

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

การศึกษาการดักกรองของตัวกรองอนุภาคดีเซลในเชื้อเพลิงดีเซล และไบโอดีเซล

**STUDY ON DIESEL AND BIODIESEL PARTICULATE MATTER TRAPPING  
INSIDE A DIESEL PARTICULATE FILTER**



T119490



b. 10312055  
i. ....

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 119490  
วัน,เดือน,ปี.....- อ.ร.ด. 2554

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2553

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาการดักกรองของตัวกรองอนุภาคดีเซลในเชื้อเพลิงดีเซล และไบโอดีเซล

Study on Diesel and Biodiesel Particulate Matter Trapping inside a Diesel Particulate Filter

ผู้จัดทำ

1. นาย กิตติพงษ์ สร้อยทอง รหัสประจำตัว 50010119
2. นาย กิตติคุณ อัมพันธ์ รหัสประจำตัว 50010133
3. นาย ชนานันท์ แสงกระจ่าง รหัสประจำตัว 50010649



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร. จินดา เจริญพรพาณิชย์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร.ปริษา กักรินทร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การศึกษาการดักกรองของตัวกรองอนุภาคดีเซลในเชื้อเพลิงดีเซล และไบโอดีเซล

นาย กิตติพงษ์	สร้อยทอง	50010119
นาย กิติคุณ	อำพันธ์ุ	50010133
นาย ธนานันท์	แสงกระจ่าง	50010649
ศศ.ดร. จินดา เจริญพรพาณิชย์		อาจารย์ที่ปรึกษา
ดร. ปรีชา การินทร์		อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2553		

### บทคัดย่อ

เครื่องยนต์ดีเซล (Diesel engine) เป็นเครื่องยนต์ที่ให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal efficiency) สูงสุดในเครื่องยนต์สันดาปภายใน (Internal combustion engine) ของรถยนต์ปัจจุบันที่ภาระโหลดการทำงานเท่ากัน ดังนั้นการเพิ่มปริมาณการใช้รถยนต์ดีเซลก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงเหลว (Fluid fuel) ที่มีอยู่จำกัด และยังเป็นการช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของปัญหาโลกร้อน (Global warming) ได้อีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามมลพิษหลักสองชนิดจากไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลคือ มลพิษอนุภาคของแข็ง (Particulate matter: PM) ที่มีส่วนประกอบหลักคือคาร์บอน และมลพิษก๊าซซึ่งประกอบด้วยออกไซด์ของไนโตรเจน (NO<sub>x</sub>) ต้องได้รับการกำจัดเพื่อแก้ปัญหาภาวะเป็นพิษซึ่งนำไปสู่ปัญหาสุขภาพของมนุษย์ งานวิจัยนี้แบ่งการศึกษาออกเป็นสองส่วนคือ ประการแรกเป็นการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของมลพิษอนุภาคของแข็งเพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐาน โดยใช้ Scanning electron microscope (SEM), ประการที่สองเป็นการศึกษาพฤติกรรมการกำจัดมลพิษอนุภาคด้วย Full flow Diesel Particulate Filter (DPF) โดยการสร้างชุดอุปกรณ์ทดสอบที่สามารถวัดค่าผลกระทบของความดันแตกต่าง (Pressure drop) ระหว่างทำการดักเขม่า และประสิทธิภาพการกรอง (Filtration efficiency) ในขบวนการดักมลพิษอนุภาค โดยควบคุมความหนาแน่นของเขม่าและ Superficial velocity ของไอเสีย ผลที่ได้รับคือ จากการทดลองพบว่าความหนาแน่นของอนุภาคเขม่าที่เกิดจากน้ำมันไบโอดีเซลมีน้อยกว่าอนุภาคเขม่าที่เกิดจากดีเซล และขนาดของอนุภาคมีขนาดเล็กกว่าด้วย จะสามารถนำตัวดักกรองอนุภาคเขม่าดีเซล (Diesel Particulate Filter, DPF) มาใช้กับน้ำมันไบโอดีเซลได้ และยังคงผลให้ใช้งานได้นานขึ้น เนื่องจากอนุภาคเขม่ามีน้อยกว่า อายุการใช้งานของ DPF ที่นำมาใช้กับน้ำมันไบโอดีเซลจะมากกว่าน้ำมันดีเซล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Study on Diesel and Biodiesel Particulate Matter Trapping inside a Diesel Particulate Filter

Kittipong Sroythong	50010119
Kitikun Ampan	50010133
Thananan Seangkrajang	50010649
Asst.Prof.Dr. Chinda Charoenphonphanich	Advisor
Dr. Preechar Karin	Advisor

### ABSTRACT

Among internal combustion engines, diesel engines have the highest thermal efficiency for a given output power. Therefore, the global warming and energy consumption problems should be improved by increasing amount of diesel passenger cars. However, particulate matter (PM) and NO<sub>x</sub> must be removed from the exhaust gas emitted from diesel engines to protect the environment and human health. This research have two parts, the first part is study about the physical properties of particulate matter, such as Nano structure, micro structure and size distribution, by using scanning electron microscope (SEM). The second part is study about particulate trapping behavior using the full flow diesel particulate filter (DPF). The concentration of particulate matter, superficial velocity and temperature of fluid were controlled during pressure drop and filtration efficiency measurements. The different properties of each diesel particulate filter were successfully compared. In addition, particulate matter emitted from biodiesel was evaluated in the same conditions as diesel particulate matter for better understanding. The pressure drop during trapping process shows two main regions. The first region was the depth filtration, particulate trapped inside the wall of filter. The second region is the soot cake layer. Similarity, the filtration efficiency was also shows the results that strongly related to the depth filtration and soot cake layer regions. Moreover, the low quantity of particulate matter emitted from the combustion of biodiesel shows an important advantage. The results showed that the density of the soot from biodiesel was lower than that from with. The size of the biodiesel soot was smaller than that of diesel Soot too. As a result; Diesel Particulate Filter (DPF) is possible to use with biodiesel fuel. Moreover lifetime of the DPF to be used with biodiesel is longer than that with diesel.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความร่วมมือจากทั้งบุคคลและองค์กรหลายฝ่ายด้วยกัน ซึ่งบุคคลแรกที่ต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงคือ อาจารย์จินดา เจริญพรพาณิชย์ และอาจารย์ปรีชา การินทร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความเอาใจใส่ คอยติดตามความคืบหน้า ช่วยเหลือ และแนะนำสิ่งต่างๆ เสมอมา

ขอขอบคุณ ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) และสถาบันยานยนต์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านการถ่ายภาพ และขอขอบคุณอาจารย์ปัญญา ชันสุวรรณ ที่ให้ความช่วยเหลือในการถ่ายภาพ (SEM)

ทั้งนี้ต้องขอขอบคุณที่ทรงธรรม เหล่าสุวรรณรุ่นพี่ปริญญาบัตร ที่คอยให้คำปรึกษาดำเนินงานและให้ความช่วยเหลือต่างๆ มาโดยตลอด ขอขอบคุณที่ประธาน ศรีชัย ที่ให้ความช่วยเหลือด้านอุปกรณ์ ขอขอบคุณพี่ๆ ในห้องปริญญาโทท่านอื่นๆ (พีวิท พีพี พีโอ พีไอต์ พีจี) ที่คอยสอนและแนะนำในเรื่องต่างๆ ขอขอบคุณพี่เป่า ที่คอยช่วยเหลือด้านเครื่องมือและเครื่องจักรในโรงทดลอง ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ชมรมยานยนต์ ที่คอยเป็นกำลังใจและอำนวยความสะดวกด้านสถานที่ และต้องขอขอบคุณท่านอื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวไว้ ณ ที่นี้

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าทั้งสามคนขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และบุพการีเป็นอย่างสูง ที่ได้อบรมเลี้ยงดูพวกข้าพเจ้าให้การสนับสนุนด้านการศึกษามาโดยตลอด และเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้พวกข้าพเจ้ามีทุกวันนี้ได้

กิตติพงษ์

สร้อยทอง

กิติคุณ

อำพันรุ้

ธนานันท์

แสงกระจ่าง

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.5 แนวทางในการศึกษา.....	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานในงานวิจัย.....</b>	<b>7</b>
2.1 มลพิษไอเสียเครื่องยนต์ดีเซล.....	7
2.2 แหล่งกำเนิดมลพิษจากรถยนต์.....	14
2.3 เครื่องดักกรองอนุภาคมลสารในไอเสียเครื่องยนต์ดีเซล (DPF).....	17
2.4 หลักการดักกรองอนุภาคมลสาร.....	20
2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการกรองอนุภาคมลสาร.....	22
2.6 ความเร็วในการดักกรองอนุภาคมลสาร.....	22
2.7 การตรวจวัดประสิทธิภาพการดักกรอง.....	23
2.8 ความดันตกคร่อม.....	23
2.9 การวัดค่าความพรุนวัสดุทดลอง วิธีแทนที่น้ำ.....	26
2.10 การถ่ายเทความร้อน.....	27
2.11 เชื้อเพลิงไบโอดีเซล.....	32
<b>บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....</b>	<b>35</b>
3.1 อุปกรณ์และการออกแบบ.....	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก .....88



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตารางเปรียบเทียบสมบัติของเชื้อเพลิงดีเซล และไบโอดีเซล.....	34
3.1 คุณสมบัติของ DPF .....	38
3.2 สมรรถนะของปั๊มสุญญากาศ.....	40
3.3 รูปแบบการทดลอง.....	54
4.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณปริมาณความหนาแน่นของอนุภาคเขม่า.....	80



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การเกิด NO <sub>x</sub> ต่ออัตราส่วนของอากาศและเชื้อเพลิง.....	8
2.2 การเกิด CO ต่ออัตราส่วนการให้อากาศ.....	9
2.3 การรวมตัวเกาะกันเป็นก้อนของคาร์บอนเม็ด.....	10
2.4 ลักษณะของอนุภาคของแข็ง .....	12
2.5 การเกิดเขม่าในไอเสียดยนต์ดีเซลที่ความดันต่างๆของเชื้อเพลิง .....	13
2.6 จุดกำเนิดมลพิษจากรถยนต์ทั่วไป .....	14
2.7 แสดงการติดตั้งเครื่องดักกรองอนุภาคเข้ากับเครื่องยนต์ดีเซล.....	16
2.8 แสดงการติดตั้งเครื่องดักกรองของเครื่องดักกรองรังผึ้งเซรามิก.....	17
2.9 ลักษณะของเครื่องดักกรองชนิดโฟมเซรามิก.....	18
2.10 ลักษณะของเครื่องดักกรองชนิดแผ่นใยเซรามิก.....	19
2.11 กลไกการเคลื่อนตัวของอนุภาคมลสาร.....	20
2.12 แสดงอนุภาคมลสารของก๊าซไอเสียถูกคักจับด้วยกลไกต่างๆ.....	21
2.13 แสดงความเร็วต่างๆที่เกิดขึ้นในตัวดักกรองอนุภาค.....	22
2.14 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อวัดความดันตกคร่อม.....	24
2.15 แบบจำลองแนวทิศของความดันตกคร่อมในระหว่างการดักอนุภาค.....	25
2.16 การวัดค่าความพรุนวัสดุทดลอง.....	26
2.17 การพัฒนาชั้นของเขตในการพาความร้อน.....	29
2.18 การถ่ายเทความร้อนวิธีการต่างๆ.....	31
3.1 แผนผังอุปกรณ์การทดลอง.....	35
3.2 อุปกรณ์การทดลอง.....	36
3.3 วัสดุพรุน A.....	37
3.4 วัสดุพรุน B.....	37
3.5 วัสดุพรุน C.....	38
3.6 การถ่ายเทความร้อนจากผนังห้องเผาไหม้ใหม่ด้านนอกสู่ผนังห้องเผาไหม้ด้านใน.....	39
3.7 ลักษณะของฮีตเตอร์แบบเส้นแบน.....	40
3.8 บั้มสูญญากาศ.....	41
3.9 กระดาษกรองที่นำมาใช้วัดค่าประสิทธิภาพการกรอง.....	41
3.10 ถังกรองผ่านน้ำ.....	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.11 มานอมิเตอร์.....	42
3.12 (ซ้าย) ตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล (ขวา) เทอร์โมคัปเปิล ชนิดK.....	43
3.13 ชุดควบคุมอุณหภูมิ.....	44
3.14 ภาพของเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง.....	44
3.15 (ซ้าย) ลักษณะเปลวตะเกียง (ขวา) การกำหนดความยาวไส้ตะเกียงที่ทดลอง.....	45
3.16 ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่อง SEM .....	46
3.17 แสดงสัญญาณที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับตัวอย่าง.....	48
3.18 แสดงสัญญาณอิเล็กตรอนในลักษณะต่าง ๆ จากอันตรกิริยา.....	48
3.19 แสดงลักษณะการเกิด Backscatter electron และ 51 คือระยะที่ secondary electron สามารถหาจุดออกมาจากผิวตัวอย่าง.....	49
3.20 แสดงลักษณะของภาพที่ได้จากสัญญาณ Backscatter Electron .....	49
3.21 แสดงการเกิด X-ray และการเกิด Auger Electrons .....	41
3.22 กล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 30 เท่า ที่ใช้ในการถ่ายภาพของวัสดุพูน.....	56
3.23 การใช้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 30 เท่า ในการถ่ายภาพของวัสดุพูน.....	57
3.24 การเกิด Soot Cake .....	58
4.1 ภาพถ่ายผิววัสดุพูนทั้ง 3 ชนิดด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 30 เท่า.....	59
4.2 ภาพถ่ายอนุภาคเขม่าดีเซลบนวัสดุพูนชนิด A หลังทำการทดลอง.....	60
4.3 ภาพถ่ายอนุภาคเขม่าไบโอดีเซลบนวัสดุพูนชนิด A หลังทำการทดลอง.....	60
4.4 ภาพถ่ายอนุภาคเขม่าดีเซลบนวัสดุพูนชนิด B หลังทำการทดลอง.....	61
4.5 ภาพถ่ายอนุภาคเขม่าไบโอดีเซลบนวัสดุพูนชนิด B หลังทำการทดลอง.....	61
4.6 ภาพถ่ายอนุภาคเขม่าดีเซลบนวัสดุพูนชนิด C (DPF) หลังทำการทดลอง.....	62
4.7 ภาพถ่ายอนุภาคเขม่าไบโอดีเซลบนวัสดุพูนชนิด C (DPF) หลังทำการทดลอง .....	62
4.8 แสดงลักษณะการเกาะตัวกันของอนุภาคเขม่าดีเซลบนเส้นใยของกระดาษกรอง.....	63
4.9 แสดงลักษณะการเกาะตัวกันของอนุภาคเขม่าไบโอดีเซลบนเส้นใยของกระดาษกรอง.....	63
4.10 การวัดขนาดอนุภาคเขม่าดีเซลจากการถ่ายภาพ SEM .....	64
4.11 การวัดขนาดอนุภาคเขม่าไบโอดีเซลจากการถ่ายภาพ SEM .....	64
4.12 กราฟขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคเขม่าดีเซลเปรียบเทียบกับอนุภาคเขม่าไบโอดีเซล.....	65
4.13 แสดงความดันตกคร่อมที่เกิดจากอนุภาคเขม่าดีเซลและไบโอดีเซลของวัสดุพูน A และ วัสดุพูน B ที่อุณหภูมิ 25 °C.....	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 แสดงความดันตกคร่อมที่เกิดจากอนุภาคเขม่าดีเซลและไบโอดีเซลของวัสดุพอรุน C ที่อุณหภูมิ 25 °C.....	67
4.15 แสดงประสิทธิภาพการดักกรองอนุภาคเขม่าดีเซลและไบโอดีเซลของวัสดุพอรุน A และ วัสดุพอรุน B ที่อุณหภูมิ 25 °C.....	68
4.16 แสดงประสิทธิภาพการดักกรองอนุภาคเขม่าดีเซลและไบโอดีเซลของวัสดุพอรุน C ที่อุณหภูมิ 25 °C .....	69
4.17 แสดงความดันตกคร่อมที่เกิดจากอนุภาคเขม่าดีเซลและไบโอดีเซลของวัสดุพอรุน C ที่อุณหภูมิ 100 °C.....	70
4.18 แสดงประสิทธิภาพการดักกรองอนุภาคเขม่าดีเซลและไบโอดีเซลของวัสดุพอรุน C ที่อุณหภูมิ 100 °C.....	71
4.19 กราฟเปรียบเทียบค่าความดันตกคร่อมที่เกิดจากวัสดุพอรุนที่มีค่าความพรุนแตกต่างกัน.....	72
4.20 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดักกรองของวัสดุพอรุนที่มีค่าความพรุนต่างกัน .....	73
4.21 กราฟเปรียบเทียบค่าความดันตกคร่อมที่เกิดจากวัสดุพอรุนชนิดเดียวกันที่อุณหภูมิต่างกัน.....	74
4.22 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดักกรองของวัสดุพอรุนชนิดเดียวกันที่มีอุณหภูมิ ต่างกัน.....	75
4.23 กราฟเปรียบเทียบค่าความดันตกคร่อมกับพลังงานของวัสดุพอรุน A และ B .....	76
4.24 กราฟเปรียบเทียบค่าความดันตกคร่อมกับพลังงานของวัสดุพอรุน C (DPF) .....	77
4.25 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดักกรองของวัสดุพอรุน A และ B .....	78
4.26 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดักกรองของวัสดุพอรุน C (DPF).....	79
4.27 กราฟกราฟแสดงความดันตกคร่อมของน้ำมันดีเซลและไบโอดีเซลแสดงค่า $\Delta T$ .....	81

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ด้วยปัจจุบันมนุษย์ได้มีการพัฒนาเครื่องจักรกลต่างๆขึ้นมาเพื่ออำนวยความสะดวกในการเดินทางแก่ตนเองมากมาย เช่น รถยนต์ที่ใช้เครื่องยนต์ดีเซลเป็นต้นกำลังในปัจจุบันนี้ มีการเพิ่มจำนวนมากขึ้นเรื่อยๆปัญหาที่ตามมาที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ คือ ไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลที่ปล่อยออกสู่บรรยากาศ ที่มีซึ่งมลพิษของไอเสียเครื่องยนต์ดีเซล ไอเสียเครื่องยนต์ดีเซลสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่หนึ่งส่วนที่เป็นก๊าซ คือ คาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) ไฮโดรคาร์บอน (HC) ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) เป็นต้น ประเภทที่สองส่วนที่เป็นอนุภาค คือ ฝุ่นละอองทั่วของเหลวและของแข็ง เช่น เขม่า (Soot) เป็นต้นถึงแม้ว่าในปัจจุบันในด้านวิศวกรรมจะมีการออกแบบเครื่องยนต์ดีเซลด้วยเทคโนโลยีใหม่ๆให้มีการเผาไหม้สมบูรณ์ที่สุดแต่ไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ก็ยังไม่สามารถพอที่จะไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ สัตว์และพืช ด้วยเหตุนี้ทางบริษัทรถยนต์ต่างๆ จึงได้คิดค้นอุปกรณ์ที่จะช่วยลดปัญหาหมอกควันจากรถยนต์ ให้ลดลงมากที่สุด ที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดคือ อุปกรณ์กำจัดก๊าซไอเสีย (Catalytic converter) ซึ่งสามารถเปลี่ยนก๊าซพิษต่างๆโดยการทำปฏิกิริยาให้เปลี่ยนสภาพเป็นก๊าซที่ไม่มีพิษ หรือมีพิษน้อยลง ยกตัวอย่างเช่น CO HC NO<sub>x</sub> อุปกรณ์กำจัดไอเสียจะต้องสามารถเปลี่ยนก๊าซนี้ให้เป็น CO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>O N<sub>2</sub> แต่ทว่าอุปกรณ์ Catalytic converter ในปัจจุบันส่วนใหญ่ยังคงมีใช้กับเครื่องยนต์แก๊สโซลีนเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากในเครื่องยนต์ดีเซลจะมีก๊าซพิษที่เพิ่มขึ้นมาต่างจากเครื่องยนต์แก๊สโซลีน คือ SO<sub>2</sub> และเขม่า ซึ่งสารทั้งสองตัวนี้จะทำปฏิกิริยากับตัว Catalytic converter เกิดเป็นพิษขึ้น (Poisoning) เป็นผลทำให้ Catalytic converter เสื่อมสภาพในระยะเวลาอันสั้น ทำให้ยังคงมีก๊าซพิษออกจากไอเสียของรถยนต์ ดังนั้นทางบริษัทผู้ผลิตรถยนต์ได้ทำการวิจัยและคิดค้นอุปกรณ์ ที่จะช่วยลดมลพิษจากไอเสียของรถยนต์อยู่ตลอดเวลา ซึ่งเทคโนโลยีที่ทางบริษัทนำมาใช้ในการกำจัดเขม่า (Soot) ก็คือการดักกรองเพื่อที่กำจัดเขม่า อุปกรณ์ที่ใช้ก็คือ Diesel Particulate Filler ก่อนที่จะปล่อยก๊าซไอเสียผ่านเข้า Catalytic converter เพื่อให้มีการเปลี่ยนก๊าซไอเสียให้มีปริมาณเขม่าเจือจางลงหรือลดน้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งในงานวิจัยนี้เน้นไปยังประการสุดท้ายที่ศึกษา การควบคุมมลพิษทางอากาศ ก่อนที่จะระบายออกสู่บรรยากาศของอนุภาคที่มากับไอเสีย ของเครื่องยนต์ดีเซล (Exhaust aftertreatment) อุปกรณ์ที่ใช้ในการดักกรองอนุภาคโดยทั่วไปมีหลายประเภทซึ่งในแต่ละแบบก็เหมาะกับการใช้ดักกรองอนุภาคสำหรับงานต่างชนิดกัน ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในหลายๆด้านเช่น ประเภทและขนาดของอนุภาคที่ต้องการดักกรอง ตำแหน่งในการติดตั้ง งบประมาณในการติดตั้งและดูแลรักษา ข้อจำกัดของอุปกรณ์และความต้องการหรือค่ามาตรฐานที่ต้องการ ในปัจจุบันประเทศไทยมีการใช้น้ำมันที่มาจากพลังงานทดแทนอย่างหลากหลายรวมถึงการใช้น้ำมันไบโอดีเซลเข้ามาใช้ในเครื่องยนต์ดีเซล โดยที่ผ่านมามีเครื่องยนต์ดีเซลของไอเสียเครื่องยนต์ดีเซล ส่วนใหญ่นำเข้าจากต่างประเทศ ประสิทธิภาพของเครื่องดักกรองไอเสียนั้น ขึ้นอยู่กับการไหลของอนุภาค และชนิดของอนุภาคมลสารที่ออกมาจากไอเสีย ดังนั้น โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะศึกษาการดักกรองอนุภาคของเครื่องดักกรองอนุภาคในเชื้อเพลิงดีเซลกับ ไบโอดีเซล

## 1.2 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดักกรองอนุภาคนั้น ในปัจจุบันมีจำนวนมาก โดยเฉพาะในต่างประเทศ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นการศึกษาที่กล่าวถึงเฉพาะหลักการเบื้องต้น ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

Preechar KARIN (2010)[1] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการกำจัดมลพิษอนุภาค (Particulate Matter: PM) ที่ถูกปล่อยมาพร้อมกับไอเสีย (Exhaust gas) จากเปลวของการเผาไหม้แบบแพร่ (Diffusion Flame) เช่นเครื่องยนต์ดีเซล (Diesel Engine) เครื่องยนต์ดีเซลไอ (Gasoline Direction Engine) โดยการศึกษาโครงสร้างของมลพิษอนุภาคในระดับไมโครและนาโนสเกล โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (Scanning Electron Microscope: SEM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนรณามิสชัน (Transmission Electron Microscope: TEM) และการศึกษาถึงการกำจัดอนุภาคมลพิษโดยการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างมลพิษกับออกซิเจน ตามหลักการของอุปกรณ์กำจัดมลพิษอนุภาค (Diesel Particulate Filter: DPF) การวิเคราะห์หาค่าพลังงานกระตุ้น (Apparent Activation Energy) ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างก๊าซออกซิเจนกับมลพิษอนุภาคที่มีส่วนประกอบหลักคือ คาร์บอน[1]

สมชาย จันทวานา (2535) ได้ศึกษาถึงผลกระทบของการซ่อมบำรุง เครื่องยนต์และคุณภาพของน้ำมันดีเซล ต่อสมรรถนะและปริมาณมลสารที่ปล่อยออกมาจากไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซล ได้กระทำ

โดยการทดสอบเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก บนไดนาโมมิเตอร์ที่สภาวะการทำงานต่างๆก่อนและหลัง  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อนำมาใช้เพื่อประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การซ่อมบำรุง และน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับการทดลองก่อนการซ่อมบำรุงเป็นมันดีเซลที่มีอุณหภูมิ  
 กลั่น 317 °C และ 357 °C ส่วนหลังการซ่อมบำรุงใช้น้ำมันดีเซลสองชนิดคือ ชนิดที่มีอุณหภูมิกลั่นที่  
 317 °C และ 357 °C ตามลำดับ ทั้งนี้จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบในรูปของ Output Power,  
 Specific Fuel Consumption, ปริมาณของ CO, HC, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> และควันดำ ที่สภาวะการทำงานต่างๆ  
 ก่อนและหลังการซ่อมบำรุง และผลกระทบของน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีคุณสมบัติต่างกัน จากการทดลอง  
 พบว่าถ้าหากเครื่องยนต์ทำงานที่ EQR สูงกว่า 0.8 (EQR คือ Equivalence Ratio) ไม่ว่าจะใช้น้ำมัน  
 D317 หรือ D357 ก็ตามยังไม่สามารถขจัดปัญหาควันดำที่ออกมากับไอเสียได้ทั้งหมด トラบใดที่  
 เครื่องยนต์ยังทำงานที่สภาวะเกินพิกัด[14]

Mayer และ Buck (1992) ได้ทำการศึกษาถึงแนวความคิดใหม่ เกี่ยวกับเส้นใยเซรามิกไฟเบอร์  
 สำหรับดักกรองอนุภาคมลสารจากเครื่องยนต์ดีเซล เนื่องจากอนุภาคของไอเสียเครื่องยนต์ดีเซล จะ  
 เป็นสารที่ก่อให้เกิดมะเร็ง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการออกกฎหมายควบคุม ให้อยู่ในระดับที่ไม่  
 เป็นอันตรายต่อมนุษย์ ซึ่งวัสดุที่นำมาทำเป็นไส้กรองประกอบด้วยวัสดุ 2 ชนิด คือ เซรามิกไฟเบอร์  
 จาก Mullite Polycrystal และ เซรามิกไฟเบอร์จาก SiO<sub>2</sub> ในการผลิตไส้กรองด้วยการนำแผ่นเซรามิก  
 ไฟเบอร์ไปพันรอบแท่งทรงกระบอก แล้วให้ก๊าซไอเสียวิ่งผ่านเข้าไปในแท่งทรงกระบอกและผ่านไฟ  
 เบอร์และเส้นใยดังกล่าวจะเป็นตัวดักกรองอนุภาคเอาไว้ และปล่อยให้ก๊าซไหลผ่านไส้กรองไปได้ซึ่ง  
 จากการทดสอบสามารถดักกรองอนุภาคได้ถึง 90 เปอร์เซ็นต์[15]

Scott และคณะ(1992) ได้ทำการศึกษาแบบจำลองอนุภาคทางคณิตศาสตร์ ของไส้กรองแบบไฟ  
 เบอร์สำหรับดักกรองอนุภาคเครื่องยนต์ดีเซล ซึ่งไส้กรองจะใช้เส้นใยไฟเบอร์ เพื่อดักกรองอนุภาคที่  
 ออกมากับก๊าซไอเสีย รูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ใช้ พื้นฐานกลไกการสะสม ของอนุภาคขนาด  
 เล็กที่อนุภาคของเข็มีมีการกระจายตัวอย่างหลากหลาย กลไกพื้นฐานการดักกรองอนุภาคมีขนาด  
 เล็ก 3 กลไก คือ Interception, Inertial Impaction, Diffusion ในการทดสอบใช้เครื่องยนต์ขนาดเล็ก 1  
 สูบ จากการทดสอบพบว่า ประสิทธิภาพการดักกรองของอนุภาคที่ออกมากับก๊าซไอเสียขึ้นอยู่กับ  
 พื้นที่ด้านหน้าของกรอง ความหนาของไส้กรอง ขนาดของเส้นใยไฟเบอร์[16]

Mayer และคณะ (1993) ได้ศึกษาวิธีการออกแบบเครื่องดักกรองอนุภาคมลสารแบบตาข่าย  
 โดยใช้เส้นใยของเซรามิกที่ใช้เป็นโครงถักตาข่าย มีความยืดหยุ่นในระดับปานกลาง และมีลักษณะ  
 ของผิวหน้าเป็นแบบพิเศษ มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยฉับพลัน โดยปัจจัยที่ใช้ในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์คือ ความยืดหยุ่นของเส้นใยไฟเบอร์ ความพรุนของผิวหน้า ความแตกต่างของความดัน ความแตกต่างของอุณหภูมิ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย ความยาวของเครื่องดักกรอง พบว่าการจัดวางของเส้นใยที่เป็นรูปขดกันหอย และความแตกต่างความดันมีความเหมาะสมที่ใช้เป็นเครื่องดักกรองอนุภาคมลสารจากไอเสียเครื่องยนต์ดีเซล[17]

Johnson และคณะ (1994) ได้ศึกษาวิธีในการควบคุมการแพร่กระจายของอนุภาคจากเครื่องยนต์ดีเซลที่ทำงานหนัก โดยพิจารณาผลจากการแพร่แบบต่างๆไป และแบบพิเศษ และการสูมตัวอย่างการแพร่ และคุณสมบัติทางเคมี ชีวะ ภายภาพของอนุภาค โดยที่เทคนิคในการควบคุมอนุภาคถูกพัฒนาให้สามารถรองรับมาตรฐานสากลได้[18]

Ambrogio และคณะ (2001) ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพก๊าซไอเสียเครื่องยนต์ดีเซลด้วยการใช้เครื่องดักกรองอนุภาคมลสารและแคตาไลติก ซึ่งในการทดลองได้มีการสร้างรูปแบบจำลอง และการทดลองจริงของปฏิกิริยาต่างๆ ลักษณะของการไหลในที่จะเป็นรูปแบบทรงกรวย โดยพิจารณาจากความพรุนของเม็ดเซรามิกโพรเซอไมท์ ขนาดของเขม่า ความดันตกคร่อม และประสิทธิภาพในการดักกรองด้วยเม็ดโพรเซอไมท์จะเป็นฟังก์ชันขนาดของเขม่า พบว่า เครื่องดักกรองที่ใช้กรองทำมาจาก  $Cs_2V_2O_7$  ในชั้นแรกจะมีประสิทธิภาพที่สูง และมีประสิทธิภาพลดลงกว่าเดิมเมื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งจากผลการทดสอบมีความสอดคล้องกับรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น [22]

Gulijk และคณะ (2001) ได้ศึกษาถึงการเลือกการพัฒนาตัวอุปกรณ์สำหรับการดักกรองอนุภาคมลสารเครื่องยนต์ดีเซล โดยพิจารณาถึงพลังงานและความดันแตกต่าง ที่ตัวเครื่องดักกรองซึ่งในเครื่องดักกรองแบบนี้จะแบ่งการไหลของแก๊สออกมากกว่า 2 ส่วน ที่ทำให้เกิดความดันแตกต่างของก๊าซไอเสีย และใช้ CFD กำหนดหาขนาดแผ่นตะแกรงที่จะรองรับซีเขม่า พบว่าการดักกรองอนุภาคมลสาร และความดันตกคร่อม ตลอดการดักกรองซึ่งอยู่ในค่าที่สามารถยอมรับได้[19]

Saracco และคณะ (2001) ได้ทำการศึกษาการเร่งปฏิกิริยาการดักกรองสำหรับอนุภาคมลสารในเครื่องยนต์ดีเซล โดยใช้เม็ดเซรามิกโพรเซอไมท์ที่ทำมาจาก  $CsVO_3$  และ KCl ซึ่งผลที่ได้นั้นพบว่า การสะสมของเขม่าจากการดักกรอง  $CsVO_3$  และ KCl ให้ผลที่น่าพึงพอใจ ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ การดักกรองทำให้ความดันตกคร่อมตลอดการดักกรอง ซึ่งอยู่ในค่าที่สามารถยอมรับได้ และเหมาะสมสำหรับการนำเครื่องยนต์ไปใช้งาน[20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Industrial Center – The Hong Kong Polytechnic University (2002) ได้ศึกษาวิธีการ ออกแบบเครื่องดักกรองอนุภาคมลสาร สำหรับลดการแพร่กระจายของอนุภาคมลสาร จากก๊าซไอเสีย ของยานพาหนะ ที่ใช้เครื่องยนต์ดีเซลเป็นต้นกำลังในรถแท็กซี่ รถประจำทางมินิบัส และรถแวน โดยการพิจารณาการดักกรองจากไส้กรองที่สร้างขึ้น และความดันตกคร่อมที่ส่งผลต่อสมรรถนะของ เครื่องยนต์ ซึ่งจากการทดลองพบว่าเทคนิคดังกล่าวสามารถดักกรองอนุภาคมลสาร จากก๊าซไอเสีย ของเครื่องยนต์ได้ทั้งหมด 30 เปอร์เซ็นต์[21]

### 1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 ศึกษาลักษณะโครงสร้างของอนุภาคเขม่าของน้ำมันดีเซลและน้ำมันไบโอดีเซล
- 1.2.2 ศึกษาการดักกรองของตัวกรองอนุภาคเขม่าของน้ำมันดีเซลและน้ำมันไบโอดีเซล

### 1.4 ขอบเขตของการศึกษา

- 1.3.1 สร้างชุดทดสอบการดักกรองอนุภาคเพื่อจำลองท่อไอเสียใช้สำหรับการทดสอบกับควัน จากตะเกียง
- 1.3.2 ทำการทดสอบกับวัสดุพรม 3 ชนิดคือ 1. วัสดุพรม A (ความพรม 98 %) 2. วัสดุพรม B (ความพรม 96 %) 3. วัสดุพรม C คือ DPF (ความพรม 55 %)
- 1.3.3 ทำการทดสอบวัสดุพรมทั้งสามชนิดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และทดสอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส กับวัสดุพรม C เท่านั้น โดยทดสอบกับเชื้อเพลิงดีเซลและไบโอดีเซล
- 1.3.4 ทำการทดลองแล้วบันทึกผลคือ ความดันตกคร่อม นำข้อมูลมาวิเคราะห์แล้วสรุปผล

### 1.5 แนวทางในการศึกษา

- 1.4.1 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ทฤษฎีการเผาไหม้ ข้อมูลเครื่องยนต์ดีเซล ข้อมูลเชื้อเพลิงดีเซล และไบโอดีเซล ตลอดจนการออกแบบชุดทดลอง การเลือกใช้อุปกรณ์ และการเก็บบันทึก ข้อมูล
- 1.4.2 ออกแบบและสร้างชุดทดลอง
- 1.4.3 ติดตั้งเครื่องมือวัดและบันทึกผลต่างๆ ได้แก่ เครื่องบันทึกความดัน และเครื่องวัดอุณหภูมิ
- 1.4.4 ทำการทดลอง บันทึกผล วิเคราะห์ แล้วสรุป

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 สามารถทราบผลกระทบของการใช้เชื้อเพลิงไบโอดีเซลกับเครื่องจักรกรองอนุภาคดีเซล
- 1.5.2 ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง สามารถนำไปเป็นแนวทางในการศึกษาและพัฒนาเครื่องจักรกรองอนุภาคไอเสียเครื่องยนต์ดีเซลต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# หลักการและทฤษฎี

### 2.1 มลพิษไอเสียเครื่องยนต์ดีเซล

ไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลที่ปล่อยออกสู่บรรยากาศสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทดังนี้ ประเภทที่หนึ่งส่วนที่เป็นก๊าซ คือ คาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) ไฮโดรคาร์บอน (HC) ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) ประเภทที่สองส่วนที่เป็นอนุภาค คือ ฝุ่นละอองตัวของเหลวและของแข็ง เช่น ขี้เถ้า (Soot) มลพิษแต่ละชนิดสามารถอธิบายรายละเอียด [3] ดังนี้

#### 2.1.1 ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO<sub>x</sub>)

ในก๊าซไอเสียเป็นการยากที่จะบอกว่า NO<sub>x</sub> เกิดมากน้อยแค่ไหนและเกิดขึ้นบริเวณใดบ้างภายในกระบอกสูบเนื่องจาก ในขณะที่เผาไหม้สามารถเกิดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ดังนี้

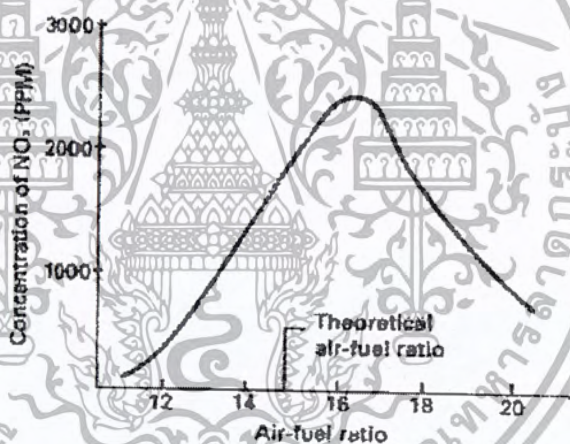
1. เกิดที่อุณหภูมิเปลวไฟ (ประมาณ 2,000 เคลวิน) ไนโตรเจนในอากาศทำปฏิกิริยากับออกซิเจน เรียกปฏิกิริยานี้ว่า Thermal NO
2. ไนโตรเจนในเชื้อเพลิงถูกปลดปล่อยออกมาที่อุณหภูมิต่ำ (ประมาณ 1,300 เคลวิน) เป็นก๊าซโมเลกุลเล็กๆ เช่น NH<sub>3</sub>, HCN แล้วจึงเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจน เรียกว่า Fuel NO
3. เกิดโดยวิธีอื่นนอกจากที่กล่าวมาแล้วที่สภาวะการผสมที่เหมาะสม และอุณหภูมิต่ำ (ประมาณ 1,600 เคลวิน) ตัวอย่างเช่น ไนโตรเจนทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระของไฮโดรคาร์บอนจากเชื้อเพลิงโดยกลไกการเกิด HCN ก่อน เรียกว่า Prompt NO
4. ในก๊าซกลุ่มก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) เป็นก๊าซมลพิษ โดยทั่วไปประกอบด้วยไนตริกออกไซด์ มากกว่าไนโตรเจนไดออกไซด์ โดยมลสารที่เริ่มต้นคือ NO ถูกออกซิไดซ์กับออกซิเจนและ โอโซน ในบรรยากาศกลายเป็น NO<sub>2</sub>

ทั้งนี้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ดีเซล อัตราส่วนอากาศและเชื้อเพลิง กับอุณหภูมิ

นั้น มีการแปรเปลี่ยนกันก่อนข้างซับซ้อน แต่โดยทั่วไปการเกิด NO<sub>x</sub> นั้นเกิดขึ้นที่การสันดาปที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ผ่านการแก้ไขใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบรูณ์ในช่วงดังกล่าวจะทำให้อุณหภูมิที่สูงมากและค่อนข้างนานตามไดอะแกรมการเผาไหม้ ดังนั้น  $\text{NO}_x$  จึงเกิดช่วงนี้มากดังรูปที่ 2.1 เป็นการยากที่จะบอกว่ไนโตรเจนออกไซด์ เกิดมากน้อยเพียงใดและเกิดขึ้นบริเวณใดบ้าง ภายในกระบอกสูบเครื่องยนต์ โดยปฏิกริยานี้จะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิเกิน 2,000 เคลวิน ไนโตรเจนออกไซด์จะเกิดมากถ้าการเผาไหม้สมบรูณ์ ปัจจัยที่สำคัญที่ทำให้เกิดไนโตรเจนออกไซด์ ก็คือ อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ และอัตราส่วนผสมของอากาศกับน้ำมันเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ ของเครื่องยนต์ดีเซลดังนี้

1. เมื่ออุณหภูมิห้องเผาไหม้สูงการเกิดไนโตรเจนออกไซด์สูง
2. เมื่อเพิ่มความดันในกระบอกสูบให้สูงขึ้น พบว่าการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ก็จะมีปริมาณลดลง
3. อัตราส่วนผสมที่ทำให้เกิดไนโตรเจนออกไซด์สูงสุดอยู่ที่ 16:1 โดยปริมาตร



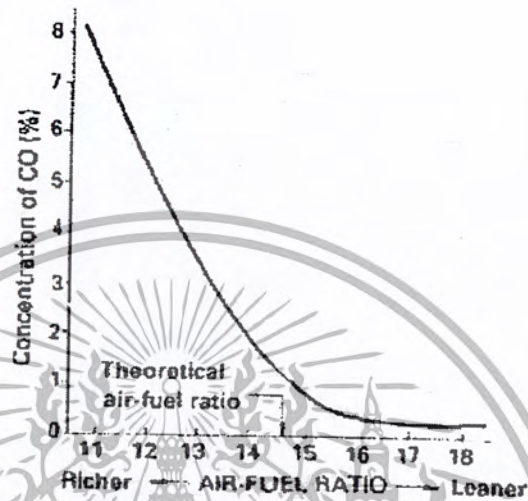
รูปที่ 2.1 การเกิด  $\text{NO}_x$  ต่ออัตราส่วนของอากาศและเชื้อเพลิง [2]

### 2.1.2 ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO)

คาร์บอนมอนนอกไซด์ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น เกิดจากการเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิงไม่สมบรูณ์ เนื่องจากออกซิเจนไม่เพียงพอ เช่น เกิดจากอัตราส่วนผสมเชื้อเพลิงหนา เป็นต้น โดยทางทฤษฎีแล้ว ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ไม่ควรเกิดถ้าส่วนผสมบางแต่โดยความเป็นจริงแล้วก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์เกิดขึ้นได้แม้ส่วนผสมบาง เนื่องจากโดยทั่วไปของเครื่องยนต์ดีเซล จะมีอัตราส่วนอากาศที่มากกว่าอยู่แล้วประมาณ 1-20 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นปริมาณคาร์บอนมอนนอกไซด์ ที่เกิดขึ้นจึงน้อยดังรูปที่ 2.2 การเกิดก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ เพราะเหตุผลต่างๆ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การกระจายส่วนผสมของอากาศและเชื้อเพลิงไม่ทั่วถึงและเท่ากันทุกส่วนของห้องเผาไหม้
2. อุณหภูมิโดยรอบห้องเผาไหม้ซึ่งติดกับโลหะจะต่ำ ทำให้การลุกไหม้ไม่ถึงอุณหภูมิขณะเผาไหม้ทำให้ไม่สมบูรณ์



รูปที่ 2.2 การเกิด CO ต่ออัตราส่วนการให้อากาศ[2]

### 2.1.3 ไฮโดรคาร์บอน (HC)

เครื่องยนต์ดีเซลจะปล่อย ก๊าซไฮโดรคาร์บอนออกมาน้อย เนื่องจากเหตุผลหลายประการซึ่งในการเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิงส่วนใหญ่จะเผาไหม้ได้สมบูรณ์ แต่ก็อาจจะมีน้ำมันบางส่วนไม่เผาไหม้ในบางจังหวะการทำงาน สารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่ได้เผาไหม้ จะออกมาในรูปก๊าซปนอยู่ในไอเสีย เครื่องยนต์ดีเซลจะมีอัตราอากาศที่มากกว่าอยู่แล้วประมาณ 1-20 เปอร์เซ็นต์ แต่ปริมาณไฮโดรคาร์บอนจะเพิ่มขึ้นจากสาเหตุอื่นๆ ได้อีก คือ

1. อุณหภูมิต่ำ ก๊าซที่อยู่ในห้องเผาไหม้กับส่วนที่เป็นโลหะจะมีอุณหภูมิต่ำทำให้เปลวไฟมีอุณหภูมิต่ำลง จึงไม่เกิดการเผาไหม้
2. กำลังอัดกระบอกสูบต่ำ อาจเกิดขึ้นที่ในขณะที่ขบรถเข้าหรือในช่วงที่จะเบรกรถ
3. ส่วนผสมของอากาศและเชื้อเพลิงที่หนาเกินไป ทำให้มี HC ที่ติดค้างไม่ได้ทำปฏิกิริยากับ  $O_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. น้ำมันที่หล่อลื่นในเสื้อสูบและกระบอกสูบเผาไหม้ไม่หมด
5. ส่วนผสมบางเกินไปทำให้เปลวไฟดับจึงเกิด HC
6. น้ำมันที่มีการรั่วไหลออกจากหัวฉีดแล้วไม่สามารถเผาไหม้ต่อไปได้

#### 2.1.4 อนุภาคของแข็ง (Particulates)

ไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลจะมีละอองเขม่าจากคาร์บอนในสถานะของแข็งปนอยู่ด้วยซึ่งเกิดขึ้นบริเวณที่ไอดีมีความเข้มข้นสูงภายในกระบอกสูบขณะเกิดการสันดาปซึ่งเรามองเห็นในรูปควันดำจากท่อไอเสีย พร้อมกับส่งกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ต่อสิ่งแวดล้อมด้วย ละอองคาร์บอนในไอเสียนี้มีความเข้มข้นสูงสุดเมื่อเครื่องยนต์มีโหลดสูงสุด ที่สภาวะนี้เชื้อเพลิงจะถูกฉีดด้วยอัตราสูงเพื่อให้เครื่องยนต์ให้กำลังสูงสุด ไอดีจึงมีความเข้มข้นมากและความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงสูง ซึ่งเราสังเกตได้จากควันดำที่ออกมาจากปลายท่อไอเสียของรถบรรทุก หรือหัวรถจักร ซึ่งกำลังเร่งขึ้นทางชัน หรือขณะออกรถ[8]

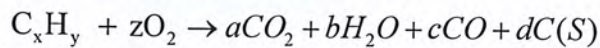


รูปที่ 2.3 การรวมตัวเกาะกันเป็นก้อนของคาร์บอนเม็ดกลม

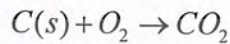
เขม่าชิ้นเล็กๆเหล่านี้เป็นการรวมตัวเกาะกันเป็นก้อนของคาร์บอนเม็ดกลมในสถานะของแข็งจำนวนมากโดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 10 nm ถึง 80 nm ( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ nm}$ ) ดังรูป 2.3 โดยส่วนใหญ่มีขนาด 15-30 nm คาร์บอนเม็ดกลมในสถานะของแข็งเหล่านี้ดูดซับไฮโดรคาร์บอนและสารประกอบอื่นๆไว้ที่ผิว ชิ้นเขม่าเล็กๆหนึ่งชิ้นอาจประกอบด้วยเม็ดคาร์บอนเหล่านี้จำนวนถึง 4,000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อคาร์บอนเม็ดกลมเหล่านี้เกิดในย่านที่ไอดีซึมภายในห้องเผาไหม้ซึ่งไม่มีออกซิเจนเพียงพอในการทำปฏิกิริยากับคาร์บอนให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์

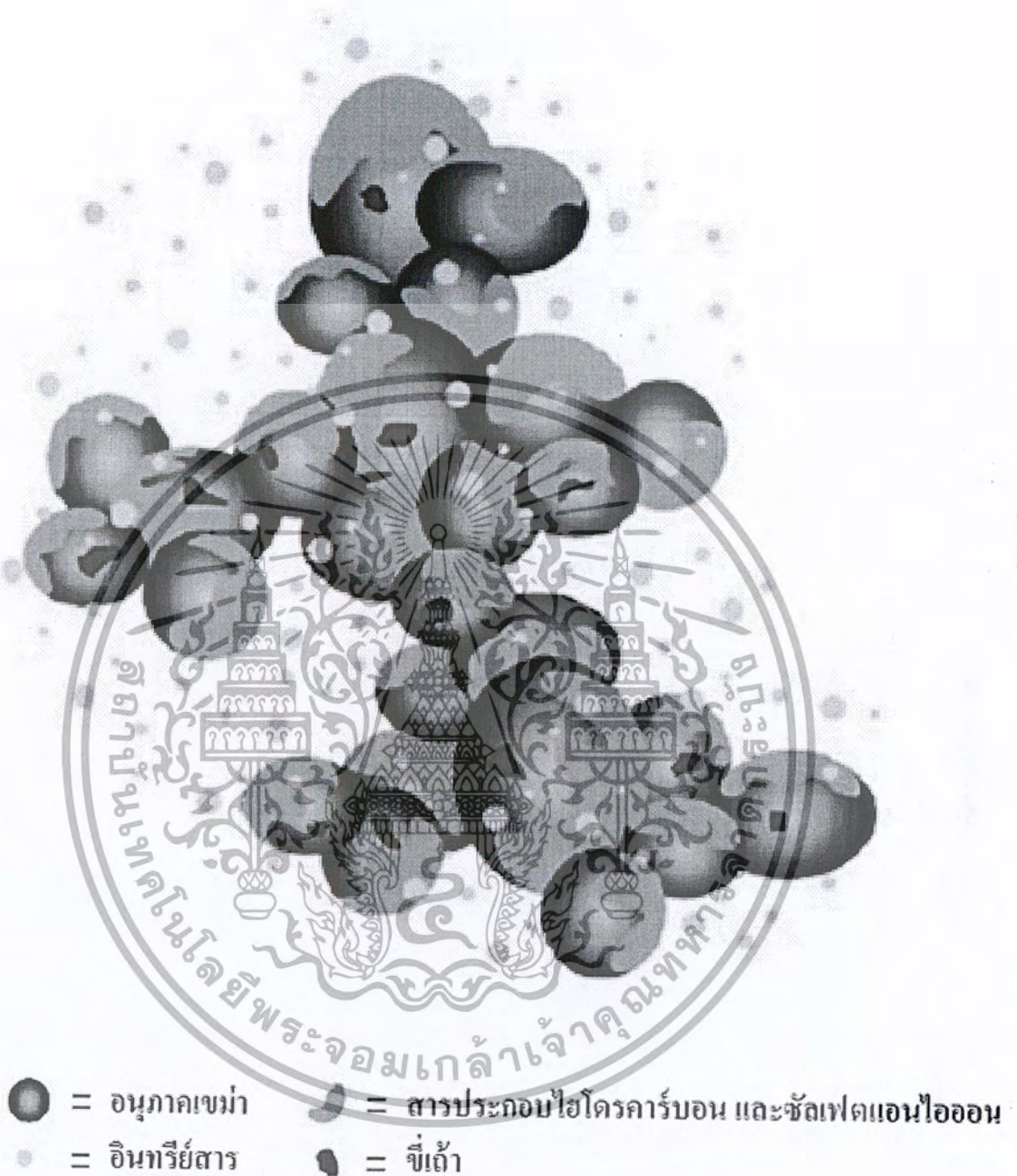


แต่หลังจากคาร์บอนเหล่านี้จะถูกก๊าซซึ่งไหลปั่นป่วนให้ห้องเผาไหม้คลุกเคล้าให้ผสมกับออกซิเจนส่วนที่เหลือและทำปฏิกิริยากันจนกลายเป็น  $CO_2$



ไม่ต่ำกว่า 90% ของเม็ดคาร์บอนภายในเครื่องยนต์จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนดังกล่าวมาแล้ว จึงเหลือส่วนที่ปนออกมาในไอเสียน้อยมาก หากเครื่องยนต์ดีเซลใช้ไอดีความเข้มแบบสตอยคิโอเมตริกแทนไอดีจาง ปริมาณเขม่าในไอเสียจะสูงกว่านี้มาก และจะสูงเกินกว่าที่มาตรฐานกำหนดไว้อย่างมากด้วยประมาณ 25% หรือต่ำกว่านั้นของคาร์บอนในเขม่าเกิดจากสารประกอบในน้ำมันหล่อลื่นซึ่งระเหยและทำปฏิกิริยาระเกิดการสันดาป ส่วนที่เหลือเป็นคาร์บอนจากเชื้อเพลิงประมาณ 0.2-0.5% ของเชื้อเพลิงที่ใช้ เนื่องจากเครื่องยนต์ดีเซล มีอัตราส่วนการอัดสูงจึงมีการขยายตัวของก๊าซสูงเช่นเดียวกันในขณะทำงาน อุณหภูมิของก๊าซที่ขยายตัวนี้จึงค่อนข้างต่ำ สารประกอบที่มีจุดเดือดสูงในเชื้อเพลิงและน้ำมันหล่อลื่นจึงกลั่นตัวเป็นของเหลวจับที่ผิวของเม็ดคาร์บอน เราเรียกปริมาณของสารนี้ที่ผิวของผงเขม่าว่า เศษสารอินทรีย์อินทรีย์ละลายได้ (solution organic fraction) หรือ SOF ดังรูปที่ 2.4 โดยมีปริมาณขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในกระบอกสูบ เมื่อเครื่องยนต์มีโหลดต่ำ อุณหภูมิภายในกระบอกสูบจะลดลงและอาจเหลือเพียง 200 องศาเซลเซียส ในช่วงปลายของจังหวะทำงาน และช่วงที่ไอเสียถูกระบายในสภาวะดังกล่าว SOF อาจมีปริมาณสูงถึง 50% ของปริมาณเขม่าทั้งหมด แต่ในสภาวะอื่นของเครื่องยนต์ที่อุณหภูมิภายในกระบอกสูบสูง และเกิดการกลั่นเป็นของเหลวได้ยาก ปริมาณ SOF อาจต่ำเพียง 3% ของปริมาณเขม่าทั้งหมด SOF นี้ประกอบด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนและไฮโดรเจน  $SO_2$ ,  $NO$ ,  $NO_2$  นอกนั้นเป็นธาตุอื่นในปริมาณน้อยมากเช่น กำมะถัน สังกะสี ฟอสฟอรัส แคลเซียม เหล็ก ซิลิคอน และ โครเมียม เชื้อเพลิงดีเซลมีกำมะถัน แคลเซียม เหล็ก ซิลิคอน และ โครเมียมผสมอยู่ ส่วนน้ำมันหล่อลื่นมีสังกะสี ฟอสฟอรัส และแคลเซียมปนอยู่ด้วย[8]

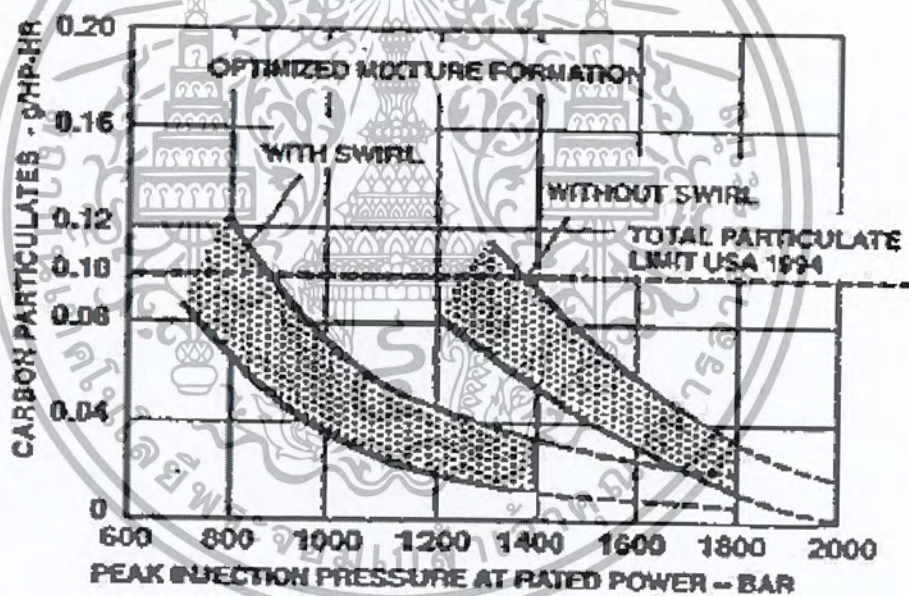
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ลักษณะของอนุภาคของแข็ง [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซีเขม่า(Soot) อนุภาคของสารพวกนี้ จะถูกขับออกมาจากเครื่องยนต์ภายใต้การทำงานต่างๆ ซีเขม่าในที่นี้จะมีลักษณะเป็นอนุภาคเล็กๆของคาร์บอน ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงพวกไฮโดรคาร์บอน โดยมีออกซิเจนไม่เพียงพอ อาจพิจารณาการเกิดซีเขม่า จากลักษณะละอองเชื้อเพลิงที่ฉีดเข้าไปในอากาศที่หมุนวนในกระบอกสูบ ละอองเชื้อเพลิงจะถูกการหมุนวนของอากาศ (Air swirling) พัดจนทำให้เกิดการกระจายตัวของเชื้อเพลิงกับอากาศ ซึ่งมีปริมาณแกนกลางของละออง (Spray core) ปลายละออง(Spray tail) บริเวณส่วนผสมที่บางที่ติดไฟได้ (Lean flame region : LEF) บริเวณส่วนผสมผสานที่ไม่ติดไฟ (Lean flame out region : LFOR) พบว่าบริเวณส่วนผสมที่บางที่ไม่ติดไฟ จะมีส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศ ที่ทำให้เกิดการเผาไหม้บางส่วนซึ่งจะทำให้เกิดเขม่าควันได้มากที่สุดอย่างไรก็ตามในส่วนปลายละออง และส่วนแกนกลางของละอองก็ทำให้เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ได้เช่นกัน



รูปที่ 2.5 การเกิดเขม่าในไอเสียรถยนต์ดีเซลที่ความดันต่างๆของเชื้อเพลิง [2]

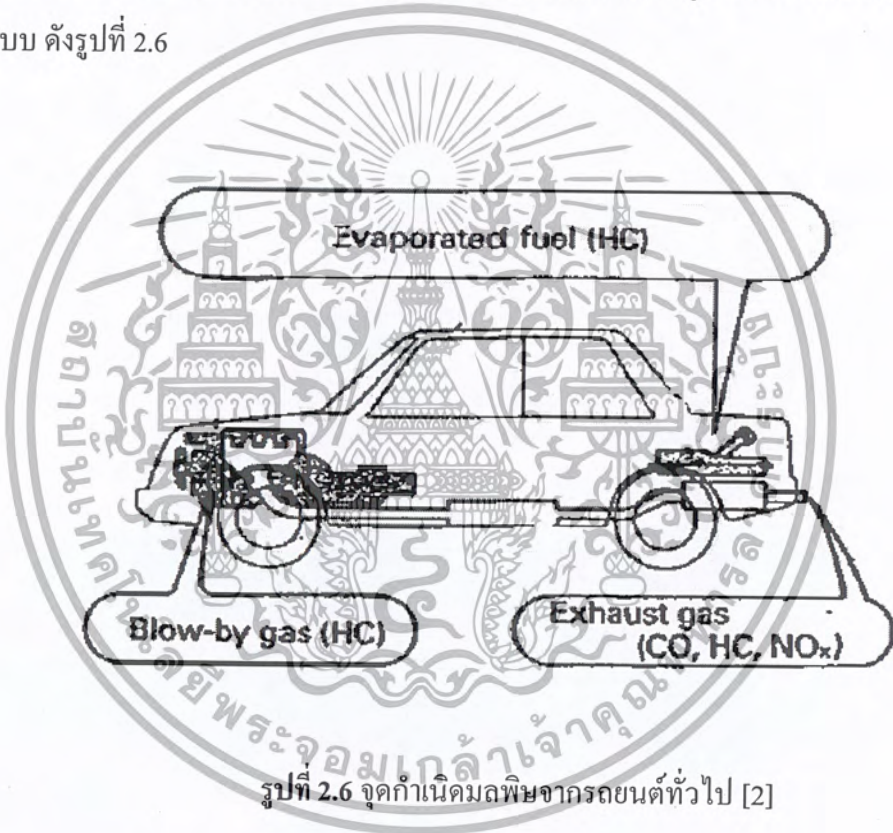
อนุภาคของแข็งในไอเสียรถยนต์สามารถลดได้ด้วยรูปแบบของเครื่องยนต์และสภาวะใช้งานต่างๆแต่ก็ยังมีผลเสียด้านอื่นๆตามมาด้วยเสมอ หากเพิ่มช่วงเวลาที่เกิดการสันดาปให้ยาวนานขึ้นโดยอาศัยรูปร่างของห้องเผาไหม้ และจังหวะการฉีดเชื้อเพลิง ก็จะสามารถลดจำนวนผงเขม่าลงได้ เนื่องจากผงเขม่าที่เกิดขึ้นมีเวลาเพิ่มขึ้นในการผสมกับออกซิเจนและถูกเผาไหม้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาร์บอนไดออกไซด์ แต่ช่วงเวลาของการสันดาปที่เพิ่มขึ้นทำให้อุณหภูมิในกระบอกสูบสูงขึ้นและเพิ่มปริมาณ  $\text{NO}_x$  ตามไปด้วย สำหรับเครื่องยนต์ส่วนใหญ่การออกแบบและควบคุมยังไม่เพียงพอสำหรับการลดผงเขม่าในไอเสียให้อยู่ในระดับปลอดภัย

## 2.2 แหล่งกำเนิดมลพิษจากรถยนต์

ยานพาหนะประเภทต่างๆนับว่าเป็นแหล่งกำเนิดมลพิษทางอากาศที่สำคัญอีกประเภทหนึ่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งมลพิษทางอากาศในเมืองใหญ่ เช่น กรุงเทพมหานคร ขอนแก่น เชียงใหม่ เป็นต้น ทั้งนี้จุดที่ยานพาหนะที่ใช้เครื่องยนต์ดีเซลเป็นต้นกำลังปล่อยมลพิษออกสู่บรรยากาศมีที่มาจากระบบต่างๆ 3 ระบบ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 จุดกำเนิดมลพิษจากรถยนต์ทั่วไป [2]

### 2.2.1 ระบบระเหย

คือปริมาณเชื้อเพลิงที่ระเหยออกจากถังน้ำมัน การระเหยจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของบรรยากาศ อุณหภูมิของเครื่องยนต์ และความสามารถในการระเหยมลพิษที่ออกมา นั่น ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารไฮโดรคาร์บอนทั้งหมด แต่อย่างไรก็ตามนับเป็นปริมาณที่น้อยมากเมื่อเทียบกับระบบอื่น

### 2.2.2 ระบบกันอ่าง

คือมลพิษจากกันอ่างเกิดขึ้นจากการรั่วซึมของก๊าซในลูกสูบผ่านแหวนและลูกสูบลงมาที่กันอ่าง ซึ่งจะต้องถูกกำจัดออก เนื่องจากก๊าซเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับน้ำมันหล่อลื่นทำให้เกิดตะกอน เกิดเป็นกรดกัดกร่อน โลหะและชิ้นส่วนต่างๆทำให้เครื่องยนต์เสียหาย ปริมาณก๊าซพิษที่ออกมาจากกันอ่างก็ยังมีปริมาณน้อย และในปัจจุบันผู้ผลิตได้ปรับปรุง เครื่องยนต์ที่ผลิตใหม่ให้สามารถเก็บก๊าซเหล่านี้ เข้าในกระบอกสูบได้อีกพร้อมกับทำให้เกิดการสันดาปได้เหมือนกับไอดีทั่วไป ทั้งนี้อาจจะพูดได้ว่าระบบนี้ก่อให้เกิดปัญหาน้อยมาก

### 2.2.3 ระบบไอเสีย

คือมลพิษจากระบบไอเสียนั้นถือเป็นอันตรายต่อมนุษย์มากที่สุด และเป็นระบบที่ปรับปรุงได้ยากเนื่องจากธรรมชาติของการเผาไหม้ ก็จะเกิดก๊าซพิษอยู่ในขั้นตอนสุดท้าย และมีปริมาณมากที่สุด มีค่าโดยประมาณ 60-80 เปอร์เซ็นต์ ของมลพิษทั้งหมดที่ออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซล มลพิษจากไอเสียจะประกอบไปด้วย HC ที่เผาไหม้แล้วบางส่วน  $\text{CO}$   $\text{SO}_2$   $\text{NO}_x$  และเขม่า (Soot) ซึ่งปริมาณของสารเหล่านี้จะมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ ของเครื่องยนต์และสภาวะการใช้เครื่องยนต์ที่แตกต่างกัน

จากระบบไอเสีย สารพิษจากระบบ ไอเสียถือว่าเป็นสารมลพิษที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์มากที่สุด และเป็นระบบที่ปรับปรุงแก้ไขได้ยากอีกด้วย ไอเสียจากเครื่องยนต์จะมีประมาณ 60-80 เปอร์เซ็นต์ ของสารมลพิษทั้งหมดที่ปล่อยออกมาจากยานพาหนะ สารมลพิษจากไอเสียนี้จะประกอบไปด้วย ไฮโดรคาร์บอนที่ยังไม่ได้เผาไหม้ ไฮโดรคาร์บอนที่เผาไหม้แล้วบางส่วน คาร์บอนมอนอกไซด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ สารละออง และออกไซด์ของไนโตรเจน ซึ่งปริมาณของสารต่างๆเหล่านี้จะมากขึ้นขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ ของเครื่องยนต์ มลพิษที่ปล่อยจากยานพาหนะ มีด้วยกันหลายชนิดจากแหล่งต่างๆ

ทั้งนี้ปริมาณของสารมลพิษที่ปล่อยออกมา จะต้องสัมพันธ์กับชนิดและสภาพการทำงานของเครื่องยนต์ด้วยเช่น เครื่องยนต์ดีเซลจะปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ออกมาน้อยกว่า เครื่องยนต์เบนซิน แต่กลับปล่อยออกไซด์ของไนโตรเจนและอนุภาคต่างๆมาจากตัวแปรการทำงานที่มีผลต่อสมรรถนะ ประสิทธิภาพ สำหรับการปล่อยมลพิษจำเพาะของเครื่องยนต์ดีเซลคือ อัตราการไหลของมลแต่ละ

ชนิดต่อหน่วยกำลังที่ออกมา[3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 เครื่องดักกรองอนุภาคมลสารในไอเสียเครื่องยนต์ดีเซล (Diesel particulate filter: DPF)

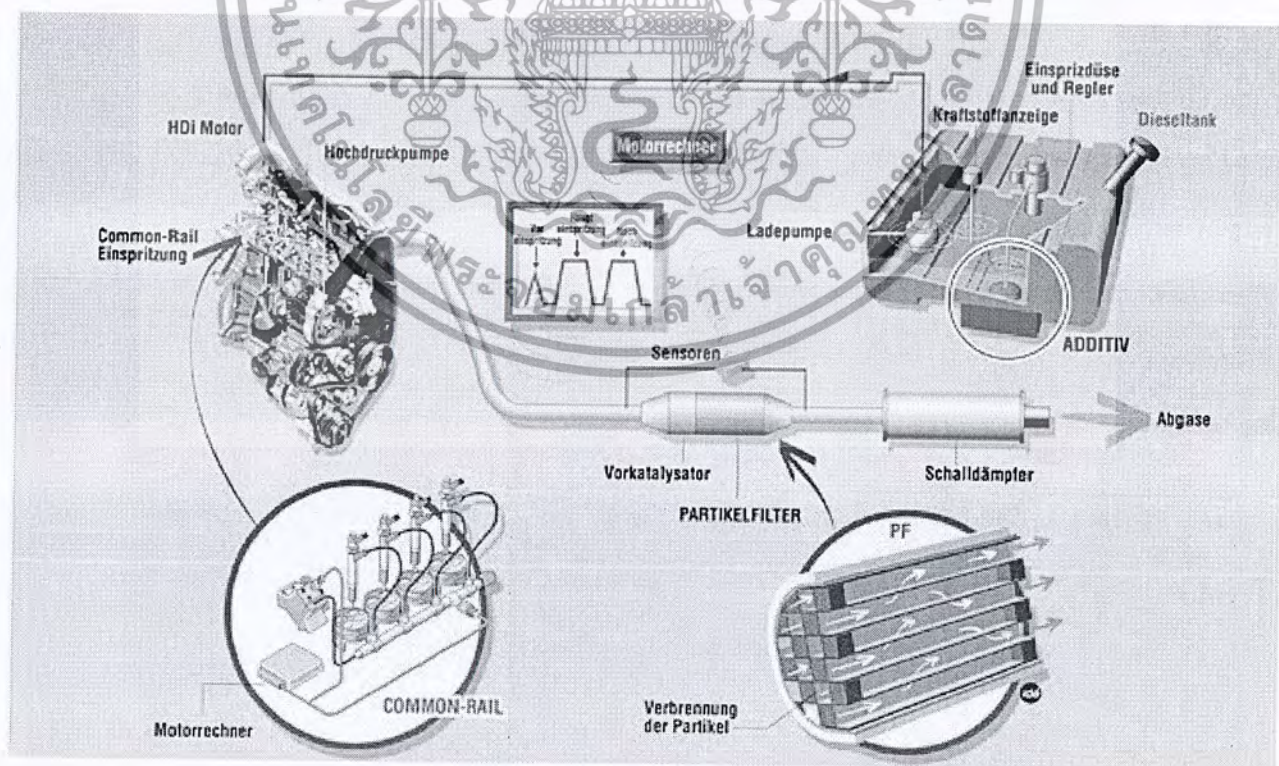
อนุภาคมลสารที่ออกมาจากไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลสามารถควบคุมได้โดยใช้เครื่องกรองหรือเครื่องดักกรองอนุภาคมลสาร ซึ่งจะต้องมีลักษณะพิเศษคือต้องทนอุณหภูมิสูงของไอเสียได้และสามารถทำความสะอาดตัวเอง ตามปกติจะกระทำโดยการออกซิไดซ์อนุภาคเขม่าที่สะสมอยู่ในเครื่องดักกรองอนุภาคมลสาร แต่วิธีการนี้ก็จะมีความยุ่งยากหลายประการคือ

ประการที่หนึ่ง เครื่องดักกรองอนุภาคแม้แต่สะอาดแต่ก็ไปเพิ่มความดันในระบบไอเสีย

ประการที่สอง ความดันนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อเครื่องดักกรองเก็บอนุภาคมลสารไว้มากขึ้น

ประการที่สาม ภายใต้สภาวะการทำงานตามปกติของเครื่องยนต์ดีเซล อนุภาคมลสารที่เก็บสะสมไว้จะไม่สามารถจุดระเบิดและออกซิไดซ์ตัวเอง

ประการที่สี่ เมื่อเกิดการจุดระเบิดของอนุภาคมลสาร กระบวนการเผาไหม้จะต้องถูกควบคุมอย่างใกล้ชิดเพื่อป้องกันไม่ให้อุณหภูมิสูงเกินไปและไม่ให้เครื่องดักกรองเกิดความเสียหาย[3]



รูปที่ 2.7 แสดงการติดตั้งเครื่องดักกรองอนุภาคเข้ากับเครื่องยนต์ดีเซล [1]

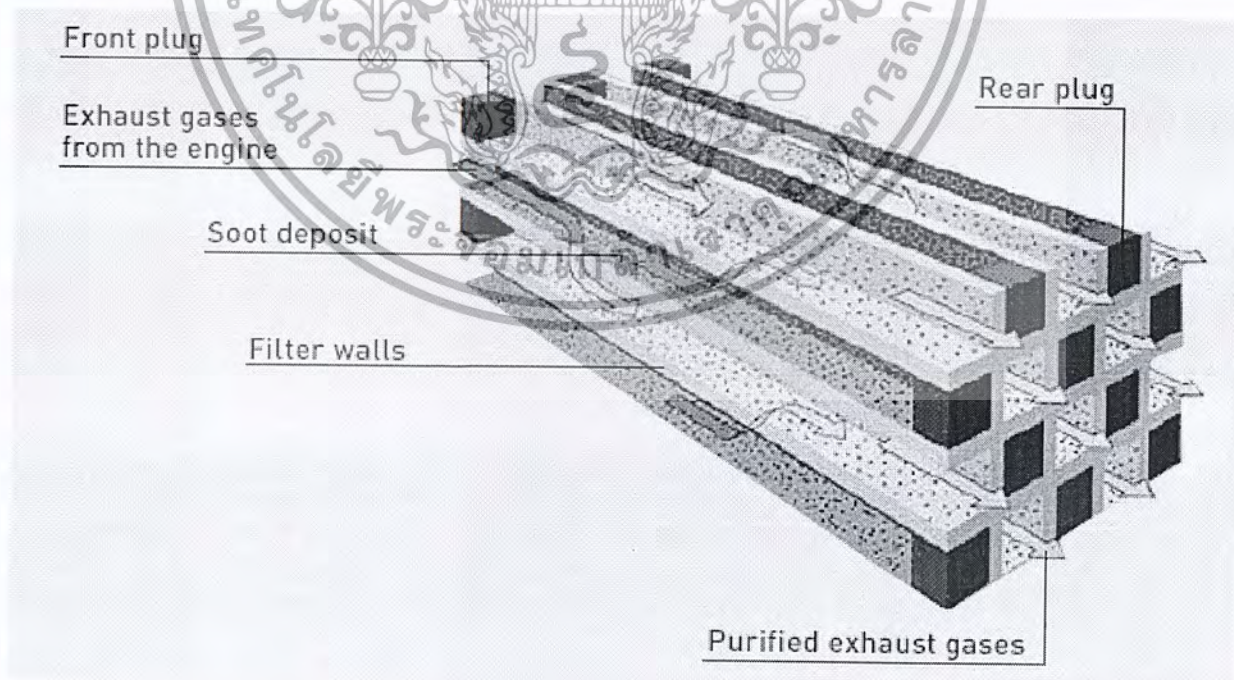
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีสืบค้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมเห็นชอบขอขอยืมด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## จำนักรอสมุคกลาง พระจอมเกล้าตากกระบี่

เครื่องดักกรองอนุภาคมีหลายชนิด เช่นชนิดรังผึ้งเซรามิก (Ceramic monoliths) ชนิดตระแกรงเคลือบอะลูมินา (Alumina-coated mesh) ชนิดโฟมเซรามิก (Ceramic foam) และแผ่นใยเซรามิก (Ceramic fiber mat) เป็นต้น ซึ่งแต่ละชนิดจะมีการสูญเสียความดันและประสิทธิภาพในการกรองแตกต่างกันในแต่ละชนิด

### 2.3.1 เครื่องดักกรองชนิดรังผึ้งเซรามิก (Ceramic monoliths)

ด้านหนึ่งของช่อง (Cell) ถูกปิดไว้ที่ปลายทางเข้าและอีกด้านหนึ่งของช่องถูกปิดไว้ที่ปลายทางออกสลับกัน ทำให้ไอเสียที่มีอนุภาคมลสารถูกบังคับให้ไหลผ่านผนังของช่องที่เป็นเซรามิกซึ่งมีรูพรุน ด้านนอกของรังผึ้งถูกหุ้มไว้ด้วยฉนวนและเครื่องดักกรอง ถูกติดตั้งไว้ใกล้กับเครื่องยนต์เพื่อรักษาอุณหภูมิของเครื่องดักกรองให้สูงไว้เท่าที่จะเป็นไปได้ เมื่อเครื่องดักกรองมีอนุภาคมลสารสะสมไว้มากขึ้น ความดันตกคร่อมก็จะเพิ่มขึ้นทำให้ต้องมีการฉีดเชื้อเพลิงเข้ามากขึ้น เพื่อชดเชยกำลังที่สูญเสียไป ส่งผลให้อุณหภูมิของไอเสียสูงขึ้น ซึ่งผลสุดท้ายก็จะทำให้เกิดการจุดระเบิดของอนุภาคมลสารโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราการออกซิไดซ์อนุภาคมลสารนี้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของเครื่องดักกรอง ซึ่งเครื่องดักกรองชนิดนี้จะลดอนุภาคมลสารที่ออกมาที่ไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลได้ถึงร้อยละ 70 หรือมากกว่าดูลักษณะการทำงานดังรูปที่ 2.8

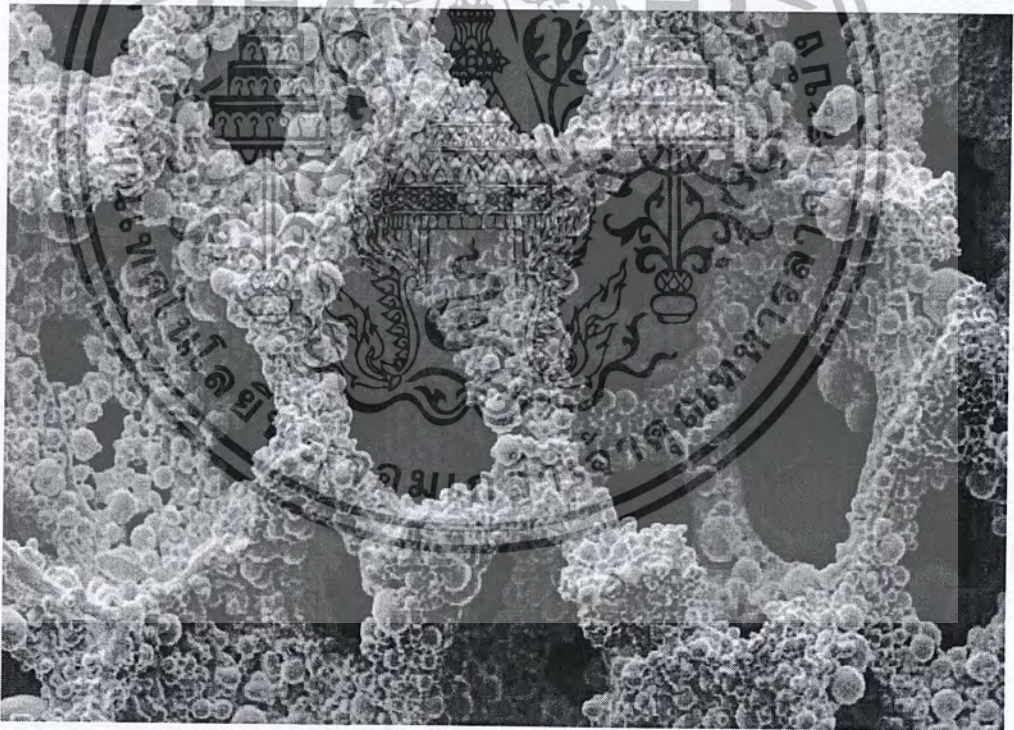


รูปที่ 2.8 แสดงการติดตั้งเครื่องดักกรองของเครื่องดักกรองรังผึ้งเซรามิก [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา หรือเผยแพร่ข้อมูลของอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.2 เครื่องดักกรองชนิดโฟมเซรามิก (Ceramic foam)

เครื่องดักกรองอนุภาคมลสารชนิดนี้ ขนาดของเม็ดโฟมจะต้องมีขนาดเล็กเพียงพอที่จะดักกรองอนุภาคมลสารของไอเสีย เมื่อนำเม็ดโฟมเซรามิกบรรจุลงในเสื้อเครื่องดักกรองจะต้องมีช่องหรือรูพรุนเพื่อให้อนุภาคมลสารไหลผ่านช่องระหว่างเม็ดโฟมเซรามิกและในขณะที่เดียวกันก็จะทำให้เม็ดโฟมเซรามิกดักจับหรือสะสมอนุภาคไว้รอบๆเม็ดโฟม ส่วนไอเสียที่ผ่านการดักกรองไหลต่อไปตามท่อไอเสียและออกสู่บรรยากาศต่อไป ทั้งนี้สำหรับการเครื่องดักกรองจะต้องอยู่ใกล้กับเครื่องยนต์เพื่อรักษาอุณหภูมิให้สูงในระดับหนึ่งที่จะเป็นไปได้ เมื่อเครื่องดักกรองมีอนุภาคมลสารสะสมไว้มากขึ้น ความดันตกคร่อมก็จะเพิ่มขึ้นทำให้เชื้อเพลิงต้องถูกฉีดเข้ามามากขึ้นเพื่อชดเชยกำลังที่สูญเสียไป ซึ่งผลสุดท้ายก็จะทำให้เกิดการจุดระเบิดของอนุภาคมลสารโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราการออกซิไดซ์อนุภาคมลสารนี้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของเครื่องดักกรอง ลักษณะของเครื่องดักกรองชนิดโฟมเซรามิก ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ลักษณะของเครื่องดักกรองชนิด โฟมเซรามิก [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.3 เครื่องดักกรองชนิดแผ่นใยเซรามิกหรือไฟเบอร์ (Ceramic fiber mat)

เครื่องดักกรองอนุภาคมลสารชนิดนี้ จะนำแผ่นใยเซรามิกหรือไฟเบอร์มาวางซ้อนกันเป็นชั้นๆ ซึ่งจะทำให้ไอเสียที่ไหลผ่านเครื่องดักกรองชนิดนี้ จะถูกดักกรองอนุภาคของมลสารตามขนาดของรูพรุนหรือช่องของเครื่องดักกรอง ส่วนไอเสียที่ผ่านจากเครื่องดักกรอง ก็จะไหลตามท่อและออกสู่บรรยากาศต่อไปเมื่อเครื่องดักกรองสะสมอนุภาคมลสารไว้มากขึ้น ความดันตกคร่อมก็จะเพิ่มขึ้นทำให้เชื้อเพลิงต้องถูกฉีดเข้ามากขึ้นเพื่อชดเชยกำลังที่สูญเสียไป ซึ่งผลสุดท้ายก็จะทำให้เกิดการจุดระเบิดของอนุภาคมลสารโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราการออกซิไดซ์อนุภาคมลสารนี้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของเครื่องดักกรอง ลักษณะของเครื่องดักกรองชนิดแผ่นใยเซรามิก ดังรูปที่ 2.10

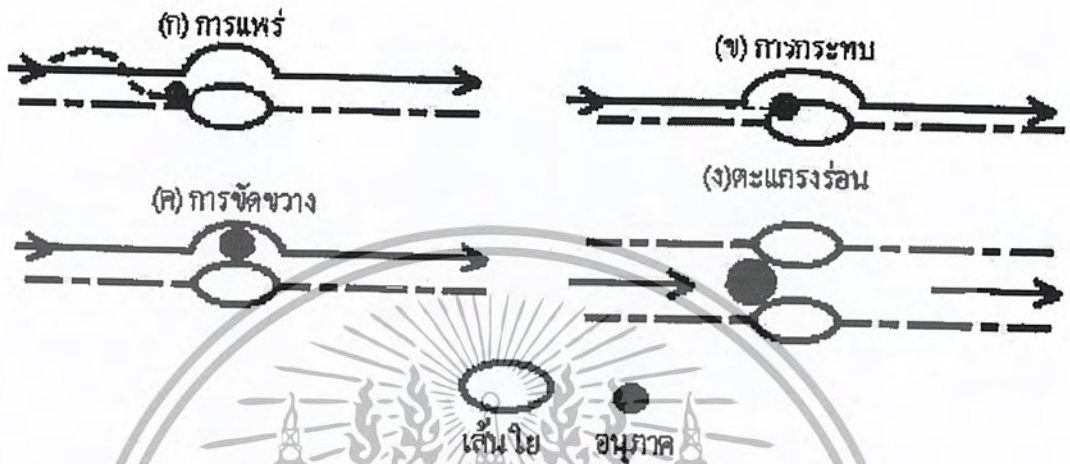


รูปที่ 2.10 ลักษณะของเครื่องดักกรองชนิดแผ่นใยเซรามิก [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 หลักการพื้นฐานการดักกรองอนุภาคมลสาร

กลไกการเคลื่อนตัวของอนุภาค อนุภาคจะถูกจับหรือเกาะติดกับเส้นใยวัสดุไส้กรอง โดยกลไกที่สำคัญ 4 กลไก คือ การกระทบ การแพร่ การขัดขวาง และตะแกรงร่อน ดังที่แสดงไว้ในรูป 2.11



รูปที่ 2.11 กลไกการเคลื่อนตัวของอนุภาคมลสาร [3]

**การแพร่ (Diffusion)** การแพร่ของอนุภาคเป็นแบบ บราวเนียน (Brownian movement) ซึ่งเกิดจากการชนกัน ระหว่างอนุภาคทำให้อนุภาคเคลื่อน ที่แบบมีทิศทางไม่แน่นอนจนไปชนกับเส้นใยของกระดาษกรอง การแพร่แบบ บราวเนียน (Brownian motion) นี้จะมีอัตราเพิ่มขึ้นเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กลง ดังนั้นกลไกการแพร่จะช่วยกำจัดอนุภาคขนาดเล็ก แสดงดังรูปที่ 2.11(ก)

**การกระทบ (Impaction)** เกิดเมื่ออนุภาคไม่สามารถ หักหลบสิ่งกีดขวางได้ทัน เนื่องจากแรงเฉื่อย ทำให้ตัวอนุภาคเองหลุดออกจาก เส้นกระแสอากาศ จึงชนและฝังติดกับสิ่งกีดขวางนั้นเพราะโมเมนตัมของอนุภาค กลไกส่วนใหญ่เกิดกับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่และมีความเร็วสูง แสดงดังรูปที่ 2.11(ข)

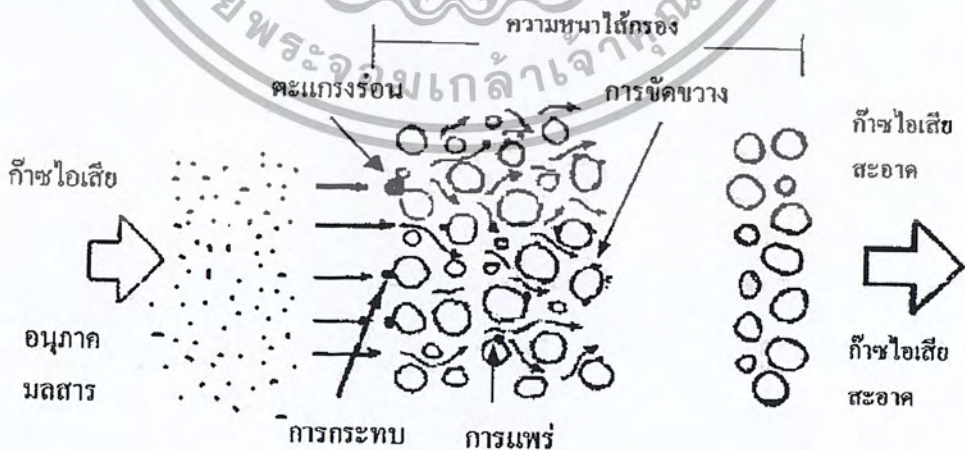
**การขัดขวาง (Interception)** การไหลของอากาศเมื่อผ่านเส้นใยกระดาษกระดาษกรองเส้น กระแสของอากาศจะไหลโค้งรอบเส้นใย อนุภาคที่ปะปนมากับอากาศอาจไหลตามเส้นกระแสผ่านไป หรืออาจหลุดออกจากเส้นกระแสติดกับเส้นใยก็ได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างเส้นกระแสกับเส้นใย ถ้าระยะนี้มีค่าเท่ากับรัศมีของอนุภาค อนุภาคจะติดกับเส้นใยเพราะแรงวันเดอร์วาล์ว (Van Der

Waals forces) แรงวันเดอร์วาล์วเป็นแรงดึงดูดระหว่าง โมเลกุลและจะมีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่าง โมเลกุลน้อยลง ดังแสดงในรูปที่ 2.11(ค)

ตะแกรงร่อน (Sieve) เกิดเมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่กว่ารูตะแกรงร่อนซึ่งทำให้ไม่สามารถผ่านไป ได้ ความเร็วของอนุภาคนี้คำนวณได้จากระยะทางที่อนุภาคเจาะทะลุเข้ามาในรูตะแกรงร่อนจนถึงจุดหยุดนิ่ง และเนื่องจากอนุภาคส่วนใหญ่มีรูปร่างที่ไม่ราบเรียบ จึงเกิดการขัดกันตรงขอบของตะแกรงร่อน ทำให้รูของตะแกรงร่อนมีขนาดเล็กลงไปอีก ซึ่งทำให้สามารถจับอนุภาคที่เล็กลงไปได้อีก ดังแสดงในรูปที่ 2.11(ง)

#### 2.4.1 การกรองขั้นพื้นฐาน

การกรองเป็นวิธีการที่สามารถกำจัดสิ่งเจือปนที่มีอนุภาคเป็นของแข็ง โดยนำวัสดุที่มีรูพรุนมา ขวางการไหลของก๊าซไอเสีย ซึ่งจะยอมให้ก๊าซไอเสียไหลผ่านแต่อนุภาคมลสารหรือซีม่าที่มีขนาด ใหญ่กว่ารูพรุนนั้น จะถูกดักกรองไว้ด้านหน้าของไส้กรอง ส่วนอนุภาคขนาดที่เล็กกว่าจะถูกดักด้วย กลไกอื่น ๆ ดังแสดงรูปที่ 2.12 โดยวัสดุไส้กรองที่นิยมใช้มีด้วยกันสองแบบ คือ แบบที่หนึ่งเป็นความ หนาแน่นของเส้นใย (Packed filter) ซึ่งมีเส้นใยหยาบสานกันหลวมๆ แล้วอัดเป็นแผ่นเพิ่มความหนา มี ลักษณะ เช่นเดียวกับที่ใช้ในเครื่องปรับอากาศ ไส้กรองแบบนี้เหมาะกับก๊าซที่มีความสกปรกไม่มาก นัก ส่วนแบบที่สองมีเป็นกระดาษกรอง หรืออาจจะเป็นเส้นใยชั้นเดียวทอเป็นผืนผ้า (Single layer filter) เหมาะสำหรับการกรองอนุภาคหรือฝุ่นที่มีความละเอียดมากออกจากก๊าซที่สกปรก เส้นใยที่ใช้ อาจ เป็นเส้นใยแก้วหรือเส้นใยเซรามิก



รูปที่ 2.12 แสดงอนุภาคมลสารของก๊าซไอเสียถูกดักจับด้วยกลไกต่างๆ [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการดักกรองอนุภาคมลสาร

ปัจจัยที่มีผลต่อการดักกรองอนุภาคมลสารของเครื่องยนต์ดีเซล ได้แก่

2.5.1 ความหนาแน่นของอนุภาค

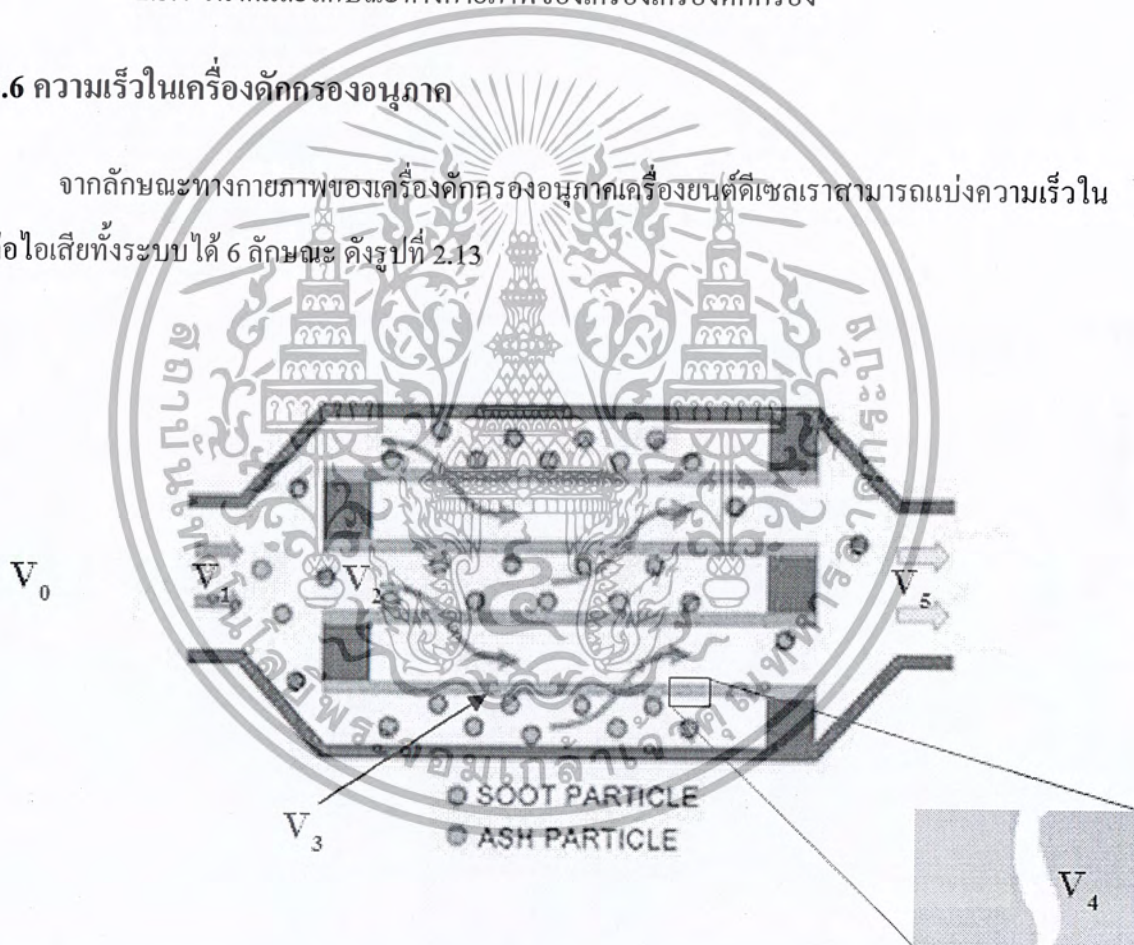
2.5.2 ความหนาแน่นของเครื่องดักกรอง

2.5.3 ความเร็ว และความดันตกคร่อมของก๊าซไอเสียก่อนเข้าเครื่องดักกรอง

2.3.4 ขนาดและลักษณะทางกายภาพของเครื่องดักกรอง

## 2.6 ความเร็วในเครื่องดักกรองอนุภาค

จากลักษณะทางกายภาพของเครื่องดักกรองอนุภาคเครื่องยนต์ดีเซลเราสามารถแบ่งความเร็วในท่อไอเสียทั้งระบบได้ 6 ลักษณะ ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงความเร็วต่างๆที่เกิดขึ้นในตัวดักกรองอนุภาค [11]

$V_0$  คือ ความเร็วในท่อไอเสีย

$V_1$  คือ ความเร็วก่อนเข้าตัวดักกรองอนุภาค

$V_2$  คือ ความเร็วที่วิ่งในช่องตัวดักกรองอนุภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$V_3$  คือ ความเร็วที่จ่อหน้าผิว (Super fital velocity)

$V_4$  คือความเร็วที่อยู่ในรูพรุน (Filtration velocity)

$V_5$  คือความเร็วที่ออกจากตัวดักกรองอนุภาค

## 2.7 การตรวจวัดประสิทธิภาพการดักกรอง

ในการวัดประสิทธิภาพการดักกรองของตัวกรองอนุภาค ทำโดยวัดค่าจากกระดาศกรองที่นำมาติดตั้งไว้หลังตัวดักกรองอนุภาค โดยทำการตั้งค่าเครื่องตรวจไว้ที่ 100 เปอร์เซ็นต์ หรืออีกวิธีหนึ่งคือการใช้เครื่องตรวจวัดความหนาแน่นของอนุภาคมลสาร มาทำการวัดค่าความเข้มข้นก่อนและหลังที่อนุภาคไปเสียผ่านเครื่องดักกรองอนุภาค

$$\eta_{trap} = \frac{C_u - C_d}{C_u} \times 100 \quad (2.1)$$

เมื่อ  $\eta_{trap}$  คือ ประสิทธิภาพการดักกรอง

$C_u$  คือ ความหนาแน่นของอนุภาคมลสารก่อนเข้าเครื่องดักกรอง

$C_d$  คือ ความหนาแน่นของอนุภาคมลสารออกจากเครื่องดักกรอง

## 2.8 ความดันตกคร่อม

การคำนวณหาความดันตกคร่อมของเครื่องดักกรองอนุภาคนั้นเป็นส่วนสำคัญอีกส่วนหนึ่งในการทดลองเนื่องจากความดันตกคร่อมมีผลต่อการศึกษาการใช้เครื่องดักกรองอนุภาคในเชื้อเพลิงดีเซลและไบโอดีเซล โดยการคำนวณหาค่าความดันตกคร่อมนั้นจะใช้สมการเบอร์นูลีในการคำนวณดังสมการ[10]

$$Porosity (\%) = \frac{V_{air}}{V_m + V_{air}} V_{diff} \quad (2.2)$$

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

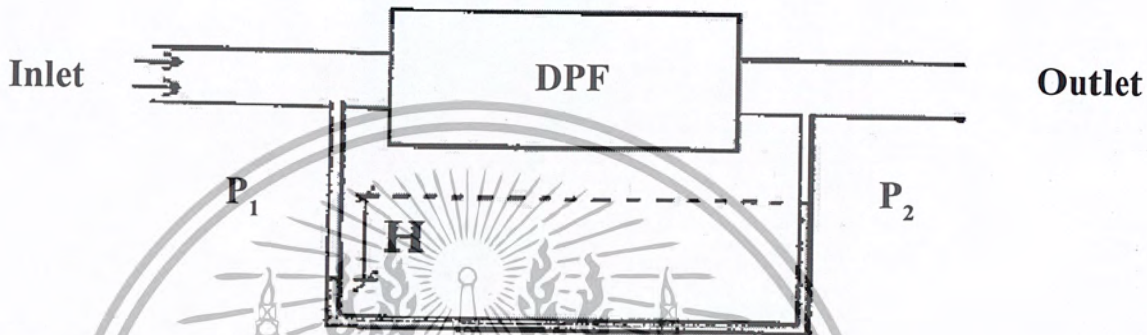
$\frac{V^2}{2g}$  คือ เสดเนื่องจากความเร็ว (Velocity Head)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$Z$  คือ เสดเนื่องจากความสูง (Elevation Head)

$H$  คือ เสดรวมสำหรับการไหล (Total Head)

การวัดความดันตกคร่อมทำการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อวัดค่าความดันที่ขาเข้าและขาออกของอุปกรณ์ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อวัดความดันตกคร่อม [12]

จากสมการ (2.2) จะได้ว่า

$$\frac{P_1 - P_2}{\rho g} = H \quad (2.2.1)$$

$$\frac{\Delta P}{\rho g} = H \quad (2.2.2)$$

$$\Delta P = \rho g H \quad (2.2.3)$$

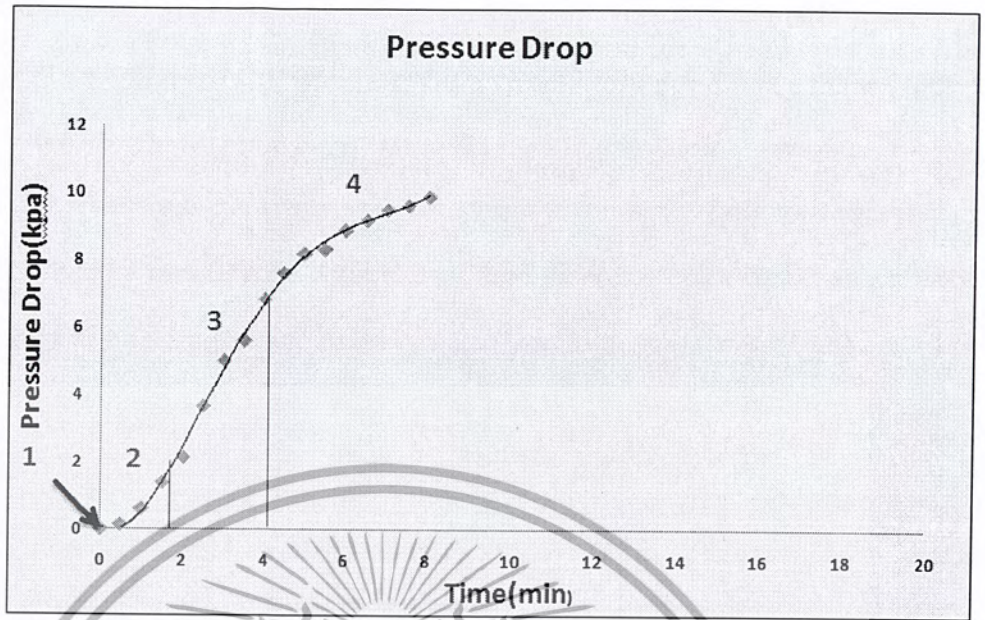
ดังนั้นค่าความดันตกคร่อมของเครื่องดักกรองอนุภาคสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.2.3

### 2.8.1 แบบจำลองความดันตกคร่อมที่เกิดในเครื่องดักกรองอนุภาค (DPF)

ในการเกิดความดันตกคร่อมในเครื่องดักกรองอนุภาคความดันตกคร่อมกับการสะสมอนุภาค

เขม่าเทียบกับเวลาจะมีลักษณะดังรูปที่ 2.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 แบบจำลองแนวคิดของความดันตกคร่อมในระหว่างการตกอนุภาค [1]

ภาพที่ 1 คือ ตักขณะของรูพรุนที่สะอาด

ภาพที่ 2 คือ ตักขณะของรูพรุนที่เริ่มมีอนุภาคเข้ามาเข้ามาจับในรูพรุน ความดันตกคร่อมจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ

ภาพที่ 3 คือ ตักขณะของรูพรุนที่อนุภาคเข้ามาเริ่มปิดรูพรุนความดันตกคร่อมจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

ภาพที่ 4 คือ ตักขณะของรูพรุนที่อนุภาคเข้ามาเต็มรูพรุนและเริ่มจับที่ผิวหน้าวัสดุทดลองเรียกอนุภาคที่จับตัวกันว่า Soot Cake ความดันตกคร่อมจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆและคงที่

## 2.9 การวัดค่าความพรุนวัสดุทดลองวิธีแทนที่น้ำ

ในการวัดค่าความพรุนของวัสดุทดลองสามารถทำได้หลายวิธีแต่ที่นิยมทำกันมากคือ วิธีการแทนที่น้ำ ซึ่งมีขั้นตอนการทำการวัดค่าความพรุนโดยวิธีการแทนที่น้ำ ดังนี้

2.9.1 ทำการวัดปริมาตรของวัสดุทดลอง  $V_{am}$

2.9.2 ทำการวัดปริมาตรของน้ำ  $V_{water}$

2.9.3 นำวัสดุทดลองมาใส่ในน้ำแล้วทำการวัดปริมาตรน้ำที่เพิ่มขึ้นมา  $V_{diff}$

2.9.4 แทนค่าลงในสมการเพื่อหาค่าความพรุน



รูปที่ 2.16 การวัดค่าความพรุนวัสดุทดลอง

สมการการหาค่าความพรุน

$$V_{am} = V_m + V_{air} \quad (2.3)$$

$$V_{air} = V_{am} - V_{diff} \quad (2.4)$$

$$Porosity (\%) = \frac{V_{air}}{V_m + V_{air}} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $Porosity (\%)$  คือ ความพรุนของวัสดุทดลอง (%)

$V_{am}$  คือ ปริมาตร ของวัสดุทดลอง

$V_m$  คือ ปริมาตรเนื้อวัสดุทดลอง

$V_{air}$  คือ ปริมาตรของอากาศที่แทรกตัวอยู่ในวัสดุทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้ หากมีข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยเป็นอย่างสูงและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$V_{diff}$  คือ ปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นเมื่อทำวัสดุทดลองแทนที่ลงในน้ำ

## 2.10 การถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) จากวัตถุหนึ่งซึ่งร้อนกว่าไปยังวัตถุหนึ่งซึ่งเย็นกว่า หรือจากส่วนของวัตถุที่ร้อนกว่าไปสู่ส่วนของวัตถุที่เย็นกว่า หรือจากที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่ที่ต่ำ จะมีการถ่ายเทความร้อนได้ 3 วิธีด้วยกัน [5]

### 2.10.1 การถ่ายเทความร้อนโดยการนำ (conduction)

เป็นการถ่ายเทความร้อนจากที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่อุณหภูมิต่ำ โดยความร้อนเคลื่อนที่ไปตามเนื้อวัตถุ แต่เนื้อวัตถุที่เป็นตัวกลางไม่ได้เคลื่อนที่แต่ใด เช่น เมื่อเผาปลายข้างหนึ่งของแท่งโลหะที่ปลายข้างนั้นจะสันสะเก็ดหรือเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น โมเลกุลของโลหะที่ปลายข้างนั้นจะสันสะเก็ดหรือเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น โมเลกุลนี้จะไปชนกับโมเลกุลที่อยู่เคียงอื่นๆ ทำให้โมเลกุลข้างเคียงสันสะเก็ดหรือเคลื่อนที่เร็วขึ้นด้วย เป็นลักษณะเช่นนี้ต่อเนื่องกันไป โดยวิธีนี้ความร้อนสามารถถูกส่งไปยังอีกปลายข้างหนึ่งได้

กฎสหสัมพันธ์ของการนำความร้อน โดยถือเกณฑ์การสังเกตจากการทดลอง กำเนิดจากบิโธต์ (Biot) แต่ต่อมา นักฟิสิกส์-คณิตศาสตร์ชาว ชื่อ โจเซฟ ฟูริเยร์ (Joseph Fourier) นำหลักการนี้มาใช้วิเคราะห์เป็นทฤษฎีความร้อน กฎนี้กล่าวว่า อัตราการไหลของการนำความร้อนในทิศทางที่กำหนดเป็นสัดส่วนกับพื้นที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อนและเกรเดียนต์อุณหภูมิในทิศทางนั้น สำหรับการไหลของความร้อนในทิศทาง  $x$  กฎของฟูริเยร์กำหนดเป็น

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad \text{W} \quad (2.6)$$

หรือ

$$q_x'' = \frac{q_x}{A} = -k \frac{dT}{dx} \quad \text{W/m}^2 \quad (2.7)$$

โดยที่  $q_x$  คือ อัตราการนำความร้อนผ่านพื้นที่  $A$  ในทิศทางบวก  $x$

$q_x''$  คือ ฟลักซ์ความร้อนในทิศทางบวก  $x$

$k$  คือ ค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุ (Thermal conductivity of material) และเป็นค่าบวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (2.6) ถ้าอุณหภูมิลดลงในทิศทางบวกของ  $x$  แล้ว  $\frac{dT}{dx}$  เป็นลบ ดังนั้น  $q_x''$  (หรือ  $q_x$ ) มีค่าเป็นบวก เนื่องจากสมการมีเครื่องหมายลบติดอยู่ เพราะฉะนั้นเครื่องหมายลบจึงต้องใส่ในสมการ และเพื่อให้แน่ใจว่า  $q_x''$  (หรือ  $q_x$ ) เป็นปริมาณบวก เมื่อการไหลของความร้อนอยู่ในทิศทางบวกของ  $x$  ในทางกลับกันเมื่อทางด้านขวามือของสมการเป็นลบ แสดงว่าการไหลของความร้อนอยู่ในทิศทางลบของ  $x$

จุดประสงค์หลัก ในการวิเคราะห์การนำความร้อนก็เพื่อที่จะหา สนามอุณหภูมิ (Temperature field) ในตัวกลางหนึ่งซึ่งเป็นผลจากเงื่อนไขซึ่งสอดคล้องกับขอบเขตของมัน นั่นคือ ต้องทราบการกระจายของอุณหภูมิ (Temperature distribution) เมื่อทราบค่านี้จะสามารถหาค่าพลาซึ่มความร้อนที่จุดใดๆ ในตัวกลางนั้น จากกฎฟูริเยร์ (Fourier's Law) การหาค่านี้ทำโดยใช้กฎพลังงาน (Energy conservation) กับปริมาตรควบคุมดิฟเฟอเรนเชียลซึ่งคำตอบของมันจะทำให้การกระจายอุณหภูมิในตัวกลางหรือวัตถุนั้น

สารต่างๆจะมีความสามารถในการนำความร้อนได้ดีและเร็วไม่เท่ากัน สารที่สามารถนำความร้อนได้ดีและเร็วไม่เท่ากัน สารที่สามารถนำความร้อนได้ดีและเร็ว เรียกว่า ตัวนำความร้อน ได้แก่ พวกโลหะต่างๆเช่น เงิน (เป็นตัวนำความร้อนที่ดีที่สุด) ทองแดง อะลูมิเนียม เหล็ก ส่วนสารที่นำความร้อนไม่ดีหรือช้า เรียกว่า ฉนวนความร้อน ได้แก่ พวกอโลหะต่างๆ เช่น กระจก แก้ว ไม้ อากาศ และในจำนวนสารทั้ง 3 สถานะ คือ ของแข็ง ของเหลว และ ก๊าซ ก๊าซจะเป็นตัวนำความร้อนที่ไม่ดีที่สุด

### 2.10.2 การถ่ายเทความร้อนโดยการพา (convection)

เป็นการถ่ายเทความร้อนจากที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่อุณหภูมิต่ำ โดยมีวัตถุหรือตัวกลางที่ได้รับความร้อนเป็นตัวพาเอาความร้อนนั้นไป การพาความร้อนจะเกิดได้เฉพาะวัตถุพวกของเหลวและก๊าซเท่านั้นพวกของแข็งจะไม่เกิดการพาความร้อน

เมื่อของไหลไหลผ่านวัตถุที่เป็นของแข็งหรือของไหลผ่านภายในช่องทางการไหล โดยที่อุณหภูมิของของไหลและผิวของของแข็งมีค่าแตกต่างกัน การถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลและผิวของของแข็งจะเกิดขึ้นเมื่อของไหลเคลื่อนที่สัมผัสกับผิวของของแข็ง กลไกของการถ่ายเทความร้อนแบบนี้เรียกว่า การพาความร้อน ถ้าการเคลื่อนที่ของของไหลเกิดขึ้นโดยการทำขึ้นเองโดยใช้ปั๊มหรือพัดลมเป็นตัวทำให้เกิดแรงกระทำให้ของไหลผ่านบนพื้นผิว การถ่ายเทความร้อนแบบนี้เรียกว่า การพาความร้อนแบบบังคับ (Forced convection) ถ้าการเคลื่อนที่ของของไหลเกิดจากแรงลอยตัว ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

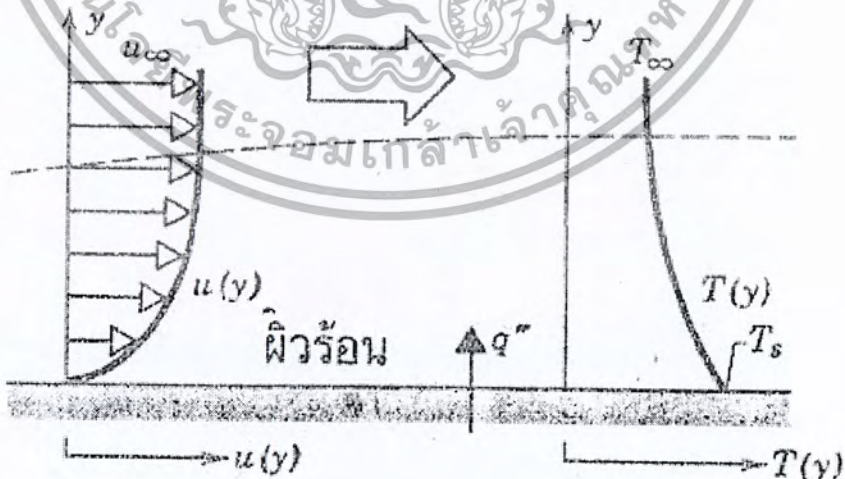
มีผลมาจากความแตกต่างของความหนาแน่นที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิภายในของไหล การถ่ายเทความร้อนแบบนี้เรียกว่า การพาแบบอิสระ หรือการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Free or Natural convection) เช่นการปล่อยแผ่นวัตถุร้อนที่วางอยู่ในแนวตั้งไว้ในอากาศเย็นที่หยุดนิ่ง ชั้นของอากาศที่ติดกับพื้นผิวของแผ่นวัตถุจะมีการเคลื่อนที่เพราะเกรเดียนอุณหภูมิในอากาศเป็นผลทำให้เกรเดียนของความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้อากาศเกิดการเคลื่อนที่ โดยการเคลื่อนที่ของของไหลมีผลกระทบต่อสนามอุณหภูมิภายในของไหล การคำนวณหาการกระจายของอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนแบบการพาในทางปฏิบัติเป็นเรื่องที่สลับซับซ้อนมากในทางวิศวกรรม เพื่อให้การคำนวณการถ่ายเทความร้อนง่ายขึ้นระหว่างผิวร้อน  $T_w$  และอุณหภูมิของของไหลเย็นที่ไหลผ่านบนผิวที่อุณหภูมิ  $T_f$  ตามที่แสดงในรูปที่ 2.17 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h$ ) ถูกกำหนดเป็น

$$q'' = h[T_w - T_f] \quad (2.8)$$

โดยที่  $q''$  เป็นฟลักซ์ความร้อนที่ถ่ายเทจากผนังร้อนไปยังของไหลที่เย็น (มีหน่วยเป็น  $\frac{W}{m^2}$ ) ถ้าการถ่ายเทความร้อนเกิดจากของไหลที่ร้อน ไปยังผนังที่เย็น จะได้ว่า

$$q'' = h[T_f - T_w] \quad (2.9)$$

โดยที่  $q''$  เป็นฟลักซ์ความร้อนที่ถ่ายเทจากของไหลที่ร้อนไปยังผนังเย็น สมการ (2.8) เป็นสมการที่ได้มาจากกฏการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of Cooling) โดยที่อุณหภูมิมิหน่วยเป็น เซลเซียส หรือ เคลวินและค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน  $h$  มีหน่วยเป็น  $\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$



รูปที่ 2.17 การพัฒนาชั้นของเขตในการพาความร้อน [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการพาความร้อน เช่น กาต้มน้ำ น้ำตอนล่างที่อยู่ใกล้กับเตาไฟได้รับความร้อนแล้ว ขยายตัวจึงมีความหนาแน่นน้อย จะลอยขึ้นตอนบน ส่วนที่เย็นซึ่งหนักกว่าจะจมลงมาแทนที่ ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของน้ำเป็นกระแสนวนเวียนจนทั่วทั้งกา น้ำจึงร้อนทั่วถึงทั้งหมด

เมื่อเราเอามือไปอังไอน้ำที่พุ่งออกมาจากกาต้มน้ำ เราจะรู้สึกร้อน เพราะว่าความร้อนจากน้ำในกาได้ติดมากับไอน้ำ เมื่อกระทบมือ เราจึงรู้สึกร้อน

ลมช่วยพาความร้อนออกจากร่างกายเรา ทำให้เราร้อนน้อยลงหรือเย็นขึ้น

การใช้น้ำไหลวนเวียนในเครื่องยนต์ เพื่อพาความร้อนจากเครื่องยนต์ออกมาที่หม้อน้ำแล้วใช้พัดลมช่วยพาความร้อนออกไปอีกครั้ง

### 2.10.3 การแผ่รังสีความร้อน (radiation)

เป็นการถ่ายเทความร้อนจาก คือพลังงานที่ส่งออกไปโดยสารซึ่งอยู่ที่อุณหภูมิจำกัดแน่นอนจนถึงแม้ว่าเราจะเน้นกรแผ่รังสีจากผิวของวัตถุแข็งก็ตาม การส่งออกของรังสีอาจเกิดขึ้นได้จากของเหลวและก๊าซดังนั้นโดยไม่คำนึงถึงรูปแบบของสาร การส่งออกของรังสีเชื่อว่าเป็นการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนขององค์ประกอบอะตอมหรือ โมเลกุล พลังงานของสนามการแผ่รังสีนั้นถูกนำออกไปโดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (หรือเรียกอีกอย่างว่า โฟตอน) ในขณะที่การถ่ายเทพลังงานโดยการนำความร้อนหรือการพาความร้อนต้องการวัตถุตัวกลาง แต่การแผ่รังสีความร้อนไม่ต้องการ แต่ในความเป็นจริงการถ่ายเทโดยการแผ่รังสีเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุดในสูญญากาศ

ค่าฟลักซ์ความร้อนสูงสุดซึ่งความแผ่รังสีถูกส่งออกไปได้จากพื้นผิวหนึ่งกำหนดโดยกฎของสตีเฟน-โบลซ์แมน (Stefan-Boltzmann Law)

$$q'' = \sigma T_s^4 \quad (2.10)$$

โดยที่  $T_s$  คือ ค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ (K) ของผิว

$\sigma$  คือ ค่าคงที่ของสตีเฟน-โบลซ์แมน  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}$

และผิวนั้นจะเรียกว่า ตัวแผ่รังสีอุดมคติหรือวัตถุดำ (Blackbody) ฟลักซ์ความร้อนซึ่งถูกส่งออกไปโดยผิวจริงจะน้อยกว่าที่ส่งออกจากตัวแผ่รังสีอุดมคติ (Ideal radiator) กำหนดเป็น

$$q'' = \epsilon \sigma T_s^4 \quad (2.11)$$

โดยที่  $\epsilon$  เป็นคุณสมบัติการแผ่รังสีของผิว เรียกว่า สัมประสิทธิ์การแผ่รังสี (Emissivity) คุณสมบัตินี้ ชี้ให้เห็นถึงประสิทธิภาพของผิวเป็นอย่างไร เมื่อเทียบกับวัตถุดำ

จากสมการ (2.11) ใช้หาอัตราการส่งพลังงานออกจากผิว การคำนวณหาอัตราสุทธิซึ่งการแผ่รังสีถูกแลกเปลี่ยนระหว่างผิว โดยทั่วไปค่อนข้างยุ่งยากมาก อย่างไรก็ตามมีกรณีพิเศษซึ่งเกิดขึ้นบ่อยมากในทางปฏิบัติเกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนสุทธิระหว่างพื้นผิวเล็กๆ และผิวที่ใหญ่กว่ามากซึ่งอยู่ล้อมรอบผิวที่เล็กกว่านั่นเอง พื้นผิวและสิ่งแวดล้อมที่อยู่แยกจากกัน โดยก๊าซซึ่งไม่มีอิทธิพลเกี่ยวกับการแผ่รังสี อัตราสุทธิของการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนระหว่างผิวและสิ่งแวดล้อมของมันเป็นต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของผิวกำหนดเป็น

$$q'' = \frac{q}{A} = \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{sur}^4) \quad (2.12)$$

ในสมการนี้  $A$  เป็นพื้นที่ผิว และ  $\varepsilon$  เป็นสัมประสิทธิ์การส่งออก ในขณะที่  $T_{sur}$  เป็นอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม

มีการประยุกต์สมการนี้ในรูปอื่นเพื่อให้สะดวก คือ

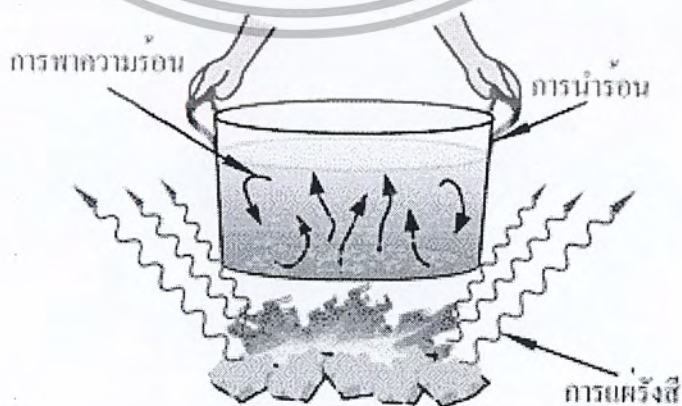
$$q_{rad} = h_r A (T_s - T_{sur}) \quad (2.13)$$

ซึ่งจากสมการ (2.12) ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี ( $h_r$ ) คือ

$$h_r \equiv \varepsilon\sigma(T_s + T_{sur})(T_s^2 + T_{sur}^2) \quad (2.14)$$

จุดประสงค์ที่ทำเช่นนี้เพื่อให้มีรูปแบบเหมือนการพาความร้อน สังเกตว่าค่า  $h_r$  ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเป็นสำคัญ ในขณะที่  $h$  ของการพาขึ้นอยู่กับอุณหภูมิตามปกติ

ตัวอย่างการแผ่รังสีความร้อน เช่น เอมือไปอังข้างเตารีด เราจะรู้สึกว่าร้อน ความร้อนไม่ได้เกิดจากการนำความร้อน เพราะว่าคุณภาพเป็นตัวนำความร้อนที่ไม่ดี และไม่ได้เกิดจากการพาความร้อน เพราะว่าคุณภาพจะลอยสูงขึ้นในแนวตั้ง แต่ความร้อนที่เราได้รับนี้เกิดจากการแผ่รังสีความร้อน



รูปที่ 2.18 การถ่ายเทความร้อนวิธีการต่างๆ [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.11 เชื้อเพลิงไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลก็คือการนำน้ำมันจากพืชหรือไขมันสัตว์หรือแม้แต่ไขมันที่ใช้แล้วอย่างน้ำมันที่ทอดไก่ หรือปาตองไก่ มาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซล ซึ่งอาจแบ่งไบโอดีเซลตามประเภทของน้ำมัน ที่นำมาใช้ได้ออกเป็น 3 ประเภท [6]

### 2.11.1 น้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์

ไบโอดีเซลประเภทนี้ก็คือน้ำมันพืชแท้ๆ (เช่น น้ำมันมะพร้าว, น้ำมันปาล์ม, น้ำมันถั่วลิสง, น้ำมันถั่วเหลือง) หรือน้ำมันจากไขมันสัตว์ (เช่น น้ำมันหมู) ซึ่งเราสามารถเอามาใช้ได้เลยกับเครื่องยนต์ดีเซลโดยไม่ต้องผสม หรือเติมสารเคมีอื่นใด หรือไม่ต้องนำมาเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของน้ำมันให้เปลืองเวลา เปลืองทรัพยากรอีก

### 2.11.2 ไบโอดีเซลแบบลูกผสม

ไบโอดีเซลชนิดนี้เป็นลูกผสมระหว่างน้ำมันพืช (หรือสัตว์) กับ น้ำมันก๊าด น้ำมันดีเซล หรืออะไรก็ได้เพื่อให้ไบโอดีเซลที่ได้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลให้มากที่สุด อย่างเช่น โคโคดีเซล (coco-diesel) ที่ อ.ทับสะแก ประจวบคีรีขันธ์ ซึ่งเป็นการผสมกันระหว่างน้ำมันมะพร้าวกับน้ำมันก๊าด หรือปาล์มดีเซล (palm-diesel) เป็นการผสมระหว่างน้ำมันปาล์มกับน้ำมันดีเซล

### 2.11.3 ไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์

ชนิดนี้เป็นความหมายของไบโอดีเซลที่แท้จริงที่เมืองนอกเขาใช้กันทั่วไป อย่างเช่น ในเยอรมัน สหรัฐอเมริกา หรือแม้แต่มาเลเซีย ดังนั้น ถ้าพูดถึงคำว่า “ไบโอดีเซล” ในความหมายของสากลจะหมายถึง ไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์ ซึ่งจะต้องผ่านกระบวนการแปรรูปด้วยกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่า ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) นั่นคือ การนำเอาไขมันพืชหรือสัตว์ที่มีกรดไขมันไปทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์โดยใช้กรดหรือด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ได้เอสเทอร์ โดยจะเรียกชนิดของไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์ตามชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ไบโอดีเซลชนิดเอสเทอร์นี้มี คุณสมบัติที่เหมือนกับน้ำมันดีเซลมากที่สุด ทำให้ไม่มีปัญหาเกี่ยวกับเครื่องยนต์ เราสามารถนำมาใช้กับรถยนต์ได้ แต่ปัญหาที่จะมีก็คือต้นทุนการผลิตที่แพงนั่นเอง

ทำไมต้องไบโอดีเซล โดยสรุปข้อดีของไบโอดีเซลในเชิงเศรษฐศาสตร์ก็คือ ราคาถูก ช่วยพยุงราคาพืชผลทางการเกษตรของไทย ลดการนำเข้าน้ำมันจากต่างประเทศ ข้อดีในด้านสิ่งแวดล้อมและคุณภาพชีวิตก็คือ ช่วยลดมลพิษในอากาศ ทำให้ลดการสูญเสียชีวิตจากการรักษาพยาบาลผู้ป่วยที่ได้รับมลพิษจากอากาศ เป็นต้น กระแสที่ดังของไบโอดีเซลในตอนนี้ ทำให้บริษัทผลิตรถยนต์ชั้นนำของโลก หลาย ๆ ค่าย ออกมาประกาศรับรองว่าสามารถใช้ไบโอดีเซลกับรถที่ออกมาจากค่ายนั้น ๆ ได้ โดยไม่มีปัญหาเกี่ยวกับเครื่องยนต์ เช่น เมอร์เซเดสเบนซ์ และ فولค์สวาเก้น เป็นต้น

ข้อดีข้อเสียของไบโอดีเซล (เมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซล) ไบโอดีเซลแต่ละชนิดมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกัน ไปเมื่อเทียบกับการใช้น้ำมันดีเซลปกติดังนี้

- น้ำมันพืชหรือสัตว์ พวกน้ำมันพืชหรือสัตว์มีปัญหาค่อนข้างมาก เนื่องจากคุณสมบัติของมันต่างกับดีเซลค่อนข้างมาก อย่างที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ก็เลยมีปัญหาเรื่องการสันดาปไม่สมบูรณ์ เครื่องสะดุด มีผลต่อลูกสูบและวาล์ว มีตะกรันขาวอยู่ในถังน้ำมัน และหนัก ความหนืดสูงที่อุณหภูมิต่ำลง ทำให้ จากที่สตาร์ทไม่ค่อยจะติดอยู่แล้วกลายเป็นไม่ติดไปเลยในที่อากาศเย็นๆ แต่มีข้อดีก็คือมีราคาถูก พอใช้ได้กับเครื่องยนต์รอบต่ำ แต่ก็ไม่ค่อยนิยมใช้กัน

- ไบโอดีเซลถูกผสม เนื่องจากไบโอดีเซลประเภทนี้เกิดจากการผสมกันระหว่างน้ำมันพืชและน้ำมันปิโตรเลียม ทำให้ลดปัญหาเรื่อง ความหนืดลงไปได้บ้าง แต่ก็ยังมีปัญหาตอนที่อากาศเย็น และปัญหาเรื่องการอุดตันของเครื่องยนต์คือ ใ้สักรองจะอุดตันเร็วกว่าปกติ สำหรับปัญหาอื่นๆไม่มี คุณสมบัติส่วนมากจะเหมือนกับน้ำมันดีเซล เครื่องจะเดินเรียบไม่มีปัญหาเรื่องสะดุดกุกกักเหมือนแบบแรก เครื่องสตาร์ทติดง่าย (แต่ควรมีการอุ่นน้ำมันก่อน) เหมาะสำหรับการใช้กับเครื่องยนต์รอบต่ำ หรือเครื่องจักรกลการเกษตร

- ไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์ ข้อดีอันดับแรกคือค่าซีเทน (Cetane ค่าดัชนีการจุดติดไฟ) สูงกว่าน้ำมันดีเซล นั่นคือจุดติดไฟได้ง่ายกว่าน้ำมันดีเซล ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ทำให้การจุดระเบิดทำได้ดี การสันดาปสมบูรณ์ การรับอมนอกไฮดริคก็เลยน้อย ไม่มีควันดำและซัลเฟอร์ไดออกไซด์ซ้ำเติมสิ่งแวดล้อม ความหนืดคงที่ จึงตัดปัญหาเรื่องความหนืดออกไปได้ แต่ข้อเสียคือต้นทุนสูงกว่าไบโอดีเซลแบบอื่นๆ เครื่องยนต์ให้กำลังต่ำกว่าน้ำมันดีเซล มีการสร้างแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) เพิ่มขึ้น แล้วก็ต้องต้องคิดแปลงส่วนประกอบของเครื่องยนต์ที่เป็นยาง (rubber) ซึ่งอาจถูกทำลายโดยไบโอดีเซล แต่ไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์นี้ใช้กับเครื่องยนต์รอบสูงอย่างรถยนต์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ตารางเปรียบเทียบสมบัติของเชื้อเพลิงดีเซลและไบโอดีเซล [6]

	น้ำมันดีเซล	น้ำมันไบโอดีเซล
น้ำหนักเชื้อเพลิง Lbs./gal.	7.05	7.3
Heat of Combustion BTU/gal.	140,000	130,000
Cetane Number	48	55
Viscosity Centistokes	3.0	5.7
Flash point C	64	70
Chemical formula.	$C_{12}H_{22}$	$RCOOCH_3$
Heating value (kJ/kg)	46,800	39,550

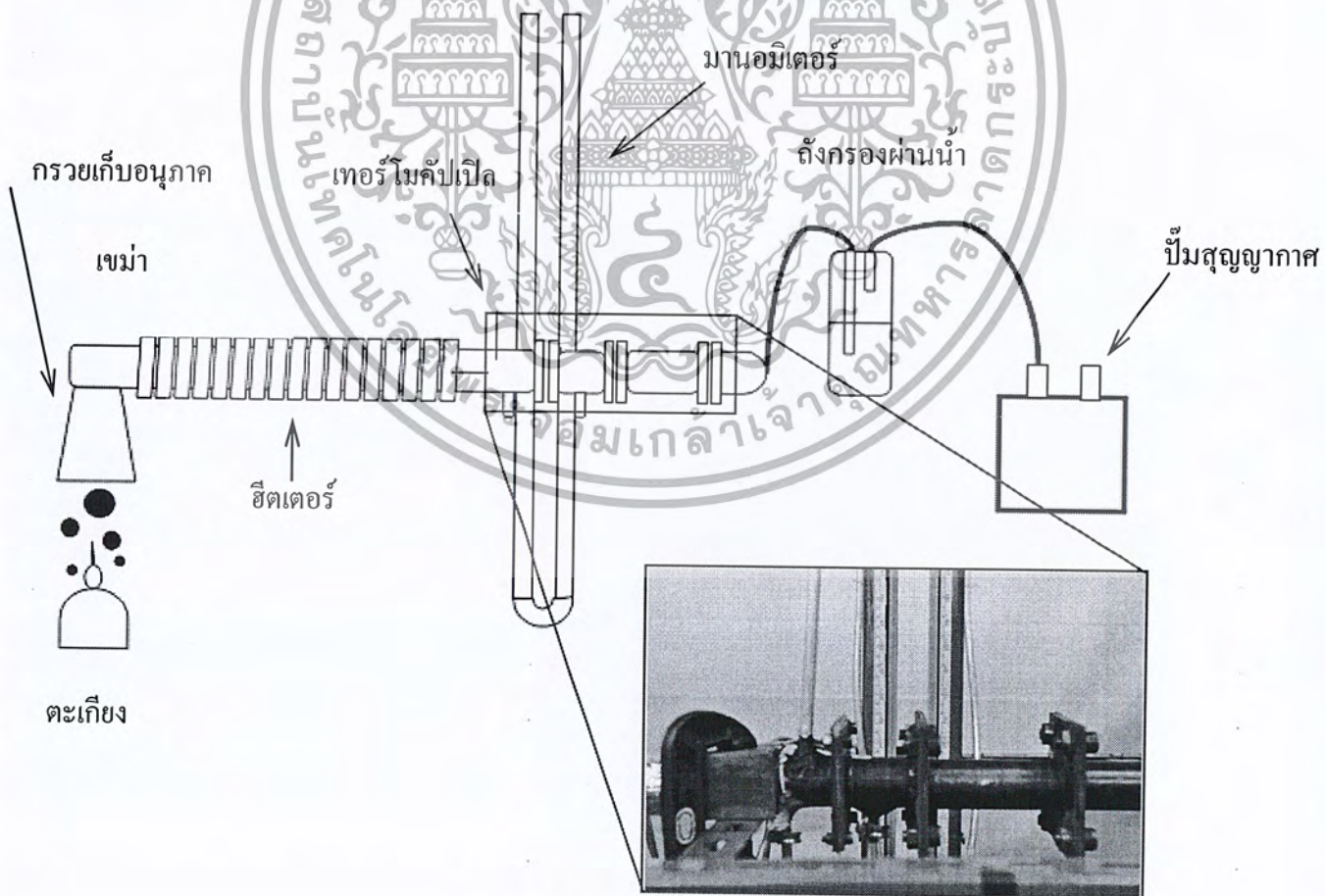
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

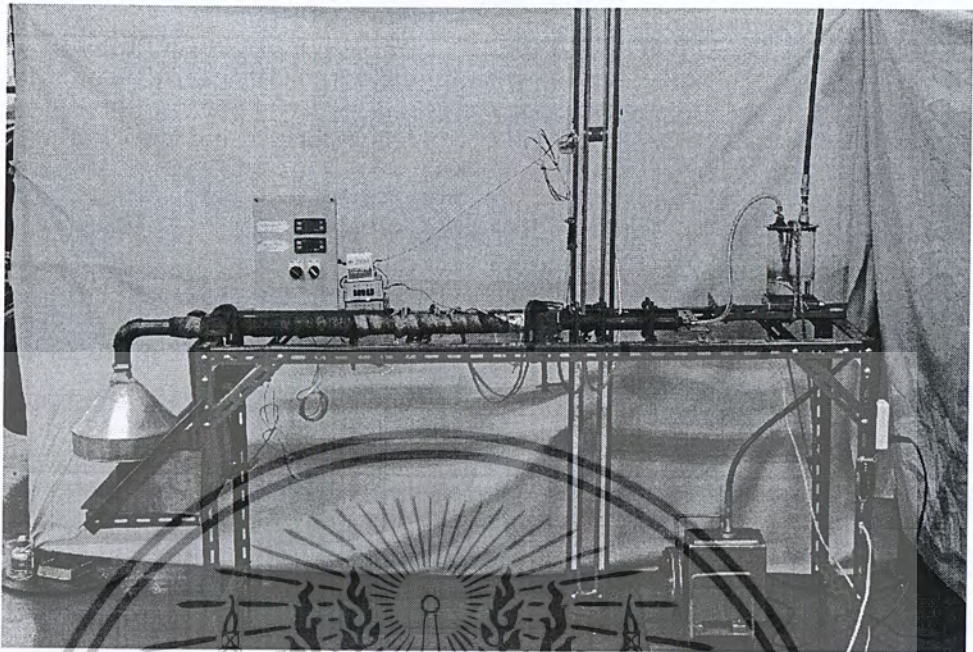
### 3.1 อุปกรณ์และการออกแบบ

ในการศึกษาการดักกรองอนุภาคของเครื่องดักกรองอนุภาคนั้น เราต้องการที่จะได้ผลการทดลองที่รวดเร็วจึงได้ใช้เขม่าที่เกิดจากตะเกียงในการทดลอง และเป็นการลดสิ่งเจือปนในอนุภาค (Particulate Matter: PM) จำเป็นที่จะต้องออกแบบและเลือกใช้วัสดุที่มีความแข็งแรง รับความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นได้ ไม่รั่วซึมเนื่องจากความดันตกคร่อมมีผลสำคัญมากในการศึกษา ในการทดลองแนวคิดสำคัญในการออกแบบคือ การสร้างชุดทดสอบให้มีความเร็วของเขม่าตะเกียงให้มีความเร็วใกล้เคียงกับเครื่องยนต์จริงมากที่สุด ซึ่งในที่นี้เราได้ใช้เส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ 38 มิลลิเมตร และใช้ปั๊มแบบดูดดูดเขม่าตะเกียงเพื่อจำลองให้เหมือนกับการคายไอเสียของเครื่องยนต์



รูปที่ 3.1 แผนผังอุปกรณ์การทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์การทดลอง

จากรูปที่ 3.1 แสดงถึงผังอุปกรณ์การทดลองโดยรวม ซึ่งหลักการทำงานของอุปกรณ์การทดลองนี้คือ การกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น ได้แก่ ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นของอากาศในท่อซึ่งมีสองอุณหภูมิคือ 25 องศาเซลเซียสและ 100 องศาเซลเซียส ในอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ใช้ฮีตเตอร์แบบเส้นแบนพันติดกับผนังด้านนอกของท่อเกิดการนำความร้อนผ่าน โลหะที่ใช้ทำท่อเพื่อจำลองให้มีลักษณะใกล้เคียงกับท่อไอเสีย และขจัดไอน้ำในอากาศ มีชุดควบคุมเพื่อควบคุมอุณหภูมิ การวัดประสิทธิภาพการกรองโดยใช้กระดาษกรอง และทำการวัดความดันตกคร่อมแล้วบันทึกค่าในช่วงเวลาที่กำหนด ซึ่งรายละเอียดของการออกแบบอุปกรณ์การทดลองมีดังนี้

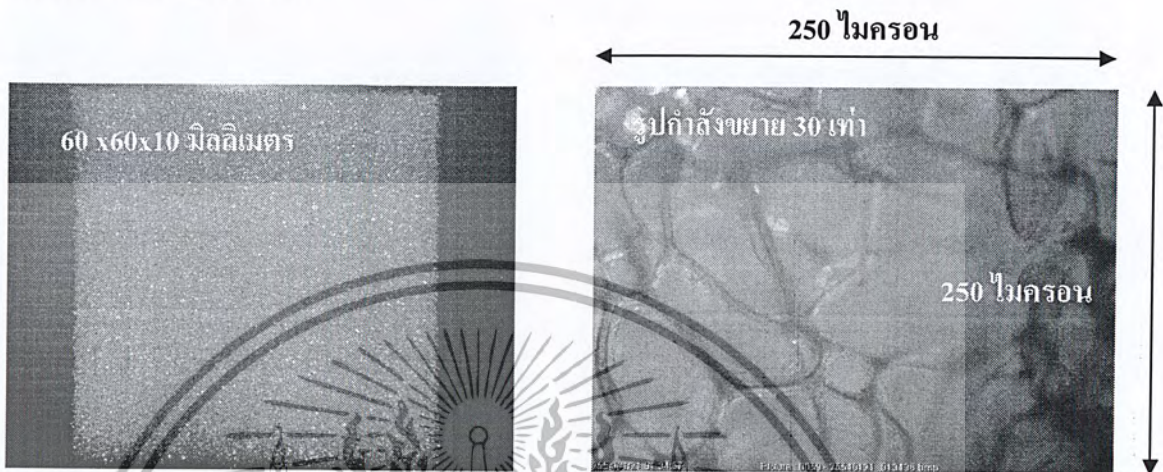
### 3.1.1 วัสดุทดลองที่นำมาศึกษา

ในการทดลองเราได้ทำการศึกษาวัสดุทดลองทำการทดสอบกับวัสดุพูน 3 ชนิดคือ วัสดุพูน A, วัสดุพูน B, วัสดุพูน C คือ DPF สาเหตุที่นำวัสดุพูนชนิด A และ B มาทดสอบก็เพราะเนื่องจาก วัสดุพูน C (DPF) มีราคาสูงเพื่อให้เกิดความผิดพลาดน้อยที่สุด จึงทำการศึกษาเปรียบเทียบวัสดุพูนหลายประเภทเพื่อดูลักษณะการดักกรองของแต่ละชนิดเนื่องจากมีความพูนที่แตกต่างกัน ซึ่งแต่ละชนิดมีลักษณะทางกายภาพดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-วัสดุพรม A

เป็นฟองน้ำมีความพรุนความพรุน 98 % ขนาดที่ใช้ในการทดลองคือเส้นผ่านศูนย์กลาง 38 มิลลิเมตร ความหนา 10 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.3 วัสดุพรม A

-วัสดุพรม B

เป็นฟองน้ำมีความพรุนความพรุน 96 % ขนาดที่ใช้ในการทดลองคือเส้นผ่านศูนย์กลาง 38 มิลลิเมตร ความหนา 10 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.4 วัสดุพรม B

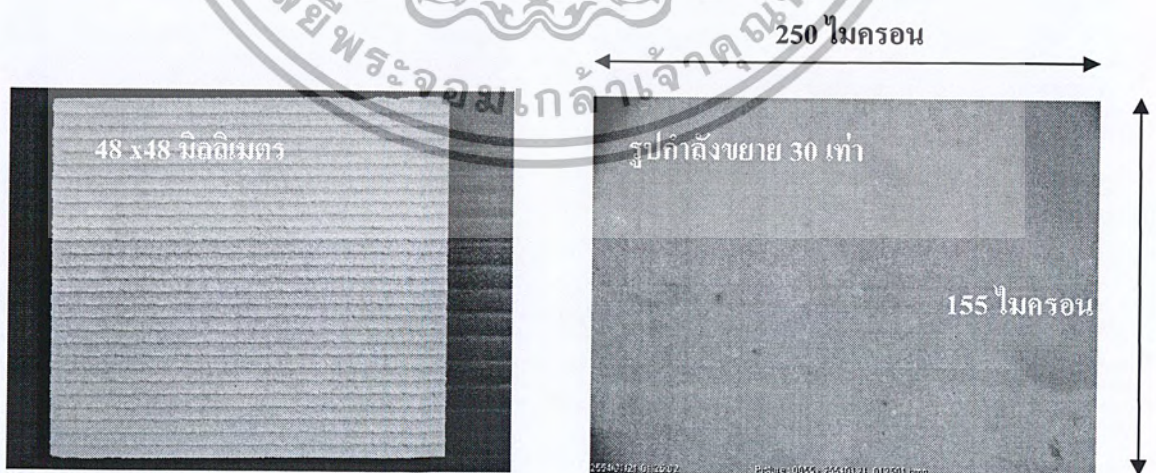
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### -วัสดุพรม C

เป็นเซรามิกมีที่เรานำมาใช้ในการทดสอบคือประเภทคอร์เดียไรท์ มีชื่อทางเคมีว่า “แมกนีเซียมอลูมิเนียมซิลิเกต” ความพรุนความพรุน 55 % ขนาดที่ใช้ในการทดลองคือเส้นผ่านศูนย์กลาง 38 มิลลิเมตร ความหนา 2 ช่อง

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของ DPF

วัสดุ	แมกนีเซียมอลูมิเนียมซิลิเกต
ความพรุน	55 %
COE	$1.5 - 2 \times 10^{-6}$ ต่อ $1^{\circ}\text{C}$
จุดหลอมตัว	$1460^{\circ}\text{C}$
ความถ่วงจำเพาะ	$2.6 \text{ g/cm}^3$

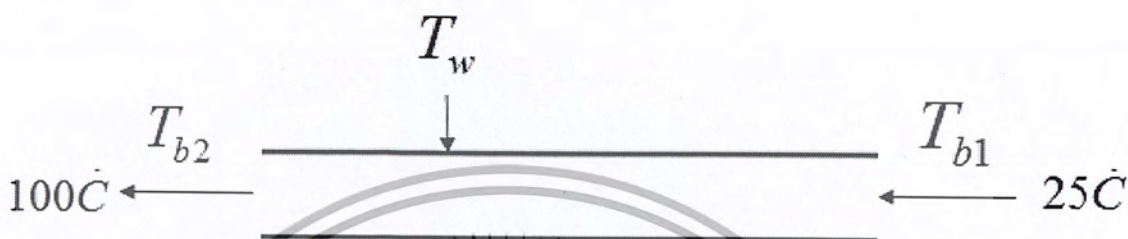


รูปที่ 3.5 วัสดุพรม C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 ระบบให้ความร้อนแก่ท่อ

สำหรับระบบการให้ความร้อนแก่ท่อ ออกแบบ โดยให้ความร้อนจากผนังด้านนอก ซึ่งเกิดจากการนำความร้อนผ่านโลหะจากผนังห้องเผาไหม้ด้านนอกเข้ามายังผนังด้านในเพื่อเป็นการกำหนดอุณหภูมิเริ่มต้นของเขม่าไอเสีย[5]



รูปที่ 3.6 การถ่ายเทความร้อนจากผนังห้องเผาไหม้ใหม่ด้านนอกสู่ผนังห้องเผาไหม้ด้านใน

$$\Delta Q = \dot{m} C_p (T_{b2} - T_{b1}) \quad (3.1)$$

- ค่าความหนาแน่นอากาศมีค่า  $1.1614 \text{ kg/m}^3$

- ความเร็วภายในท่อ  $Q=0.083 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $A = \pi(0.01905)^2 = 1.139 \text{ m}^2$

- แทนค่าจะได้ความเร็ว  $V = 0.073 \text{ m/s}$

$$\dot{m} = \rho A u \quad (3.2)$$

$$\dot{m} = (1.1614)(1.139)(0.073)$$

$$= 0.0966 \text{ Kg/s}$$

แทนค่าในสมการ 3.1

$$\Delta Q = 0.0966 \frac{(1.007 \times 10^3 + 1.0113 \times 10^3)}{2} (373 - 298)$$

$$= 7.311 \text{ Watt}$$

$$\text{จาก } \Delta Q = q_w \pi dL \quad (3.3)$$

กำหนดความยาวในการพัน = 1 m. แทนในสมการ 3.3 จะได้

$$q_w = \frac{7.311}{\pi(0.0381)(1)}$$

$$q_w = 61.11 \text{ watt/m}^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หา  $T_w$  จาก

$$T_w = \left( \frac{(q_w) d}{K (Nu)} \right) + T_{b_2} \quad (3.4)$$

แทนค่าในสมการ 3.4

$$T_w = \left( \frac{(61.11)(0.0381)}{(0.0315)(3.60)} \right) + 373$$

$$T_w = 393.495 \text{ K}$$

$$T_w = 120.49 \text{ องศาเซลเซียส}$$



รูปที่ 3.7 ลักษณะของฮีตเตอร์แบบเส้นแบน

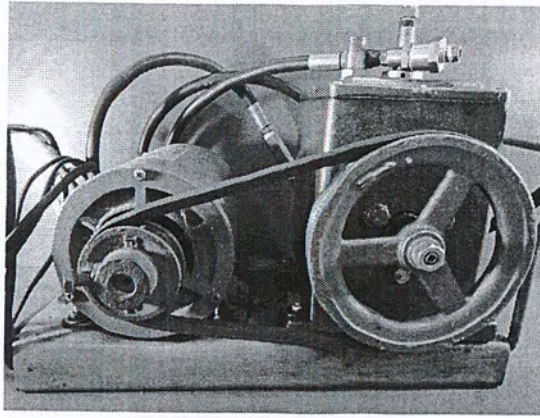
### 3.1.3 ปั๊มดูดแบบสุญญากาศ (Vacuum Pump)

ในการทดลองเพื่อจำลองให้อากาศภายในท่อมีความเร็วใกล้เคียงกับท่อไอเสียทำให้จำเป็นที่จะต้องใช้ปั๊มแบบสุญญากาศดูดอากาศภายในท่อ ปั๊มสุญญากาศที่เรานำมาใช้เป็นปั๊มแบบโรตารีทำงาน โดยการเพิ่มพลังงานให้แก่อากาศโดยอาศัยการหมุนของฟันเพื่อรอบแกนกลาง ซึ่งหมุนเพื่อทำให้เกิดความดันด้านดูดต่ำกว่าความดันบรรยากาศ ปั๊มที่นำมาใช้มีคุณสมบัติดังนี้

ตารางที่ 3.2 ตารางสมรรถนะของปั๊มสุญญากาศ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 ปัมสุญญากาศ

### 3.1.4 เครื่องวัดประสิทธิภาพควันดำ

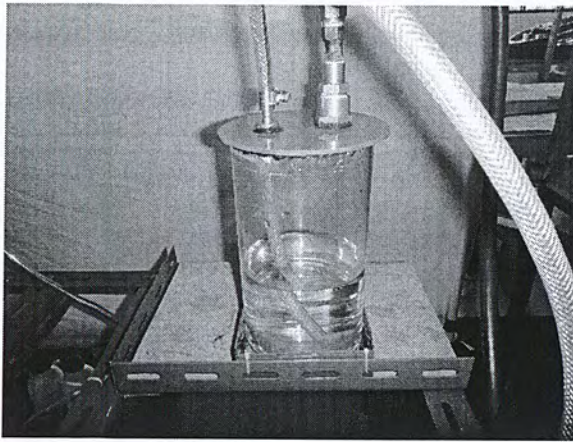
ในการทดลองมีการวัดค่าประสิทธิภาพควันดำเพื่อวัดประสิทธิภาพการดักกรองของเครื่องดักกรองชนิดต่างๆ ในการทดลองได้ใช้กระดาษกรองมวัดค่าประสิทธิภาพการกรองแล้วนำไปอ่านค่าที่เครื่องวัดเปอร์เซ็นต์ควันดำ เครื่องวัดเปอร์เซ็นต์ควันดำที่นำมาใช้ชื่อ Okuda รุ่น DSM-240 No. 1008 กระดาษกรองที่ใช้ชื่อ Kitcha ขนาด 45 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 กระดาษกรองที่นำมาใช้วัดค่าประสิทธิภาพการกรอง

### 3.1.5 ถังกรองผ่านน้ำ

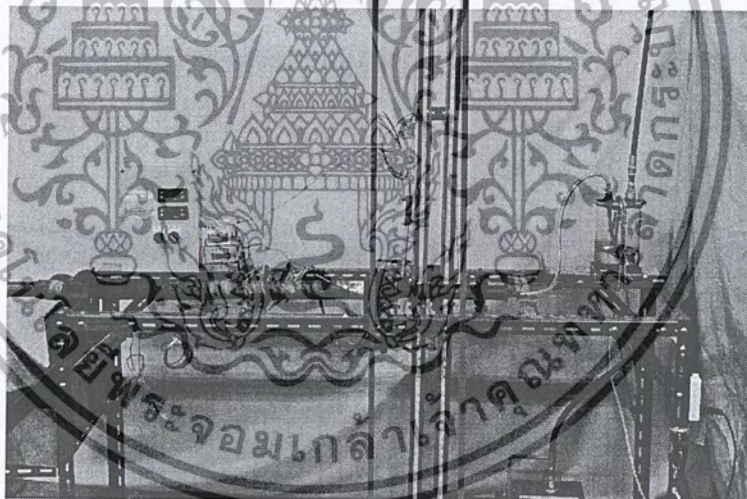
เนื่องจากปั๊มสุญญากาศไม่สามารถดูดอากาศที่มีสิ่งเจือปนและอากาศที่อุณหภูมิสูงเข้าปั๊มได้โดยตรงซึ่งในการทดลองอาจมีอนุภาคเขม่าหลุดรอดเข้าไปภายในปั๊มทำให้ปั๊มมีอายุการใช้งานสั้นลงเพื่อแก้ไขเพื่อไม่ให้มีปัญหาที่เกิดขึ้นจึงได้มีการออกแบบถังกรองผ่านน้ำมาใช้ดักกรองอนุภาคที่หลุดรอดเข้าไปภายในตัวปั๊มสุญญากาศ ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ถังกรองผ่านน้ำ

### 3.1.6 มานอมิเตอร์

ใช้วัดค่าความดันตกคร่อมในเครื่องดักกรองอนุภาค มีลักษณะเป็นหลอดแก้วรูปตัวยู ซึ่งปลายข้างหนึ่งต่อเข้าก่อนหน้าเครื่องดักกรองและปลายอีกข้างหนึ่งต่อเข้าหลังเครื่องดักกรอง ในที่นี้สามารถวัดค่าได้สูงสุด  $H = 2$  เมตร หรือ  $20 \text{ kPa}$  ใช้ของเหลวที่บรรจุเป็นน้ำกลั่น [12] ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 มานอมิเตอร์

### 3.1.7 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

เทอร์โมคัปเปิล คืออุปกรณ์วัดอุณหภูมิโดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือความร้อนเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้า (emf) เทอร์โมคัปเปิลทำมาจากโลหะตัวนำที่ต่างชนิดกัน 2 ตัว (แตกต่างกันทางโครงสร้างของอะตอม) นำมาเชื่อมต่อปลายทั้งสองเข้าด้วยกันที่ปลายด้านหนึ่ง เรียกว่าจุดวัดอุณหภูมิ ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งปล่อยเปิดไว้ เรียกว่าจุดอ้างอิง หากจุดวัดอุณหภูมิและจุดอ้างอิงมีอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

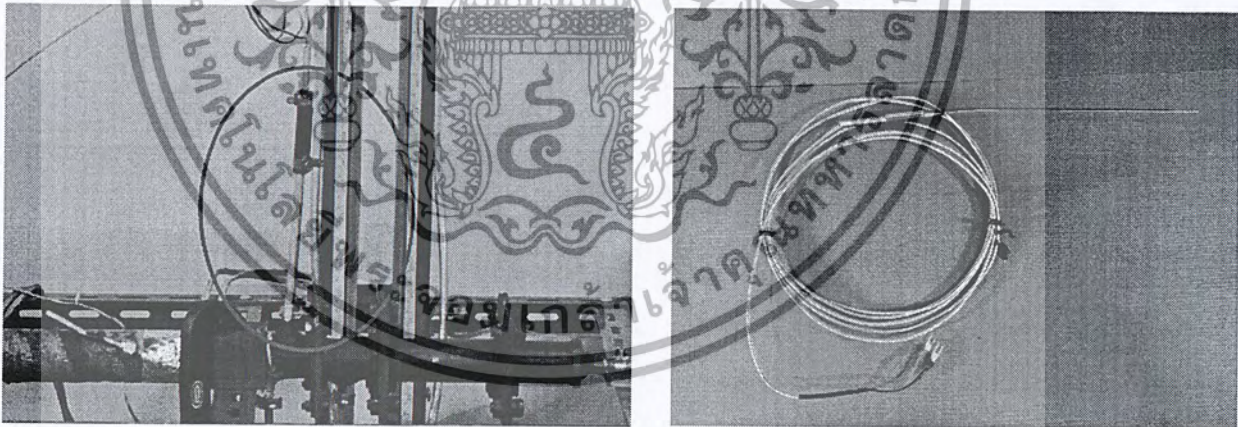
ต่างกันก็จะทำให้มีการนำกระแสในวงจรเทอร์โมคัปเปิลทั้งสองข้าง เทอร์โมคัปเปิลที่นำมาใช้เป็นชนิด K การติดตั้งเราจะติดตั้งก่อนทางเข้าเครื่องดักกรองอนุภาค มีข้อดีและข้อเสีย[7] ดังนี้

#### ข้อดีของแบบ K

- เป็นแบบที่นิยมใช้แพร่หลายมากที่สุด
- สำหรับการวัดอุณหภูมิช่วงสั้น ๆ จะวัดได้จาก  $-180^{\circ}\text{C}$  ถึงประมาณ  $1,350^{\circ}\text{C}$
- สามารถใช้วัดในงานที่มีปฏิกิริยาออกซิไดซิง หรือสภาวะแบบเฉื่อย(inert) ได้ดีกว่าแบบอื่น ๆ
- สามารถใช้กับสภาพงานที่มีการแผ่รังสีความร้อนได้ดี
- ให้อัตราการเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่ออุณหภูมิดีกว่าแบบอื่น ๆ (ความชันเกือบเป็น 1) และมีความเป็นเชิงเส้นมากที่สุดในบรรดาเทอร์โมคัปเปิลด้วยกัน

#### ข้อเสียของแบบ K

- ไม่เหมาะกับการวัดที่ต้องสัมผัสกับปฏิกิริยารีดิวซิงและออกซิไดซิงโดยตรง
- ไม่เหมาะกับงานที่มีไอของซัลเฟอร์
- ไม่เหมาะกับสภาพงานที่เป็นสูญญากาศ (ยกเว้นจะใช้ในช่วงเวลาสั้นๆ)
- หลังการใช้งานไป 30 ปี ทำให้ส่วนผสมทางเคมีเปลี่ยนไป เป็นผลทำให้คุณสมบัติของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเปลี่ยนไป



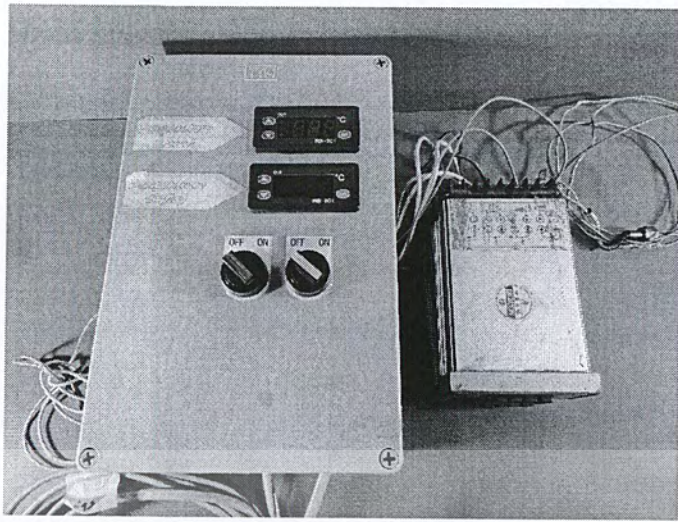
รูปที่ 3.12(ซ้าย) ตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล (ขวา) เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K

### 3.1.8 ชุดควบคุมอุณหภูมิ

ในการทดลองที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เพื่อที่จะควบคุมให้อุณหภูมิภายในห้องมีอุณหภูมิประมาณ 100 ต้องมีการใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิมาใช้ ในที่นี้เป็นเครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบ On - Off คือจะทำงานเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่ตั้งค่าไว้ และจะตัดเมื่ออุณหภูมิได้ตามต้องการ ดังแสดง

#### ในรูปที่ 3.13

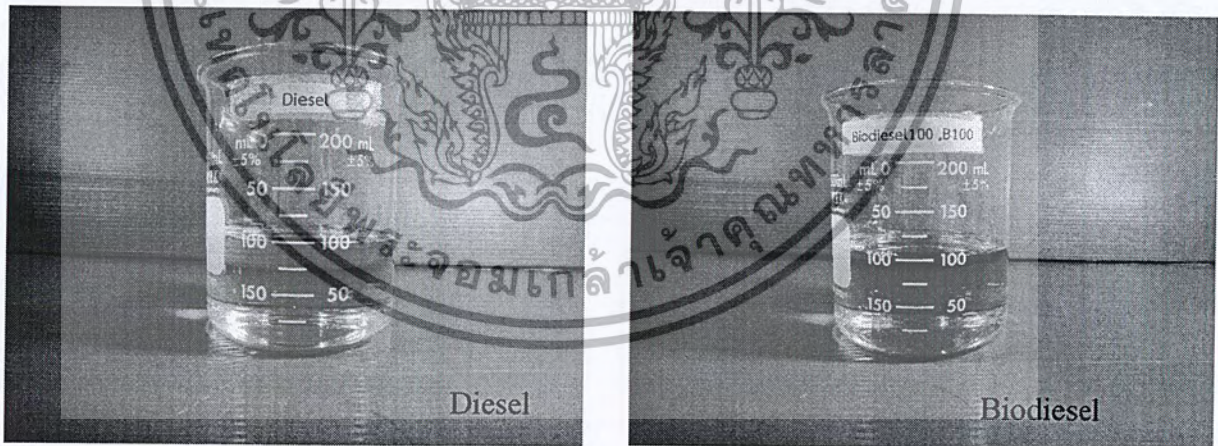
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 ชุดควบคุมอุณหภูมิ

### 3.2 เชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง

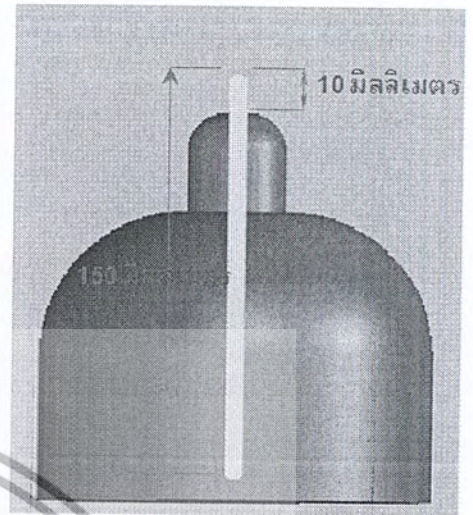
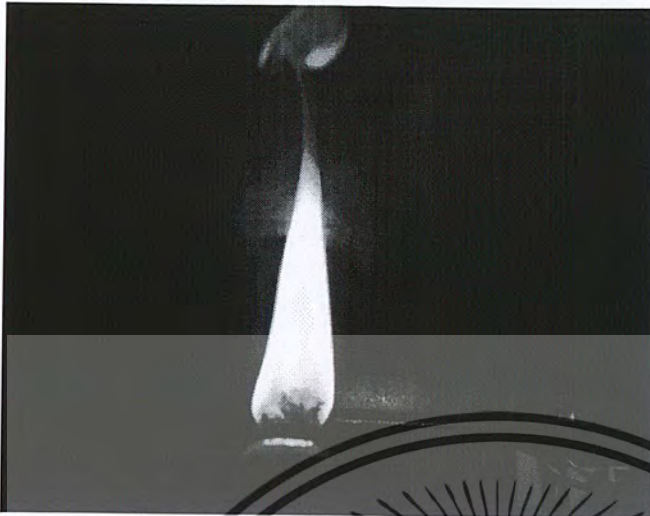
เชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลองได้แก่ น้ำมันดีเซล และน้ำมันไบโอดีเซล 100 เปอร์เซ็นต์ (B100) ซึ่งเชื้อเพลิงทั้งหมดเป็นไปตามมาตรฐานของการปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย [9]



รูปที่ 3.14 ภาพของเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 ตะเกียงและไส้ตะเกียง



รูปที่ 3.15 (ซ้าย) ลักษณะเปลวตะเกียง (ขวา) การกำหนดความยาวไส้ตะเกียงที่ทดลอง

ในการทดลองเพื่อที่จะควบคุมให้การจุดเชื้อเพลิงได้เข้ามาแต่ละครั้งมีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด จึงทำการกำหนดปริมาตรที่ใช้ในการเริ่มต้นทดลองให้มีค่าเท่ากันทุกครั้ง และกำหนดไส้ตะเกียง เริ่มต้นให้มีค่า 150 มิลลิเมตร ในการทดลองทุกครั้ง โดยมีระยะปลายไส้ยาวออกมาจากตะเกียง 10 มิลลิเมตร เมื่อทำการวัดค่าแต่ละครั้งทุกๆการทดลอง ไส้ต้องยาว 10 มิลลิเมตร เพื่อให้ได้ความหนาแน่นเข้ามาเท่ากันทุกครั้งในการทดลอง ดังรูปที่ 3.15

### 3.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (Scanning Electron Microscope: SEM)

Scanning Electron Microscope (SEM) ในภาษาไทยเรียกว่า กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscope) เป็นอุปกรณ์ช่วยสายตาที่มีความคล่องตัวมากที่สุดชนิดหนึ่ง ซึ่งมีประโยชน์ต่อการตรวจสอบลักษณะหรือรายละเอียดของตัวอย่าง กล้อง SEM กำลังได้รับความนิยมอย่างสูงมากเพราะความสามารถหรือสมรรถนะของอุปกรณ์ชนิดนี้ในการตรวจสอบศึกษาตัวอย่างขนาดใหญ่ให้ภาพโดยมีรายละเอียดสูงสามารถแยกรายละเอียดในระดับที่กล้องจุลทรรศน์ธรรมดาไม่สามารถจะแยกได้ [13]

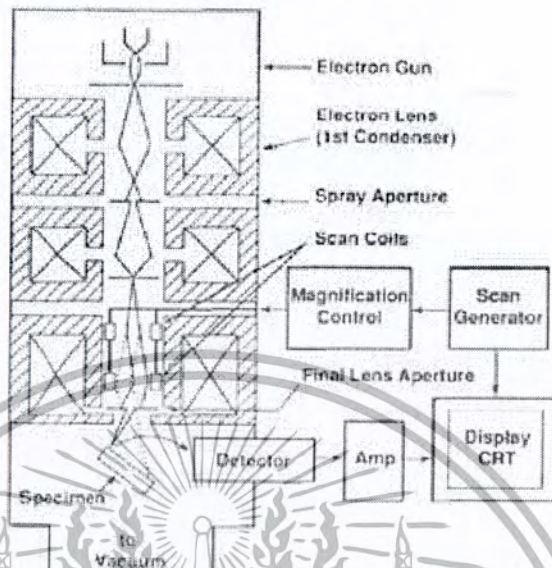
#### ส่วนประกอบพื้นฐานของกล้อง SEM

1. แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron gun)
2. เลนส์ควบคุมลำแสงอิเล็กตรอน (Electromagnetic lens) และขดลวดควบคุมการเคลื่อนที่ของลำแสงอิเล็กตรอน (Scan coil)

#### 3. ห้องตัวอย่าง (Specimen Chamber)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. อุปกรณ์รวบรวมสัญญาณ (Collector & scintillator)
5. อุปกรณ์สร้างภาพและถ่ายภาพ (Imaging photographic devices)



รูปที่ 3.16 ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่อง SEM

1. แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron gun) แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนสำหรับกล้อง SEM มักจะเรียกว่าแคโทด (Cathode) เนื่องจากเป็นขั้วลบ สามารถแบ่งเป็น 3 ประเภท คือ

- 1.1 แคโทดชนิด Tungsten
- 1.2 แคโทดชนิด Lanthanum hexa boride ( $\text{LaB}_6$ )
- 1.3 แคโทดชนิด Field emission

ใน 2 ชนิดแรกจะใช้หลักการ Thermionic emission หรือการปลดปล่อยอิเล็กตรอนเนื่องจากความร้อน ส่วนชนิดที่ 3 ใช้หลักการทางฟิสิกส์ที่เรียกว่า Field emission หรือการปลดปล่อยอิเล็กตรอนเนื่องจากสถานะสุญญากาศขั้นสูง อาจจะใช้ความร้อนเข้าช่วยหรือไม่ก็ได้ ซึ่งทั้งสามแบบจำเป็นต้องอาศัยปลายที่แหลม

2. เลนส์ควบคุมลำแสงอิเล็กตรอนพร้อมขดลวดขับเคลื่อนลำแสงอิเล็กตรอน (Electromagnic lens & scan coils) เป็นชุดอุปกรณ์ที่ทำงานร่วมกันทำหน้าที่รวบรวมอิเล็กตรอนปฐมภูมิให้เป็นลำแสงรูปกรวยที่เล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ลำแสงดังกล่าวไปตกกระทบบนผิวตัวอย่างและจะใช้สนามแม่เหล็กขับหรือผลักให้ลำแสงอิเล็กตรอนปฐมภูมิเคลื่อนไปบนผิวตัวอย่างในแนวที่ต้องการเป็นบริเวณรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส เลนส์แต่ละชุดมี aperture ซึ่งเป็นโลหะประเภททองขาวทองเหลืองมีรูปขนาดต่างๆกัน (50um-400um) และสามารถ เปลี่ยนได้ตามขนาดที่ต้องการ aperture

ดังกล่าวมักจะจัดไว้ในเลนส์แต่ละชุดภายในบริเวณที่ไร้สนามแม่เหล็กของเลนส์ aperture เหล่านี้ทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาติให้เผยแพร่เชิงพาณิชย์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้าที่กำหนดให้ลำแสงอิเล็กตรอนที่ผ่านสนามแม่เหล็กของเลนส์แต่ละชุดให้ มีรูปกรวยที่สมมาตร aperture ของเลนส์ชุดสุดท้ายก่อนที่ลำแสงอิเล็กตรอนจะมาสัมผัสกับตัวอย่างเป็น aperture พิเศษ เรียกว่า objective aperture มีไว้เพื่อกันกรวยลำแสงอิเล็กตรอนให้เป็นรูปกรวย ขนาดเล็กที่มีความสมมาตรที่สุดและกำหนดขนาดและปริมาณของอิเล็กตรอนให้กระทบจุดต่างๆบนผิวตัวอย่าง เพื่อให้ภาพที่มีความลึกมากกว่าปกติ ขดลวดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ขับเคลื่อนลำแสงอิเล็กตรอนปฐมภูมิให้กราดไปบนผิวของตัวอย่างชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ นี้เรียกว่า scan coils ซึ่งควบคุม โดยระบบไฟฟ้าและยังควบคุมการกราดของลำแสงที่เป็นเส้นในจอรับภาพ (CRT) ให้เคลื่อนที่ไปในทิศทางและเวลาเดียวกันกับลำแสงอิเล็กตรอน

3. ช่องใส่ตัวอย่าง (Specimen chamber) ของ SEM เป็นช่องว่างใต้เลนส์สุดท้ายส่วนที่สำคัญของช่องใส่ตัวอย่างคือฐานวางตัวอย่างและปุ่มควบคุม โดยใช้เพื่อขนาดต่างๆเพื่อเลื่อนฐานนี้ให้เลื่อนไปมาภายในช่องตัวอย่าง ได้อย่างน้อย 6 ทิศทางฐานวางตัวอย่างที่ มีส่วนประกอบและคุณสมบัติเหล่านี้ เรียกว่า Goniometer stage

4. อุปกรณ์รวบรวมสัญญาณ (Collector & scintillator) เป็นแท่งแก้วใสมีปลายมลทำด้วยพลาสติกฉาบผิวด้วยอลูมิเนียมและส่วนปลายของแท่งนี้ ล้อมด้วยตาข่ายโลหะที่ต่อกับวงจรไฟฟ้า ประจุบวกขนาด 30-250 โวลต์ เพื่อดึงดูดประจุอิเล็กตรอนทุติยภูมิอันเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างประจุอิเล็กตรอนปฐมภูมิกระทบกับผิวของตัวอย่าง

5. อุปกรณ์สร้างภาพและถ่ายภาพ (Imaging & photographic devices) ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงสัญญาณที่ได้รับเป็นภาพและภาพที่ปรากฏบนจอ CRT ก็พร้อมที่จะทำการบันทึก อุปกรณ์สร้างภาพประกอบด้วยท่อนำแสงและเครื่องขยายและเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กตรอนให้เป็นแสงไฟฟ้า การสร้างภาพเริ่มจากประจุอิเล็กตรอนทุติยภูมิซึ่งประจุอิเล็กตรอนชุดนี้จะถูกจับและรวบรวมไว้แล้วนำสู่แท่งแก้วใสประเภท ท่อนำแสงในลักษณะของแสง แสงที่ผ่านท่อแท่งแก้วนี้จะเคลื่อนไปสู่เครื่องขยายแสง (photomultiplier) ซึ่งจะเปลี่ยนแสงชนิด photons นี้ไปเป็นอิเล็กตรอนอีกครั้งหนึ่ง โดยอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะผ่านเครื่องขยายให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าให้ปรากฏในจอภาพ (CRT) ที่ติดตั้งไว้บน Console unit

### หลักการทำงานของ Scanning Electron Microscope

จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิด อิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำแสงอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำแสงอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะ โฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาติให้นำไปเผยแพร่หรือใช้ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ และถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไป และสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้เลย

**อันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับตัวอย่าง (Specimen-beam interactions)**

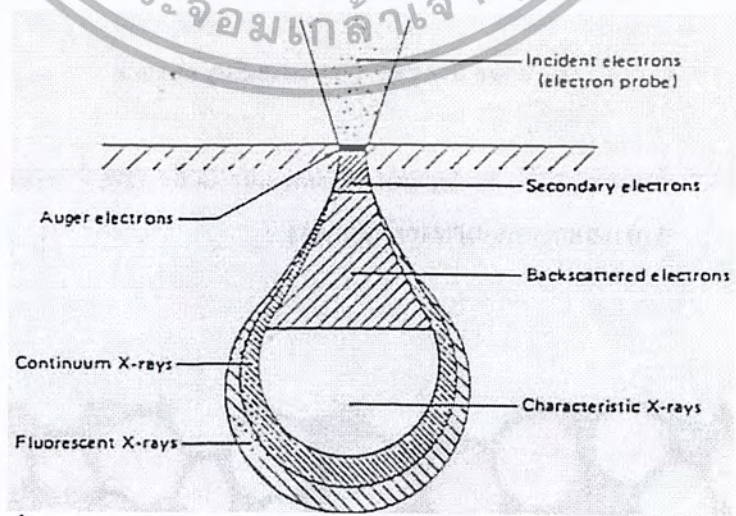
อิเล็กตรอน จาก Column ของ SEM เราเรียกว่า Primary Electron โดยอันตรกิริยาของลำแสงอิเล็กตรอนที่ตกกระทบบนผิวตัวอย่างจะกำเนิดสัญญาณอิเล็กตรอนต่างๆ สามารถแบ่งอันตรกิริยาของการชนเป็นสองลักษณะคือ

1. ยืดหยุ่น (Elastic)
2. ไม่ยืดหยุ่น (Inelastic)

ซึ่งการชนทั้งสองลักษณะนี้จะให้ผลหรือสัญญาณที่แตกต่างกัน



รูปที่ 3.17 แสดงสัญญาณที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับตัวอย่าง

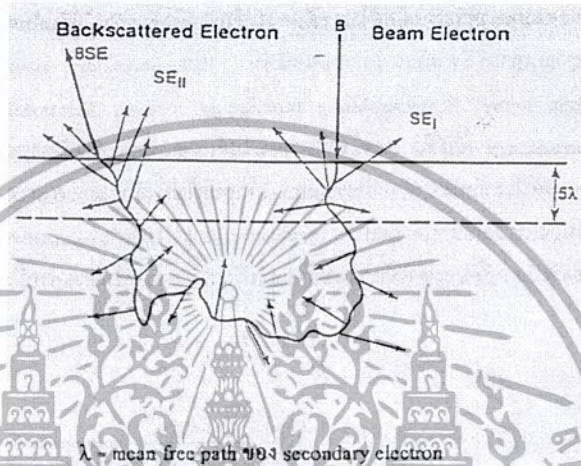


รูปที่ 3.18 แสดงสัญญาณอิเล็กตรอนในลักษณะต่างๆ จากอันตรกิริยา

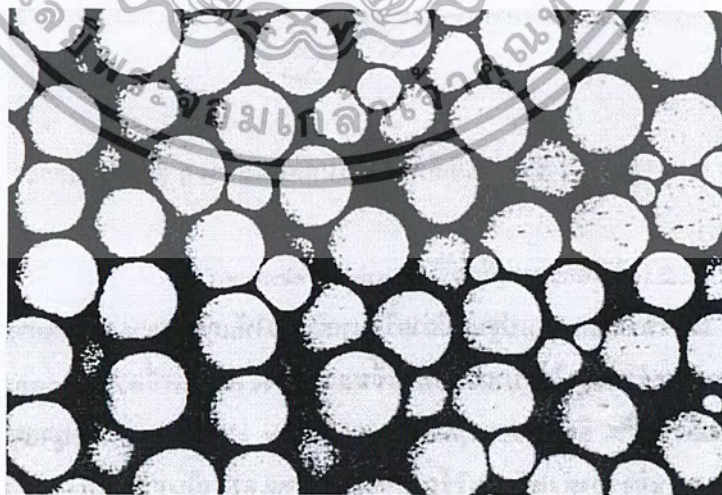
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การชนแบบยืดหยุ่น (Elastic scattering)

ลักษณะการชนชนิดนี้สัญญาณที่ได้ คือ Backscatter Electron โดยอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (primary electrons) จะสูญเสียพลังงานบางส่วน (น้อยมาก) ให้กับอะตอมของตัวอย่างที่ตกกระทบและมีการเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ มีการกระเจิงกลับจากผิวของตัวอย่าง อิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับส่วนนี้เรียกว่าอิเล็กตรอนแบบ Backscatter Electrons (BE) ภายในห้องใส่ตัวอย่างจะมีตัววัดสัญญาณ (Detector) ติดตั้งไว้เพื่อนำสัญญาณ BE นี้ไปสร้างเป็นสัญญาณภาพแสดงผลบนจอ CRT



รูปที่ 3.19 แสดงลักษณะการเกิด Backscatter electron และ SE คือระยะที่ secondary electron สามารถหาจุดออกมาจากผิวตัวอย่าง



รูปที่ 3.20 แสดงลักษณะของภาพที่ได้จากสัญญาณ Backscatter Electron

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic scattering)

ลักษณะการชนชนิดนี้อิเล็กตรอนปฐมภูมิจะถ่ายโอนพลังงานจลน์ให้กับอะตอมของตัวอย่าง และทำให้อะตอมของตัวอย่างที่อยู่ในระดับความลึกจากผิวตัวอย่างได้รับอันตรกิริยาที่แตกต่างกัน ซึ่งจะกำเนิดสัญญาณหลายชนิดหลังจากการชนชนิดนี้ เช่น Secondary electrons, Auger electrons, Characteristic X-ray, Bremsstrahlung (continuum x-rays), Electron-hole pairs, Ultraviolet, Cathodoluminescence เป็นต้น จะเห็นว่าการชนในลักษณะนี้เราจะได้สัญญาณหลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดก็จะบ่งบอกองค์ประกอบของตัวอย่างที่แตกต่างออกไปทั้งลักษณะของภาพจากสัญญาณ Secondary electrons จนถึงการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ (Qualitative) และปริมาณ (Quantitative) ของธาตุในตัวอย่างจากสัญญาณของรังสี X อันจะทำให้ทราบชนิดและปริมาณของ ธาตุในตัวอย่างนั้น ๆ

### อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron (SEM))

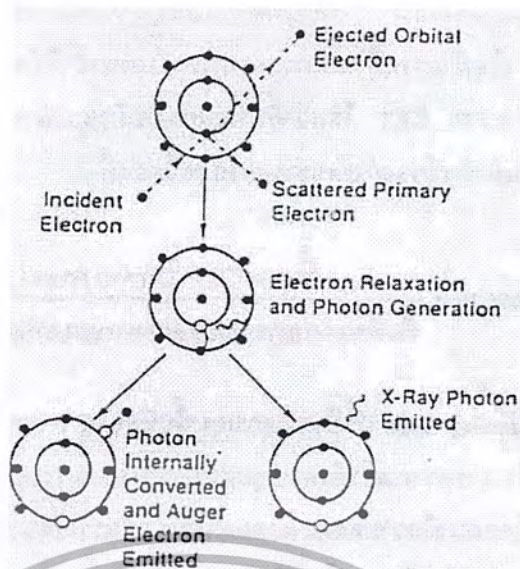
เป็นอิเล็กตรอนพลังงานต่ำที่เกิดจาก Primary Electrons ไปชนเอาอิเล็กตรอนที่ผิวตัวอย่างหลุดออกมา โดยจะหลุดออกจากผิวตัวอย่างที่ความลึกจากพื้นผิวไม่เกิน 10 นาโนเมตร ให้ภาพที่มีรายละเอียดสูง ความเข้มของ SE จะขึ้นอยู่กับมุมที่ Primary Electrons ตกกระทบและสภาพพื้นผิวตัวอย่าง โดยภาพที่มีรายละเอียดสูงภาพที่ได้จาก SE เรียกว่า Secondary Electron Image, SEI

### Characteristic X-rays

เกิดจากการที่เมื่ออิเล็กตรอนวงในของธาตุตัวอย่างถูกชนโดย Primary Electrons จนหลุดออกไป ก็จะเป็นระดับชั้นพลังงานที่ว่าง ทำให้อิเล็กตรอนที่ระดับพลังงานสูงกว่าระดับพลังงานลง พร้อมกันนี้ก็จะปล่อยพลังงานในรูป X-Rays ออกมา พลังงานของ X-Rays ที่ได้จะมีรูปแบบของระดับพลังงานเฉพาะตัวแตกต่างกันไปในแต่ละธาตุเรียกว่า Characteristic X-Rays ดังนั้นจึงสามารถทำให้วิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบที่ผิวตัวอย่างโดยอาศัยประโยชน์จากการวิเคราะห์พลังงานหรือความยาวคลื่นของ X-rays ที่เกิดขึ้นนี้

### Auger Electrons

เกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิตกกระทบตัวอย่างและเหนี่ยวนำให้เกิดรังสี X เฉพาะธาตุของชั้นโคจรใดๆ รังสี X ที่ปลดปล่อยจากอันตรกิริยานี้มีโอกาสดำเนินพลังงานให้กับ อิเล็กตรอนชั้น โคจรถัดออกไปทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากวงโคจรเรียกอิเล็กตรอน ชนิดนี้ว่า Auger Electrons ซึ่งการวิเคราะห์พลังงาน Auger Electrons นี้มีประโยชน์ในการวิเคราะห์พื้นผิวตัวอย่าง เช่นการ วัดปริมาณของธาตุ (ที่มี Atomic number ต่ำ) ที่ฉาบอยู่บนผิวที่บางมาก



รูปที่ 3.21 รูป แสดงการเกิด X-ray และการเกิด Auger Electrons

### Cathodoluminescence

เป็นลักษณะเรืองแสงจากตัวอย่าง ซึ่งแสงที่เรืองนี้เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงที่ตามองไม่เห็นเกิดจาก อะตอมของตัวอย่างได้รับพลังงานจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิทำให้อิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นนอกถูกกระตุ้นและเมื่อกลับเข้าสู่ภาวะปกติอิเล็กตรอนจะคายพลังงานออกมา ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเนื่องจากสภาวะกระตุ้นสภาวะปกติมีช่วงพลังงานไม่ห่างกันมากนัก เมื่อคายพลังงานออกมาแล้วทำให้ความถี่หรือความยาวคลื่นอยู่ในช่วงที่ตามองเห็นได้

### การเกิดภาพของกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Image Formation)

เมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิตกกระทบตัวอย่าง และเกิดอันตรกิริยาจะทำให้เกิดสัญญาณต่าง ๆ ขึ้นบริเวณผิวหน้าของตัวอย่าง เมื่อตัววัดสัญญาณตรวจจับสัญญาณต่าง ๆ เช่น Secondary Electron หรือ backscatter electron และนำสัญญาณเหล่านี้ไปแสดงบนจอ CRT ทำให้สามารถเห็นรายละเอียดของภาพ ส่วนรังสี X นั้นสามารถนำไปใช้วิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบและปริมาณในตัวอย่าง ซึ่งการแสดงความหนาแน่นของปริมาณธาตุนี้สามารถนำไปซ้อนลงบนภาพของ สัญญาณ SE และ BE ซึ่งเรียกว่า การทำ X-ray mapping หลักการสร้างภาพในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนสามารถ อธิบายได้ด้วยตัวอย่างการกำเนิดภาพของสัญญาณ SE

### กำเนิดภาพของสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (SE)

เมื่ออิเล็กตรอนจาก Filament ถูกควบคุมเป็นลำแสงอิเล็กตรอนและโฟกัสด้วยเลนส์แม่เหล็กลงบนผิวของตัวอย่างและลำแสงอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยชุด Scanning coils ซึ่งเป็นขดลวดที่สร้าง

สนามแม่เหล็กเพื่อควบคุมการกวาดของลำแสงอิเล็กตรอน ไปบนผิวของตัวอย่างซึ่งการกวาดบนผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามาให้เผยแพร่หรือใช้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จากชุดทดลองแล้วนำไปตรวจค่าความหนาแน่นของเขม่าจากเครื่องตรวจวัดเปอร์เซ็นต์ควันดำ ซึ่งจะต้องทำการปรับตั้งค่าให้คงที่เท่าเดิมทุกครั้งในระหว่างการทดลอง

### 3.5.2 การจัดเตรียมอุปกรณ์สำหรับการทดลอง

- (1) น้ำมันที่ใช้ในการทดลอง 150 มิลลิลิตร
- (2) ไม้ตะเกียงยาว 150 มิลลิเมตร
- (3) ไม้ตะเกียงที่ยื่นออกมาจากตะเกียงยาว 10 มิลลิเมตร
- (4) ขนาดของวัสดุพรุณ A และ B เท่ากับ 48 x 48 x 10 มิลลิเมตร
- (5) ขนาดของวัสดุพรุณ A และ B เท่ากับ 48 x 48 x 6 มิลลิเมตร
- (5) ตั้งค่าเครื่องวัดปริมาณเขม่าไอเสียที่ 0 % ทุกครั้ง
- (6) ตรวจสอบการทำงานของเทอร์โมคัปเปิลที่ใช้วัดอุณหภูมิ และ ฮีตเตอร์ ในกรณีทำการทดลองวัดประสิทธิภาพการดักกรองของวัสดุพรุณ

### 3.5.3 การทำงานของชุดอุปกรณ์การทดลอง

เมื่อเริ่มเปิดปั๊มทำการอ่านค่าความดันตกคร่อมจากมานอมิเตอร์ซึ่งวัดความแตกต่างของความดันระหว่างก่อนเข้าวัสดุพรุณและหลังผ่านวัสดุพรุณ ( ถ้าเป็นการทดลองที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ให้เปิดฮีตเตอร์เพื่อเพิ่มความร้อนแก่อากาศที่ไหลเข้าไปในท่อรองจนเทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิได้ 100 องศาเซลเซียสจึงทำขั้นต่อไป ) หลังจากนั้นจุดตะเกียงจะทำให้อนุภาคเขม่าดีเซลหรือไบโอดีเซลที่เกิดจากตะเกียงถูกดูดเข้าไปในท่อกลมผ่านไปยังตัวของวัสดุพรุณซึ่งวัสดุพรุณจะเริ่มดักกรองอนุภาคเขม่าดีเซลหรือไบโอดีเซล เป็นผลให้ความดันตกคร่อมระหว่างก่อนและหลังของตัววัสดุพรุณมีค่าแตกต่างกันมากขึ้น หลังจากอนุภาคเขม่าดีเซลหรือไบโอดีเซลผ่านวัสดุพรุณก็จะผ่านไปยังกระดวยกรองชั้นแรกซึ่งกระดวยกรองชั้นแรกจะเป็นกระดวยกรองที่นำไปใช้วัดค่าประสิทธิภาพการดักกรองของวัสดุพรุณ ส่วนกระดวยกรองชั้นที่สองใช้เพื่อกรองอนุภาคเขม่าดีเซลหรือไบโอดีเซลที่หลุดออกมาจากกระดวยกรองชั้นแรกก่อนที่อากาศและอนุภาคเขม่าดีเซลหรือไบโอดีเซลจะผ่านไปสู่ถังดักเขม่า ซึ่งจะทำหน้าที่ในการดักอนุภาคเขม่าดีเซลหรือไบโอดีเซลโดยใช้หลักการ อากาศผ่านน้ำ ซึ่งเป็นวิธีการเพื่อรักษาปั๊มให้สามารถทำงานได้นานยิ่งขึ้น เนื่องจากถ้าอนุภาคเขม่าดีเซลหรือไบโอดีเซลเข้าไปในปั๊มจะทำให้ปั๊มเกิดการอุดตันเป็นผลให้ปั๊มเกิดความเสียหาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6 รูปแบบการทดลอง

จะมีทั้งหมด 16 การทดลองโดยจะแบ่งเป็น 2 ส่วนคือการทดลองที่อุณหภูมิ 25 องศาและการทดลองที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ตามตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 รูปแบบการทดลอง

การทดลองที่ อุณหภูมิ 25 C	วัสดุ A ความพรุน 98 %	น้ำมันดีเซล	ความดันตกคร่อม	
			ประสิทธิภาพการกรอง	
			น้ำมันไบโอดีเซล	ความดันตกคร่อม
				ประสิทธิภาพการกรอง
	วัสดุ B ความพรุน 96 %		น้ำมันดีเซล	ความดันตกคร่อม
				ประสิทธิภาพการกรอง
			น้ำมันไบโอดีเซล	ความดันตกคร่อม
				ประสิทธิภาพการกรอง
วัสดุ C ความพรุน 55 % (DPF)		น้ำมันดีเซล	ความดันตกคร่อม	
			ประสิทธิภาพการกรอง	
		น้ำมันไบโอดีเซล	ความดันตกคร่อม	
			ประสิทธิภาพการกรอง	
การทดลองที่ อุณหภูมิ 100 C	วัสดุ C ความพรุน 55 % (DPF)	น้ำมันดีเซล	ความดันตกคร่อม	
			ประสิทธิภาพการกรอง	
			น้ำมันไบโอดีเซล	ความดันตกคร่อม
				ประสิทธิภาพการกรอง

ในการทดลองทั้งหมด 16 จะให้ข้อมูลที่เหมือนกันคือ ค่าความดันตกคร่อมที่เกิดจากการดักกรองอนุภาคเขม่าของวัสดุพรุน ค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง ส่วนค่าประสิทธิภาพการดักกรองอนุภาคเขม่าของวัสดุพรุน ค่านี้จะได้เฉพาะการทดลองเกี่ยวกับประสิทธิภาพการดักกรองอนุภาคเขม่าของวัสดุพรุนซึ่งมีทั้งหมด 8 การทดลอง ดังนั้นการเลือกค่าต่างๆมาเปรียบเทียบกันนั้นต้องกำหนดขอบเขตการทดลองให้เป็นแบบเดียวกันด้วย สำหรับการเปรียบเทียบค่าต่างๆจำแนกเป็นหัวข้อคือ

- (1) การเปรียบเทียบค่าความดันตกคร่อมที่เกิดจากวัสดุพรุนที่มีค่าความพรุนแตกต่างกัน
- (2) การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการดักกรองของวัสดุพรุนที่ค่าความพรุนแตกต่างกัน
- (3) การเปรียบเทียบค่าความดันตกคร่อมที่เกิดจากวัสดุพรุนชนิดเดียวกันที่อุณหภูมิต่างกัน
- (4) การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการดักกรองของวัสดุพรุนชนิดเดียวกันที่อุณหภูมิต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.7 การทดลองวัดค่าความดันตกคร่อมและวัดประสิทธิภาพการดักกรองของวัสดุพูน

ในการทดลองเพื่อวัดค่าความดันตกคร่อมและวัดประสิทธิภาพการดักกรองของวัสดุพูนเป็นการทดลองเพื่อดูค่าความแตกต่างของระยะเวลาในการเกิดการดักกรองอนุภาคเขม่าดีเซลและไบโอดีเซลซึ่งจะสามารถบ่งบอกได้ว่าอนุภาคเขม่าดีเซลหรืออนุภาคเขม่าไบโอดีเซลมีความหนาแน่นหรือมีขนาดของอนุภาคใดใหญ่กว่า ซึ่งจะต้องมีปัจจัยในส่วนอื่นๆเข้ามาพิจารณาคด้วย ในส่วนของการทดลองจะแบ่งเป็นสองส่วน

#### 3.7.1 การทดลองวัดค่าความดันตกคร่อมและวัดประสิทธิภาพการดักกรองของวัสดุพูน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสมีขั้นตอนดังนี้

- (1) อ่านและบันทึกค่าความดันเริ่มต้นจากมานอมิเตอร์
- (2) เปิดปั๊มและบันทึกค่าความดันที่ตกคร่อมที่เกิดจากวัสดุพูน
- (3) จุดตะเกียงน้ำมันดีเซล (หรือน้ำมันไบโอดีเซลขึ้นอยู่กับวิธีการทดลอง) ภายในระยะเวลาที่กำหนดเมื่อครบจึงดับไฟ และปิดปั๊ม
- (4) บันทึกค่าความดันตกคร่อมจากมานอมิเตอร์ และวัดน้ำหนักของน้ำมันที่ลดลง พร้อมทั้งตรวจสอบไส้ตะเกียงที่ขึ้นออกมาจากตะเกียงต้องมีความยาว 10 มิลลิเมตรเสมอ
- (5) เปลี่ยนกระดวยกรองเพื่อนำกระดวยกรองมาวัดปริมาณเขม่าที่ติดอยู่บนกระดวยกรองด้วยเครื่องวัดเปอร์เซ็นต์ควันดำ (ไม่ต้องเปลี่ยนกระดวยกรองถ้าเป็นการทดลองการวัดความดันตกคร่อม)
- (6) ทำซ้ำข้อ (2) จนถึงข้อ (5) จนค่าความดันตกคร่อมที่วัดได้เริ่มคงที่จึงหยุดการทดลอง
- (7) นำไส้ตะเกียงมาวัดความยาวและจดบันทึกค่า ถอดวัสดุพูนออกจากชุดทดลองแล้วนำไปวัดความหนาของอนุภาคที่เกาะตัวกันบนผิวหน้าของวัสดุพูน

#### 3.7.2 การทดลองวัดค่าความดันตกคร่อมและวัดประสิทธิภาพการดักกรองของวัสดุพูน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสมีขั้นตอนดังนี้

- (1) อ่านและบันทึกค่าความดันเริ่มต้นจากมานอมิเตอร์
- (2) เปิดปั๊มและบันทึกค่าความดันที่ตกคร่อมที่เกิดจากวัสดุพูน
- (3) เปิดฮีตเตอร์และรอให้ฮีตเตอร์ทำงานจนถึงอุณหภูมิ 100 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(4) จุดตะเกียงน้ำมันดีเซล (หรือน้ำมัน ไบโอดีเซลขึ้นอยู่กับวิธีการทดลอง) ภายในระยะเวลาที่กำหนดเมื่อครบจึงดับไฟ และปิดปั๊ม

(5) บันทึกค่าความดันตกคร่อมจากมานอมิเตอร์ และวัดน้ำหนักของน้ำมันที่ตกลงพร้อมทั้งตรวจสอบไส้ตะเกียงที่ยื่นออกมาจากตะเกียงต้องมีความยาว 10 มิลลิเมตรเสมอ

(6) เปลี่ยนกระดาษกรองเพื่อนำกระดาษกรองมาวัดปริมาณเขม่าที่ติดอยู่บนกระดาษกรองด้วยเครื่องวัดเปอร์เซ็นต์ควันดำ (ไม่ต้องเปลี่ยนกระดาษกรอง ถ้าเป็นการทดลองความดันตกคร่อม)

(7) ทำซ้ำข้อ (2) จนถึงข้อ (6) จนค่าความดันตกคร่อมที่วัดได้เริ่มคงที่จึงหยุดการทดลอง

(8) นำไส้ตะเกียงมาวัดความยาวและจดบันทึกค่า ถอดวัสดุพอรุนออกจากชุดทดลองแล้วนำไปวัดความหนาของอนุภาคที่เกาะตัวกันบนผิวหน้าของวัสดุพอรุน

### 3.8 การถ่ายภาพเพื่อวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างอนุภาคเขม่าดีเซลและไบโอดีเซล

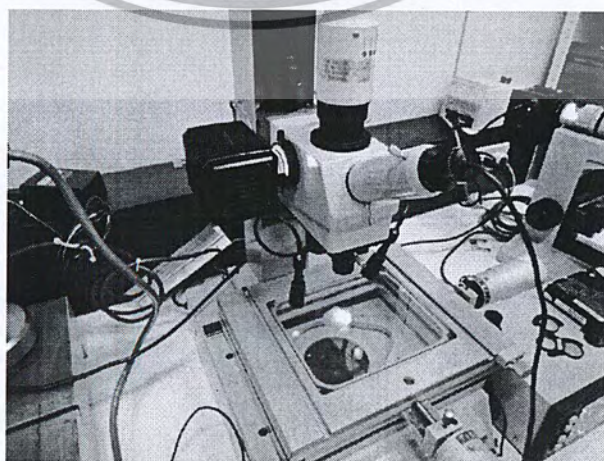
#### 3.8.1 ถ่ายภาพจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 30 เท่า เพื่อดูลักษณะการก่อตัวของอนุภาคเขม่า

หลังจากทำการทดลองเพื่อวัดค่าความดันตกคร่อมและวัดประสิทธิภาพการกรองของวัสดุพอรุนแต่ละชนิดแล้ว สามารถนำวัสดุพอรุนที่ได้จากการทดลองมาส่งคุณลักษณะการก่อตัวของอนุภาคเขม่าดีเซลและไบโอดีเซล และความหนาแน่นการเกาะตัว โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยาย 30 เท่า ซึ่งวัสดุพอรุนที่ใช้ในการถ่ายภาพมีดังนี้

วัสดุพอรุน A น้ำมันดีเซล, น้ำมันไบโอดีเซล

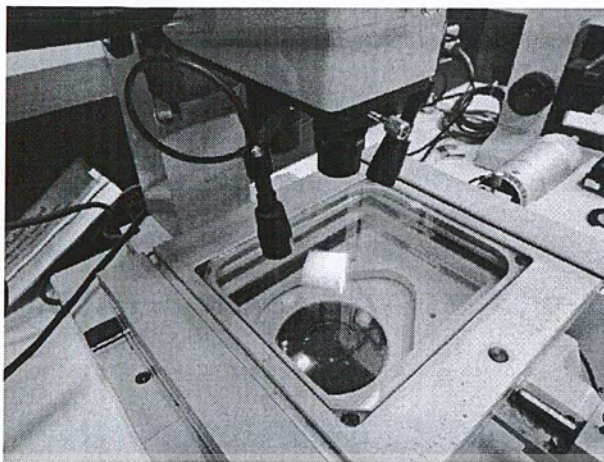
วัสดุพอรุน B น้ำมันดีเซล, น้ำมันไบโอดีเซล

วัสดุพอรุน C (DPF) น้ำมันดีเซล, น้ำมันไบโอดีเซล



รูปที่ 3.22 กล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 30 เท่า ที่ใช้ในการถ่ายภาพของวัสดุพอรุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้เห็นได้เห็น กรุณาอย่าเผยแพร่ข้อมูลใดๆ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.23 การใช้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 30 เท่า ในการถ่ายภาพของวัสดุพูน

### 3.8.2 การถ่ายภาพอนุภาคเขม่าด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด

การถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด โดยใช้กระดวยกรองกรองผ่านปั๊ม ใช้เวลาเพียงวินาทีเดียว แล้วนำกระดวยกรองที่มีอนุภาคเขม่าดีเซลหรือไบโอดีเซลติดอยู่ไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด เพื่อดูลักษณะการเกาะตัวของอนุภาค และวัดขนาดของอนุภาคเขม่าดีเซลและไบโอดีเซล และหาค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคดีเซลหรือไบโอดีเซล นำค่าที่ได้มาพล็อตกราฟเพื่อเปรียบเทียบกับขนาดของอนุภาคเขม่าดีเซลหรือไบโอดีเซล

### 3.9 กำหนดปริมาณความหนาแน่นของอนุภาคในอากาศ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร

เป็นการคำนวณจำนวนของอนุภาคเขม่าดีเซลและไบโอดีเซลในอากาศหนึ่งลูกบาศก์เซนติเมตร โดยการนำวัสดุพูนที่ทำการทดสอบแล้วมาวัดค่าความหนาแน่นมีวิธีการคำนวณดังนี้

หาปริมาตรของเขม่าที่เกาะอยู่บนผิวหน้าของวัสดุพูนจากสมการ

$$V_{\text{soot cake}} = \text{thickness} * \pi r^2 \quad (3.5)$$

ปริมาตรที่แท้จริงของเขม่าไอเสียที่เกาะอยู่บนผิวหน้าของวัสดุพูน

$$V_{\text{soot actual}} = \frac{(100 - 55)}{100} * V_{\text{soot cake}} \quad (3.6)$$

คำนวณปริมาตรของอากาศที่ไหลผ่านปั๊มทั้งหมดเมื่อเกิด soot cake

$$V_{\text{Air}} = \dot{Q} * t \quad (3.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณขนาดของอนุภาคไอเสียหนึ่งอนุภาค

$$Size = (4/3) * \pi * (D/2)^3 \quad (3.8)$$

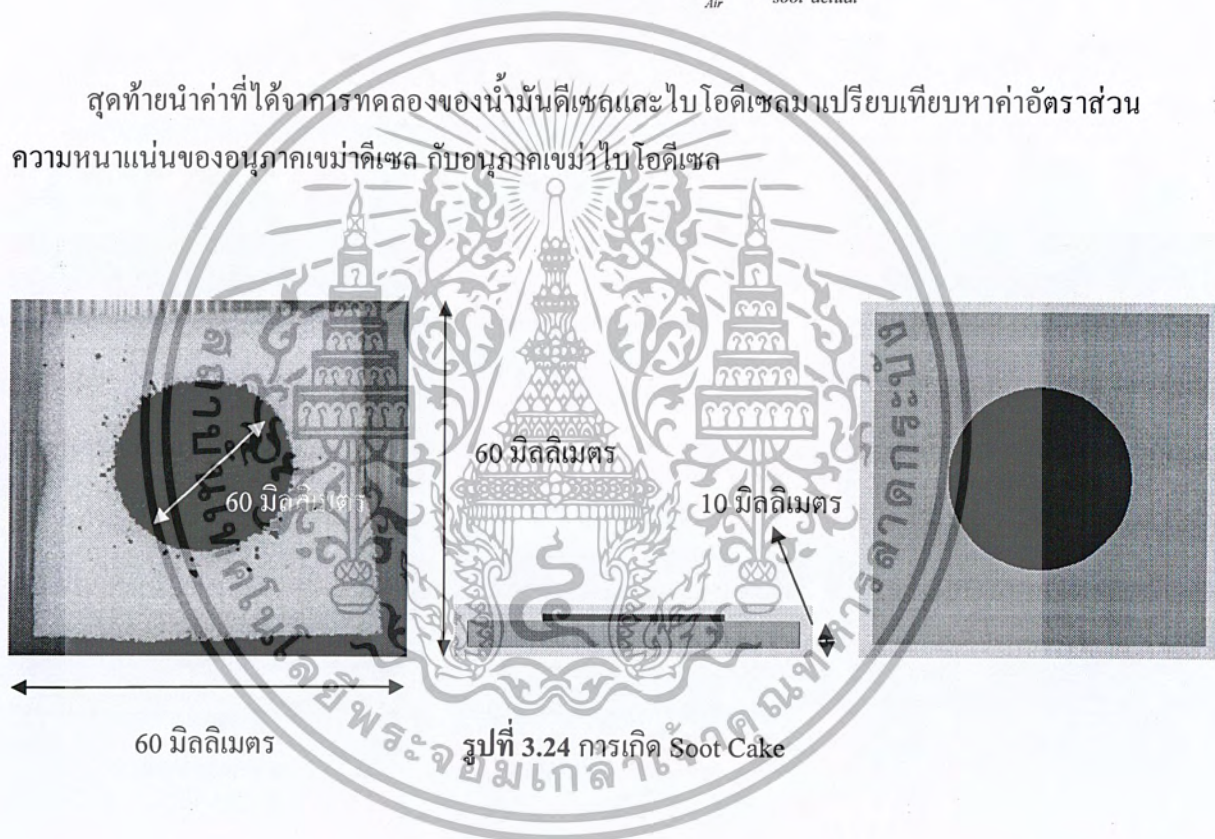
หาจำนวนอนุภาคทั้งหมด

$$Number\ of\ Soot = \frac{V_{soot\ actual}}{Size} \quad (3.9)$$

หาความหนาแน่นของอนุภาคในหนึ่งลูกบาศก์เซนติเมตร

$$D = Number\ of\ Soot \frac{Number\ of\ Soot}{V_{Air} - V_{soot\ actual}} \quad (3.10)$$

สุดท้ายนำค่าที่ได้จากการทดลองของน้ำมันดีเซลและไบโอดีเซลมาเปรียบเทียบกับค่าอัตราส่วนความหนาแน่นของอนุภาคเขม่าดีเซล กับอนุภาคเขม่าไบโอดีเซล



## บทที่ 4

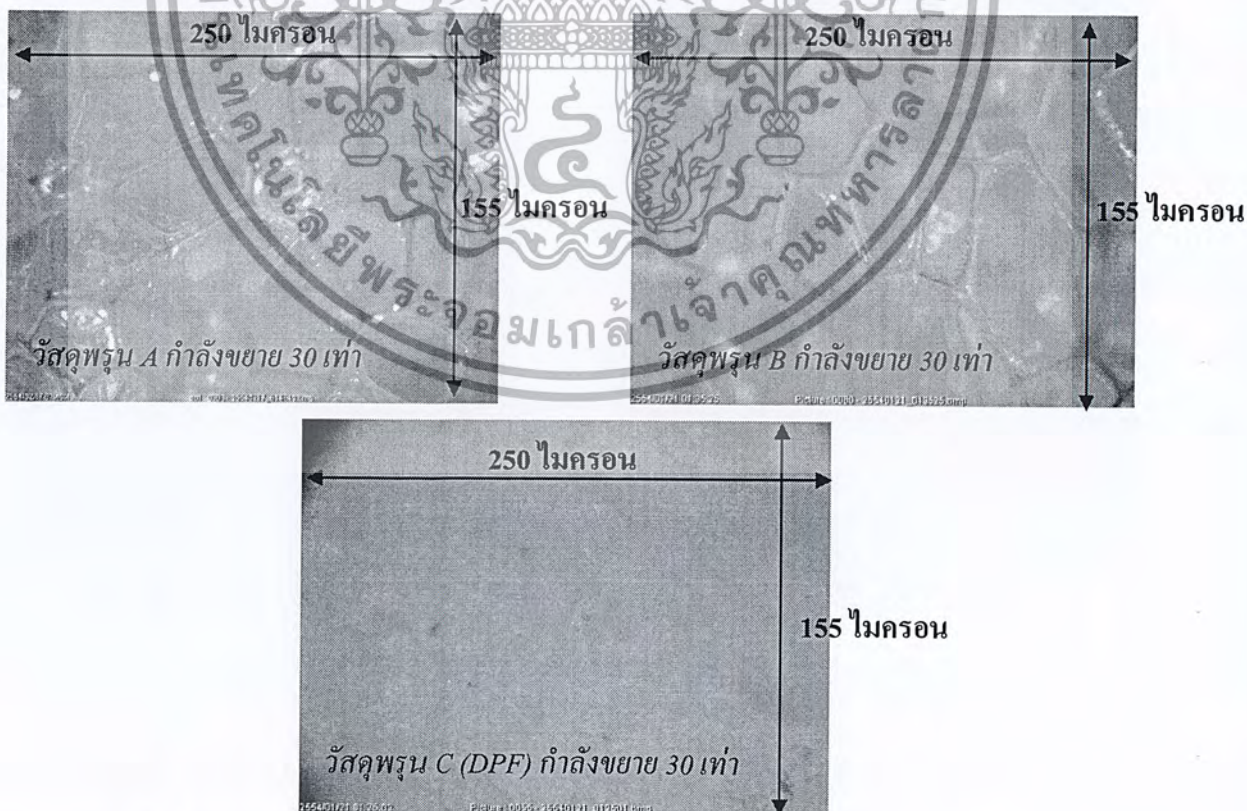
### ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

ในส่วนของ การวิเคราะห์ผลการทดลองเราจะแบ่งเป็นสามส่วนคือการวิเคราะห์ภาพถ่ายอนุภาค ดีเซลและไบโอดีเซล ซึ่งจะเป็นการวัดขนาดของอนุภาคเขม่า ส่วนที่สองคือการคำนวณปริมาณความหนาแน่นของเขม่าที่ได้จากการเผาไหม้ด้วยตะเกียงของน้ำมันทั้งสองชนิด และส่วนสุดท้าย เป็นการทดลองเพื่อวัดความดันตกคร่อมและประสิทธิภาพการดักกรองของวัสดุพรุนที่มีค่าค่าความพรุนแตกต่างกัน

#### 4.1 การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างอนุภาคจากภาพถ่าย

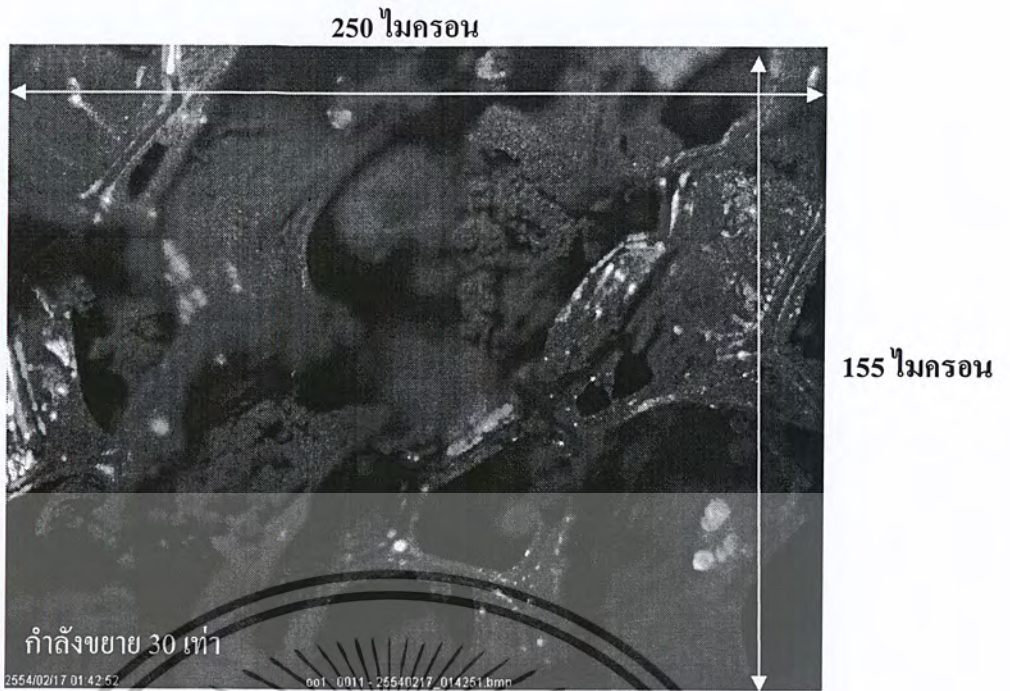
สำหรับในส่วนของ การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างอนุภาคดีเซลและไบโอดีเซลจากภาพถ่ายจะแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ การวิเคราะห์ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 30 เท่า และการวิเคราะห์ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

##### 4.1.1 การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างอนุภาคจากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 30 เท่า

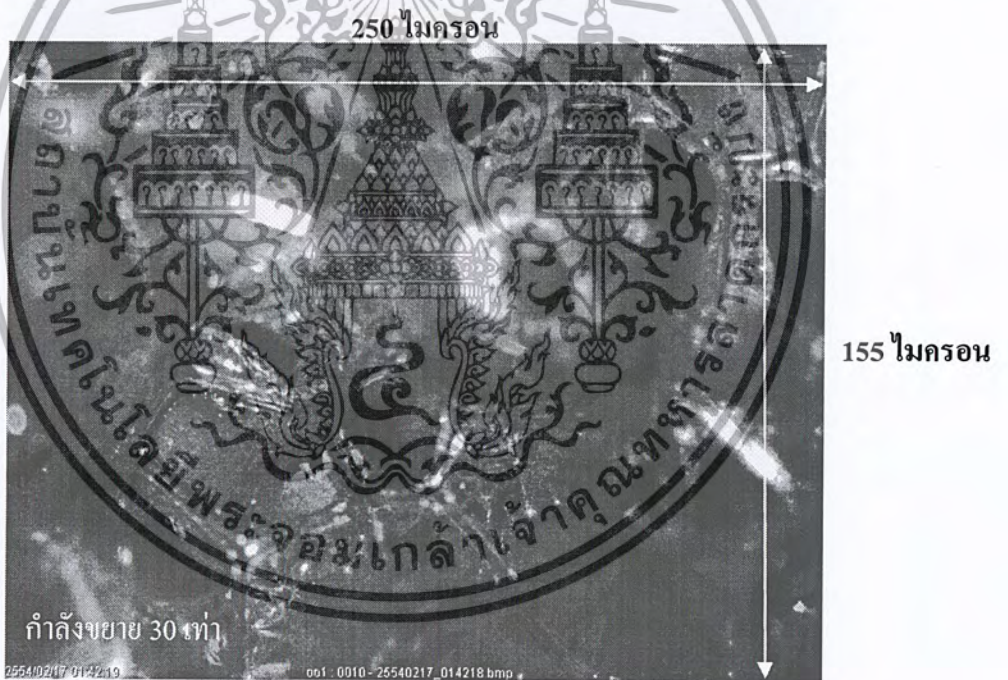


รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายผิววัสดุพรุนทั้ง 3 ชนิดด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 30 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายอนุภาคเขม่าดีเซลบนวัสดุพรมชนิด A หลังทำการทดลอง

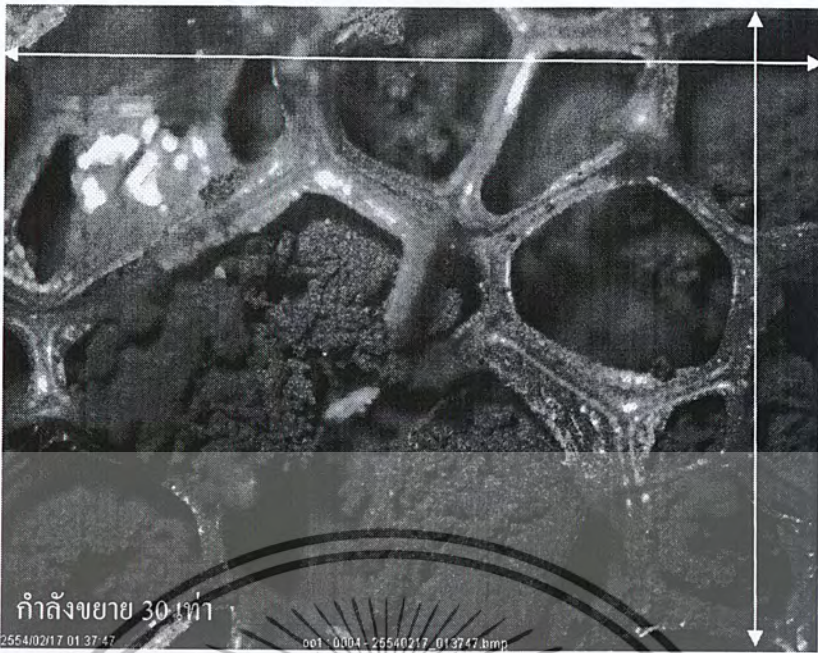


รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายอนุภาคเขม่าไบโอดีเซลบนวัสดุพรมชนิด A หลังทำการทดลอง

จากรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 จะสังเกตเห็นว่าที่ผิววัสดุพรมชนิด A การเกาะตัวของอนุภาคเขม่าดีเซลจะมีความหนาแน่นมากกว่าอนุภาคเขม่าไบโอดีเซล นอกจากนี้ความหนาของอนุภาคเขม่า และความเข้มของสีดำที่ปรากฏอยู่บนรูปถ่ายก็เป็นปัจจัยที่บ่งบอกได้ว่าอนุภาคเขม่าดีเซลมีขนาดใหญ่กว่า หรือมีจำนวนมากกว่า อนุภาคเขม่าไบโอดีเซล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

250 ไมครอน



155 ไมครอน

รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายอนุภาคเขม่าดีเซลบนวัสดุพูนชนิด B หลังทำการทดลอง

250 ไมครอน



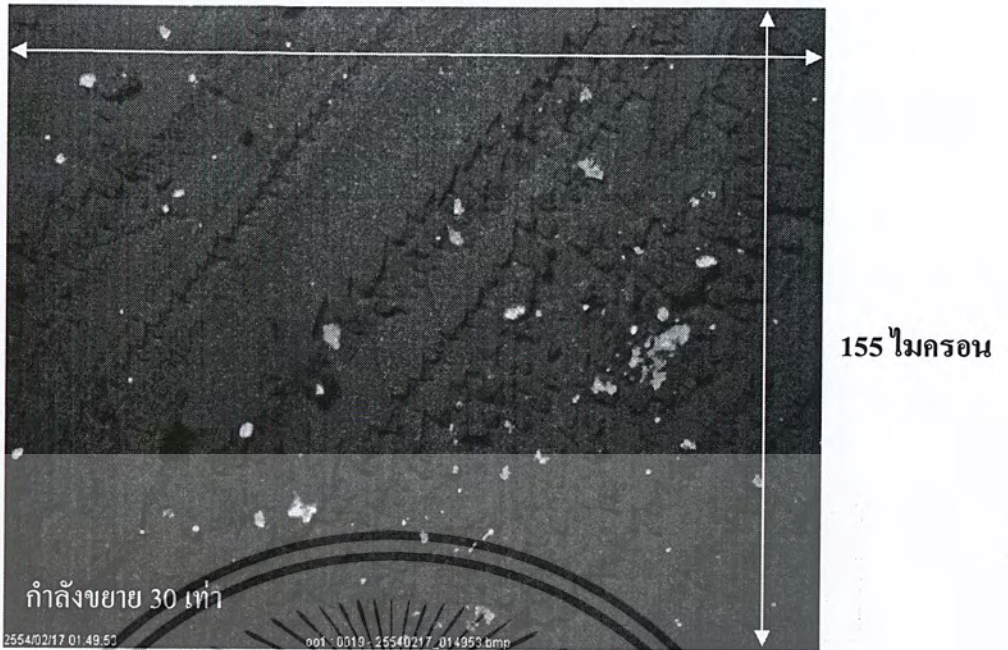
155 ไมครอน

รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายอนุภาคเขม่าไบโอดีเซลบนวัสดุพูนชนิด B หลังทำการทดลอง

เช่นเดียวกับกับวัสดุพูนชนิด A จะสังเกตเห็นว่าที่ผิววัสดุพูนชนิด B การเกาะตัวของอนุภาคเขม่าดีเซลจะมีความหนาแน่นมากกว่าอนุภาคเขม่าไบโอดีเซล นอกจากนี้ความหนาของอนุภาคเขม่าบนผิวและความเข้มของสีดำที่ปรากฏอยู่บนรูปถ่ายก็เป็นปัจจัยที่บ่งบอกได้ว่าอนุภาคเขม่าดีเซลมีขนาดใหญ่กว่า หรือมีปริมาณมากกว่า อนุภาคเขม่าไบโอดีเซลดังรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

250 ไมครอน



รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายอนุภาคเขม่าดีเซลบนวัสดุพรมชนิด C (DPF) หลังทำการทดลอง

250 ไมครอน

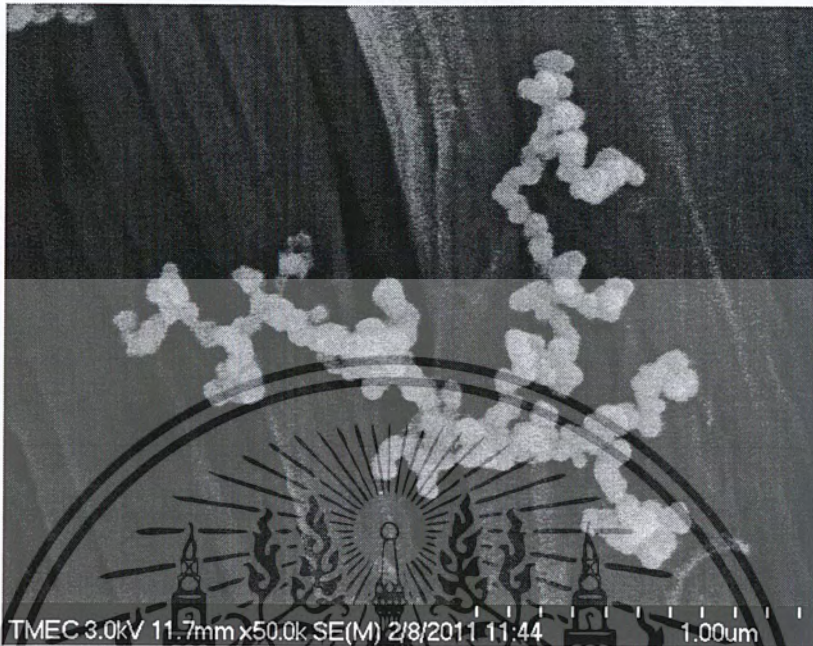


รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายอนุภาคเขม่าไบโอดีเซลบนวัสดุพรมชนิด C (DPF) หลังทำการทดลอง

จากรูปที่ 4.6 และ 4.7 เป็นรูปวัสดุพรมชนิด C (DPF) จะพบว่าอนุภาคเขม่าทั้งของดีเซลและไบโอดีเซล มีการเกาะตัวของอนุภาคหนาแน่นกว่าวัสดุพรมชนิด A และชนิด B เนื่องจากมีค่าความพรุนมากกว่า และจากรูปก็จะสังเกตเห็นว่าอนุภาคเขม่าดีเซลจะมีความหนาแน่นมากกว่าอนุภาคเขม่าไบโอดีเซล และความหนาของอนุภาคเขม่า หรือความเข้มของสีค่าที่ปรากฏอยู่บนรูปถ่ายก็เป็นปัจจัยที่บ่งบอกได้ว่าอนุภาคเขม่าดีเซลมีขนาดใหญ่กว่า หรือมีปริมาณมากกว่า อนุภาคเขม่าไบโอดีเซล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างอนุภาคจากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์  
อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)



รูปที่ 4.8 แสดงลักษณะการเกาะตัวกันของอนุภาคเขม่าดีเซลบนเส้นใยของกระดาษกรอง



รูปที่ 4.9 แสดงลักษณะการเกาะตัวกันของอนุภาคเขม่าไบโอดีเซลบนเส้นใยของกระดาษกรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การวัดขนาดอนุภาคจากภาพถ่าย ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)



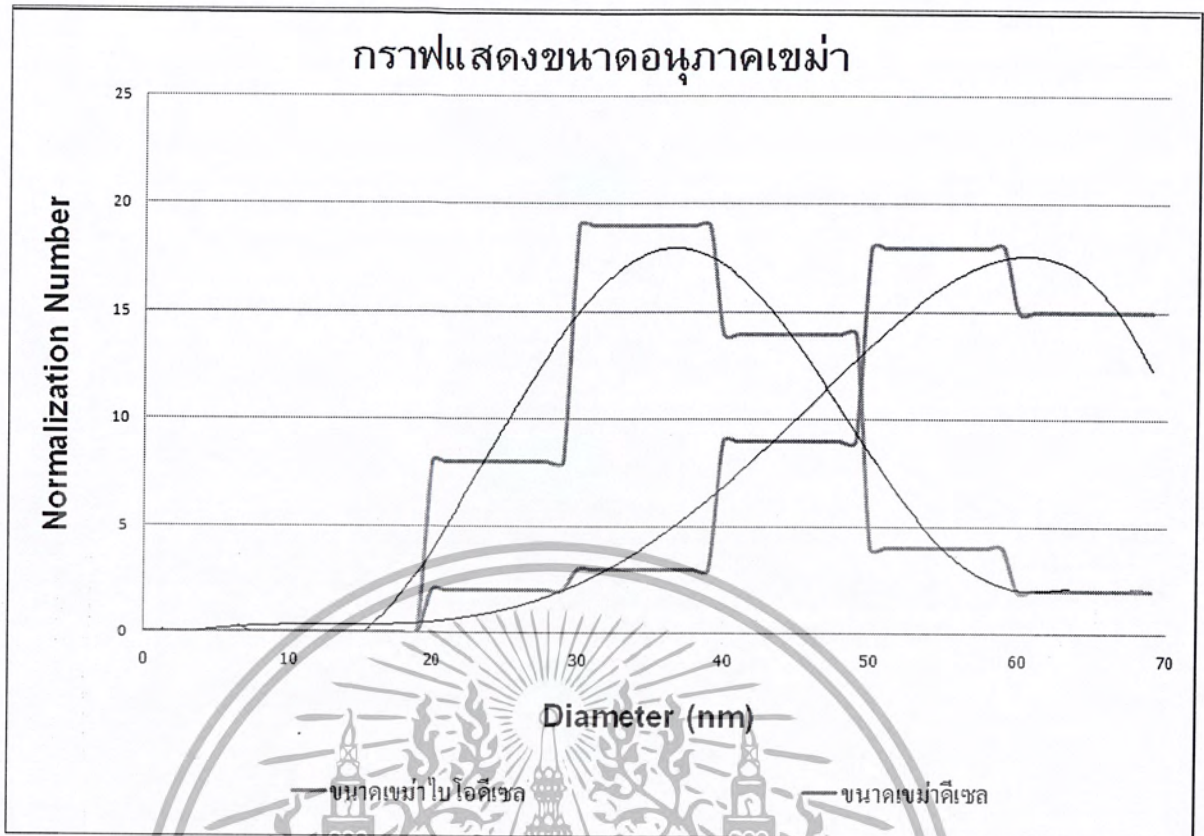
รูปที่ 4.10 การวัดขนาดอนุภาคเขม่าดีเซลจากการถ่ายภาพ SEM



รูปที่ 4.11 การวัดขนาดอนุภาคเขม่าไบโอดีเซลจากการถ่ายภาพ SEM

จากรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 เป็นการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจากกลุ่มก้อนอนุภาคของเขม่าดีเซลและไบโอดีเซลด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด ซึ่งขนาดอนุภาคเขม่าทั้งสองจะมีขนาดอยู่ระหว่าง 20 – 80 nm และจะสังเกตเห็นว่าขนาดของอนุภาคเขม่าดีเซลจะมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของอนุภาคเขม่าไบโอดีเซลโดยเฉลี่ย ซึ่งจะแสดงในรูปกราฟหน้าถัดไป

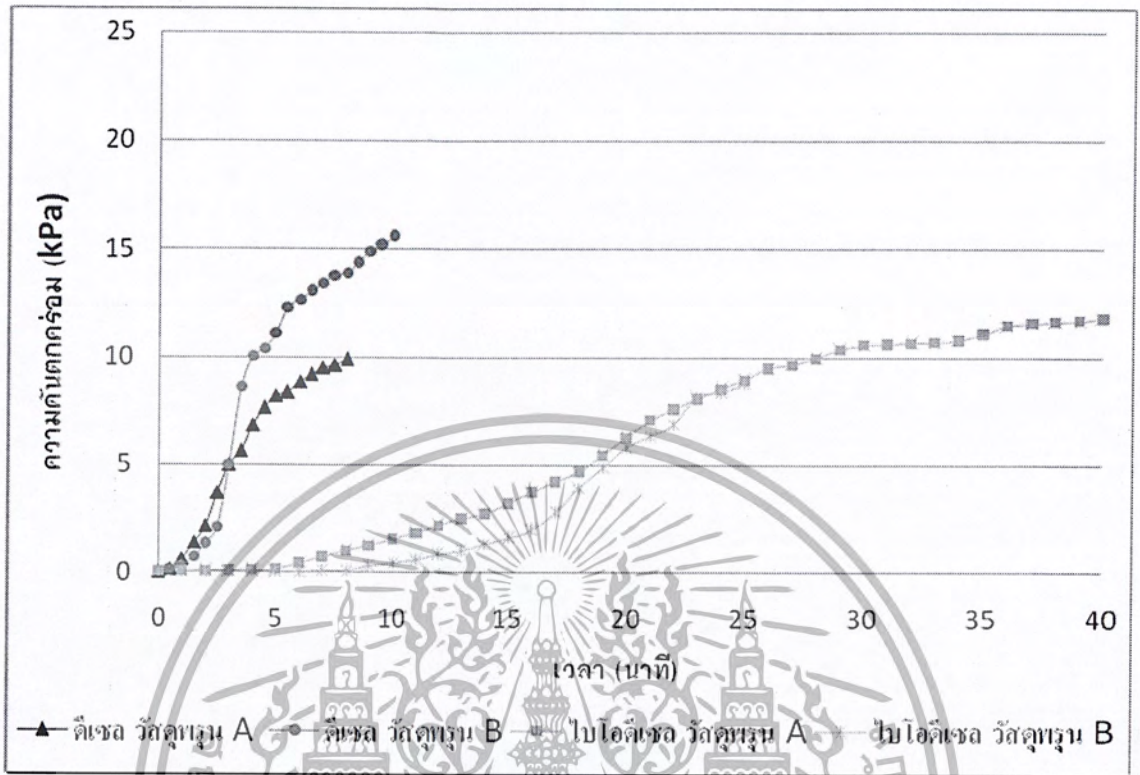
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายเท่านั้น และผู้ยูเห็นเห็นใบ้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 กราฟขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคเขม่าดีเซลเปรียบเทียบกับอนุภาคเขม่าไบโอดีเซล

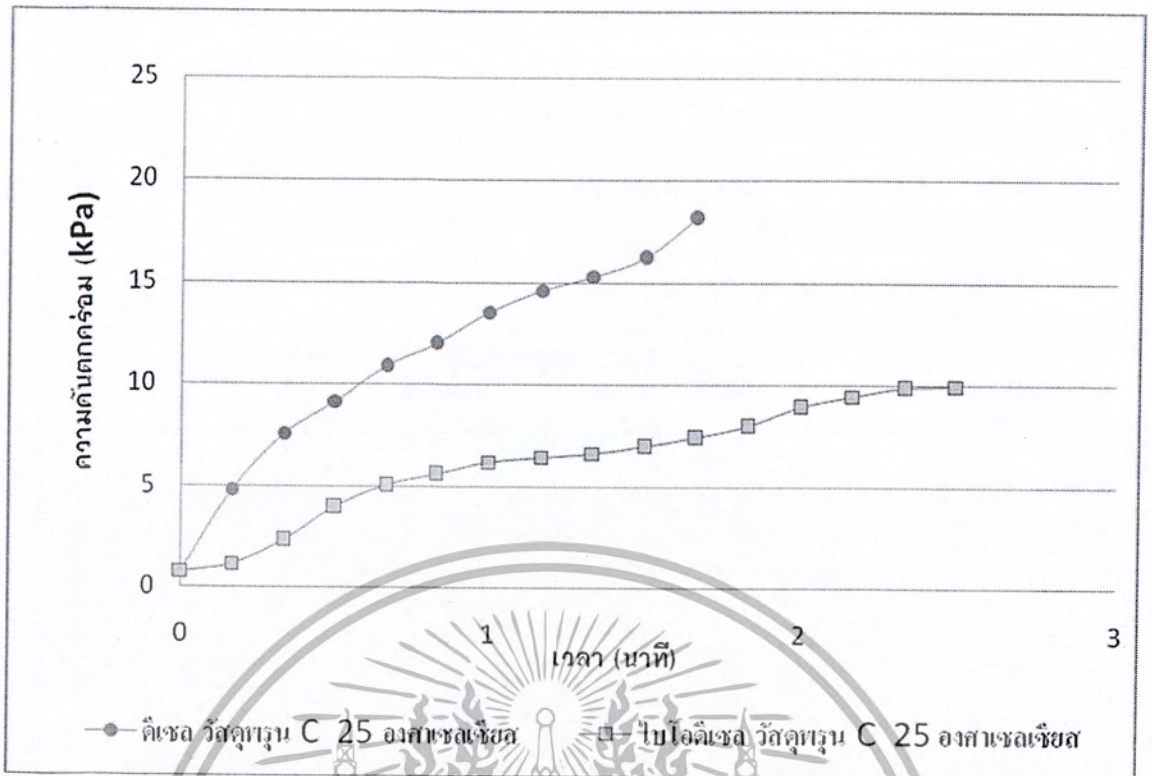
จากรูปที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าขนาดของอนุภาคเขม่าดีเซลมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยส่วนใหญ่อยู่ที่ 50 – 60 นาโนเมตร ในขณะที่อนุภาคเขม่าไบโอดีเซลมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยส่วนใหญ่อยู่ที่ 30 - 40 นาโนเมตร ซึ่งขนาดของอนุภาคของดีเซลมีขนาดใหญ่กว่า

#### 4.3 ผลการวัดความดันตกคร่อมที่เกิดจากการดักกรองวัสดุพรุนที่อุณหภูมิ 25 °C



รูปที่ 4.13 แสดงความดันตกคร่อมที่เกิดจากอนุภาคเขม่าดีเซลและไบโอดีเซลของวัสดุพรุน A และ วัสดุพรุน B ที่อุณหภูมิ 25 °C

จากรูปที่ 4.13 จะเห็นว่าได้ว่าค่าความดันตกคร่อมของวัสดุพรุน A และ B ในน้ำมันดีเซลมีที่ อุณหภูมิการทดลอง 25 °C จะมีค่าความดันตกคร่อมสูงกว่าค่าที่เกิดในน้ำมันไบโอดีเซล



รูปที่ 4.14 แสดงความดันตกคร่อมที่เกิดจากอนุภาคเขม่าดีเซลและไบโอดีเซลของวัสดุพูน C ที่

อุณหภูมิ 25 °C

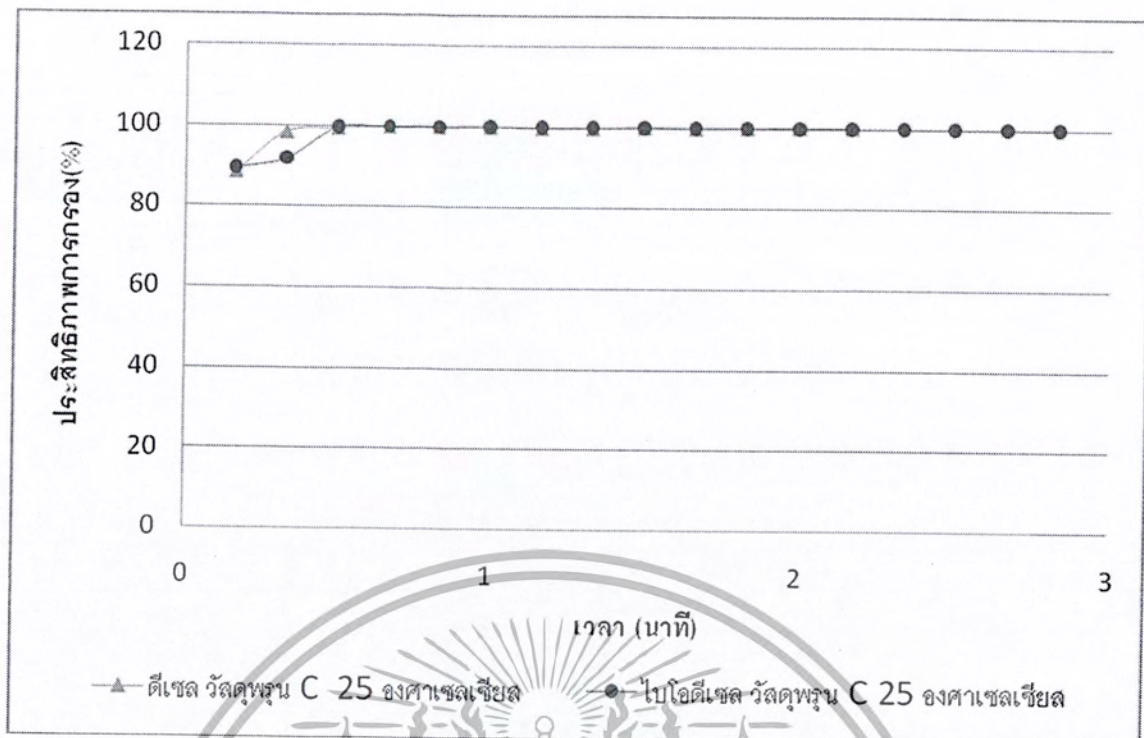
จากรูปที่ 4.14 จะเห็นว่าได้ว่าค่าความดันตกคร่อมของวัสดุพูน C ในน้ำมันดีเซลมีที่อุณหภูมิ การทดลอง 25 °C จะมีค่าความดันตกคร่อมสูงกว่าค่าที่เกิดในน้ำมันไบโอดีเซล

#### 4.4 ผลการวัดประสิทธิภาพการดักกรองของวัสดุพรุน ที่อุณหภูมิ 25 °C



รูปที่ 4.15 แสดงประสิทธิภาพการดักกรองอนุภาคเขม่าดีเซลและไบโอดีเซลของวัสดุพรุน A และ วัสดุพรุน B ที่อุณหภูมิ 25 °C

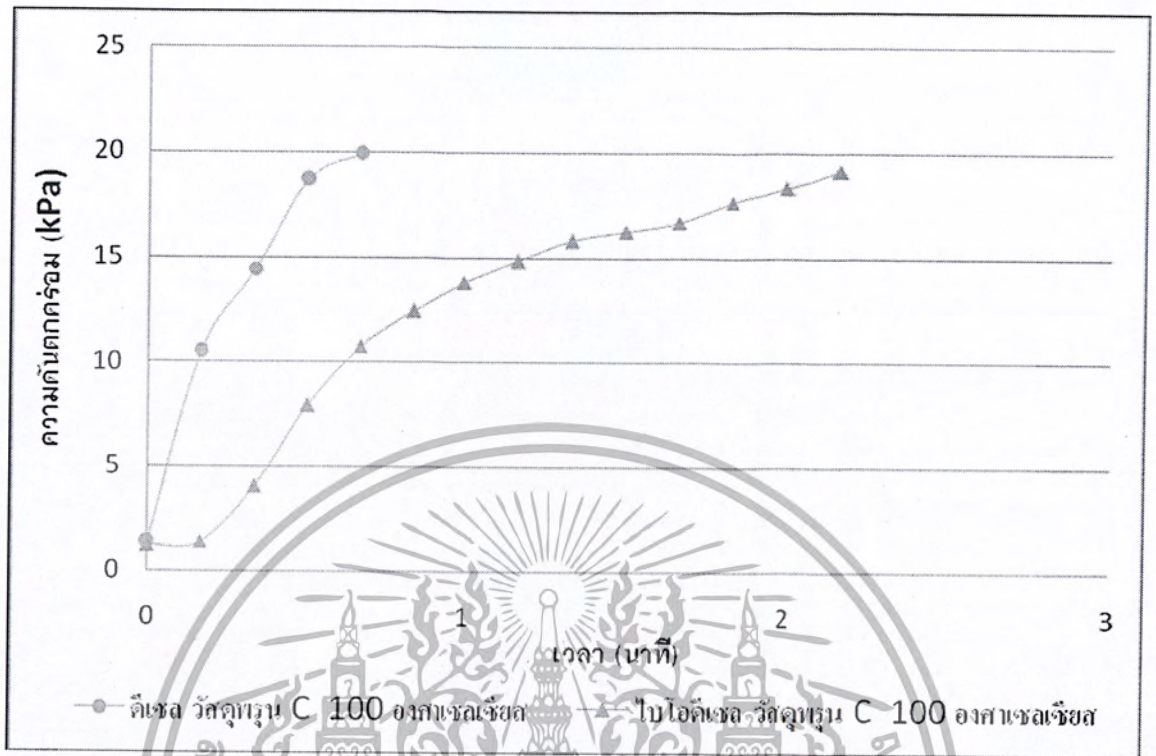
จากรูปที่ 4.15 จะเห็นว่าได้ว่าค่าประสิทธิภาพการกรองของวัสดุพรุน A และ B ในน้ำมันดีเซลที่ อุณหภูมิการทดลอง 25 °C จะมีค่าประสิทธิภาพการกรองสูงกว่าในน้ำมันไบโอดีเซล ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความดันตกคร่อม ซึ่งมีผลมาจากค่าความหนาแน่นของเขม่าในน้ำมัน ดีเซลมีค่ามากกว่าในน้ำมันไบโอดีเซล



รูปที่ 4.16 แสดงประสิทธิภาพการดักกรองอนุภาคเขม่าดีเซลและไบโอดีเซลของวัสดุพรุน C ที่อุณหภูมิ 25 °C

จากรูปที่ 4.16 จะเห็นว่าได้ว่าค่าประสิทธิภาพการกรองของวัสดุพรุน C ในน้ำมันดีเซลที่อุณหภูมิการทดลอง 25 °C จะมีค่าประสิทธิภาพการกรองสูงกว่าในน้ำมันไบโอดีเซล ซึ่งจะเห็นได้ว่ากราฟมีความสัมพันธ์กับค่าความดันตกคร่อม

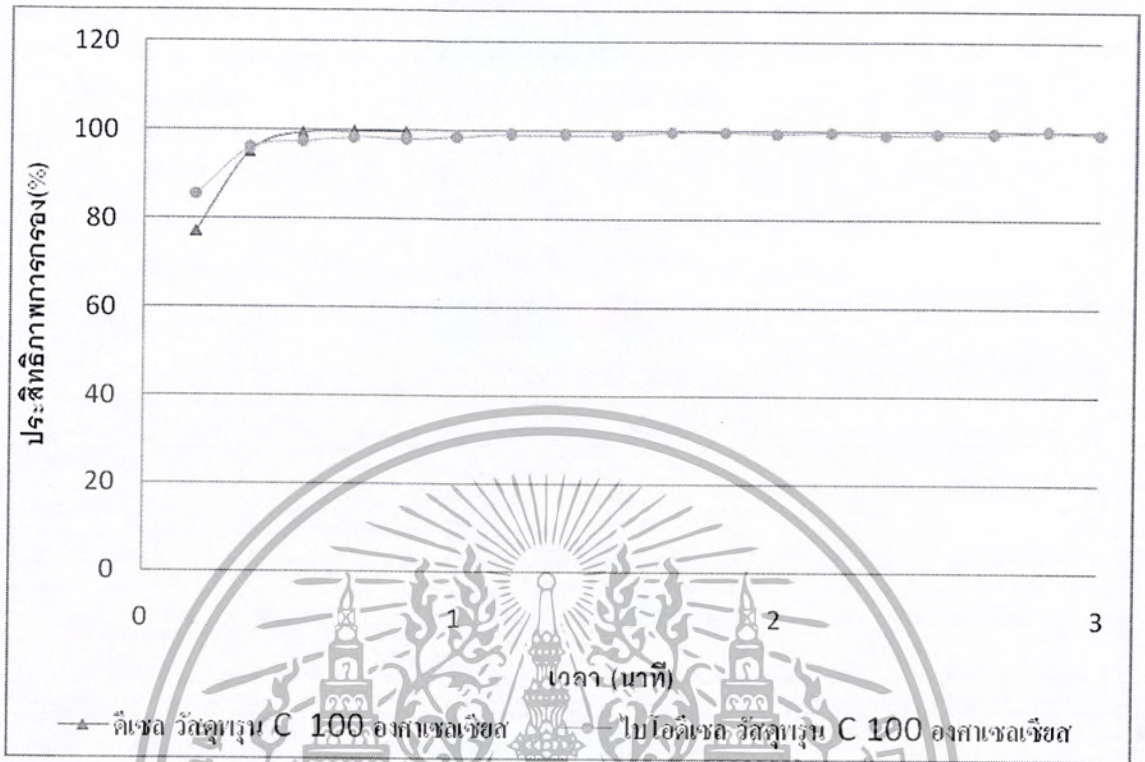
#### 4.5 ผลการวัดความดันตกคร่อมที่เกิดจากการดักกรองของวัสดุพรุนที่อุณหภูมิ 100 °C



รูปที่ 4.17 แสดงความดันตกคร่อมที่เกิดจากอนุภาคเขม่าดีเซลของวัสดุพรุน C ที่อุณหภูมิ 100 °C

จากรูปที่ 4.17 จะเห็นว่าได้ว่าค่าความดันตกคร่อมของวัสดุพรุน C ในน้ำมันดีเซลมีที่อุณหภูมิการทดลอง 100 °C จะมีค่าความดันตกคร่อมสูงกว่าค่าที่เกิดในน้ำมันไบโอดีเซล

#### 4.6 ผลการวัดประสิทธิภาพการดักกรองของวัสดุพูนที่อุณหภูมิ 100 °C



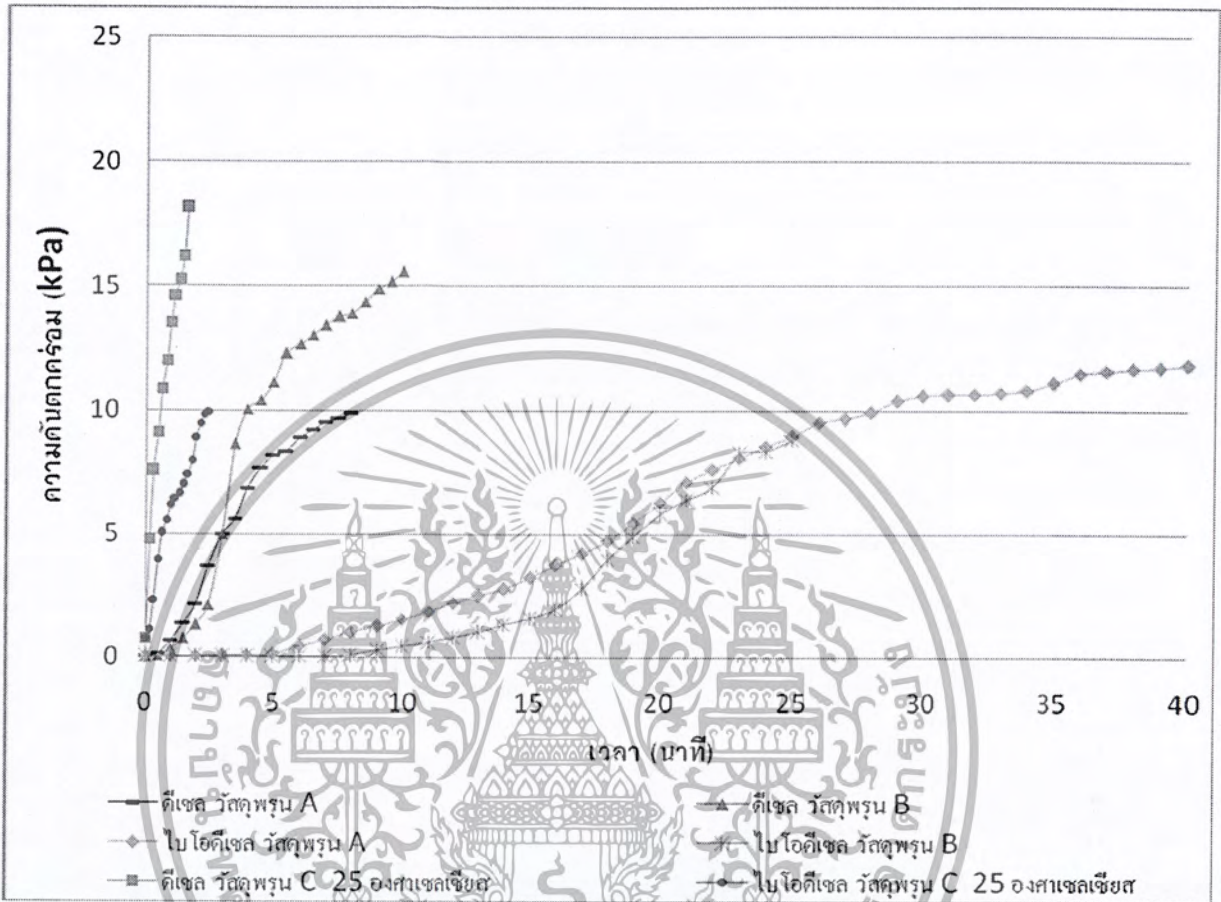
รูปที่ 4.18 แสดงประสิทธิภาพการดักกรองอนุภาคเขม่าดีเซลของวัสดุพูน C ที่อุณหภูมิ 100 °C

จากรูปที่ 4.18 จะเห็นว่าได้ว่าค่าประสิทธิภาพการกรองของวัสดุพูน C ในน้ำมันดีเซลที่อุณหภูมิการทดลอง 100 °C จะมีค่าประสิทธิภาพการกรองสูงกว่าในน้ำมันโพลีอครีเลต ซึ่งจะเห็นได้ว่ากราฟมีความสัมพันธ์กับค่าความดันคคร่อม

## 4.7 วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลอง

### 4.7.1 การเปรียบเทียบค่าความดันตกคร่อมที่เกิดจากวัสดุพอรุนที่มีค่าความพรุนแตกต่างกันที่

อุณหภูมิเท่ากัน (25 °C)

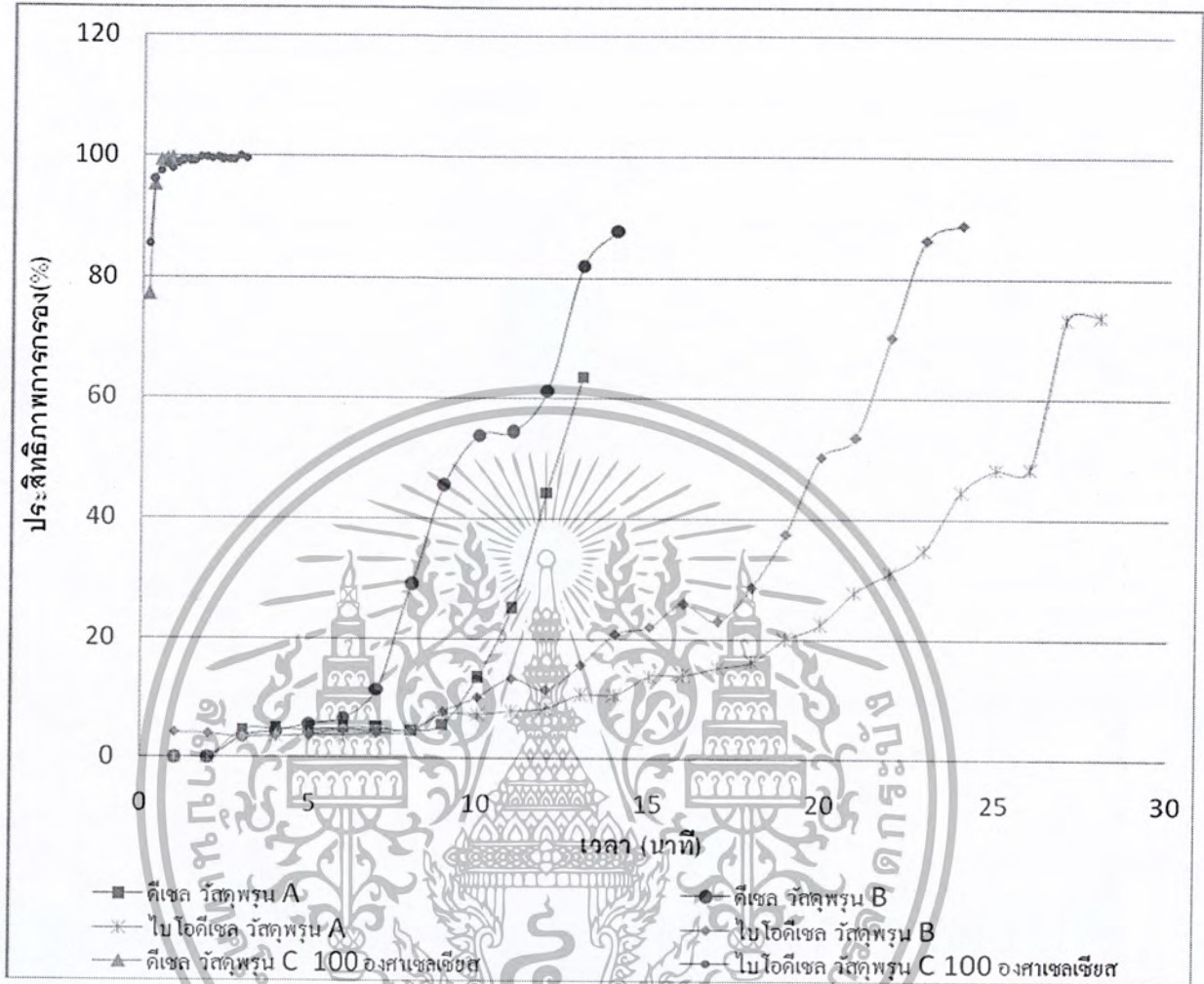


รูปที่ 4.19 กราฟเปรียบเทียบค่าความดันตกคร่อมที่เกิดจากวัสดุพอรุนที่มีค่าความพรุนแตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.19 จะเห็นว่าได้ว่าค่าความดันตกคร่อมของวัสดุพอรุน C (DPF) มีค่าสูงกว่าวัสดุพอรุน A และ B ที่อุณหภูมิเท่ากัน และยังเกิดความแตกต่างของความดันเร็วกว่า ก็เนื่องมาจากวัสดุพอรุน C (DPF) สามารถกรองอนุภาคเขม่าได้เร็วกว่า และยังทำให้เวลาในการเกิด Soot Cake ของวัสดุพอรุน C (DPF) เร็วกว่าด้วย นอกจากนี้จากรูปจะสังเกตเห็นว่าความดันตกคร่อมที่เกิดจากอนุภาคเขม่าดีเซลจะมีค่าสูงกว่าอนุภาคเขม่าไบโอดีเซล เมื่อวัสดุพอรุนที่ใช้เป็นชนิดเดียวกัน

#### 4.7.2 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการดักกรองของวัสดุพรมที่มีค่าความพรุนแตกต่างกัน

ที่อุณหภูมิเท่ากัน (25 °C)

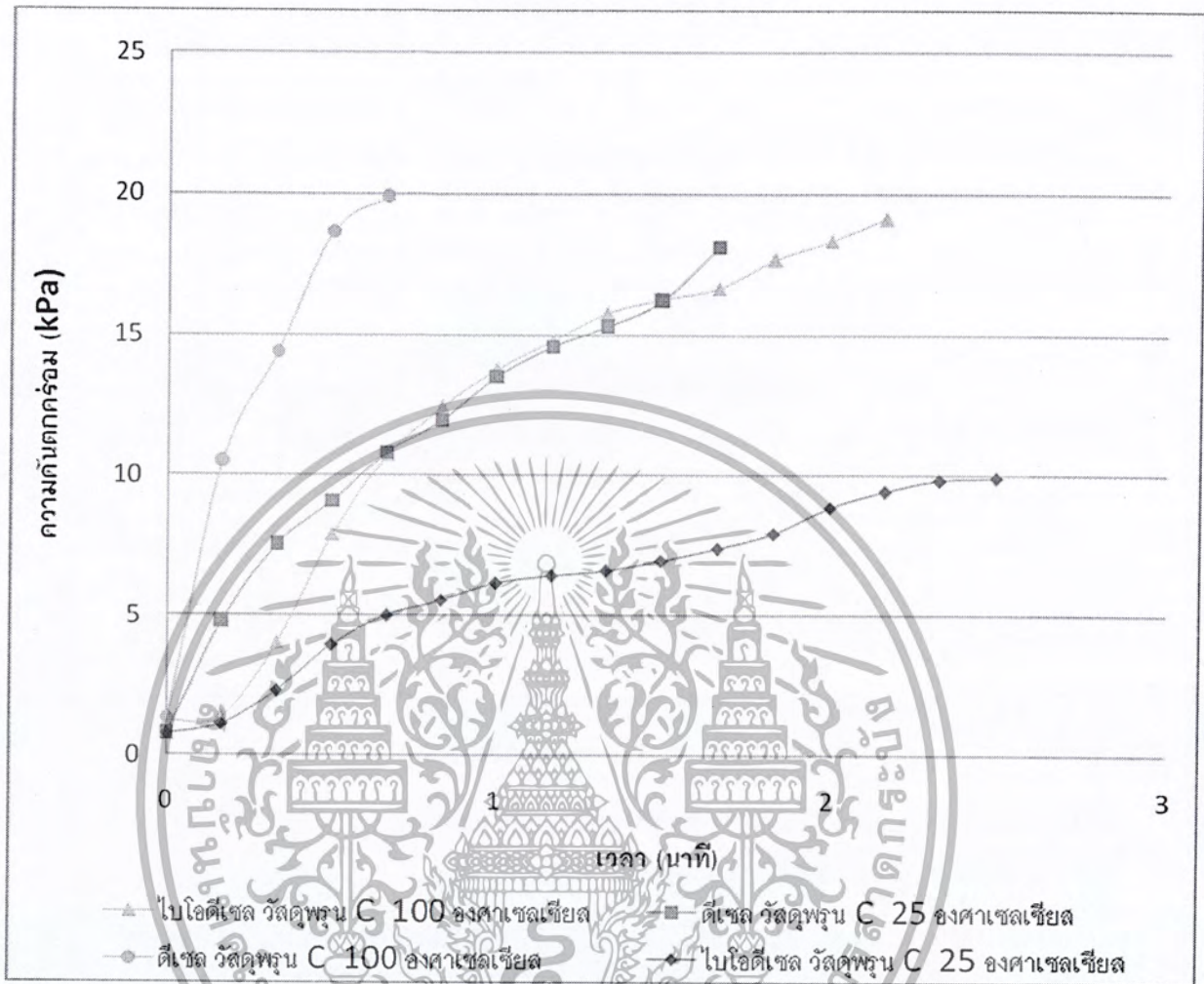


รูปที่ 4.20 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดักกรองของวัสดุพรมที่มีค่าความพรุนต่างกัน

จากรูปที่ 4.20 จะเห็นว่าได้ว่าประสิทธิภาพการดักกรองของวัสดุพรม C (DPF) มีค่าสูงกว่าวัสดุพรม A และ B ที่อุณหภูมิเท่ากัน เนื่องจากวัสดุพรม C (DPF) มีค่าความพรุนน้อยกว่า นอกจากนั้นเวลาที่เกิดกรณีของ Soot Cake ของวัสดุพรม C (DPF) ก็ใช้เวลาน้อยมากเมื่อเทียบกับวัสดุพรมอีกสองชนิด และเมื่อเทียบกันระหว่างอนุภาคเขม่าดีเซลและอนุภาคเขม่าไบโอดีเซลนั้นก็พบว่า อนุภาคเขม่าดีเซลเกิดกรณีของ Soot Cake เร็วกว่าในวัสดุพรมทุกชนิดเมื่อเทียบที่อุณหภูมิเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7.3 การเปรียบเทียบค่าความดันตกคร่อมที่เกิดจากวัสดุพูนชนิดเดียวกันที่อุณหภูมิต่างกัน

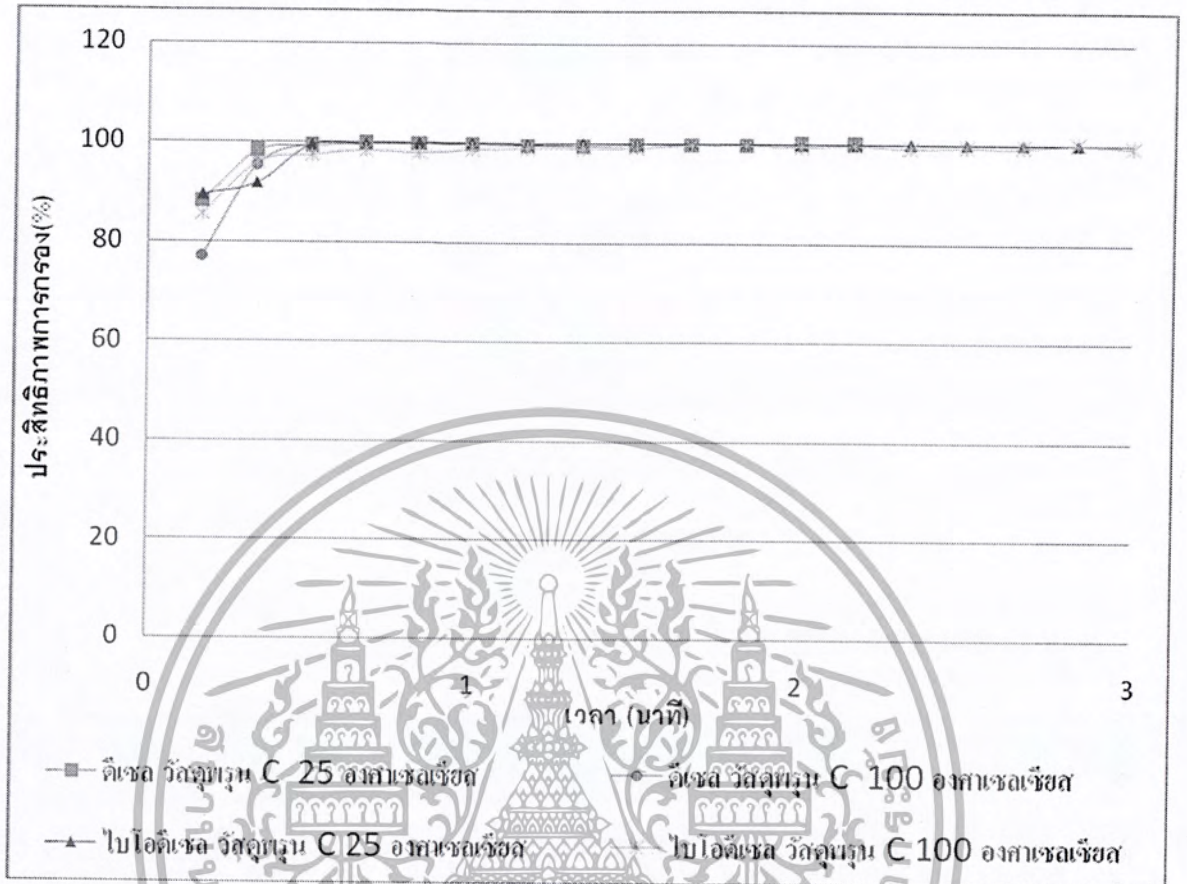


รูปที่ 4.21 กราฟเปรียบเทียบค่าความดันตกคร่อมที่เกิดจากวัสดุพูนชนิดเดียวกันที่อุณหภูมิต่างกัน

จากรูปที่ 4.21 จะเห็นว่าค่าความดันตกคร่อมของอนุภาคเขม่าดีเซลจะมีค่าสูงเมื่อทำการคัดกรองอนุภาคเขม่าที่อุณหภูมิสูงกว่า และยังสังเกตได้ว่าค่าความดันตกคร่อมที่เกิดจากการคัดกรองอนุภาคเขม่าดีเซลจะสูงกว่าค่าความดันตกคร่อมที่เกิดจากการคัดกรองอนุภาคเขม่าไบโอดีเซล นอกจากนี้เวลาที่เกิดความดันตกคร่อมของอนุภาคเขม่าดีเซลยังจะเกิดเร็วกว่าของอนุภาคเขม่าไบโอดีเซล และที่อุณหภูมิสูงขึ้นเท่าไร ค่าความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นก็จะมีค่ามากขึ้น เป็นผลมาจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอนุภาคเขม่าก็จะมีพลังงานสูงขึ้นทำให้เกิดการชนของอนุภาที่ขึ้น ทำให้ค่าความดันสูงนั่นเอง

#### 4.7.4 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการดักกรองของวัสดุพรมชนิดเดียวกันที่อุณหภูมิ

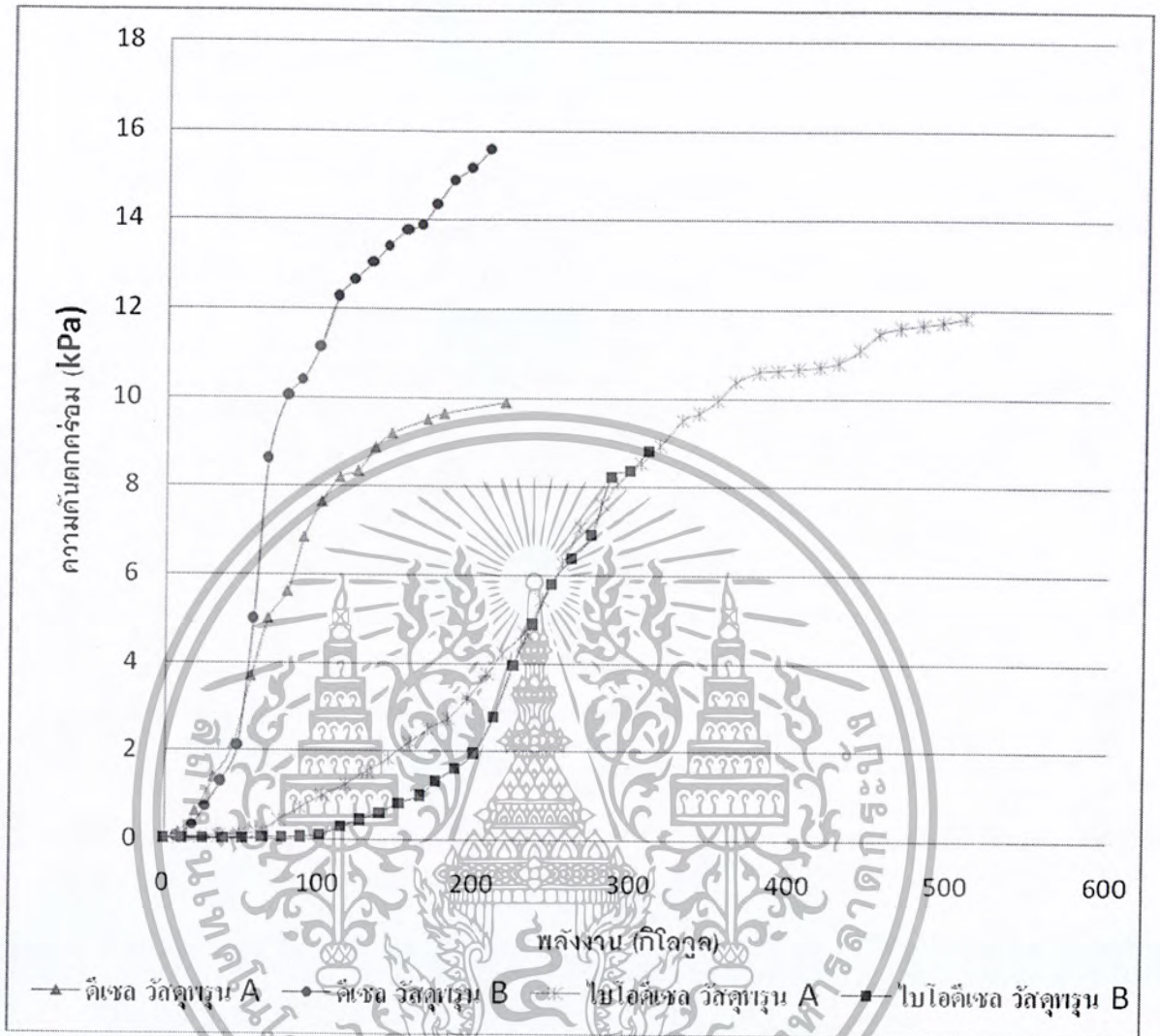
ต่างกัน



รูปที่ 4.22 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดักกรองของวัสดุพรมชนิดเดียวกันที่มีอุณหภูมิต่างกัน

จากรูปที่ 4.22 จะเห็นว่าได้ว่าประสิทธิภาพการดักกรองของวัสดุพรมชนิดเดียวกันจะมีประสิทธิภาพในการดักกรองอนุภาคเขม่าคีเซลและ ไบ โอดีเซล ได้ดีกว่า เมื่อมีอุณหภูมิในการทดลองสูงกว่า และจากกราฟจะเห็นว่าประสิทธิภาพการดักกรองของวัสดุพรมชนิดเดียวกันจะมีประสิทธิภาพการดักกรองอนุภาคเขม่าคีเซล ได้ดีกว่าอนุภาคเขม่าไบ โอดีเซลที่อุณหภูมิเดียวกัน ข้อสังเกตคือวัสดุพรมชนิด C (DPF) สามารถดักกรองอนุภาคทั้งคีเซลและไบ โอดีเซลได้เกือบ 100 % โดยใช้เวลาน้อยมากในการเกิด Soot Cake

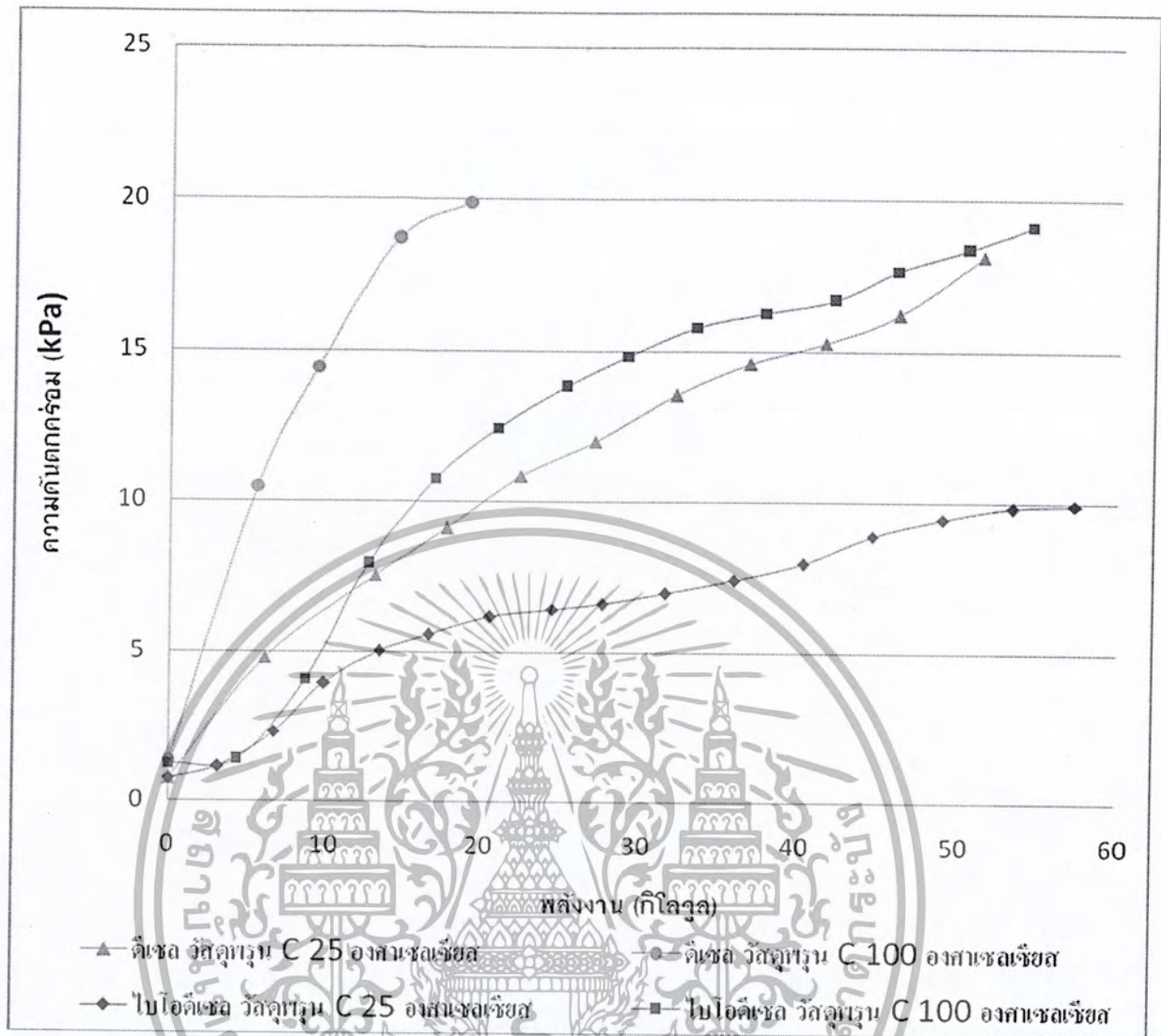
#### 4.7.5 การเปรียบเทียบค่าความดันตกคร่อมกับการสิ้นเปลืองพลังงานของเชื้อเพลิง



รูปที่ 4.23 กราฟเปรียบเทียบค่าความดันตกคร่อมกับพลังงานของวัสดุหุวน A และ B

จากรูปที่ 4.23 จะเห็นว่าได้ว่าค่าความดันตกคร่อมของวัสดุหุวน B มีค่าสูงกว่าวัสดุหุวน A ที่อุณหภูมิและพลังงานเท่ากัน และยังเกิดความแตกต่างของความดันเร็วกว่า ก็เนื่องมาจากวัสดุหุวน B สามารถดีกรองอนุภาคเขม่าได้เร็วกว่า และยังทำให้พลังงานที่ใช้ในการเกิด Soot Cake ของวัสดุหุวน B เร็วกว่าด้วย นอกจากนี้จากรูปจะสังเกตเห็นความดันตกคร่อมที่เกิดจากอนุภาคเขม่าดีเซลจะมีค่าสูงกว่าอนุภาคเขม่าไบโอดีเซล เมื่อวัสดุหุวนที่ใช้เป็นชนิดเดียวกัน และถ้าหากเปรียบเทียบการเขียนกราฟระหว่าง ความดันตกคร่อมกับเวลา และกราฟความดันตกคร่อมกับพลังงาน แนวโน้มของกราฟยังมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน นั่นคือยิ่งเวลาในการจุดตะเกียงมากขึ้น พลังงานที่ใช้ก็จะมากขึ้นด้วยตามการเผาไหม้เชื้อเพลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

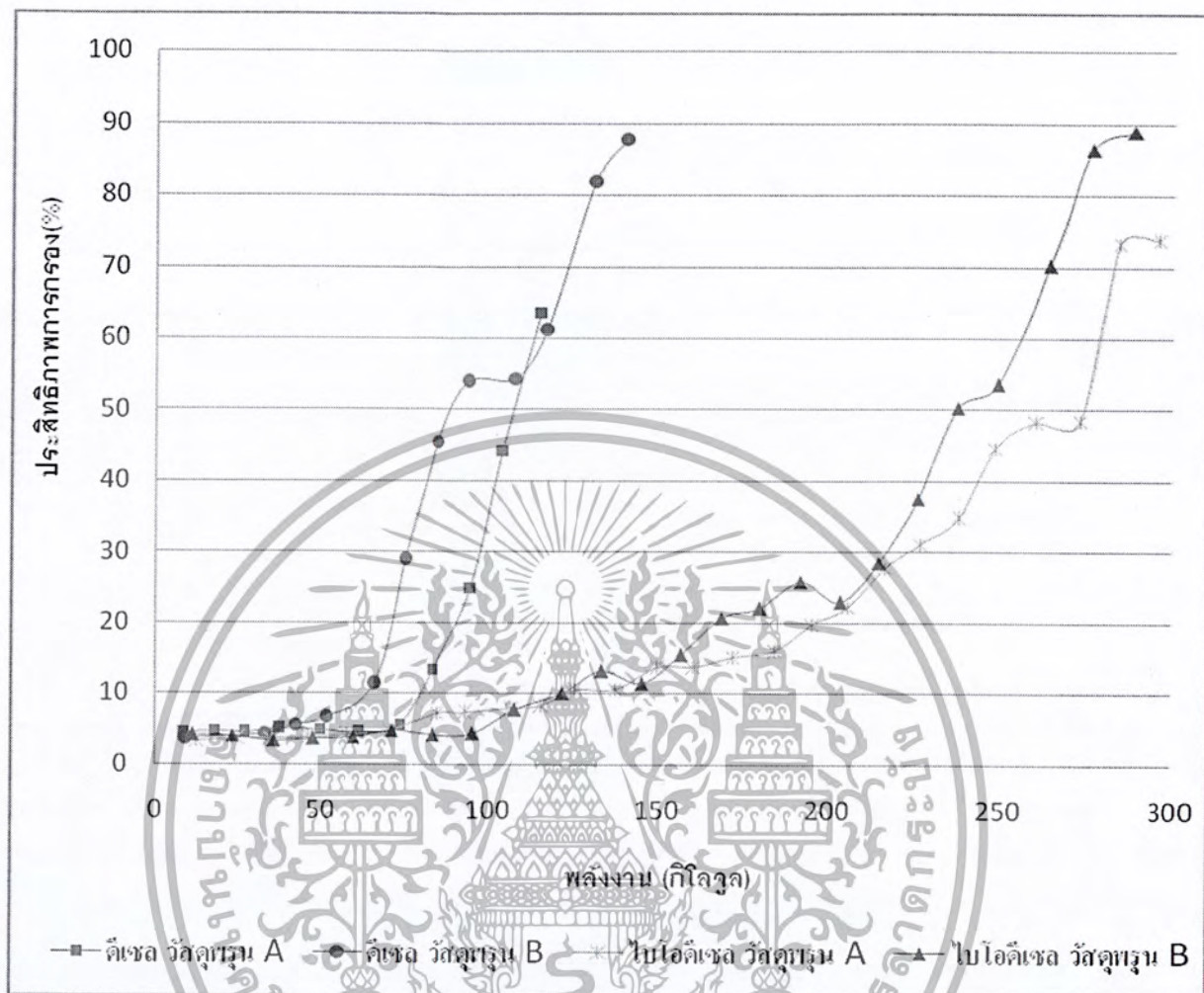


รูปที่ 4.24 กราฟเปรียบเทียบค่าความดันตกคร่อมกับพลังงานของวัสดุพูน C (DPF)

จากรูปที่ 4.24 จะเห็นว่าค่าความดันตกคร่อมของอนุภาคเขม่าดีเซลจะมีค่าสูงเมื่อทำการคัดกรองอนุภาคเขม่าที่อุณหภูมิสูงกว่าในขณะที่พลังงานเท่ากัน และยังสังเกตได้ว่าค่าความดันตกคร่อมที่เกิดจากการคัดกรองอนุภาคเขม่าดีเซลจะสูงกว่าค่าความดันตกคร่อมที่เกิดจากการคัดกรองอนุภาคเขม่าไบโอดีเซล นอกจากนี้พลังงานที่เกิดความดันตกคร่อมของอนุภาคเขม่าดีเซลยังจะเกิดเร็วกว่าของอนุภาคเขม่าไบโอดีเซล และที่อุณหภูมิสูงขึ้นเท่าไร ความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นก็จะมีค่ามากขึ้น และถ้าหากเปรียบเทียบการเขียน กราฟระหว่างความดันตกคร่อมกับเวลาที่อุณหภูมิสูงขึ้น และกราฟความดันตกคร่อมกับพลังงานที่อุณหภูมิสูงขึ้น แนวโน้มของกราฟยังมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน นั่นคือยิ่งเวลาในการจุดตะเกียงมากขึ้น พลังงานก็จะมากขึ้นด้วยการเผาไหม้เชื้อเพลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

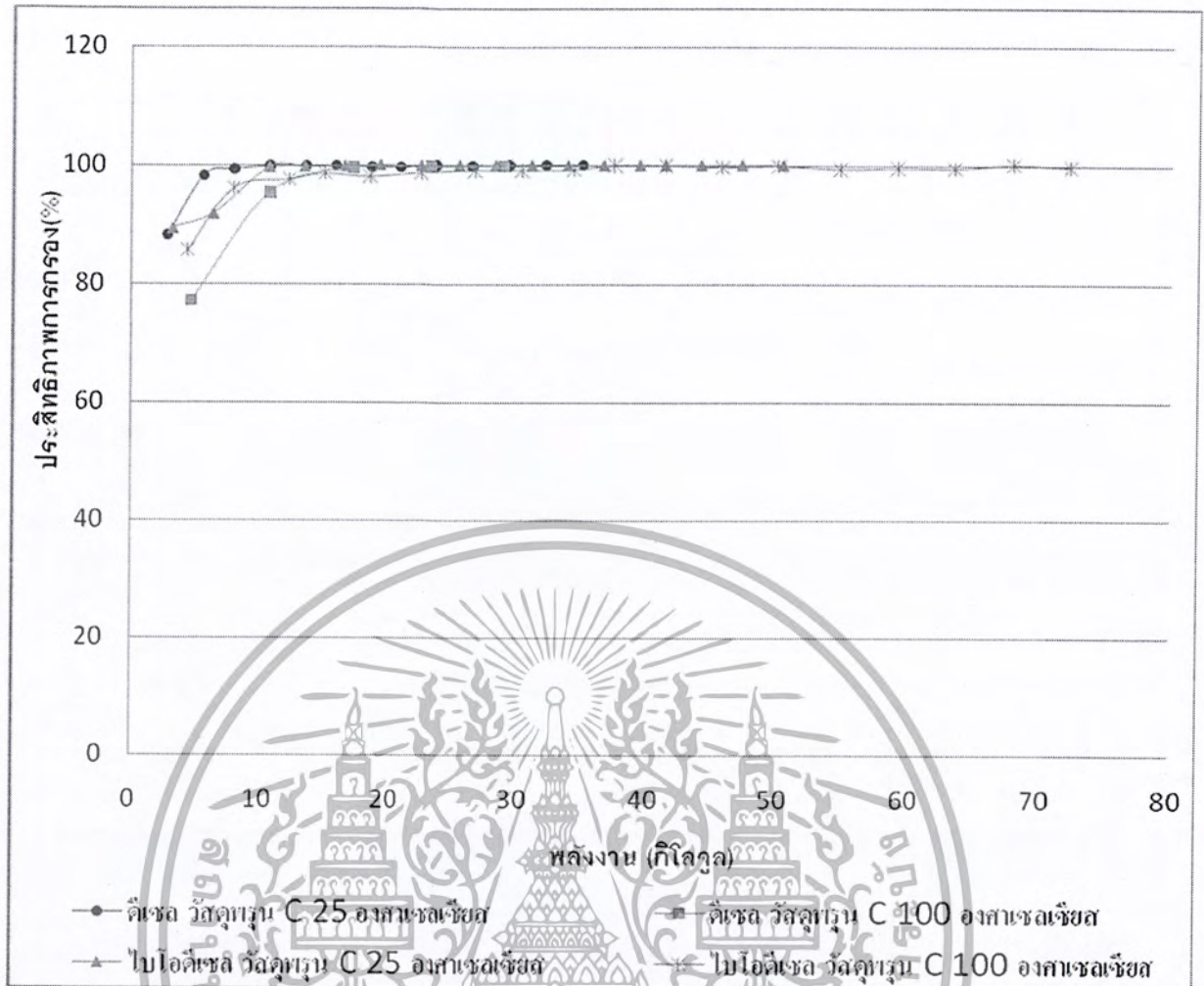
#### 4.7.6 ประสิทธิภาพการคัดกรองของวัสดุพูนกับการสิ้นเปลืองพลังงานของเชื้อเพลิง



รูปที่ 4.25 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการคัดกรองของวัสดุพูน A และ B

จากรูปที่ 4.25 จะเห็นว่าได้ว่าประสิทธิภาพการคัดกรองของวัสดุพูน B มีค่าสูงกว่าวัสดุพูน A ที่อุณหภูมิและพลังงานเท่ากัน เนื่องจากวัสดุพูน B มีค่าความพรุนน้อยกว่า นอกจากนั้นพลังงานที่ใช้เกิดกรณีของ Soot Cake ของวัสดุพูน B เกิดจากการใช้พลังงานน้อยมากเมื่อเทียบกับวัสดุพูน A และเมื่อเทียบกันระหว่างอนุภาคเขม่าดีเซลและอนุภาคเขม่าไบโอดีเซลนั้นก็พบว่า อนุภาคเขม่าดีเซลเกิดกรณีของ Soot Cake เร็วกว่าอนุภาคเขม่าไบโอดีเซล และถ้าหากเปรียบเทียบการเขียนกราฟระหว่าง ประสิทธิภาพการคัดกรองกับเวลา และกราฟประสิทธิภาพการกรองกับพลังงาน แนวโน้มของกราฟยังมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน นั่นคือยิ่งเวลาในการจุดตะเกียงมากขึ้น พลังงานก็จะมากขึ้นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดักกรองของวัสดุพรม C (DPF)

จากรูปที่ 4.26 จะเห็นว่าได้ว่าประสิทธิภาพการดักกรองของวัสดุพรมชนิดเดียวกันจะมีประสิทธิภาพในการดักกรองอนุภาคเขม่าดีเซลและไบโอดีเซลได้ดีกว่า เมื่อมีอุณหภูมิในการทดลองสูงกว่า โดยดูจากตำแหน่งที่มีพลังงานเท่ากัน และจากกราฟจะเห็นว่าประสิทธิภาพการดักกรองของวัสดุพรมชนิดเดียวกันจะมีประสิทธิภาพการดักกรองอนุภาคเขม่าดีเซลได้ดีกว่าอนุภาคเขม่าไบโอดีเซลที่อุณหภูมิเดียวกัน ข้อสังเกตคือวัสดุพรมชนิด C (DPF) สามารถดักกรองอนุภาคทั้งดีเซลและไบโอดีเซลได้เกือบ 100 % กราฟประสิทธิภาพการกรองกับพลังงาน แนวโน้มของกราฟยังมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน นั่นคือยิ่งเวลาในการจุดตะเกียงมากขึ้น พลังงานก็จะมากขึ้นด้วย

## 4.8 ผลการหาค่าอัตราส่วนปริมาณความหนาแน่นของอนุภาคเขม่าดีเซลและไบโอดีเซล

### โดยการวัดความหนาของ Soot Cake

ตาราง 4.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณปริมาณความหนาแน่นของอนุภาคเขม่า

	<i>D 55 100 NC</i>	<i>B 55 100 NC</i>
Thickness of Soot cake	0.03	0.015
Diameter of Pipe	3.57	3.57
Porosity	55%	55%
Size of Soot	0.00000006	0.00000004
Displacement of Pump	50000	50000
Time	0.167 minute	1.833 minute
Volume of air	8333.333 cm <sup>3</sup>	91666.667 cm <sup>3</sup>
Volume of soot cake	0.336294 cm <sup>3</sup>	0.168147 cm <sup>3</sup>
Volume of soot actual	0.151332 cm <sup>3</sup>	0.075666 cm <sup>3</sup>
Volume of one soot	1.1304E-22	3.34933E-23
Number of soot	1.33875E+21	2.25914E+20
Number of soot in cm <sup>3</sup>	1.6065E+17	2.46452E+16

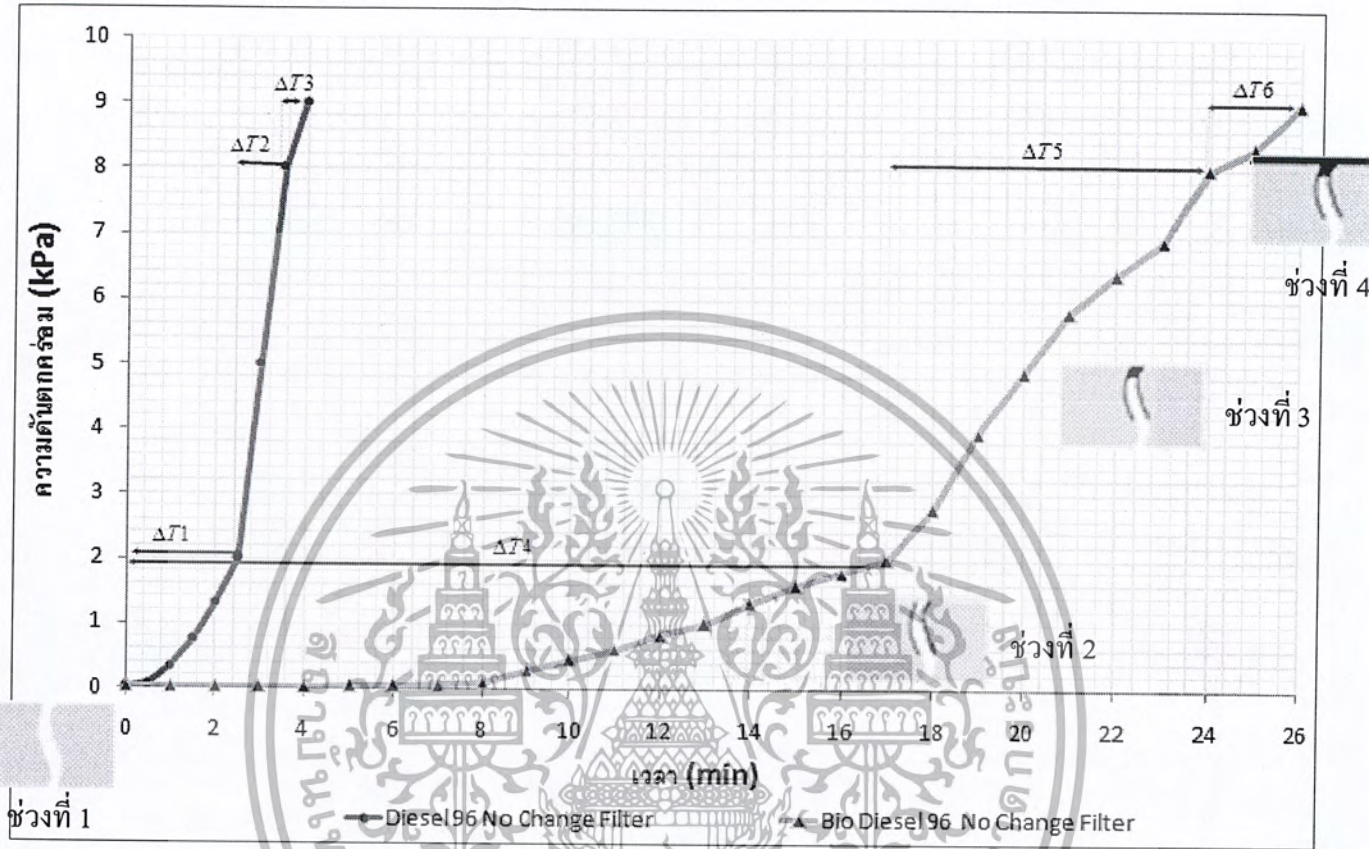
จากข้อมูลดังตารางสามารถคำนวณอัตราส่วนความหนาแน่นอนุภาคไอเสียของน้ำมันดีเซลต่อ น้ำมันไบโอดีเซลได้

$$\text{อัตราส่วนความหนาแน่น} = \frac{\text{จำนวนอนุภาคดีเซล}}{\text{จำนวนอนุภาคไบโอดีเซล}} \quad (4.1)$$

$$= 1.6065E+17 / 2.46452E+16$$

$$= 6.52$$

#### 4.9 ผลการหาค่าอัตราส่วนปริมาณความหนาแน่นของอนุภาคเขม่าดีเซลและไบโอดีเซล โดยการวัด $\Delta T$ ของการเกิด Soot Cake จากกราฟ



รูปที่ 4.27 กราฟกราฟแสดงความดันตกคร่อมของน้ำมันดีเซลและไบโอดีเซลแสดงค่า  $\Delta T$

จากทฤษฎีอัตราส่วนความหนาแน่นเขม่า

$$\frac{\Delta T_6}{\Delta T_3} = \frac{\Delta T_5}{\Delta T_2} = \frac{\Delta T_3}{\Delta T_1} \quad (4.2)$$

จากการทดลองได้

$$\frac{2}{0.3} = \frac{7}{0.9} = \frac{17}{2.5}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.66 ≈ 6.66 ≈ 6.8

จากการทดลองจะเห็นได้ว่าค่าที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกันคือ 6.66, 6.66, 6.68 ตามลำดับและเมื่อนำค่าอัตราส่วนความหนาแน่นจากการหาค่าด้วยความหนาแน่นของ Soot Cake ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6.25 มาหาค่าความผิดพลาดเทียบกับค่าอัตราส่วนความหนาแน่นจากกราฟ จะมีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดประมาณ 7 เปอร์เซ็นต์ซึ่งเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการทดลอง ปัญหาและแนวทางแก้ปัญหา และ ข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการสร้างชุดทดลองดักเขม่าอนุภาคดีเซล และไบโอดีเซล เพื่อศึกษาการดักกรองของตัวกรองอนุภาคเขม่าของน้ำมันดีเซล และไบโอดีเซล และลักษณะ โครงสร้างอนุภาคเขม่าของน้ำมันดีเซลและไบโอดีเซล สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

1. จากกราฟแสดงความดันตกคร่อมที่ได้จากการทดลองที่ใช้ วัสดุพรมชนิดเดียวกัน แต่ น้ำมันเชื้อเพลิงต่างชนิดกัน และการคำนวณจากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(SEM) ของอนุภาคเขม่าของเชื้อเพลิงแต่ละชนิด จะแสดงให้เห็นว่าอนุภาคเขม่าที่เกิดขึ้นจากน้ำมันดีเซลนั้น จะมีความหนาแน่นของอนุภาคเขม่ามากกว่าความหนาแน่นของอนุภาคเขม่าที่เกิดขึ้นจากน้ำมันไบโอดีเซลประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์เพราะค่าคาร์บอนโดยน้ำหนักของน้ำมันดีเซลมีค่ามากกว่าน้ำมันไบโอดีเซล โดยมี 85 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและ 76 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ

2. เนื่องจากความหนาแน่นของอนุภาคเขม่าที่เกิดจากน้ำมันไบโอดีเซลมีน้อยกว่าอนุภาคเขม่าที่เกิดจากดีเซล จึงสามารถนำตัวดักกรองอนุภาคเขม่าดีเซล (Diesel Particulate Filter, DPF) มาใช้กับน้ำมันไบโอดีเซลได้ และยังส่งผลให้ใช้งานได้นานขึ้น เนื่องจากอนุภาคเขม่ามีน้อยกว่า นั่นคือ อายุการใช้งานของ DPF ที่นำมาใช้กับน้ำมันไบโอดีเซลจะมากกว่าน้ำมันดีเซล

3. จากการวัดขนาดของเม็ดอนุภาคคาร์บอนทางภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยของเชื้อเพลิงแต่ละชนิด ทราบได้ว่า ขนาดของอนุภาคเขม่าที่เกิดจากเชื้อเพลิงไบโอดีเซล มีขนาดเล็กกว่าอนุภาคเขม่าที่เกิดจากดีเซล

### 5.2 ปัญหา และแนวทางแก้ปัญหา

จากการทดลองดักกรองอนุภาคเขม่าของน้ำมันดีเซล และน้ำมันไบโอดีเซล มีปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการทดลอง และได้แสดงแนวทางแก้ปัญหา เพื่อการพัฒนาการทดลอง ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. เนื่องจากปั๊มที่ใช้เป็นปั๊มสุญญากาศ ซึ่งปั๊มสุญญากาศไม่สามารถดูดเอาอากาศที่มีสิ่งเจือปน และอากาศที่มีอุณหภูมิสูงเข้าปั๊มได้

แนวทางแก้ปัญหา : ทำการติดตั้งถังดักกรองเขม่า โดยใช้หน้าเป็นตัวดักกรองอากาศก่อนที่จะถูกดูดเข้าปั๊ม เนื่องจากสิ่งเจือปนที่ปะปนมากับอากาศจะถูกน้ำดักกรอง และยังทำให้อุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าปั๊มมีอุณหภูมิตกลง จนไม่ส่งผลเสียต่อปั๊มสุญญากาศ

2. การควบคุมอุณหภูมิของ Heater ไม่สามารถควบคุมให้อุณหภูมิให้คงที่ได้ เนื่องจากชุดควบคุมไม่สามารถปรับค่าวัตต์ ได้ แต่ชุดควบคุมจะสั่งจ่าย – สั่งหยุดจ่าย กระแสไฟที่จ่ายให้ Heater แทน

แนวทางแก้ปัญหา : คือการให้ความร้อนจนอุณหภูมิอากาศที่ไหลภายในท่อเกินอุณหภูมิที่กำหนดไว้ในการทดลอง แล้วหลังจากนั้นรอกให้อุณหภูมิภูมิอากาศที่ไหลภายในท่อลดลงจนใกล้อุณหภูมิที่กำหนดไว้ แล้วค่อยจุดตะเกียงเพื่อทำการทดลองต่อไปหรือทำการใช้ชุดควบคุมแบบ PID

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองดักกรองอนุภาคเขม่าของน้ำมันดีเซล และน้ำมันไบโอดีเซล มีข้อเสนอแนะเพื่อการพัฒนาการทดลอง ดังต่อไปนี้

1. การออกแบบของชุดวัดประสิทธิภาพการดักกรอง ในการทดลองประสิทธิภาพการดักกรองของวัสดุพรุน ต้องเสียเวลามากในการเปลี่ยนกระดวยกรองซึ่งจะส่งผลให้การทดลองการทดลองแต่ละครั้งใช้เวลานานในการทำทดลอง
2. ควรออกแบบชุดทดลองให้สามารถวัดความดันตกคร่อมให้สูงกว่าชุดทดลองเดิม เนื่องจากแนวโน้มของกราฟบางกราฟที่เกิดจากการทดลองนั้น ยังมีแนวโน้มว่าจะเพิ่มขึ้นได้อีก โดยการอาจจะใช้เครื่องวัดเป็นแบบตัวเลขดิจิทัล
3. การศึกษาการออกซิไดซ์เขม่าเพื่อทำความเข้าใจในตัว DPF เพื่อทราบว่า การออกซิไดซ์ของเขม่าที่เกิดจากน้ำมันดีเซล และน้ำมันไบโอดีเซล เหมือนหรือแตกต่างกันเช่นไร
4. การศึกษาโครงสร้างของเขม่าโดยละเอียดของน้ำมันไบโอดีเซลและน้ำมันดีเซล เพื่อทราบถึงปัจจัยที่ทำให้ขนาดของอนุภาคเขม่าที่เกิดจากน้ำมันเชื้อเพลิงไบโอดีเซลถึงมีขนาดเล็กกว่าขนาดอนุภาคเขม่าที่เกิดจากน้ำมันดีเซล และปัจจัยที่ทำให้ความหนาแน่นของอนุภาคเขม่าที่เกิดจากน้ำมันไบโอดีเซล มีน้อยกว่าความหนาแน่นของอนุภาคเขม่าที่เกิดจากน้ำมันดีเซล



บรรณานุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [1] Preechar KARIN. “Microscopic Visualization and Characterization of Particulate Matter Trapping and Oxidation in Diesel Particulate Filters and Membrane Filter”, Tokyo Institute of Technology 2010
- [2] กัญจนา บุญเกียรติ. “เชื้อเพลิงและการเผาไหม้”, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย – ญี่ปุ่น) กรุงเทพฯ. 2542
- [3] ณรงค์ หุชัยภูมิ. “การพัฒนาเครื่องดักกรองอนุภาคไอเสียสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล”, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2547
- [4] ชิกาโอะ คานาโอกะ และ วิวัฒน์ ตันตะพานิชกุล. “มลภาวะทางอากาศ”, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย – ญี่ปุ่น). กรุงเทพฯ. 2535
- [5] พงษ์เจต พรหมวงศ์. “การถ่ายเทความร้อน”, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2542
- [6] พิสมัย เจนวนิชปัญญากุล. “ไบโอดีเซล: พลังงานทางเลือก”, วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปีที่ 16 ฉบับที่ 3 ก.ย. -ธ.ค. 2544
- [7] วิศรุต ศรีรัตนะ. “เซนเซอร์และทรานสดิวเซอร์ในงานอุตสาหกรรม”, ภาควิชาวิศวกรรมกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2550
- [8] Willard W. Pulkrabek. “Internal Combustion Engine”, Person Education Indochina, Inc, Prentice Hall. 1997
- [9] บริษัท ปตท.จำกัด (มหาชน), “เปรียบเทียบการใช้น้ำมันดีเซล VS ดีเซลปลั่มบริสุทธิ์”. <http://www.PTTPublicCompanyLimited.com>
- [10] Bruce R. Munson, Donald F. Young, Theodore H. Okiishi, “Fundamentals of Fluid Mechanic”, John Wiley & Son, Inc. 2006
- [11] <http://www.autogreenmag.com/tag/filtre-anti-particles>
- [12] สมนึก บุญพาไสว, “การวัดและเครื่องมือวัด”, บริษัท สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด, 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] <http://www.elecnet.chandra.ac.th/learn/courses/5513101/termwork/sem/pong/1.html>
- [14] สมชาย จันทวนา, “มลพิษในไอเสียเครื่องยนต์ดีเซล”, วารสารการประชุมสัมมนาวิชาการ
- [15] Mayer., Buck A. “**Diesel Exhaust Aftertreatment**”, Knitted Ceramic Fiber – A New Concept for Particulate Traps, 1992
- [16] Scott MacDonald.J, Gerrald L., Vaneman., “**Diesel Exhaust Aftertreatment**”, Mathematical Modeling of Fibrous Filters for Diesel Particulates – Theory and Experiment, SAE 810113, 1992
- [17] Mayer., Buck A. and Bressler H. “**Diesel Exhaust Aftertreatment**”, The Knitted Particulate Trap : Field Experience and Development Progress, SAE 930362, 1993
- [18] Johnson, J.H, Baglay, S.T., Gratz,L.D. and Leddy, D.G. “**Diesel Exhaust Aftertreatment**”, A Review of Diesel Particulate Control Technology and Emissions Effects 1992 Horning Memmorial Award Lecture, Pp 1- 35, 1994
- [19] Gulijk C. Van., Heiswolf J.J, Makkee M., Moulijn J.A. “**Diesel Exhaust Aftertratreatment**”, Selection and development of a reactor for diesel particulate filtration., Pp.1705 – 1712, 2001,
- [20] Guido Saracco., Claudio Badini., Vito Specchia, “**Diesel Exhaust Aftertreatment**”, Catalytic traps for diesel particulate control, Pp.3035 – 3041, 2001
- [21] Hong Kong Polytechnic University. “**Particulate Trap**”, แหล่งที่มา <http://www.Industrial Centre – The Hong Kong Polytechnic University.ac.th>, 23 มกราคม 2546
- [22] Michel Ambrogio, Guido Saracco, Vito specchia, “**Diesel Exhaust Aftertreatment**” Combining filtration and catalytic combustion in particulate traps for diesel exhaust treatment, Pp.1613 – 1621, 2001



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### กรณีศึกษา

ในครั้งแรกเราได้ดำเนินการ ทดลอง DPF โดยใช้ความเร็วจ่อหน้าผิว (Superficial Velocity) มีค่าเท่ากับ Superficial Velocity ในเครื่องยนต์จริงที่ความเร็วรอบ 3000 rpm เพื่อจำลองการทดลองให้ใกล้เคียงกับการทำงานของเครื่องยนต์จริงมากที่สุด โดยการคำนวณ เมื่อได้ค่า Superficial Velocity แล้วนำมาออกแบบ DPF สำหรับใช้ในการทดลอง โดยการคำนวณ ดังต่อไปนี้

ใช้สูตรต่อไปนี้

$$1. Q = Av$$

Q = อัตราการไหลของปฏิกิริยา

A = พื้นที่ DPF

v = ความเร็วอากาศ ภายในท่อ

$$2. A = 4(n)(t)(L)$$

A = พื้นที่หน้าตัดของ DPF

n = จำนวนช่องสว่าง ทั้งหมด (ในความยาว 1 นิ้ว จะมีช่องสว่าง 8 ช่อง)

t = ความหนาของผนัง DPF (0.00105 m)

L = ความยาวของ DPF

$$3. x = \frac{n_x(2.54)}{8}$$

x = ความกว้างของ DPF

$n_x$  = จำนวนช่องสว่างในด้านกว้างของ DPF ( $n = n_x^2$  เมื่อ n คือจำนวนช่องสว่างทั้งหมด)

## การคำนวณ

อัตราการไหลของปั๊ม 50 L/min

เครื่องยนต์ดีเซล มี Superfital Velocity @ 3,000 rpm = 0.01157943452 m/s

ให้ DPF มีความยาว  $L = 0.08$  m (เนื่องจาก DPF สำเร็จรูปจะมีความยาว = 0.17 m เพื่อให้ง่ายต่อการ ออกแบบ)

## 1. หาพื้นที่หน้าตัดของ DPF (A)

จาก

$$Q = Av$$

$$Q = 50 \text{ L/min} = 0.000833 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$v = 0.01157943452 \text{ m/s}$$

$$\text{จะได้ } A = 0.071967 \text{ m}^2$$

## 2. หาจำนวนช่องสว่างทั้งหมด(n)

จาก

$$A = 4(n)(t)(L)$$

$$A = 0.071967 \text{ m}^2$$

$$t = 0.00105 \text{ m}$$

$$L = 0.08 \text{ m}$$

$$\text{จะได้ } n = 214.1875 \text{ ช่อง}$$

## 3. ความกว้างของ DPF (x)

จาก

$$n = n_x^2$$

$$n = 214.1875 \text{ ช่อง}$$

$$\text{จะได้จำนวนช่องสว่างตามด้านกว้าง } (n_x) = 14.63515 \text{ ช่อง}$$

และจาก

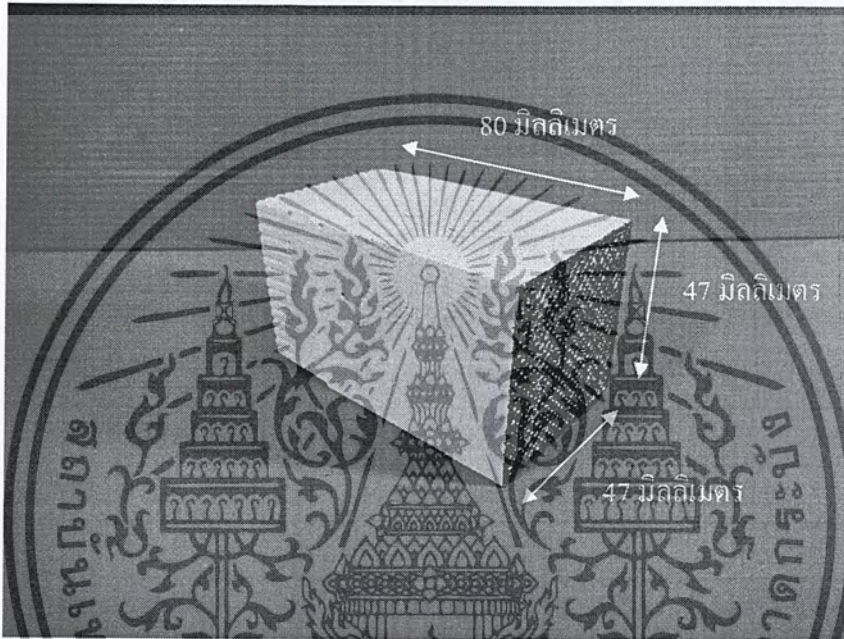
$$x = \frac{n_x(2.54)}{8}$$

$$n_x = 14.63515 \text{ ช่อง}$$

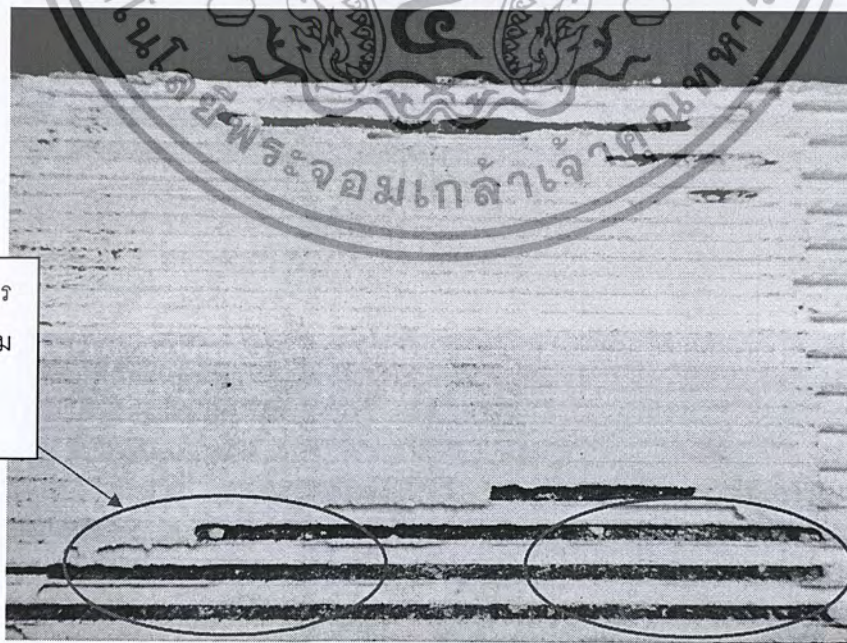
$$X = 0.4646659 \text{ m.} = 4.65 \text{ cm.}$$

ดังนั้นในการตัด DPF ในการทดลอง เราจึงตัด DPF ขนาด  $4.65 \times 4.68 \times 8$  cm

ในการทดลองกับ DPF ได้เกิดปัญหาขึ้น คือ ความหนาแน่นของเขม่า ของเชื้อเพลิงมีความหนาแน่นมากเกินไปซึ่งต่างจากความเป็นจริง ในเครื่องยนต์จริงจะมีความหนาแน่นของเขม่าน้อยกว่าความหนาแน่นของเขม่าในการทดลองซึ่งเป็นการจุดเชื้อเพลิงจากการจุดตะเกียง เนื่องจากเขม่าที่ทำการทดลองมีความหนาแน่นสูง ทำให้เกิดการการปิดทางเข้ารู DPF ในขณะที่ เขม่ายังไม่เต็มโพรง DPF ทางคณะผู้จัดทำ จึงแก้ปัญหาโดยการศึกษาการเกิดความดันตกคร่อม ภายใน DPF เป็นแบบ Disc แทน



ก่อน DPF ก่อนทำการทดลอง

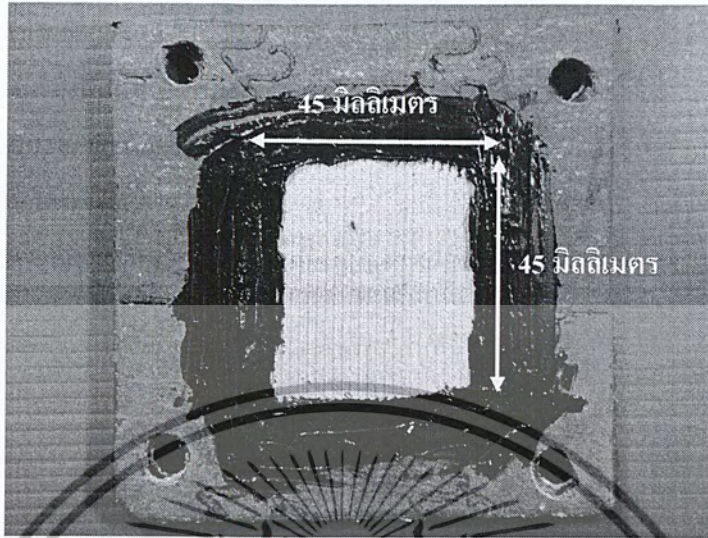


เขม่าเกิดการจับตัวจนเต็มรู DPF

เขม่าจับตัวที่ผนัง DPF แต่ไม่เต็มรู DPF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก่อน DPF ที่มีปัญหาหลังทำการทดลอง (มีความหนาแน่นของเขม่ามากเกินไป)



DPF แบบ Disc ก่อนการทดลอง



DPF แบบ Disc หลังการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตาชั่ง ทศนิยม 2 ตำแหน่ง (หน่วย กรัม) ใช้ในการวัดน้ำหนักของน้ำมันดีเซลและน้ำมันไบโอดีเซล

รหัส : GF-3000

ยี่ห้อ : AND

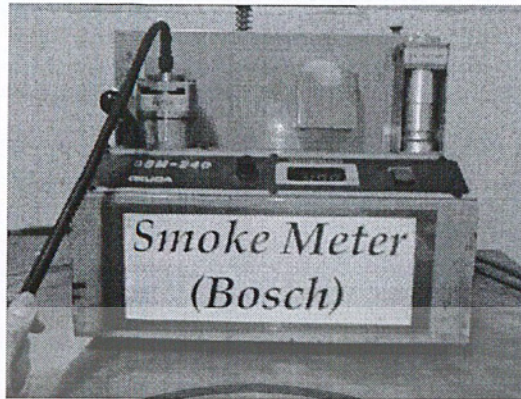
รุ่น : Precision Balance

เว็บไซต์ : <http://www.zepper.biz/template/www.and.co.jp>

รายละเอียดย่อ :

- มาตรฐาน ISO9001
- ออกแบบและพัฒนาโดย AND, Japan
- รับประกันคุณภาพ 1 ปี
- โครงสร้างอลูมิเนียมอัลลอยด์
- GLP Compliance
- หน่วยชั่ง 11 มาตรา และฟังก์ชันชั่งสัตว์ทดลอง
- ฟังก์ชันนับจำนวนและหาเปอร์เซ็นต์
- อุปกรณ์เสริม RS232C Interface
- ผลิตในประเทศญี่ปุ่น 100 % Made in Japan

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

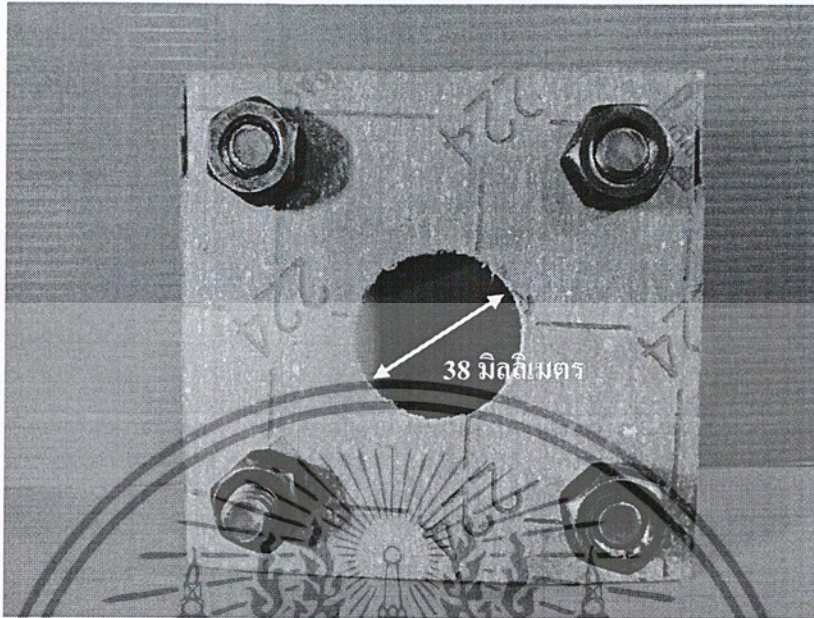


เครื่องวัดเปอร์เซ็นต์ควันดำ (Okuda รุ่น DSM – 240, No. 1008 )

คุณลักษณะเฉพาะ

- ใช้วัดปริมาณควันดำที่ออกจากท่อไอเสียเครื่องยนต์ดีเซล
- เป็นเครื่องวัดระบบกระดาษกรอง
- โดยวัดค่าของแสงสะท้อนจากกระดาษกรอง
- วัดค่าเป็นหน่วยร้อยละ
- จอแสดงผลแสดงค่าเป็นแบบตัวเลข (Digital)
- วัดค่าควัน 0-100 %
- ระบบไฟฟ้า 220 โวลต์

ปะเก็นทนความร้อนและกันรั่ว (ใช้ป้องกันการรั่วซึมของอากาศที่ไหลในท่อ)



ปะเก็นกระดาด(KTE - 224)

ปะเก็น Non asbestos หรือปะเก็นไม่มีใยหิน

สามารถใช้งานได้ดีกับ น้ำ เบนซิน ไขมัน สารเคมี

กรดอ่อน เบส อัลคาไลน์

และใช้งานได้ทั่วไป ในโรงงาน

ทนอุณหภูมิสูงสุด 350 องศา

ทนความดัน 30 Bar

## ALTECO Epoxy Putty (ใช้อุดรอยรั่ว แบบไม่ยึดหยุ่น)



Epoxy Putty



**ALTECO**

A+B Epo Putty 100g

- For repair, bond, fill and seal
- Works even under water
- Can be moulded into any shape and size
- Can be drilled, filed and sanded when harden

Appearance	Non-Transparent Paste
Tensile Shear Strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	Excellent
Working Time	Below 30 Min
Curing Time	2 Hrs 30 Min
Colour Of Finishing	Light Yellowish

100g 12sets/box, 144sets/ctn

รายละเอียด Epoxy Putty

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**MEGA BLACK OXIME SILICONE (กาวดำ ที่ใช้สำหรับอุดรอยรั่ว ชนิดยืดหยุ่นเล็กน้อย)**



MEGA BLACK OXIME SILICONE

**MEGA BLACK OXIME SILICONE**

- Mega Black Oxime Silicone is OEM approved for today's high-heat high-performance engines!
- Forms a tough, flexible silicone rubber gasket that resists aging and weathering
- Replaces felt, paper, rubber, asbestos and cork gaskets and is easy to use
- Remains more flexible than conventional gaskets and won't harden, shrink or crack
- Non-corrosive to steel, iron and aluminum
- Non volatile-safe for use on vehicles with oxygen sensors and computers

VersaChem Mega Black Oxime Silicone has a non-slumping paste-like consistency that makes it easy to use-it cures when exposed to moisture or air. Mega Black will resist synthetic oils, but not if friction modifiers (additives) are present. Non-flammable and non-toxic. Temperature resistance from -65° to 400°F continuous, 650°F intermittent. 245 PSI tensile strength. Dries black. 3-oz. tube.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## น้ำกลั่น (ใช้เติมใน Pressure gage {U – Tube})



น้ำกลั่น ซี.เอส.

น้ำกลั่นเติมแบตเตอรี่ ตรา ซี.เอส. ภายใต้การผลิตของบริษัท ซี.เอส. ยูเนี่ยน กรุ๊ป จำกัด ซึ่งเป็นผู้ผลิตและจัดจำหน่ายน้ำกลั่นบริสุทธิ์มานานกว่า 10 ปี ซึ่งเป็นบริษัทเดียวในประเทศไทยที่ได้รับมาตรฐานจาก ม.อ.ก. ให้น้ำกลั่นเติมแบตเตอรี่ ตรา ซี.เอส. นั้นเป็นน้ำกลั่นที่มีคุณภาพสูง ผลลัพธ์ที่นี้สำหรับเติมในแบตเตอรี่รถยนต์ ซึ่งผ่านกระบวนการผลิตอันทันสมัยมีค่าประจุไฟฟ้าสูง ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ และยังเป็นการทำให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ในรถยนต์มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น (เนื่องจากน้ำกลั่นเป็นน้ำที่บริสุทธิ์ จึงเหมาะแก่การใช้กับ U – Tube)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลอง : ประสิทธิภาพการกรอง ไม้ตะเกียงเหลือ : 13 cm.  
 ชนิดตัวกรอง : ฟองน้ำสีม่วง 98 เขม่าหนา : 3.5 mm.  
 ชนิดน้ำมัน : ดีเซล อุณหภูมิ : 28.5 °C  
 ปริมาณน้ำมัน : 150 มิลลิลิตร วันที่ทำการทดลอง : 27/01/2011  
 ความยาวไม้ตะเกียง : 150 มิลลิเมตร

time (s)	time (m)	LH	RH	น้ำหนัก น้ำมัน	เปอร์เซ็นต์ ความดำ	Pd(kpa)	eff(%)
0	0	100.3	99.9	208.02	100	0.04	0
30	0.5	101.4	98.7	207.84	95.4	0.27	4.6
60	1	103.9	96.3	207.64	95.3	0.76	4.7
90	1.5	106.5	93.7	207.45	95.5	1.28	4.5
120	2	109	91.2	207.22	95	1.78	5
150	2.5	111.1	88.7	206.96	95.1	2.24	4.9
180	3	114.5	85.9	206.71	95.5	2.86	4.5
210	3.5	119.5	80.5	206.45	94.4	3.9	5.6
240	4	130.5	70	206.25	86.6	6.05	13.4
270	4.5	150	50.5	206	75	9.95	25
300	5	177.3	21	205.8	55.7	15.63	44.3
330	5.5	193	2	205.56	36.4	19.1	63.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลอง : ความดันลด ไม้ตะเกียงเหลือ : 14.55 cm.  
 ชนิดตัวกรอง : ฟองน้ำสีม่วง 98 เขม่าหนา : 3.5 mm.  
 ชนิดน้ำมัน : ดีเซล อุณหภูมิ : 26 °C  
 ปริมาณน้ำมัน : 150 มิลลิลิตร วันที่ทำการทดลอง : 24/01/2011  
 ความยาวไม้ตะเกียง : 150 มิลลิเมตร

time (s)	time(m)	LH	RH	น้ำมัน	Pd(kpa)
0	0	100	99.8	206.79	0.02
30	0.5	100.7	99.2	206.59	0.15
60	1	103	96.7	206.37	0.63
90	1.5	105.5	91.5	206.11	1.4
120	2	108.5	87	205.85	2.15
150	2.5	112.9	76	205.61	3.69
180	3	123.5	73.5	205.38	5
210	3.5	126	69.8	205.11	5.62
240	4	130	61.5	204.89	6.85
270	4.5	137	60.5	204.64	7.65
300	5	139.5	57.5	204.4	8.2
330	5.5	140	56.5	204.14	8.35
360	6	143.3	54.5	203.92	8.88
390	6.5	144	52	203.68	9.2
420	7	146.2	51	203.2	9.52
450	7.5	147	50.5	202.96	9.65
480	8	148.5	49.5	202.12	9.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลอง : ประสิทธิภาพการกรอง ไม้ตะเกียบเหลือ : 14.7 cm.  
 ชนิดตัวกรอง : ฟองน้ำสีเหลือง 96 เขม่าหนา : 3.5 mm.  
 ชนิดน้ำมัน : ดีเซล อุณหภูมิ : 25 °C  
 ปริมาณน้ำมัน : 150 มิลลิลิตร วันที่ทำการทดลอง : 21/01/2011  
 ความยาวไม้ตะเกียบ : 150 มิลลิเมตร

time(s)	time(m)	HL	HR	น้ำหนัก น้ำมัน	ควันท่า	Pd(kpa)	(%)eff
0	0	95	94	207.5	100	0.1	0
30	0.5	96	93	207.3	96.4	0.3	3.6
60	1	99	95	206.8	95.6	0.4	4.4
90	1.5	103.1	96.1	206.6	94.4	0.7	5.6
120	2	106	93.5	206.4	93.4	1.25	6.6
150	2.5	109	90	206.1	88.6	1.9	11.4
180	3	118.2	82	205.9	71.1	3.62	28.9
210	3.5	140	70	205.7	54.5	7	45.5
240	4	142	55	205.5	46.1	8.7	53.9
270	4.5	145	53	205.2	45.6	9.2	54.4
300	5	154	43.5	205	38.7	11.05	61.3
330	5.5	156	41	204.7	18	11.5	82
360	6	157	40	204.5	12.1	11.7	87.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลอง : ความดันลด ไม้ตะเกียงเหลือ : 14.7 cm.  
 ชนิดตัวกรอง : ฟองน้ำสีเหลือง 96 เขม่าหนา : 2.2 mm.  
 ชนิดน้ำมัน : ดีเซล อุณหภูมิ : 25 °C  
 ปริมาณน้ำมัน : 150 มิลลิลิตร วันที่ทำการทดลอง : 27/01/2011  
 ความยาวไม้ตะเกียง : 150 มิลลิเมตร

time(s)	time(m)	LH	RH	น้ำมัน	Pd(kpa)
0	0	100.2	100	207.98	0.02
30	0.5	100.4	99.8	207.81	0.06
60	1	101.8	98.6	207.6	0.32
90	1.5	103.9	96.5	207.42	0.74
120	2	106.7	93.6	207.21	1.31
150	2.5	110.9	89.7	206.98	2.12
180	3	125.3	75.3	206.77	5
210	3.5	142.5	56.3	206.58	8.62
240	4	149.5	49	206.31	10.05
270	4.5	151	47	206.11	10.4
300	5	154.6	43.3	205.87	11.13
330	5.5	160	37.2	205.62	12.28
360	6	162	35.5	205.4	12.65
390	6.5	163.8	33.4	205.16	13.04
420	7	166	31.9	204.94	13.41
450	7.5	167.5	29.7	204.69	13.78
480	8	167.8	28.9	204.49	13.89
510	8.5	170	26.5	204.27	14.35
540	9	172.4	23.5	204.03	14.89
570	9.5	174	22.3	203.79	15.17
600	10	176	20.2	203.54	15.58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลอง : ประสิทธิภาพการกรอง ไล่ตะเกียงเหลือ : 14.9 cm.  
 ชนิดตัวกรอง : DPF เจม่าหนา : 0.35 mm.  
 ชนิดน้ำมัน : ดีเซล อุณหภูมิ : 25 °C  
 ปริมาณน้ำมัน : 150 มิลลิลิตร วันที่ทำการทดลอง : 13/02/2011  
 ความยาวไล่ตะเกียง : 150 มิลลิเมตร

time(s)	time(m)	LH	RH	น้ำมัน	เปอร์เซ็นต์		(% )eff
					ควันดำ	Pd(kpa)	
0	0.00	105	97.5	206.8	100	0.75	0
10	0.17	121.5	80.8	206.74	11.7	4.07	88.3
20	0.33	134	63	206.68	1.8	7.1	98.2
30	0.50	150	51.3	206.63	0.8	9.87	99.2
40	0.67	156.5	47.6	206.57	0.3	10.89	99.7
50	0.83	164.2	36.5	206.51	0.2	12.77	99.8
60	1.00	168.5	32	206.46	0.2	13.65	99.8
70	1.17	175.7	23.5	206.4	0.4	15.22	99.6
80	1.33	182	16.6	206.35	0.4	16.54	99.6
90	1.50	183	15.9	206.29	0.1	16.71	99.9
100	1.67	189.5	13	206.23	0.2	17.65	99.8
110	1.83	189	10.5	206.17	0.1	17.85	99.9
120	2.00	190.3	8.8	206.11	0	18.15	100
130	2.17	191	8.2	206.05	0	18.28	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลอง : ความดันลด ไม้ตะเกียงเหลือ : 14.9 cm.  
 ชนิดตัวกรอง : DPF เขม่าหนา : 0.3 mm.  
 ชนิดน้ำมัน : ดีเซล อุณหภูมิ : 25 °C  
 ปริมาณน้ำมัน : 150 มิลลิลิตร วันที่ทำการทดลอง : 13/02/2011  
 ความยาวไม้ตะเกียง : 150 มิลลิเมตร

time(s)	time(m)	LH	RH	น้ำมัน	Pd(kpa)
0	0	105	97.5	206.8	0.75
10	0.17	124.9	77	206.67	4.79
20	0.33	138.4	63	206.52	7.54
30	0.50	146.7	55.5	206.42	9.12
40	0.67	154.2	45.7	206.32	10.85
50	0.83	159.5	39.5	206.22	12
60	1.00	167	31.5	206.11	13.55
70	1.17	172.1	26	206.01	14.61
80	1.33	175.4	22.5	205.91	15.29
90	1.50	180.2	18	205.81	16.22
100	1.67	190.7	9.2	205.7	18.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลอง : ประสิทธิภาพการกรอง ไม้ตะเกียงเหลือ : 14.95 cm.  
 ชนิดตัวกรอง : DPF เขม่าหนา : 0.38 mm.  
 ชนิดน้ำมัน : ดีเซล อุณหภูมิ : 100 °C  
 ปริมาณน้ำมัน : 150 มิลลิลิตร วันที่ทำการทดลอง : 16/02/2011  
 ความยาวไม้ตะเกียง : 150 มิลลิเมตร

time(s)	time(m)	LH	RH	น้ำมัน	เปอร์เซ็นต์ ควันดำ	Pd(kpa)	(%)eff
0	0	107.1	94.4	206.8	100	1.27	0
10	0.17	145.7	56.8	206.7	22.8	8.89	77.2
20	0.33	164.5	35.7	206.57	4.7	12.88	95.3
30	0.50	177.7	25.1	206.43	0.5	15.26	99.5
40	0.67	187.9	9.5	206.3	0.3	17.84	99.7
50	0.83	195.4	2	206.18	0.2	19.34	99.8

การทดลอง : ความดันลด ไม้ตะเกียงเหลือ : 14.7 cm.  
 ชนิดตัวกรอง : DPF เขม่าหนา : 0.3 mm.  
 ชนิดน้ำมัน : ดีเซล อุณหภูมิ : 100 °C  
 ปริมาณน้ำมัน : 150 มิลลิลิตร วันที่ทำการทดลอง : 16/02/2011  
 ความยาวไม้ตะเกียง : 150 มิลลิเมตร

time(s)	time(m)	LH	RH	น้ำมัน	Pd(kpa)
0	0	108.3	94.7	206.8	1.36
10	0.17	153.3	48.3	206.68	10.5
20	0.33	171.4	27	206.6	14.44
30	0.5	191.9	5	206.49	18.69
40	0.67	200.1	1	206.39	19.91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลอง : ประสิทธิภาพการกรอง ไม้ตะเกียบเหลือ : 14.7 cm.  
 ชนิดตัวกรอง : ฟองน้ำสีม่วง 98 เขม่าหนา : 2.6 mm.  
 ชนิดน้ำมัน : ไบโอดีเซล อุณหภูมิ : 25.5 °C  
 ปริมาณน้ำมัน : 150 มิลลิลิตร วันที่ทำการทดลอง : 31/01/2011  
 ความยาวไม้ตะเกียบ : 150 มิลลิเมตร

time(m)	LH	RH	น้ำมันที่	เปอร์เซ็นต์	Pd(kpa)	(%eff)
			ลดลง g	ความดำ		
0	101	99.5	234.2	100	0.15	0
1	101.1	99.5	233.89	96.7	0.16	3.3
2	102	98.5	233.58	96.4	0.35	3.6
3	103	97.6	233.32	96.3	0.54	3.7
4	103.8	96.9	233.04	96.2	0.69	3.8
5	105	95.6	232.75	95.9	0.94	4.1
6	106.4	94.3	232.43	95.2	1.21	4.8
7	108.1	92.5	232.07	92.8	1.56	7.2
8	109.4	91	231.85	92.7	1.84	7.3
9	110.5	90	231.91	92.1	2.05	7.9
10	111.2	89.5	231.28	91.7	2.17	8.3
11	112.1	88.3	231.03	89.5	2.38	10.5
12	113	87.4	230.73	89.4	2.56	10.6
13	114.4	86.4	230.42	86.3	2.8	13.7
14	115.9	84.5	230.14	86.2	3.14	13.8
15	117.6	83	229.85	84.8	3.46	15.2
16	119.6	80.8	229.54	83.9	3.88	16.1
17	121.7	78.4	229.26	80.2	4.33	19.8
18	125.6	75.5	229	77.7	5.01	22.3
19	127.5	73	228.73	72.2	5.45	27.8
20	132.1	67.7	228.46	68.9	6.44	31.1
21	138.5	61.6	228.18	65.2	7.69	34.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

time(m)	LH	RH	น้ำมันที่ ลดลง g	เปอร์เซ็นต์ ความดำ	Pd(kpa)	(%eff)
22	141.5	58.5	227.91	55.4	8.3	44.6
23	144.5	55	227.62	51.7	8.95	48.3
24	147.3	47.8	227.29	51.5	9.95	48.5
25	148.8	46.3	227.01	26.7	10.25	73.3
26	156.1	39	226.72	26.2	11.71	73.8



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลอง : ความดันลด  
 ชนิดตัวกรอง : ฟองน้ำสีม่วง 98  
 ชนิดน้ำมัน : ไบโอดีเซล  
 ปริมาณน้ำมัน : 150 มิลลิลิตร  
 ความยาวไส้ตะเกียง : 150 มิลลิเมตร

ไส้ตะเกียงเหลือ : 14.5 cm.  
 เขม่าหนา : 3.5 mm.  
 อุณหภูมิ : 28 °C  
 วันที่ทำการทดลอง : 24/01/2011

time(m)	LH	RH	น้ำมันที่ เหลือ	Pd(kpa)
0	99	98.7	234.19	0.03
1	100.1	99.7	233.94	0.04
2	100.1	99.6	233.6	0.05
3	100.2	99.5	233.29	0.07
4	100.4	99.3	232.97	0.11
5	100.6	99.1	232.68	0.15
6	101.9	97.5	232.31	0.44
7	103.4	96.2	231.96	0.72
8	104.9	94.9	231.6	1
9	106.1	93.6	231.23	1.25
10	107.7	92.2	230.87	1.55
11	109	90.6	230.53	1.84
12	111	89	230.2	2.2
13	112.3	87.3	229.89	2.5
14	113.6	86.1	229.55	2.75
15	116	83.9	229.24	3.21
16	118.6	81	228.93	3.76
17	121	78.8	228.68	4.22
18	123.5	76.5	228.33	4.7
19	127.1	72.6	228.05	5.45
20	131	68.2	227.72	6.28

time(m)	LH	RH	น้ำมันที่ เหลือ	Pd(kpa)
21	135.1	64.2	227.44	7.09
22	137.5	61.4	227.1	7.61
23	139.8	59	226.84	8.08
24	142.1	56.7	226.47	8.54
25	144.1	54.7	226.17	8.94
26	146.2	51.1	225.81	9.51
27	147	50.4	225.55	9.66
28	148.5	49	225.26	9.95
29	150.7	47	224.97	10.37
30	151.9	46	224.61	10.59
31	152.1	45.8	224.31	10.63
32	152.4	45.7	223.98	10.67
33	152.6	45.5	223.65	10.71
34	153.1	45	223.35	10.81
35	154.5	43.5	223	11.1
36	156	41.3	222.69	11.47
37	156.5	40.6	222.35	11.59
38	156.8	40.2	221.99	11.66
39	157	39.9	221.67	11.71
40	157.5	39.3	221.32	11.82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลอง : ประสิทธิภาพการกรอง ไม้ตะเกียงเหลือ : 14.65 cm.  
 ชนิดตัวกรอง : ฟองน้ำเหลือ 96 เขม่าหนา : 2.2 mm.  
 ชนิดน้ำมัน : ไบโอดีเซล อุณหภูมิ : 28 °C  
 ปริมาณน้ำมัน : 150 มิลลิลิตร วันที่ทำการทดลอง : 24/01/2011  
 ความยาวไม้ตะเกียง : 150 มิลลิเมตร

time(m)	LH	RH	น้ำมันที่ ลดลง	ควันดำ	PD(kpa)	(%eff)
0	100.6	100.4	229.2	100	0.02	0
1	100.6	100.4	228.92	95.9	0.02	4.1
2	100.6	100.4	228.62	96	0.02	4
3	100.6	100.3	228.3	96.7	0.03	3.3
4	100.7	100.2	228	96.4	0.05	3.6
5	101.1	99.9	227.7	96.2	0.12	3.8
6	101.7	99.3	227.41	95.2	0.24	4.8
7	102.7	98.4	227.11	95.9	0.43	4.1
8	104.2	96.9	226.79	95.7	0.73	4.3
9	105	96.1	226.48	92.3	0.89	7.7
10	106.8	94.4	226.12	89.9	1.24	10.1
11	107.2	93.8	225.83	86.8	1.34	13.2
12	108.8	92.3	225.53	88.6	1.65	11.4
13	110	91	225.24	84.5	1.9	15.5
14	111.2	89.7	224.93	79.3	2.15	20.7
15	112.3	88.5	224.65	78	2.38	22
16	113.5	87.4	224.35	74.2	2.61	25.8
17	115	85.8	224.06	77.1	2.92	22.9
18	117.5	83.5	223.77	71.5	3.4	28.5
19	119.5	81.5	223.48	62.5	3.8	37.5
20	122.5	78.5	223.19	49.7	4.4	50.3
21	128	73	222.9	46.4	5.5	53.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

time(m)	LH	RH	น้ำมันที่ ลดลง	เปอร์เซ็นต์ ความดำ	PD(kpa)	(%eff)
22	134.1	67.8	222.52	29.8	6.63	70.2
23	149	53.5	222.21	13.6	9.55	86.4
24	162	37	221.9	11.1	12.5	88.9



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลอง : ความดันลด ไม้ตะเกียงเหลือ : 13 cm.  
 ชนิดตัวกรอง : ฟองน้ำเหลือง 96 เขม่าหนา : 2.4 mm.  
 ชนิดน้ำมัน : ไบโอดีเซล อุณหภูมิ : 28 °C  
 ปริมาณน้ำมัน : 150 มิลลิลิตร วันที่ทำการทดลอง : 28/01/2011  
 ความยาวไม้ตะเกียง : 150 มิลลิเมตร

time(m)	LH	RH	น้ำมันที่ ลดลง	Pd(kpa)	time(m)	LH	RH	น้ำมันที่ ลดลง	Pd(kpa)
0	100.3	100.1	229.21	0.02	22	134.4	65.4	222.28	6.9
1	100.3	100.1	228.91	0.02	23	141	58.8	221.97	8.22
2	100.3	100.1	228.57	0.02	24	141.5	58	221.67	8.35
3	100.3	100.1	228.25	0.02	25	143.5	55.5	221.37	8.8
4	100.3	100.1	227.93	0.02					
5	100.4	100	227.61	0.04					
6	100.4	100	227.28	0.04					
7	100.5	99.9	226.98	0.06					
8	100.7	99.7	226.67	0.1					
9	101.7	98.8	226.33	0.29					
10	102.5	98	226.01	0.45					
11	103.3	97.2	225.7	0.61					
12	104.5	96.2	225.38	0.83					
13	105.4	95.3	225.05	1.01					
14	107	93.7	224.77	1.33					
15	108.4	92.4	224.46	1.6					
16	110	90.5	224.15	1.95					
17	114.2	86.4	223.84	2.78					
18	119.8	80.3	223.53	3.95					
19	124.8	76	223.22	4.88					
20	129	71	222.92	5.8					
21	131.9	68.1	222.6	6.38					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลอง : ประสิทธิภาพการกรอง ไล่ตะเกียงเหลือ : 13 cm.  
 ชนิดตัวกรอง : DPF เหม่าหนา : 0.7 mm.  
 ชนิดน้ำมัน : ไบโอดีเซล อุณหภูมิ : 25 °C  
 ปริมาณน้ำมัน : 150 มิลลิลิตร วันที่ทำการทดลอง : 14/02/2011  
 ความยาวไล่ตะเกียง : 150 มิลลิเมตร

time(s)	time(m)	LH	RH	น้ำมัน	เปอร์เซ็นต์		PD(kpa)	(% )eff
					ควันทิ้ง	PD(kpa)		
0	0	105	97.5	234.2	100	0.75	0	
10	0.17	106.5	94	234.12	10.6	1.25	89.4	
20	0.33	108.5	90.4	234.04	8.2	1.81	91.8	
30	0.50	109.5	86	233.93	0.4	2.35	99.6	
40	0.67	112	81	233.86	0.3	3.1	99.7	
50	0.83	123.3	79.2	233.78	0.2	4.41	99.8	
60	1.00	126.7	75.5	233.71	0	5.12	100	
70	1.17	129.2	73	233.63	0.1	5.62	99.9	
80	1.33	132	70	233.55	0	6.2	100	
90	1.50	134.3	67.3	233.48	0	6.7	100	
100	1.67	137.3	64.5	233.41	0	7.28	100	
110	1.83	139.8	62.2	233.34	0	7.76	100	
120	2.00	142.2	59.5	233.27	0	8.27	100	
130	2.17	146.5	54.5	233.2	0	9.2	100	
140	2.33	147.7	52.8	233.15	0	9.49	100	
150	2.50	149.5	50.5	233.08	0	9.9	100	
160	2.67	151.1	49.1	232	0	10.2	100	
170	2.83	152.5	47.7	232.92	0	10.48	100	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลอง	: ความดันลด	ไส้ตะเกียงเหลือ	: 14.93 cm.
ชนิดตัวกรอง	: DPF	เขม่าหนา	: 0.4 mm.
ชนิดน้ำมัน	: ไบโอดีเซล	อุณหภูมิ	: 25 °C
ปริมาณน้ำมัน	: 150 มิลลิลิตร	วันที่ทำการทดลอง	: 14/02/2011
ความยาวไส้ตะเกียง	: 150 มิลลิเมตร		

time (s)	time(m)	LH	RH	น้ำมัน	PD(kpa)
0	0	105	97.5	234.2	0.75
10	0.17	106.8	95.4	234.12	1.14
20	0.33	112.6	89.5	234.03	2.31
30	0.50	120.8	81.4	233.95	3.94
40	0.67	125.9	75.8	233.86	5.01
50	0.83	128.7	73	233.78	5.57
60	1.00	130.9	69.2	233.68	6.17
70	1.17	133	68.8	233.58	6.42
80	1.33	133.8	67.7	233.5	6.61
90	1.50	135.6	65.9	233.4	6.97
100	1.67	137.6	63.5	233.29	7.41
110	1.83	140.5	60.8	233.18	7.97
120	2.00	145	56	233.07	8.9
130	2.17	147.5	53	232.96	9.45
140	2.33	150.2	51.8	232.85	9.84
150	2.50	149.8	50.5	232.75	9.93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลอง	: ประสิทธิภาพการกรอง	ใส่ตะเกียงเหลือ	: 14.85 cm.
ชนิดตัวกรอง	: DPF	เขม่าหนา	: 0.2 mm.
ชนิดน้ำมัน	: ไบโอดีเซล	อุณหภูมิ	: 100 °C
ปริมาณน้ำมัน	: 150 มิลลิลิตร	วันที่ทำการทดลอง	: 15/02/2011
ความยาวใส่ตะเกียง	: 150 มิลลิเมตร		

time(s)	time(m)	LH	RH	น้ำมัน	เปอร์เซ็นต์ ควันดำ	PD(kpa)	(%)eff
0	0	107.2	95.3	234.2	100	1.19	0
10	0.17	120.6	81.6	234.09	14.4	3.9	85.6
20	0.33	132.8	69	234	4	6.38	96
30	0.50	144	58	233.89	2.5	8.6	97.5
40	0.67	147.5	53.5	233.82	1.5	9.4	98.5
50	0.83	156.5	50	233.73	2	10.65	98
60	1.00	158	42	233.63	1.3	11.6	98.7
70	1.17	159	41	233.52	0.9	11.8	99.1
80	1.33	159.5	40	233.43	0.9	11.95	99.1
90	1.50	162	37	233.33	0.8	12.5	99.2
100	1.67	172.2	27	233.25	0.1	14.52	99.9
110	1.83	172	26.5	233.15	0.1	14.55	99.9
120	2.00	176	23.8	233.04	0.4	15.22	99.6
130	2.17	177.9	26.7	232.93	0.2	15.12	99.8
140	2.33	182	16.8	232.81	0.7	16.52	99.3
150	2.50	183	15.4	232.7	0.5	16.76	99.5
160	2.67	183.7	14.7	232.59	0.6	16.9	99.4
170	2.83	186	12.5	232.48	0	17.35	100
180	3.00	189.5	8.5	232.37	0.4	18.1	99.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลอง	: ความดันลด	ไส้ตะเกียงเหลือ	: 14.90 cm.
ชนิดตัวกรอง	: DPF	เขม่าหนา	: 1.5 mm.
ชนิดน้ำมัน	: ไบโอดีเซล	อุณหภูมิ	: 100 °C
ปริมาณน้ำมัน	: 150 มิลลิลิตร	วันที่ทำการทดลอง	: 15/02/2011
ความยาวไส้ตะเกียง	: 150 มิลลิเมตร		

time	LH	RH	น้ำมัน	Pd(kpa)
0	107.5	95.2	234.2	1.23
10	108.3	94.5	234.09	1.38
20	121.9	81.3	234.98	4.06
30	140.5	61.3	234.88	7.92
40	155.4	47.8	234.77	10.76
50	162.2	37.6	234.67	12.46
60	169.3	31.1	234.56	13.82
70	173.8	25.5	234.46	14.83
80	179.3	21.2	234.35	15.81
90	181.2	18.3	234.24	16.29
100	181.5	14.5	234.13	16.7
110	187.3	10.5	234.03	17.68
120	190.5	6.8	233.92	18.37
130	195	3.5	233.82	19.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Emission standards for passenger cars



Exhaust gases are far less toxic than they were years ago.

Emission standards for passenger cars and light commercial vehicles are summarised in the following tables. Since the Euro 2 stage, EU regulations introduce different emission limits for diesel and petrol vehicles. Diesels have more stringent CO standards but are allowed higher NO<sub>x</sub> emissions. Petrol-powered vehicles are exempted from particulate matter (PM) standards through to the Euro 4 stage, but vehicles with direct injection engines will be subject to a limit of 0.005 g/km for Euro 5 and Euro 6. A particulate number standard (P) or (PN) is part of Euro 5 and 6, but is not final. The standard is to be defined as soon as possible and at the latest upon entry into force of Euro 6.

All dates listed in the tables refer to new type approvals. The EC Directives also specify a second date — one year later — which applies to first registration (entry into service) of existing, previously type-approved vehicle models.

**European emission standards for passenger cars (Category M\*), g/km**

Tier	Date	CO	THC	NMHC	NO <sub>x</sub>	HC+NO <sub>x</sub>	PM	P***
<b>Diesel</b>								
Euro 1†	July 1992	2.72 (3.16)	-	-	-	0.97 (1.13)	0.14 (0.18)	-
Euro 2	January 1996	1.0	-	-	-	0.7	0.08	-
Euro 3	January 2000	0.64	-	-	0.50	0.56	0.05	-
Euro 4	January 2005	0.50	-	-	0.25	0.30	0.025	-
Euro 5	September 2009	0.500	-	-	0.180	0.230	0.005	-
Euro 6 (future)	September 2014	0.500	-	-	0.080	0.170	0.0025	-
<b>Petrol (Gasoline)</b>								
Euro 1†	July 1992	2.72 (3.16)	-	-	-	0.97 (1.13)	-	-
Euro 2	January 1996	2.2	-	-	-	0.5	-	-
Euro 3	January 2000	2.3	0.20	-	0.15	-	-	-
Euro 4	January 2005	1.0	0.10	-	0.08	-	-	-
Euro 5	September 2009	1.000	0.100	0.068	0.060	-	0.005**	-
Euro 6 (future)	September 2014	1.000	0.100	0.068	0.060	-	0.005**	-

\* Before Euro 5, passenger vehicles > 2500 kg were type approved as light commercial vehicles N<sub>1</sub>-I

\*\* Applies only to vehicles with direct injection engines

\*\*\* A number standard is to be defined as soon as possible and at the latest upon entry into force of Euro 6

† Values in brackets are conformity of production (COP) limits

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Emission standards for light commercial vehicles

European emission standards for light commercial vehicles  $\leq 1305$  kg (Category N<sub>1</sub>-I), g/km

Tier	Date	CO	THC	NMHC	NO <sub>x</sub>	HC+NO <sub>x</sub>	PM	P
<b>Diesel</b>								
Euro 1	October 1994	2.72	-	-	-	0.97	0.14	-
Euro 2	January 1998	1.0	-	-	-	0.7	0.08	-
Euro 3	January 2000	0.64	-	-	0.50	0.56	0.05	-
Euro 4	January 2005	0.50	-	-	0.25	0.30	0.025	-
Euro 5	September 2009	0.500	-	-	0.180	0.230	0.005	-
Euro 6 (future)	September 2014	0.500	-	-	0.080	0.170	0.005	-
<b>Petrol (Gasoline)</b>								
Euro 1	October 1994	2.72	-	-	-	0.97	-	-
Euro 2	January 1998	2.2	-	-	-	0.5	-	-
Euro 3	January 2000	2.3	0.20	-	0.15	-	-	-
Euro 4	January 2005	1.0	0.10	-	0.08	-	-	-
Euro 5	September 2009	1.000	0.100	0.068	0.060	-	0.005*	-
Euro 6 (future)	September 2014	1.000	0.100	0.068	0.060	-	0.005*	-

\* Applies only to vehicles with direct injection engines

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**European emission standards for light commercial vehicles 1305 kg – 1760 kg (Category N<sub>1</sub>-II),  
g/km**

Tier	Date	CO	THC	NMHC	NO <sub>x</sub>	HC+NO <sub>x</sub>	PM	P
<b>Diesel</b>								
Euro 1	October 1994	5.17	-	-	-	1.4	0.19	-
Euro 2	January 1998	1.25	-	-	-	1.0	0.12	-
Euro 3	January 2001	0.80	-	-	0.65	0.72	0.07	-
Euro 4	January 2006	0.63	-	-	0.33	0.39	0.04	-
Euro 5	September 2010	0.630	-	-	0.235	0.295	0.005	-
Euro 6 (future)	September 2015	0.630	-	-	0.105	0.195	0.005	-
<b>Petrol (Gasoline)</b>								
Euro 1	October 1994	5.17	-	-	-	1.4	-	-
Euro 2	January 1998	4.0	-	-	-	0.6	-	-
Euro 3	January 2001	4.17	0.25	-	0.18	-	-	-
Euro 4	January 2006	1.81	0.13	-	0.10	-	-	-
Euro 5	September 2010	1.810	0.130	0.090	0.075	-	0.005*	-
Euro 6 (future)	September 2015	1.810	0.130	0.090	0.075	-	0.005*	-
* Applies only to vehicles with direct injection engines								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**European emission standards for light commercial vehicles >1760 kg max 3500 kg. (Category N<sub>1</sub>-III & N<sub>2</sub>), g/km**

Tier	Date	CO	THC	NMHC	NO <sub>x</sub>	HC+NO <sub>x</sub>	PM	P
<b>Diesel</b>								
Euro 1	October 1994	6.9	-	-	-	1.7	0.25	-
Euro 2	January 1998	1.5	-	-	-	1.2	0.17	-
Euro 3	January 2001	0.95	-	-	0.78	0.86	0.10	-
Euro 4	January 2006	0.74	-	-	0.39	0.46	0.06	-
Euro 5 (future)	September 2010	0.740	-	-	0.280	0.350	0.005	-
Euro 6 (future)	September 2015	0.740	-	-	0.125	0.215	0.005	-
<b>Petrol (Gasoline)</b>								
Euro 1	October 1994	6.9	-	-	-	1.7	-	-
Euro 2	January 1998	5.0	-	-	-	0.7	-	-
Euro 3	January 2001	5.22	0.29	-	0.21	-	-	-
Euro 4	January 2006	2.27	0.16	-	0.11	-	-	-
Euro 5 (future)	September 2010	2.270	0.160	0.108	0.082	-	0.005*	-
Euro 6 (future)	September 2015	2.270	0.160	0.108	0.082	-	0.005*	-
* Applies only to vehicles with direct injection engines								

**Emission standards for lorries and buses**

Whereas for passenger cars, the standards are defined by vehicle driving distance, g/km, for lorries (trucks) they are defined by engine energy output, g/kWh, and are therefore in no way comparable. The

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

following table contains a summary of the emission standards and their implementation dates. Dates in the tables refer to new type approvals; the dates for all type approvals are in most cases one year later (EU type approvals are valid longer than one year).

The official category name is heavy-duty diesel engines, which generally includes lorries and buses.

**EU Emission Standards for HD Diesel Engines, g/kWh (smoke in  $m^{-1}$ )**

Tier	Date	Test cycle	CO	HC	NO <sub>x</sub>	PM	Smoke
Euro I	1992, < 85 kW	ECE R-49	4.5	1.1	8.0	0.612	
	1992, > 85 kW		4.5	1.1	8.0	0.36	
Euro II	October 1996		4.0	1.1	7.0	0.25	
	October 1998		4.0	1.1	7.0	0.15	
Euro III	<i>October 1999 EEVs only</i>	ESC & ELR	1.0	0.25	2.0	0.02	0.15
	October 2000		2.1	0.66	5.0	0.10 0.13*	0.8
Euro IV	October 2005	ESC & ELR	1.5	0.46	3.5	0.02	0.5
Euro V	October 2008		1.5	0.46	2.0	0.02	0.5
Euro VI	January 2013		1.5	0.13	0.4	0.01	

\* for engines of less than 0.75 dm<sup>3</sup> swept volume per cylinder and a rated power speed of more than 3,000 per minute. EEV is "Enhanced environmentally friendly vehicle".

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Emission standards for Large Goods Vehicles

#### Euro norm emissions for category N2, EDC, (2000 and up)

Standard	Date	CO (g/kWh)	NO <sub>x</sub> (g/kWh)	HC (g/kWh)	PM (g/kWh)
Euro 0	1988–1992	12.3	15.8	2.6	none
Euro I	1992–1995	4.9	9.0	1.23	0.40
Euro II	1995–1999	4.0	7.0	1.1	0.15
Euro III	1999–2005	2.1	5.0	0.66	0.1
Euro IV	2005–2008	1.5	3.5	0.46	0.02
Euro V	2008–2012	1.5	2.0	0.46	0.02

#### Euro norm emissions for (older) ECE R49 cycle

Standard	Date	CO (g/kWh)	NO <sub>x</sub> (g/kWh)	HC (g/kWh)	PM (g/kWh)
Euro 0	1988–1992	11.2	14.4	2.4	none
Euro I	1992–1995	4.5	8.0	1.1	0.36
Euro II	1995–1999	4.0	7.0	1.1	0.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้