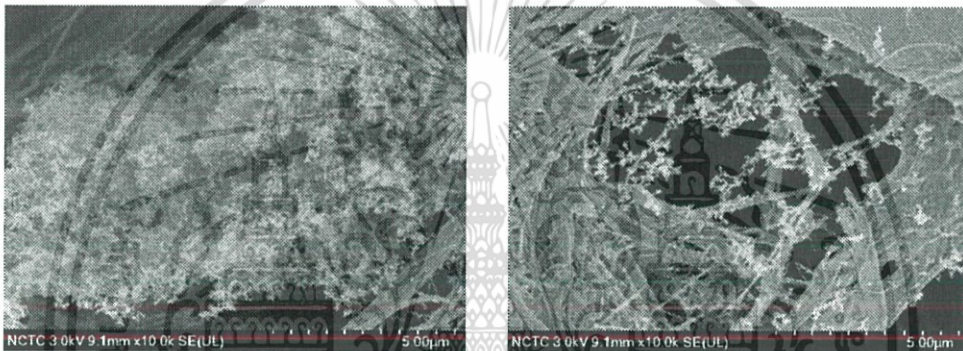
รูปที่ 4.13 แสดงผลของการวิจัยในการเปรียบเทียบความเข้มข้นของเขม่าระหว่างเชื้อเพลิง B7, B20 และ B100 จากการศึกษาพบว่าความปริมาณของเขม่าขึ้นอยู่กับภาระงานของเครื่องยนต์ ยิ่งเครื่องยนต์มีภาระงานของเครื่องยนต์มากขึ้นไอเสียของเครื่องยนต์จะมีปริมาณของเขม่ามากขึ้นเช่นกัน เนื่องจากเครื่องยนต์ต้องใช้เชื้อเพลิงมากขึ้นเพื่อให้สามารถทำงานตามภาระงานของเครื่องยนต์ที่เพิ่มขึ้นได้ นอกจากนี้สังเกตได้ว่าถ้าให้เงื่อนไขอื่นคงที่โดยดูการเปลี่ยนแปลงของเชื้อเพลิงเพียงอย่างเดียว เห็นได้ว่าเมื่ออัตราส่วนการผสมของเชื้อเพลิงไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นค่าความเข้มข้นของเขม่าในไอเสียจะลดลงอย่างชัดเจน ซึ่งสาเหตุที่ทำให้ความเข้มข้นของเขม่าในไอเสียลดลงประการแรกเป็นเพราะเชื้อเพลิงไบโอดีเซลมีออกซิเจนในโมเลกุลอยู่มากจึงช่วยให้การเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ประการที่สองอาจมาจากที่เชื้อเพลิงไบโอดีเซลมีอุณหภูมิจุดระเบิดด้วยตัวเองที่สูงกว่าเชื้อเพลิงดีเซลทำให้มันมีเวลาเพียงพอสำหรับการเปลี่ยนแปลงเป็นละอองซึ่งช่วยให้การเผาไหม้ดีขึ้น [9]



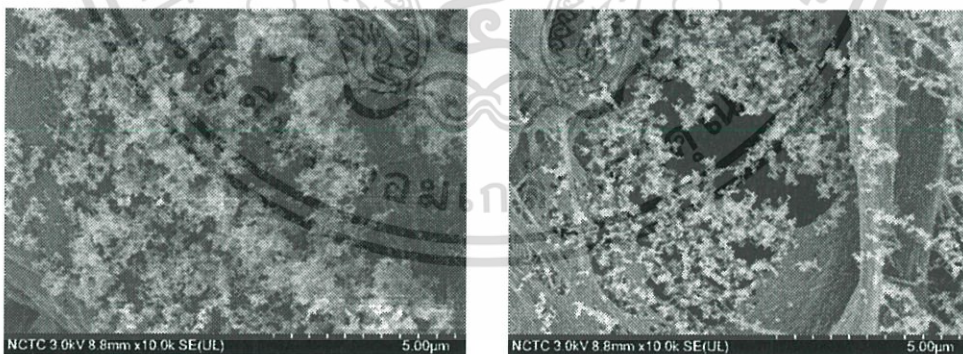
รูปที่ 4.13 ปริมาณความเข้มข้นของเขม่าในไอเสียของที่ภาระงานของเครื่องยนต์, ความเร็วรอบและเชื้อเพลิงต่างกัน

### 4.3 ลักษณะวิทยาของอนุภาค (Particulate matter's morphology)

เขม่าในไอเสียจากเชื้อเพลิง B7, B20 และ B100 เมื่อนำไปตรวจสอบด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM) โดยมีกำลังขยายอยู่ที่ 1,000 เท่า และ 10,000 เท่าตามลำดับ จะพบกลุ่มของอนุภาคที่รวมตัวกันบนกระดาษกรองมีการเกาะกลุ่มดังรูปที่ 4.14, 4.15 และ 4.16 ขนาดของกลุ่มอนุภาคเหล่านี้แตกต่างกันออกไป ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาอนุภาคละเอียดหรือ PM1 ส่วนอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า PM1 ในการวิจัยนี้จะไม่ทำการศึกษา อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะหรือรูปร่างของอนุภาคจากเชื้อเพลิงแต่ละชนิดไม่สามารถพบความสัมพันธ์ในกำลังขยายระดับนี้ได้

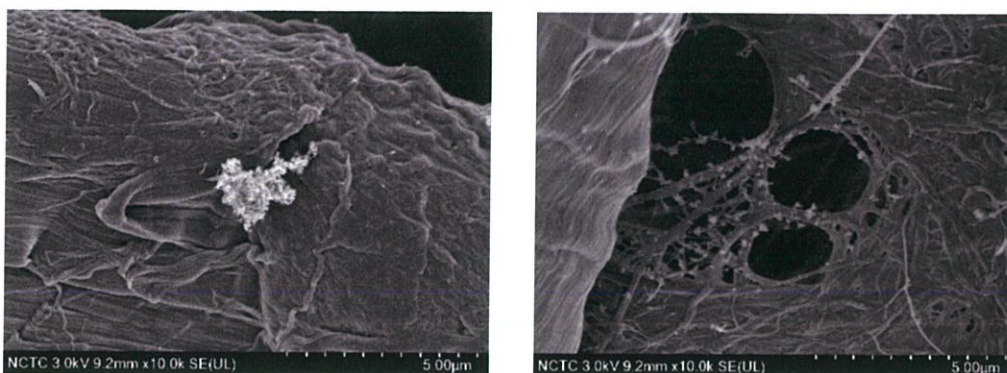


รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายการจับตัวของอนุภาคในกระดาษกรองของเชื้อเพลิง B7



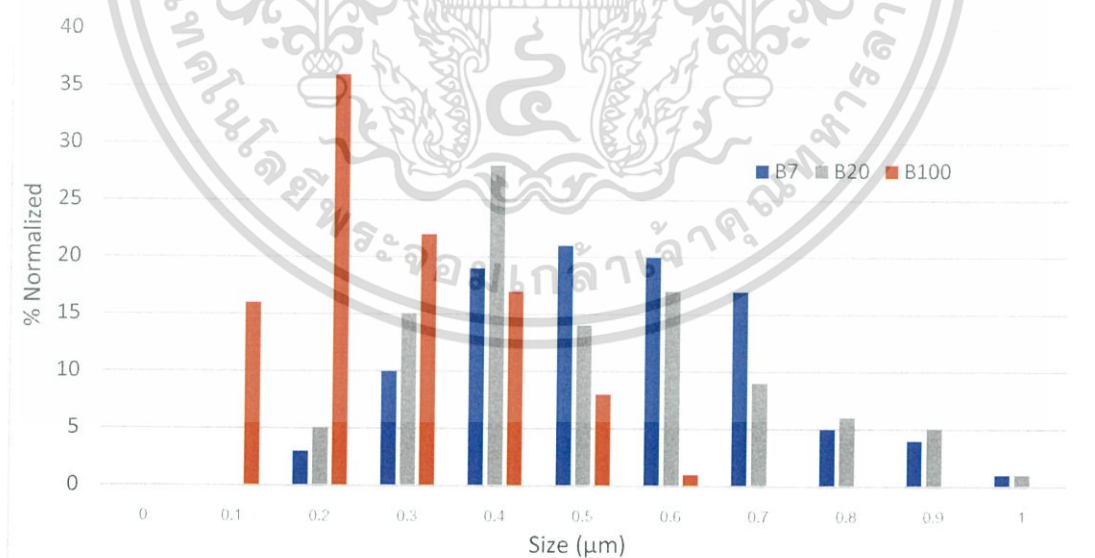
รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายการจับตัวของอนุภาคในกระดาษกรองของเชื้อเพลิง B20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายการจับตัวของอนุภาคในกระดาดของเชื้อเพลิง B100

เมื่อนำข้อมูลที่วัดขนาดแล้วเขียนเป็นกราฟตามรูปที่ 4.17 พบว่าขนาดอนุภาคของเชื้อเพลิงที่ผสมไบโอดีเซลในอัตราส่วนที่มากกว่ามีแนวโน้มเล็กกว่าอย่างชัดเจน ซึ่งสาเหตุมาจากการเพิ่มอัตราส่วนผสมของไบโอดีเซลซึ่งส่งผลกระทบต่อขนาดของอนุภาคโดยตรงเพราะคุณสมบัติของเชื้อเพลิงไบโอดีเซลมีออกซิเจนอยู่ในโครงสร้างโมเลกุลมากจึงทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์กว่าและยังเพิ่มโอกาสให้มีออกซิเจนส่วนที่เหลือเข้าไปจับกับอนุภาคแล้วเกิดการเผาไหม้ซ้ำจนทำให้อนุภาคมีขนาดเล็กลงกว่าการเผาไหม้ที่มีออกซิเจนน้อย

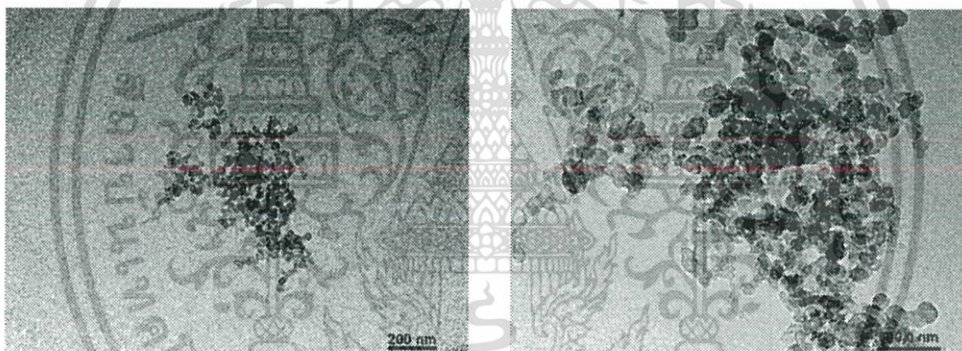


รูปที่ 4.17 ขนาดของกลุ่มอนุภาคที่ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของทั้งสามเชื้อเพลิง

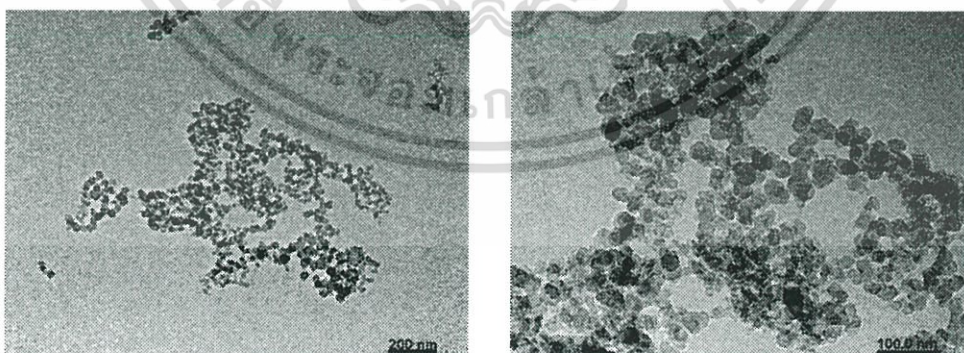
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 โครงสร้างระดับนาโนของอนุภาค (Particulate matter's nanostructure)

หากต้องการดูรายละเอียดเพิ่มเติมของอนุภาคกลุ่มโดยไม่ได้พุ่งเป้าไปที่เพียงพื้นผิวการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านจึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาเพื่อแสดงรายละเอียดของอนุภาคกลุ่มและอนุภาคเดี่ยว ซึ่งโครงสร้างจะถูกวิเคราะห์โดยการประมวลผลภาพด้วยซอฟต์แวร์ที่มีชื่อว่า "Image J" การสังเกตอนุภาคกลุ่มจะใช้ภาพที่มีกำลังขยาย 30,000 และ 80,000 เท่า ส่วนการวัดขนาดอนุภาคเดี่ยวจะใช้เฉพาะกำลังขยาย 80,000 เท่า เพื่อวัดขนาดอนุภาคจากเชื้อเพลิง B7, B20 และ B100 ตามรูปที่ 4.18 - รูปที่ 4.20 โดยการวัดนั้นจะเลือกใช้วิธีวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคสองเส้นที่ตั้งฉากกัน เพื่อหาเส้นที่มีความยาวมากที่สุดแล้วเลือกใช้เป็นตัวกำหนดขนาดอนุภาคเดี่ยว อัตราการสุ่มวัดขนาดตัวอย่างอยู่ที่ 100 อนุภาคต่อรูป และจากรูปที่ 4.21 พบว่าขนาดอนุภาคเดี่ยวของเชื้อเพลิง B100 มีขนาดเล็กกว่าเมื่อเทียบกับขนาดของอนุภาคคาร์บอนจากเชื้อเพลิง B7 และ B20 ซึ่งสันนิษฐานว่าเป็นผลมาจากเชื้อเพลิง B100 มีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากกว่าเชื้อเพลิงอื่น ๆ

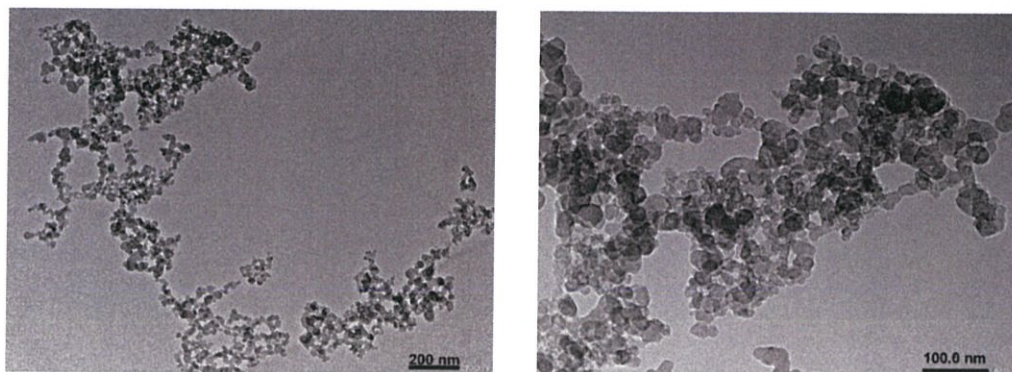


รูปที่ 4.18 ภาพถ่ายอนุภาคกลุ่มโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของเชื้อเพลิง B7

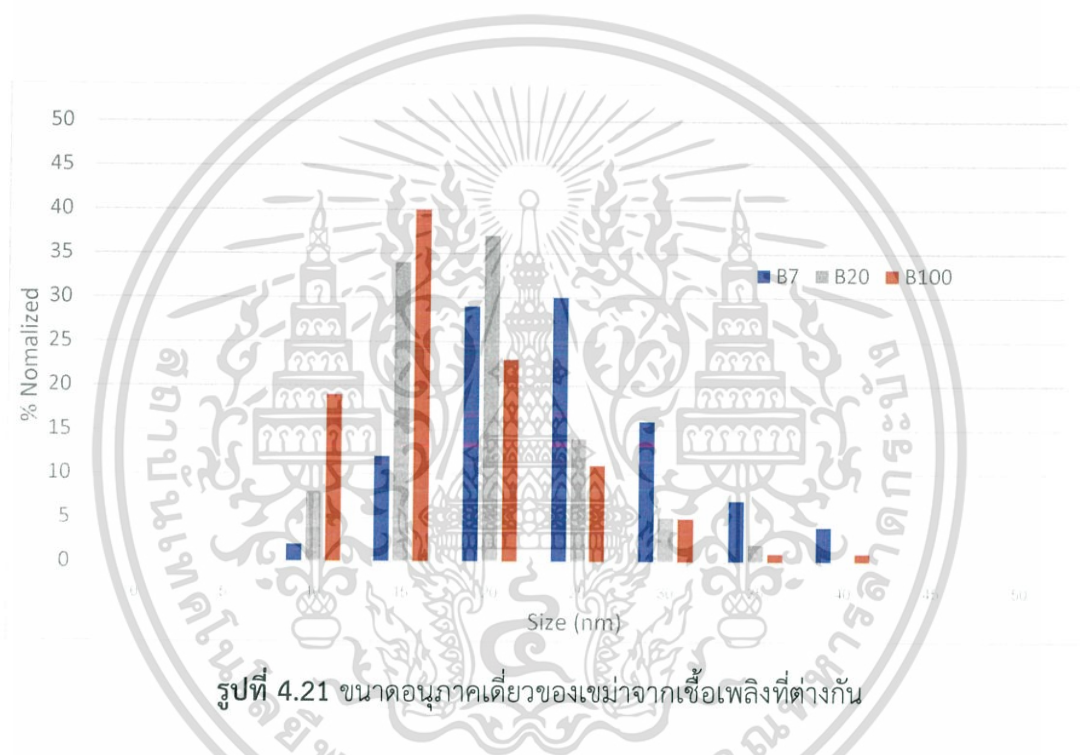


รูปที่ 4.19 ภาพถ่ายอนุภาคกลุ่มโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของเชื้อเพลิง B20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



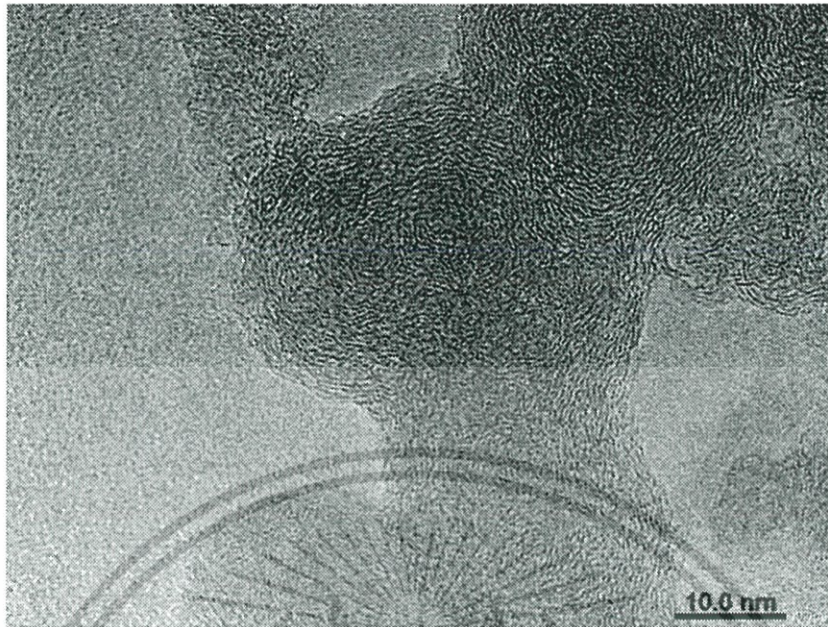
รูปที่ 4.20 ภาพถ่ายอนุภาคกลุ่มโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของเชื้อเพลิง B100



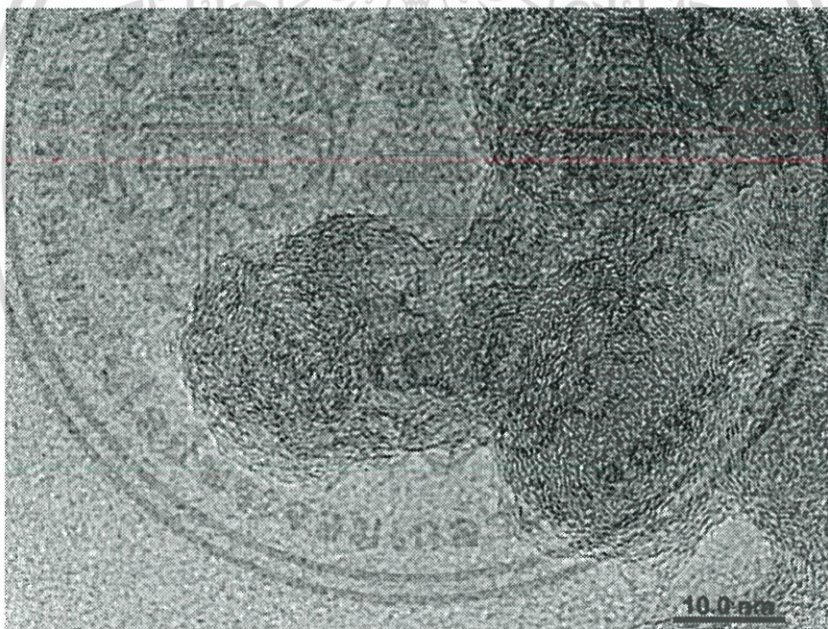
รูปที่ 4.21 ขนาดอนุภาคเดี่ยวของเขม่าจากเชื้อเพลิงที่ต่างกัน

เพื่อการศึกษาและความเข้าใจที่ลึกซึ้งมากยิ่งขึ้นเกี่ยวกับอนุภาคจากไอเสียของเครื่องยนต์ จึงจำเป็นต้องพิจารณาในเชิงลึกถึงโครงสร้างอนุภาคเดี่ยวที่ไม่ใช่เพียงแค่การวัดขนาดของอนุภาคเพียงเท่านั้น ความยาวผลึกกราฟีนภายในอนุภาคเดี่ยวถูกศึกษาด้วยแบบจำลอง โดยใช้ภาพที่มีกำลังขยาย 800,000 เท่า ตามรูปที่ 4.22 - รูปที่ 4.24 แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านจากเชื้อเพลิง B7, B20 และ B100 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

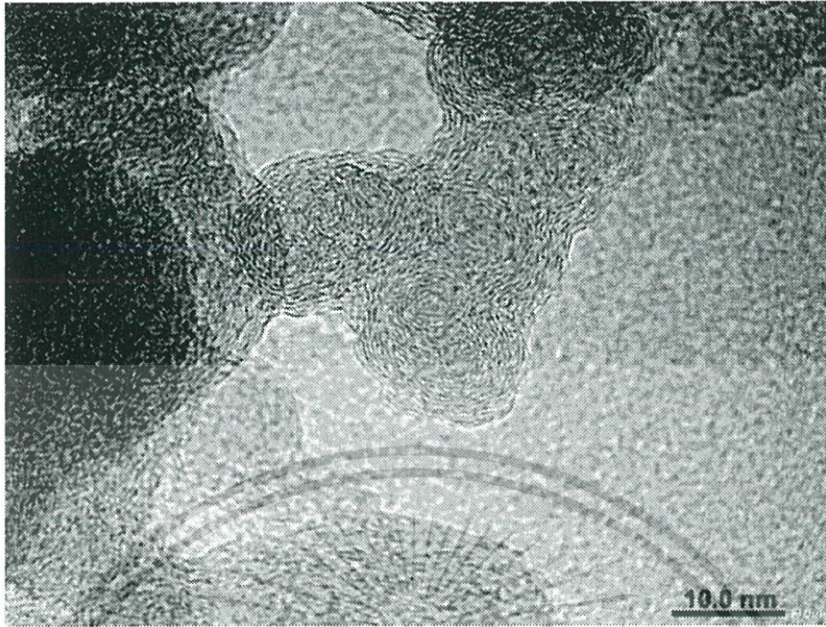


รูปที่ 4.22 ภาพถ่ายอนุภาคเดี่ยวจากเชื้อเพลิง B7 โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน



รูปที่ 4.23 ภาพถ่ายอนุภาคเดี่ยวจากเชื้อเพลิง B20 โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



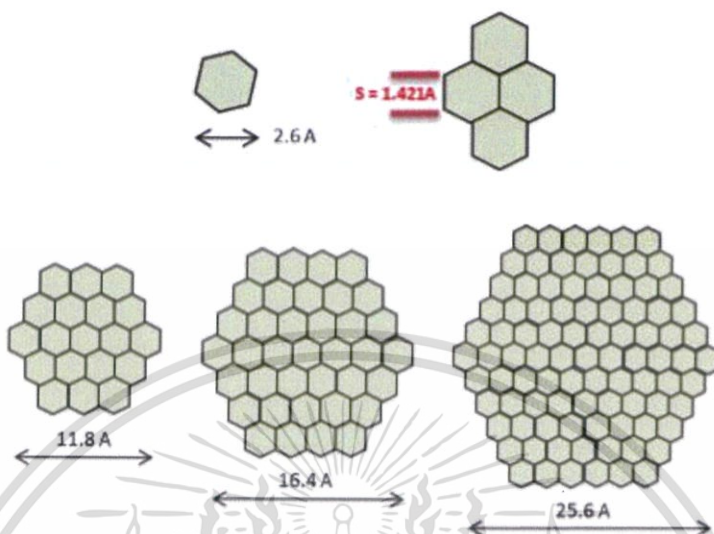
รูปที่ 4.24 ภาพถ่ายอนุภาคเดี่ยวจากเชื้อเพลิง B100 โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

แบบจำลองอนุภาคของ V. Fernandez-Alos [15] ในรูปที่ 4.25 แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างผลึกกราฟีนที่ประกอบด้วยโมเลกุลของคาร์บอน ซึ่งเป็นหน่วยที่เล็กที่สุดที่เป็นไปได้โมเลกุลดังกล่าวจะรวมตัวกันเป็นโครงสร้างผลึกของคาร์บอน จากนั้นกลายเป็นผลึกกราฟีนโดยมีระยะตามทฤษฎีของคาร์บอนที่อยู่ติดกันในวงแหวนหกเหลี่ยมที่ 1.421 Å หรือ 0.1421 นาโนเมตร ดังนั้นการอ้างอิงรูปทรงเรขาคณิตหกเหลี่ยมอย่างง่ายจึงสามารถกำหนดความยาวผลึกต่ำสุดที่เป็นไปได้เนื่องจากโครงสร้างชั้นต่ำของอะตอม C-6 ที่ประมาณความยาวได้ 2.6 Å หรือ 0.26 nm เมื่อโครงสร้างหกเหลี่ยมโตขึ้นขนาดของวงแหวนและความยาวของผลึกจะถูกกำหนดเป็นภาพที่มองเห็นได้และเนื่องจากผลึกกราฟีนมีรูปร่างเป็นชั้นเรียบส่วนของกิ่งก้านที่แตกออกมาจึงไม่ได้ถูกพิจารณาในงานวิจัยนี้

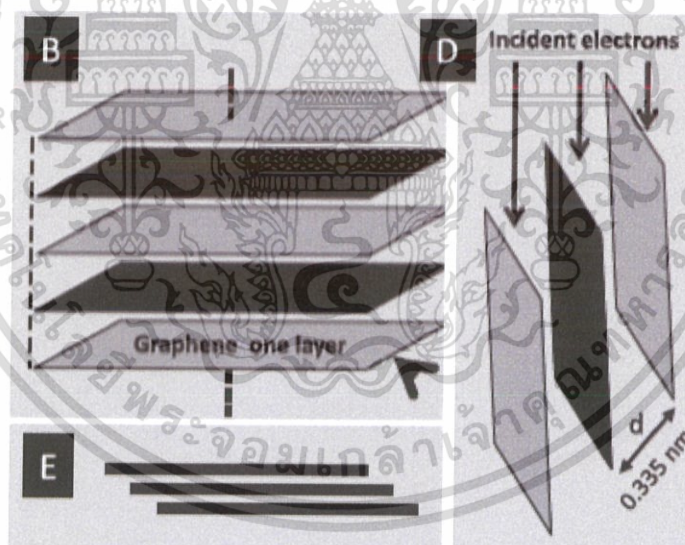
ตามแบบจำลองแนวคิดของ Lipkea [15] สันนิษฐานว่าระยะห่างระหว่างผลึกกราฟีนอยู่ที่ประมาณ 0.35–0.36 นาโนเมตร อย่างไรก็ตามจากการวัดระยะห่างของผลึกกราฟีนที่อยู่ติดกันพบว่า มีระยะห่างประมาณ 0.3 - 0.4 นาโนเมตร นั้นหมายความว่าภาพโครงร่างของผลึกกราฟีน ในกรณีนี้สอดคล้องกับ 1 เส้นขอบต่อ 1 โครงสร้างผลึกกราฟีน จึงทำให้ประมาณได้ว่าสายยาวที่ยาวขึ้นจะมีวงแหวนคาร์บอนจำนวนมากขึ้นในโครงสร้างของผลึกกราฟีน แนวคิดนี้ยังสอดคล้องกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านสมัยใหม่ S. Akhtar [12] อธิบายวิธีวิเคราะห์ภาพจาก TEM ของผลึกกราฟีน ดังแสดงในรูปที่ 4.26 ระยะห่างระหว่างระนาบผลึกกราฟีนอยู่ที่ประมาณ 0.335 นาโนเมตร ชั้นผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ราฟีนที่พบได้จะขนานกับลำอิเล็กตรอนที่ตกกระทบ ซึ่งแต่ละชั้นมีเส้นสีดำที่มีระยะห่างประมาณ 0.335 นาโนเมตร



รูปที่ 4.25 แบบจำลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างคาร์บอนอะตอมกับโครงสร้างของผลึกกราไฟท์ [15]



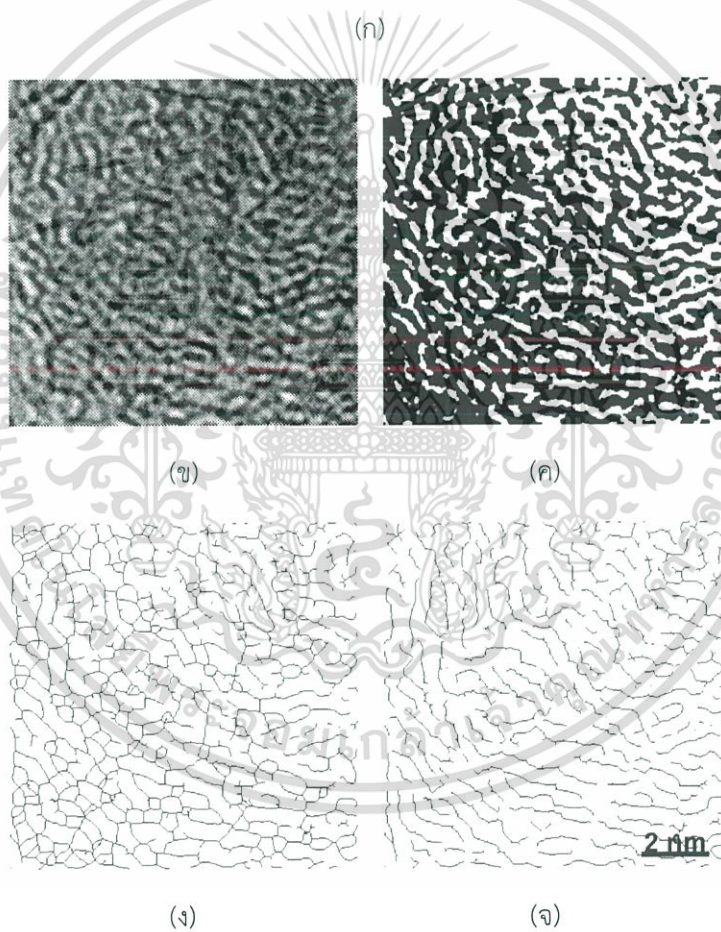
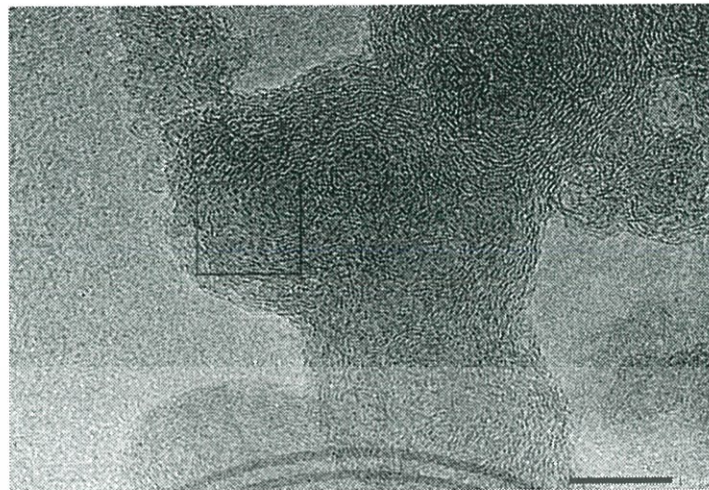
รูปที่ 4.26 แบบจำลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระนาบของผลึกกราไฟท์ในแต่ละชั้น [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากแบบจำลองที่กล่าวมาพบว่าภายในอนุภาคเดี่ยวประกอบด้วยผลึกกราฟีนจำนวนมาก เส้นผลึก ผลึกกราฟีนเหล่านี้จะถูกประมวลผลโดยวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลเป็นลำดับไปตามรูปที่ 4.27 ถึงรูปที่ 4.29 แสดงภาพของอนุภาคเดี่ยว B7, B20 และ B100 บนพื้นที่ที่สนใจ (พื้นที่ 10 nm x 10 nm) ด้วยการประยุกต์ใช้วิธีการประมวลผลภาพจากแบบจำลองด้วยโปรแกรม “Image J” ซึ่งความยาวของผลึก ผลึกกราฟีนที่ได้มาสามารถนำไปคาดการณ์ถึงจำนวนหรือความหนาแน่นของคาร์บอนภายในอนุภาคได้แล้วเมื่อได้จำนวนคาร์บอนมาสามารถนำไปคาดการณ์ถึงน้ำหนัก พหุติกรรม ลักษณะการไหลภายในท่อไอเสียหรือความแข็งแรงของอนุภาคได้ ซึ่งเป็นข้อมูลที่เป็นประโยชน์สำหรับอุปกรณ์กำจัดหรือดักกรองอนุภาคภายในเครื่องยนต์ดีเซล การคาดการณ์ความเสียหายของเครื่องยนต์จากอนุภาคที่เปลี่ยนไปจากการใช้เชื้อเพลิงที่ต่างกันทำให้สามารถจัดการกับอุปกรณ์ในรถยนต์ให้เหมาะสมกับการใช้งานได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

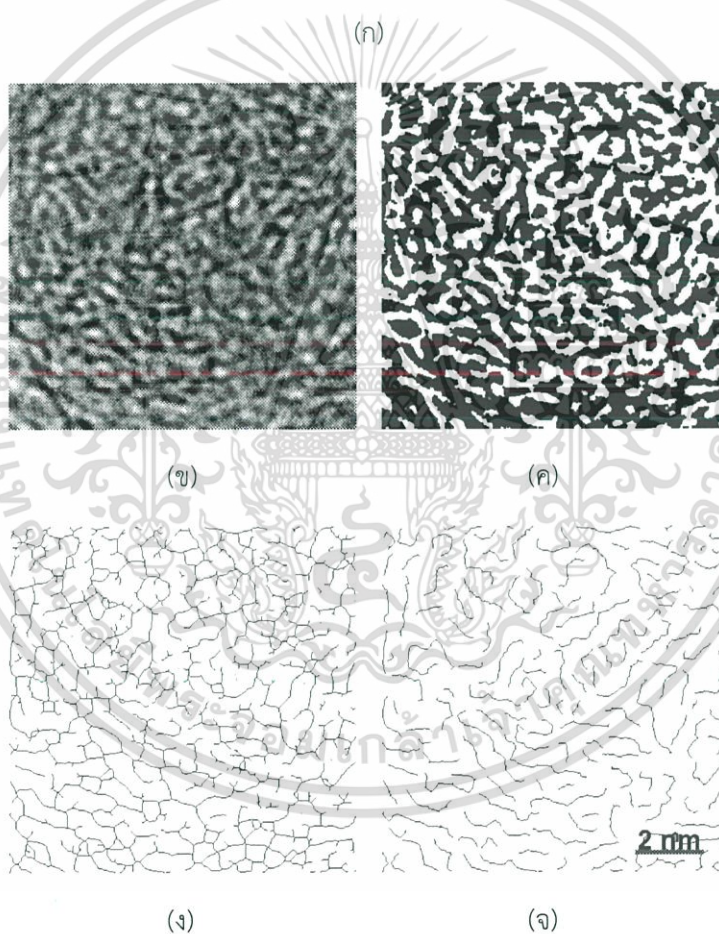
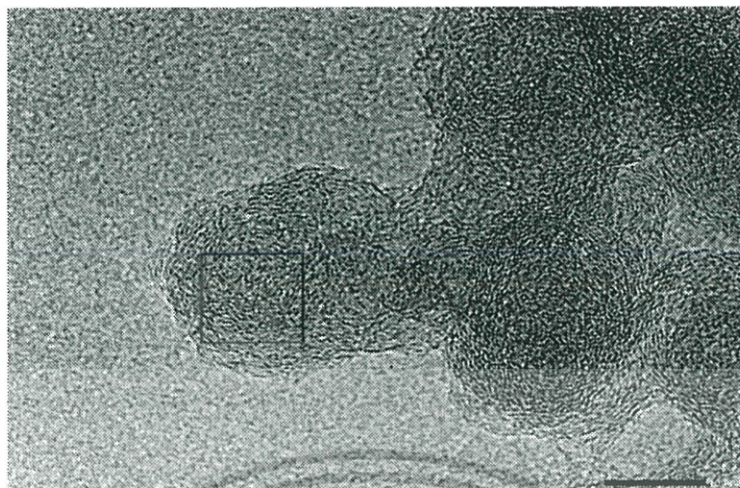


รูปที่ 4.27 กระบวนการวัดขนาดความยาวผลึกกราฟีนของเขม่าจากเชื้อเพลิง B7

(ก) ภาพถ่ายอนุภาคเดี่ยว (ข) ภาพตัดขนาด 10x10 nm (ค) ภาพขาว-ดำของอนุภาคเดี่ยว

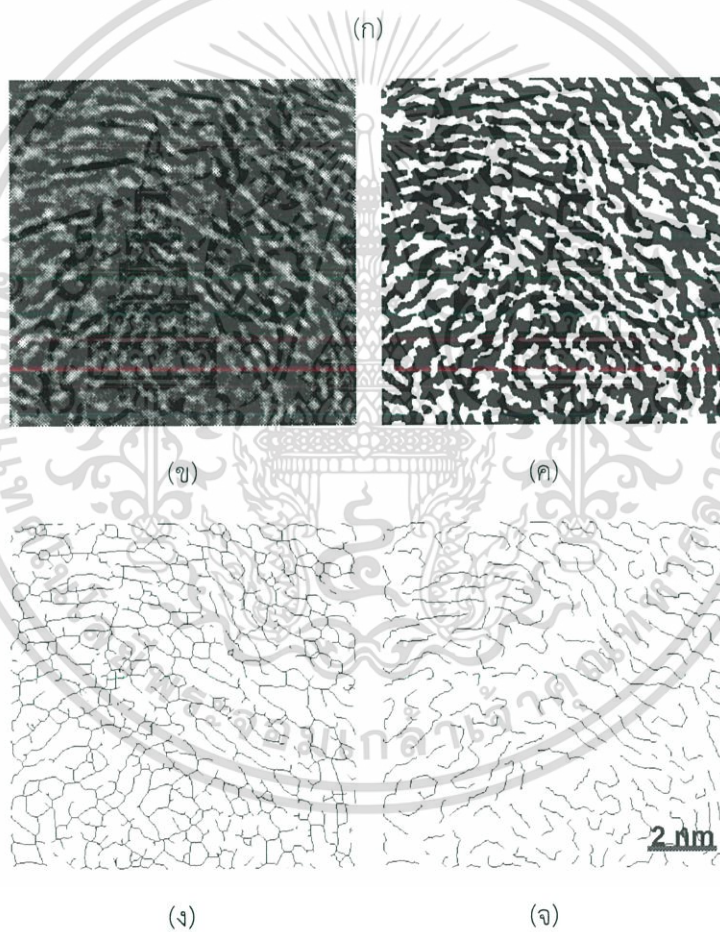
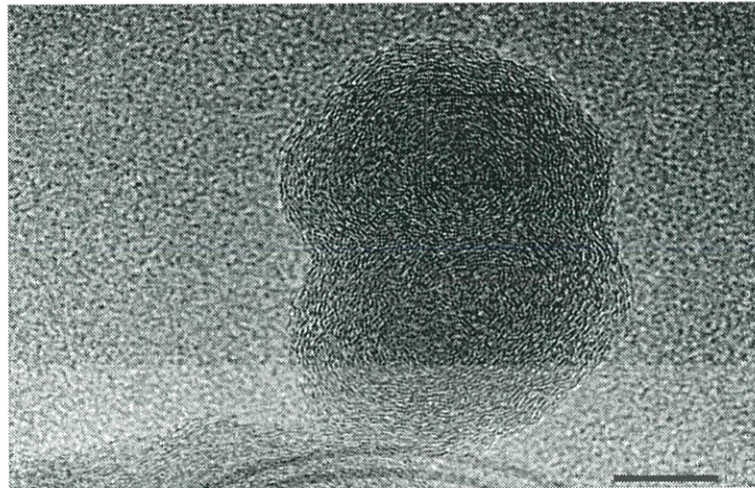
(ง) ภาพเส้นโครงความยาวผลึกกราฟีน (จ) ภาพปรับแก้เส้นโครงความยาวผลึกกราฟีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.28 กระบวนการวัดขนาดความยาวผลึกกราฟีนของเขม่าจากเชื้อเพลิง B20  
 (ก) ภาพถ่ายอนุภาคเดี่ยว (ข) ภาพตัดขนาด 10x10 nm (ค) ภาพขาว-ดำของอนุภาคเดี่ยว  
 (ง) ภาพเส้นโครงความยาวผลึกกราฟีน (จ) ภาพปรับแก้เส้นโครงความยาวผลึกกราฟีน

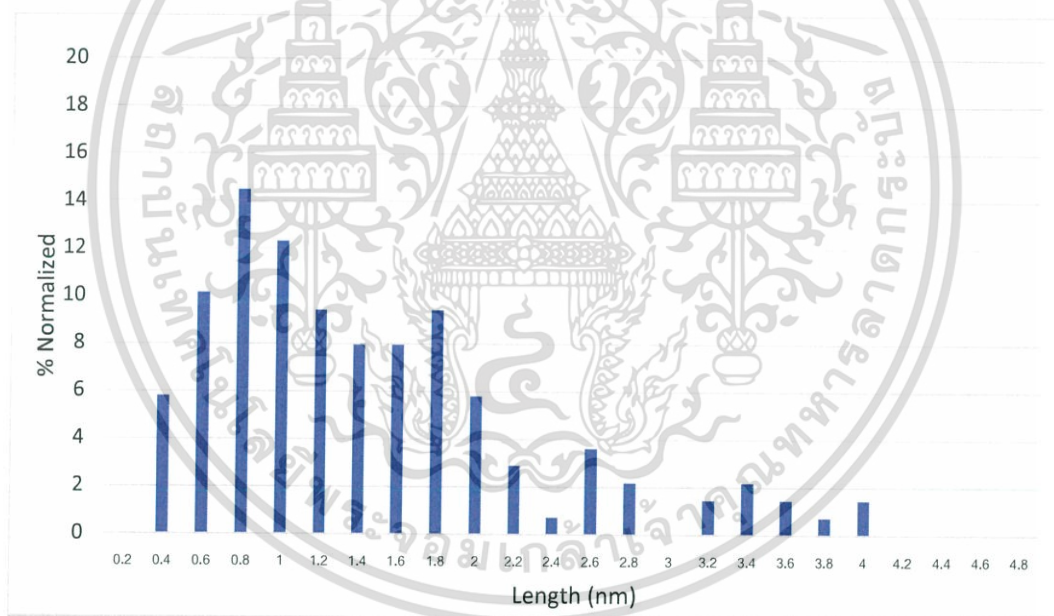
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



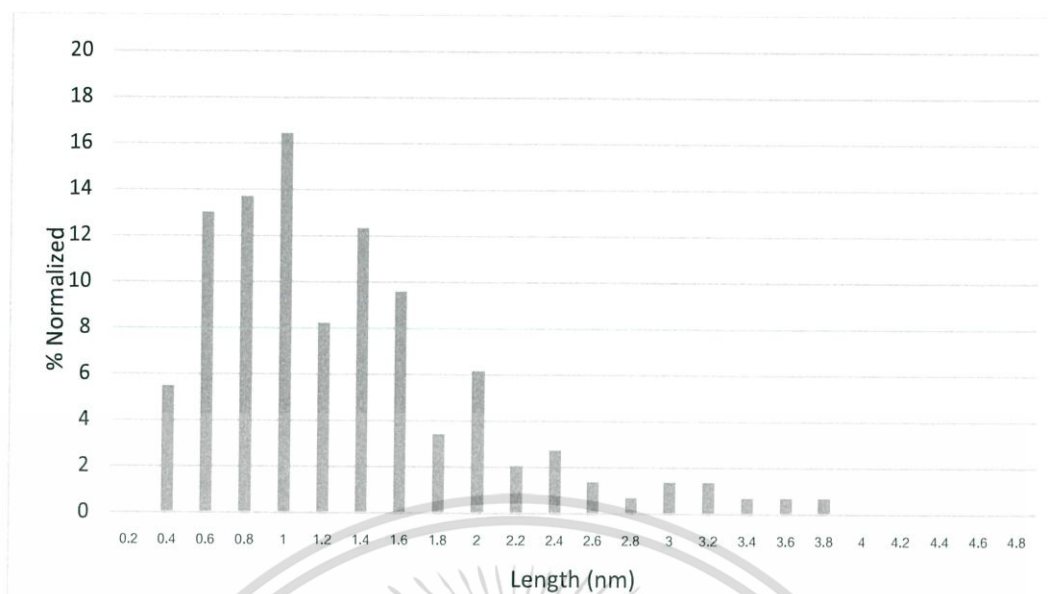
รูปที่ 4.29 กระบวนการวัดขนาดความยาวผลึกกราฟีนของเขม่าจากเชื้อเพลิง B100  
 (ก) ภาพถ่ายอนุภาคเดี่ยว (ข) ภาพตัดขนาด 10x10 nm (ค) ภาพขาว-ดำของอนุภาคเดี่ยว  
 (ง) ภาพเส้นโครงความยาวผลึกกราฟีน (จ) ภาพปรับแก้เส้นโครงความยาวผลึกกราฟีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

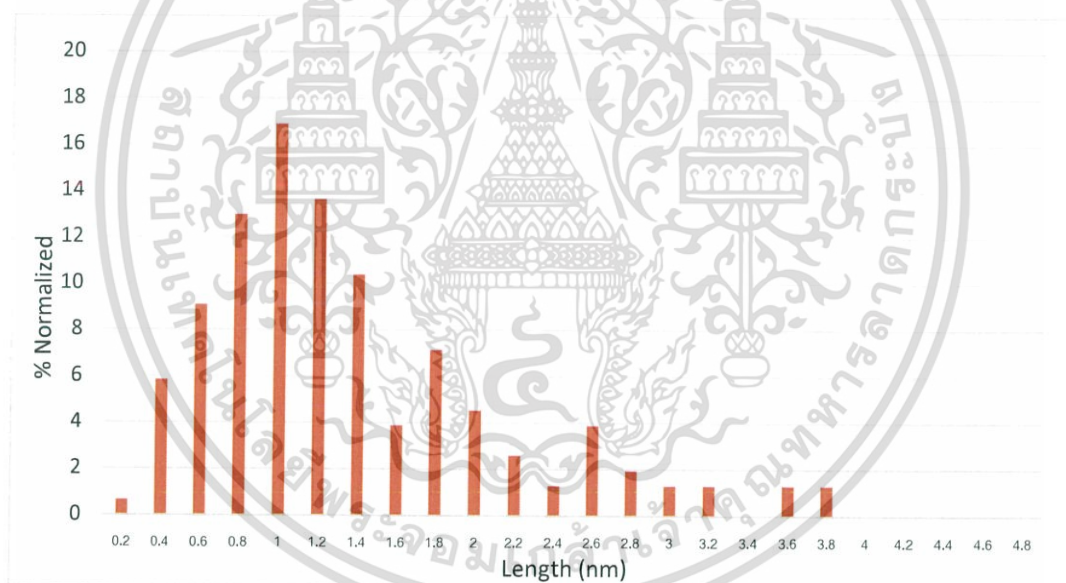
รูปที่ 4.30 - รูปที่ 4.32 แสดงถึงความยาวผลึกกราฟีนของอนุภาคจากเชื้อเพลิง B7, B20 และ B100 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อนำทั้งสามกราฟมาเปรียบเทียบรวมกันจะได้ตามรูปที่ 4.33 จะพบว่าแนวโน้มของความยาวผลึกกราฟีนจากเชื้อเพลิงทั้งสามชนิดมีลักษณะใกล้เคียงกันมาก ความยาวส่วนใหญ่ของผลึกกราฟีนจากเชื้อเพลิง B7 อยู่ในช่วง 0.8 - 1.2 nm สำหรับเชื้อเพลิง B20 อยู่ในช่วง 0.8 - 1.2 nm และเชื้อเพลิง B100 อยู่ในช่วง 0.2 - 1.2 nm ทำให้สรุปได้ว่าการผสมเชื้อเพลิงไบโอดีเซลลงไปแทบจะไม่มีผลต่อความยาวผลึกกราฟีนและเมื่อลองพิจารณาถึงความยาวรวมของผลึกกราฟีนของแต่ละเชื้อเพลิง พบว่าความยาวรวมผลึกกราฟีนต่อพื้นที่ ( $10 \times 10$  nm) จากเชื้อเพลิง B7, B20 และ B100 มีค่า 187.09, 176.82 และ 194.87 nm ตามลำดับ แสดงว่าเชื้อเพลิงไบโอดีเซลไม่ได้มีผลกระทบต่อจำนวนคาร์บอนอะตอมในอนุภาคเดี่ยวเลยตั้งแต่นั้นน้ำหนักหรือความแข็งของอนุภาคจึงไม่มีแตกต่างกันมากนัก การนำเชื้อเพลิงไบโอดีเซลไปใช้งานในเครื่องยนต์ดีเซลระบบคอมมอนเรลจึงไม่สร้างปัญหาต่อเครื่องยนต์



รูปที่ 4.30 ความยาวผลึกกราฟีนของอนุภาคจากเชื้อเพลิง B7

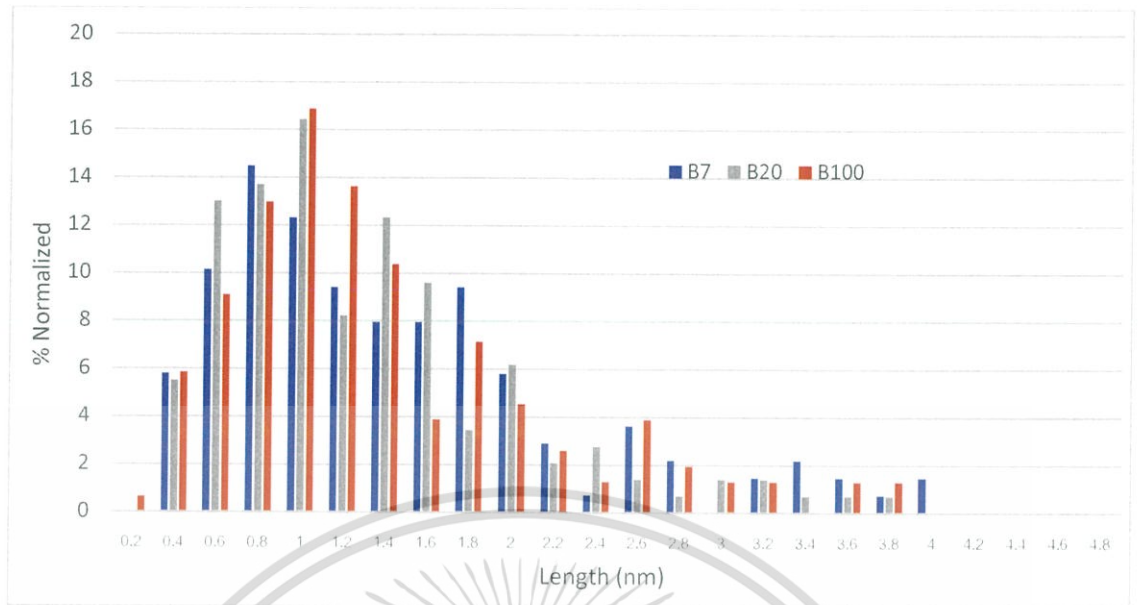


รูปที่ 4.31 ความยาวผลึกกราฟีนของอนุภาคจากเชื้อเพลิง B20



รูปที่ 4.32 ความยาวผลึกกราฟีนของอนุภาคจากเชื้อเพลิง B100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.33 การเปรียบเทียบความยาวผลึกกราฟีนของอนุภาคจากทั้งสามเชื้อเพลิง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้สรุปได้ว่าการเปลี่ยนเชื้อเพลิงจากการใช้เชื้อเพลิงดีเซลมาเป็นเชื้อเพลิงไบโอดีเซลในเครื่องยนต์ดีเซลระบบคอมมอนเรลไม่มีความแตกต่างอย่างชัดเจนในด้านประสิทธิภาพเชิงความร้อน เบรก แม้ว่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของไบโอดีเซลจะมีค่ามากกว่าเชื้อเพลิงดีเซล แต่ในด้านของมลพิษเชื้อเพลิงไบโอดีเซลสร้างมลพิษน้อยกว่าอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซล

การผสมเชื้อเพลิงไบโอดีเซลลงไปในเชื้อเพลิงดีเซลทำให้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ เบรก (BSFC) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแต่ไม่ได้ส่งผลต่อค่าอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเบรก (BSEC) และประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก (BTE) อย่างมีนัยสำคัญ ส่วนหม้อจากไอเสียเครื่องยนต์ที่ใช้ไบโอดีเซลมีค่าต่ำกว่าหม้อจากไอเสียเครื่องยนต์ที่ใช้ดีเซลประมาณ 60% สำหรับโครงสร้างสันฐานวิทยาของอนุภาคจากเชื้อเพลิง B7, B20 และ B100 ค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคกลุ่มจากเชื้อเพลิง B7, B20 และ B100 มีค่าเท่ากับ 540, 500 และ 270 nm ตามลำดับ ส่วนโครงสร้างระดับอนุภาคเดี่ยวมีค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคเดี่ยวจากเชื้อเพลิง B7, B20 และ B100 เป็น 24.08, 19.06 และ 17.32 nm พบว่าการผสมเชื้อเพลิงไบโอดีเซลทำให้อนุภาคมีขนาดลดลงดังนั้นการกำจัดอนุภาคด้วยปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นภายในท่อไอเสียจึงสามารถเกิดได้ง่ายขึ้น

การวิเคราะห์ความยาวผลึกกราฟีนของอนุภาคเดี่ยวจากเชื้อเพลิง B7, B20 และ B100 ค่าเฉลี่ยความยาวผลึกกราฟีนจากเชื้อเพลิง B7, B20 และ B100 มีค่าเท่ากับ 1.36, 1.21 และ 1.27 nm ตามลำดับ พบว่าความยาวของผลึกกราฟีนจากเชื้อเพลิง B7, B20 และ B100 มีค่าต่างกันเพียงเล็กน้อย ส่วนความยาวรวมผลึกกราฟีนต่อพื้นที่อนุภาค ( $10 \times 10$  nm) จากเชื้อเพลิง B7, B20 และ B100 จะเป็น 187.09, 176.82 และ 194.87 nm หมายความว่าคุณสมบัติกายภาพของอนุภาคจากไอเสียที่ปล่อยออกมาไม่แตกต่างกันมากนัก ความเสียหายภายในเครื่องยนต์ที่เกิดจากอนุภาคจึงไม่น่ามีอะไรที่แตกต่างกัน

เพื่อความเข้าใจที่มากขึ้นเกี่ยวกับการดักจับและทำปฏิกิริยาเคมีกับออกซิเจนของอนุภาคเขม่าด้วยอุปกรณ์กรองมลพิษเขม่าดีเซล (Diesel Particulate Filter, DPF) ในท่อไอเสีย และผลกระทบของเชื้อเพลิงและขนาดอนุภาคเขม่าต่อการสึกหรอของเครื่องยนต์จำเป็นต้องทำการวิจัยขั้นสูงต่อไป

## บรรณานุกรม

- [1] “Coordinated control strategy for the common-rail pressure using a metering unit and a pressure control valve in diesel engines” [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา [https://www.researchgate.net/figure/Structure-of-the-common-rail-injection-system\\_fig1\\_270281133](https://www.researchgate.net/figure/Structure-of-the-common-rail-injection-system_fig1_270281133) (6 พฤษภาคม 2562)
- [2] “Data Acquisition Card (DAQ) function.” [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <https://automationforum.co/data-acquisition-card-daq-function/> (30 พฤศจิกายน 2561).
- [3] David B. Kittelson, “Engines and nanoparticles: A review.” J. Aerosol Sct. Vol. 29, No. 5/6, pp. 575-5888. Great Britain. 1997.
- [4] Dhananjay Kumer Srivastava, Avinash Kumer Agarwal, “Particulate characterization of biodiesel fuelled compression Ignition engine”, SAE International, 2009-28-0018. United States of America. 2009
- [5] “Eddy Current Dynamometer (ECDY)Direct Cooling Disk Type Eddy Current Dynamometer.” [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา [http://www.meidensha.com/products/automobile/prod\\_01/prod\\_01\\_03/prod\\_01\\_03\\_04\\_01/index.html](http://www.meidensha.com/products/automobile/prod_01/prod_01_03/prod_01_03_04_01/index.html) (30 พฤศจิกายน 1561).
- [6] “Hitachi H-8100 TEM.” [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.nuance.northwestern.edu/epic/instruments-epic/tem/index.html> (30 พฤศจิกายน 2561).
- [7] ISUZU motors limited service marketing department, “4JJ1-TC ENGINE-Engine Mechanical Features-Engine Control System & Diagnosis Applicable”, pp. 1-35, September, Tokyo, Japan, 2004

- [8] “JSM-7610F Schottky Field Emission Scanning Electron Microscope.” [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <https://www.jeol.co.jp/en/products/detail/JSM-7610F.html> (30 พฤศจิกายน 2561).
- [9] Park Watanawongskorn, Preechar Karin, Nuwong Chollacoop, Katsunori Hanamura, “Characterization of morphology, nanostructure, and oxidation kinetics of biofuel particulate matters”, King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang, KMITL-2017-IC-M-004-002, pp.65-71, 2018
- [10] Pi-qiang Tan, Zhi-yuan Hu, Di-ming Lou, Bo Li. “Particle number and size distribution from a diesel engine with jatropha biodiesel fuel”, SAE International. 2009-01-2726. United States of America. 2009.
- [11] Preechar Karin, Park Watanawongskorn, Jiramed Boonsakda, Eakkawut Saenkhumvong, Sippakorn Rungsritanapaisan, Settavit Srivarocha and Chinda Charoenphonphanich, “Impact of Biodiesel on Small CI Engine Combustion Behavior and Particle Emission Characteristic”, JSAE, 2017.
- [12] S. Akhtar, “Transmission Electron Microscopy of Graphene and Hydrated Biomaterial Nanostructures”, Uppsala, Acta Universitatis Upsaliensis, (2012)
- [13] S. Laosuwan, P. Karin and C. Charoenpornpanich, “Comparative study of particulate matter characterization under diffusion flame between diesel and biodiesel fuels”, pp. 6-34, 2013.
- [14] S. Laosuwan, P. Karin and C. Charoenpornpanich, “Study on Diesel and Biodiesel Particulate Matter Trapping inside a Diesel Particulate Filter”, The 7th International Conference of Automotive Engineer (ICAE7) TSAE 2829 inside a Diesel Particulate Filter, The 7th International Conference of Automotive Engineer (ICAE-7), TSAE, 28-29 March, Bangkok, Thailand, 2011.

- [15] V. Fernandez-Alos, J. Watson, R. Vander Wal, and J. Mathews, "Soot and char molecular representations generated directly from HRTEM lattice fringe images using Fringe3D", *Combustion and Flame*, 158(9), pp.1807-1813, (2011)
- [16] Willard W. Pulkrabek, "Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine", Prentice Hall, Inc., New Jersey, United State of America, 1997.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้