

จลนศาสตร์ออกซิเดชันของมลพิษอนุภาคเขม่าไบโอดีเซล  
ในตัวกรองมลพิษอนุภาคดีเซล

BIODIESEL SOOT OXIDATION KINETICS ON A CONVENTIONAL  
DIESEL PARTICULATE FILTER

นางสาวปรียามาศ	มณีวรรณ
นายปัญญาพล	วิชาพิณ
นายสานิตย์	อ่องบางน้อย

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2556

จลนศาสตร์ออกซิเดชันของมลพิษอนุภาคเขม่าไบโอดีเซล  
ในตัวกรองมลพิษอนุภาคดีเซล

BIODIESEL SOOT OXIDATION KINETICS ON A CONVENTIONAL  
DIESEL PARTICULATE FILTER

นางสาวปรียามาศ มณีวรรณ  
นายปัญญาผล วิชาพิณ  
นายสานิตย์ อ่องบางน้อย

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2556

BIODIESEL SOOT OXIDATION KINETICS ON A CONVENTIONAL  
DIESEL PARTICULATE FILTER

Preeyamas Maneewan

Panjapol Witchapin

Sanit Ongbangnoi

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

2013

ปริญญาโทปีการศึกษา 2556

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง จลนศาสตร์ออกซิเดชันของมลพิษอนุภาคเขม่าไปโอดีเซลในตัวกรองมลพิษอนุภาคดีเซล

BIODIESEL SOOT OXIDATION KINETICS ON A CONVENTIONAL DIESEL PARTICULATE  
FILTER

ผู้จัดทำ

1. นางสาว ปรียามาศ มณีวรรณ รหัสประจำตัว 53010957
2. นาย ปัญจพล วิชาพิณ รหัสประจำตัว 53010968
3. นาย สานิต อ่องบางน้อย รหัสประจำตัว 53011666



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร.ปรีชา การินทร์)

## จลนศาสตร์ออกซิเดชันของมลพิษอนุภาคเขม่าไบโอดีเซลในตัวกรองมลพิษอนุภาคดีเซล

นางสาวปริยามาศ มณีวรรณ	53010957
นายปัญญาพล วิชชาพิณ	53010968
นายสานิตย์ อ่องบางน้อย	53011666
ดร.ปรีชา การินทร์ อาจารย์ที่ปรึกษา	ปีการศึกษา 2556

### บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาลักษณะทางกายภาพของมลพิษอนุภาค และยังศึกษาการเกิดและการกำจัดมลพิษอนุภาคจากไอเสียโดยเครื่องกำจัดมลพิษอนุภาคแบบไหลผ่านทั้งหมด (Full-flow Diesel Particulate Filter, DPF) เปรียบเทียบระหว่างเชื้อเพลิงดีเซลและไบโอดีเซลที่โหลด80% โดยการให้ความร้อนจากเตาเผาอุณหภูมิสูง นอกจากนี้ยังทำการออกแบบชุดทดลองการดักและการกำจัดมลพิษอนุภาค ในการทำโครงการนี้จะต้องทำการศึกษาในเรื่องการเกิดมลพิษอนุภาค ขนาดองค์ประกอบทางเคมี ปริมาณของมลพิษระหว่างเชื้อเพลิงดีเซลและไบโอดีเซลโดยการวัดจากความดันตกคร่อมที่ขาเข้าและขาออก ซึ่งความดันจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเนื่องจากมลพิษอนุภาคที่สะสมมากขึ้นในตัวกรอง นอกจากนี้ยังศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของมลพิษที่เกิดจากเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์และสะสมอยู่ในตัวกรอง

# BIODIESEL SOOT OXIDATION KINETICS ON A CONVENTIONAL DIESEL PARTICULATE FILTER

Preeyamas      Maneewan  
Panjapol        Witchapin  
Sanit             Ongbangnoi  
Dr.Preechar    Karin    Advisor  
Year 2013

## ABSTRACT

This project would like to study about physical characteristic, the formation and oxidation behavior of particulate matter from diesel and biodiesel fuel combustion by using Full-flow Diesel Particulate Filter (DPF) at 80% engine load condition. In addition, we design the Diesel Particulate Filter to use in experiment. To do this project, the characteristics of the particulate matter should be studied such as the particulate matter size, chemical composition, particulate matter quantity of diesel and biodiesel by measured pressure drop between input and output of the filter. The pressure might be increase more and more because of the particulate matter from the fuel combustion is collected in the filter. Finally, this project study in diesel and biodiesel particulate oxidation which occurs in incomplete combustion and clogs inside the particulate filter.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ก็เพราะด้วยความเอาใจใส่ แนะนำ และช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ เสมอมาจาก ดร.ปรีชา การินทร์ อาจารย์ที่ปรึกษา และ ผศ.ดร.จินดา เจริญพรพาณิชย์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ซึ่งต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างมาก

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่เอื้อเพื่อให้ยืมเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการนี้

ขอขอบคุณ พี่โจ พี่แขก พี่มิวสิค พี่วิท พี่เบส พี่มอเทซ่า และพี่ๆปริญญาโทชมรมยานยนต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกคนที่แนะนำให้ความรู้และให้ความช่วยเหลือในทุกๆด้านด้วยดีมาโดยตลอด

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมา ในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นางสาวปริยามาศ มณีวรรณ

นายปัญญาพล วิชาพิณ

นายสานิตย์ อ่องบางน้อย

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	2
1.4 วิธีการดำเนินงาน.....	2
1.5 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานในงานวิจัย.....	6
2.1 มลพิษไอเสียเครื่องยนต์ดีเซล.....	6
2.1.1 ไฮโดรคาร์บอน.....	6
2.1.2 ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์.....	6
2.1.3 ออกไซด์ของไนโตรเจน.....	7
2.1.4 อนุภาคของแข็ง.....	8
2.2 ตัวกรองเขม่าดีเซลในไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซล.....	10
2.2.1 ความยุ่งยากหลายตัวกรองเขม่าดีเซล.....	10
2.2.2 ตัวกรองเขม่าดีเซลไหลผ่านทุกส่วนชนิดรังผึ้ง.....	11
2.2.3 ตัวกรองเขม่าดีเซลไหลผ่านทุกส่วนชนิดโฟมเซรามิค.....	12
2.2.4 ตัวกรองเขม่าดีเซลไหลผ่านบางส่วนชนิดแผ่นใยเซรามิคหรือไฟเบอร์.....	12
2.3 หลักการพื้นฐานการกรองเขม่า.....	13
2.3.1 การแพร่.....	13
2.3.2 การกระทบ.....	13
2.3.3 การขัดขวาง.....	14
2.3.4 ตะแกรงร่อน.....	14
2.4 ความดันตกคร่อม.....	14
2.5 เชื้อเพลิงไบโอดีเซล.....	16

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 ทฤษฎีหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน.....	17
2.6.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน.....	17
2.6.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด.....	18
2.7 เครื่องมือวิเคราะห์โดยวิธีชั่งน้ำหนักเชิงความร้อน.....	20
2.8 การคำนวณพลังงานก่อกัมมันต์ของมลพิษอนุภาคดีเซลและไบโอดีเซล.....	21
บทที่ 3 วิธีการทดลอง.....	23
3.1 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของมลพิษอนุภาคดีเซล.....	23
3.2 การวิเคราะห์มลพิษอนุภาคโดยเครื่องมือวิเคราะห์โดยวิธีชั่งน้ำหนักเชิงความร้อนจากคาร์บอนเชื้อเพลิงดีเซลและเชื้อเพลิงไบโอดีเซล.....	26
3.3 การดักและการสลายมลพิษอนุภาค.....	28
3.3.1 อุปกรณ์และวิธีการดักมลพิษอนุภาค.....	28
3.3.1.1 อุปกรณ์กรองมลพิษอนุภาค.....	29
3.3.1.2 เครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก.....	30
3.3.1.3 เชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง.....	31
3.3.1.4 เซนเซอร์วัดความดัน.....	33
3.3.1.5 เทอร์โมคัปเปิล.....	33
3.3.1.6 บั้มดูดแบบสุญญากาศ.....	34
3.3.1.7 เต้าเผาอุณหภูมิสูง.....	35
3.3.2 การออกแบบชุดทดลอง.....	36
3.3.3 การทำงานของชุดทดลอง.....	38
3.3.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	38
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	39
4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของมลพิษอนุภาคที่ได้จากเชื้อเพลิงดีเซล.....	39
4.2 สมบัติทางเคมีของมลพิษอนุภาคจากเชื้อเพลิงดีเซลและไบโอดีเซลโดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์โดยวิธีชั่ง น้ำหนักเชิงความร้อน (Thermo-gravimetric analysis).....	40
4.3 ปริมาณมลพิษอนุภาคที่ได้จากเชื้อเพลิงดีเซลและไบโอดีเซล.....	46
4.4 พฤติกรรมการสลายตัวของมลพิษอนุภาคของเชื้อเพลิงดีเซลและไบโอดีเซล โดยการให้ความร้อนด้วยเต้าเผาอุณหภูมิสูง.....	47
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง ปัญหาและแนวทางแก้ไขปัญหา และข้อเสนอแนะ.....	49
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	49

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไขปัญหา.....	50
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	50
บรรณานุกรม.....	51
ภาคผนวก.....	53
ภาคผนวก ก: คุณสมบัติของอุปกรณ์.....	54
ก-1: คุณสมบัติเครื่องยนต์ดีเซล.....	55
ก-2: คุณสมบัติตัวเก็บข้อมูล.....	56
ก-3: โปรแกรม Labview.....	57
ก-4: เซนเซอร์วัดความดัน.....	58
ภาคผนวก ข: มาตรฐานและคุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิง.....	59
ข-1: น้ำมันดีเซล.....	60
ข-2: น้ำมันไบโอดีเซล.....	62
ภาคผนวก ค: มาตรฐานมลพิษอนุภาค.....	64
ค-1: มาตรฐานรถยนต์ขนาดเล็กที่ใช้เครื่องยนต์แบบจุดระเบิดด้วยการอัดในประเทศไทย...65	
ค-2: มาตรฐานรถยนต์ขนาดเล็กที่ใช้เครื่องยนต์แบบจุดระเบิดด้วยการอัดในยุโรป.....65	

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงดีเซลที่ใช้ในการทดลอง.....	23
3.2 ตารางแสดงคุณสมบัติของรถยนต์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	23
3.3 คุณสมบัติของอุปกรณ์กรองมลพิษอนุภาค.....	30
3.4 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กที่ใช้ในการทดลอง.....	31
3.5 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงดีเซลและไบโอดีเซล.....	32
3.6 สมรรถนะของปั๊มสุญญากาศ.....	34
3.7 คุณสมบัติของเตาเผาอุณหภูมิสูง.....	35

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การเกิดก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ต่ออัตราส่วนอากาศและเชื้อเพลิง.....	7
2.2 การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนต่ออัตราส่วนอากาศและเชื้อเพลิง.....	8
2.3 การเกิดมลพิษอนุภาคในแกนสเปรย์.....	8
2.4 การรวมตัวเกาะกันเป็นก้อนของมลพิษอนุภาค.....	9
2.5 องค์ประกอบของกลุ่มก้อนมลพิษ.....	10
2.6 การติดตั้งตัวกรองเขม่าดีเซลชนิดไหลผ่านทุกส่วนชนิดรังผึ้ง.....	11
2.7 ลักษณะของตัวกรองเขม่าดีเซลไหลผ่านทุกส่วนชนิดโพนเซรามิก.....	12
2.8 ลักษณะของตัวดักกรองเขม่าดีเซลชนิดแผ่นใยเซรามิก.....	13
2.9 กลไกการเคลื่อนตัวของเขม่า.....	13
2.10 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อวัดความดันตกคร่อม.....	15
2.11 กราฟความดันตกคร่อม.....	15
2.12 แบบจำลองแนวความคิดของความดันตกคร่อมในระหว่างการดักอนุภาค.....	16
2.13 หลักการทำงานของกระบวนการคาร์บอนนิวตรอนของไบโอดีเซล.....	17
2.14 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน.....	17
2.15 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน.....	18
2.16 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด.....	19
2.17 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด.....	19
2.18 เครื่องมือวิเคราะห์โดยวิธีซึ่งน้ำหนักเชิงความร้อน.....	21
2.19 แผนภาพไดอะแกรมของระบบเครื่องซึ่งเชิงความร้อน.....	21
3.1 ภาพระหว่างการเก็บมลพิษอนุภาค.....	24
3.2 กระดาษกรองเขม่าของเปลวไฟแบบแพร่จากเชื้อเพลิงดีเซล.....	24
3.3 โปรแกรม Image Pro Plus ที่ใช้วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของมลพิษอนุภาค.....	24
3.4 แสดงวิธีการวัดขนาดของมลพิษอนุภาคจากภาพถ่ายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน.....	25
3.5 ภาพการวัดขนาดมลพิษอนุภาคแบบกลุ่มจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	25
3.6 เครื่องวัดขนาดมลพิษอนุภาค Scanning Mobility Particulate Sizer (SMPS).....	26
3.7 มลพิษอนุภาคที่ได้จากตะแกรงลวด (ก) ดีเซล (ข) ไบโอดีเซล.....	27
3.8 แผนผังชุดอุปกรณ์ทดลองการดักมลพิษอนุภาค.....	28
3.9 ชุดอุปกรณ์ทดลองการดักมลพิษอนุภาค.....	28
3.10 อุปกรณ์กรองมลพิษอนุภาคแบบไหลผ่านทั้งหมด.....	29

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.11 ภาพถ่ายอุปกรณ์กรองมลพิษอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน.....	29
3.12 เครื่องยนต์ Yanmar รุ่น TF 120 Di.....	30
3.13 ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ที่รอบต่างๆ.....	31
3.14 เชื้อเพลิงดีเซล (B4-5) และไบโอดีเซลที่ใช้ในการทดลอง (B100).....	32
3.15 เซนเซอร์วัดความดันยี่ห้อ Free scale Semiconductor รุ่น mpx5050dp.....	33
3.16 เทอร์โมคัปเปิล.....	34
3.17 ปีมัสสุญญากาศ.....	34
3.18 เตาเผาอุณหภูมิสูง.....	35
3.19 ท่อเซรามิค.....	36
3.20 ที่ยึดอุปกรณ์กรองมลพิษอนุภาค.....	36
3.21 ที่ยึดอุปกรณ์กรองภายในบรรจุที่กรองมลพิษอนุภาค.....	36
3.22 ชิ้นส่วนของอุปกรณ์กรองมลพิษอนุภาค.....	37
3.23 ตำแหน่งที่ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล.....	37
3.24 เตาเผาอุณหภูมิสูงที่มีท่อเซรามิคภายในบรรจุตัวกรองมลพิษอนุภาค.....	37
4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนมลพิษอนุภาคกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของมลพิษอนุภาคของเชื้อเพลิงดีเซลที่สภาวะเดินเบา.....	39
4.2 ผลการวัดขนาดมลพิษอนุภาคจากเครื่อง SMPS.....	40
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักเทียบเวลาของมลพิษอนุภาคสภาวะทดสอบ 80% ที่อุณหภูมิต่างๆจากเครื่องมือวิเคราะห์โดยวิธีชั่งน้ำหนักเชิงความร้อน (Thermo-gravimetric analysis).....	41
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักเทียบเวลาของมลพิษอนุภาคจากเชื้อเพลิงดีเซลสภาวะทดสอบ 80% ที่อุณหภูมิต่างๆจากเครื่องมือวิเคราะห์โดยวิธีชั่งน้ำหนักเชิงความร้อน (Thermo-gravimetric analysis).....	42
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักเทียบเวลาของมลพิษอนุภาคจากเชื้อเพลิงไบโอดีเซลสภาวะทดสอบ 80% ที่อุณหภูมิต่างๆจากเครื่องมือวิเคราะห์โดยวิธีชั่งน้ำหนักเชิงความร้อน (Thermo-gravimetric analysis).....	43
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักเทียบเวลาของคาร์บอน, มลพิษอนุภาคจากเชื้อเพลิงดีเซล และไบโอดีเซลสภาวะทดสอบ 80% ที่อุณหภูมิ 600 °C จากเครื่องมือวิเคราะห์โดยวิธีชั่งน้ำหนักเชิงความร้อน (Thermo-gravimetric analysis).....	44

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Ln rate กับ $1/T$ แต่ช่วงอุณหภูมิของแต่ละเชื้อเพลิง.....	45
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมที่เพิ่มขึ้นกับเวลาเนื่องจากการสะสมของมลพิษอนุภาคของเชื้อเพลิงดีเซลกับไบโอดีเซลที่สภาวะโหลด 80%.....	46
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างความดันที่ลดลงกับเวลาเนื่องจากการสลายตัวของมลพิษอนุภาคของเชื้อเพลิงดีเซลกับไบโอดีเซลที่สภาวะโหลด 80%.....	47

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มา

เครื่องยนต์ดีเซลเป็นเครื่องยนต์ที่มีประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal Efficiency) สูงที่สุดในบรรดาเครื่องยนต์สันดาปภายในภายใต้สภาวะโหลดเดียวกัน ดังนั้นการเพิ่มปริมาณการใช้เครื่องยนต์ดีเซลเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพจากเชื้อเพลิงเหลวที่มีอยู่อย่างจำกัด เครื่องยนต์ดีเซลนั้นก่อให้เกิดมลพิษหลักสองชนิด คือ มลพิษอนุภาค (Particulate Matter: PM) โดยมีส่วนประกอบหลักเป็นคาร์บอน และอีกชนิดคือ มลพิษก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน (NOx) มลพิษทั้งสองชนิดต้องได้รับการกำจัดออกจากไอเสียเพื่อแก้ไขปัญหาสภาวะแวดล้อมเป็นพิษ (Air pollution) เป็นผลทำให้เกิดสภาวะโลกร้อน รวมถึงปัญหาสุขภาพโดยเฉพาะระบบหายใจ ปอด เป็นต้น

จากปัญหามลพิษเครื่องยนต์ดีเซลที่ปล่อยออกมาพร้อมไอเสีย ส่งผลกระทบต่อปัญหาสุขภาพของมนุษย์ รวมทั้งสร้างมลภาวะให้กับสิ่งแวดล้อม ด้วยเหตุนี้ประเทศไทยจึงออกกฎหมายกำหนดให้รถยนต์ดีเซลขนาดเล็กใช้มาตรฐานมลพิษระดับ 7 หรือเทียบเท่า EURO4 โดยมีปริมาณมลพิษอนุภาค (PM) ไม่เกิน 0.025 g/km และในอนาคตประเทศไทยมีแผนการปรับระดับมาตรฐานเป็นระดับ 8 หรือเทียบเท่า EURO5 โดยกำหนดให้ปริมาณมลพิษไม่เกิน 0.005 g/km อุปกรณ์กำจัดมลพิษอนุภาค (Diesel Particulate Filter) จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อช่วยบรรเทาการเกิดสภาวะแวดล้อมเป็นพิษ โดยอุปกรณ์นี้จะดักกรองมลพิษอนุภาคจนเต็มจะทำให้ความดันตกคร่อมมีค่าสูงขึ้น มลพิษอนุภาคเหล่านั้นต้องถูกออกซิไดซ์ โดยใช้อุณหภูมิที่สูง จากให้ความร้อนของเตาเผา

น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงที่เกิดจากการทับถมของซากพืชซากสัตว์ ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่มีอยู่อย่างจำกัด การเลือกใช้พลังงานทางเลือก เช่น ไบโอดีเซล เป็นทางเลือกที่ดีที่จะใช้แทนน้ำมันดีเซล ซึ่งข้อดีของไบโอดีเซลคือ มีสารตะกั่ว และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอโรมาติกต่ำกว่าน้ำมันดีเซล น้ำมันไบโอดีเซลประกอบด้วยโมเลกุลของออกซิเจน ทำให้มีการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ได้สมบูรณ์กว่า การใช้เชื้อเพลิงดีเซล และยังประพัตตัวเป็นเชื้อเพลิงที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. ศึกษาลักษณะทางกายภาพของมลพิษอนุภาคโดยการวัดขนาดของกลุ่มก้อนที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
2. ศึกษาพฤติกรรมการดักกรองมลพิษอนุภาคจากเครื่องยนต์ดีเซล ที่ใช้เชื้อเพลิงดีเซล และไบโอดีเซล โดยอุปกรณ์การดักกรองมลพิษอนุภาค
3. ศึกษาพฤติกรรมการสลายตัวของมลพิษอนุภาคจากเครื่องยนต์ดีเซล ที่ใช้เชื้อเพลิงดีเซล และไบโอดีเซล เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง

### 1.3 ขอบเขตของโครงการ

ศึกษาลักษณะทางกายภาพของมลพิษอนุภาคโดยการวัดขนาดของกลุ่มก้อนที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและทำการดักกรองมลพิษอนุภาคจากเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้เชื้อเพลิงดีเซล และไบโอดีเซลโดยอุปกรณ์การดักกรองมลพิษอนุภาคที่สภาวะไหล 80% เปรียบเทียบการเกิดและการสลายตัวของมลพิษอนุภาคที่ใช้เชื้อเพลิงดีเซล และไบโอดีเซล โดยการใช้เตาเผาอุณหภูมิสูง

### 1.4 วิธีการดำเนินงาน

ในโครงการนี้เริ่มต้นโดยการศึกษาค้นคว้าทฤษฎีที่เกี่ยวกับการไหลของของไหลผสมเพื่อนำมาวิเคราะห์หาสมการสำเร็จรูปในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของของไหลผสม จากนั้นทำการออกแบบและสร้างชุดทดลองที่ใช้ทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของของไหลผสม หลังจากนั้นจึงทำการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของของไหลจากชุดทดลองที่สร้างขึ้น โดยนำผลที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยรายละเอียดของผลการทดลอง และผลการเปรียบเทียบที่ได้จากการทดลองกับผลการคำนวณทางทฤษฎีนั้นจะแสดงไว้ในผลการทดสอบและสรุปผล

### 1.5 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดักกรองมลพิษอนุภาคนั้นในปัจจุบันมีจำนวนมาก โดยเฉพาะในต่างประเทศ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นการศึกษาที่กล่าวถึงเฉพาะหลักการเบื้องต้น ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

Preechar KARIN (2010) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการกำจัดมลพิษอนุภาค (Particulate Matter: PM) ที่ถูกปล่อยมาพร้อมกับไอเสีย (Exhaust gas) จากเปลวของการเผาไหม้แบบแพร่ (Diffusion Flame) เช่น เครื่องยนต์ดีเซล (Diesel Engine) เครื่องยนต์จีดีไอ (Gasoline Direction Engine) โดยการศึกษาโครงสร้างของมลพิษอนุภาคในระดับไมโครและนาโนสเกล โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope: TEM) และการศึกษาถึงการกำจัดมลพิษอนุภาคโดยการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างมลพิษอนุภาคกับออกซิเจน ตามหลักการของอุปกรณ์กำจัดอนุภาคมลพิษอนุภาค (Diesel Particulate Filter: DPF) การวิเคราะห์หาค่าพลังงานกระตุ้น (Apparent Activation Energy) ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาระหว่างก๊าซออกซิเจนกับมลพิษอนุภาคที่มีส่วนประกอบหลักคือคาร์บอน[20]

Victor Fernandez และคณะ ได้ศึกษาการเกิดขึ้นของมลพิษอนุภาค ตั้งแต่ระดับอะตอมจนกลายมาเป็นระดับอนุภาค โดยอะตอมของคาร์บอนซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักในมลพิษอนุภาค จับตัวกันอยู่ด้วยพันธะเป็นรูปหกเหลี่ยมโดยเริ่มจาก C6 จับตัวกับ C6 อีกตัวเกิดเป็น C10 มีความยาวเพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆ เป็นเช่นนี้ไปเรื่อยๆ คาร์บอนจะจับตัวกันในระนาบเดียวเป็นแผ่นบางๆ เมื่อแผ่น

บางๆ เหล่านี้เกาะตัวกันเป็นชั้นกลายเป็นคริสตัล ซึ่งในแต่ละคริสตัลจะมีประมาณ 2-5 ชั้น โดยมีระยะห่างระหว่างชั้น 0.355 นาโนเมตร การรวมตัวกันเป็นมลพิษอนุภาคประกอบด้วยคริสตัลประมาณ  $10^3$  คริสตัล หรือประมาณ  $10^5$ - $10^6$  อะตอมคาร์บอน [22]

สมชาย จันทวานา (2535) ได้ศึกษาถึงผลกระทบของการซ่อมบำรุง เครื่องยนต์และคุณภาพของน้ำมันดีเซล ต่อสมรรถนะและปริมาณมลพิษอนุภาคที่ปล่อยออกมากับไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซล ได้กระทำโดยการทดสอบเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กบนไดนาโมมิเตอร์ที่สภาวะการทำงานต่างๆ ก่อนและหลังการซ่อมบำรุง และน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับการทดสอบก่อนการซ่อมบำรุงเป็นน้ำมันดีเซลที่มีอุณหภูมิกลั่น 317 °C และ 357 °C ส่วนหลังการซ่อมบำรุงใช้น้ำมันดีเซลสองชนิดคือชนิดที่มีอุณหภูมิกลั่นที่ 317 °C และ 357 °C ตามลำดับ ทั้งนี้จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบในรูปของ Output Power, Specific Fuel Consumption, ปริมาณของ CO, HC, NOX, SO2 และควันดำ ที่สภาวะการทำงานต่างๆ ก่อนและหลังการซ่อมบำรุง และผลกระทบของน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีคุณสมบัติต่างกัน จากการทดลองพบว่า ถ้าหากเครื่องยนต์ทำงานที่ EQR สูงกว่า 0.8 (EQR คือ Equivalence Ratio) ไม่ว่าจะใช้น้ำมัน D317 หรือ D357 ก็ตามยังไม่สามารถจัดปัญหาควันดำที่ออกมากับไอเสียได้ทั้งหมด トラบดีที่เครื่องยนต์ยังทำงานที่สภาวะเกินพิกัด [7]

Industrial Center. The Hong Kong Polytechnic University (2002) ได้ศึกษาวิธีการในการออกแบบเครื่องดักกรองมลพิษอนุภาค สำหรับลดการแพร่กระจายของมลพิษอนุภาค จากก๊าซไอเสียของยานพาหนะที่ใช้เครื่องยนต์ดีเซลเป็นต้นกำลัง เช่น ในรถแท็กซี่ รถประจำทางมินิบัส และรถแวน โดยการพิจารณาการดักกรองจากไส้กรองที่สร้างขึ้น และความดันตกคร่อมที่ส่งผลต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์ ซึ่งจากการทดลองพบว่าเทคนิคดังกล่าวสามารถดักกรองมลพิษอนุภาคจากก๊าซไอเสียของเครื่องยนต์ได้ทั้งหมด 30 เปอร์เซ็นต์ [11]

ยุทธนา ส่องแสงจันทร์และ ทรงธรรม เหล่าสุวรรณ ได้ศึกษาเรื่องโครงสร้างระดับนาโนเมตรของมลพิษอนุภาค โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนนทรานสมิชัน (Transmission Electron Microscope, TEM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (Scanning Electron Microscope, SEM) และทำการวัดขนาดเฉลี่ย ทั้งอนุภาคเดี่ยวและอนุภาคกลุ่มของมลพิษอนุภาคที่ได้จากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ไบโอดีเซลและดีเซล รวมไปถึงมลพิษอนุภาคที่ได้จากการเผาไหม้ของตะเกียงที่ใช้น้ำมันดีเซลและไบโอดีเซล [21]

Gulijk และคณะ (2001) ได้ศึกษาถึงการเลือกการพัฒนาตัวอุปกรณ์สำหรับดักกรองมลพิษอนุภาคเครื่องยนต์ดีเซล โดยพิจารณาถึงพลังงานและความดันตกต่าง ที่ตัวเครื่องดักกรองซึ่งในเครื่องดักกรองแบบนี้จะแบ่งการไหลของก๊าซออกมามากกว่า 2 ส่วน ที่ทำให้เกิดความดันตกต่างของก๊าซไอเสีย และใช้ CFD คำนวณหาขนาดแผ่นตะแกรงที่จะรองรับเขม่า พบว่าการดักกรองมลพิษอนุภาคและความดันตกคร่อม ตลอดการดักกรองซึ่งอยู่ในค่าที่สามารถยอมรับได้ [10]

Mayer และคณะ (1993) ได้ศึกษาวิธีการออกแบบเครื่องดักกรองมลพิษอนุภาคแบบตาข่าย โดยใช้เส้นใยเซรามิกเป็นโครงกัตาข่าย มีความยืดหยุ่นในระดับปานกลาง และมีลักษณะของผิวหน้า

เป็นแบบพิเศษ มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยฉับพลัน โดยปัจจัยที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ ความยืดหยุ่นของเส้นใยไฟเบอร์ ความพรุนของผิวหน้า ความแตกต่างของความดัน ความแตกต่างของอุณหภูมิ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย ความยาวของเครื่องดักกรอง พบว่าการจัดวางของเส้นใยที่เป็นรูปขดกันหอย และความแตกต่างความดันมีความเหมาะสมที่ใช้เป็นเครื่องดักกรองมลพิษอนุภาคจากไอเสียเครื่องยนต์ดีเซล [17]

Mayer และ Buck (1992) ได้ทำการศึกษาถึงแนวความคิดใหม่ เกี่ยวกับเส้นใยเซรามิกไฟเบอร์สำหรับดักกรองมลพิษอนุภาคจากเครื่องยนต์ดีเซล เนื่องจากมลพิษอนุภาคของไอเสียเครื่องยนต์ดีเซลจะเป็นสารที่ก่อให้เกิดมะเร็ง ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องออกกฎหมายควบคุม ให้อยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ ซึ่งวัสดุที่นำมาทำเป็นไส้กรองประกอบด้วยวัสดุ 2 ชนิด คือเซรามิกไฟเบอร์จาก Mullite Polycrystal และ เซรามิกไฟเบอร์จาก  $\text{SiO}_2$  ในการผลิตไส้กรองด้วยการนำแผ่นเซรามิกไฟเบอร์ไปพันรอบแท่งทรงกระบอก แล้วให้ก๊าซไอเสียวิ่งผ่านเข้าไปในแท่งทรงกระบอกและผ่านไฟเบอร์ และเส้นใยดังกล่าวจะเป็นตัวดักกรองอนุภาคเอาไว้ และปล่อยให้ก๊าซไหลผ่านไส้กรองไปได้ซึ่งจากการทดสอบสามารถดักกรองอนุภาคได้ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ [16]

B.R. Stanmore, J.F. Brilhac, P.Gilot (2001) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับกลไกของการออกซิเดชันของเขม่าและการหาพลังงานก่อกัมมันต์จากสมการ Arrhenius plot ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีของการออกซิไดซ์คาร์บอนเปลี่ยนจากสารตั้งต้นเป็นสารผลิตภัณฑ์ได้แก่ ไอ้คาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งการออกซิไดซ์ของเขม่าคาร์บอนเกิดจากออกซิเจนจะเข้าไปสัมผัสพื้นผิวทรงกลมของเขม่าเกิดการเปลี่ยนจากคาร์บอนของแข็งกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่ชั้นบรรยากาศ [9]

P. Karin and K.Hanamura ได้ทำการศึกษาเรื่องการดักและเผาไหม้เขม่าบนตัวกรองเขม่าดีเซลซึ่งได้ทำการเตรียมตัวกรองเขม่าดีเซลให้มีขนาดกว้าง 5 mm ยาว 5 mm และหนา 7 mm มีแผ่นแก้ววางบนตัวกรองเขม่าดีเซลเพื่อใช้ในการศึกษาการมองพฤติกรรมการดักเขม่าและเผาไหม้เขม่าบนตัวกรองเขม่าดีเซลจากเชื้อเพลิงดีเซลที่ใช้เป็นแบบทั่วไปอ้างอิงตามมาตรฐานเชื้อเพลิง (JIS K2204 No.2) ในงานวิจัยนี้ใช้ตะเกียงเป็นแหล่งกำเนิดเขม่า ส่วนเหตุผลที่ใช้ตะเกียงเป็นแหล่งกำเนิดเขม่าเพราะต้องการตัดพารามิเตอร์ เช่นไอ้คาร์บอนและไฮโดรคาร์บอนเพราะตัวไหม้เขม่าที่อุณหภูมิคงที่ได้แก่ 525, 550, 575, 600, 625 และ 650 °C ตามลำดับ ในระหว่างที่เผาไหม้เขม่าได้ทำการวัดก๊าซ CO และ CO<sub>2</sub> ที่ถูกปลดปล่อยออกมาในการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้เขม่าโดยใช้เครื่องวัดก๊าซในการทดลอง (Gas Analyzer) บนตัวกรองเขม่าดีเซลซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้เปรียบเทียบ 2 ชนิดคือ ตัวกรองเขม่าดีเซลแบบทั่วไปมีรูพรุนประมาณ 11  $\mu\text{m}$  และตัวกรองเขม่าดีเซลแบบมีชั้น Membrane (Diesel Particulate Membrane Filter : DPMF) มีรูพรุน 0.5  $\mu\text{m}$  ในส่วนของการวิเคราะห์เขม่าทางกายภาพได้แก่ ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) เพื่อศึกษาอนุภาคแบบเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนจากการทดลองพบว่าขนาดโดยเฉลี่ยของเขม่าแบบเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนประมาณ 100 ถึง 300 nm และใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน

(Transmission Electron Microscope : TEM) เพื่อศึกษาหาอนุภาคแบบเดี่ยวซึ่งได้ขนาดของอนุภาคแบบเดี่ยวประมาณ 20 ถึง 60 nm และได้วิเคราะห์หาขนาดเฉลี่ยของผนังคาร์บอนยาวประมาณ 3-5 nm หนาประมาณ 1 nm และทำการเผาไหม้เขม่าโดยนำไปทดสอบด้วยเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์โดยวิธีชั่งน้ำหนักเชิงความร้อน (Thermo-gravimetric Analysis: TGA) ด้วยวิธีอุณหภูมิคงที่และอุณหภูมิไม่คงที่ เพื่อคำนวณหาพลังงานกระตุ้นในการสลายเขม่า ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้พลังงานกระตุ้นเพื่อสลายเขม่าบนตัวกรองเขม่าดีเซลแบบทั่วไป  $130 \pm 40$  kJ/mol และสำหรับตัวกรองเขม่าแบบมีชั้น Membrane ประมาณ  $84 \pm 13$  kJ/mol ซึ่งตัวกรองเขม่าแบบมีชั้น Membrane ใช้พลังงานกระตุ้นสลายเขม่าลดลง 36% แปรเหล่านี้ซับซ้อนและยุ่งยากแก่การวิเคราะห์และจำลองตะเกียงให้เป็นเครื่องยนต์สมัยใหม่ ความเร็วที่ใช้ในการควบคุมในการไหลเข้าผ่านตัวกรองเขม่าดีเซลซึ่งกำหนดคงที่ประมาณ 12 cm/s อุณหภูมิใช้ในการดักเขม่ากำหนดอุณหภูมิคงที่ 200 °C และในการเผาไหม้เขม่าโดยให้อุณหภูมิการเผาไหม้เริ่มจาก 200 °C จนถึง 600 °C ซึ่งกำหนดเงื่อนไขคล้ายกับสภาวะใช้งานจริง อุณหภูมิกำหวัณประกอบด้วยไนโตรเจน 93% และออกซิเจน 7% ใช้ฮีทเตอร์ขดลวดเป็นตัวให้อุณหภูมิความร้อนแก่อากาศ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา [18]

## บทที่ 2

# ทฤษฎีพื้นฐานในงานวิจัย

### 2.1 มลพิษไอเสียเครื่องยนต์ดีเซล

ไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลที่ปล่อยออกสู่บรรยากาศสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทดังนี้ ประเภทที่หนึ่งส่วนที่เป็นก๊าซ คือ ไฮโดรคาร์บอน (HC) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) ประเภทที่สองส่วนที่เป็นอนุภาค คือ ฝุ่นละอองทั้งของเหลวและของแข็งและของแข็ง เช่น มลพิษอนุภาค(PM)มลพิษแต่ละชนิดสามารถอธิบายรายละเอียดดังนี้ [23]

#### 2.1.1 ไฮโดรคาร์บอน (HC)

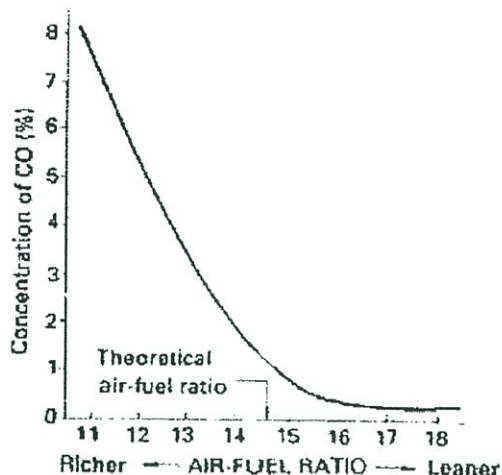
ไฮโดรคาร์บอนเป็นดัชนีบ่งชี้กลไกและประสิทธิภาพของการเผาไหม้โดยที่ปริมาณไฮโดรคาร์บอนนั้นเป็นผลอันเนื่องมาจากเกิดจากเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ซึ่งประกอบไปด้วยเชื้อเพลิงที่ไม่ถูกเผาไหม้หรือถูกเผาไหม้เพียงบางส่วนโดยส่วนโดยมากจะอยู่ในสภาวะก๊าซของไอเสีย เครื่องยนต์ดีเซลจะมีอัตราอากาศที่มากกว่าอยู่แล้วประมาณ 1-20 เปอร์เซ็นต์ แต่ปริมาณไฮโดรคาร์บอนจะเพิ่มขึ้นจากสาเหตุอื่นๆได้อีก คือ

1. อัตราส่วนอากาศ-เชื้อเพลิงที่เข้มจะขาดออกซิเจนทำปฏิกิริยากับคาร์บอนจึงทำให้ปริมาณไฮโดรคาร์บอนในไอเสียสูง
2. อัตราส่วนอากาศ-เชื้อเพลิงที่เจือจางเกินไปและการสันดาปไม่ทั่วถึง ทำให้ปริมาณไฮโดรคาร์บอนในไอเสียสูง
3. อายุการใช้งานของเครื่องยนต์ที่เพิ่มขึ้น ช่องว่างระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบจะเพิ่มขึ้นจากความสึกหรอปริมาณไฮโดรคาร์บอนจึงเพิ่มขึ้น

#### 2.1.2 ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)

คาร์บอนมอนอกไซด์เป็นก๊าซที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่ทำให้เกิดการผุกร่อนแต่มีอันตรายมาก คาร์บอนมอนอกไซด์เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์โดยส่วนมากพบในสภาวะการเผาไหม้ส่วนผสมเข้มข้น ซึ่งมีออกซิเจนไม่เพียงพอในการทำปฏิกิริยากับคาร์บอนให้ได้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ เกิดขึ้นเพราะสาเหตุต่างๆดังนี้

1. ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในไอเสียมีค่าสูงสุดเมื่ออัตราส่วนของเครื่องยนต์มีความเข้มข้นมาก
2. การผสมคลุกเคล้าไม่ทั่วกันของอัตรา รวมทั้งการสันดาปที่ไม่สมบูรณ์ ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในเครื่องยนต์ได้

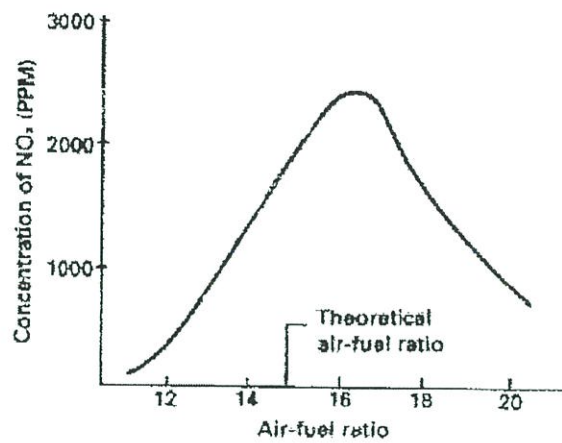


รูปที่ 2.1 การเกิดก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ต่ออัตราส่วนอากาศและเชื้อเพลิง

### 2.1.3 ออกไซด์ของไนโตรเจน ( $\text{NO}_x$ )

ออกไซด์ของไนโตรเจนเกิดจาก การทำปฏิกิริยากับไนโตรเจนในอากาศเป็นส่วนใหญ่ มีบางส่วนปนอยู่ในเชื้อเพลิงซึ่งอยู่ในรูปของ แอมโมเนีย( $\text{NH}_3$ ) และไฮโดรเจนไซยาไนด์( $\text{HCN}$ ) แต่ก็มีปริมาณที่น้อยมาก ออกไซด์ของไนโตรเจน เกิดขึ้นได้จากการทำปฏิกิริยาหลายแบบในระหว่างกระบวนการสันดาป หรือเมื่อสิ้นสุดการสันดาปทันที ปัจจัยที่สำคัญที่ทำให้เกิดไนโตรเจนออกไซด์ ก็คือ อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ และอัตราส่วนผสมของอากาศกับน้ำมันเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลดังนี้

1. เมื่ออุณหภูมิห้องเผาไหม้สูง ไนโตรเจนอะตอมคู่จะแตกตัวเป็นไนโตรเจนอะตอมเดี่ยว และก่อให้เกิดออกไซด์ของไนโตรเจนมากขึ้น
2. ปริมาณสูงสุดของ จะเกิดขึ้นเมื่ออัตราส่วนอากาศกับน้ำมันเชื้อเพลิง  $\phi = 0.95$  เพราะที่สภาวะนี้ อุณหภูมิยังคงสูงมาก และมีปริมาณออกซิเจนส่วนเกินเพียงพอในการทำปฏิกิริยากับไนโตรเจนกลายเป็นไนโตรเจนออกไซด์

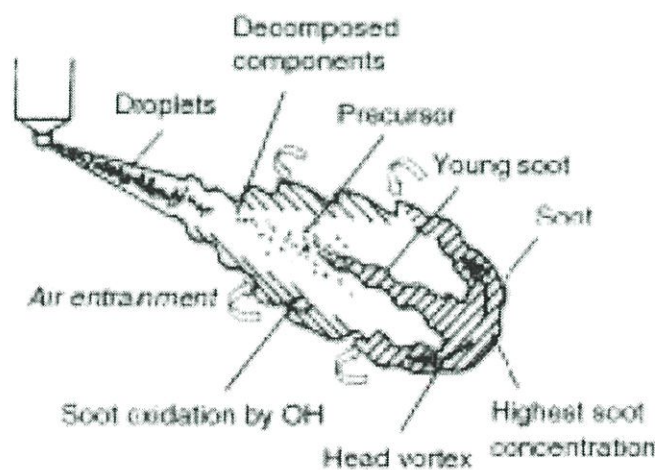


รูปที่ 2.2 การเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนต่ออัตราส่วนอากาศและเชื้อเพลิง

#### 2.1.4 อนุภาคของแข็ง (Particulates)

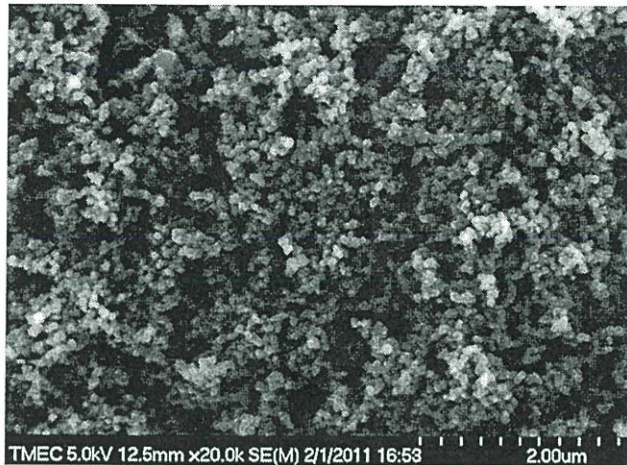
ไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลจะมีมลพิษอนุภาคปนอยู่ด้วยซึ่งเกิดขึ้นที่บริเวณที่ไอดีมีความเข้มข้นสูงภายในกระบอกสูบขณะเกิดการสันดาป ซึ่งสามารถมองเห็นในรูปควันดำจากท่อไอเสีย พร้อมกับส่งกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ต่อสิ่งแวดล้อมด้วย มลพิษอนุภาคในไอเสียนี้จะมีความเข้มข้นสูงสุดเมื่อเครื่องยนต์มีโหลดสูงสุด ที่สภาวะนี้เชื้อเพลิงจะถูกฉีดด้วยอัตราสูงเพื่อให้เครื่องยนต์ให้กำลังสูงสุด ไอดีจึงมีความเข้มข้นมากและความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงสูง ซึ่งจะสังเกตได้จากควันดำที่ออกมาจากปลายท่อไอเสียของรถบรรทุกหรือหัวรถจักร ซึ่งกำลังเร่งขึ้นทางชัน หรือขณะออกรถ

มลพิษอนุภาคจะเกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ บริเวณแกนสเปรย์เชื้อเพลิงที่ถูกฉีดเข้าไปในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ (Spray core) ซึ่งเป็นส่วนที่มีการคลุกเคล้าน้ำมันและอากาศที่หนา [1]



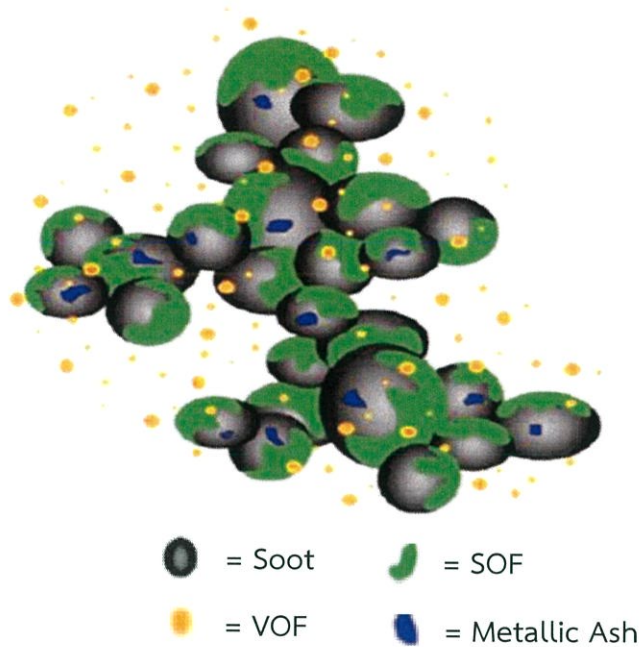
รูปที่ 2.3 การเกิดมลพิษอนุภาคในแกนสเปรย์

เขม่าชั้นเล็กๆเป็นการรวมตัวเกาะกันอะตอมของคาร์บอนเม็ดกลมในสถานะของแข็งจำนวนมาก โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 10 nm ถึง 80 nm โดยส่วนใหญ่มีขนาด 15-30 nm แสดงในรูป



รูปที่ 2.4 การรวมตัวเกาะกันเป็นก้อนของมลพิษอนุภาค

มลพิษอนุภาคจากเครื่องยนต์ดีเซลมีโครงสร้างทางกายภาพและเคมีที่ซับซ้อนมาก ประกอบด้วยสองส่วน คือ ส่วนแรกเป็นของแข็ง (Solid Organic Fraction หรือ SOL) มีส่วนประกอบหลักคือคาร์บอน (C) และซีเถ้าของ โลหะ (Metallic Ash) และส่วนที่สองเป็นของเหลว (Soluble Organic Fraction หรือ SOF) มีส่วนประกอบหลัก คือไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) จากเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์โดยปกติแล้ว มลพิษอนุภาคเดี่ยว (Primary Particle) จะมีขนาด 10 – 60 นาโนเมตร ในขณะที่อนุภาคกลุ่ม (Accumulate Particle) มีขนาด 100 – 300 นาโนเมตร ในบางกลุ่มของอนุภาคจะประกอบด้วยอนุภาคเดี่ยวและวัตถุปนเปื้อน เช่น แคลเซียม ซึ่งมีอยู่ใน น้ำมันเครื่อง รวมถึงสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เป็นของเหลวด้วย [2-6]



รูปที่ 2.5 องค์ประกอบของกลุ่มก้อนมลพิษ

## 2.2 ตัวกรองเขม่าดีเซลในไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซล (Diesel Particulate Filter : DPF)

เขม่าที่ออกมาจากไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลสามารถควบคุมได้โดยใช้ตัวกรองเขม่าดีเซล ซึ่งจะต้องมีลักษณะพิเศษคือต้องทนอุณหภูมิสูงของไอเสียได้และสามารถทำความสะอาดตัวเองได้ ตามปกติจะกระทำโดยการออกซิไดซ์เขม่าที่สะสมอยู่ในตัวกรองเขม่าดีเซล ซึ่งเรียกว่าระบบฟื้นฟูสภาพ ตัวกรองเขม่าดีเซล (Regeneration Process) [14]

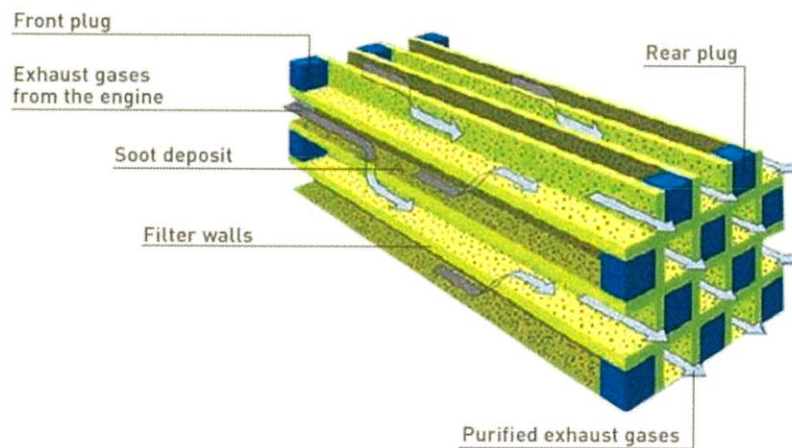
### 2.2.1 ความยุ่งยากหลายตัวกรองเขม่าดีเซล

1. ตัวกรองเขม่าดีเซลแม้จะสะอาดแต่ก็ไปเพิ่มความดันในระบบไอเสีย
2. ความดันนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อตัวกรองเขม่าดีเซลดักเก็บเขม่าไว้มากขึ้น
3. ภายใต้อัตราการทำงานปกติของเครื่องยนต์ดีเซล เขม่าที่เก็บสะสมไว้จะไม่สามารถ จุดระเบิด และออกซิไดซ์ได้เองเนื่องจากอุณหภูมิของไอเสียไม่เพียงพอทำให้เขม่าเกิดการออกซิเดชันได้
4. เมื่อเกิดการออกซิไดซ์ของเขม่า กระบวนการเผาไหม้จะต้องถูกควบคุมอย่างใกล้ชิด เพื่อป้องกันไม่ให้อุณหภูมิสูงเกินไป และไม่ทำให้ตัวกรองเขม่าดีเซลเกิดความเสียหายได้ [14]

ตัวกรองเขม่าดีเซลมีหลายชนิด เช่นชนิดรังผึ้งเซรามิก (Ceramic Monoliths) ชนิดตะแกรง ลวดเคลือบอะลูมินา (Alumina-coated Mesh) ชนิดโฟมเซรามิก (Ceramic Foam) และแผ่นใย เซรามิก (Ceramic Fiber Mat) เป็นต้น ซึ่งแต่ละชนิดจะมีการสูญเสียความดันและประสิทธิภาพการ กรองแตกต่างกันในแต่ละชนิด

## 2.2.2 ตัวกรองเขม่าดีเซลไหลผ่านทุกส่วนชนิดรังผึ้ง (Ceramic Monoliths or Full Flow Diesel Particulate Filter : DPF)

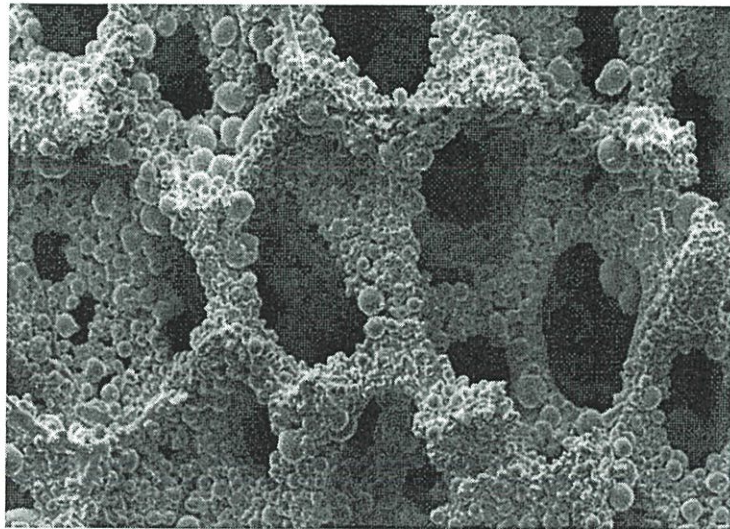
ด้านหนึ่งของช่อง (Cell) ถูกปิดไว้ที่ปลายทางเข้าและอีกด้านหนึ่งของช่องถูกปิดไว้ที่ปลายทางออกสลับกัน ทำให้ไอเสียที่มีเขม่าถูกบังคับให้ไหลผ่านผนังของช่องที่เป็นเซรามิกซึ่งมีรูพรุน ด้าน นอกของรังผึ้งถูกหุ้มไว้ด้วยฉนวนและตัวกรองเขม่าดีเซลถูกติดตั้งไว้ใกล้กับเครื่องยนต์เพื่อรักษา อุณหภูมิของตัวกรองเขม่าดีเซลให้สูงไว้เท่าที่จะเป็นไปได้ เมื่อตัวกรองเขม่าดีเซลมีเขม่าสะสมไว้มาก ขึ้น ความดันตกคร่อมก็จะเพิ่มเข้ามาทำให้ต้องมีการฉีดเชื้อเพลิงเข้ามากขึ้น เพื่อชดเชยกำลังที่สูญเสีย ไป ส่งผลให้อุณหภูมิของไอเสียสูงขึ้น ซึ่งผลสุดท้ายก็จะทำให้เกิดการจุดระเบิดของเขม่าโดยใช้ตัวเร่ง ปฏิกิริยา อัตราการออกซีไดซ์เขม่านี้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของตัวกรองเขม่าดีเซล ซึ่งตัวกรองเขม่า ดีเซลชนิดนี้จะลดเขม่าที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลได้ถึงร้อยละ 70 หรือมากกว่า ดูลักษณะการทำงาน ได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงการติดตั้งตัวกรองเขม่าดีเซลชนิดไหลผ่านทุกส่วนชนิดรังผึ้ง

### 2.2.3 ตัวกรองเขม่าดีเซลไหลผ่านทุกส่วนชนิดโฟมเซรามิก (Ceramic Foam)

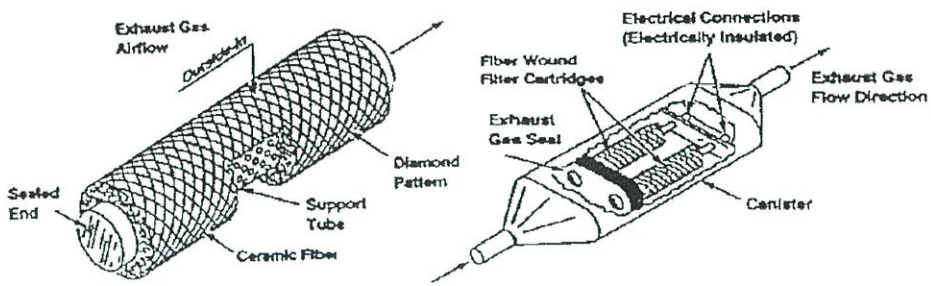
ตัวกรองเขม่าดีเซลชนิดนี้ ขนาดของเม็ดโฟมจะต้องมีขนาดเล็กเพียงพอที่จะดักกรองเขม่าของ ไอเสีย เมื่อนำเม็ดโฟมเซรามิกบรรจุลงในตัวกรองเขม่าดีเซลจะต้องมีช่องหรือรูพรุนเพื่อให้เขม่าไหล ผ่านช่องระหว่างเม็ดโฟมเซรามิกและในขณะเดียวกันก็จะทำให้เม็ดโฟมเซรามิกจับหรือสะสมเขม่าไว้ รอบๆเม็ดโฟม ส่วนไอเสียที่ผ่านการดักกรองไหลต่อไปตามท่อไอเสียและออกสู่บรรยากาศต่อไป ทั้งนี้ สำหรับการติดตั้งตัวกรองเขม่าดีเซลจะต้องอยู่ใกล้กับเครื่องยนต์เพื่อรักษาอุณหภูมิให้สูงในระดับหนึ่ง ที่จะเป็นไปได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ลักษณะของตัวกรองเขม่าดีเซลไหลผ่านทุกส่วนชนิดโฟมเซรามิก

### 2.2.4 ตัวกรองเขม่าดีเซลไหลผ่านบางส่วนชนิดแผ่นใยเซรามิกหรือไฟเบอร์ (Ceramic Fiber Mat or Partial Flow Diesel Particulate Filter)

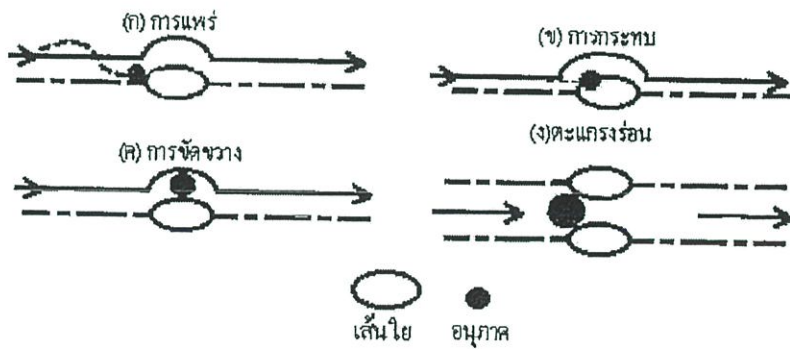
ตัวกรองเขม่าดีเซลชนิดนี้ จะนำแผ่นใยเซรามิกหรือไฟเบอร์มาวางซ้อนกันเป็นชั้นๆ ซึ่งจะทำให้ไอเสียที่ไหลผ่านตัวกรองเขม่าดีเซลชนิดนี้ จะนำแผ่นใยเซรามิกหรือไฟเบอร์มาวางซ้อนกันเป็นชั้นๆ ซึ่งจะทำให้ไอเสียที่ไหลผ่านตัวกรองเขม่าดีเซล จะถูกดักกรองเขม่าตามขนาดของรูพรุนหรือช่องของ ตัวกรองเขม่าดีเซลจากไอเสียที่ผ่านเข้าตัวกรองเขม่าดีเซล ก็จะมีไหลตามท่อและออกสู่บรรยากาศต่อไป ลักษณะของตัวดักกรองชนิดนี้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ลักษณะของตัวดักกรองเขม่าดีเซลชนิดแผ่นใยเซรามิก

### 2.3 หลักการพื้นฐานการดักกรองเขม่า

กลไกการเคลื่อนตัวของเขม่า กลไกการเคลื่อนที่ของเขม่าจะถูกจับหรือเกาะติดกับวัสดุพอร์นของตัวกรองเขม่าดีเซลโดยกลไกที่สำคัญ 4 กลไก คือ การกระทบ การแพร่ การขัดขวาง และตะแกรงร้อน ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 กลไกการเคลื่อนตัวของเขม่า

2.3.1 การแพร่ (Diffusion) การแพร่ของเขม่าเป็นแบบ บราวเนียน (Brownian Movement) ซึ่งเกิดจากการชนกันระหว่างเขม่าทำให้เขม่าเคลื่อนที่แบบมีทิศทางไม่แน่นอน จนไปชน กับผนังวัสดุพอร์นของตัวกรองเขม่าดีเซล การแพร่แบบบราวเนียน (Brownian Movement) นี้จะมี อัตราการเพิ่มขึ้นเมื่อเขม่ามีขนาดเล็กลง ดังนั้นกลไกการแพร่จะช่วยดักกรองเขม่าขนาดเล็ก แสดงดัง ในรูปที่ 2.9 (ก)

2.3.2 การกระทบ (Impaction) เกิดเมื่อเขม่าไม่สามารถหักหลบสิ่งกีดขวางได้ทัน เนื่องจากแรงเฉื่อย ทำให้เขม่าเองหลุดออกจากเส้นกระแสอากาศ จึงชนและฝังติดกับสิ่งกีดขวางนั้น เพราะแรงกระทำของเขม่า กลไกส่วนใหญ่เกิดกับเขม่าที่มีขนาดใหญ่และมีความเร็วสูง แสดงดังใน รูปที่ 2.9 (ข)

2.3.3 การขัดขวาง (Interception) การไหลของอากาศเมื่อผ่านผนังความพรุนของตัวกรอง เมมาดีเซล เส้นกระแสการไหลของอากาศจะไหลโค้งรอบวัสดุพรุน อนุภาคที่ปะปนมากับอากาศ อาจไหลตามเส้นกระแสผ่านไปหรืออาจหลุดออกจากเส้นกระแสติดกับวัสดุพรุนก็ได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับ ระยะห่างระหว่างเส้นกระแสกับวัสดุพรุน ถ้าระยะนี้มีค่าเท่ากับรัศมีของเมมา ซึ่งเมมาจะติดกับวัสดุพรุนเพราะแรงวานเดอร์วาลส์ (Van Der Waals Forces) แรงวานเดอร์วาลส์เป็นแรงดึงดูดระหว่าง โมเลกุลและจะมีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างโมเลกุลน้อยลง ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ค)

2.3.4 ตะแกรงร่อน (Sieve) เกิดเมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่กว่ารูวัสดุพรุนของตัวกรองเมมา ดีเซล ซึ่งทำให้ไม่สามารถผ่านไปได้ ความเร็วของอนุภาคนี้ยคำนวณได้จากระยะทางที่อนุภาคเจาะทะลุ เข้ามาในรูวัสดุพรุนของตัวกรองเมมาดีเซลจนถึงจุดหยุดนิ่ง และเนื่องจากเมมาส่วนใหญ่มีรูปร่างที่ไม่ ราบเรียบ จึงเกิดการขัดกันตรงขอบวัสดุพรุน ทำให้รูของวัสดุพรุนมีขนาดเล็กลง ซึ่งทำให้สามารถจับ เมมาที่เล็กลงไปได้อีก ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ง)

## 2.4 ความดันตกคร่อม (Pressure Drop)

การคำนวณหาความดันตกคร่อมของเครื่องดักกรองอนุภาคนั้นเป็นส่วนสำคัญอีกส่วนหนึ่งในการทดลองเนื่องจากความดันตกคร่อมมีผลต่อการศึกษาการใช้เครื่องดักกรองอนุภาคในเชื้อเพลิง ดีเซลและไบโอดีเซล โดยการคำนวณหาค่าความดันตกคร่อมนั้นจะใช้สมการเบอร์นูลลีในการคำนวณดัง สมการ

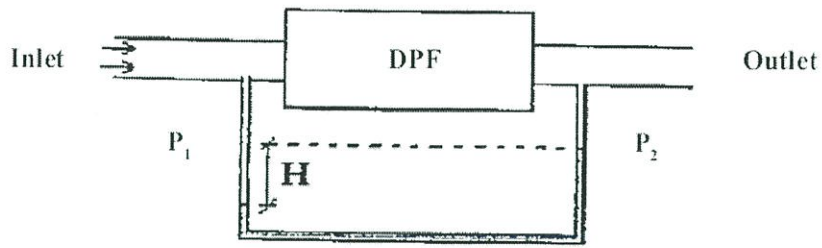
$$\frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + Z = H \quad (2.1)$$

เมื่อ  $\frac{P}{\rho g}$  คือ เฮดเนื่องจากความดัน (Pressure Head)

$\frac{V^2}{2g}$  คือ เฮดเนื่องจากความเร็ว (Velocity Head)

$Z$  คือ เฮดเนื่องจากความสูง (Elevation Head)

$H$  คือ เฮดรวมสำหรับการไหล (Total Head)



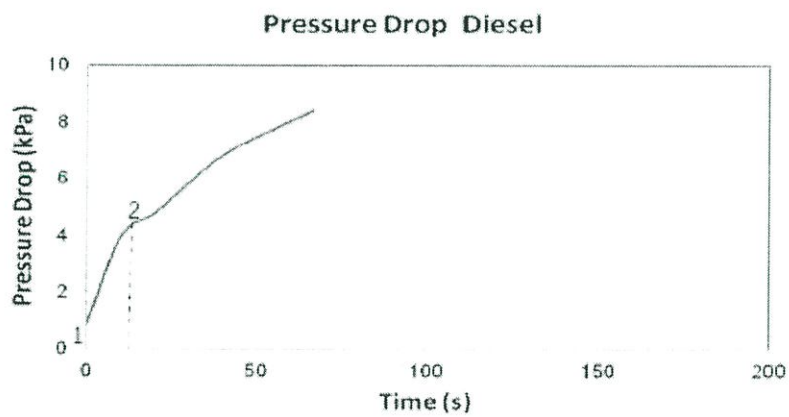
รูปที่ 2.10 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อวัดความดันตกคร่อม

$$\frac{P_1 - P_2}{\rho g} = H \quad (2.2)$$

$$\frac{\Delta P}{\rho g} = H \quad (2.3)$$

$$\Delta P = \rho g H \quad (2.4)$$

ในการเกิดความดันตกคร่อมในเครื่องดักกรองอนุภาคความดันตกคร่อมกับการสะสมอนุภาคเขม่าเทียบกับเวลาจะมีลักษณะดังรูป 2.11



รูปที่ 2.11 กราฟความดันตกคร่อม



รูปที่ 2.12 แบบจำลองแนวความคิดของความดันตกคร่อมในระหว่างการตกอนุภาค

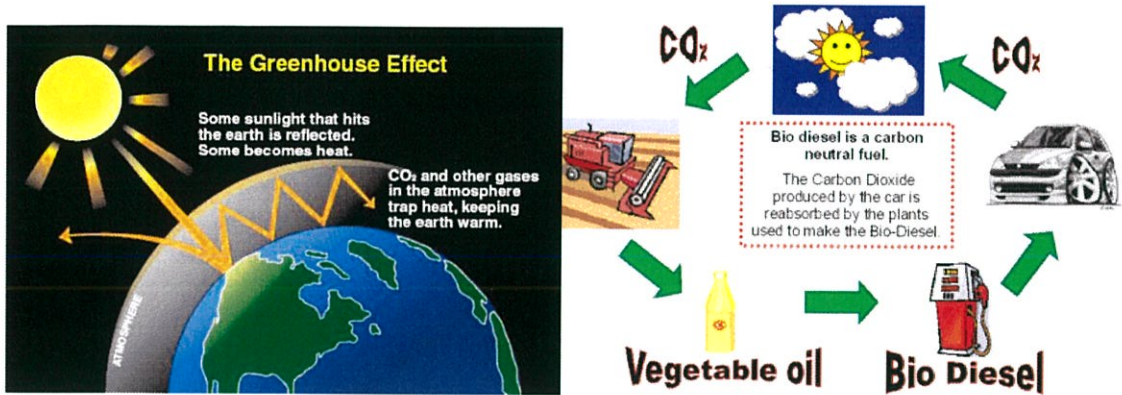
## 2.5 เชื้อเพลิงไบโอดีเซล

ไบโอดีเซล (Biodiesel) [4] คือ เชื้อเพลิงที่ได้จากน้ำมันพืชและสัตว์ที่ผ่านกระบวนการทาง เคมี เกิดเป็นสารที่เรียกว่า เมทิลเอสเทอร์ หรือเอทิลเอสเทอร์ ซึ่งมีสมบัติใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงดีเซลที่ กลั่นจากปิโตรเลียม สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลได้ดี โดยไม่ต้องทำการดัดแปลง เครื่องยนต์ ซึ่งไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์ซึ่งจะต้องผ่านกระบวนการแปรรูปด้วยกระบวนการทางเคมีที่ เรียกว่า ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Trans esterification) นั่นคือ การนำเอาน้ำมันพืชหรือสัตว์ที่มีกรด ไขมันไปทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์โดยใช้กรดหรือด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ได้เอสเทอร์ โดยจะ เรียกชนิดของไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์ตามชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ไบโอดีเซลชนิด เอสเทอร์นี้มีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงเชื้อเพลิงดีเซลมากที่สุด ซึ่งข้อดีของไบโอดีเซลมีดังต่อไปนี้

1. สามารถลดการนำเข้าเชื้อเพลิงฟอสซิลเพราะเป็นเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากพืชใน ประเทศซึ่งเป็นการสร้างความมั่นคงทางพลังงาน ความมั่นคงของภาคเกษตรกรรม เพิ่มการสร้างงาน และรายได้ในภาคส่วนที่เกี่ยวข้อง โดยเฉพาะเกษตรกรภายในประเทศได้

2. สามารถลดมลพิษจากการเผาไหม้ เช่น สารประกอบไฮโดรคาร์บอน เหม่า และคาร์บอนมอนอกไซด์ เพราะมีส่วนประกอบของออกซิเจนในโมเลกุลของเชื้อเพลิง ทำให้มีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมและสุขภาพน้อยลงเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซล

3. สามารถลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์(CO<sub>2</sub>) ที่มีผลโดยตรงต่อสภาวะโลกร้อน (Global Warming) เนื่องจากการใช้คาร์บอนที่มีอยู่และหมุนเวียนแบบครบกระบวนการ(Carbon Neutral)



รูปที่ 2.13 หลักการทำงานของกระบวนการคาร์บอนนิวตรอนของไบโอดีเซล

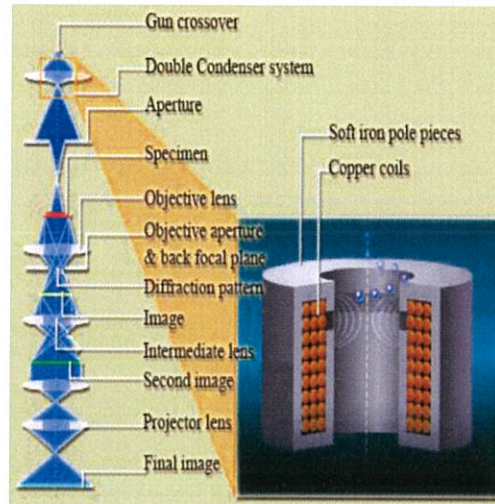
## 2.6 ทฤษฎีหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

### 2.6.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope: TEM)

เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้ศึกษาตัวอย่างชนิดบาง ซึ่งเตรียมขึ้นโดยวิธีพิเศษเพื่อให้ลำอนุภาคอิเล็กตรอนผ่านทะลุได้ การสร้างภาพจากกล้องประเภทนี้จะทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่างนั่นเอง เครื่อง TEM เหมาะสำหรับศึกษารายละเอียดขององค์ประกอบภายในของตัวอย่าง เช่น องค์ประกอบภายในเซลล์ ลักษณะของเยื่อหุ้มเซลล์ ผนังเซลล์ เป็นต้น ซึ่งจะให้รายละเอียดสูงกว่ากล้องจุลทรรศน์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากมีกำลังขยายและประสิทธิภาพในการแจจแจงรายละเอียดสูงมาก (กำลังขยายสูงสุดประมาณ 0.1 นาโนเมตร)



รูปที่ 2.14 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope: TEM)



รูปที่ 2.15 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope: TEM)

โดยหลักการทำงานของเครื่อง TEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างที่จะศึกษา (specimen) ไป ซึ่งตัวอย่างที่จะศึกษาจะต้องมีลักษณะที่แบนและบางมาก (บ่อยครั้งที่พบว่าอยู่ในช่วงระหว่าง 1 - 100 นาโนเมตร) จากนั้นจะเกิดการกระเจิงอนุภาคขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนทะลุผ่านตัวอย่างไป และอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่างนี้ก็จะถูกปรับโฟกัสของภาพโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่ขยายภาพให้ได้รายละเอียดมากที่สุด จากนั้นจะได้รับการขยายด้วยเลนส์ทอดภาพไปสู่จอร์บ (projector lens) และปรับโฟกัสของลำอนุภาคอิเล็กตรอนให้ยาวพอดีที่จะปรากฏบนฉากเรืองแสง สุดท้ายจะเกิดการสร้างภาพขึ้นมาได้

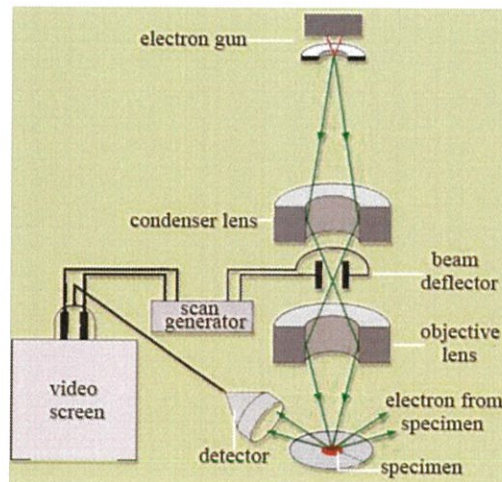
## 2.6.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายไม่สูงเท่ากับเครื่อง TEM (เครื่อง SEM มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร) การเตรียมตัวอย่างเพื่อที่จะดูด้วยเครื่อง SEM นี้ไม่จำเป็นต้องที่ตัวอย่างจะต้องมีขนาดบางเท่ากับเมื่อดูด้วยเครื่อง TEM ก็ได้ (เพราะไม่ได้ตรวจวัดจากการที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ทะลุผ่านตัวอย่าง) การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของ ตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ดังนั้นเครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาพื้นฐานและ

รายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น



รูปที่ 2.16 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)



รูปที่ 2.17 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด

หลักการทำงานของเครื่อง SEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ

(secondary electron) ขึ้นซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และ ถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไปและสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้เลย

## 2.7 เครื่องมือวิเคราะห์โดยวิธีชั่งน้ำหนักเชิงความร้อน (Thermo-gravimetric analysis: TGA)

เทอร์โมกราวิเมทรี (Thermogravimetry) เป็นเทคนิคที่ใช้ตรวจสอบมวลของสารตัวอย่างเทียบกับเวลา หรืออุณหภูมิ โดยการตั้งโปรแกรมอุณหภูมิให้แก่สารตัวอย่างนั้นในบรรยากาศเฉพาะตัว ส่วนใหญ่เรียกว่า การวิเคราะห์โดยวิธีชั่งน้ำหนักเชิงความร้อน (Thermo-gravimetric analysis: TGA) ใช้อุปกรณ์ที่สำคัญคือเครื่องชั่งสารเชิงความร้อน หรือเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์โดยวิธีชั่งน้ำหนักเชิงความร้อน ถ้าต้องการระบุขั้นตอนของเส้นเคิร์ฟ TG ก็ใช้วิธีลากเส้นแบบอนุพันธ์ซึ่งเป็นเทคนิคที่ช่วยเพิ่มความถูกต้องแม่นยำในการตรวจวัดและให้ข้อมูลการวิเคราะห์ในแง่จลพลศาสตร์ ณ อุณหภูมิต่างๆ ได้เป็นอย่างดี เทคนิคนี้มักเรียกว่า “เดริเวทีฟ เทอร์โมกราวิเมทริก อะนาไลซิส” (Derivative thermo-gravimetric analysis: DTG) ซึ่งหมายถึง การพล็อตอัตราการสูญเสียมวลเทียบกับเวลา

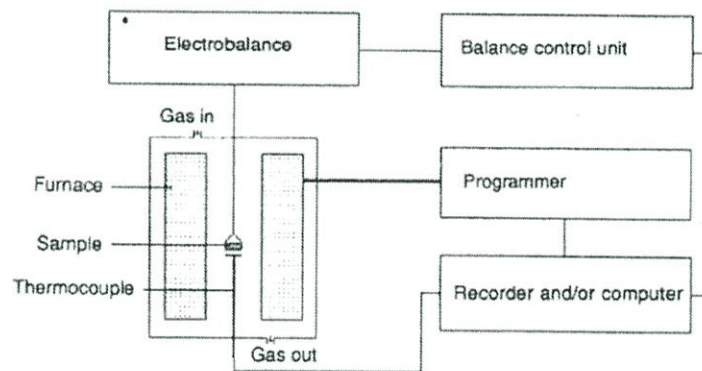
หลักการทำงานของเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์โดยวิธีชั่งน้ำหนักเชิงความร้อน เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์โดยวิธีชั่งน้ำหนักเชิงความร้อนใช้วิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุเมื่อได้รับความร้อนโดยการวัดน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละช่วงอุณหภูมิด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวสูง เทคนิคนี้เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสภาพของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับก๊าซหรือระเหยของน้ำและใช้ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง ตัวอย่างจะถูกวางบนจานขนาดเล็กซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องชั่งละเอียดที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสูง โดยที่ทั้งหมดจะอยู่ในเตาที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและบรรยากาศได้ บรรยากาศภายในอาจจะเป็นก๊าซเฉื่อยหรือก๊าซที่มีความว่องไวเช่นอากาศหรือออกซิเจน โดยน้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงไปจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิเฉพาะของสารแต่ละชนิด โดยน้ำหนักที่หายไปนั้นเกิดขึ้นจากการระเหย การย่อยสลายหรือการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ [6]



รูปที่ 2.18 เครื่องมือวิเคราะห์โดยวิธีชั่งน้ำหนักเชิงความร้อน

#### อุปกรณ์และเครื่องมือ

- (1) เครื่องชั่งไฟฟ้าและระบบควบคุม (Electro balance and Controller)
- (2) เตาเผาและเครื่องวัดอุณหภูมิ (Furnace and Temperature sensor)
- (3) โปรแกรมเมอร์ หรือคอมพิวเตอร์
- (4) เครื่องบันทึกสัญญาณ เครื่องพิมพ์ผล หรือเครื่องเก็บข้อมูล



รูปที่ 2.19 แผนภาพไดอะแกรมของระบบเครื่องชั่งเชิงความร้อน

## 2.8 การคำนวณพลังงานก่อกัมมันต์ของมลพิษอนุภาคดีเซลและไบโอดีเซล

การเกิดปฏิกิริยาเคมีของการสลายเขม่าถูกศึกษาโดยใช้เครื่องมือที่ใช่วิเคราะห์โดยวิธีชั่งน้ำหนักเชิงความร้อน (Thermo-gravimetric Analysis: TGA) [3,5,8]



อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีในสมการที่ 2.5 สามารถคำนวณจากเส้นโค้งของกราฟ TGA ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาเคมีในสมการที่ 2.6

$$-\frac{d[\text{PMs}]}{dt} = -k[\text{PMs}]^n[\text{O}_2]^m \quad (2.6)$$

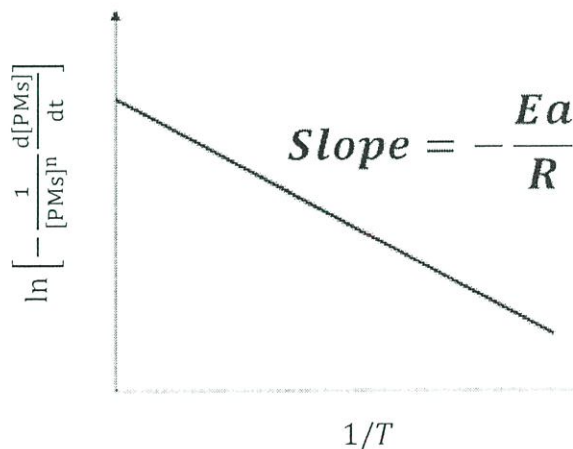
เมื่อ [PM] คือมวลของเขม่า, t คือเวลา, k คือค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาเคมี, n และ m คืออัตราส่วนโมล (Reaction order) ของคาร์บอนและออกซิเจนตามลำดับ สำหรับงานวิจัยนี้สมมติให้ n เท่ากับ 1 เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาเคมีถูกอธิบายโดยสมการที่ 2.7

$$k = Ae^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (2.7)$$

เมื่อ A คือค่าคงที่พรีเอกโพเนนเชียล,  $E_a$  คือพลังงานกระตุ้น, R คือค่าคงที่ของก๊าซ

$$\ln \left[ -\frac{1}{[\text{PMs}]^n} \frac{d[\text{PMs}]}{dt} \right] = -\frac{E_a}{R} \frac{1}{T} + (\ln A + m \ln [\text{O}_2]) \quad (2.8)$$

ค่า  $E_a$  สามารถคำนวณจากการพล็อตกราฟอาร์เรเนียสในสมการที่ 2.8 [3] โดยนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln \left[ -\frac{1}{[\text{PMs}]^n} \frac{d[\text{PMs}]}{dt} \right]$  กับ  $\frac{1}{T}$  ความชันของกราฟคือ  $-\frac{E_a}{R}$  ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln \left[ -\frac{1}{[\text{PMs}]^n} \frac{d[\text{PMs}]}{dt} \right]$  กับ  $1/T$

### บทที่ 3

## อุปกรณ์การทดลองและวิธีการทดลอง

### 3.1 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของมลพิษอนุภาคดีเซล

ในการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของมลพิษอนุภาคดีเซล ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของมลพิษอนุภาคดีเซลจากมลพิษอนุภาคที่ปล่อยออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลที่สภาวะเดินเบาจาก Graz University of Technology (TU Graz) จากนั้นนำมาถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อนำมาวัดขนาดมลพิษอนุภาค จากนั้นเปรียบเทียบกับการวัดจากเครื่อง Scanning Mobility Particulate Sizer (SMPS)[19]

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงดีเซลที่ใช้ในการทดลอง

	Method	Value	Unit
LHV	DIN 51 900-2 mod.	42,482	J/g
Carbon	DIN 51 732	85.6	% (m/m)
Hydrogen	DIN 51 732	13.4	% (m/m)
Oxygen	DIN 51 732 mod.	0.5	% (m/m)

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงคุณสมบัติของรถยนต์ที่ใช้ในการทดสอบ

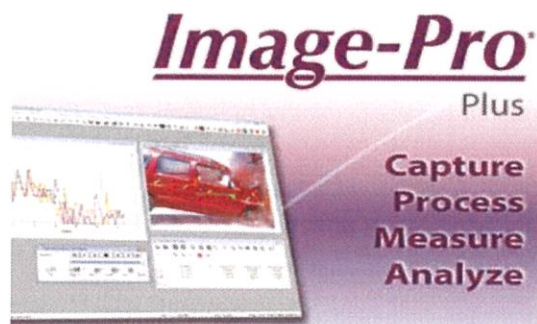
	Method	Unit
Maker	VOLKSWAGEN	-
Trade Name	KASTENWAGEN TDI	-
Vehicle Type	70 T - KASTEN	-
Fuel	Diesel	-
Engine Displacement	2,461	cc
Rated Output	75	kW
After Treatment	Non-DPF	-



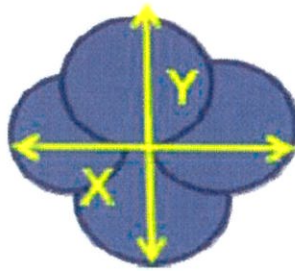
รูปที่ 3.1 ภาพระหว่างการเก็บมลพิษอนุภาค[19]



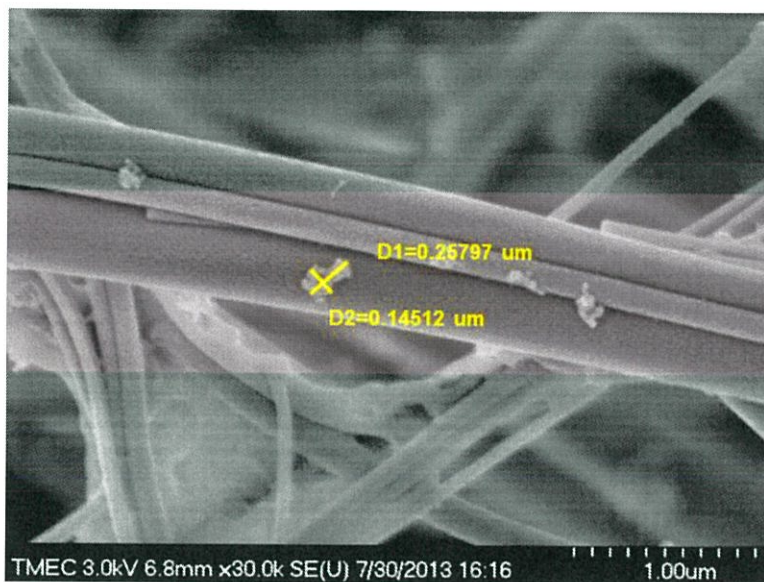
รูปที่ 3.2 กระดาษกรองเขม่าของเปลวไฟแบบแพร่จากเชื้อเพลิงดีเซล



รูปที่ 3.3 โปรแกรม Image Pro Plus ที่ใช้วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของมลพิษอนุภาค



รูปที่ 3.4 แสดงวิธีการวัดขนาดของมลพิษอนุภาคจากภาพถ่ายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM)



รูปที่ 3.5 ภาพการวัดขนาดมลพิษอนุภาคแบบกลุ่มจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ 3.6 เครื่องวัดขนาดมลพิษอนุภาค Scanning Mobility Particulate Sizer (SMPS) [19]

#### วิธีการวัดขนาดมลพิษอนุภาค

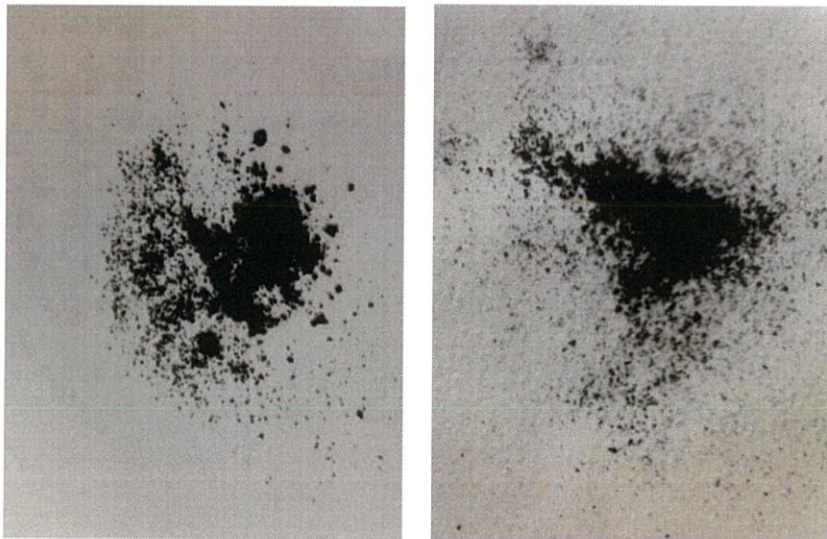
1. เก็บมลพิษอนุภาคจากเครื่องยนต์ดีเซลที่สภาวะเดินเบาด้วยแผ่นกรอง
2. นำแผ่นกรองที่มีมลพิษอนุภาคไปทำการวิเคราะห์ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)
3. นำภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) มาวัดขนาดโดยใช้โปรแกรม Image Pro Plus
4. ใช้สมการ  $R = \frac{X+Y}{2}$  เพื่อคำนวณหาจำนวนขนาดเฉลี่ยของกลุ่มก้อนมลพิษอนุภาค
5. นำไปเปรียบเทียบกับวิธีวัดจากเครื่อง SMPS ในรูปที่ 3.6

### 3.2 การวิเคราะห์มลพิษอนุภาคโดยเครื่องมือวิเคราะห์โดยวิธีชั่งน้ำหนักเชิงความร้อนจากคาร์บอน เชื้อเพลิงดีเซลและเชื้อเพลิงไบโอดีเซล

ในการศึกษามลพิษอนุภาคโดยการวัดอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างมลพิษอนุภาคกับออกซิเจนสามารถทำได้โดยการใช้เครื่องทดสอบการลดลงของน้ำหนักระหว่างการทำปฏิกิริยาเคมีขณะเพิ่มอุณหภูมิ (Thermo-gravimetric analysis: TGA) โดยใช้คาร์บอน มลพิษอนุภาคดีเซล และไบโอดีเซลที่เก็บจากการทดสอบที่สภาวะโหลด 80% ที่ 2400 รอบต่อนาที ซึ่งใช้มลพิษอนุภาคดีเซลและไบโอดีเซลประมาณ 5 mg งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาด้วยวิธีการทดลองแบบอุณหภูมิคงที่ (Isothermal Method) โดยใช้วิธีอุณหภูมิไม่คงที่สำหรับแยกสารประกอบไฮโดรคาร์บอนกับคาร์บอนออกจากกัน และวิธีอุณหภูมิคงที่

สำหรับคาร์บอนเพียงอย่างเดียวภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในอัตรา 40 °C ต่อนาที ทดลองที่อุณหภูมิต่างๆกัน โดยใช้อากาศในการทำปฏิกิริยา

การวิเคราะห์เขม่าโดยเครื่องมือวิเคราะห์โดยวิธีชั่งน้ำหนักเชิงความร้อนจะทำการทดลองด้วยวิธีอุณหภูมิคงที่ (Isothermal) โดยใช้วิธีอุณหภูมิไม่คงที่สำหรับแยกสารประกอบไฮโดรคาร์บอนกับคาร์บอนออกจากกัน และวิธีอุณหภูมิคงที่สำหรับคาร์บอนเพียงอย่างเดียวสภาวะที่ใช้ในการทดลองวิธีอุณหภูมิไม่คงที่จะควบคุมภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิเพิ่มขึ้นในอัตรา 40 °C ต่อนาที จากอุณหภูมิ 30 °C ถึง 350 °C และคงอุณหภูมิที่ 350 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยจะทำการทดลองที่อุณหภูมิ 350 °C, 400 °C, 450 °C, 500 °C, 550 °C และ 600 °C ตามลำดับ และใช้อากาศ 100% ในการทำปฏิกิริยา มีวิธีการทดลองคือ นำเขม่าไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์โดยวิธีชั่งน้ำหนักเชิงความร้อน เพื่อศึกษาการเกิดปฏิกิริยาเคมีของเขม่าดีเซลและไบโอดีเซล หลังจากนั้นนำเขม่าดีเซลและไบโอดีเซลไปวิเคราะห์หาส่วนประกอบทางเคมีของเขม่าซึ่งได้แก่ ส่วนที่เป็นความชื้น ส่วนของไฮโดรคาร์บอน และส่วนที่เป็นคาร์บอนเพื่อแยกสารประกอบต่างๆของเขม่า สุดท้ายนำเขม่าดีเซลและไบโอดีเซลไปวิเคราะห์หาค่าพลังงานกระตุ้น (Activation energy : Ea) ที่ใช้เปลี่ยนจากเขม่าของแข็งกลายเป็นก๊าซ



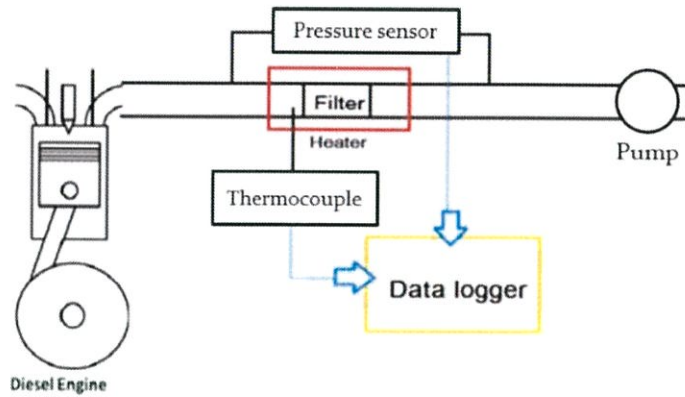
(ก)

(ข)

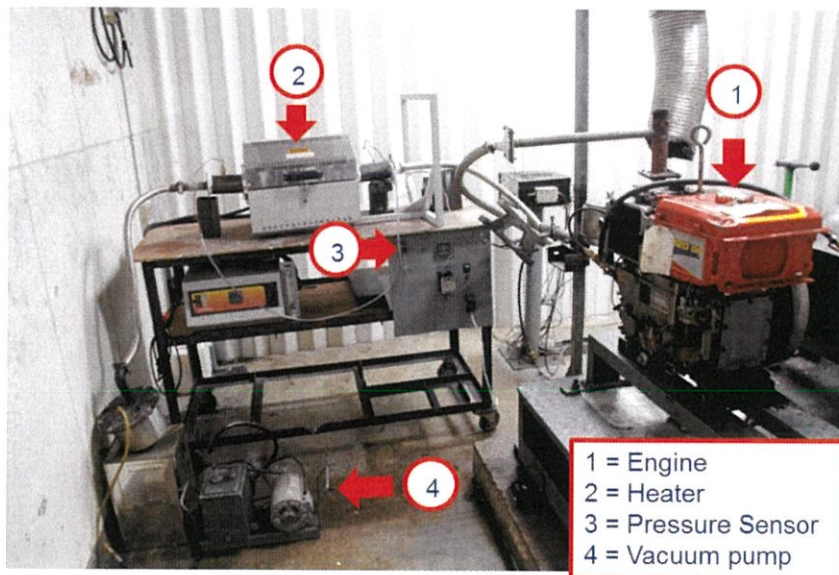
รูปที่ 3.7 มลพิษอนุภาคที่ได้จากตะแกรงลวด (ก) ดีเซล (ข) ไบโอดีเซล

### 3.3 การดักและการสลายมลพิษอนุภาค

#### 3.3.1 อุปกรณ์และวิธีการดักมลพิษอนุภาค



รูปที่ 3.8 แสดงแผนผังชุดอุปกรณ์ทดลองการดักมลพิษอนุภาค



รูปที่ 3.9 ชุดอุปกรณ์ทดลองการดักมลพิษอนุภาค

จากรูปที่ 3.8 แสดงแผนผังการทำงานของชุดทดลองการดักมลพิษอนุภาคหลักการทำงานของคือใช้เครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กสร้างมลพิษอนุภาคจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงดีเซลและไบโอดีเซลจากนั้นไอเสียจะไหลไปตามท่อเหล็กที่ได้ติดตั้งไว้เข้าไปที่ชุดทดลองโดยผ่านเตาเผาซึ่งภายในบรรจุอุปกรณ์กรอง

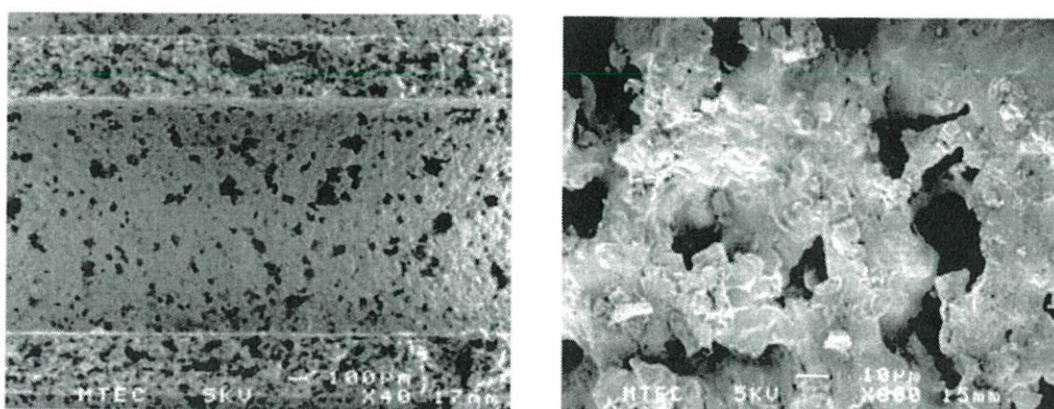
มลพิษอนุภาคชนิดเซรามิกเอาไว้ ไอเสียจะไหลผ่านและถูกดักไว้ โดยระหว่างทำการทดลองจะทำการเก็บค่าความดันตกคร่อมระหว่างทางเข้าและทางออกของชุดทดลองเพื่อหาระยะเวลาที่ไส้กรองอุดตันอีกทั้งอุณหภูมิของไอเสียด้วยซึ่งรายละเอียดของอุปกรณ์มีดังต่อไปนี้

### 3.3.1.1 อุปกรณ์กรองมลพิษอนุภาค

การทดลองได้ใช้ทำการศึกษาอุปกรณ์กรองมลพิษอนุภาคแบบไหลผ่านทั้งหมด แบบที่เป็นเซรามิก ประเภทคอร์เดียไรท์ ชื่อทางเคมีว่า “แมกนีเซียมอลูมิเนียมซิลิเกต” เปอร์เซ็นต์ความพรุน 55% ขนาดที่ใช้ในการทดลองคือเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.5 cm. ความหนา 3 ช่อง



รูปที่ 3.10 อุปกรณ์กรองมลพิษอนุภาคแบบไหลผ่านทั้งหมด



รูปที่ 3.11 ภาพถ่ายอุปกรณ์กรองมลพิษอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

### ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของอุปกรณ์กรองมลพิษอนุภาค (DPF)

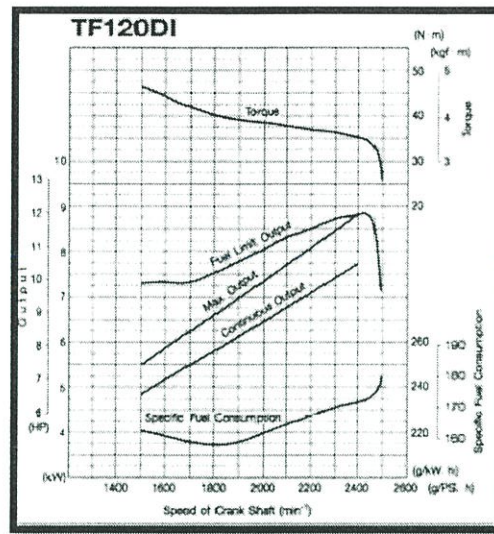
ชนิด	เซรามิก คอर्डเตียไรท์
ความหนาของผนัง	300 ไมโครเมตร
ความพรุน	52 %
ขนาดเฉลี่ยของรู	10 – 50 ไมโครเมตร
ความหนาแน่นของเซลล์	300 เซลล์ต่อตารางนิ้ว

#### 3.3.1.2 เครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก

ในการทดลองนี้เลือกใช้เครื่องยนต์ดีเซลเล็กเพราะสามารถควบคุมการทำงานได้ง่ายกว่าเครื่องยนต์ดีเซลใหญ่และสามารถประหยัดเชื้อเพลิงได้มากกว่าซึ่งเป็นเครื่องที่ทางห้องทดลองมีอยู่แล้ว



รูปที่ 3.12 เครื่องยนต์Yanmar รุ่นTF 120 Di



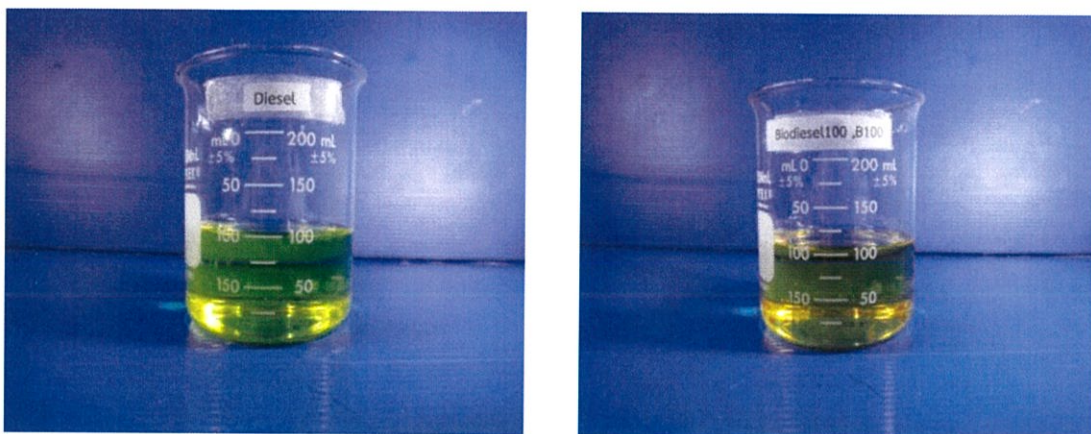
รูปที่ 3.13 ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ที่รอบต่างๆ

ตารางที่ 3.4 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กที่ใช้ในการทดลอง

Brand	Yanmar
Fuel	Diesel direct injection
Model	TF 120 Di
Displacement	638 cc
Max output	8.8 kw/2400rpm
Compression ratio	16.1:1
Number of Cylinder	1

### 3.3.1.3 เชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง

เชื้อเพลิงดีเซล (B4-5) ตามมาตรฐาน มอก. 2155-2546 นำมาเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงไบโอดีเซล (B100) ตามมาตรฐาน มอก. 2313-2549



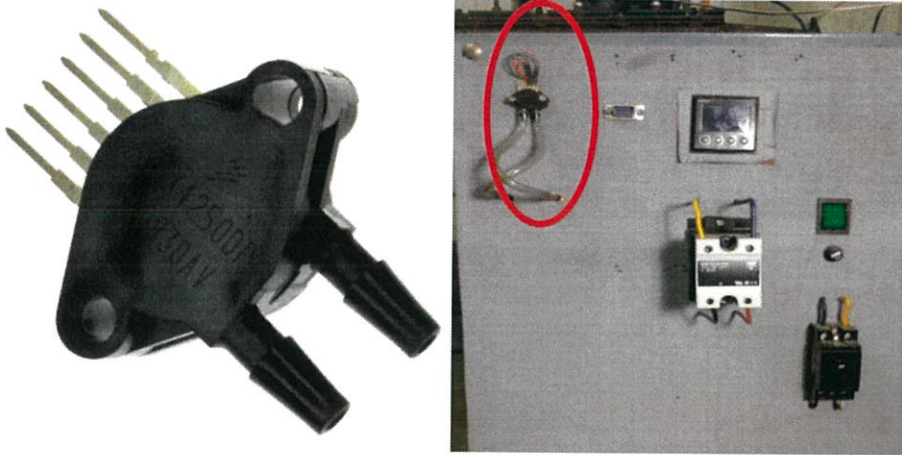
รูปที่ 3.14 เชื้อเพลิงดีเซล (B4-5) และไบโอดีเซลที่ใช้ในการทดลอง(B100)

ตารางที่ 3.5 แสดงคุณสมบัติของเชื้อเพลิงดีเซลและไบโอดีเซล

Properties / Fuels	Diesel	Biodiesel
Density (kg/m <sup>3</sup> )	844.78	847.73
Heat of combustion (MJ/m <sup>3</sup> )	140,000	130,000
Cetane Number	48	55
Viscosity (centistokes)	3.0	5.7
Flash point °C	64	70
Chemical formula	C <sub>14</sub> H <sub>26.18</sub>	C <sub>18.96</sub> H <sub>35.29</sub> O <sub>2</sub>
Carbon fraction	82	78
Heating value (kJ/kg)	46,800	39,550

### 3.3.1.4 เซนเซอร์วัดความดัน (Pressure sensor)

เนื่องจากการทดลองนี้ใช้เครื่องยนต์ดีเซลในการทดลองการใช้มานอมิเตอร์ไม่สามารถเก็บผลการทดลองได้ตลอดเวลาและค่าความดันตกคร่อมที่อ่านได้จะไม่เที่ยงตรง ดังนั้นเพื่อให้ผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือมากที่สุดจึงนำเซนเซอร์วัดความดันเพื่อใช้วัดความดันตกคร่อมระหว่างทางเข้าและทางออกของชุดอุปกรณ์ทดลองการดักมลพิษอนุภาคโดยเก็บค่าความดันตกคร่อมเพื่อนำไปวิเคราะห์โดยคอมพิวเตอร์ต่อไป



รูปที่ 3.15 เซนเซอร์วัดความดันยี่ห้อ Free scale Semiconductor รุ่น mpx5050dp

### 3.3.1.5 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

เทอร์โมคัปเปิล คืออุปกรณ์วัดอุณหภูมิโดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือความร้อนเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้า (emf) เทอร์โมคัปเปิลทำมาจากโลหะตัวนำที่ต่างชนิดกัน 2 ตัว (แตกต่างกันทางโครงสร้างอะตอม) นำมาเชื่อมต่อปลายทั้งสองเข้าด้วยกันที่ปลายด้านหนึ่ง เรียกว่าจุดวัดอุณหภูมิส่วนปลายอีกด้านหนึ่งปล่อยให้เปิดไว้ เรียกว่าจุดอ้างอิง หากจุดวัดอุณหภูมิและจุดอ้างอิงมีอุณหภูมิต่างกัน ก็จะทำให้มีการนำกระแสในวงจรเทอร์โมคัปเปิลทั้งสองข้าง เทอร์โมคัปเปิลที่นำมาใช้เป็นชนิด K การติดตั้งเราจะติดตั้งด้านหน้าของอุปกรณ์กรองมลพิษอนุภาค มีข้อดีคือ สำหรับการวัดอุณหภูมิช่วงสั้นๆจะวัดได้จาก 0°C ถึงประมาณ 1,200°C สามารถใช้กับสภาพงานที่มีการแผ่รังสีความร้อนได้ดี , ให้อัตราการเปลี่ยนแรงเครื่องไฟฟ้าต่ออุณหภูมิดีกว่าแบบอื่นๆและมีความเป็นเชิงเส้นมากที่สุดในบรรดาเทอร์โมคัปเปิลด้วยกัน



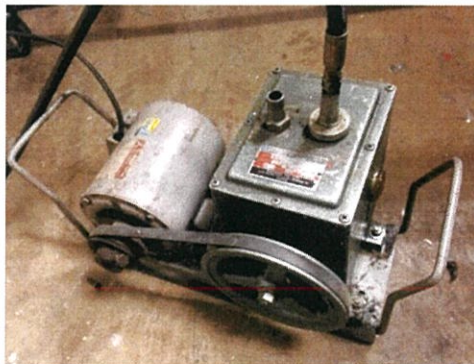
รูปที่ 3.16 เทอร์โมคัปเปิล

### 3.3.1.6 ปั๊มดูดแบบสุญญากาศ (Vacuum Pump)

ในการทดลองเพื่อจำลองให้อากาศภายในท่อมีความเร็วใกล้เคียงกับท่อไอเสียทำให้จำเป็นที่ จะต้องใช้ปั๊มแบบสุญญากาศดูดอากาศภายในท่อ ปั๊มสุญญากาศที่เรานำมาใช้เป็นปั๊มแบบโรตารีทำงานโดยการเพิ่มพลังงานให้แก่อากาศโดยอาศัยการหมุนของฟันเฟืองรอบแกนกลาง ซึ่งหมุนเพื่อทำ ให้เกิดความดันด้านดูดต่ำกว่าความดันบรรยากาศ ปั๊มที่นำมาใช้มีคุณสมบัติดังนี้

#### ตารางที่ 3.6 ตารางสมรรถนะของปั๊มสุญญากาศ

ยี่ห้อ	Nakabo
รุ่น	A-S 50
ความเร็วรอบ	750 รอบต่อนาที
อัตราการไหล	50 ลิตรต่อนาที



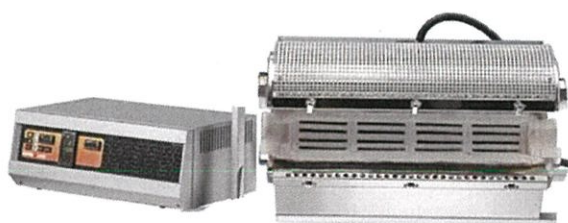
รูปที่ 3.17 ปั๊มสุญญากาศ

### 3.3.1.7 เตาเผาอุณหภูมิสูง (Furnace)

เตาเผาอุณหภูมิสูง (Furnace) เป็นอุปกรณ์ทำความร้อน ที่มีหลักการพื้นฐานคือ เมื่อกระแสไหลผ่านลวดตัวนำที่มีค่าความต้านทานสูง ลวดตัวนำจะร้อนและถ่ายเทความร้อนให้กับโหลด สามารถทนอุณหภูมิได้ถึง 1200 °C

#### ตารางที่ 3.7 คุณสมบัติของเตาเผาอุณหภูมิสูง

Brand	CARBOLITE
Model	HST12/300/3216P1
Max Temperature	Split Tube furnace 1200 °C
Diameter Tube	20-110 mm.
Heating element	Resistance wire heating element
Heated length	300 mm.
Temperature sensor	NiCrSi/NiSiMg (Type N thermocouple)



รูปที่ 3.18 เตาเผาอุณหภูมิสูง

### 3.3.2 การออกแบบชุดทดลอง



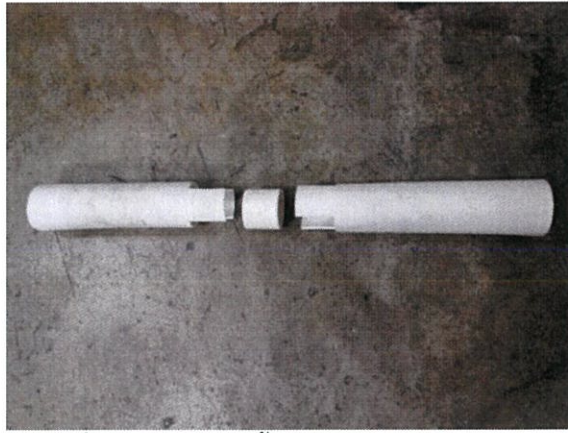
รูปที่ 3.19 ท่อเซรามิก



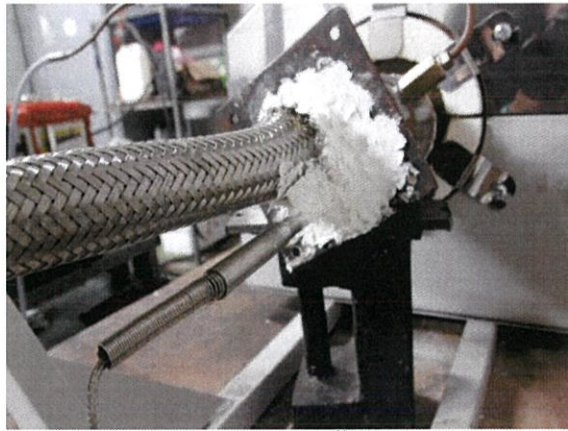
รูปที่ 3.20 ที่ยึดอุปกรณ์กรองมลพิษอนุภาค



รูปที่ 3.21 ที่ยึดอุปกรณ์กรองภายในบรรจุที่กรองมลพิษอนุภาค



รูปที่ 3.22 ภาพแยกชิ้นส่วนของอุปกรณ์กรองอนุภาค



รูปที่ 3.23 ตำแหน่งที่ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล



รูปที่ 3.24 เตาเผาอุณหภูมิสูงที่มีท่อเซรามิกภายในบรรจุตัวกรองมลพิษอนุภาค

### 3.3.3 การทำงานของชุดทดลอง

การทดลองจะเริ่มจากการเตรียมที่กรองมลพิษอนุภาคให้ได้ขนาดพอดีกับที่ยึดอุปกรณ์กรองมลพิษอนุภาค ติดตั้งเข้ากับเตาเผาอุณหภูมิสูง เริ่มให้เครื่องยนต์ทำงานสักระยะหนึ่ง จากนั้นปรับโหลดเครื่องยนต์ที่ 80% และปรับรอบเครื่องยนต์ไปที่ 2400 รอบต่อนาที เมื่อรอบเครื่องยนต์คงที่แล้วเปิดปั๊มดูดไอเสีย ไอเสียจะวิ่งผ่านท่อเข้าไปยังตัวกรองมลพิษอนุภาค เริ่มจับเวลาและวัดค่าความดันตกคร่อมด้วยเซนเซอร์วัดความดัน เซนเซอร์วัดความดันจะเก็บค่าตลอดเวลาทุกวินาที ในขณะที่ไอเสียผ่านตัวกรองมลพิษอนุภาคจะถูกกรองไว้ที่ตัวกรอง และเมื่อค่าความดันตกคร่อมเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนคงที่ก็จะหยุดเก็บผลการทดลองเพราะหากค่าความดันตกคร่อมคงที่แล้วนั้นหมายความว่าสิ้นสุดความสามารถของเครื่องมือวัด และยังหมายความว่าไส้กรองนั้นอุดตันแล้ว ทำกระบวนการที่กล่าวมาซ้ำอีก 2-3 ครั้งเพื่อดูความคลาดเคลื่อนของผลการทดลอง และทำการทดลองแบบเดิมแต่เปลี่ยนชนิดน้ำมันเป็นไบโอดีเซล

### 3.3.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

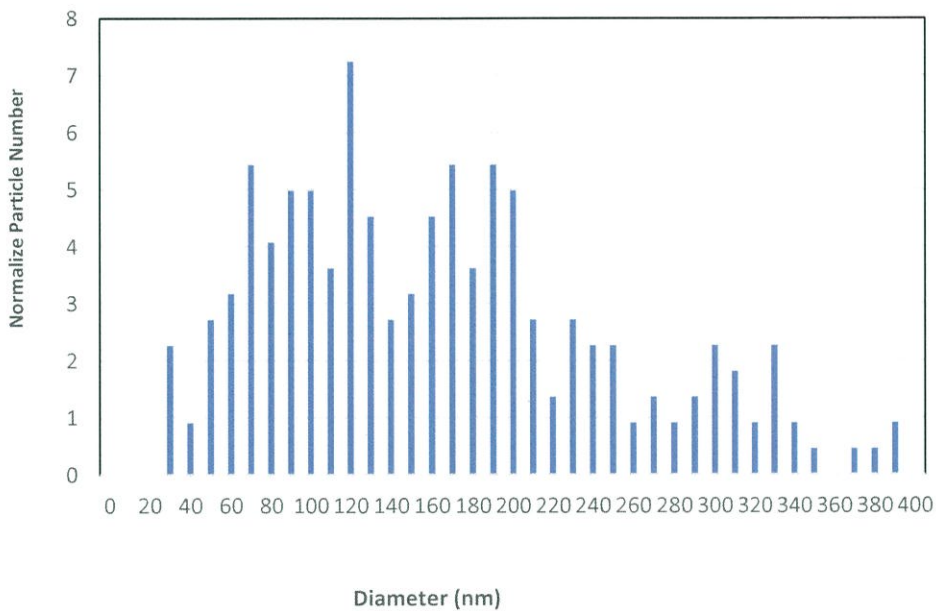
1. เตรียมเชื้อเพลิงดีเซลและไบโอดีเซล (B100)
2. เตรียมอุปกรณ์การกรองมลพิษอนุภาคชนิดเซรามิก
3. ติดตั้งท่อเซรามิกที่มีตัวกรองมลพิษอนุภาคอยู่ภายในลงในเตาเผาอุณหภูมิสูงและเตรียมเตาเผาอุณหภูมิสูงสำหรับการทดสอบ
4. ติดเครื่องยนต์และปรับโหลดเครื่องยนต์ที่ 80% จากนั้นปรับรอบเครื่องยนต์ให้อยู่ที่ 2400 รอบต่อนาที
5. เก็บผลค่าความดันตกคร่อมและระยะเวลาที่ตัวกรองอุดตัน
6. เมื่อความดันตกคร่อมเริ่มคงที่ จึงให้ความร้อนเพื่อสลายมลพิษอนุภาคด้วยเตาเผาที่อุณหภูมิ 570 องศาเซลเซียส
7. เก็บผลค่าความดันตกคร่อมที่ลดลงและระยะเวลาที่มลพิษอนุภาคสลายตัว
8. ทำการทดลองซ้ำที่สภาวะเดิมจำนวน 3 ครั้ง
9. เปลี่ยนเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลองเป็นเชื้อเพลิงไบโอดีเซลแล้วทำการทดลองเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซล
10. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

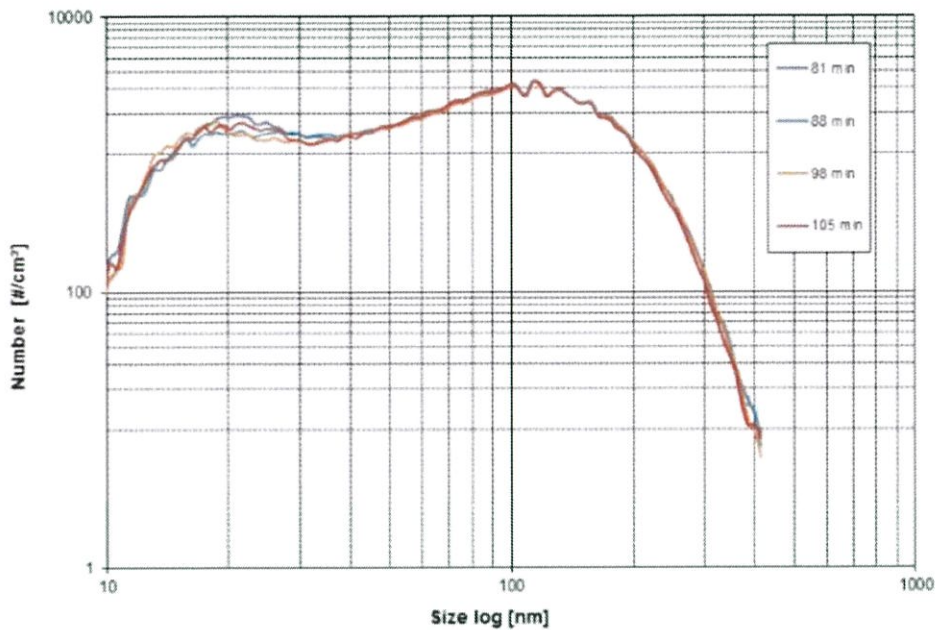
#### 4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของมลพิษอนุภาคที่ได้จากเชื้อเพลิงดีเซล

จากการวัดขนาดมลพิษอนุภาคจากเชื้อเพลิงดีเซลจากแผ่นกรองมลพิษอนุภาคโดยการวิเคราะห์ขนาดของมลพิษอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) โดยนำมาวัดขนาดความกว้างและความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางที่สภาวะเดินเบาสามารถสรุปเป็นกราฟได้ดังนี้



รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนมลพิษอนุภาคกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของมลพิษอนุภาคของเชื้อเพลิงดีเซลที่สภาวะเดินเบา

จากรูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนมลพิษอนุภาคกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของมลพิษอนุภาคที่สภาวะเดินเบา จะเห็นได้ว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของมลพิษอนุภาคของเชื้อเพลิงดีเซลส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง 120 นาโนเมตร



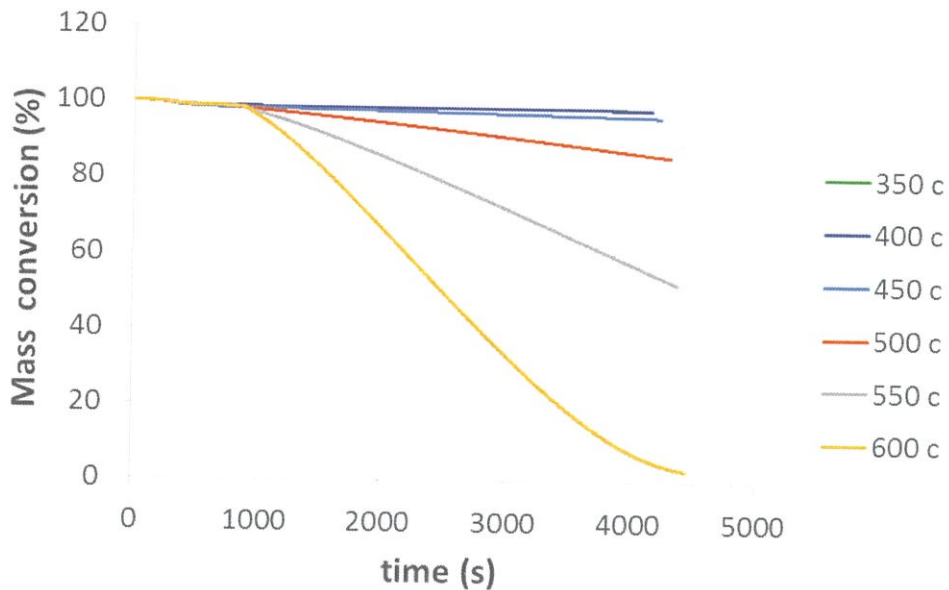
รูปที่ 4.2 ผลการวัดขนาดมลพิษอนุภาคจากเครื่อง SMPS

จากรูปที่ 4.2 ผลการวัดขนาดมลพิษอนุภาคจากเครื่อง SMPS จะเห็นว่าขนาดมลพิษอนุภาคดีเซลเฉลี่ยส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงประมาณ 120 นาโนเมตร

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการวัดโดยนำภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนในรูปที่ 4.1 มาเปรียบเทียบกับผลการวัดโดยใช้เครื่อง SMPS ในรูปที่ 4.2 จะเห็นว่ามีความสอดคล้องกันของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของมลพิษอนุภาคของเชื้อเพลิงดีเซลส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงประมาณ 120 นาโนเมตรเช่นเดียวกัน จึงสามารถยืนยันได้ว่าเราสามารถใช้ในการวัดขนาดจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดได้

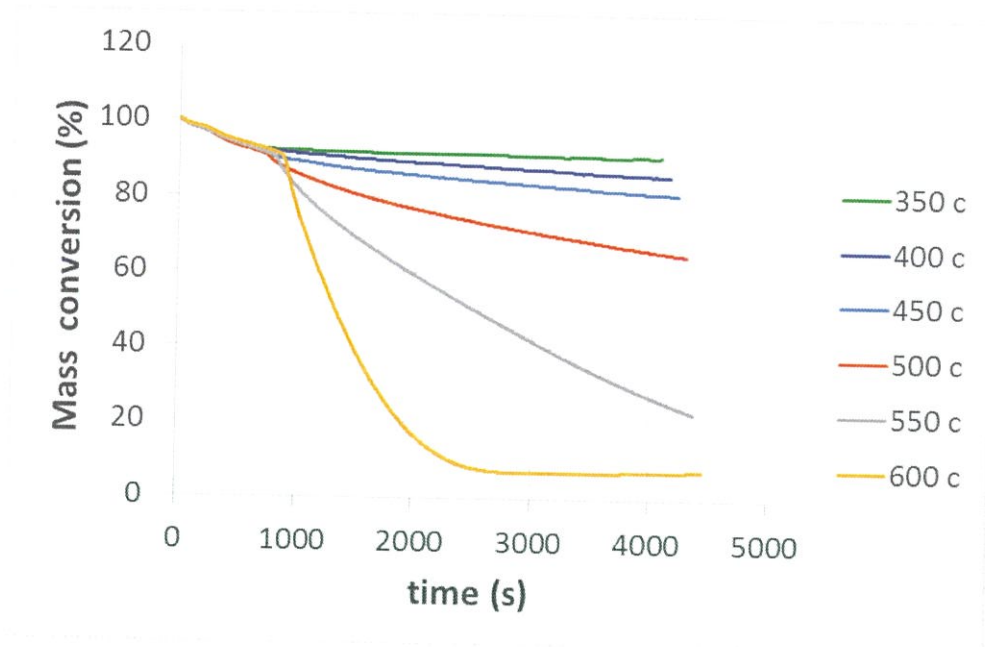
#### 4.2 สมบัติทางเคมีของมลพิษอนุภาคจากเชื้อเพลิงดีเซลและไบโอดีเซลโดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์โดยวิธีชั่งน้ำหนักเชิงความร้อน (Thermo-gravimetric analysis)

ซึ่งใช้ในการวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนของมลพิษอนุภาคจากเชื้อเพลิงดีเซลและไบโอดีเซลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยใช้ในการวัดการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักและอุณหภูมิ



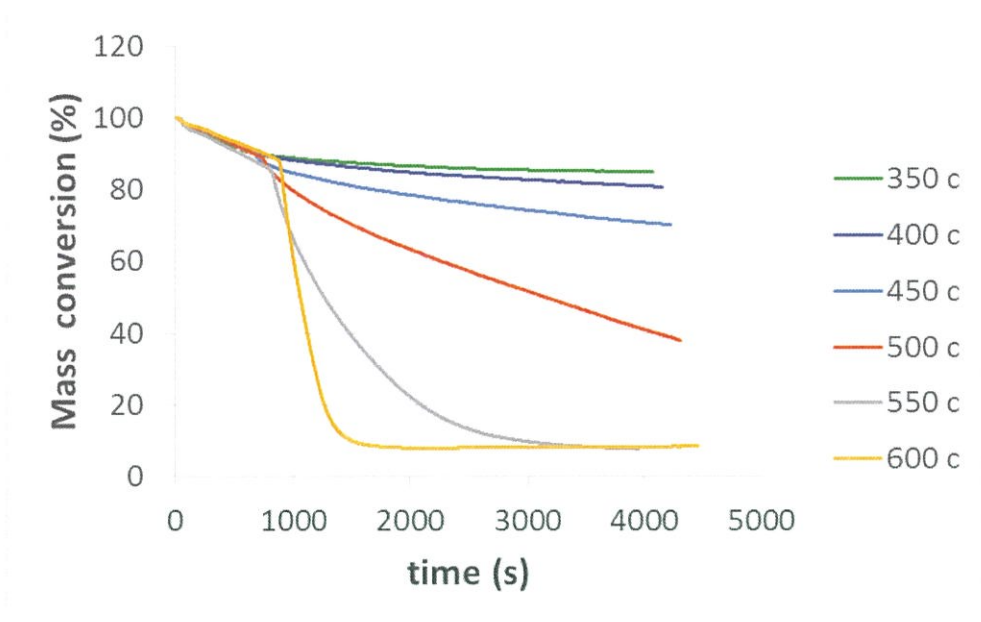
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักเทียบเวลาของมลพิษอนุภาคสถานะทดสอบ 80% ที่อุณหภูมิต่างๆจากเครื่องมือวิเคราะห์โดยวิธีชั่งน้ำหนักเชิงความร้อน (Thermogravimetric analysis)

จากรูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสลายตัวของคาร์บอนกับเวลา จะเห็นว่าที่อุณหภูมิ 350 °C คาร์บอนจะสลายตัวจาก 100% เหลือ 98.4% ที่อุณหภูมิ 400 °C คาร์บอนจะสลายตัวจาก 100% เหลือ 98.4% ที่อุณหภูมิ 450 °C จะสลายตัวจาก 100% เหลือ 96.3% ที่อุณหภูมิ 500 °C จะสลายตัวจาก 100% เหลือ 85.8% ที่อุณหภูมิ 550 °C จะสลายตัวจาก 100% เหลือ 52.1% ที่อุณหภูมิ 600 °C จะสลายตัวจาก 100% เหลือ 2.8%



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักเทียบเวลาของมลพิษอนุภาคจากเชื้อเพลิงดีเซลสถานะทดสอบ 80% ที่อุณหภูมิต่างๆจากเครื่องมือวิเคราะห์โดยวิธีชั่งน้ำหนักเชิงความร้อน (Thermo-gravimetric analysis)

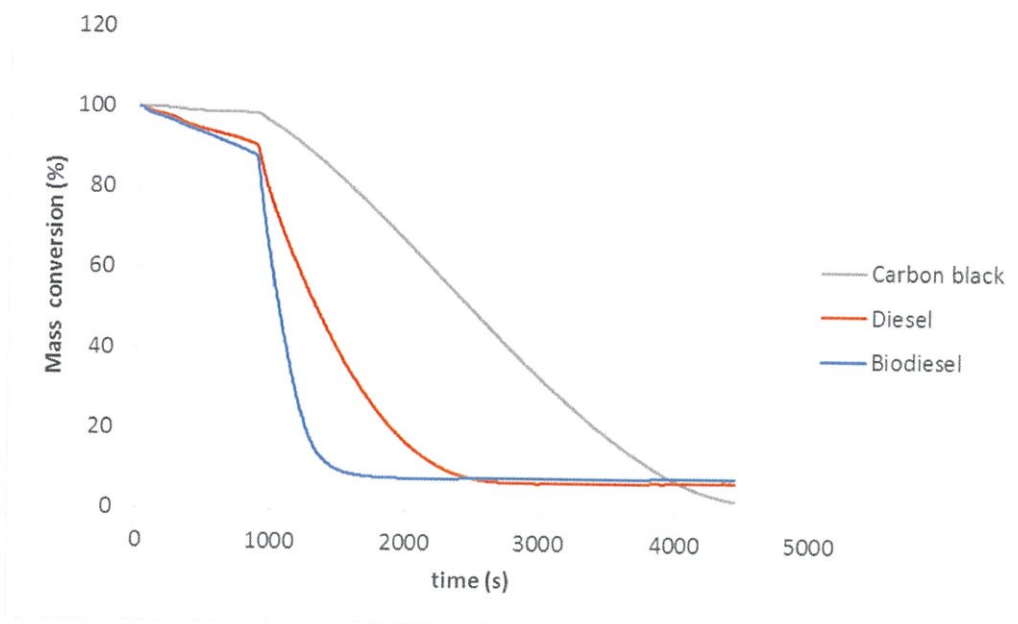
จากรูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสลายตัวของเชื้อเพลิงดีเซลกับเวลา จะเห็นว่าที่อุณหภูมิ 350 °C มลพิษอนุภาคของเชื้อเพลิงดีเซลจะสลายตัวจาก 100% เหลือ 90% ที่อุณหภูมิ 400 °C จะสลายตัวจาก 100% เหลือ 85.9% ที่อุณหภูมิ 450 °C จะสลายตัวจาก 100% เหลือ 81% ที่อุณหภูมิ 500 °C จะสลายตัวจาก 100% เหลือ 64.8% ที่อุณหภูมิ 550 °C จะสลายตัวจาก 100% เหลือ 22.9% ที่อุณหภูมิ 600 °C จะสลายตัวจาก 100% เหลือ 7.4%



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักเทียบเวลาของมลพิษอนุภาคจากเชื้อเพลิงไบโอดีเซลสภาวะทดสอบ 80% ที่อุณหภูมิต่างๆจากเครื่องมือวิเคราะห์โดยวิธีชั่งน้ำหนักเชิงความร้อน (Thermo-gravimetric analysis)

รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสลายตัวของเชื้อเพลิงไบโอดีเซลกับเวลา จะเห็นว่าที่อุณหภูมิ 350 °C มลพิษอนุภาคของเชื้อเพลิงไบโอดีเซลจะสลายตัวจาก 100% เหลือ 84.9% ที่อุณหภูมิ 400 °C จะสลายตัวจาก 100% เหลือ 96% ที่อุณหภูมิ 450 °C จะสลายตัวจาก 100% เหลือ 80.6% ที่อุณหภูมิ 450 °C จะสลายตัวจาก 100% เหลือ 70% ที่อุณหภูมิ 500 °C จะสลายตัวจาก 100% เหลือ 37.9% ที่อุณหภูมิ 550 °C จะสลายตัวจาก 100% เหลือ 7.6% ที่อุณหภูมิ 600 °C จะสลายตัวจาก 100% เหลือ 8.4%

จากรูปที่ 4.3 - 4.5 เมื่อพิจารณาส่วนประกอบทางเคมีของมลพิษอนุภาคประกอบด้วยความชื้น, ไฮโดรคาร์บอน, และคาร์บอน ความชื้นสามารถสลายตัวได้ที่อุณหภูมิ 25 – 100 °C ไฮโดรคาร์บอนสามารถสลายตัวได้ที่อุณหภูมิ 100 °C – 500 °C คาร์บอนสามารถสลายตัวได้ที่อุณหภูมิ 500 °C – 600 °C จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิต่ำๆอัตราการสลายตัวของมลพิษอนุภาคจะสลายตัวได้น้อยเพราะมีเพียงความชื้นที่สลายตัว ส่วนที่อุณหภูมิสูงคาร์บอนซึ่งมีน้ำหนักมากสามารถสลายตัวได้ น้ำหนักจึงลดลงอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักเทียบเวลาของคาร์บอน, มลพิษอนุภาคจากเชื้อเพลิงดีเซล และไบโอดีเซลสภาวะทดสอบ 80% ที่อุณหภูมิ 600 °C จากเครื่องมือวิเคราะห์โดยวิธีชั่งน้ำหนักเชิงความร้อน (Thermo-gravimetric analysis)

เมื่อพิจารณาระหว่างรูปที่ 4.6 ซึ่งเป็นกราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักเทียบเวลาของคาร์บอน, มลพิษอนุภาคของเชื้อเพลิงดีเซลและไบโอดีเซลที่อุณหภูมิ 600 °C จะเห็นได้ว่ามลพิษของเชื้อเพลิงไบโอดีเซลสามารถสลายตัวได้เร็วกว่าเชื้อเพลิงดีเซลและคาร์บอนที่อุณหภูมิเดียวกันเนื่องจากในเชื้อเพลิงไบโอดีเซลมีอะตอมของออกซิเจนอยู่ ทำให้เมื่อเกิดการทำปฏิกิริยากับคาร์บอนจะเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ได้ง่ายกว่าเชื้อเพลิงดีเซล และคาร์บอนสามารถสลายตัวได้ช้าที่สุดเนื่องจากในโมเลกุลของคาร์บอนมีเพียงคาร์บอนอย่างเดียวสลายตัวจึงลดลงอย่างต่อเนื่องคงที่

จากนั้นนำข้อมูลของมลพิษอนุภาคแต่ละเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิต่างๆไปหาพลังงานก่อกัมมันต์จากสมการ

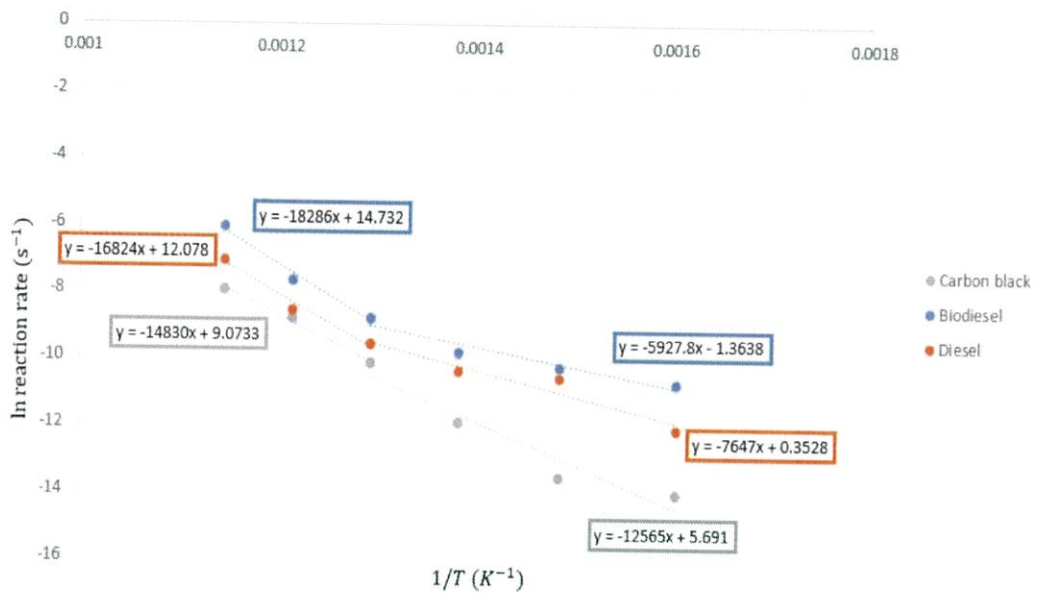
$$-\frac{dc}{dt} = K[C]^m[O]^n \quad (4.1)$$

$$-\frac{dc}{dt} = Ae^{-\frac{Ea}{R}}[C]^m[O]^n \quad (4.2)$$

$$-\ln \frac{dc}{dt} = -\frac{Ea}{RT} + \ln[A[C]^m[O]^n] \quad (4.3)$$

$$-\frac{Ea}{R} = \frac{-\ln \frac{dc}{dt}}{\frac{1}{T}} + Constant \quad (4.4)$$

เราสามารถหาพลังงานก่อกัมมันต์(Ea) ได้จากความชันของกราฟระหว่าง  $-\ln \frac{dc}{dt}$  กับ  $\frac{1}{T}$  เมื่อ  $R = 8.314 \text{ J/mol.K}$



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln dc/dt$  กับ  $1/T$  แต่ช่วงอุณหภูมิของแต่ละเชื้อเพลิง

ช่วงอุณหภูมิสูง (500 °C - 600 °C)

พลังงานก่อกัมมันต์(Ea) ของคาร์บอน = 123.30 kJ/mol

พลังงานก่อกัมมันต์(Ea) ของดีเซล = 139.87 kJ/mol

พลังงานก่อกัมมันต์(Ea) ของไบโอดีเซล = 152.03 kJ/mol

ช่วงอุณหภูมิต่ำ (350 °C - 450 °C)

พลังงานก่อกัมมันต์(Ea) ของคาร์บอน = 104.47 kJ/mol

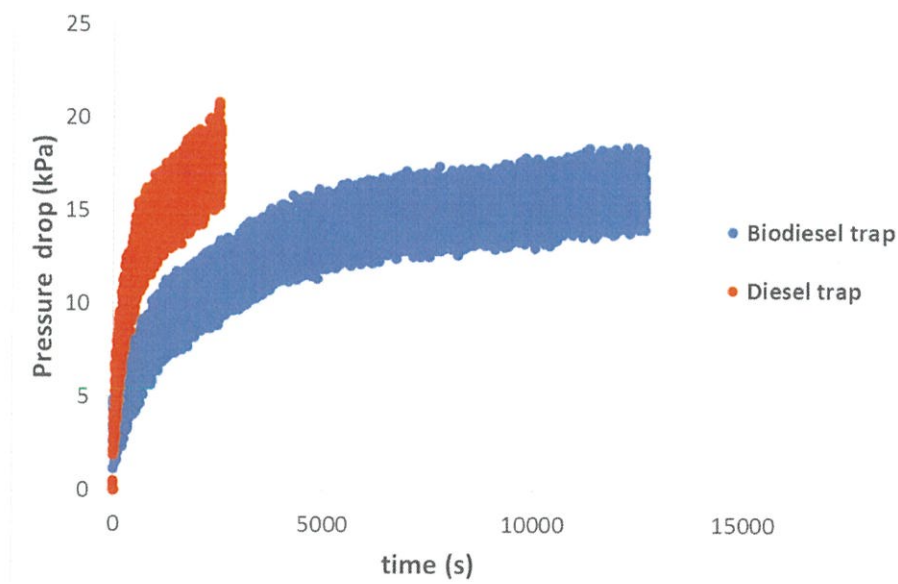
พลังงานก่อกัมมันต์(Ea) ของดีเซล = 63.58 kJ/mol

พลังงานก่อกัมมันต์(Ea) ของไบโอดีเซล = 49.29 kJ/mol

จะเห็นว่าในช่วงอุณหภูมิสูง พลังงานก่อกัมมันต์จะมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากโมเลกุลของมลพิษอนุภาคเหลือเพียงคาร์บอนเป็นส่วนใหญ่ ทำให้พลังงานการสลายตัวมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนในช่วงอุณหภูมิต่ำ พลังงานก่อกัมมันต์ของมลพิษอนุภาคจากไบโอดีเซลมีค่าต่ำที่สุดเนื่องจากโมเลกุลของมลพิษอนุภาคมีโมเลกุลของออกซิเจนอยู่ด้วยทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดีกว่าเชื้อเพลิงดีเซล และจะเห็นว่าพลังงานก่อกัมมันต์ของคาร์บอนมีค่าใกล้เคียงกับพลังงานก่อกัมมันต์ในช่วงอุณหภูมิสูงเนื่องจากโมเลกุลมีเฉพาะคาร์บอนเท่านั้น

### 4.3 ปริมาณมลพิษอนุภาคที่ได้จากเชื้อเพลิงดีเซลและไบโอดีเซล

จากการดักมลพิษอนุภาคจากชุดทดสอบที่ประกอบด้วยอุปกรณ์กำจัดมลพิษอนุภาคแบบไหลผ่านทั้งหมดชนิดเซรามิกที่สถานะไหล 80% เพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณของมลพิษอนุภาคด้วยค่าความดันตกคร่อมเทียบกับเวลา



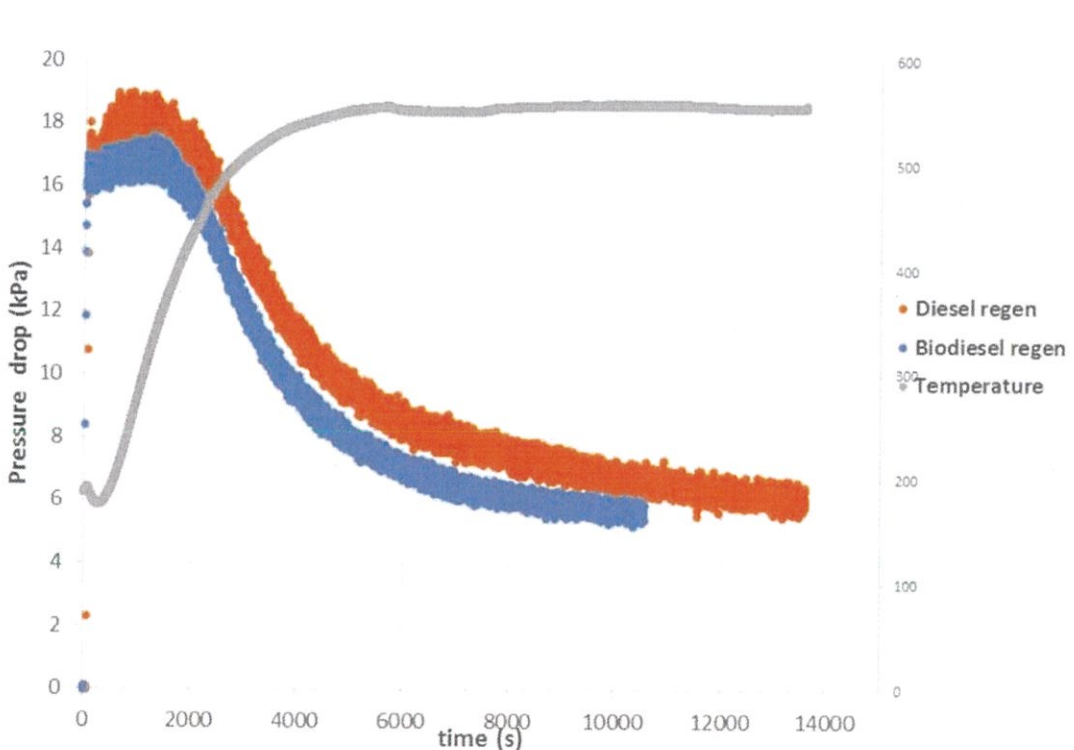
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมที่เพิ่มขึ้นกับเวลาเนื่องจากการสะสมของมลพิษอนุภาคของเชื้อเพลิงดีเซลกับไบโอดีเซลที่สภาวะไหล 80%

จากรูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมที่เพิ่มขึ้นกับเวลาเนื่องจากการสะสมของมลพิษอนุภาคของเชื้อเพลิงดีเซลกับไบโอดีเซลที่สภาวะไหล 80% จะเห็นว่าความดันตกคร่อม

ที่เพิ่มขึ้นของเชื้อเพลิงไบโอดีเซลนั้นใช้เวลาประมาณ 12500 วินาที นานกว่าความดันตกคร่อมที่เพิ่มขึ้นของเชื้อเพลิงดีเซลซึ่งใช้เวลาประมาณ 2500 วินาที ประมาณ 5 เท่า เนื่องจากมลพิษอนุภาคของเชื้อเพลิงไบโอดีเซลมีขนาดเล็กกว่ามลพิษอนุภาคของเชื้อเพลิงดีเซล และมลพิษอนุภาคของเชื้อเพลิงไบโอดีเซลมีออกซิเจนเป็นส่วนประกอบ การเผาไหม้จึงสมบูรณ์กว่ามลพิษอนุภาคจากมลพิษอนุภาคของเชื้อเพลิงดีเซลทำให้เกิดมลพิษอนุภาคน้อยกว่าเชื้อเพลิงดีเซล

#### 4.4 พฤติกรรมการสลายตัวของมลพิษอนุภาคของเชื้อเพลิงดีเซลและไบโอดีเซล โดยให้ความร้อนด้วยเตาเผาอุณหภูมิสูง

ดูการสลายตัวโดยวิเคราะห์จากค่าความดันตกคร่อมเทียบกับเวลา เมื่ออุณหภูมิถึงช่วงที่ทำปฏิกิริยา อะตอมของออกซิเจนในมลพิษอนุภาคของไบโอดีเซลจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอน และจะเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ได้ง่ายกว่าเชื้อเพลิงดีเซล



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างความดันที่ลดลงกับเวลาเนื่องจากการสลายตัวของมลพิษอนุภาคของเชื้อเพลิงดีเซลกับไบโอดีเซลที่สภาวะไหล 80%

จากรูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างความดันที่ลดลงกับเวลาเนื่องจากการสลายตัวของมลพิษอนุภาคของเชื้อเพลิงดีเซลกับไบโอดีเซลที่สภาวะโหลด 80% มลพิษอนุภาคจะเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 500 °C ความดันตกคร่อมที่ลดลงของเชื้อเพลิงไบโอดีเซลใช้เวลาประมาณ 10500 วินาที ลดลงเร็วกว่าเชื้อเพลิงดีเซลซึ่งใช้เวลาประมาณ 13500 วินาที ประมาณ 0.8 เท่า เนื่องจากมลพิษอนุภาคของเชื้อเพลิงไบโอดีเซลมีออกซิเจนเป็นส่วนประกอบทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่ายกว่ามลพิษอนุภาคจากเชื้อเพลิงดีเซล

## บทที่ 5

# สรุปผลการทดลอง ปัญหาและแนวทางแก้ไขปัญหา และ ข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

1. จากการวัดขนาดของมลพิษอนุภาคจากเชื้อเพลิงดีเซลที่รอบเดินเบา การวัดขนาดมลพิษอนุภาคภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ได้ผลใกล้เคียงกับการวัดขนาดมลพิษอนุภาคโดยใช้เครื่อง Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) ซึ่งมีขนาดประมาณ 120 นาโนเมตร แต่การวัดขนาดจากภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดนอกจากจะได้ขนาดที่ถูกต้องแล้ว เรายังสามารถจะวิเคราะห์โครงสร้าง, ขนาด, ลักษณะ, การรวมตัวกันของมลพิษอนุภาคได้

2. จากการวิเคราะห์โดยวิธีชั่งน้ำหนักเชิงความร้อน (TGA) พลังงานก่อกัมมันต์ของมลพิษอนุภาคของเชื้อเพลิงไบโอดีเซลมีค่าน้อยที่สุดเนื่องจากมีออกซิเจนในโมเลกุลทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ง่าย พลังงานก่อกัมมันต์ของมลพิษอนุภาคของเชื้อเพลิงดีเซลมีค่าสูงขึ้นมาเนื่องจากไม่มีออกซิเจนในโมเลกุลแต่มีไฮโดรคาร์บอนทำให้การสลายตัวได้ในช่วงอุณหภูมิกลางๆ และพลังงานก่อกัมมันต์ของคาร์บอนมีค่ามากที่สุดเนื่องจากมีเฉพาะคาร์บอนซึ่งสลายตัวในช่วงอุณหภูมิสูงจึงเกิดปฏิกิริยาได้ยากที่สุด

3. จากการดักมลพิษอนุภาคเชื้อเพลิงดีเซลและไบโอดีเซล การดักมลพิษอนุภาคของเชื้อเพลิงดีเซลจะเต็มเร็วกว่าการดักมลพิษอนุภาคจากเชื้อเพลิงไบโอดีเซลประมาณ 5 เท่า เนื่องจากมลพิษอนุภาคของเชื้อเพลิงดีเซลมีขนาดใหญ่กว่า และมลพิษอนุภาคของเชื้อเพลิงไบโอดีเซลมีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่าทำให้เกิดมลพิษอนุภาคน้อยกว่า

4. จากการสลายมลพิษอนุภาคจากเชื้อเพลิงดีเซลและไบโอดีเซล การสลายมลพิษอนุภาคของเชื้อเพลิงไบโอดีเซลจะสลายได้เร็วกว่ามลพิษอนุภาคจากเชื้อเพลิงดีเซลประมาณ 0.8 เท่า เนื่องจากมลพิษอนุภาคจากเชื้อเพลิงไบโอดีเซลมีโมเลกุลของออกซิเจนอยู่ด้วยทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิไดซ์ได้ง่าย การเกิดปฏิกิริยาจึงเกิดได้ง่ายด้วย

จากผลการทดลองข้างต้นสรุปได้ว่าควรเลือกใช้เชื้อเพลิงไบโอดีเซลแทนการใช้เชื้อเพลิงดีเซล เนื่องจากเชื้อเพลิงไบโอดีเซลเป็นคาร์บอนนิเวศสามารถลดปัญหาสภาวะโลกร้อนได้ อีกทั้งมีปริมาณและขนาดของมลพิษอนุภาคน้อยกว่าเชื้อเพลิงดีเซลซึ่งสามารถลดจำนวนมลพิษที่มีผลต่อสิ่งมีชีวิตและยังมีผลต่อการเพิ่มมาตรฐานยูโร (Euro) ของประเทศไทยในอนาคตอีกด้วย อย่างไรก็ตามการหันมาใช้เชื้อเพลิงไบโอดีเซลยังช่วยส่งเสริมรายได้แก่เกษตรกรของไทยทำให้คุณภาพชีวิตของเกษตรกรไทยดีขึ้น เป็นการพัฒนาประเทศชาติอีกทางหนึ่งด้วย

## 5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไขปัญหา

จากการทดลองการดักกรองมลพิษอนุภาคจากเชื้อเพลิงดีเซลและไบโอดีเซลเกิดปัญหาขึ้นระหว่างการทดลองและได้แสดงแนวทางแก้ปัญหามาเพื่อพัฒนาการทดลอง ดังต่อไปนี้

1. เกิดรอยรั่วบริเวณที่รอยต่อระหว่างท่อเซรามิกทำให้ความดันตกคร่อมคลาดเคลื่อน

แนวทางแก้ไขปัญหา: ใช้ซีเมนต์ทนความร้อนผสมกับกาวทนความร้อน ในการประสานรอยต่อระหว่างท่อเซรามิก

2. อุณหภูมิภายในเตาเผาอุณหภูมิไม่ถึงที่ต้องการ เนื่องจากอากาศที่ผ่านเตาเผาอุณหภูมิสูงไหลเร็วเกินไป

แนวทางแก้ไขปัญหา: ปรับอัตราการไหลของอากาศให้ช้าลง

## 5.3 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองดักกรองมลพิษอนุภาคจากน้ำมันดีเซลและไบโอดีเซลมีข้อเสนอแนะเพื่อการพัฒนาการทดลอง ดังต่อไปนี้

1. การศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของมลพิษอนุภาคจากน้ำมันดีเซลและไบโอดีเซลโดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์โดยวิธีซึ่งน้ำหนักเชิงความร้อนควรทำหลายครั้งเพื่อจะได้มีข้อมูลนำมาใช้วิเคราะห์อย่างเพียงพอและน่าเชื่อถือ

2. ควรเลือกใช้ท่อต่างๆ หรือข้อต่อต่างๆ ให้มีความหนาใกล้เคียงกันเพื่อที่จะได้ทำการเชื่อมจะได้ไม่เกิดรอยรั่วขึ้นได้

3. ในระหว่างการทดสอบควรสวมหน้ากากกรองมลพิษเพื่อป้องกันมลพิษอนุภาคและแก๊สที่เป็นอันตรายจากไอเสียเข้าสู่ร่างกายเป็นอันตรายต่อสุขภาพผู้ทดลอง

## บรรณานุกรม

- [1]กัญจนณา บุญยเกียรติ. “เชื้อเพลิงและการเผาไหม้”, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย - ญี่ปุ่น) กรุงเทพฯ.2542
- [2]ทรงธรรม เหล่าสุวรรณ, ปรีชากรินทร์และจินดาเจริญพรพาณิชย์ (2555).จลนพลศาสตร์เคมีของการออกซิโดซิมลพิษอนุภาคจากเชื้อเพลิงไบโอดีเซล, การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 8,จังหวัดมหาสารคาม
- [3]ทิพา ภรณ์ ศรีธัญรัตน์. จลนพลศาสตร์เคมี. โครงการผลิตตำรา คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 2554.  
บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม เคมี. คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าอนบุรี. 2543.
- [4]พิสมัย เจนวิชัยกุล. “ไบโอดีเซล:พลังงานทางเลือก” , วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปีที่16 ฉบับที่ 3 ก.ย. -ธ.ค. 2544
- [5]ภมรมาศ อ่อนอิมสิน. "การเผาไหม้เข้ามาจากเครื่องยนต์ดีเซลบนเครื่องกรองที่ทำจากโลหะทองแดง." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม เคมี. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าอนบุรี. 2548.
- [6]รองศาสตราจารย์ ดร.ศักดิ์สิทธิ์ จันทร์ไทย. “การวิเคราะห์เชิงความร้อนและแคลอริเมตรี” มหาวิทยาลัยขอนแก่น.2553
- [7]สมชาย จันชานา, “มลพิษในไอเสียเครื่องยนต์ดีเซล”.รการประชุมสัมมนาวิชาการวารสา.
- [8]สิริกร ดุพัสกุล. "การเผาไหม้เข้ามาจากเครื่องยนต์ดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา."วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตร์
- [9]B.R. Stanmore, J.F. Brilhac, P.Gilot, The oxidation of soot : a review of experiments, mechanisms and models,Carbon 39, pp.2247-2268, 2001.
- [10]Gulijk C. Van., Heiswolf J.J, Makkee M., Moulijn J.A. DDiesel Exhaust Aftertreatment\_, Selection and development of a reactor for diesel particulate filtration., Pp.1705 ; 1712, 2001.
- [11]Hong Kong Polytechnic University. “Particulate Trap”, แหล่งที่มา <http://www.IndustrialCentre> ; The Hong Kong Polytechnic University.ac.th, 23 มกราคม 2546
- [12]J.B. Heywood, Internal Combustion EngineFundamental, McGraw-Hill series in mechanicalEngineering, Singapore, 1998.

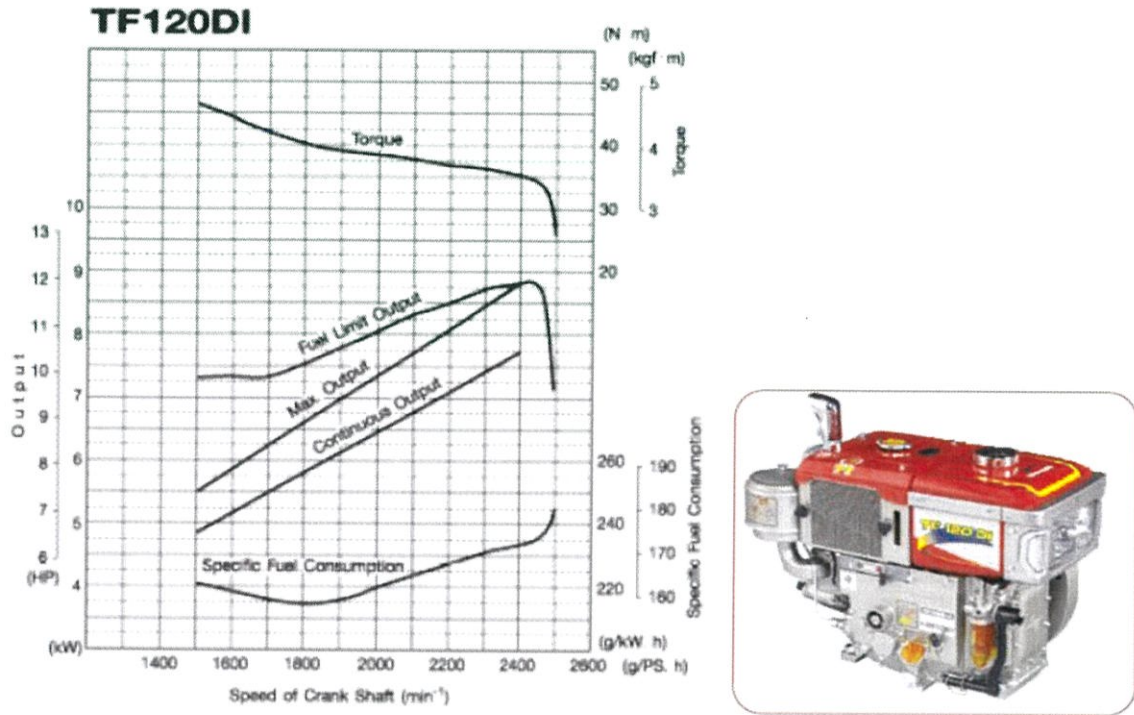
- [13]Johnson, J.H, Baglay, S.T., Gratz,L.D. and Leddy, D.G. \_Diesel Exhaust AftertreatmentG, A Review of Diesel Particulate Control Technology and Emissions Effects 1992 Horning Memmorial Award Lecture, Pp 1- 35,1994
- [14]Kalogiron M., Samaras Z. (2009). Athermogravimetric kinetic study of uncatalyzed diesel soot oxidation, *J Therm Anal Calorim*, vol. 98, 2009,pp. 215-224.
- [15]Michel Ambrogio, Guido Saracco, Vito specchia, DDiesel Exhaust Aftertreatment\_ Combining filtration and catalytic combustion in particulate traps for diesel exhaust treatment, Pp.1613 ; 1621, 2001.
- [16]Mayer., Buck A. Diesel Exhaust Aftertreatment, Knitted Ceramic Fiber ; A New Concept for Particulate Traps, 1992.
- [17]Mayer., Buck A. and Bressler H. \_Diesel Exhaust Aftertreatment\_, The Knitted Particulate Trap : Field Experience and Development Progress, SAE 930362, 1993.
- [18]P. Karin and K.Hanamura. Particulate Matter Trapping and Oxidation on a Diesel Particulate Filter. The First TSME International Conference on Mechanical Engineering, TSME, ACE002, 20-22 October. Ubon Ratchathani, Thailand. 2010.
- [19]P.Karin, C.Charoenphonphanich, K.Hanamura, T.Vuckovic, Characterization of Engine Particle Emission Size Distribution by SMPS. The 4th TSME International Conference on Mechanical Engineering 16-18 October 2013, Pattaya, Chonburi
- [20]P. Karin, *Microscopic Visualization and Characterization of Particulate Matter Trapping and Oxidation in Diesel Particulate Filters and Membrane Filters*.Doctor thesis, Tokyo Institute of Technology, Japan, 2010.
- [21]P.Karin, Y. Songsaengchan, S. Laosuwan, Chinda Chareonphonphanich, Nanostructure of Renewable Oxygenated Fuels Particulate Matter. The 4th AUN/SEED-Net Regional Conference, Vietnam, 2012.
- [22]Victor Fernandez-Alos, Justin K. Watson, Randy vander Wal, Jonathan P. Mathews, *Soot and char molecular representations generated directly from HRTEM lattice fringe images using Fringe3D*. The Pennsylvania State University, United States of America, 2011.
- [23]Willard W.P., *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*. University of Wisconsin.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

คุณสมบัติของอุปกรณ์

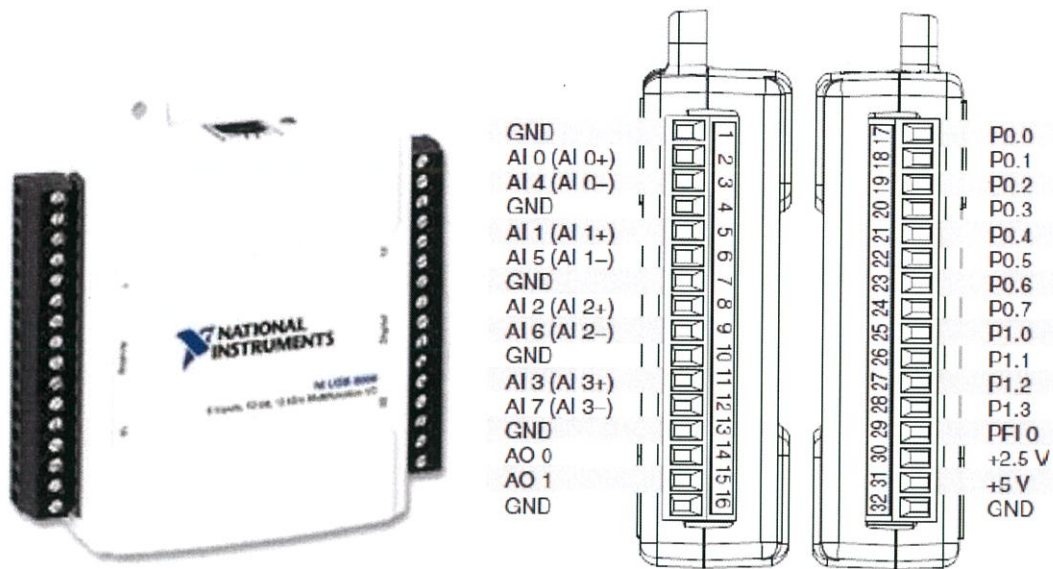
ก-1: คุณสมบัติเครื่องยนต์ดีเซล



**ข้อมูลจำเพาะเครื่องยนต์**

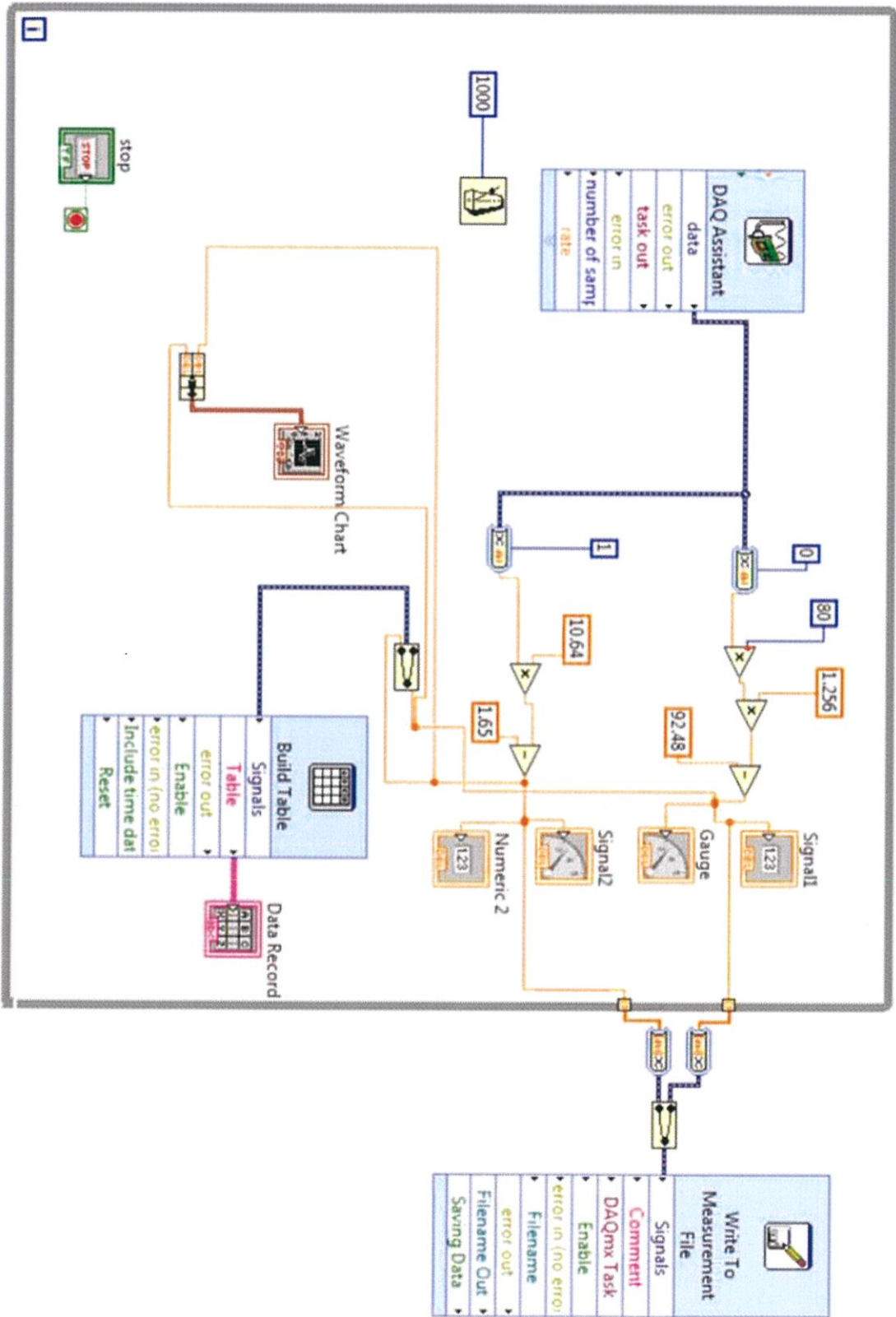
รุ่น	หน่วย	TF80DI-L	TF80DI-H	TF90DI-L	TF90DI-H	TF110DI-L	TF110DI-Y	TF110DI-H	TF120DI-L	TF120DI-Y	TF120DI-H	
แบบ		เครื่องยนต์ดีเซล 4 จังหวะ สูบสอง ระบายความร้อนด้วยน้ำ										
ระบบห้องเผาไหม้		โคโรคิงเจอร์ซัน										
จำนวนสูบ		1										
ความโตกระบอกสูบ x ช่วงชัก	มม.	80 x 87	80 x 87	85 x 87	85 x 87	88 x 96	88 x 96	88 x 96	92 x 96	92 x 96	92 x 96	
ปริมาตรกระบอกสูบ	ลิตร	0.437	0.437	0.493	0.493	0.583	0.583	0.583	0.638	0.638	0.638	
กำลังม้าต่อเนื่อง	แรงม้า / รอบต่อนาที	7.0 / 2400	7.0 / 2400	8.0 / 2400	8.0 / 2400	9.8 / 2400	9.8 / 2400	9.8 / 2400	10.5 / 2400	10.5 / 2400	10.5 / 2400	
	กิโลวัตต์ / รอบต่อนาที	5.1 / 2400	5.1 / 2400	5.9 / 2400	5.9 / 2400	7.2 / 2400	7.2 / 2400	7.2 / 2400	7.7 / 2400	7.7 / 2400	7.7 / 2400	
กำลังม้าสูงสุด	แรงม้า / รอบต่อนาที	8.0 / 2400	8.0 / 2400	9.0 / 2400	9.0 / 2400	11.0 / 2400	11.0 / 2400	11.0 / 2400	12.0 / 2400	12.0 / 2400	12.0 / 2400	
	กิโลวัตต์ / รอบต่อนาที	5.9 / 2400	5.9 / 2400	6.6 / 2400	6.6 / 2400	8.1 / 2400	8.1 / 2400	8.1 / 2400	8.8 / 2400	8.8 / 2400	8.8 / 2400	
ความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง	กรัม / แรงม้า-ชม.	177										
อัตราส่วนกำลังอัด		16.8 : 1	16.8 : 1	16.6 : 1	16.6 : 1	16.3 : 1	16.3 : 1	16.3 : 1	16.1 : 1	16.1 : 1	16.1 : 1	
ตำแหน่งส่งกำลัง		ปุ่มลิฟต์ด้านข้าง										
ทิศทางการหมุนของเพลารื้อเหียง		ทวนเข็มนาฬิกา ด้านล้อช่วยแรง										
น้ำมันเชื้อเพลิง		ดีเซลหมุนเร็ว										
ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิง		บีบีเอส										
จังหวะการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิง	องศา	20 องศาจนจุดศูนย์กลางบน					19 องศาจนจุดศูนย์กลางบน					
แรงดันการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิง	กก. / ตร.ซม.						200					
ความจุถังน้ำมันเชื้อเพลิง	ลิตร	10.6					11.0					
ระบบหล่อเย็น		ใช้แรงดันเป็นแรงขับเคลื่อนด้วยมีโทรคอยล์ มีชุดควบคุมแรงดัน										
ชนิดของน้ำมันหล่อเย็น		SAE เบอร์ 40 มาตรฐาน API CD / SF										
ความจุของอ่างน้ำทิ้งหล่อเย็น	ลิตร	2.2					2.8					
ระบบระบายความร้อน		หม้อน้ำรังผึ้ง	หม้อต้ม	หม้อน้ำรังผึ้ง	หม้อต้ม	หม้อน้ำรังผึ้ง	หม้อน้ำรังผึ้ง	หม้อต้ม	หม้อน้ำรังผึ้ง	หม้อน้ำรังผึ้ง	หม้อต้ม	
ความจุน้ำระบายความร้อน	ลิตร	1.6	9.4	1.6	9.4	2.1	2.1	11.8	2.1	2.1	11.8	
การติดตั้งเครื่องยนต์		ใช้เฟืองทด มีถาด										
ความยาว	มม.	676.5					704.0					
ขนาดเครื่องยนต์	ความกว้าง	มม. 339.5					มม. 355.5					
	ความสูง	มม. 524.0					มม. 549.0					
น้ำหนักตัวเปล่าของเครื่องยนต์	กก.	87.5	84.0	88.5	85.0	104.5	104.5	101.5	105.5	105.5	102.5	

## n-2: Data Acquisition



Signal Name	Reference	Direction	Description
GND	—	—	<b>Ground</b> —The reference point for the single-ended analog input measurements, analog output voltages, digital signals, +5 VDC supply, and +2.5 VDC at the I/O connector, and the bias current return point for differential mode measurements.
AI <0..7>	Varies	Input	<b>Analog Input Channels 0 to 7</b> —For single-ended measurements, each signal is an analog input voltage channel. For differential measurements, AI 0 and AI 4 are the positive and negative inputs of differential analog input channel 0. The following signal pairs also form differential input channels: AI<1, 5>, AI<2, 6>, and AI<3, 7>. Refer to the <i>Analog Input</i> section for more information.
AO <0, 1>	GND	Output	<b>Analog Output Channels 0 and 1</b> —Supplies the voltage output of AO channel 0 or AO channel 1. Refer to the <i>Analog Output</i> section for more information.
P0.<0..7>	GND	Input or Output	<b>Port 0 Digital I/O Channels 0 to 7</b> —You can individually configure each signal as an input or output. Refer to the <i>Digital I/O</i> section for more information.
P1.<0..3>	GND	Input or Output	<b>Port 1 Digital I/O Channels 0 to 3</b> —You can individually configure each signal as an input or output. Refer to the <i>Digital I/O</i> section for more information.
PFI 0	GND	Input	<b>PFI 0</b> —This pin is configurable as either a digital trigger or an event counter input. Refer to the <i>PFI 0</i> section for more information.
+2.5 V	GND	Output	<b>+2.5 V External Reference</b> —Provides a reference for wrap-back testing. Refer to the <i>+2.5 V External Reference</i> section for more information.
+5 V	GND	Output	<b>+5 V Power Source</b> —Provides +5 V power up to 200 mA. Refer to the <i>+5 V Power Source</i> section for more information.

ก-3: โปรแกรม Labview



## n-4: Pressure sensor

## Pressure

## Operating Characteristics

**Table 1. Operating Characteristics** ( $V_S = 5.0$  Vdc,  $T_A = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise noted,  $P_1 > P_2$ . Decoupling circuit shown in Figure 4 required to meet electrical specifications.)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Pressure Range <sup>(1)</sup>	$P_{OP}$	0	—	50	kPa
Supply Voltage <sup>(2)</sup>	$V_S$	4.75	5.0	5.25	Vdc
Supply Current	$I_o$	—	7.0	10	mAdc
Minimum Pressure Offset <sup>(3)</sup> @ $V_S = 5.0$ Volts	$V_{off}$	0.088	0.2	0.313	Vdc
Full Scale Output <sup>(4)</sup> @ $V_S = 5.0$ Volts	$V_{FSO}$	4.587	4.7	4.813	Vdc
Full Scale Span <sup>(5)</sup> @ $V_S = 5.0$ Volts	$V_{FSS}$	—	4.5	—	Vdc
Accuracy <sup>(6)</sup>	—	—	—	$\pm 2.5$	% $V_{FSS}$
Sensitivity	V/P	—	90	—	mV/kPa
Response Time <sup>(7)</sup>	$t_R$	—	1.0	—	ms
Output Source Current at Full Scale Output	$I_{o+}$	—	0.1	—	mAdc
Warm-Up Time <sup>(8)</sup>	—	—	20	—	ms
Offset Stability <sup>(9)</sup>	—	—	$\pm 0.5$	—	% $V_{FSS}$

1. 1.0 kPa (kiloPascal) equals 0.145 psi.

2. Device is ratiometric within this specified excitation range.

3. Offset ( $V_{off}$ ) is defined as the output voltage at the minimum rated pressure.

4. Full Scale Output ( $V_{FSO}$ ) is defined as the output voltage at the maximum or full rated pressure.

5. Full Scale Span ( $V_{FSS}$ ) is defined as the algebraic difference between the output voltage at full rated pressure and the output voltage at the minimum rated pressure.

6. Accuracy (error budget) consists of the following:

Linearity: Output deviation from a straight line relationship with pressure over the specified pressure range.

Temperature Hysteresis: Output deviation at any temperature within the operating temperature range, after the temperature is cycled to and from the minimum or maximum operating temperature points, with zero differential pressure applied.

Pressure Hysteresis: Output deviation at any pressure within the specified range, when this pressure is cycled to and from the minimum or maximum rated pressure at  $25^\circ\text{C}$ .

TcSpan: Output deviation over the temperature range of  $0^\circ$  to  $85^\circ\text{C}$ , relative to  $25^\circ\text{C}$ .

TcOffset: Output deviation with minimum pressure applied, over the temperature range of  $0^\circ$  to  $85^\circ\text{C}$ , relative to  $25^\circ\text{C}$ .

Variation from Nominal. The variation from nominal values, for Offset or Full Scale Span, as a percent of  $V_{FSS}$  at  $25^\circ\text{C}$ .

7. Response Time is defined as the time for the incremental change in the output to go from 10% to 90% of its final value when subjected to a specified step change in pressure.

8. Warm-up Time is defined as the time required for the product to meet the specified output voltage after the Pressure has been stabilized.

9. Offset Stability is the product's output deviation when subjected to 1000 hours of Pulsed Pressure, Temperature Cycling with Bias Test.

## ภาคผนวก ข

มาตรฐานและคุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิง

## ข-1: น้ำมันดีเซล

รายละเอียดแนบท้ายประกาศกรมธุรกิจพลังงาน  
เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล  
พ.ศ. ๒๕๕๖

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงต่ำ	น้ำมันดีเซล		วิธีทดสอบ <sup>๒</sup>
			หมุนเร็ว	หมุนช้า	
๑	ความถ่วงจำเพาะ ณ อุณหภูมิ ๑๕.๖/๑๕.๖ องศาเซลเซียส (Specific Gravity at ๑๕.๖/๑๕.๖ °C)	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	๐.๘๑ ๐.๘๗	- ๐.๘๒๐	ASTM D ๑๒๙๘
๒	จำนวนซีเทน (Cetane Number)	ไม่ต่ำกว่า	๕๐	๔๕	ASTM D ๖๑๓
	หรือ ดัชนีซีเทน (Calculated Cetane Index)	ไม่ต่ำกว่า	๕๐	๔๕	ASTM D ๔๗๖
๓	ความหนืด เซนติสโตกส์ (Viscosity, cSt)				ASTM D ๔๔๕
	๓.๑ ณ อุณหภูมิ ๔๐ องศาเซลเซียส (at ๔๐ °C)	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	๑.๘ ๔.๑	- ๘.๐	
	หรือ ๓.๒ ณ อุณหภูมิ ๕๐ องศาเซลเซียส (at ๕๐ °C)	ไม่สูงกว่า	-	๖.๐	
๔	จุดไหลเท องศาเซลเซียส (Pour Point, °C)	ไม่สูงกว่า	๑๐	๑๖	ASTM D ๙๗
๕	กำมะถัน ร้อยละโดยน้ำหนัก (Sulphur, %wt.)	ไม่สูงกว่า	๐.๐๐๕	๑.๕	ASTM D ๒๖๒๒
๖	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (Copper Strip Corrosion)	ไม่สูงกว่า	หมายเลข ๑	-	ASTM D ๑๓๐
๗	เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Stability, g/m <sup>3</sup> )	ไม่สูงกว่า	๒๕	-	ASTM D ๒๒๗๔
๘	ภาค่าน ร้อยละโดยน้ำหนัก (Carbon Residue, %wt.)	ไม่สูงกว่า	๐.๐๕	-	ASTM D ๑๘๙
๙	น้ำและตะกอน ร้อยละโดยปริมาตร (Water and Sediment, %vol.)	ไม่สูงกว่า	๐.๐๕	๐.๓	ASTM D ๒๗๐๔
๑๐	เถ้า ร้อยละโดยน้ำหนัก (Ash, %wt.)	ไม่สูงกว่า	๐.๐๑	๐.๐๒	ASTM D ๔๘๒
๑๑	จุดวาบไฟ องศาเซลเซียส (Flash Point, °C)	ไม่ต่ำกว่า	๕๒	๕๒	ASTM D ๙๓

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงสุด	น้ำมันดีเซล		วิธีทดสอบ <sup>๙</sup>	
			หมุนเร็ว	หมุนช้า		
๑๒	การกลั่น (Distillation, อุณหภูมิของส่วนที่กลั่นได้โดยปริมาตรในอัตราร้อยละเก้าสิบ (๙๐% recovered)	องศาเซลเซียส (°C)	ไม่สูงกว่า	๓๕๗	-	ASTM D ๘๖
๑๓	โพลีไซคลิก อะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic Aromatic Hydrocarbon,	ร้อยละโดยน้ำหนัก (% wt.)	ไม่สูงกว่า	๑๑	-	ASTM D ๒๕๒๕
๑๔	สี (Colour)					
	๑๔.๑ ชนิดของสี (Hue)		ไม่ต่ำกว่า	เหลือง	น้ำตาล	
	๑๔.๒ ความเข้มของสี (Intensity)		ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	-	๕.๕	ASTM D ๑๕๐๐
๑๕	ไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ ของกรดไขมัน (Methyl Ester of Fatty Acids,	ร้อยละโดยปริมาตร (%vol.)	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	๕.๕	-	EN ๑๕๐๗๘
๑๖	คุณสมบัติการหล่อลื่น รอยขีดข่วน (Lubricity , Wear Scar	ไมโครเมตร (µm)	ไม่สูงกว่า	๕๖๐	-	CEC F - ๐๖ - ๙๖
๑๗	สารเติมแต่ง (ถ้ามี) (Additives)		ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบจากอธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน			

หมายเหตุ ๙/ วิธีทดสอบอาจใช้วิธีอื่นที่เทียบเท่าก็ได้ แต่ในกรณีที่มีข้อโต้แย้งให้ใช้วิธีที่กำหนดในรายละเอียดแนบท้ายนี้

## ข-2: น้ำมันไบโอดีเซล

เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน

พ.ศ. ๒๕๕๒

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงสุด	วิธีทดสอบ <sup>๑</sup>
1	เมทิลเอสเทอร์ (Methyl Ester, ร้อยละโดยน้ำหนัก % wt.)	ไม่ต่ำกว่า 96.5	EN 14103
2	ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 °ซ (Density at 15 °C, กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร kg/m <sup>3</sup> )	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า 860 900	ASTM D 1298
3	ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 °ซ (Viscosity at 40 °C, เซนติสโตกส์ cSt)	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า 3.5 5.0	ASTM D 445
4	จุดวาบไฟ (Flash Point, องศาเซลเซียส °C)	ไม่ต่ำกว่า 120	ASTM D 93
5	กำมะถัน (Sulphur, ร้อยละโดยน้ำหนัก %wt.)	ไม่สูงกว่า 0.0010	ASTM D 2622
6	กากดำ (ร้อยละ 10 ของกากที่เหลือจากการกลั่น) (Carbon Residue , on 10 % distillation residue, %wt)	ไม่สูงกว่า 0.30	ASTM D 4530
7	จำนวนซีเทน (Cetane Number)	ไม่ต่ำกว่า 51	ASTM D 613
8	เถ้าซัลเฟต (Sulphated Ash, ร้อยละโดยน้ำหนัก %wt.)	ไม่สูงกว่า 0.02	ASTM D 874
9	น้ำ (Water, wt.)	ไม่สูงกว่า 0.050	EN ISO 12937
10	สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด (Total Contaminate, ร้อยละโดยน้ำหนัก %wt.)	ไม่สูงกว่า 0.0024	EN 12662
11	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (Copper Strip Corrosion)	ไม่สูงกว่า หมายเลข 1	ASTM D 130
12	เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยา ออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส (Oxidation Stability at 110 °C, ชั่วโมง hours)	ไม่ต่ำกว่า 10	EN 14112

(ต่อ-2-)

รายการ	ข้อกำหนด	ขีดจำกัด	อัตราสูงสุด	วิธีทดสอบ <sup>1/</sup>	
13	ค่าความเป็นกรด (Acid Value ,	มิลลิกรัมปอดัสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัม <i>mg KOH/g</i> )	ไม่สูงกว่า	0.50	ASTM D 664
14	ค่าไอโอดีน (Iodine Value ,	กรัมไอโอดีน/ 100 กรัม <i>g Iodine / 100 g</i> )	ไม่สูงกว่า	120	EN 14111
15	กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเตอร์ (Linolenic Acid Methyl Ester ,	ร้อยละโดยน้ำหนัก <i>%wt.</i> )	ไม่สูงกว่า	12.0	EN 14103
16	เมทานอล (Methanol,	ร้อยละโดยน้ำหนัก <i>%wt.</i> )	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14110
17	โมโนกลีเซอไรด์ (Monoglyceride	ร้อยละโดยน้ำหนัก <i>%wt.</i> )	ไม่สูงกว่า	0.80	EN 14105
18	ไดกลีเซอไรด์ (Diglyceride ,	ร้อยละโดยน้ำหนัก <i>%wt.</i> )	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14105
19	ไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride ,	ร้อยละโดยน้ำหนัก <i>%wt.</i> )	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14105
20	กลีเซอรินอิสระ (Free glycerin ,	ร้อยละโดยน้ำหนัก <i>%wt.</i> )	ไม่สูงกว่า	0.02	EN 14105
21	กลีเซอรินทั้งหมด (Total glycerin,	ร้อยละโดยน้ำหนัก <i>%wt.</i> )	ไม่สูงกว่า	0.25	EN 14105
22	โลหะกลุ่ม 1 (โซเดียมและโปแตสเซียม) (Group I metals (Na+K),	มิลลิกรัม/กิโลกรัม <i>mg/kg</i> )	ไม่สูงกว่า	5.0	EN 14108 และ EN 14109
	โลหะกลุ่ม 2 (แคลเซียมและแมกนีเซียม) (Group II metals (Ca+Mg),	มิลลิกรัม/กิโลกรัม <i>mg/kg</i> )	ไม่สูงกว่า	5.0	pr EN 14538
23	ฟอสฟอรัส (Phosphorus,	ร้อยละโดยน้ำหนัก <i>%wt.</i> )	ไม่สูงกว่า	0.0010	ASTM D 4951
24	สารเติมแต่ง (ถ้ามี) (Additive)		ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบจากอธิบดี กรมธุรกิจพลังงาน		

หมายเหตุ 1/ วิธีทดสอบอาจใช้วิธีอื่นที่เทียบเท่าก็ได้ แต่ในกรณีที่มีข้อโต้แย้งให้ใช้วิธีที่กำหนดในรายละเอียดแนบท้ายนี้

ภาคผนวก ค

มาตรฐานมลพิษอนุภาค

ค-1: มาตรฐานรถยนต์ขนาดเล็กที่ใช้เครื่องยนต์แบบจุดระเบิดด้วยการอัดในประเทศไทย

ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม

ฉบับที่ ๔๓๕๔ (พ.ศ. ๒๕๕๔)

ออกตามความในพระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

พ.ศ. ๒๕๑๑

เรื่อง กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

รถยนต์ขนาดเล็กที่ใช้เครื่องยนต์แบบจุดระเบิดด้วยการอัด เฉพาะด้านความปลอดภัย  
สารมลพิษจากเครื่องยนต์ ระดับที่ 7

หน่วยเป็น g/km

ประเภทรถยนต์	มวลอ้างอิง (kg)	คาร์บอน มอนอกไซด์	ออกไซด์ ของ ไนโตรเจน	ไฮโดรคาร์บอนรวม กับออกไซด์ ของ ไนโตรเจน	สารมลพิษ อนุภาค
รถยนต์นั่ง มวลเต็มอัตราบรรทุกไม่เกิน 2 500 kg	-	0.50	0.25	0.30	0.025
รถยนต์นั่งมวลเต็มอัตราบรรทุกเกิน 2 500 kg หรือรถยนต์บรรทุกและรถยนต์นั่งที่ดัดแปลงมา จากรถยนต์บรรทุกที่มีมวลเต็มอัตราบรรทุกไม่ เกิน 3 500 kg	ไม่เกิน 1 305	0.50	0.25	0.30	0.025
	เกิน 1 305 แต่ไม่เกิน 1 760	0.63	0.33	0.39	0.04
	เกิน 1 760	0.74	0.39	0.46	0.06

ค-2: มาตรฐานรถยนต์ขนาดเล็กที่ใช้เครื่องยนต์แบบจุดระเบิดด้วยการอัดในยุโรป

มาตรฐาน	เริ่มบังคับใช้ (ค.ศ.)	ปริมาณไอเสียตามชนิดเครื่องยนต์									
		CO		HC		NO <sub>x</sub>		HC+NO <sub>x</sub>		PM	
		เบนซิน	ดีเซล	เบนซิน	ดีเซล	เบนซิน	ดีเซล	เบนซิน	ดีเซล	เบนซิน	ดีเซล
Euro 1	1992	2.72	2.72	-	-	-	-	0.97	0.97	-	0.14
Euro 2	1996	2.2	1.0	-	-	-	-	0.5	0.7	-	0.08
Euro 3	2000	2.3	0.64	0.2	-	0.15	0.5	-	0.56	-	0.05
Euro 4	2005	1.0	0.5	0.1	-	0.08	0.25	-	0.3	-	0.025
Euro 5 (อนาคต)	2009	1.0	0.5	0.1	-	0.06	0.18	-	0.23	0.005**	0.005
Euro 6 (อนาคต)	2014	1.0	0.5	0.1	-	0.06	0.08	-	0.17	0.005**	0.005