



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

คุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของมลพิษอนุภาคจากเชื้อเพลิงดีเซล

Physical and Chemical Characterization of Diesel Particulate Matter

ดร.ปรีชา กรินทร์

นายทรงธรรม เหล่าสุวรรณ

นายยุทธนา ส่องแสงจันทร์

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2554

วิทยาลัยนานาชาติ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

RCH

ป/467ก

2554

b.12626454
i.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากฝ่าฝืนให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
สาขา.....
เลขทะเบียน.....
รับเดือนปี 22 ส.ย. 2558

137356

ชื่อโครงการ คุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของมลพิษอนุภาคจากเชื้อเพลิงดีเซล
 แหล่งเงิน แหล่งเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2554 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 50,000 บาท
 ระยะเวลาทำการวิจัย 7 เดือน ตั้งแต่ 1 มีนาคม 2554 ถึง 30 กันยายน 2554 /
 หัวหน้าโครงการ ดร.ปรีชา การินทร์ สาขาวิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยี วิทยาลัยนานาชาติ
 ผู้ร่วมโครงการ นายทรงธรรม เหล่าสุวรรณ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
 ผู้ร่วมโครงการ นายยุทธนา ส่องแสงจันทร์ สาขาวิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยี วิทยาลัยนานาชาติ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของมลพิษอนุภาคซึ่งมีขนาดในระดับนาโนสเกล และมีโครงสร้างทางกายภาพและเคมีที่ซับซ้อนมาก ในการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและแบบส่องผ่าน พบว่า “เกล็ดของคาร์บอน” ในมลพิษอนุภาคไบโอดีเซลและดีเซลมีขนาดประมาณ 0.5-3.0 นาโนเมตร โดยมีความหนาแน่นของคาร์บอนอะตอมประมาณ 50-250 อะตอมต่อลูกบาศก์นาโนเมตร ขนาดของอนุภาคเดี่ยวของมลพิษอนุภาคจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงไบโอดีเซลและดีเซลมีขนาดประมาณ 30-40 นาโนเมตร และ 50-60 นาโนเมตร ตามลำดับ นอกจากนี้ขนาดเดี่ยวของมลพิษอนุภาคไบโอดีเซลจะมีขนาดเล็กกว่าดีเซลแล้วยังพบอีกว่าปริมาณการปล่อยมลพิษอนุภาคไบโอดีเซลต่ำกว่าดีเซลประมาณร้อยละ 50 ในการศึกษาคุณลักษณะทางเคมีของมลพิษอนุภาคโดยใช้โดยใช้เครื่องวิเคราะห์เทอโมกราวิเมตริกซ์พบว่า ไฮโดรคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ในมลพิษอนุภาคไบโอดีเซล ไฮโดรคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ในมลพิษอนุภาคดีเซล และคาร์บอนในมลพิษอนุภาคทั้งสองชนิด สามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนโดยใช้พลังงานกระตุ้นประมาณ 91, 130 และ 155 กิโลจูลต่อโมล โดยไฮโดรคาร์บอนและคาร์บอนสามารถเริ่มทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ที่อุณหภูมิประมาณ 400 และ 500 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่า ข้อดีของเชื้อเพลิงไบโอดีเซลนอกจากขนาดอนุภาคเดี่ยวและปริมาณของมลพิษอนุภาคจากการเผาไหม้ไบโอดีเซลจะมีค่าต่ำกว่าดีเซลแล้ว พลังงานกระตุ้นที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนยังมีค่าต่ำกว่าดีเซลด้วย ซึ่งสาเหตุหลักของพฤติกรรมดังกล่าวน่าจะเกิดจากโมเลกุลของเชื้อเพลิงไบโอดีเซลประกอบด้วยอะตอมของออกซิเจนที่มีผลกระทบโดยตรงต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีในขบวนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงและขบวนการทำปฏิกิริยาเคมีของมลพิษอนุภาคนั้นเอง พฤติกรรมการดักและเผาผลาญมลพิษอนุภาคในอุปกรณ์กรองมลพิษอนุภาคจะถูกศึกษาในการวิจัยต่อเนื่อง ผลที่ได้รับจากผลการวิจัยข้างต้นจะเป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบโครงสร้างอุปกรณ์หลังการเผาไหม้ที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้พลังงานในอนาคต

คำสำคัญ : เครื่องยนต์ดีเซล, มลพิษอนุภาค, อุปกรณ์กรองมลพิษอนุภาคดีเซล, ไอเสีย, ภาวะมลพิษ, ไบโอดีเซล

Research Title: Physical and Chemical Characterization of Diesel Particulate Matter

Researcher: Dr.Preechar Karin

Faculty: International College Department: Engineering and Technology

Researcher: Mr.Songtam Laosuwan

Faculty: Engineering Department: Mechanical Engineering

Researcher: Mr.Yutthana Songsaengchan

Faculty: International College Department: Engineering and Technology

ABSTRACT

This research is study of physical and chemical characterization of diesel and bio-diesel particulate matter which the nanostructure and chemical component are very complicate. The primary size distribution of each particulate matter can be estimated by using the images of scanning electron microscope (SEM) and transmission electron microscope (TEM). The size of carbon platelet inside diesel and biodiesel particulate matter is approximately 0.5-3.0 nm. As a result, the density of carbon atom inside particulate matter is about 50-250 atoms/nm³. The primary sizes of diesel and biodiesel particulate matter are approximately 50-60 nm and 30-40 nm, respectively. Moreover, particulate matter of biodiesel combustion is about two times lower than that of diesel. The chemical kinetics of particulate matter oxidation was studied by using Thermo-gravimetric analysis (TGA). The apparent activation energies of unburned hydrocarbon of biodiesel, unburned hydrocarbon of diesel and carbon inside both of PM oxidation are approximately 91, 133 and 155 kJ/mol, respectively. Unburned hydrocarbon and carbon could be started of oxidation at the temperature of 400 and 500 °C, respectively. The oxygen atoms inside biodiesel molecules may be affected to biodiesel particulate combustion, resulting in small primary particle size, low PM concentration and low apparent activation energy of oxidation. The advantage points of biodiesel are clearly described in this research. Particulate matter trapping and oxidation behaviors inside the micro porous structure of DPF wall will be studied and reported by next step. The result of this research will be improved our understanding of such complicate behaviors, and it can potentially facilitate the future design of ideal DPF configurations.

Keywords : Diesel Engine, Particulate Matter, Diesel Particulate Filter, Emissions, Pollution, Biodiesel

กิตติกรรมประกาศ

คณะนักวิจัยขอขอบคุณ คณาจารย์ เจ้าหน้าที่ ตลอดจนนักศึกษา สาขาวิศวกรรมยานยนต์ วิทยาลัยนานาชาติ และ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และความช่วยเหลือจนงานวิจัยเสร็จสิ้นสมบูรณ์ตามวัตถุประสงค์ ยิ่งไปกว่านั้น นักวิจัยขอขอบคุณหน่วยงานที่เป็นแหล่งทุนวิจัยตลอดโครงการฯ โดยการวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุนเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2554

ดร.ปรีชา การินทร์
ทรงธรรม เหล่าสุวรรณ
ยุทธนา ส่องแสงจันทร์



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	V
สารบัญภาพ.....	VI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	6
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	6
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	6
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 แนวคิดและทฤษฎีหลักของงานวิจัย.....	8
2.2 การทบทวนวรรณกรรม.....	12
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	17
3.1 คุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของมลพิษอนุภาค.....	17
3.2 การกำจัดมลพิษอนุภาคด้วยอุปกรณ์กรองมลพิษอนุภาค.....	21
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	22
4.1 คุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของมลพิษอนุภาค.....	22
4.2 การกำจัดมลพิษอนุภาคด้วยอุปกรณ์กรองมลพิษอนุภาค.....	32
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	34
บรรณานุกรม/เอกสารอ้างอิง.....	35
ภาคผนวก.....	37
ประวัตินักวิจัย.....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงไบโอดีเซล.....	17
4.1 ความหนาแน่นของอะตอมคาร์บอนในมลพิษอนุภาค.....	28
4.2 พลังงานกระตุ้นของการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างมลพิษอนุภาคกับออกซิเจน.....	31



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.3 การพัฒนาเทคโนโลยีเครื่องยนต์สันดาปภายในประสิทธิภาพสูงในปัจจุบัน.....	2
1.2 เทคโนโลยีเชื้อเพลิงชีวภาพในปัจจุบันและอนาคต.....	3
1.3 การลดภาวะโลกร้อนด้วยการหมุนเวียนของคาร์บอนแบบครบวงจร.....	4
2.1 พลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้และพลังงานกระตุ้นในขบวนการเผาไหม้.....	9
2.2 การแบ่งประเภทของมลพิษอนุภาคจากการเผาไหม้ตามขนาดของอนุภาค.....	11
2.3 ภาพจำลองมลพิษอนุภาคจากเครื่องยนต์ดีเซลในระดับไมโครและนาโนสเกล.....	12
2.4 ภาพถ่ายของมลพิษอนุภาค โดยใช้กล้องอิเล็กตรอน.....	13
2.5 อุปกรณ์กรองมลพิษอนุภาคดีเซล.....	15
3.1 อุปกรณ์สำหรับ เทคนิคการถ่ายภาพด้วยซูริเรน.....	18
3.2 โค้ดอะแกรมแสดงชุดทดสอบปริมาณมลพิษอนุภาคจากเครื่องยนต์.....	19
3.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง.....	20
3.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทรานสมิซชัน.....	20
3.5 อุปกรณ์ทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี.....	21
3.6 ชุดทดสอบพฤติกรรมกรดิกและเผาผลาญอนุภาค.....	21
4.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของเชื้อเพลิงไบโอดีเซลกับดีเซล.....	22
4.2 การเปรียบเทียบปริมาณมลพิษอนุภาคจากภาพถ่ายภาพเปลวไฟแบบแพร่.....	23
4.3 การเปรียบเทียบปริมาณมลพิษอนุภาคจากเครื่องยนต์ด้วย.....	24
4.4 ภาพถ่ายมลพิษอนุภาคกลุ่มด้วย SEM.....	25
4.5 เปรียบเทียบขนาดมลพิษอนุภาคกลุ่มจากภาพถ่ายด้วย SEM.....	25
4.6 ภาพถ่ายมลพิษอนุภาคเดี่ยวด้วย SEM และ TEM.....	26
4.7 เปรียบเทียบขนาดมลพิษอนุภาคกลุ่มจากภาพถ่ายด้วย TEM.....	27
4.8 การประมาณความยาวเกล็ด (Platelet) คาร์บอนในมลพิษอนุภาคเดี่ยว.....	27
4.9 เปรียบเทียบขนาดของเกล็ด (Platelet) คาร์บอนในมลพิษอนุภาค.....	28
4.10 การทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างมลพิษอนุภาคกับออกซิเจนด้วย TGA.....	30
4.11 สัดส่วนของน้ำ ไฮโดรคาร์บอนและคาร์บอน โดยประมาณจาก TGA.....	31
4.12 ภาพถ่ายอุปกรณ์กรองมลพิษอนุภาคด้วย SEM.....	32
4.13 การทดสอบพฤติกรรมกรดิกมลพิษอนุภาคด้วยอุปกรณ์กรองมลพิษอนุภาค.....	33

บทที่ 1

บทนำ

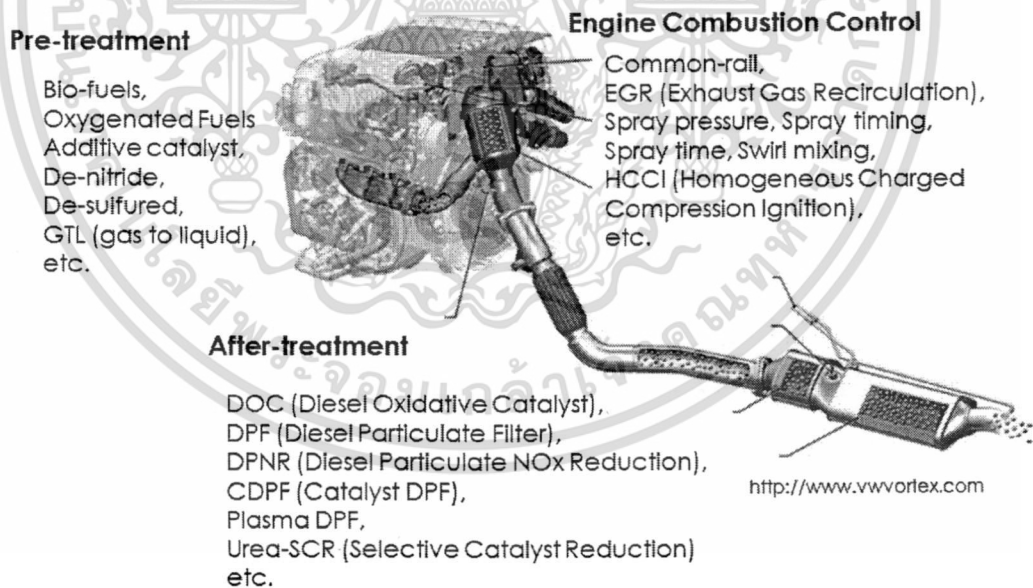
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

1.1.1 เครื่องยนต์สันดาปภายใน (Internal Combustion Engine)

เครื่องยนต์สันดาปภายใน (Internal Combustion Engine; ICE) เป็นกลจักรความร้อน (Heat Engine) ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานเคมี (Chemical Energy) ที่มีอยู่ในโมเลกุลของเชื้อเพลิง ไปเป็นพลังงานความร้อน (Thermal Energy) โดยอาศัยการเผาไหม้ (Combustion) ซึ่งเป็นการทำปฏิกิริยาเคมี (Chemical Reaction) ระหว่างโมเลกุลของออกซิเจน (Oxygen) ที่ได้จากอากาศกับโมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon Compound) ที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง การทำปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลสารตั้งต้น (Reactants) สองชนิดข้างต้นจะทำให้เกิดการคายพลังงานภายใน (Internal Energy) ที่เป็นพลังงานเคมีออกมาในรูปของความร้อน เรียกการทำปฏิกิริยาเคมีแบบนี้ว่า ปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic Reaction) พลังงานความร้อนที่ได้รับระหว่างการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ (Combustion Chamber) จะทำให้กิจกรรมในระดับโมเลกุล (Molecular Dynamics) ของก๊าซในห้องเผาไหม้มากขึ้น แรงที่โมเลกุลของก๊าซกระทำกับผนังที่ผนังห้องเผาไหม้หรือความดันในห้องเผาไหม้นั้นจะสูงขึ้นมากตามไปด้วย เครื่องยนต์สันดาปภายใน สามารถเปลี่ยนแรงที่โมเลกุลของก๊าซกระทำกับผนังห้องเผาไหม้เป็นพลังงานกล (Mechanical Energy) โดยใช้กลไกทางวิศวกรรม โดยส่วนใหญ่เครื่องยนต์สันดาปภายในจะเป็นเครื่องยนต์แบบลูกสูบ (Reciprocating Engines) กล่าวคือ จะมีลูกสูบ (Pistons) วิ่งไปกลับในกระบอกสูบ (Cylinders) ภายในห้องเผาไหม้ ผิวหน้าของลูกสูบจะทำหน้าที่รับแรงกระทำจากโมเลกุลของก๊าซดังกล่าว จึงเกิดการเคลื่อนที่ของลูกสูบซึ่งเป็นพลังงานกล (Mechanical Energy) โดยมีกลไกต่อไปยังระบบขับเคลื่อนยานยนต์

สารประกอบไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon Compound) มีพลังงานภายในที่สูงจึงถูกนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานหลักในสังคมโลกปัจจุบัน น้ำมันดิบ (Crude Oil) เป็นเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon Fuel) หลักสำหรับยานยนต์ โดยจะถูกนำไปผ่านกระบวนการกลั่นเพื่อให้ได้เชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนชนิดต่างๆ เช่น น้ำมันเบนซิน (Gasoline) ซึ่งจะมีค่าออกเทน (Octane) สูงทนต่อการจุดระเบิดด้วยตัวเอง (Detonation) ได้ดี จึงสามารถถูกออกแบบให้ผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับอากาศก่อนเข้าห้องเผาไหม้ที่ท่อไอดี (Port Injection) ของเครื่องยนต์เบนซิน จุดระเบิดด้วยประกายไฟ (Spark Ignition Gasoline Engine) ซึ่งทำงานตามวัฏจักรออตโต (Otto Cycle) และมีอัตราส่วนการอัด (Compression Ratio) ประมาณ 9-10:1 เครื่องยนต์เบนซินจะมีข้อดีคือ

สามารถควบคุมส่วนผสมออกซิเจนในอากาศกับเชื้อเพลิงโดยเป็นเนื้อเดียวกันทั้งห้องเผาไหม้ได้ทำให้มลพิษจากการเผาไหม้ซึ่งมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพมนุษย์ เช่น มลพิษคาร์บอนไดออกไซด์ (CO) ไฮโดรคาร์บอน (HC) ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO) และ มลพิษอนุภาค (Particulate Matter; PM) สามารถถูกกำจัดได้ด้วยเทคโนโลยีหลังการเผาไหม้ แคตตาไลติกคอนเวอร์เตอร์สามทาง (After Treatment Technology : Catalytic Converter) ได้โดยไม่ยากนักเพราะแทบไม่มีปริมาณออกซิเจนที่เหลือจากการเผาไหม้เลย ในทางตรงกันข้าม น้ำมันดีเซล (Diesel Fuel) ถูกออกแบบให้ฉีดเข้าห้องเผาไหม้โดยตรง (Direct Injection) หลังจากอัดอากาศในห้องเผาไหม้จนได้อุณหภูมิและความดันที่เหมาะสมตามหลักการของวัฏจักรดีเซล (Diesel Cycle) ของเครื่องยนต์ดีเซล จะถูกจุดระเบิดด้วยการอัด (Compression Ignition Diesel Engine) ที่มีอัตราส่วนการอัดสูงถึง 15-22:1 ดังนั้นจะเห็นว่าเครื่องยนต์ดีเซลมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูงกว่าเครื่องยนต์เบนซินแต่ก็มีข้อเสีย คือ การปล่อยมลพิษออกไซด์ของไนโตรเจน (NO) และ มลพิษอนุภาค (Particulate Matter; PM) จะอยู่ในอัตราส่วนที่สูงมาก จึงไม่สามารถกำจัดมลพิษดังกล่าวได้โดยใช้เพียงเทคโนโลยีหลังการเผาไหม้ชนิดเดียวกับเครื่องยนต์เบนซินเพราะมีข้อจำกัดเรื่องสัดส่วนของปริมาณออกซิเจนที่เหลือจากการเผาไหม้มีค่าสูงเกินไป จำเป็นต้องเพิ่มเทคโนโลยีหลังการเผาไหม้เฉพาะมลพิษสอง



ภาพที่ 1.1 การพัฒนาเทคโนโลยีเครื่องยนต์สันดาปภายในประสิทธิภาพสูงในปัจจุบัน

ที่มา: P. Karin, "Lecture Material of M.Eng.(Automotive Engineering), KMITL.

ประเภทดักถั่ว (After Treatment Technology: Diesel Particulate Filter (DPF), Selective Catalytic Converter (SCR)) ดังแสดงใน ภาพที่ 1.1 ซึ่งจะเห็นว่าปัจจุบันการพัฒนาเทคโนโลยีเครื่องยนต์สันดาปภายในแบบประสิทธิภาพสูงและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมได้ให้ความสำคัญกับการพัฒนาสามด้านหลัก ประกอบด้วย เทคโนโลยีก่อนการเผาไหม้ (Pre-Treatment Technology) เทคโนโลยีการควบคุมการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ (Engine Combustion Control Technology) และเทคโนโลยีหลังการเผาไหม้ (After-Treatment Technology)

1.1.2 เชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายใน

เชื้อเพลิงชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงที่มีออกซิเจนอะตอมอยู่ในโมเลกุลอยู่แล้ว (Oxygenates) จึงสามารถเผาไหม้ในสถานะที่ส่วนผสมอากาศบาง (Lean) และเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ให้สูงขึ้น โดยเชื้อเพลิงชีวภาพสามารถแบ่งออกเป็นสองกลุ่มใหญ่ๆ คือ เทคโนโลยีเชื้อเพลิงชีวภาพแบบธรรมดา (Conventional Biofuel Technologies) และ เทคโนโลยีเชื้อเพลิงชีวภาพขั้นสูง (Advanced Biofuel Technologies) ดังแสดงใน ภาพที่ 1.2

	Advanced biofuels			Conventional biofuels
	Basic and applied R&D	Demonstration	Early commercial	Commercial
Bioethanol		Cellulosic ethanol		Ethanol from sugar and starch crops
Diesel-type biofuels	Biodiesel from microalgae; Sugar-based hydrocarbons	BtL-diesel (from gasification + FT) ¹	Hydrotreated vegetable oil	Biodiesel (by transesterification)
Other fuels and additives	Novel fuels (e.g. furanics)	Biobutanol; DME ² ; Pyrolysis-based fuels	Methanol	
Biomethane		Bio-SC ⁴		Biogas (anaerobic digestion)
Hydrogen	All other novel routes	Gasification with reforming	Biogas reforming	

■ Liquid biofuel ■ Gaseous biofuel

1. Biomass-to-liquids; 2. Fischer-Tropsch; 3. Dimethylether; 4. Bio-synthetic gas.

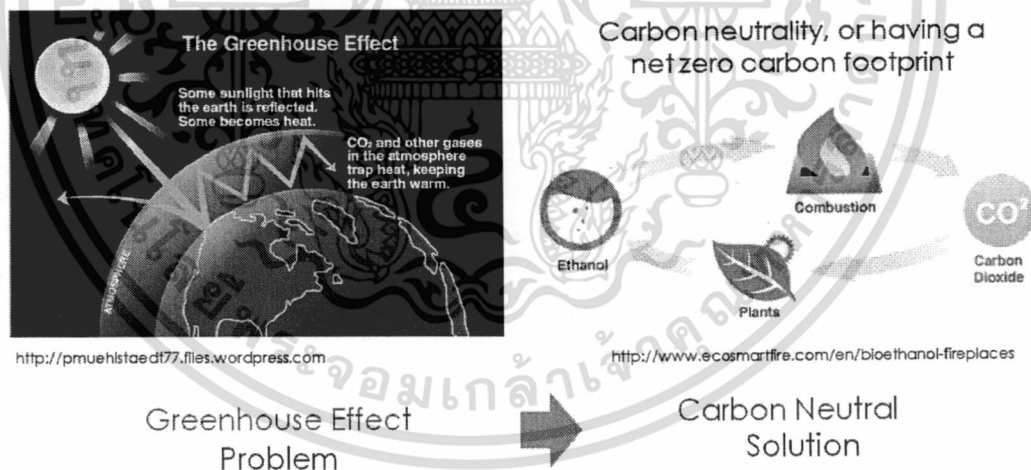
Source: Modified from Bauen *et al.*, 2009.

ภาพที่ 1.2 เทคโนโลยีเชื้อเพลิงชีวภาพในปัจจุบันและอนาคต

ที่มา: Technology Roadmap Biofuels for Transport, Energy International Agency (EIA), 2011.

เชื้อเพลิงชีวภาพแบบธรรมดา (Conventional Biofuel) เป็นเชื้อเพลิงชีวภาพที่ใช้และจำหน่ายกันได้ทั่วไป เช่น เอทานอลที่ผลิตจากน้ำตาลและแป้ง (Sugar-Based and Starch-Based Ethanol) ซึ่งสามารถผลิตจากวัตถุดิบจำพวก อ้อย มันสำปะหลัง และ ข้าวโพด น้ำมันไบโอดีเซลธรรมดา (Conventional Biodiesel) ซึ่งผลิตจาก เมล็ดของพืชตระกูลถั่ว และ ปาล์มน้ำมัน การใช้เอทานอล (Ethanol) และไบโอดีเซล (Biodiesel) ที่สามารถผลิตได้ในประเทศมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่างๆ ดังนี้

- สามารถลดการนำเข้าเชื้อเพลิงฟอสซิล เพราะเป็นเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากพืชในประเทศซึ่งเป็นการสร้างความมั่นคงทางพลังงาน ความมั่นคงของภาคเกษตรกรรม เพิ่มการสร้างงานและรายได้ในภาคส่วนที่เกี่ยวข้อง โดยเฉพาะเกษตรกรของประเทศ
- สามารถลดมลพิษจากการเผาไหม้ เช่น สารประกอบไฮโดรคาร์บอน มลพิษอนุภาค และคาร์บอนมอนอกไซด์ เพราะมีส่วนประกอบของออกซิเจนในโมเลกุลของเชื้อเพลิง ทำให้มีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมและสุขภาพน้อยลงเมื่อเทียบกับน้ำมันเบนซินหรือดีเซล
- สามารถลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ที่มีผลโดยตรงต่อสภาวะโลกร้อน (Global Warming) เนื่องจากเป็นการใช้คาร์บอนที่มีอยู่และหมุนเวียนแบบครบวัฏจักร (Carbon Neutral) ดังแสดงใน ภาพที่ 1.3



ภาพที่ 1.3 การลดภาวะโลกร้อนด้วยการหมุนเวียนของคาร์บอนแบบครบวัฏจักร (Carbon Neutral)

ที่มา: P. Karin, "Lecture Material of M.Eng.(Automotive Engineering), KMITL.

เชื้อเพลิงชีวภาพขั้นสูง (Advanced Biofuel) เป็นเชื้อเพลิงที่ถูกปรับปรุงคุณภาพให้ดีขึ้นหรือผลิตจากเทคโนโลยีและเทคนิคแบบใหม่ โดยยังอยู่ในขบวนการวิจัยและพัฒนาหรือการทดลองใช้ และแสดงเป็นตัวอย่างเท่านั้น เช่น เอทานอลที่ผลิตจากเซลลูโลส (Cellulosic Ethanol) เชื้อเพลิงไบโอดีเซลขั้นสูง ประกอบด้วย Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) และ Biomass-to-Liquids (BtL) เชื้อเพลิงที่ผลิตจากชีวมวลและน้ำตาลอื่นๆ โดยอาศัยเทคนิคใหม่ๆ เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาชีวภาพในการผลิต (Biomass-Based/Sugar-Based Biofuels) เช่น ดีเซลสังเคราะห์จากน้ำตาล เชื้อเพลิงชีวภาพสังเคราะห์ (Bio-Synthetic Gas (Bio-SG)) เชื้อเพลิงชีวภาพแหล่งวัตถุดิบใหม่ๆ เช่น ไบโอดีเซลจากสาหร่าย โดยการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และประสิทธิภาพการใช้พลังงานจะขึ้นอยู่กับการผลิตวัตถุดิบและขบวนการผลิตเชื้อเพลิงทั้งหมด ทำให้เชื้อเพลิงชีวภาพขั้นสูงส่วนใหญ่ยังเป็นการใช้พลังงานในการผลิตที่สูงกว่าเชื้อเพลิงชีวภาพแบบธรรมดา เชื้อเพลิงก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) และก๊าซธรรมชาติสำหรับยานยนต์ (NGV) ก็สามารถนำมาใช้กับเครื่องยนต์สันดาปภายในได้ การใช้เชื้อเพลิงก๊าซสามารถลดปริมาณการปล่อยมลพิษไฮโดรคาร์บอน คาร์บอนมอนอกไซด์ และ มลพิษอนุภาค หากมีการออกแบบที่เหมาะสม เพราะสามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับอากาศได้ดีกว่าเชื้อเพลิงเหลว อย่างไรก็ตามเชื้อเพลิงทั้งสองชนิดเป็นเชื้อเพลิงจากฟอสซิลที่ปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ในกระบวนการกลั่นเช่นเดียวกับเบนซินและดีเซล

เนื่องจาก เทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle) และ ยานยนต์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน (Hydrogen Vehicle) จำเป็นต้องใช้เวลานานในการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพรวมสูงสุด ดังนั้นเครื่องยนต์สันดาปภายในยังมีความจำเป็นที่จะต้องพัฒนาให้มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากที่สุดเท่าที่เทคโนโลยีปัจจุบันจะสามารถทำได้ โดยมีเป้าหมายหลัก คือ “การพัฒนาเครื่องยนต์เบนซินให้มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับเครื่องยนต์ดีเซล” และ “การพัฒนาเครื่องยนต์ดีเซลให้มีการปล่อยมลพิษต่ำเหมือนเครื่องยนต์เบนซิน” ซึ่งรวมไปถึง “การลดขนาดเครื่องยนต์และยานยนต์ลง (Down Sizing) ให้เหมาะสมกับการใช้งาน”

1.1.3 มลพิษอนุภาค

มลพิษอนุภาค (Particulate Matter) ที่เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเครื่องยนต์เป็นสาเหตุหลักของการเกิดมะเร็งในปอด ดังนั้นการควบคุมมลพิษจากยานยนต์จึงมีความเข้มงวดมากขึ้น โดยเฉพาะสหภาพยุโรป สหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น เทคโนโลยีปัจจุบันสามารถกำจัดมลพิษอนุภาคได้ด้วยการใช้อุปกรณ์กรองมลพิษอนุภาค (Diesel Particulate Filter: DPF)

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาคูณลักษณะทางกายภาพ (Physical) และเคมี (Chemical) ของมลพิษอนุภาค (PM) ซึ่งมีขนาดเล็กในระดับนาโนสเกล (Nano-particles) และมีคูณลักษณะทางกายภาพและเคมีที่ซับซ้อนมาก การวิจัยครั้งนี้มุ่งหวังที่จะค้นคว้าเพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานของการวิจัยเชิงลึกทางกายภาพและเคมีในขั้นสูงต่อไป เพื่อให้สามารถออกแบบโครงสร้างในระดับไมโครและนาโนสเกลของระบบกำจัดมลพิษอนุภาคซึ่งเป็นอันตรายร้ายแรงต่อร่างกายมนุษย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

1.2.2 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการกำจัดมลพิษอนุภาคด้วยอุปกรณ์กรองมลพิษอนุภาคดีเซล (Diesel Particulate Filter: DPF) จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงดีเซลและเชื้อเพลิงไบโอดีเซล เพื่อวิเคราะห์ถึง ความเหมาะสมและความเป็นไปได้ในการนำอุปกรณ์ดังกล่าวมาใช้กับเครื่องยนต์เชื้อเพลิงชีวภาพในประเทศไทย

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาเกี่ยวกับการกำจัดมลพิษอนุภาค (PM) ที่ถูกปล่อยออกมาพร้อมกับไอเสีย (Exhaust gases) โดย แบ่งการศึกษาออกเป็นสองส่วน

1.3.1 ศึกษาคูณลักษณะทางกายภาพและเคมีของมลพิษอนุภาคจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงดีเซลและไบโอดีเซลเพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานของการวิจัยขั้นสูงต่อไป

1.3.2 ศึกษาพฤติกรรมการกำจัดมลพิษอนุภาคจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงดีเซลและไบโอดีเซล อุปกรณ์กรองมลพิษอนุภาคดีเซล (Diesel Particulate Filter: DPF)

1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

1.4.1 ศึกษาคูณลักษณะทางกายภาพและเคมีของมลพิษอนุภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (Scanning electron microscope: SEM) และกล้องอิเล็กตรอนแบบทรานสมิชชัน (Transmission electron microscope: TEM) สำหรับวิเคราะห์คูณสมบัติทางกายภาพในระดับไมโครและนาโนสเกล และ การศึกษาคูณลักษณะทางเคมีโดยใช้ Thermo-gravimetric analysis (TGA) Energy dispersive spectrometer (EDS) CHN Thermal-Analysis เป็นต้น

1.4.2 ศึกษาพฤติกรรมการกำจัดมลพิษอนุภาคด้วย อุปกรณ์กรองมลพิษอนุภาคดีเซล (Diesel Particulate Filter: DPF) โดยการสร้างชุดอุปกรณ์การทดสอบที่สามารถวัดค่าผลกระทบของความดันแตกต่าง (Pressure drop) และ ประสิทธิภาพการกรอง (Filtration efficiency) ในขบวนการดักและสลายมลพิษอนุภาค

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ข้อมูลพื้นฐานของการวิจัยเชิงลึกเกี่ยวกับคุณลักษณะทางกายภาพ (Physical) และเคมี (Chemical) ของมลพิษอนุภาค (PM) ซึ่งมีขนาดเล็กในระดับนาโนสเกล (Nano-particles) และมีคุณลักษณะทางกายภาพและเคมีที่ซับซ้อนและเป็นอันตรายต่อสุขภาพมนุษย์มาก การวิจัยครั้งนี้มุ่งหวังที่จะค้นคว้าเพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานของการออกแบบโครงสร้างในระดับไมโครและนาโนสเกลของระบบกำจัดมลพิษอนุภาคดังกล่าวให้มีประสิทธิภาพสูงยิ่งขึ้น

1.5.2 ข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบและเลือกใช้อุปกรณ์กรองมลพิษอนุภาคดีเซล (Diesel Particulate Filter: DPF) ที่เหมาะสมกับเชื้อเพลิงฟอสซิลและชีวภาพในประเทศไทย ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมในระดับเทียบเท่ามาตรฐานยูโร-4 และ ยูโร-5 ซึ่งจะถูกนำมาใช้ในอนาคตอันใกล้

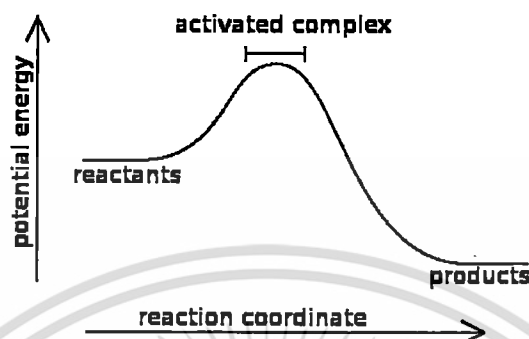
บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎีหลักของงานวิจัย

2.1.1 มลพิษอนุภาคจากเครื่องยนต์ (Engine's Particle Emissions)

เครื่องยนต์สันดาปภายในสามารถให้พลังงานจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนกับอากาศ โดยการเปลี่ยนพลังงานเคมีใน โมเลกุลของเชื้อเพลิงเป็นพลังงานภายในในรูปแบบของพลังงานความร้อน พลังงานความร้อนจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานกลในรูปการหมุนของเพลาคอเหวี่ยงและต่อไปยังกลไกต่างๆ ของระบบส่งกำลัง สารประกอบไฮโดรคาร์บอนมีหลายชนิดซึ่งล้วนประกอบด้วยธาตุหลักคือ ไฮโดรเจนและคาร์บอน นอกจากนั้นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนบางชนิดก็มีส่วนประกอบของธาตุออกซิเจนอยู่ด้วย เช่น แอลกอฮอล์และไบโอดีเซล เป็นต้น ปริมาณของพลังงานเคมีที่เปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณพลังงานภายในของเชื้อเพลิงชนิดนั้นๆ ภาพที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ของพลังงานของสารตั้งต้นที่เปลี่ยนไประหว่างทำปฏิกิริยาเคมีจนได้เป็นสารผลิตภัณฑ์หลังการทำปฏิกิริยาเคมี พลังงานภายในของโมเลกุลของสารตั้งต้น (Reactants Internal Energy; H_r) แต่ละชนิดจะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะเฉพาะของโมเลกุลของสารประกอบชนิดนั้นๆ การวิ่งชนกันของโมเลกุลของสารตั้งต้นสองชนิดต้องมีความรุนแรงพอจึงจะเข้าไปเป็นโมเลกุลของสารผลิตภัณฑ์ได้ ความรุนแรงที่มากพอดังกล่าวคือ พลังงานกระตุ้น (Activation Energy; E_a) หากโมเลกุลของสารตั้งต้นที่วิ่งชนกันไม่แรงพอก็จะไม่สามารถเข้ามาเป็นสารผลิตภัณฑ์ได้ หลังจากโมเลกุลของสารตั้งต้นเข้ามาเป็นโมเลกุลของสารผลิตภัณฑ์แล้ว พลังงานภายในอาจเพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ได้ ในกรณีที่พลังงานภายในเพิ่มขึ้น เรียกว่า ปฏิกิริยาคูดความร้อน (Endothermic Reaction) คือ โมเลกุลจะดูดซับเอาพลังงานความร้อนจากสิ่งแวดล้อมทำให้บริเวณรอบๆ อุณหภูมิต่ำลง ส่วนในกรณีที่พลังงานภายในลดลงเรียกว่า ปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic Reaction) คือ โมเลกุลจะให้ความร้อนออกมา ทำให้บริเวณรอบๆ ร้อนขึ้น ซึ่งปฏิกิริยาการเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนเพราะให้ความร้อนจากการเผาไหม้ จะเห็นว่าพลังงานภายในของโมเลกุลของสารผลิตภัณฑ์ (Product Internal Energy; H_p) มีค่าต่ำกว่าพลังงานภายในของโมเลกุลของสารตั้งต้น (Reactants Internal Energy; H_r) ดังนั้นค่าความแตกต่างของพลังงานทั้งสองส่วนนี้คือพลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ ซึ่งเป็นไปตามกฎอนุรักษ์พลังงานที่กล่าวว่าเป็น "พลังงานไม่สูญหายหรือสร้างขึ้นใหม่ได้" พลังงานความร้อนที่คายออกมาจากการเผาไหม้ดังกล่าวคือ ค่าความร้อน (Heating Value) ของเชื้อเพลิงแต่ละชนิดนั่นเอง

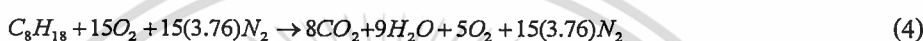
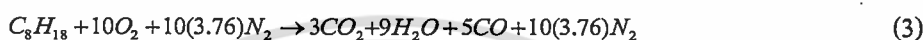
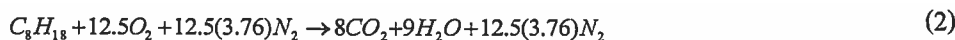


ภาพที่ 2.1 พลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้และพลังงานกระตุ้นในขบวนการเผาไหม้

ที่มา: http://en.wikipedia.org/wiki/Exothermic_reaction.

การทำปฏิกิริยาเคมีที่สามารถปล่อยพลังงานความร้อนออกมาได้มากที่สุดคือ การเกิดปฏิกิริยาของส่วนผสมอากาศต่อเชื้อเพลิงแบบพอดี (Stoichiometric or Theoretical Oxygen) การทำปฏิกิริยาเคมีของเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนกับออกซิเจนในขบวนการเผาไหม้ที่ส่วนผสมอากาศต่อเชื้อเพลิงพอดีตามหลักทฤษฎีจะได้สารผลิตภัณฑ์คือ ไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจำนวนอะตอมรวมของธาตุแต่ละชนิดในสารตั้งต้นในด้านซ้ายของสมการต้องเท่ากับจำนวนอะตอมรวมของธาตุแต่ละชนิดในสารผลิตภัณฑ์ในด้านขวาของสมการ สมการที่ (1) แสดงถึงการทำปฏิกิริยาเคมีของไอโซออกเทนกับออกซิเจนที่ส่วนผสมออกซิเจนต่อเชื้อเพลิงพอดี จะได้สารผลิตภัณฑ์คือ คาร์บอนไดออกไซด์กับไอน้ำ จากสมการจะเห็นว่าไอโซออกเทน 1 โมเลกุลต้องการออกซิเจน 12.5 โมเลกุลในการทำปฏิกิริยาเคมีให้พอดี ซึ่งสารผลิตภัณฑ์คือ คาร์บอนไดออกไซด์ 8 โมเลกุลกับไอน้ำ 9 โมเลกุล อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติเราไม่สามารถจัดหาออกซิเจนบริสุทธิ์ให้เพียงพอกับความต้องการของการใช้เครื่องยนต์ได้ จึงจำเป็นที่จะต้องใช้อากาศซึ่งมีส่วนผสมของออกซิเจนประมาณ 21% ไนโตรเจน 78% และสารอื่นๆ อีก 1% โดยโมล แทนในการทำปฏิกิริยาเคมีกับเชื้อเพลิง กล่าวคือทุกๆ ออกซิเจน 0.21 โมลในอากาศจะมีไนโตรเจนประมาณ 0.79 โมล ดังนั้นทุกๆ หนึ่งโมลของออกซิเจนในอากาศก็จะมีไนโตรเจนประมาณ $0.79/0.21$ หรือ 3.76 โมลนั่นเอง สมการที่ (2) แสดงถึงการทำปฏิกิริยาเคมีของไอโซออกเทนกับอากาศที่ส่วนผสมอากาศต่อเชื้อเพลิงแบบพอดี จะเห็นว่า มีพจน์ของไนโตรเจนเพิ่มเข้ามาในสมการเคมี 12.5 คูณด้วย 3.76 โมล สมการที่ (3) และ (4) แสดงปฏิกิริยาเคมีที่มีออกซิเจนไม่เพียงพอหรือส่วนผสมหนา (Rich) และออกซิเจนเกินเพียงพอ หรือส่วนผสมบาง (Lean) ตามลำดับ จะเห็นว่าผลิตภัณฑ์ในสมการที่ (3) มีพจน์ของ

คาร์บอนมอนอกไซด์ซึ่งเป็นสารที่เป็นพิษและเกิดขึ้นก่อนที่จะเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์และกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์



2.1.2 มลพิษจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด (CI Engine Emissions)

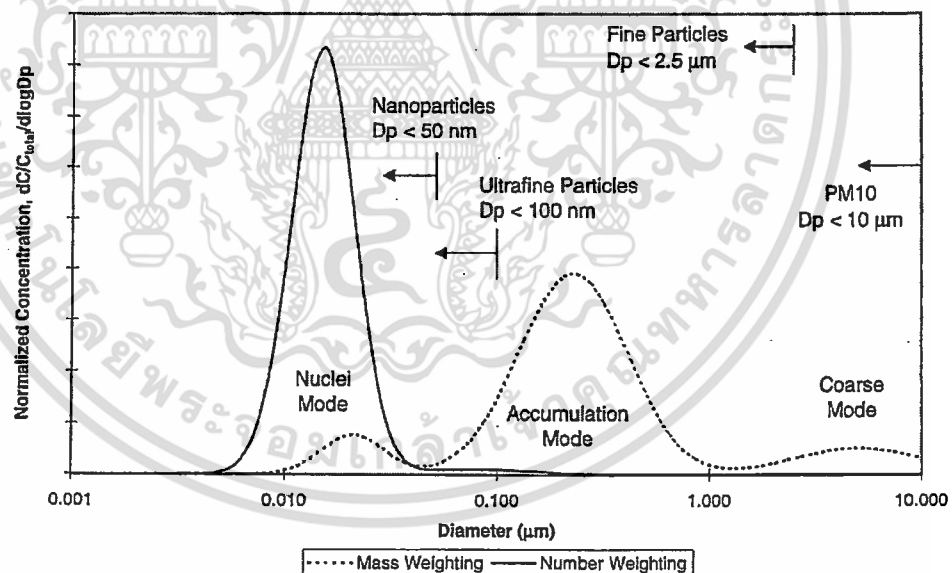
เครื่องยนต์ที่ใช้ในปัจจุบันไม่สามารถทำงานได้ตรงตามทฤษฎีทั้งหมด เพราะมีพารามิเตอร์อื่นๆ ที่เกี่ยวข้องมากมาย ทำให้การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงไม่สมบูรณ์ ดังแสดงในสมการที่ (5)



เครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดหรือเครื่องยนต์ดีเซลเป็นเครื่องยนต์ที่ให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดในเครื่องยนต์สันดาปภายในที่ใช้ในรถยนต์ปัจจุบัน เมื่อเปรียบเทียบกับภาวะโหลดเดียวกัน ดังนั้นการเพิ่มปริมาณการใช้เครื่องยนต์ดีเซลในรถยนต์นั่งให้มากขึ้นก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงเหลว (Liquid Fuel) ที่มีอยู่จำกัดและยังเป็นการช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของปัญหาโลกร้อนด้วย อย่างไรก็ตามเครื่องยนต์ดีเซลปล่อยมลพิษอนุภาคของแข็ง (Particulate Matter (PM)) และก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ในปริมาณที่สูงเมื่อเทียบกับเครื่องยนต์เบนซิน มลพิษสองชนิดดังกล่าวมีผลเสียอย่างมากต่อสุขภาพของมนุษย์ เช่น มะเร็งในปอด และสภาวะแวดล้อมเป็นพิษ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องกำจัดมลพิษสองชนิดนี้

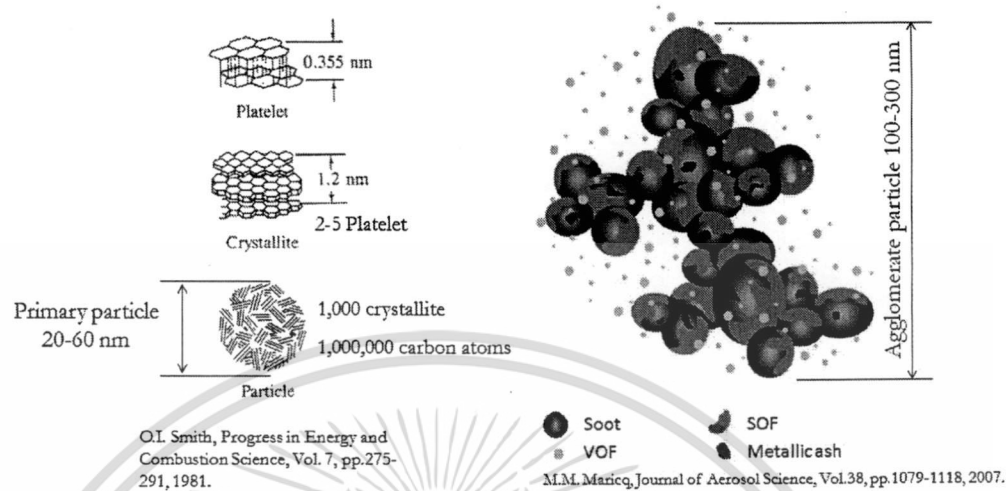
มลพิษอนุภาคจากเครื่องยนต์ดีเซลมีโครงสร้างทางกายภาพและเคมีที่ซับซ้อนมาก ประกอบด้วยสองส่วนคือ ส่วนแรกเป็นของแข็ง (Solid Organic Fraction; SOL) มีส่วนประกอบหลักคือ คาร์บอน(C) และขี้เถ้าของโลหะ (Metallic Ash) และส่วนที่สองเป็นของเหลว (Soluble Organic Fraction; SOF) มีส่วนประกอบหลักคือไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) จากเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ อนุภาคแต่ละอนุภาค (Primary Particle) มีขนาดประมาณ 20-60 นาโนเมตร

(Ultrafine Particle) และจะเกาะกันเป็นกลุ่มๆ (Accumulated Particle) ขนาดประมาณ 100-300 นาโนเมตร (Fine Particle) ด้วยแรงไฟฟ้าสถิตที่เกิดจากการปล่อยอิเล็กตรอน (Thermionic Emission) และจับอิเล็กตรอน (Electron Capture) ของโมเลกุลคาร์บอน ซึ่งเกิดขึ้นที่สภาวะอุณหภูมิสูงระหว่างเกิดการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ ดังแสดงในภาพที่ 2.2 ขนาดการเกาะกลุ่มกันของมลพิษอนุภาคสามารถแบ่งออกเป็นสามกลุ่มใหญ่ คือ กลุ่มแรกเป็นการเกาะกลุ่มใหญ่มากๆ สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ซึ่งขนาดจะอยู่ในช่วง 1-10 ไมครอน บางทีเรียกว่า PM10 และ PM2.5 โดยตัวเลขข้างหลังจะบอกขนาดในรัศมีไมครอนนั่นเอง เครื่องยนต์ในประเทศที่ยังไม่เข้มงวดมากก็ยังสามารถพบเห็น PM10 และ PM2.5 ตามท้องถนนทั่วไป การเกาะกลุ่มในขนาดที่ใหญ่มากดังกล่าวเกิดจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์มีประสิทธิภาพต่ำ ทำให้ทั้งคาร์บอนและไฮโดรคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ถูกปล่อยออกมาในปริมาณที่สูงมาก ส่วนประเทศที่มีความเข้มงวดทางกฎหมายมลพิษ ก็จะพบเพียงมลพิษอนุภาคที่มีขนาดเล็กในระดับต่ำกว่า 1 ไมครอน ซึ่งเราจะเรียกว่า Fine Particle, Ultrafine Particle และ Primary Particle ตามขนาดที่เล็กลงเรื่อยๆ ดังแสดงในภาพที่ 2.3 ซึ่งก็ยังคงมองว่าเป็นสาเหตุของมะเร็งในปอดเช่นกัน



ภาพที่ 2.2 การแบ่งประเภทของมลพิษอนุภาคจากการเผาไหม้ตามขนาดของอนุภาค

ที่มา: D.B. Kittelson, Engines and nanoparticles: a review, *Journal of Aerosol Science*, Vol.29, pp.575-588, 1998.

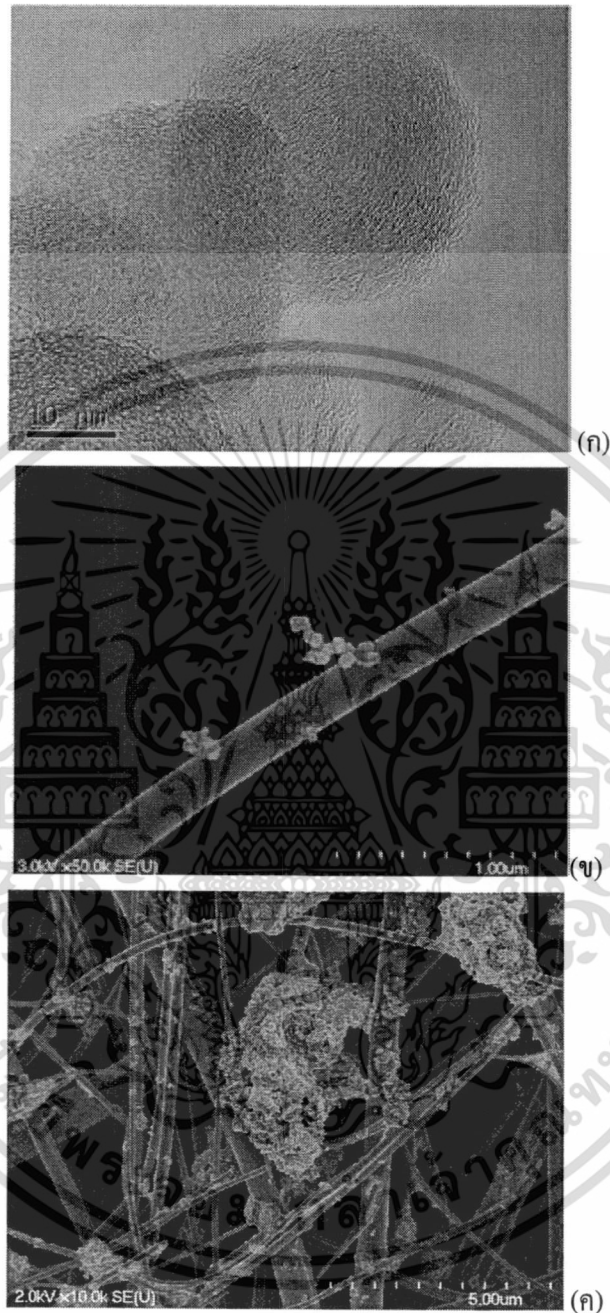


ภาพที่ 2.3 ภาพจำลองมลพิษอนุภาคจากเครื่องยนต์ดีเซลในระดับไมโครและนาโนสเกล
ที่มา: M.M.Maricq, Journal of Aerosol Science, Vol.38, pp.1079-1118, 2007 และ O.I.Smith,
Progress in Energy and Combustion Science, Vol.7, pp.275-291, 1981.

2.2 การทบทวนวรรณกรรม

2.2.1 คุณลักษณะของมลพิษอนุภาค (Particle Emissions Characteristic)

ปัจจุบันการนำกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope; TEM) มาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพของมลพิษอนุภาคทำให้สามารถเข้าใจและสามารถออกแบบระบบกำจัดมลพิษอนุภาคได้ดียิ่งขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.4 (ก) ภาพถ่ายมลพิษอนุภาคเดี่ยวด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ภาพที่ 2.4 (ข) ภาพถ่ายกลุ่มมลพิษอนุภาคขนาดเล็กกว่าหนึ่งไมครอน ด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และ ภาพที่ 2.4 (ค) ภาพถ่าย PM_{2.5}/PM₁₀ ด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เราสามารถมองเห็นโครงสร้างทางกายภาพของมลพิษอนุภาคเดี่ยว การเกาะกลุ่มของมลพิษอนุภาคในระดับนาโนเมตรและไมครอนอย่างชัดเจน แต่อย่างไรก็ตาม คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีเบื้องต้นสามารถเปลี่ยนแปลงได้ในช่วงที่กว้างมากขึ้นอยู่กับภาระการทำงานของเครื่องยนต์และคุณสมบัติหรือส่วนประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิงชนิดนั้นๆ ซึ่งมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องได้รับการวิจัยในเชิงลึกเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวต่อไป



รูปที่ 2.4 ภาพถ่ายของมลพิษอนุภาคโดยใช้กล้องอิเล็กตรอน

ที่มา: H. Oki, P. Karin and K. Hanamura, “Visualization of Oxidation of Soot Nanoparticles Trapped on a Diesel Particulate Membrane Filter”, SAE International Journal of Engines, SAE International, Vol. 4 no. 1 pp.515-526, 2011.

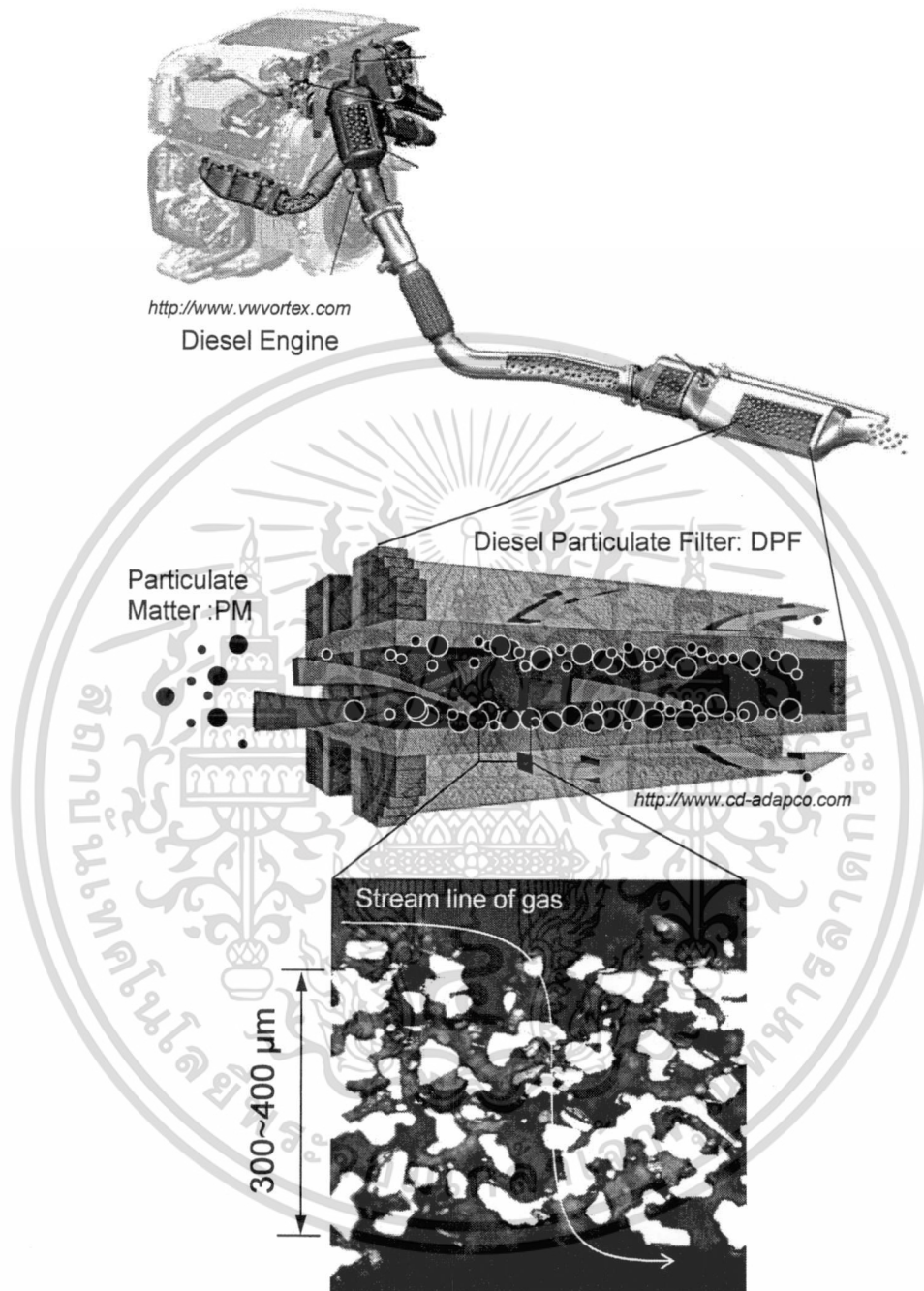
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 อุปกรณ์กรองมลพิษอนุภาคดีเซล (Diesel Particulate Filter; DPF)

Diesel Particulate Filters (DPFs) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่กำจัดมลพิษอนุภาค ซึ่งได้รับการออกแบบพัฒนาจนสามารถนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในบริษัทผู้ผลิตรถยนต์ ในปัจจุบันเทคโนโลยีนี้ถูกนำมาใช้กับประเทศที่มีกฎหมายมลพิษเข้มงวดมากๆ เช่น สหภาพยุโรป ญี่ปุ่น และอเมริกา คาดว่าอุปกรณ์ดังกล่าวจะถูกนำมาใช้ในประเทศไทยในอนาคตอันใกล้นี้ โดยทั่วไป DPF จะมีโครงสร้างเป็นวัสดุพรุน (Porous Media) ที่ผลิตจากเซรามิก เช่น ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) และคอร์ดีไรท์ (Cordierite) DPF จะถูกติดตั้งไว้เป็นส่วนหนึ่งของท่อไอเสีย ของไหล (Fluid) ที่มีสถานะเป็นก๊าซในไอเสียของเครื่องยนต์จะไหลผ่านวัสดุพรุนนี้ได้ ในขณะที่เดียวกันมลพิษอนุภาคจะถูกดักไว้ด้วยวัสดุพรุน ซึ่งขบวนการนี้เรียกว่า ขบวนการดัก (Trapping Process) และหลังจากมลพิษอนุภาคถูกดักจนสะสมกันมากพอที่ความดันในท่อไอเสียสูงขึ้นจะมีผลกระทบกับเครื่องยนต์ มลพิษอนุภาคเหล่านั้นก็จะเป็นที่จะต้องถูกกำจัด โดยการเพิ่มอุณหภูมิไอเสียให้สูงขึ้นถึงจุดที่มลพิษอนุภาคสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ดี คือประมาณ 600 องศาเซลเซียส และกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการ (6) ซึ่งเรียกว่า ขบวนการรีเจนเนอเรชันของอุปกรณ์กรองมลพิษอนุภาค (DPF Regeneration Process) ดังแสดงในภาพที่ 2.5



อย่างไรก็ตามขบวนการดักและเผาผลิษอนุภาคจากเครื่องยนต์ดังกล่าวมีพฤติกรรมที่ซับซ้อนมากทำให้นักวิจัยทั่วโลกพยายามศึกษาทั้งด้วยวิธีการถ่ายภาพในระดับไมโครและไมโครสเกลของพฤติกรรมดักและเผาผลิษอนุภาค การวิเคราะห์พฤติกรรมดังกล่าวด้วยคอมพิวเตอร์ทางกลศาสตร์ของไหลและการทำปฏิกิริยาเคมี การพัฒนาทางด้านวัสดุศาสตร์กลุ่มเซรามิกส์ โลหะ และสารเร่งปฏิกิริยาเคมีของมลพิษอนุภาคกับออกซิเจน รวมถึงการทดสอบสมรรถนะและประสิทธิภาพของอุปกรณ์กรองมลพิษอนุภาคดังกล่าวกับเครื่องยนต์และรถยนต์จริง เพื่อพัฒนาอุปกรณ์กรองมลพิษอนุภาคที่มีประสิทธิภาพในการดักและการเผาผลิษอนุภาคสูงขึ้นกว่าเทคโนโลยีปัจจุบัน นอกเหนือจากนั้นการพัฒนาอุปกรณ์ดังกล่าวสำหรับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ (SI Engine) ก็มีความจำเป็นเช่นกันเพราะแม้ว่ามลพิษอนุภาคปริมาณจากเครื่องยนต์ดังกล่าวจะมีปริมาณไม่มากเมื่อเทียบกับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดแต่ก็เป็นอันตรายต่อสุขภาพเช่นเดียวกัน



ภาพที่ 2.5 อุปกรณ์กรองมลพิษอนุภาคดีเซล (Diesel Particulate Filter; DPF)
ที่มา: P. Karin, "Lecture Material of M.Eng.(Automotive Engineering), KMITL.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 มลพิษจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวภาพ (Biofuel Combustion Emissions)

การใช้ชีวภาพจากพืช เช่น ไบโอดีเซล (RCOOCH_3) หรือ เอทานอล ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) ก็เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่สามารถลดปริมาณมลพิษจากการเผาไหม้ได้ ออกซิเจนอะตอมในโมเลกุลของไบโอดีเซลและเอทานอลจะช่วยในการเผาไหม้ให้มีประสิทธิภาพสูงกว่าเชื้อเพลิงจากฟอสซิลซึ่งไม่มีอะตอมของออกซิเจนในโมเลกุลเชื้อเพลิง ออกซิเจนอะตอมในเชื้อเพลิงเอทานอลดังกล่าวมีผลทำให้ค่าอัตราส่วนผสมอากาศต่อเชื้อเพลิงที่พอดีตามทฤษฎีอยู่ที่ประมาณ 9:1 ซึ่งต่ำกว่าแก๊สโซลีนที่มีค่าประมาณ 14.7:1 นอกเหนือจากส่วนผสมเชื้อเพลิงต่ออากาศที่เหมาะสมแล้ว ส่วนประกอบของธาตุต่างๆ ในโมเลกุล ค่าความร้อน มวลโมเลกุลของเชื้อเพลิง ล้วนมีผลกระทบต่ออัตราส่วนผสมเชื้อเพลิงอากาศที่เหมาะสม ซึ่งคุณสมบัติทางวิศวกรรมดังกล่าวมีผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องยนต์ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด กล่าวโดยสรุป การเติมส่วนผสมเอทานอลในน้ำมันเบนซิน มีผลทำให้ต้องการปริมาณน้ำมันแก๊สโซลีนที่มากขึ้น โดยมวลเมื่อเทียบกับแก๊สโซลีนเมื่อพิจารณาที่พลังงานเท่ากัน ในขณะที่เดียวกันปริมาณของอากาศที่ใช้ทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงก็มีค่าต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักของเชื้อเพลิงเท่ากัน ดังนั้นในกรณีที่เคยเติมเชื้อเพลิงเอทานอลในสัดส่วนที่มากเกินไปควรมีการปรับแต่งเครื่องยนต์ให้มีส่วนผสมใกล้เคียงกับทฤษฎีตามตารางข้างต้น เพราะเครื่องยนต์ที่ผลิตจากโรงงานโดยทั่วไปจะสามารถออกแบบให้ทำงานได้ดีที่สุดที่ส่วนผสมอากาศต่อเชื้อเพลิงเพียงค่าเดียวหรือช่วงแคบๆ เท่านั้น

ในทำนองเดียวกันการนำเชื้อเพลิงไบโอดีเซล จากปาล์ม น้ำมัน หรือสาหร่ายก็ล้วนมีผลกระทบต่อทางบวกในการลดปริมาณมลพิษและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นต้นเหตุของภาวะเรือนกระจกและปัญหาโลกร้อนได้ อย่างไรก็ตาม เครื่องยนต์ควรมีการออกแบบให้เหมาะสมกับคุณสมบัติของเชื้อเพลิงหรือส่วนผสมของเชื้อเพลิงชนิดนั้นๆ ด้วย เพื่อเป็นการใช้พลังงานที่มีอยู่อย่างจำกัดให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดได้ตามเป้าหมายที่วางไว้

บทที่ 3
วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 คุณลักษณะทางกายภาพ (Physical) และ เคมี (Chemical) ของมลพิษอนุภาค (PM)

3.1.1 คุณสมบัติของเชื้อเพลิง

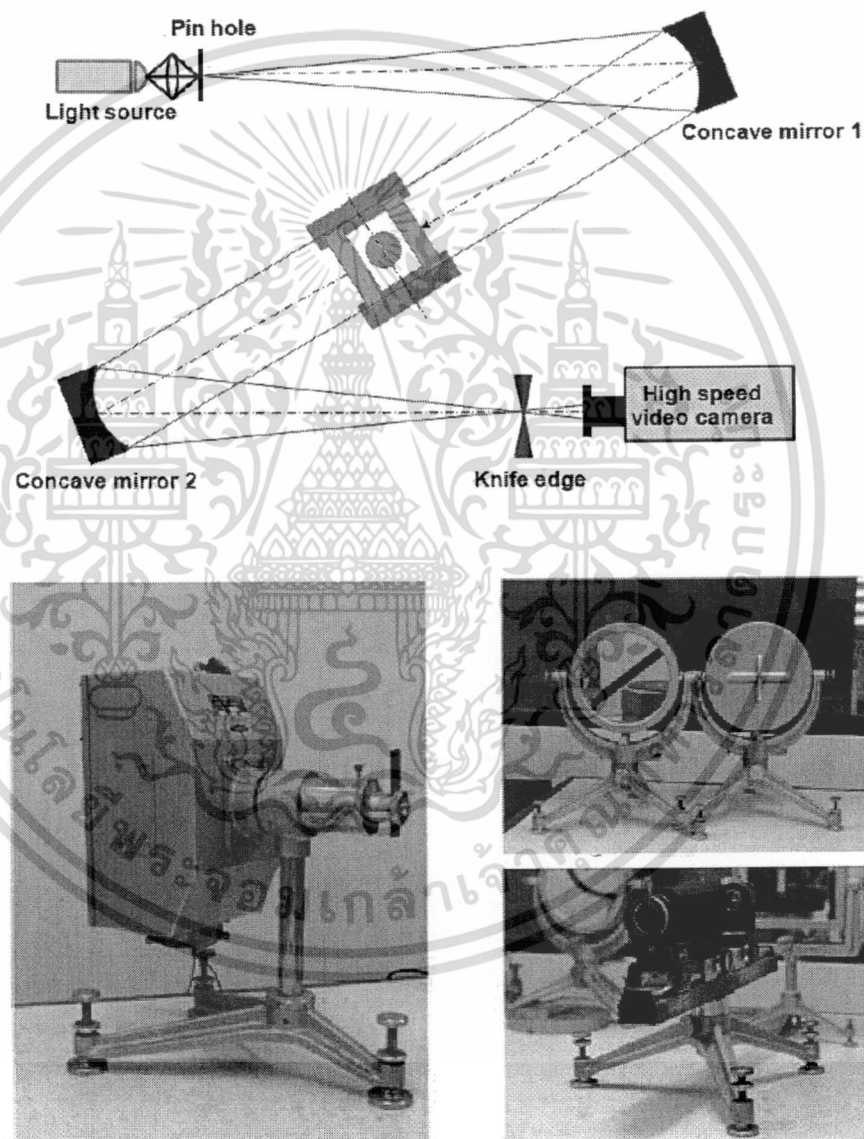
เชื้อเพลิงดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันดิบ และ ไบโอดีเซล (B100) ที่ผลิตและจำหน่ายตามมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก. 2313-2549) ซึ่งผลิตมาจากน้ำมันปาล์ม โอลีน ถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงในการวิจัยนี้ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงไบโอดีเซล

	Test Parameter	Result
1	Methyl Ester, %wt	97.9
2	Density at 30°C, kg/m ³	864.1
3	Viscosity at 40°C, cSt	4.5
4	Flash Point, °C	184.5
5	Sulphur Content, %wt	< 0.0001
6	Carbon, on 10% distillation residue, %wt	< 0.1
7	Cetane Number	68.2
8	Sulphated Ash, %wt	< 0.001
9	Water, %wt	0.028
10	Total Contaminate, %wt	0.0003
11	Copper Strip Corrosion, %wt	1a
12	Oxidation Stability at 110 °C, hr	26.3
13	Acid Value, mgKOH/g	0.1
14	Iodine Value, gI ₂ /100g	51.5
15	Linolenic Acid Methyl Ester, %wt	0.18
16	Methanol, %wt	0.03
17	Monoglyceride, %wt	0.31
18	Phosphorus, %wt	<0.00001
19	Cloud point, °C	14.0

3.1.2 ปริมาณมลพิษอนุภาคจากเปลวไฟแบบแพร่

ปริมาณมลพิษอนุภาคจากเปลวไฟแบบแพร่ของเชื้อเพลิงแต่ละชนิดสามารถศึกษาได้จากภาพถ่ายที่ได้จากเทคนิคการถ่ายภาพด้วยซูรีเรน (Schlieren) ดังแสดงใน ภาพที่ 3.1 โดยความเข้มของเปลวไฟสามารถบ่งบอกถึงความแตกต่างของปริมาณมลพิษอนุภาคได้



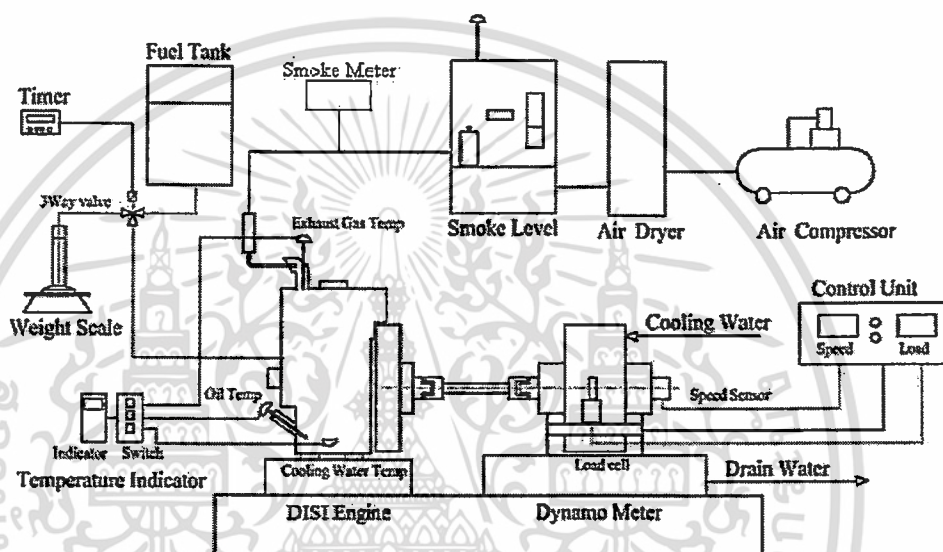
ภาพที่ 3.1 อุปกรณ์สำหรับ เทคนิคการถ่ายภาพด้วยซูรีเรน (Schlieren)

ที่มา: P. Ornman, Master Thesis of Automotive Engineering, KMITL, 2555.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 ปริมาณมลพิษอนุภาคจากเครื่องยนต์สันดาปภายใน

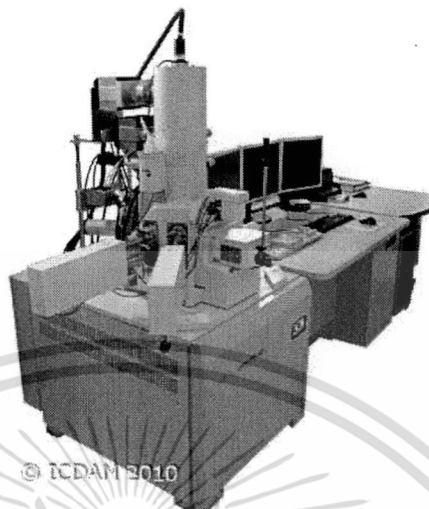
ปริมาณมลพิษอนุภาคจากเครื่องยนต์สันดาปภายในที่ใช้เพลิงแต่ละชนิดสามารถศึกษาได้จากการวัดปริมาณมลพิษอนุภาคด้วยการวัดความเข้มของกระตาศกรองที่มีค่าสูงขึ้นเมื่อมีปริมาณมลพิษอนุภาคซึ่งมีสีดำมากขึ้น อุปกรณ์ดังกล่าวเรียกว่าอุปกรณ์วัดควันดำ (Smoke Meter) ดังแสดงใน ภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 โค้ดแกรมแสดงชุดทดสอบปริมาณมลพิษอนุภาคจากเครื่องยนต์
ที่มา: A. Butmarasri, Investigation of DISI Engine Particle Emission, RCNRE2012, 2555.

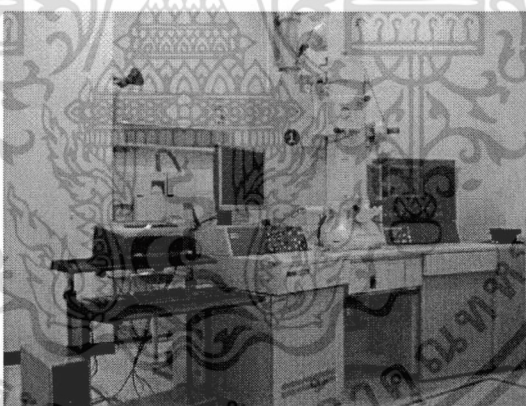
3.1.4 ขนาดของมลพิษอนุภาคจากการเผาไหม้

การวัดขนาดของมลพิษอนุภาคในระดับไมโครและนาโนสเกลสามารถทำได้ด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron Microscopy) โดยการวัดขนาดอนุภาคกลุ่มของมลพิษอนุภาคสามารถทำได้ด้วยการใช้ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (Scanning electron microscope: SEM) ดังแสดงในภาพที่ 3.3 ในทำนองเดียวกันการวัดขนาดของอนุภาคเดี่ยวของมลพิษอนุภาค สามารถทำได้ด้วยการใช้ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (Scanning electron microscope: SEM) ดังแสดงในภาพที่ 3.4 การวัดขนาดของมลพิษอนุภาคสามารถทำได้ด้วยการวัดจากภาพถ่ายโดยตรงหรืออาจจะใช้การวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วยคอมพิวเตอร์ (Image Processing Technique) ซึ่งมีความละเอียดแม่นยำมากกว่า



ภาพที่ 3.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (Scanning electron microscope: SEM)

ที่มา: <http://www.icdam.cz/en/laboratories/electron-microscopy>



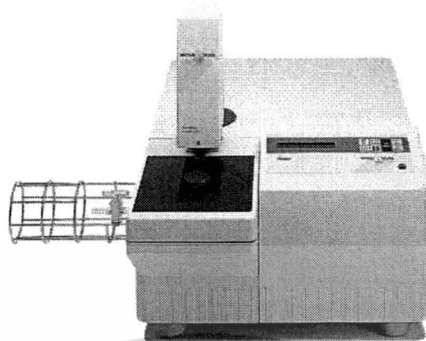
ภาพที่ 3.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทรานสมิชัน (Transmission electron microscope: TEM)

ที่มา: <http://www.mtec.or.th/laboratory/tem/>

3.1.5 จลนพลศาสตร์เคมีของการเผาไหม้มลพิษอนุภาค

การวัดอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างมลพิษอนุภาคกับออกซิเจนสามารถทำได้โดยใช้เครื่องทดสอบการลดลงของน้ำหนักระหว่างการทำปฏิกิริยาเคมีขณะเพิ่มอุณหภูมิ (Thermogravimetric analysis: TGA) ดังแสดงในภาพที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



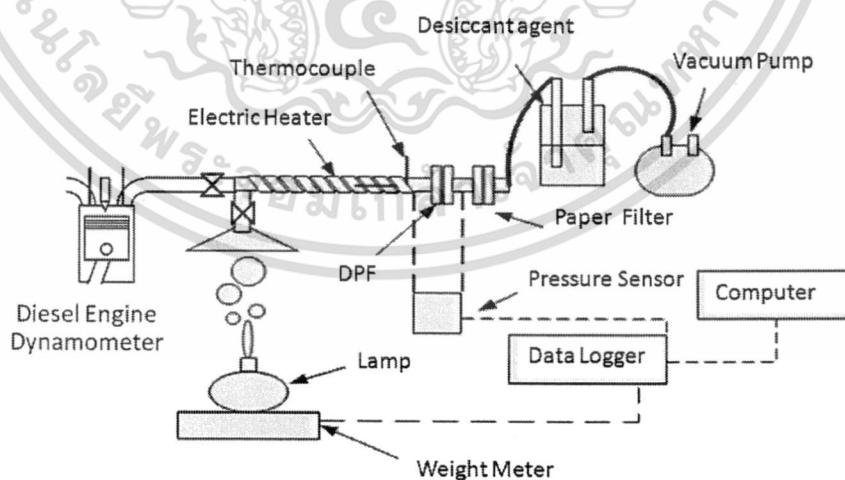
ภาพที่ 3.5 อุปกรณ์ทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี (Thermo-gravimetric analysis: TGA)

ที่มา: http://us.mt.com/us/en/home/phased_out_products/

3.2 การกำจัดมลพิษอนุภาคด้วยอุปกรณ์กรองมลพิษอนุภาค (Particulate Filter)

3.2.1 ศึกษาพฤติกรรมของการกำจัดมลพิษอนุภาคด้วย

การศึกษาดังกล่าวสามารถทำได้ด้วยการสร้างชุดทดสอบการดักและเผาผลาญมลพิษอนุภาคด้วยอุปกรณ์กรองมลพิษอนุภาคดีเซล (Diesel Particulate Filter: DPF) โดยการสร้างชุดอุปกรณ์การทดสอบที่สามารถวัดค่าผลกระทบของความดันตกต่าง (Pressure drop) และ ประสิทธิภาพการกรอง (Filtration efficiency) ในขบวนการดักและสลายมลพิษอนุภาคได้ ดังแสดงใน ภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 ชุดทดสอบพฤติกรรมดักและเผาผลาญมลพิษอนุภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

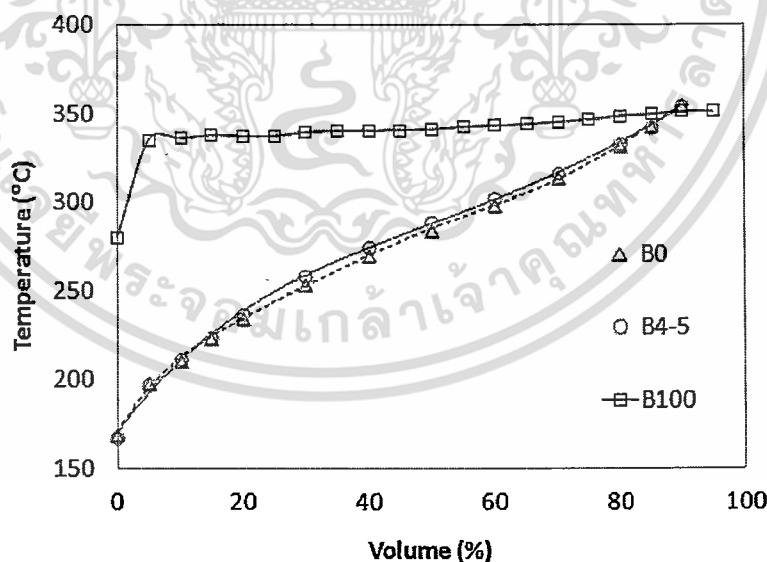
บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 คุณลักษณะทางกายภาพ (Physical) และ เคมี (Chemical) ของมลพิษอนุภาค (PM)

4.1.1 คุณสมบัติของเชื้อเพลิง

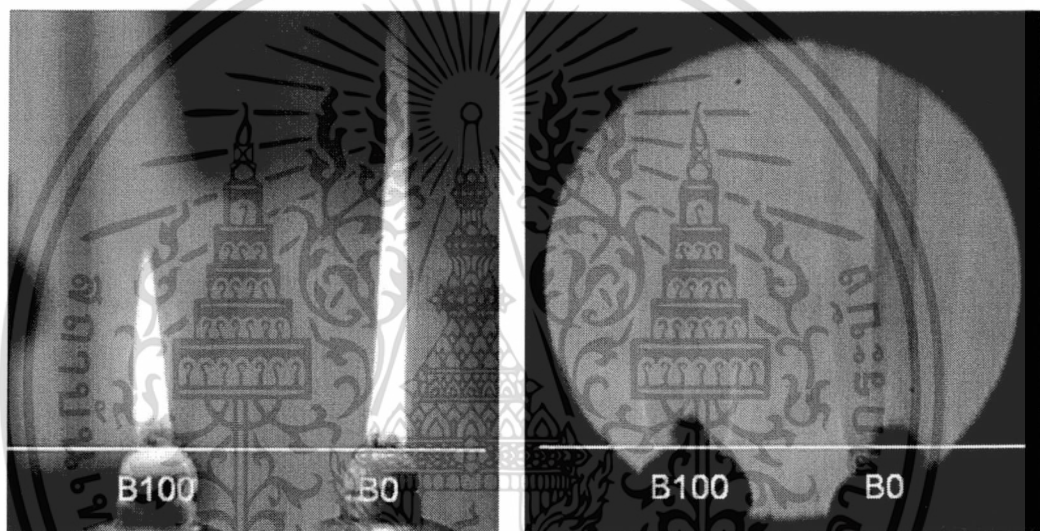
เชื้อเพลิงดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันดิบมีส่วนประกอบของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนหลายชนิด เมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงไบโอดีเซลที่มีความบริสุทธิ์มาก ภาพที่ 4.1 แสดงการทดสอบสัดส่วนโดยปริมาตรขณะเกิดการระเหยตัวของเชื้อเพลิงดีเซล ไบโอดีเซล และ เชื้อเพลิงผสม จากกราฟแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงความเป็นโมเลกุลชนิดเดียวกันของเชื้อเพลิงไบโอดีเซลที่สามารถระเหยได้เกือบทั้งหมด ณ อุณหภูมิประมาณ 330 - 350 °C ในทางตรงกันเชื้อเพลิงดีเซลจากฟอสซิลมีความสามารถในการระเหยที่อุณหภูมิต่ำ ปานกลาง และ สูง ในสัดส่วนค่าหนึ่ง ซึ่งหมายถึงขนาดที่แตกต่างกันของโมเลกุลนั่นเอง จะเห็นว่าเชื้อเพลิงชีวภาพมีโมเลกุลชนิดเดียวกัน สามารถระเหยตัวได้พร้อมกัน ที่อุณหภูมิต่ำใดค่าหนึ่งนั้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพเชิงปริมาตรของเครื่องยนต์ได้ ในทางตรงกันข้ามเชื้อเพลิงจากฟอสซิลซึ่งมีความแตกต่างของชนิดโมเลกุลนั้นสามารถทำให้เกิดการติดไฟและเผาไหม้ได้ง่ายในช่วงแรกของการทำปฏิกิริยาเคมี



ภาพที่ 4.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของเชื้อเพลิงไบโอดีเซลกับดีเซล (Distillation curves)

4.1.2 ปริมาณมลพิษอนุภาคจากเปลวไฟแบบแพร่

ปริมาณมลพิษอนุภาคจากเปลวไฟแบบแพร่ของเชื้อเพลิงแต่ละชนิดสามารถศึกษาได้จากภาพถ่ายที่ได้จากเทคนิคการถ่ายภาพด้วยชวรีเรน (Schlieren) ดังแสดงใน ภาพที่ 4.2 จะเห็นได้ชัดเจนว่าเปลวไฟแบบแพร่ของเชื้อเพลิงดีเซลยาวกว่าไบโอดีเซลแสดงว่ามลพิษอนุภาคในเปลวเชื้อเพลิงดีเซลมีมากกว่าไบโอดีเซล ในทำนองเดียวกันความหนาแน่นของเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์หรือมลพิษอนุภาคซึ่งอยู่บริเวณศูนย์กลางของเปลวไฟของดีเซลมีค่ามากกว่าไบโอดีเซลซึ่งสามารถดูได้จากสัดส่วนของบริเวณที่มีสีเข้มของภาพเปลวไฟจากการถ่ายภาพแบบชวรีเรน



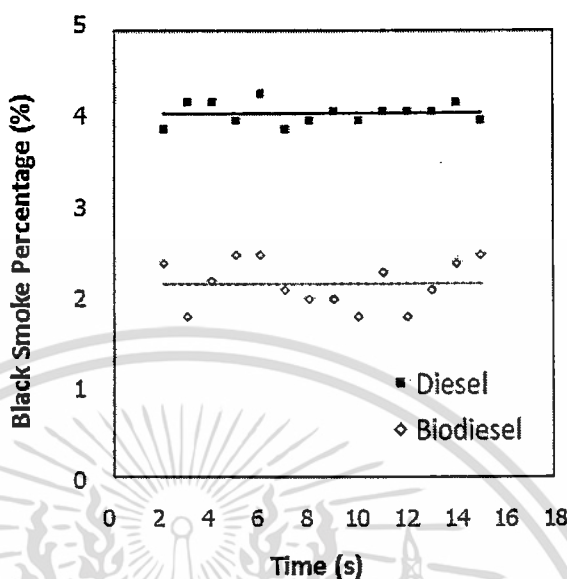
(a) Digital Camera

(b) Schlieren Method

ภาพที่ 4.2 การเปรียบเทียบปริมาณมลพิษอนุภาคจากภาพถ่ายเปลวไฟแบบแพร่

4.1.3 ปริมาณมลพิษอนุภาคจากเครื่องยนต์สันดาปภายใน

ปริมาณมลพิษอนุภาคจากเครื่องยนต์สันดาปภายในจุดระเบิดด้วยการอัดที่ใช้เชื้อเพลิงดีเซลและไบโอดีเซลสามารถศึกษาได้จากการวัดปริมาณมลพิษอนุภาคด้วยอุปกรณ์วัดควันดำ (Smoke Meter) จากผลการทดสอบด้วยเครื่องวัดจริงพบว่ามลพิษอนุภาคจากเชื้อเพลิงไบโอดีเซลมีค่าต่ำกว่าดีเซลประมาณร้อยละ 50 ดังแสดงใน ภาพที่ 4.3



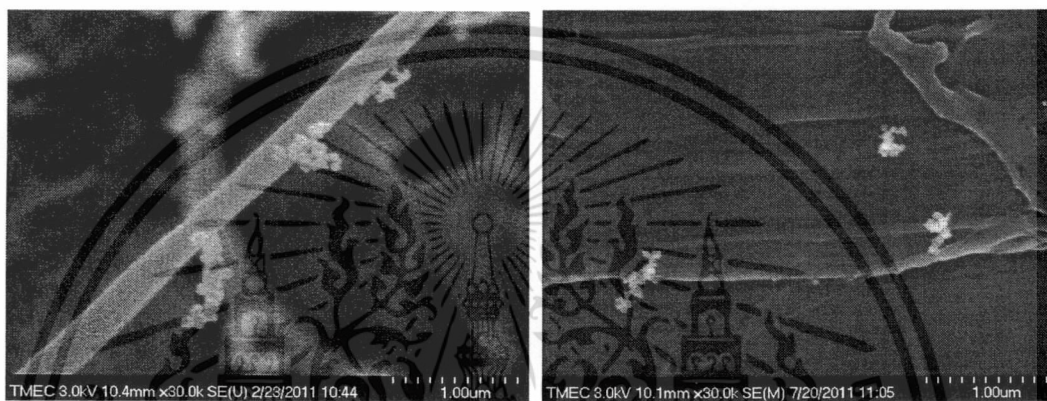
ภาพที่ 4.3 การเปรียบเทียบปริมาณมลพิษอนุภาคจากเครื่องยนต์ด้วย Smoke meter

4.1.4 ขนาดของมลพิษอนุภาคจากการเผาไหม้

การวัดขนาดของมลพิษอนุภาคในระดับไมโครและนาโนสเกลสามารถทำได้ด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron Microscopy) โดยการวัดขนาดอนุภาคกลุ่มของมลพิษอนุภาคสามารถทำได้ด้วยการใช้ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนิง (Scanning electron microscope: SEM) ดังแสดงในภาพที่ 4.4 จากการทดสอบพบว่ามลพิษอนุภาคกลุ่มจากตะเกียงและเครื่องยนต์เชื้อเพลิงไบโอดีเซลมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 220 และ 130 นาโนเมตร ตามลำดับ ในขณะที่มลพิษอนุภาคกลุ่มจากตะเกียงและเครื่องยนต์เชื้อเพลิงดีเซลมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 250 และ 280 นาโนเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.5 จะเห็นว่ามลพิษอนุภาคกลุ่มจากเชื้อเพลิงไบโอดีเซลมีขนาดเล็กกว่าดีเซลเล็กน้อยซึ่งอาจเกิดจากความหนาแน่นของอนุภาคหรือขนาดมลพิษอนุภาคเดี่ยวที่แตกต่างกันทำให้ขนาดของอนุภาคกลุ่มแตกต่าง

ในการทำนองเดียวกันการวัดขนาดของอนุภาคเดี่ยวของมลพิษอนุภาค สามารถทำได้ด้วยการใช้ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทรานสมิชชัน (Transmission electron microscope: TEM) ดังแสดงในภาพที่ 4.6 การวัดขนาดของมลพิษอนุภาคสามารถทำได้ด้วยการวัดจากภาพถ่ายโดยตรง ในการวิจัยครั้งนี้พบว่าขนาดมลพิษอนุภาคเดี่ยวของเชื้อเพลิงไบโอดีเซลมีขนาดเล็กกว่าดีเซลตั้งสมมติฐานที่ตั้งไว้จริง มลพิษอนุภาคเดี่ยวจากตะเกียงและเครื่องยนต์เชื้อเพลิงไบโอดีเซลมี

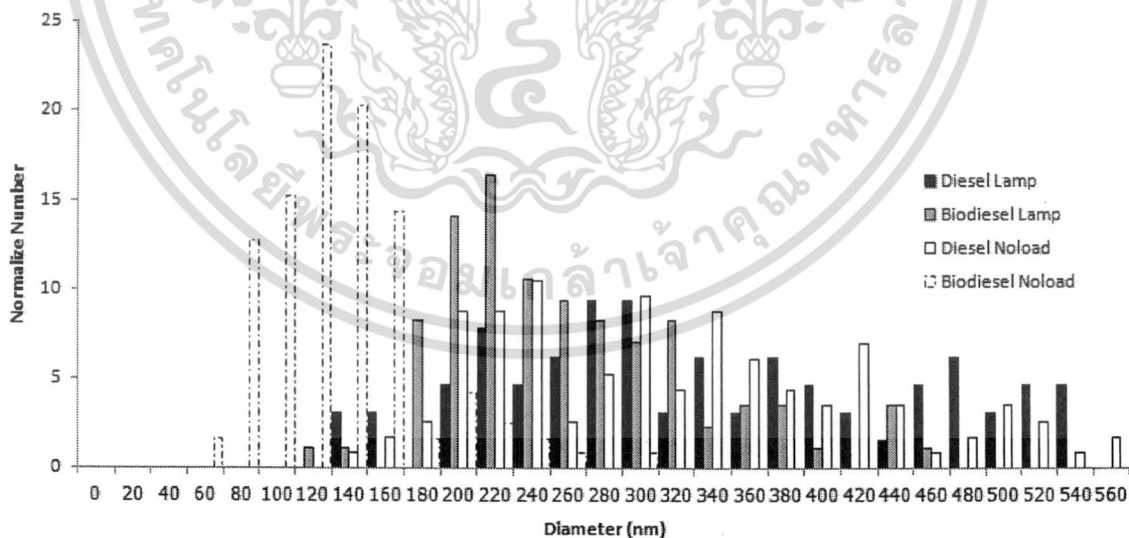
ขนาดเฉลี่ยประมาณ 30 - 40 นาโนเมตร ในขณะที่มลพิษอนุภาคเดี่ยวจากตะเกียงและเครื่องยนต์เชื้อเพลิงดีเซลมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 40 - 50 นาโนเมตร ดังแสดงในภาพที่ 4.7 ขนาดที่แตกต่างกันดังกล่าวน่าจะเกิดจากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่าของเชื้อเพลิงไบโอดีเซลมีผลทำให้ปริมาณคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ต่ำกว่าเชื้อเพลิงดีเซล ท้ายที่สุดก็ส่งผลกระทบต่อขนาดมลพิษอนุภาคกลุ่ม



(a) Diesel PMs (Lamp)

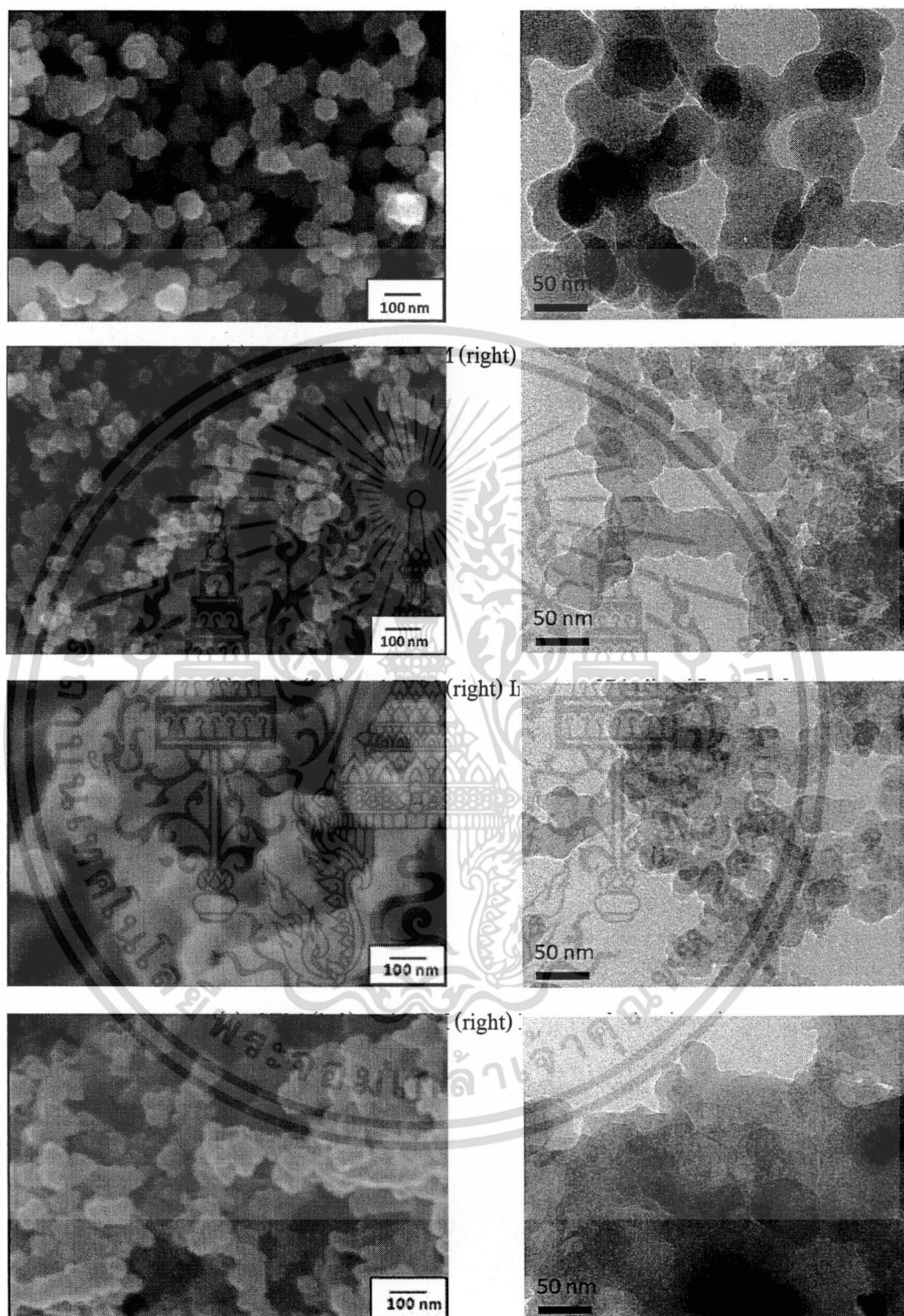
(b) Biodiesel PMs (Lamp)

ภาพที่ 4.4 ภาพถ่ายมลพิษอนุภาคกลุ่มด้วย SEM



ภาพที่ 4.5 เปรียบเทียบขนาดมลพิษอนุภาคกลุ่มจากภาพถ่ายด้วย SEM

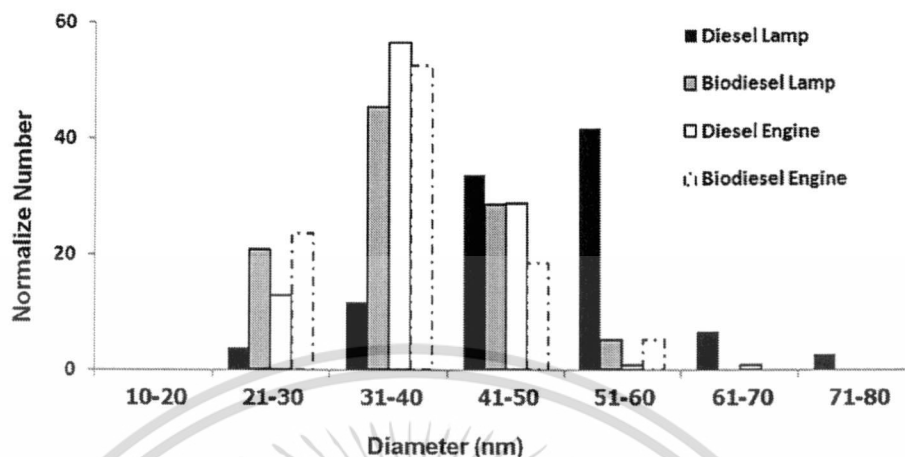
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



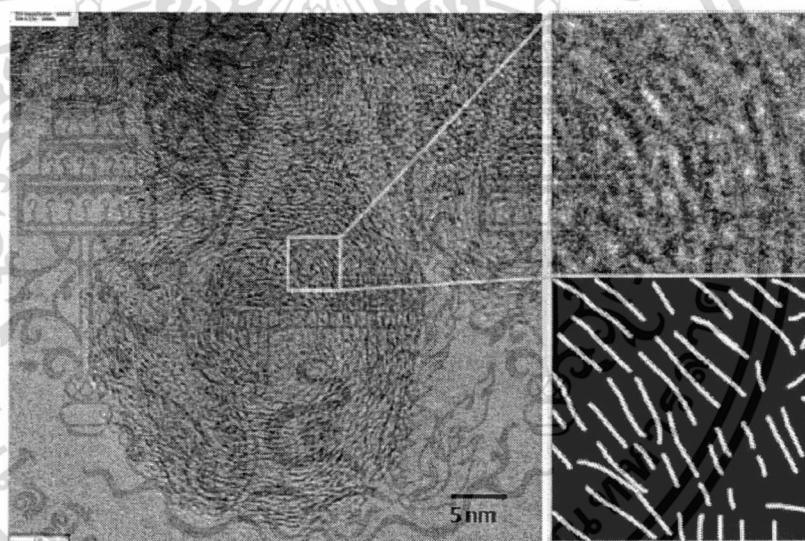
(d) SEM (left) and TEM (right) Images of Biodiesel Engine PMs

ภาพที่ 4.6 ภาพถ่ายมลพิษอนุภาคเดี่ยวด้วย SEM และ TEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

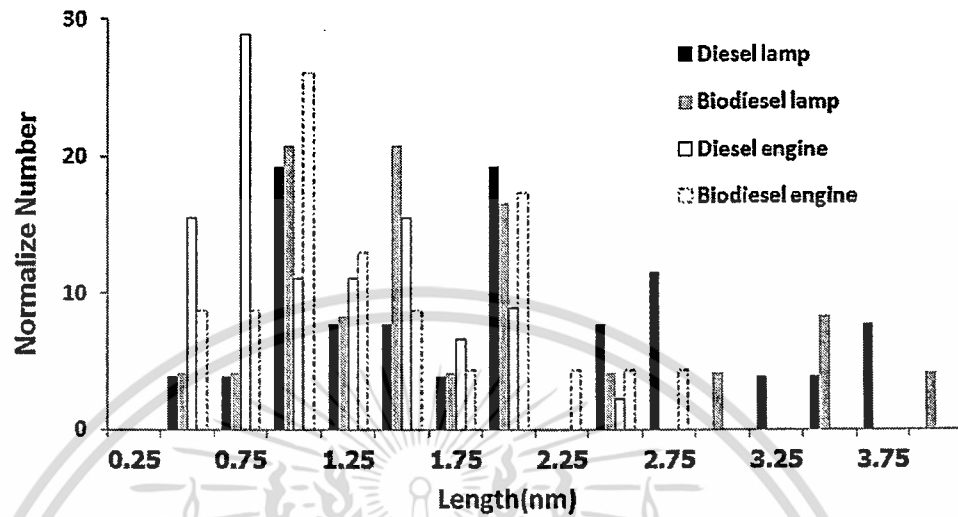


ภาพที่ 4.7 เปรียบเทียบขนาดมลพิษอนุภาคกลุ่มจากภาพถ่ายด้วย TEM



ภาพที่ 4.8 การประมาณความยาวเกล็ด (Platelet) คาร์บอนในมลพิษอนุภาคเดี่ยว

ภาพที่ 4.8 แสดงการวัดขนาดของเกล็ด (Platelet) คาร์บอนในมลพิษอนุภาคเดี่ยวจากภาพถ่าย TEM จากการวิเคราะห์พบว่าความยาวเกล็ดคาร์บอนของมลพิษอนุภาคเดี่ยวของเชื้อเพลิงทั้งสองชนิดมาค่าแตกต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.9 นอกเหนือจากนั้นเมื่อเปรียบเทียบมลพิษอนุภาคจากเครื่องยนต์กับตะเกียงยังพบว่ามีความยาวเกล็ดคาร์บอนที่แตกต่างกันอีกด้วย ซึ่งสามารถประมาณความหนาแน่นของคาร์บอนอะตอมได้ดังตารางที่ 4.1 ซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการศึกษาวิจัยในเชิงลึกต่อไป



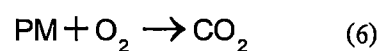
ภาพที่ 4.9 เปรียบเทียบขนาดของเกล็ด (Platelet) คาร์บอนในมลพิษอนุภาค

ตารางที่ 4.1 ความหนาแน่นของอะตอมคาร์บอนในมลพิษอนุภาค

Particulate Matter Type	Density (atom/nm ³)
Biodiesel Lamp's PMs	129
Diesel Lamp's PMs	205
Biodiesel Engine's PMs	63
Diesel Engine's PMs	72

4.1.5 จลนพลศาสตร์เคมีของการเผาไหม้มลพิษอนุภาค

การวัดอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างมลพิษอนุภาคกับออกซิเจนสามารถทำได้โดยใช้เครื่องทดสอบการลดลงของน้ำหนักระหว่างการทำปฏิกิริยาเคมีขณะเพิ่มอุณหภูมิ (Thermogravimetric analysis: TGA) งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาด้วยวิธีการทดลองแบบอุณหภูมิไม่คงที่ (Non-isothermal Method) ภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในอัตรา 10 °C ต่อนาที จากอุณหภูมิ 25 °C ถึง 800 °C โดยใช้ออกซิเจน 100%



อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีใน สมการที่ 6 สามารถคำนวณตาม สมการที่ 7

$$-\frac{d[PM]}{dt} = k[PM]^n [O_2]^m \quad (7)$$

เมื่อ [PM] คือมวลของมลพิษอนุภาค t คือเวลา k คือค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาเคมี n และ m คือลำดับการเกิดปฏิกิริยาเคมี (Reaction Order) ของคาร์บอนและออกซิเจนตามลำดับ ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาเคมีถูกอธิบายโดย สมการที่ 8

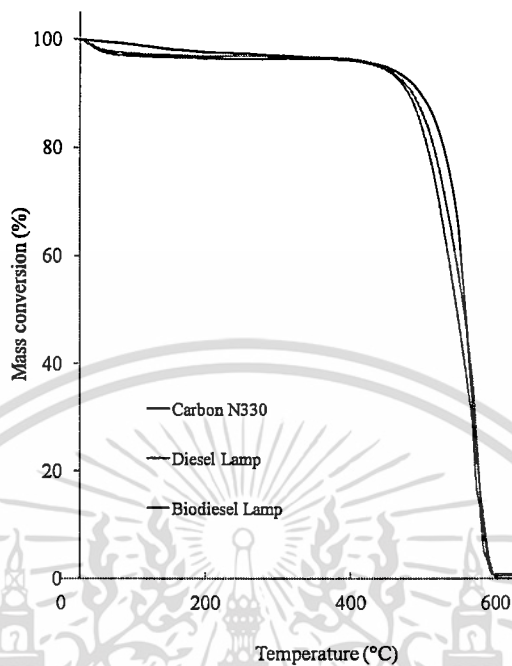
$$k = Ae^{-E_a/RT} \quad (8)$$

เมื่อ A ค่าคงที่พรีเอกโพเนนเชียล E_a คือพลังงานกระตุ้น และ R คือค่าคงที่ของก๊าซ โดยค่าพลังงานกระตุ้น สามารถคำนวณใน สมการที่ 9

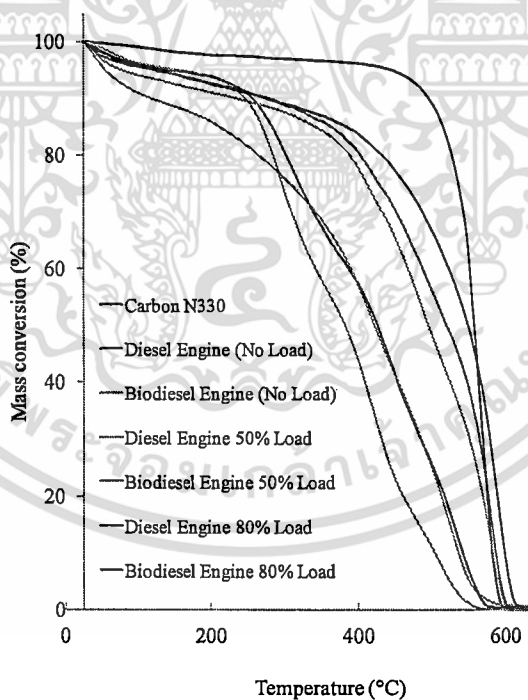
$$\ln \left[\frac{-1}{[PM]^n} \frac{d[PM]}{dt} \right] = -\frac{E_a}{RT} + (\ln A + m \ln [O_2]) \quad (9)$$

ค่า E_a สามารถคำนวณจากการเขียนกราฟ Arrhenius Plot ในสมการที่ 4 สำหรับงานวิจัยนี้สมมติให้ n เท่ากับ 1 เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ

ภาพที่ 4.10 (a) และ (b) แสดงผลการทดสอบการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างมลพิษอนุภาคกับออกซิเจนด้วย TGA จะเห็นว่ามลพิษอนุภาคจากตะเกียงมีพฤติกรรมการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนใกล้เคียงกับคาร์บอนแบล็กมาก ในขณะที่เดียวกันมลพิษอนุภาคจากเครื่องยนต์มีพฤติกรรมการออกซิเดชันที่แตกต่างกันไป ในกรณีที่ภาระโหลดเครื่องยนต์ต่ำมลพิษอนุภาคจะเผาไหม้ได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่ามลพิษอนุภาคที่ได้จากภาระโหลดเครื่องยนต์ที่สูงขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ซึ่งทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ที่อุณหภูมิต่ำนั้นมีสัดส่วนที่สูงเมื่อภาระโหลดของเครื่องยนต์ต่ำและจะมีสัดส่วนลดลงเมื่อภาระโหลดเพิ่มขึ้น สัดส่วนดังกล่าวจะใกล้เคียงกับมลพิษอนุภาคจากตะเกียงเมื่อภาระโหลดสูงมากๆ ซึ่งมลพิษอนุภาคส่วนใหญ่จะประกอบด้วยคาร์บอน ดังแสดงในภาพที่ 4.11



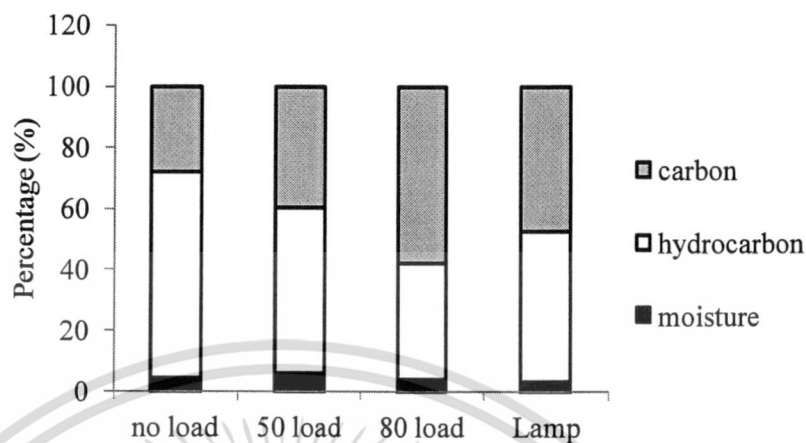
(a) Lamp's PMs vs Carbon black



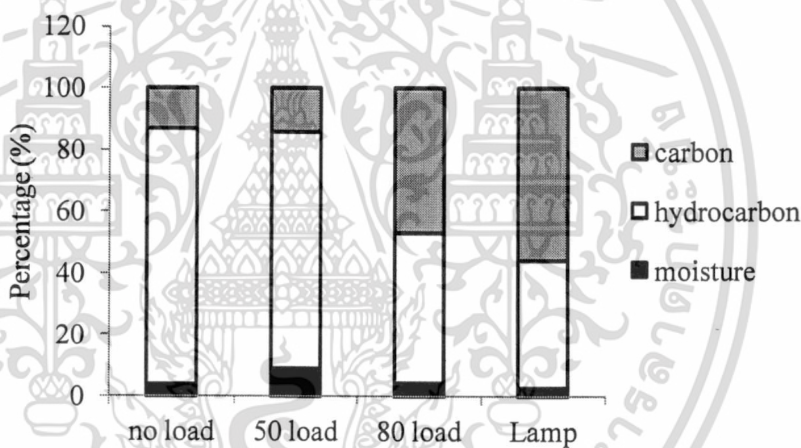
(2) Engine's PM vs Carbon black

ภาพที่ 4.10 การทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างมลพิษอนุภาคกับออกซิเจนด้วย TGA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) Diesel Particulate Matters



(b) Biodiesel Particulate Matters

ภาพที่ 4.11 สัดส่วนของน้ำ ไฮโดรคาร์บอนและคาร์บอน โดยประมาณจาก TGA

ตารางที่ 4.2 พลังงานกระตุ้นของการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างมลพิษอนุภาคกับออกซิเจน

Particulate Matter Type	Ea (kJ/mol)		
	Non-isothermal		Isothermal
	400-480 °C	490-520 °C	450-600 °C
Biodiesel Lamp's PMs	91.3	155.5	155.6
Diesel Lamp's PMs	129.6	176.6	155.9

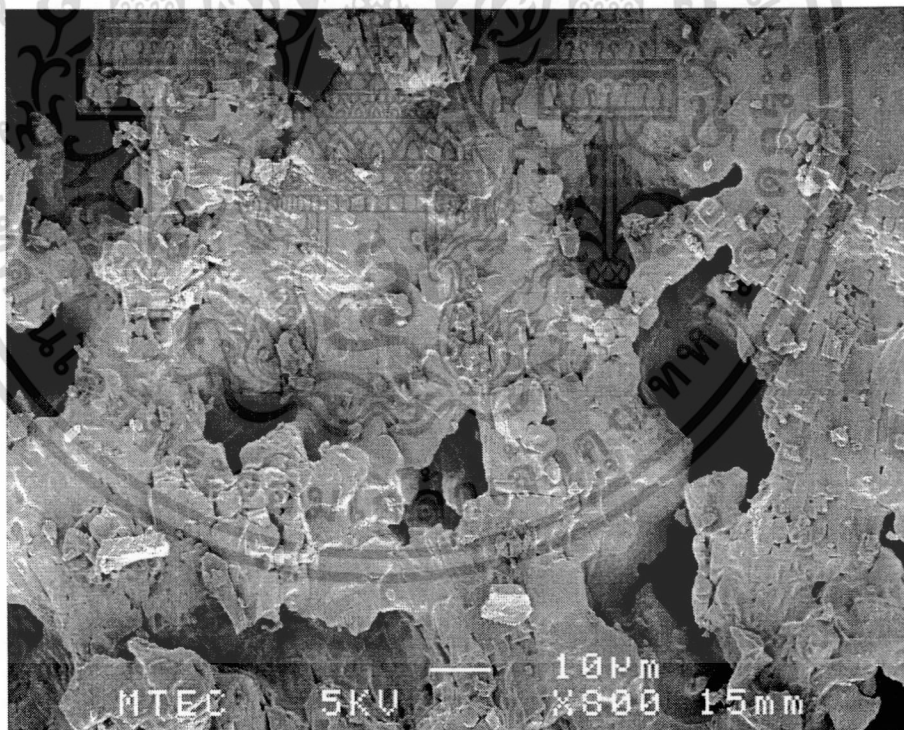
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการคำนวณพลังงานกระตุ้นในการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างมลพิษอนุภาคจากตะเกียงกับออกซิเจนตามสมการที่ (6) ถึง (9) จากการวิเคราะห์พบว่าไฮโดรคาร์บอนจากมลพิษอนุภาคไบโอดีเซลซึ่งมีอะตอมของออกซิเจนในโมเลกุลเชื้อเพลิงนั้นสามารถทำปฏิกิริยาด้วยพลังงานกระตุ้นที่ต่ำกว่าดีเซล ในขณะที่คาร์บอนจากมลพิษอนุภาคดีเซลและไบโอดีเซลมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นการเผาผลาญอนุภาคไบโอดีเซลนั้นใช้พลังงานที่ต่ำกว่ามลพิษอนุภาคดีเซล

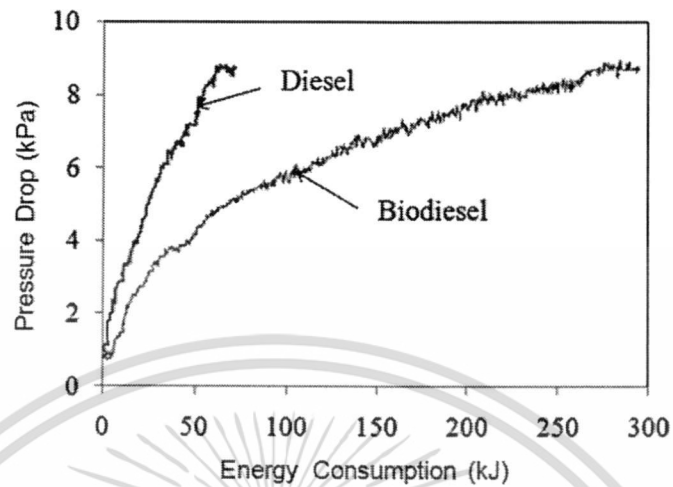
4.2 การกำจัดมลพิษอนุภาคด้วยอุปกรณ์กรองมลพิษอนุภาค (Particulate Filter)

4.2.1 ศึกษาพฤติกรรมกรองกำจัดมลพิษอนุภาคด้วย

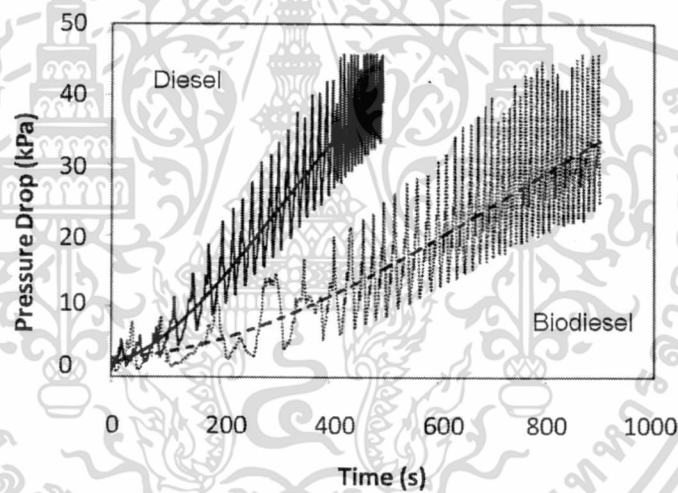
การศึกษาพฤติกรรมกรองกำจัดมลพิษอนุภาคด้วยชุดทดสอบการดักและเผาผลาญอนุภาคด้วยอุปกรณ์กรองมลพิษอนุภาคดีเซล (Diesel Particulate Filter: DPF) สามารถวัดค่าผลกระทบของความดันแตกต่าง (Pressure drop) และ ประสิทธิภาพการกรอง (Filtration efficiency) ในขบวนการดักและสลายมลพิษอนุภาคได้ อุปกรณ์กรองมลพิษอนุภาคแสดงในภาพที่ 4.12



ภาพที่ 4.12 ภาพถ่ายอุปกรณ์กรองมลพิษอนุภาคด้วย SEM



(a) Lamp's PMs



(b) Engine's PMs

ภาพที่ 4.13 การทดสอบพฤติกรรมการคั่งมลพิษอนุภาคด้วยอุปกรณ์กรองมลพิษอนุภาค

ภาพที่ 4.13 (a) และ (b) แสดงผลการวัดค่าความดันแตกต่างระหว่างขาเข้าและขาออก อุปกรณ์กรองมลพิษอนุภาค จะเห็นว่าความดันแตกต่างในกรณีเชื้อเพลิงดีเซลมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ความดันแตกต่างในกรณีเชื้อเพลิงไบโอดีเซลมีค่าเพิ่มขึ้นช้ากว่าดีเซลถึงประมาณเท่าตัวเลยทีเดียว ข้อมูลดังกล่าวสอดคล้องกับการทดสอบด้วย Smoke Meter และ ผลจากการถ่ายภาพที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากรายงานการวิจัยทั่วโลกพบว่า มลพิษอนุภาค (Particulate Matters or Particle Emissions) ที่เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนเป็นต้นเหตุหนึ่งของการเกิดมะเร็ง ดังนั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องสร้างเทคโนโลยีที่สามารถกำจัดมลพิษดังกล่าวเพื่อสุขภาพของมนุษย์อย่างไรก็ตามมลพิษอนุภาคดังกล่าวมีโครงสร้างทางกายภาพและเคมีที่ซับซ้อนมากยากต่อการกำจัดอย่างมีประสิทธิภาพด้วยเทคโนโลยีเครื่องยนต์ปัจจุบัน

ผลการวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของคุณลักษณะทางกายภาพในระดับไมโครและนาโนสเกลรวมไปถึงคุณลักษณะทางเคมีของมลพิษอนุภาคจากเชื้อเพลิงต่างชนิดกัน มลพิษอนุภาคจากเชื้อเพลิงไบโอดีเซลมีขนาดเล็กและปริมาณที่ต่ำกว่าเชื้อเพลิงดีเซลซึ่งมีผลให้ระยะเวลาในการดักมลพิษอนุภาคยาวนานกว่านั่นเอง การที่รถยนต์ใช้เวลาในการดักมลพิษอนุภาคยาวนานกว่าย่อมทำให้ประหยัดพลังงานในการเผาผลิษอนุภาคเพราะการเพิ่มอุณหภูมิไอเสียในขบวนการเผาผลิษอนุภาคนั้นจำเป็นต้องใช้เชื้อเพลิงเป็นแหล่งพลังงานด้วยระบบ Post Injection Common Rail System นอกเหนือจากนั้นเชื้อเพลิงไบโอดีเซลที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ยังสามารถทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำกว่าดีเซลด้วยเนื่องจากมีอะตอมของออกซิเจนในโมเลกุลของเชื้อเพลิงไบโอดีเซล

การใช้เชื้อเพลิงชีวภาพเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะสามารถลดปัญหามลพิษอนุภาคจากยานยนต์ได้ทั้งยังประหยัดพลังงานในการเผาผลิษอนุภาคและอาจจะสามารถเพิ่มอายุการใช้งานของอุปกรณ์กรองมลพิษอนุภาคได้ด้วย อย่างไรก็ตามคณะผู้วิจัยยังจำเป็นต้องศึกษาเชิงลึกในรายละเอียดรวมถึงการออกแบบพัฒนาอุปกรณ์กรองมลพิษอนุภาคที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้จริงต่อไป เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อสังคม

บรรณานุกรม/เอกสารอ้างอิง

- [1] J.B. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamental*, McGraw-Hill series in mechanical engineering, Singapore, 1998.
- [2] O.I. Smith, Fundamentals of soot formation in flames with application to diesel engine particulate emissions, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 7, pp.275-291, 1981.
- [3] M.M. Maricq, Review Chemical Characterization of particulate emissions from diesel engine: A review, *Journal of Aerosol Science*, Vol.38, pp.1079-1118, 2007.
- [4] D.B. Kittelson, Engines and nanoparticles: A review, *Journal of Aerosol Science*, Vol.29, pp.575-588, 1998.
- [5] W.A. Majewski and M.K. Khair, Diesel Emissions and Their Control, *SAE Order No.R-303*, SAE International. Warrendale USA, 2006.
- [6] T. Ishiguro, Y. Takatori and K. Akihama, Microstructure of Diesel Soot Particles Probed by Electron Microscopy: First Observation of Inner Core and Outer Shell, *Combustion and Flame*, 108, pp.231-234, 1997.
- [7] R.A. Vander Wal, A. Yezerets, N.W. Currier, D.H. Kim and C.H. Wang, HRTEM Study of diesel soot collected from diesel particulate filters, *Carbon*, 45, pp.70-77, 2007.
- [8] T. Aizawa, H. Nishigai, K. Kondo, T. Yamaguchi, J.G. Nerva, C. Genzale, S. Kook and L. Pickett, Transmission Electron Microscopy of Soot Particles Directly Sampled in Diesel Spray Flame – A Comparison between US#2 and Biodiesel Soot, *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, SAE International, Vol.5 No.2, pp.665-673, 2012.
- [9] N. Miyamoto, H. Ogawa and M.N. Nabi, Approches to extreamly low emissions and efficient diesel combustion with oxygenated fuels, *International Journal of Engine research*, Professional Engineering Publishing, Vol.1, No.1, pp.71-85, 2000.
- [10] A.G. Konstandopoulos, M. Kostoglou, N. Vlachos and E. Kladopoulos, Progress in Diesel Particulate Filter Simulation, *SAE Technical paper*, 2005-01-0946, 2005.
- [11] A.G. Konstandopoulos, D. Zarvalis, E. Kladopoulou and L. Dolios, A multi-reactor assembly for screening of diesel particulate filters, *SAE Technical paper*, 2006-01-0874, 2006.

- [12] S. Tushima, I. Nakamura, S. Sakashita, S. Hirai and D. Kitayama, Lattice Boltzmann simulation on particle transport and captured behaviors in a 3d-reconstructed micro porous DPF, *SAE Technical paper*, 2010-01-0534, 2010.
- [13] K. Hanamura, P. Karin, L. Cui, P. Rubio, T. Tsuruta, T. Tanaka and T. Suzuki, Micro- and macroscopic visualization of particulate matter trapping and regeneration processes in wall-flow diesel particulate filters, *International Journal of Engine research*, Professional Engineering Publishing, Vol.10, No.5/2009, pp.305-321, 2009.
- [14] P. Karin, L. Cui, P. Rubio, T. Tsuruta and K. Hanamura, Microscopic Visualization of PM Trapping and Regeneration in Micro-Structural Pores of a DPF Wall, *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, SAE International, Vol.2 No.1, pp.661-669, 2009.
- [15] P. Karin and K. Hanamura, Particulate Matter Trapping and Oxidation on Catalyst-Membrane, *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, SAE International, Vol.3 No.1 pp.368-379, 2010.
- [16] H. Oki, P. Karin and K. Hanamura, Visualization of Oxidation of Soot Nanoparticles Trapped on a Diesel Particulate Membrane Filter, *SAE International Journal of Engines*, SAE International, Vol. 4 no. 1 pp.515-526, 2011.
- [17] K. Nakamura, H. Oki, R. Sanui, and K. Hanamura, Soot Oxidation Characteristics of SiC Nanoparticle Membrane Filters, *SAE Technical Paper*, 2012-01-0848, 2012.
- [18] S. Laosuwan, P. Karin and C. Charoenpornpanich, "Study on Diesel and Biodiesel Particulate Matter Trapping inside a Diesel Particulate Filter", *The 7th International Conference of Automotive Engineer (ICAE-7)*, TSAE, 28-29 March, Bangkok-Thailand, 2011.
- [19] S. Laosuwan, P. Karin and C. Charoenpornpanich, "Thermo-gravimetric Analysis of Biodiesel Diffusion Flame's Particulate Matter", *The Second TSME International Conference on Mechanical Engineering (The 2nd TSME-ICoME)*, 19-21 October, Krabi-Thailand, 2011.
- [20] Y. Songsaengchan, C. Chareonphonphanich, P. Karin, N. Chollacoop, M. Thongroon, K. Hanamura, "Physical Characterization of Biodiesel Particulate Matter by STEM", *The Second TSME International Conference on Mechanical Engineering (The 2nd TSME-ICoME)*, 19-21 October, Krabi-Thailand, 2011.

ภาคผนวก

วารสารวิชาการ

1. P. Karin, Y. Songsaengchan, C. Charoenphonphanich and S. Laosuwan, (2012) “Nanostructure of Renewable Oxygenated Fuels Particulate Matter”, ASEAN Engineering Journal, AUN/SEET-Net, Publishing Process.

งานประชุมวิชาการ

1. S. Laosuwan, P. Karin and C. Charoenpompanich, “Thermo-gravimetric Analysis of Biodiesel Diffusion Flame’s Particulate Matter”, Second TSME International Conference on Mechanical Engineering (2nd TSME-ICoME), 19-21 October, Krabi-Thailand, 2011.
2. Y. Songsaengchan, C. Chareonphonphanich, P. Karin, N. Chollacoop, M. Thongroon, K. Hanamura, “Physical Characterization of Biodiesel Particulate Matter by STEM”, Second TSME International Conference on Mechanical Engineering (2nd TSME-ICoME), 19-21 October, Krabi-Thailand, 2011.
3. Y. Songsaengchan, P. Karin, S. Laosuwan and C. Chareonphonphanich, “Physical and Chemical Characterization of Bio-Oxygenated Particulate Matter”, The 8th International Conference of Automotive Engineer (ICAE-8), TSAE, 2-6 April, Bangkok-Thailand, 2012.
4. P. Karin, Y. Songsaengchan, S. Laosuwan and C. Chareonphonphanich, “Nanostructure of Renewable Oxygenated Fuels Particulate Matter”, The 4th AUN/SEED-Net RC MeAe 2012, Jan10-11 HCMUT Vietnam, 2012.
5. Y. Songsaengchan, M. Tongroon, P. Karin, N. Chollacoop, C. Chareonphonphanich and K. Hanamura, “Nanostructure Investigation of Biodiesel Particulate Matter”, 2012 JSAE Annual Congress (Spring), JSAE, 23-25 May, Yokohama-Japan, 2012.
6. S. Laosuwan, P. Karin, C. Chareonphonphanich and K. Hanamura, “Oxidation Kinetics of Biodiesel Particulate Matters by Using Thermogravimetric Analysis”, 2012 JSAE Annual Congress (Spring), JSAE, 23-25 May, Yokohama-Japan, 2012.

Nanostructure of Renewable Oxygenated Fuels Particulate Matter

Preechar Karin¹, Yutthana Songsaengchan¹, Songtam Laosuwan², Chinda Charoenphonphanich², Nuwong Chollacoop³ and Katsunori Hanamura⁴

¹ International College, ² Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok, 10520 Thailand, Tel.+66-2-329-8261, Fax.+66-2-329-8262, Email:kkpreech@kmitl.ac.th

³ National Metal and Materials Technology Center, National Science and Technology Development Agency, Klongluang, Pathumthani, Thailand 12120

⁴ Department of Mechanical and Control Engineering, Tokyo Institute of Technology O-okayama, Meguro-ku, Tokyo, Japan, 152-8552

Abstract

This paper describes a part of an ongoing research project in diesel Particulate Matter (PM) reduction by using renewable oxygenated fuel. In order to achieve the particulate matter reduction, physical structure and aggregation behavior should be investigated for better understanding of designs and configurations of Diesel Particulate Filter (DPF). The nanostructures of diesel and biodiesel PMs were investigated by using a Scanning Electron Microscopy (SEM) and a Transmission Electron Microscopy (TEM) for better understanding. The primary size distributions as well as particulate structures were presented by means of scanning images. The average primary sizes of diesel and biodiesel fuels PMs are approximately 50-60 nm and 30-40 nm, respectively. The average carbon platelet sizes of diesel and biodiesel PMs are in the range of 0.5-3.0 nm. In addition, Thermogravimetric Analysis (TGA) was used to investigate chemical kinetics of particulate matter oxidation. The apparent activation energies of oxygenated hydrocarbon, diesel hydrocarbon and carbon oxidation are approximately 91 kJ/mol, 130 kJ/mol and 155 kJ/mol, respectively.

Keywords: Diesel Engine, Particulate Matter, Diesel Particulate Filter, Oxygenated Fuel

Introduction

Among internal combustion engines, diesel engines have the highest thermal efficiency. However, particulate matters (PMs) must be removed from exhaust gases emitted from diesel engines to protect the environment and human health. Therefore, the regulation on the restriction of emission is increased.

Diesel particulate matters consist of a solid fraction (SOL) and a soluble organic fraction (SOF). Primary particles, composed of carbon and metallic ash, are coated with SOF and sulfate. The nanostructures of primary soot particles have been characterized using transmission electron microscopy (TEM) to understand them in details. The mean diameters of the primary and agglomerated particles are usually in the range of 20–80 nm and 80–300 nm, respectively. A primary soot particle has two distinct parts: an inner core and an outer shell. The inner core has a diameter of 10 nm and it is located at the central region of the primary particle. The composition of particles from a diesel engine may vary widely depending on the operating conditions and fuel composition [1–9].

Diesel particulate filters (DPFs) play an important role in particulate trapping and oxidation. A DPF is generally made of ceramic materials, such as cordierite or silicon carbide,

consisting of many rectangular channels with alternate channels blocked using cement at each end. The exhaust gas is forced to flow through a channel wall having numerous micron-scale pores that trap the particle emissions. Furthermore, the collected particulates must be oxidized to regenerate the DPF and reduce the back pressure on the diesel engine [10–17].

The problem of particle emissions from diesel engine should be reduced by development of high efficiency engine, after-treatment and pre-treatment technologies. The use of renewable oxygenated fuels is now a widespread means to reduce regulated pollutant emissions produced by internal combustion engines [9], as well as to reduce the greenhouse gas. However, particulate matter emitted from biodiesel must be investigated for better understanding to optimize the design of DPF configuration. The present research is to study the physical structure and oxidation behaviors of diesel and biodiesel particulate matters. The first objective is to investigate and compare the quantity, microstructure and nanostructure of diesel and biodiesel particulate matters by using DPF sample disc for particulate trapping, SEM and TEM for particulate structure investigation. The second objective is the study of diesel and biodiesel particulate matters oxidation kinetics by using Thermo-gravimetric analysis (TGA).

Experimental Setup

Particulate Matter Generator

Biodiesel which derived from palm-olein (biodiesel (B100) fuel of TIS 2313-2549) was used and compared with the results of commercial grade diesel (conventional diesel (B0) fuel of TIS 2155-2546). The carbon fraction of diesel and biodiesel are 82 and 78, respectively. Diesel and biodiesel diffusion flame particulate matters were generated by diesel and biodiesel lamps, as shown in Fig.1. The fuel consumption of each fuel was measured by weight loss respect to time for comparison in the view point of energy consumption. Particulate matters were introduced into the DPF samples by using the vacuum pump by controlling the constant gas flow rate and temperature base on the actual vehicle condition. The pressure drop between inlet and outlet of the DPF sample were measured in each trapping time by using manometer and in real time by pressure sensor.

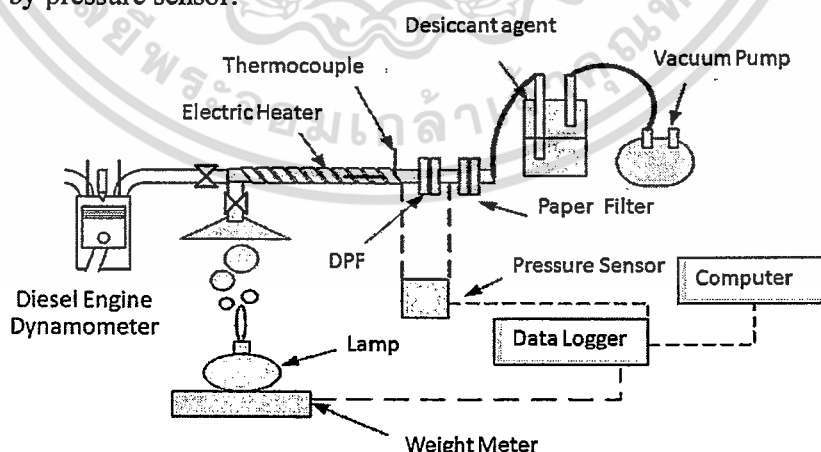


Fig 1. Experimental Setup for Particulate Matter Quantities Investigation.

On the other hand, a single cylinder, four strokes, direct injection diesel engine was also used in the soot generation process. The fuel injection pressure was 19.6 MPa and the engine speed was fixed at 2400 rpm without load on the engine dynamometer. The present research is focused on the effect of oxygenated fuel in particle emissions. Therefore, no load condition is studied in this case for the first step even particulate matter size and unburned hydrocarbon content are strongly related to engine operating condition.

Particulate Matter Characterization Method

Nanostructures of single primary particle and carbon platelet structures were investigated by TEM image and post process by hand drawn images. Oxidation behaviors of isothermal and non-isothermal methods were investigated by TGA. Non-isothermal method was used to estimate apparent activation energy of each unburned hydrocarbon (oxygenated and fossil) under the condition of temperature increasing rate of 10 °C per minute from 25 °C to 800 °C with 100% oxygen atmosphere. On the other hand, isothermal method was operated by temperature increasing rate of 10 °C per minute from 25 °C to 450 °C to remove unburned hydrocarbon. Then, temperature was holding at 450 °C for an hour. Similarity, each sample was tested under the condition of 500 °C, 550 °C and 600 °C.

Chemical kinetics of particulate matter oxidation is studied by using Thermo-gravimetric analysis (TGA).



The chemical reaction rate in eq.1 can calculate from the TGA curve based on the chemical kinetic in eq.2

$$-\frac{d[C]}{dt} = -k[C]^n [O_2]^m \quad (2)$$

Where C is particulate matter mass, t is time, k is the rate constant of chemical reactions, m , n are the reaction orders. The dependence of the specific rate constant of chemical reactions k is expressed by eq.3

$$k = Ae^{-E_a/RT} \quad (3)$$

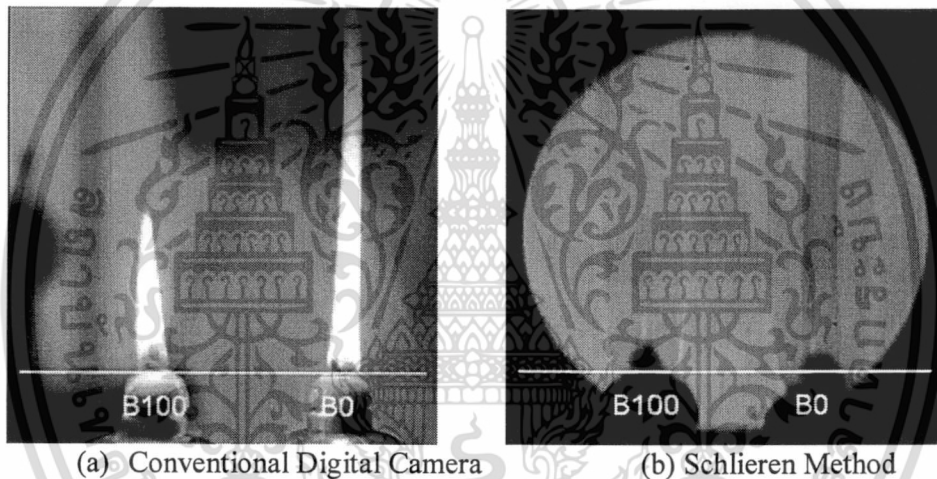
Where A is the frequency factor, E_a is the activation energy, R is the gas constant. The apparent activation energy can be calculated by eq.4.

$$\ln \left[\frac{-1}{[C]^n} \frac{d[C]}{dt} \right] = -\frac{E}{RT} + (\ln A + m \ln [O_2]) \quad (4)$$

Results and Discussions

Particulate Matter Concentration

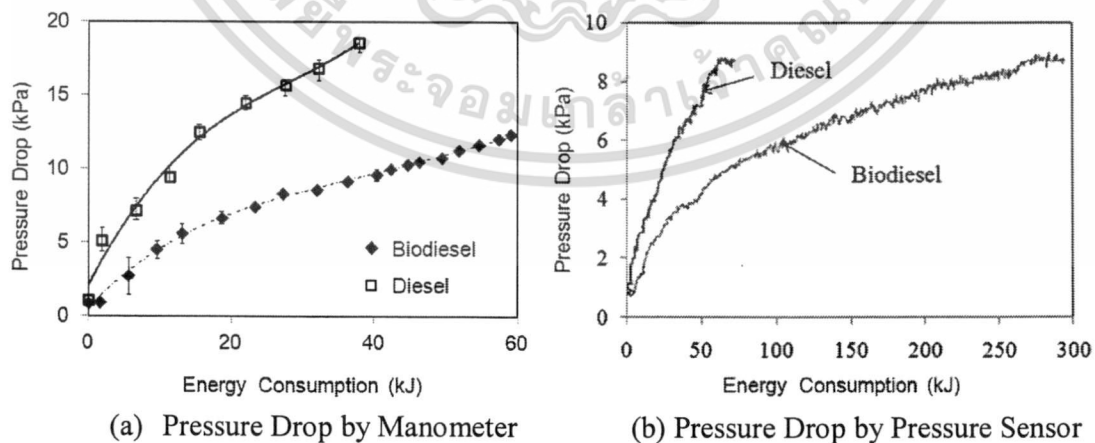
Figure 2 (a) shows diesel and biodiesel diffusion flames from optical image. The soot particle is formed in the fuel spray cores, in which the rich fuel is contained, whereas the fuel vapor is heated by mixing with hot burned gases in the flame regions. The particle is oxidized in the flame zone when it contacts with available oxygen, resulting in yellow luminous flame character. The length of biodiesel diffusion flame was shorter than that of diesel. Similarly, Fig. 2 (b) shows diesel and biodiesel diffusion flames produced by Schlieren method. The center of biodiesel diffusion flame was lighter than that of diesel because oxygen atoms inside an oxygenated fuel molecule can promote the conditions which approach to the complete combustion.



(a) Conventional Digital Camera

(b) Schlieren Method

Fig 2. Biodiesel (B100) and Diesel (B0) Diffusion Flame by (a) Optical Digital Camera and (b) Schlieren Mthod Images [18,19].



(a) Pressure Drop by Manometer

(b) Pressure Drop by Pressure Sensor

Fig 3. Lamp's Diesel and Biodiesel Particulate Matters Concentrations by (a) Manometer and [19,20] and (b) Pressure Sensor.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Figure 3 (a) shows the comparison of pressure drop between outlet and inlet of DPF disc sample with the size of $4.5 \times 4.5 \text{ cm}^2$. Samples were taken during the trapping process at the same energy consumption rate of diffusion flame. As indicated in this graph which obtained from measurement of manometer, diesel particulates have a higher pressure drop than biodiesel particulates at a given energy input. Pressure drop of DPF wall during diesel particulate matters trapping was approximately 2 times higher than that of biodiesel particulate matter. Therefore, the apparent amount of diesel particulate matter could be also assumed to be 2 times higher than that of biodiesel. However, the actual concentrations should be measured by using higher precision device in the next step. Figure 3 (b) shows the same trend of particulate matter trapping inside the DPF disc sample size of $6 \times 6 \text{ cm}^2$ and pressure drop was measured by pressure sensor.

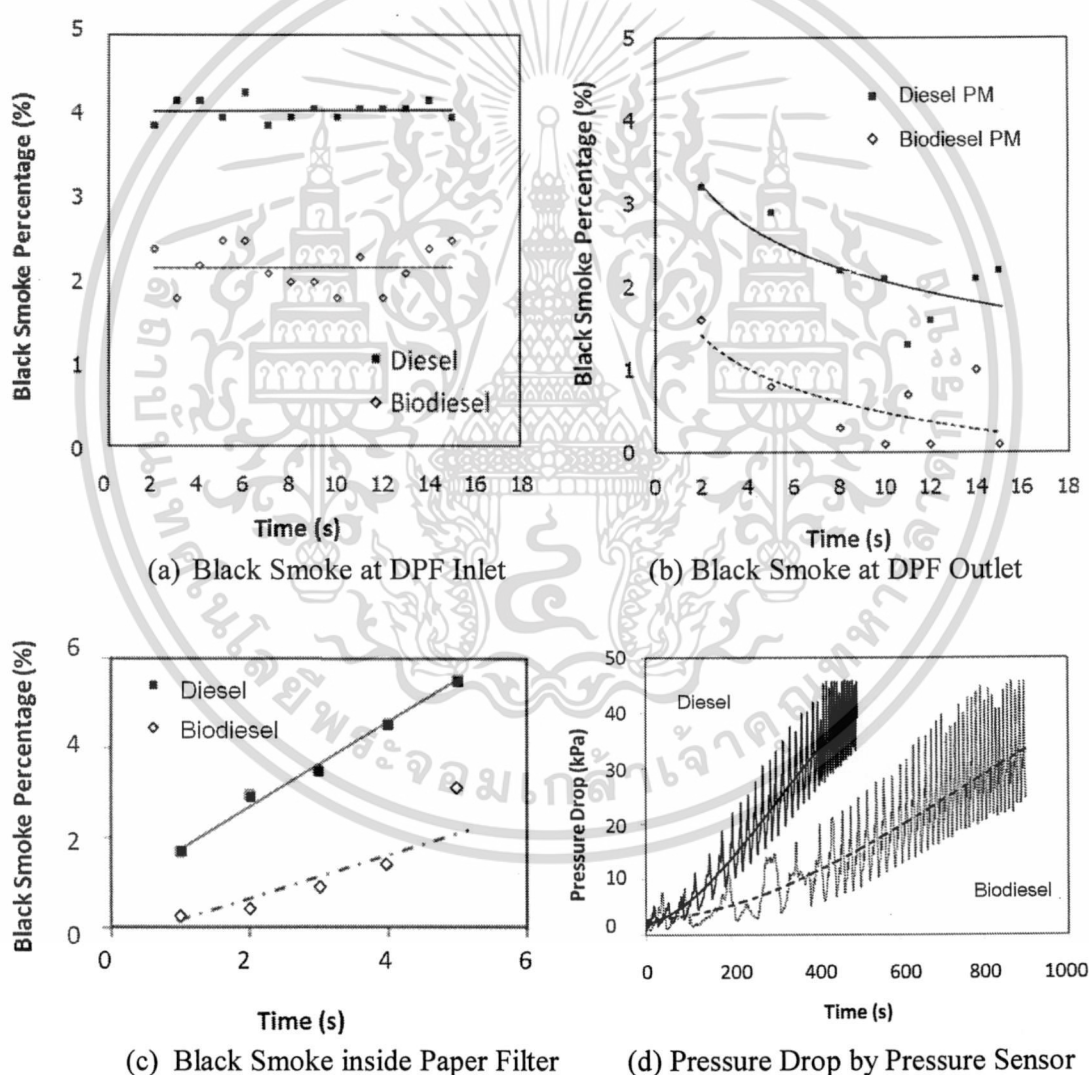


Fig 4. Engine's Diesel and Biodiesel Particulate Matters Concentrations by Smoke Meter at (a) DPF Inlet, (b) DPF Outlet, (c) inside Paper Filter [19,20] and by (d) Pressure Sensor.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

In the same method, the remaining soot particle is emitted in the CI engine exhaust pipe. The paper filter was used to trap the emitted diesel and biodiesel soot particle at any time. Subsequently, smoke meter was applied to measure the concentration of trapped particulate on the paper filter by light emitting method. Figure 4 (a) and (b) show the percentage of black smoke of diesel and biodiesel at the inlet and outlet of DPF, respectively. The concentration of diesel black smoke is approximately two times higher than that of biodiesel. Figure 4 (c) shows the percentage of black smoke of diesel and biodiesel when the trapping period is varied. The result showed that the percentage of black smoke of diesel increased faster than that of biodiesel. In addition, it's also clearly observed that the pressure drop between inlet and outlet of DPF for diesel engine is approximately two times higher than that of biodiesel. Hence, diesel particulate formation was higher than biodiesel. This could be explained that more soot particulate was remained in diesel combustion than those of biodiesel. Because it contains oxygen molecule, biodiesel is readily oxidized with available oxygen in the flame zone. Consequently, particulate filter trapping duration of biodiesel fuel is longer than that of diesel fuel because of particulate concentration emitted from bio-oxygenated fuel combustion flame is lower than that of diesel combustion.

Microstructure of Particulate Matter

In this research, the particle image is taken to verify the diesel and biodiesel particle and carbon platelet sizes by micro- and nano- image. Figure 5 shows SEM images of ultrafine particle sizes from of (a) diesel lamp, (b) biodiesel lamp, (c) diesel engine and (d) biodiesel engine (left hand side). The image showed that the biodiesel particle sizes from both sources are slightly smaller than that of diesel particle. On the other hand, particle emitted from the lamp is a slightly smaller than that particle emitted from engine in both fuels. The single particle sizes from diesel and biodiesel diffusion flame are approximately 50-60 nm and 30-40 nm, respectively. However, it is difficult to measure primary size of engine particle by SEM image because the surface of particulate matter emitted from engine could be covered by much amount of unburned hydrocarbon. The TEM method was used to measure primary particle size from diesel and biodiesel fuel. Figures 5 (a), (b), (c) and (d) show particulate matter emitted from diesel lamp, biodiesel lamp, diesel engine and biodiesel engine (right hand side). The primary particle size is approximately 20-80 nm which is in the range of ultrafine particles (diameter size lower than 100 nm). However, the biodiesel particulate matter is a bit smaller than that of diesel particulate matter for both combustions.

The particulates were trapped from exhaust gas from lamp and engine. The TEM method was used to visualize the particle diameter. The particulate size distribution in primary mode for approximately 100 particles which taken from TEM image, was shown in Fig. 6. Most of diesel lamp particle size is around 50-60 nm while the biodiesel lamp particle size has peaked in the range between 30-40 nm which is slightly smaller than that of diesel lamp particle. The peak of primary particle size from diesel and biodiesel engines are approximately 30-40 nm. The primary size of diesel particles is larger than that of biodiesel. This is due to the lower concentration of biodiesel particle, which is readily oxidized with more available oxygen in combustion flame due to oxygenated biodiesel fuel. On the other hand, the primary particle size from diesel engine is smaller than that of diesel lamp particle possibly because of engine conditions such as homogeneous of air/fuel mixture, high pressure in combustion chamber, exhaust gas temperature, may effect to particulate matter oxidation before exiting to the atmosphere. Moreover, higher oxygen content and homogeneity mixture closed to the stoichiometric condition of bio-oxygenated fuel can produce smaller size of primary particulate particle.

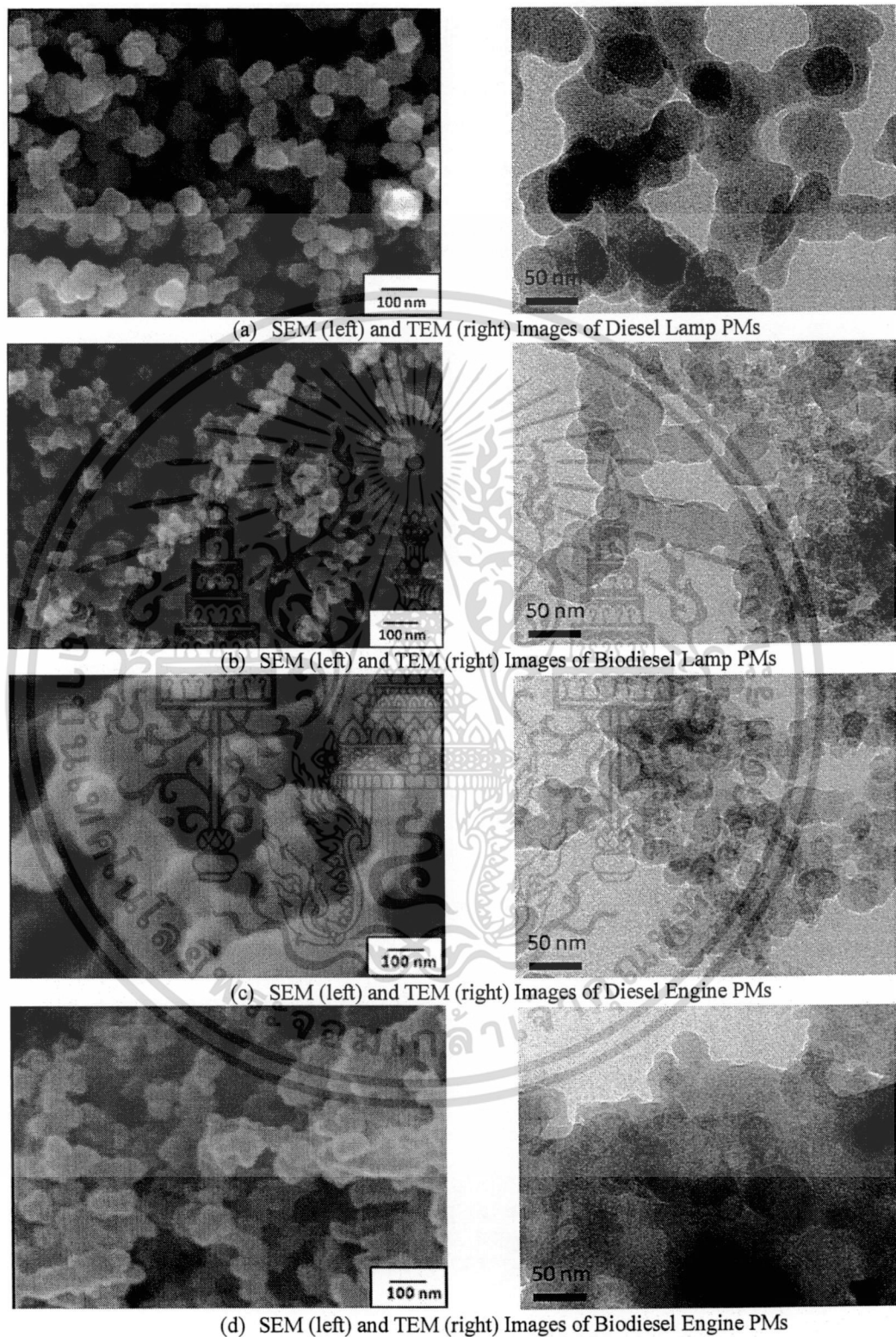


Fig 5. SEM (left) and TEM (right) Images of (a) Diesel Lamp, (b) Biodiesel Lamp (c) Diesel Engine and (d) Biodiesel Engine Particulate Matters [19-20].

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

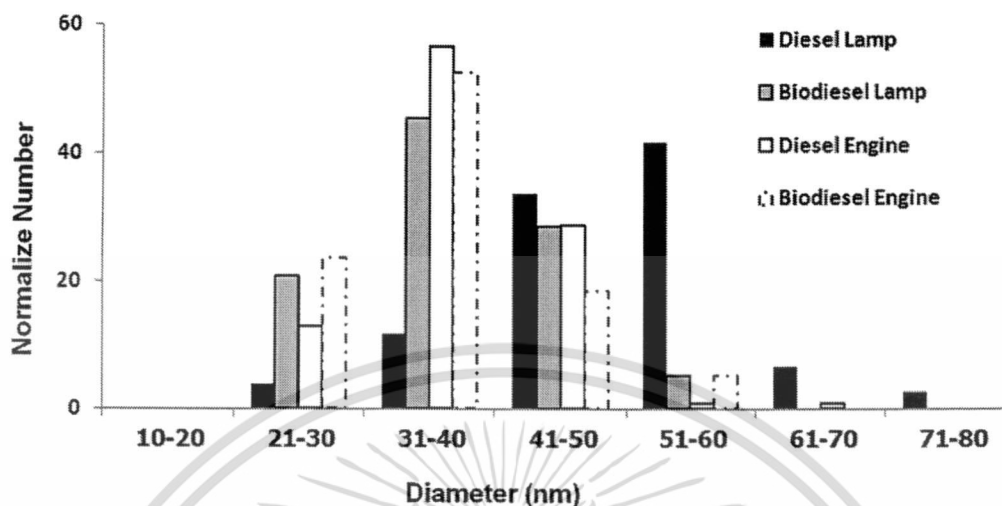


Fig 6. Primary Particle Size Distribution of Particulate Matter by TEM Images which Normalized from 38 to 108 particles to be 100 samples of Each Fuel's Particle.

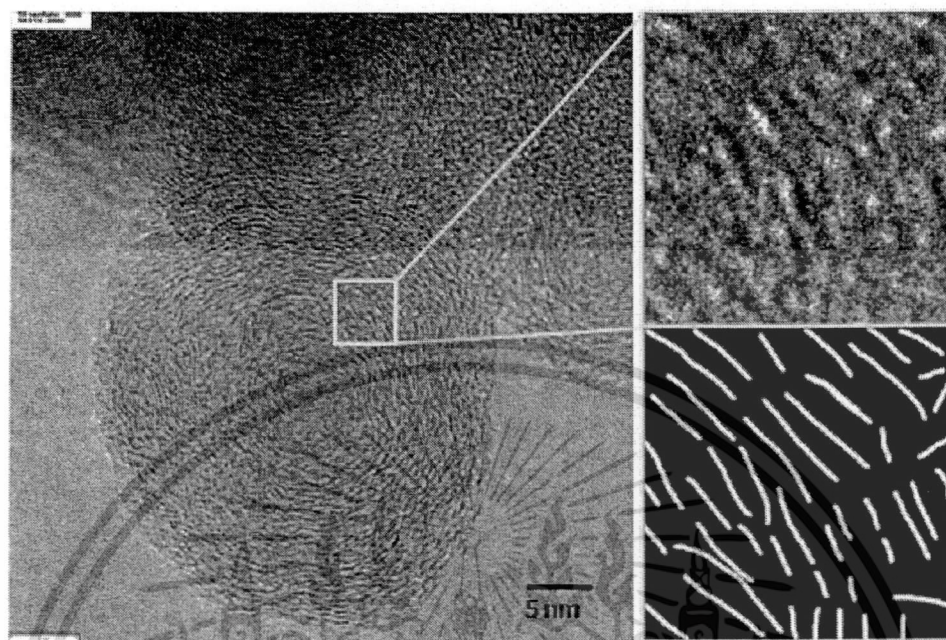
Nanostructure of Particulate Matter

Figure 7 shows the nanostructure of diesel particulate matter which emitted from diffusion flame combustion inside a diesel engine. Particulate matter is investigated for number of carbon atom contained in the particle. TEM image is used for numerating platelet number that aggregate layered in the particle. Each of platelets is consisted of proper amount of carbon atom from incomplete combustion product. For each of combustion, lamp and engine, the platelet sizes are shown in Fig. 8. The average of diesel and biodiesel carbon platelets is in the range of 0.5-3.0 nm. However the distance of each platelet for different fuels is not the same.

Another result of carbon atom number per volume is also estimated. The concept of estimation is "the molecule of carbon-6 (C₆) is the possible smallest size". Such molecules are agglomerated to be the large ring of carbon then becomes a platelet. The particulate matter from biodiesel lamp and diesel lamp contain 129, 205 atom per nm³ while the particulate matter from biodiesel engine and diesel engine are consisted by carbon atom number of 63 and 72 per nm³, respectively, as shown in Table 1.

The particulate matter from diesel combustion contains carbon atom that is larger than that of biodiesel combustion. The biodiesel combustion which emits lower carbon concentration results in lower carbon atom consisted in particulate matter. In addition, platelet length and atom concentration of particulate matter emitted from the engine are smaller than that of diffusion flame of lamp due to the impact of pressure, temperature and homogeneous mixture of fuel and oxygen.

This is an interesting result of bio-oxygenated fuel combustion behavior and particles emission nanostructure which should be researched in more details to discover the useful information for better understanding and future designs of modern Internal Combustion Engines and DPF configurations.



(a) TEM Image

(b) Post Process Image

Fig 7. (a) TEM and (b) Post Process (by Hand Draw) Images of Carbon Platelet inside Particulate Matter.

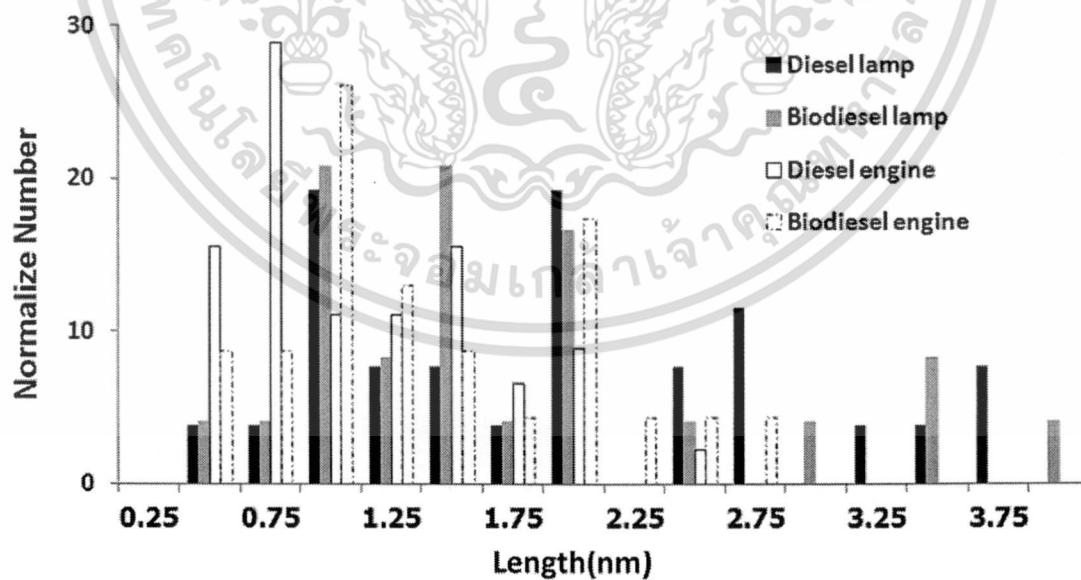


Fig 8. Carbon Platelet Size Distribution of Particulate Matter by TEM Images Normalized from 24 to 45 platelets to be 100 samples of Each Fuel's Particle.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 1. Carbon Atom Include in Particulate Matter

Particulate Matter Type	Density (atom/nm ³)
Biodiesel Lamp PM	129
Diesel Lamp PM	205
Biodiesel Engine PM	63
Diesel Engine PM	72

Oxidation of Particulate Matter

Figure 9 (a) shows Arrhenius plots of diesel and biodiesel particulate matter oxidation by non-isothermal method of TGA at temperature of 400 °C to 480 °C using Eq.1-4. It is assumed that the diesel and oxygenate unburned hydrocarbons oxidation could be oxidized and calculated apparent activation energies are approximately 130 and 91 kJ/mol, respectively. On the other hand, temperature from 490 °C to 520 °C is assumed to be carbon oxidation which has 155-177 kJ/mol of apparent activation energy.

Figure 9 (b) shows Arrhenius plots of remaining pure carbon inside diesel and biodiesel particulate matter oxidation by TGA isothermal method at the temperature from 450 °C to 600 °C. Unburned hydrocarbons were assumed to be successfully oxidized before holding the constant temperature. Apparent activation energy of pure carbon is approximately 155 kJ/mol for both of diesel and biodiesel carbon.

Table 2 summarizes the apparent activation energy of each particulate matter oxidation by non-isothermal and isothermal methods. It is clearly observed that unburned bio-oxygenated hydrocarbon oxidized at the lower temperature and requires lower apparent activation energies than that of fossil fuel even the remaining carbon are oxidized in the same range of apparent activation energies.

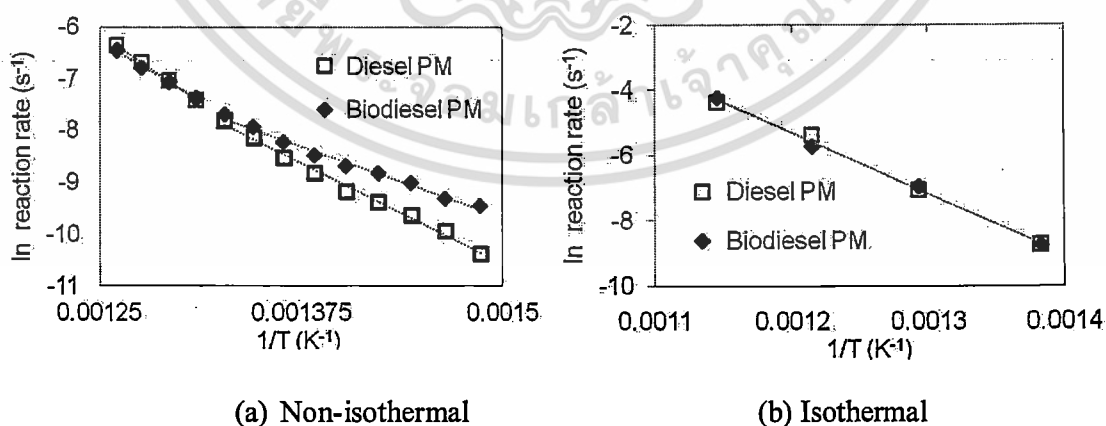


Fig. 9 Arrhenius Plots of PM Oxidation by (a) Non-isothermal and (b) Isothermal methods

Table 2. Apparent Activation Energy (E_a) of Particulate Matter Oxidation

Particulate Matter Type	E_a (kJ/mol)		
	Non-isothermal 400-480 °C	Non-isothermal 490-520 °C	Isothermal 450-600 °C
Biodiesel Lamp PM	91.3	155.4	155.6
Diesel Lamp PM	129.6	176.7	155.9

Conclusions

- Biodiesel combustion produces particulate matter two times lower than that of diesel combustion. Therefore, the conventional DPF can be used for two times of trapping duration. This means the energy consumption of engine for both the effect of pressure drop while driving and DPF regeneration process can be reduced approximately by two times.
- The primary size of diesel particles is larger than that of biodiesel. This is due to the lower concentration of biodiesel particles, which is readily oxidized with more available oxygen in combustion flame due to oxygenated biodiesel fuel. On the other hand, the primary particle size from diesel engine is smaller than that of diesel lamp particle due to homogeneous air/fuel mixture effect for complete combustion. However the impact is not strong for DPF trapping process because of the pore size of DPF is very large compared to the size of the particle emission.
- The carbon atom density in diesel particulate matter is higher than that of biodiesel. As a result, the impact of carbon and oxygen atom contents in oxygenated fuel must be researched for more understanding to optimize the internal combustion engine and DPF configurations.
- Unburned hydrocarbon from biodiesel combustion can be oxidized faster than that of unburned hydrocarbon from diesel combustion because of oxygen atoms included inside oxygenated fuel molecule promote complete combustion. Moreover, it is clearly observed that there is the same value of apparent activation energies for particulate matter without unburned hydrocarbon due to the condition of pure carbon oxidation.

References

- [1] J.B. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamental*, McGraw-Hill series in mechanical engineering, Singapore, 1998.
- [2] O.I. Smith, Fundamentals of soot formation in flames with application to diesel engine particulate emissions, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 7, pp.275-291, 1981.
- [3] M.M. Maricq, Review Chemical Characterization of particulate emissions from diesel engine: A review, *Journal of Aerosol Science*, Vol.38, pp.1079-1118, 2007.
- [4] D.B. Kittelson, Engines and nanoparticles: A review, *Journal of Aerosol Science*, Vol.29, pp.575-588, 1998.
- [5] W.A. Majewski and M.K. Khair, Diesel Emissions and Their Control, *SAE Order No.R-303*, SAE International. Warrendale USA, 2006.

- [6] T. Ishiguro, Y. Takatori and K. Akihama, Microstructure of Diesel Soot Particles Probed by Electron Microscopy: First Observation of Inner Core and Outer Shell, *Combustion and Flame*, 108, pp.231-234, 1997.
- [7] R.A. Vander Wal, A. Yezerets, N.W. Currier, D.H. Kim and C.H. Wang, HRTEM Study of diesel soot collected from diesel particulate filters, *Carbon*, 45, pp.70-77, 2007.
- [8] T. Aizawa, H. Nishigai, K. Kondo, T. Yamaguchi, J.G. Nerva, C. Genzale, S. Kook and L. Pickett, Transmission Electron Microscopy of Soot Particles Directly Sampled in Diesel Spray Flame – A Comparison between US#2 and Biodiesel Soot, *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, SAE International, Vol.5 No.2, pp.665-673, 2012.
- [9] N. Miyamoto, H. Ogawa and M.N. Nabi, Approches to extreemly low emissions and efficient diesel combustion with oxygenated fuels, *International Journal of Engine research*, Professional Engineering Publishing, Vol.1, No.1, pp.71-85, 2000.
- [10] A.G. Konstandopoulos, M. Kostoglou, N. Vlachos and E. Kladopoulos, Progress in Diesel Particulate Filter Simulation, *SAE Technical paper*, 2005-01-0946, 2005.
- [11] A.G. Konstandopoulos, D. Zarvalis, E. Kladopoulou and L. Dolios, A multi-reactor assembly for screening of diesel particulate filters, *SAE Technical paper*, 2006-01-0874, 2006.
- [12] S. Tushima, I. Nakamura, S. Sakashita, S. Hirai and D. Kitayama, Lattice Boltzmann simulation on particle transport and captured behaviors in a 3d-reconstructed micro porous DPF, *SAE Technical paper*, 2010-01-0534, 2010.
- [13] K. Hanamura, P. Karin, L. Cui, P. Rubio, T. Tsuruta, T. Tanaka and T. Suzuki, Micro- and macroscopic visualization of particulate matter trapping and regeneration processes in wall-flow diesel particulate filters, *International Journal of Engine research*, Professional Engineering Publishing, Vol.10, No.5/2009, pp.305-321, 2009.
- [14] P. Karin, L. Cui, P. Rubio, T. Tsuruta and K. Hanamura, Microscopic Visualization of PM Trapping and Regeneration in Micro-Structural Pores of a DPF Wall, *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, SAE International, Vol.2 No.1, pp.661-669, 2009.
- [15] P. Karin and K. Hanamura, Particulate Matter Trapping and Oxidation on Catalyst-Membrane, *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, SAE International, Vol.3 No.1 pp.368-379, 2010.
- [16] H. Oki, P. Karin and K. Hanamura, Visualization of Oxidation of Soot Nanoparticles Trapped on a Diesel Particulate Membrane Filter, *SAE International Journal of Engines*, SAE International, Vol. 4 no. 1 pp.515-526, 2011.
- [17] K. Nakamura, H. Oki, R. Sanui, and K. Hanamura, Soot Oxidation Characteristics of SiC Nanoparticle Membrane Filters, *SAE Technical Paper*, 2012-01-0848, 2012.
- [18] S. Laosuwan, P. Karin and C. Charoenpompanich, “Study on Diesel and Biodiesel Particulate Matter Trapping inside a Diesel Particulate Filter”, *The 7th International Conference of Automotive Engineer (ICAE-7)*, TSAE, 28-29 March, Bangkok-Thailand, 2011.
- [19] S. Laosuwan, P. Karin and C. Charoenpompanich, “Thermo-gravimetric Analysis of Biodiesel Diffusion Flame’s Particulate Matter”, *The Second TSME International Conference on Mechanical Engineering (The 2nd TSME-ICoME)*, 19-21 October, Krabi-Thailand, 2011.
- [20] Y. Songsaengchan, C. Chareonphonphanich, P. Karin, N. Chollacoop, M. Thongroon, K. Hanamura, “Physical Characterization of Biodiesel Particulate Matter by STEM”, *The Second TSME International Conference on Mechanical Engineering (The 2nd TSME-ICoME)*, 19-21 October, Krabi-Thailand, 2011.

ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล ดร.ปรีชา การินทร์

เพศ ชาย หญิง วันเดือนปีเกิด 9 ตุลาคม 2517 อายุ 38 ปีสถานภาพ โสด สมรส

ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
D.Eng.(Mechanical and Control Engineering)	Mechanical and Control Engineering	Tokyo Institute of Technology	2010

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) Automotive Engineering

ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

ปี พ.ศ.	ทุนการศึกษาและทุนวิจัย	สถาบันที่ให้
2008-2009	Honors Scholarship for Privately Financed International Students and Japan student Services Organization	Japan Student Services Organization (JASSO)
2009-2010	Rotary Yoneyama Memmorial Foundation Scholarship	Rotary Yoneyama Memorial Foundation Inc.
2012-2013	ทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่	สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

1. L. Cui, P. Rubio, P. Karin, T. Tsuruta and K. Hanamura, (2009) "Microscopic Visualization of Particulate Matter Trapping and Regeneration in Microstructural Pores on Diesel Particulate Filter Wall", Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan, Society of Automotive Engineers of Japan Inc, Vol. 40, No. 1, pp.153-158.
2. K. Hanamura, P. Karin, L. Cui, P. Rubio, T. Tsuruta, T. Tanaka and T. Suzuki, (2009) "Micro- and macroscopic visualization of particulate matter trapping and regeneration processes in wall-

10. P. Karin and K. Hanamura, "Diesel Particulate Matter Trapping and Oxidation on Catalyst Membrane", 2010 JSAE Annual Congress (Spring), Society of Automotive Engineers of Japan Inc, No.355-2010-5424, 21 May, Yokohama-Japan, 2010.
11. P. Karin and K.Hanamura, "Particulate Matter Trapping and Oxidation on a Diesel Particulate Matter" The First TSME International Conference on Mechanical Engineering, TSME, ACE002, 20-22 October, Ubon Ratchathani, Thailand, 2010.
12. H. Oki, P. Karin and K. Hanamura, "Visualization of Oxidation of Soot Nanoparticles Trapped on a Diesel Particulate Membrane Filter", SAE 2011 World Congress, Diesel Exhaust Emission Control, SAE International, 2011-01-0602, April, Detroit-USA, 2011.
13. S. Laosuwan, P. Karin and C. Charoenpornpanich, "Study on Diesel and Biodiesel Particulate Matter Trapping inside a Diesel Particulate Filter", The 7th International Conference of Automotive Engineer (ICAE-7), TSAE, 28-29 March, Bangkok-Thailand, 2011.
14. C. Charoenphonphanich, P. Ornman, P. Karin, H. Kosaka and N. Chollacoop, "Experimental investigation in combustion characteristics of ethanol-gasoline blends for stratified charge engine", The 17th Small Engine Technology Conference (SETC-2011), SAE No. 2011-32-0551, 8-10 November, Sapporo-Japan, 2011.
15. C. Charoenphonphanich, W. Imerb, P. Karin, K. Hanamura and N. Chollacoop, "Low Temperature Starting Techniques for Ethanol Engine without Secondary Fuel Tank" The 17th Small Engine Technology Conference (SETC-2011), SAE No. 2011-32-0552, 8-10 November, Sapporo-Japan, 2011.
16. P. Karin, H. Oki, K. Hanamura and C. Charoenphonphanich, "Nanostructures and Oxidation Kinetics of Diesel Particulate Matters", Second TSME International Conference on Mechanical Engineering (2nd TSME-ICoME), 19-21 October, Krabi-Thailand, 2011.
17. P. Karin, O. Koonsombatkul and C. Charoenphonphanich, "Oxidation Behaviors of Gasohol Deposit", Second TSME International Conference on Mechanical Engineering (2nd TSME-ICoME), 19-21 October, Krabi-Thailand, 2011.
18. S. Laosuwan, P. Karin and C. Charoenpornpanich, "Thermo-gravimetric Analysis of Biodiesel Diffusion Flame's Particulate Matter", Second TSME International Conference on Mechanical Engineering (2nd TSME-ICoME), 19-21 October, Krabi-Thailand, 2011.

19. Y. Songsaengchan, C. Chareonphonphanich, P. Karin, N. Chollacoop, M. Thongroon, K. Hanamura, "Physical Characterization of Biodiesel Particulate Matter by STEM", Second TSME International Conference on Mechanical Engineering (2nd TSME-ICoME), 19-21 October, Krabi-Thailand, 2011.
20. P. Srichai, C. Chareonphonphanich, P. Ornman, P. Karin, N. Chollacoop, M. Thongroon, "Spray Characteristics of Ethanol and Gasoline in a High-Pressure Chamber by Schlieren Photography Technique" Second TSME International Conference on Mechanical Engineering (2nd TSME-ICoME), 19-21 October, Krabi-Thailand, 2011.
21. Y. Songsaengchan, P. Karin, S. Laosuwan and C. Chareonphonphanich, "Physical and Chemical Characterization of Bio-Oxygenated Particulate Matter", The 8th International Conference of Automotive Engineer (ICAE-8), TSAE, 2-6 April, Bangkok-Thailand, 2012.
22. P. Karin, Y. Songsaengchan, S. Laosuwan and C. Chareonphonphanich, "Nanostructure of Renewable Oxygenated Fuels Particulate Matter", The 4th AUN/SEED-Net RC MeAe 2012, Jan10-11 HCMUT Vietnam, 2012.
23. Y. Songsaengchan, M. Tongroon, P. Karin, N. Chollacoop, C. Chareonphonphanich and K. Hanamura, "Nanostructure Investigation of Biodiesel Particulate Matter", 2012 JSAE Annual Congress (Spring), JSAE, 23-25 May, Yokohama-Japan, 2012.
24. S. Laosuwan, P. Karin, C. Chareonphonphanich and K. Hanamura, "Oxidation Kinetics of Biodiesel Particulate Matters by Using Thermogravimetric Analysis", 2012 JSAE Annual Congress (Spring), JSAE, 23-25 May, Yokohama-Japan, 2012.
25. ปรีชา การินทร์ และ จินดา เจริญพรพาณิชย์, "การศึกษาการใช้เชื้อเพลิงแก๊สผสมกับน้ำมันดีเซลในเครื่องยนต์", การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 20, TSF056, 18-20 ตุลาคม, จังหวัดนครราชสีมา, 2549.
26. ปรีชา การินทร์ และ ศัทธาโนรี ฮานามุระ, "จลนพลศาสตร์เคมีของการออกซิไดส์มลพิษอนุภาคจากเชื้อเพลิงดีเซล", การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 7, EC26, 3-5 พฤษภาคม, จังหวัดภูเก็ต, 2554.
27. ปรีชา การินทร์, "การวิจัยการเพิ่มประสิทธิภาพการกรองมลพิษอนุภาคจากเครื่องยนต์ดีเซล, วารสารอุตสาหกรรมยานยนต์ (Thailand Automotive Institute), รายไตรมาสปีที่ 8 ฉบับที่ 3 กรกฎาคม-กันยายน หน้า 16-24, 2554.

- flow diesel particulate filters”, International Journal of Engine research, Professional Engineering Publishing, Vol.10, No.5/2009, pp.305-321.
3. P. Karin, L. Cui, P. Rubio, T. Tsuruta and K. Hanamura, (2009) “Microscopic Visualization of PM Trapping and Regeneration in Micro-Structural Pores of a DPF Wall”, SAE International Journal of Fuels and Lubricants, SAE International, Vol.2 No.1, pp.661-669.
 4. P. Karin and K. Hanamura, (2010) “Microscopic Visualization of PM Trapping and Regeneration in a Diesel Particulate Catalyst-Membrane Filter (DPMF)”, Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan, Society of Automotive Engineers of Japan Inc, Vol. 41, No. 1, pp.103-108.
 5. P. Karin and K. Hanamura, (2010) “Microscopic Visualization of Particulate Matter Trapping and Oxidation Behaviors in a Diesel Particulate Catalyst-Membrane Filter”, Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan, Society of Automotive Engineers of Japan Inc, Vol.41, No.4, pp.853-858.
 6. P. Karin and K. Hanamura, (2010) “Particulate Matter Trapping and Oxidation on Catalyst-Membrane”, SAE International Journal of Fuels and Lubricants, SAE International, Vol.3 No.1 pp.368-379.
 7. H. Oki, P. Karin and K. Hanamura, (2011) “Visualization of Oxidation of Soot Nanoparticles Trapped on a Diesel Particulate Membrane Filter”, SAE International Journal of Engines, SAE International, Vol. 4 no. 1 pp.515-526.
 8. P. Karin, Y. Songsaengchan, C. Charoenphonphanich and S. Laosuwan, (2012) “Nanostructure of Renewable Oxygenated Fuels Particulate Matter”, ASEAN Engineering Journal, AUN/SEET-Net, Publishing Process.

การเสนอผลงานวิชาการ

1. P. Karin, L. Cui, P. Rubio, T. Tsuruta and K. Hanamura, “Research on Aftertreatment for Clean Diesel Engine toward Next Generation”, The First International Forum on Multidisciplinary Education and Research for Energy Science, Tokyo Institute of Technology Global COE Program, pp, 111-112, 14-17 December, Nikko-Japan, 2008.
2. P. Karin, L. Cui, P. Rubio, T. Tsuruta and K. Hanamura, “Microscopic Visualization of PM Trapping and Regeneration in Micro-Structural Pores of a DPF Wall”, SAE 2009 World Congress,

- SP-2254 Diesel Exhaust Emission Control, SAE International, 2009-01-1476, pp.725-733, 20-23 April, Detroit-USA, 2009.
3. P. Karin and K. Hanamura, "Microscopic Visualization of PM Trapping and Regeneration Phenomena in Diesel Particulate Catalyst-Membrane Filter (DPMF)", 2009 JSAE Annual Congress (Spring), Society of Automotive Engineers of Japan Inc, No.77-09, 20095387, pp. 1-6, 20-22 May, Yokohama-Japan, 2009.
 4. P. Karin and K. Hanamura, "Microscopic Visualization of Particulate Matter Trapping and Oxidation Behaviors in a Diesel Particulate Catalyst-Membrane Filter", 2009 JSAE Annual Congress (Fall), Society of Automotive Engineers of Japan Inc, No.118-09, 20095624, pp. 19-24, 7-9 October, Sendai-Japan, 2009.
 5. P. Karin and K. Hanamura, "Diesel Particulate Matter Trapping and Oxidation on Catalyst Membrane", The second International Forum on Multidisciplinary Education and Research for Energy Science, Tokyo Institute of Technology Global COE Program, 12-16 December, Okinawa-Japan, 2009.
 6. P. Karin, K. Hanamura and I. Yamanaka, "Research on Diesel Particulate Catalyst-Membrane Filter for Clean Diesel Engine toward Next Generation", The First Energy-GCOE CDP Forum – Future Social Standing of Energy Science Doctors- , Tokyo Institute of Technology Global COE Program Poster No. CDP-7, 9 March, 2009.
 7. P. Karin, K. Hanamura and I. Yamanaka, "Soot Trapping and Oxidation on SiC-nanoparticles of a Diesel Particulate Membrane Filter (DPMF), The Second Energy-GCOE CDP Forum – Future Social Standing of Energy Science Doctors- , Tokyo Institute of Technology Global COE Program Poster No. CDP-8, 8 March, 2010. Global COE Program Poster No. CDP-8, 8 March, 2010.
 8. P. Karin and K. Hanamura, "Soot Trapping and Oxidation on SiC-nanoparticles of a Diesel Particulate Membrane Filter (DPMF)", The 5th China-Japan-Korea student symposium, Zhejiang University, Hangzhou-China, 19 March, 2010.
 9. P. Karin and K. Hanamura, "Particulate Matter Trapping and Oxidation on Catalyst-Membrane", SAE 2010 World Congress, Diesel Exhaust Emission Control, SAE International, 2010-10808, 13-15 April, Detroit-USA, 2010.