AEC-37

การดักกรองและออกซิเดชั่นมลพิษอนุภาคเขม่าจากเชื้อเพลิงดีเซลและไบโอดีเซลด้วยอุปกรณ์กรองมลพิษอนุภาค

Trapping and oxidation of diesel and biodiesel particle emissions by particulate filter

นายศรายุธ ดวงแก้ว[1*], นายศริตวรรธน์ รุ่งแสงคำพันธุ์[1], นายอภิลักษณ์ จันทราช[1], นายคมกล้า ศิริชลธรรม[2], ดร.ปรีชา การินทร์[2],ผศ.ดร.จินดา เจริญพรพานิชย์[1]

[1] คณะวิศวกรรมศาสตร์,สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520
[2] วิทยาลัยนานาชาติ,สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520
ติดต่อ: Email: sarayut.dekme@gmail.com, เบอร์โทรศัพท์ : +660854266

บทคัดย่อ

โครงงานนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการศึกษาเกี่ยวกับมลพิษอนุภาคของน้ำมันดีเซลและไบโอดีเซล ซึ่งทดสอบด้วยชุดทดลองที่ออกแบบและสร้างขึ้นซึ่งสามารถดักและกำจัดมลพิษอนุภาคไอเสีย โดยใช้อุปกรณ์กำจัดมลพิษอนุภาคแบบไหลผ่าน (Diesel Particulate Filter , DPF) เพื่อมีความมุ่งหมายที่จะต้องการลดปริมาณมลพิษอนุภาคจากเครื่องยนต์ดีเซล โดยเปรียบเทียบปริมาณมลพิษอนุภาคและปฏิกิริยาทางเคมีของมลพิษอนุภาคจากน้ำมันดีเซลและไบโอดีเซล ซึ่งวัดค่าจากปริมาณความดันตกคร่อมระหว่างขาเข้าและขาออกของตัวอุปกรณ์ตามปริมาณมลพิษที่สะสมภายในตัวกรอง ซึ่งอัตราการปล่อยมลพิษอนุภาคของดีเซลมีค่าโดยประมาณเป็นสองเท่าของไบโอดีเซล รวมถึงการศึกษาเปรียบเทียบปริมาณออกซิเจนที่มีผลต่อปฏิกิริยาออกซิเดชั่นในการสลายมลพิษอนุภาคซึ่งมีการเปรียบเทียบปริมาณ O_2 ที่ 10%,15% และ 21% ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ซึ่งเชื้อเพลิงไบโอดีเซลมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นสูงกว่าเชื้อเพลิงดีเซล และถ้าเทียบที่เชื้อเพลิงเดียวกัน

คำหลัก: มลพิษอนุภาค , ปฏิกิริยาออกซิเดชัน , ไบโอดีเซล , เครื่องยนต์ดีเซล

ABSTRACT

This project would like to study about particulate matter from diesel and bio-diesel. Designed experiment to trap and eliminate particulate matter. By using a Partial-flow Diesel Particulate Filter (DPF) to reduce particulate matter from diesel engine. By comparing quantity and chemical reaction composition of particulate matter by measures pressure drop between the input and output of the device by the amount of particulate matter that accumulate in the filter. Rate of diesel is double compare to biodiesel. Including comparing the amount of oxygen that affects the oxidation reaction at O_2 10%, 15% and 20% at a temperature of 600 Celsius.The biodiesel fuel has oxidation reaction rate higher than diesel. By compared to the same amount of fuel at O_2 21% is the highest oxidation rate

Keywords: Particulate matter ; Oxidation ; Biodiesel ; Diesel Engine

AEC-37

แนะนำผู้ตรวจทานบทความ

1. ชื่อ-สกุล ..... ตำแหน่ง .....
   สถาบัน ..... Email ……..……..

2. ชื่อ-สกุล ..... ตำแหน่ง .....
   สถาบัน ..... Email ……..……..

AEC-37

1. บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

มลพิษอนุภาคจากเครื่องยนต์ดีเซล (DPM) คือมลภาวะที่เกิดจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลที่สามารถสร้างปัญหาให้กับสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์ ดังนั้นต้องกำจัดออกจากไอเสียก่อนปล่อยออกสู่ชั้นบรรยากาศ มลพิษอนุภาคประกอบไปด้วยอนุภาคคาร์บอน สารประกอบคาร์บอนอื่นๆ ซัลเฟต ไนโตรเจนออกไซด์ และโลหะหนักอื่นๆ ในปัจจุบันมีการพัฒนาเทคโนโลยีมาช่วยในการลดมลพิษอนุภาคออกจากไอเสีย เช่น การพัฒนาเครื่องยนต์ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น การปรับปรุงคุณภาพของน้ำมัน เช่น ไบโอดีเซล ซึ่งเป็นการเพิ่มออกซิเจนในโมเลกุลทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์มากขึ้น และเทคโนโลยีที่กำลังพัฒนาอย่างต่อเนื่องคือ การดักจับอนุภาคเขม่าด้วยเครื่องดักจับ (DPF) ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงมากคือ 90% ขึ้นไป [8]

อุปกรณ์กำจัดมลพิษอนุภาค (Diesel Particulate Filter) ทำหน้าที่ในการดักมลพิษอนุภาคและสลายมลพิษอนุภาค โดยทั่วไปอุปกรณ์กำจัดมลพิษอนุภาคทำจากวัสดุเซรามิกส์ เช่น คอร์ดิไรท์(Cordierite)และซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) ประกอบด้วยช่องสี่เหลี่ยมหลายช่องเปิดและปิดซึ่งสลับกันใน ไอเสียถูกบังคับไหลผ่านช่องผนังมีรูพรุนระดับไมครอนสเกลซึ่งใช้ดักมลพิษอนุภาค นอกจากนี้มลพิษที่ถูกสะสมต้องถูกออกซิไดส์เพื่อสลายมลพิษอนุภาคในอุปกรณ์กำจัดมลพิษอนุภาคและลดความดันที่เพิ่มสูงขึ้นในท่อไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซล [9,12]

โครงสร้างระดับนาโนเมตรของมลพิษอนุภาค โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนนทรานสมิสชัน (Transmission Electron Microscope, TEM)และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิง (Scanning Electron Microscope, SEM) และทำการวัดขนาดเฉลี่ย ทั้งอนุภาคเดี่ยวและอนุภาคกลุ่มของมลพิษอนุภาคที่ได้จากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ไบโอดีเซลและดีเซล รวมไปถึงมลพิษอนุภาคที่ได้จากการเผาไหม้ของตะเกียงที่ใช้น้ำมันดีเซลและไบโอดีเซล [10]

โครงสร้างระดับนาโนเมตรโดยใช้การส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (TEM) การกระจายขนาดของโครงสร้าง PM ถูกแสดงโดยภาพจากTEM ภาพขนาดก้อนเฉลี่ยของมลพิษอนุภาคของเชื้อเพลิงไบโอดีเซลและดีเซลประมาณ 30-40 นาโนเมตรและ 50-60 นาโนเมตร ตามลำดับ [5,6]

ปัจจุบันเชื้อเพลิงดีเซลคือเชื้อเพลิงฟอสซิลซึ่งมีอยู่อย่างจำกัดและใช้แล้วหมดไป ไบโอดีเซลจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่ถูกใช้แทนเชื้อเพลิงดีเซล ประเทศไทยสามารถผลิตไบโอดีเซลได้ในประเทศจากน้ำมันปาล์ม น้ำมันสบู่ดำ ข้อดีของไบโอดีเซลคือมีค่ากำมะถันน้อยและมีโมเลกุลของออกซิเจนซึ่งช่วยให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ ซึ่งเป็นผลให้ไบโอดีเซลปล่อยมลพิษอนุภาคน้อยกว่าและขนาดเล็กกว่ามลพิษอนุภาคของเชื้อเพลิงดีเซลซึ่งไบโอดีเซลเป็นคาร์บอนนิวทรอน เนื่องจากไบโอดีเซลผลิตมาจากพืชซึ่งพืชใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในการสังเคราะห์แสง จึงช่วยลดลดการเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ [2,3,4,11]

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1.2.1 เพื่อศึกษาอัตราการปล่อยมลพิษอนุภาคจากเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กโดยใช้น้ำมันดีเซลและไบโอดีเซล

1.2.2 ศึกษาผลกระทบของปริมาณแก๊สออกซิเจนที่มีต่อปฏิกิริยาออกซิเดชั่น

1.3 ขอบเขตการศึกษา

ศึกษาคุณสมบัติของมลพิษอนุภาคที่เกิดจากเชื้อเพลิงดีเซลและไบโอดีเซล และศึกษาเวลาที่ได้จากการดักจับปริมาณมลพิษอนุภาคที่เท่ากัน เพื่อเปรียบเทียบการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นของเชื้อเพลิงดีเซลและไบโอดีเซลโดยใช้อุปกรณ์การดักกรองมลพิษอนุภาคแบบไหลผ่านบางส่วนที่สภาวะโหลด 80 % ของเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก และเปรียบเทียบการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณออกซิเจนที่ 10% 15% และ 21% โดยการใช้เตาเผาอุณหภูมิสูงที่อุณหภูมิคงที่ 600 องศาเซลเซียส

AEC-37

2 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 อุปกรณ์และแผนผังชุดอุปกรณ์ทดลอง

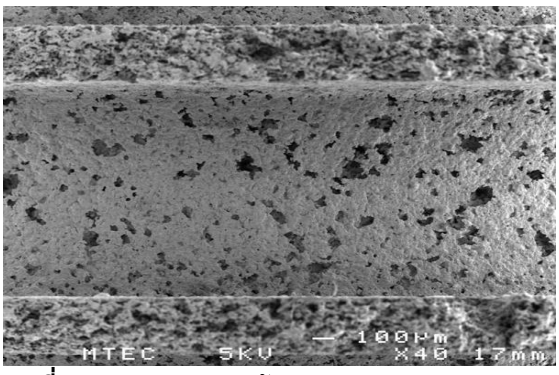
2.1.1 อุปกรณ์กรองมลพิษอนุภาค

การทดลองได้ใช้ทางอุปกรณ์กรองมลพิษอนุภาคแบบไหลผ่านบางส่วน แบบที่เป็นเซรามิค ประเภทคอร์เดียไรท์ ชื่อทางเคมีว่า “แมกนีเซียมอลูมิเนียมซิลิเกต” เปอร์เซ็นต์ความพรุน 55% ขนาดที่ใช้ในการเก็บผลการทดลองกว้าง 3 cm.ยาว 3 cm.ความหนา 7 ช่อง

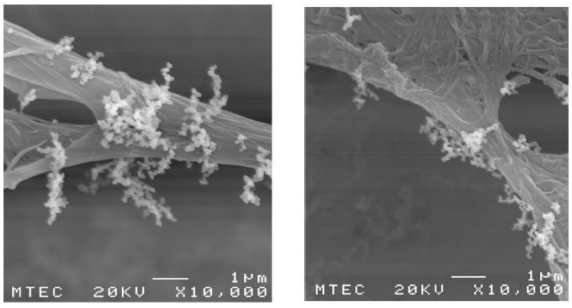
รูปที่ 2.1 อุปกรณ์กรองมลพิษอนุภาคแบบไหลผ่าน

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของอุปกรณ์กรองมลพิษอนุภาค

ชนิด	เซรามิค คอร์เดียไรท์
ความหนาของผนัง	300 ไมโครเมตร
ความพรุน	52 %
ขนาดเฉลี่ยของรู	10 – 50 ไมโครเมตร
ความหนาแน่นของเซลล์	300 เซลล์ต่อตารางนิ้ว

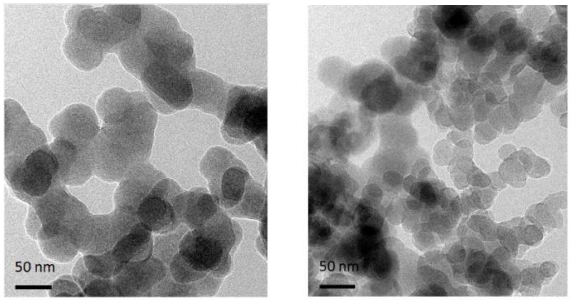


รูปที่ 2.2 ภาพการส่องกล้อง SEM ของ DPF surface pores [5]



(ก) (ข)

รูปที่2.3 (ก)ภาพส่องกล้อง SEM ของมลพิษอนุภาคดีเซล,(ข)ภาพส่องกล้อง SEM ของมลพิษอนุภาคไบโอดีเซล [6]



(ก) (ข)

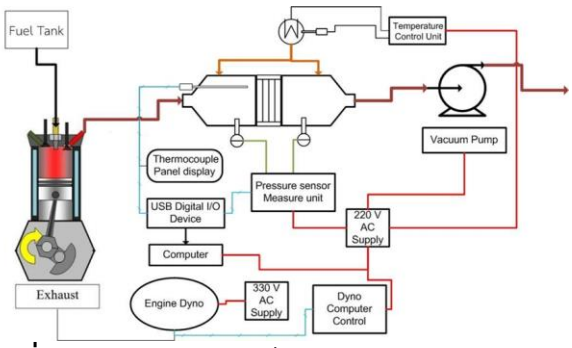
รูปที่2.4 (ก)ภาพส่องกล้อง TEM มลพิษอนุภาคดีเซล,(ข)ภาพส่องกล้อง TEM มลพิษอนุภาคไบโอดีเซล [6]

2.1.2 เตาเผาอุณหภูมิสูง (Furnace)

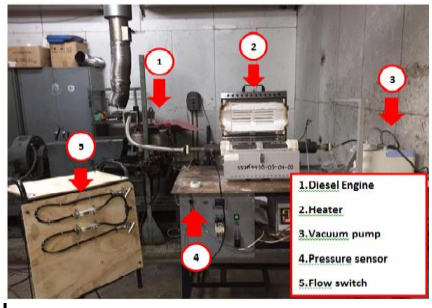
เตาเผาอุณหภูมิสูง (Furnace) เป็นอุปกรณ์ทำความร้อนที่มีหลักการพื้นฐานคือเมื่อกระแสไหลผ่านลวดตัวนำที่มีค่าความต้านทานสูงลวดตัวนำจะร้อนและถ่ายเทความร้อนให้กับโหลดสามารถทนอุณหภูมิได้ถึง 1200 ºC

รูปที่ 2.5 เตาเผาอุณหภูมิสูง

AEC-37



รูปที่ 2.6 แผนผังชุดอุปกรณ์ทดลองการดักมลพิษอนุภาค

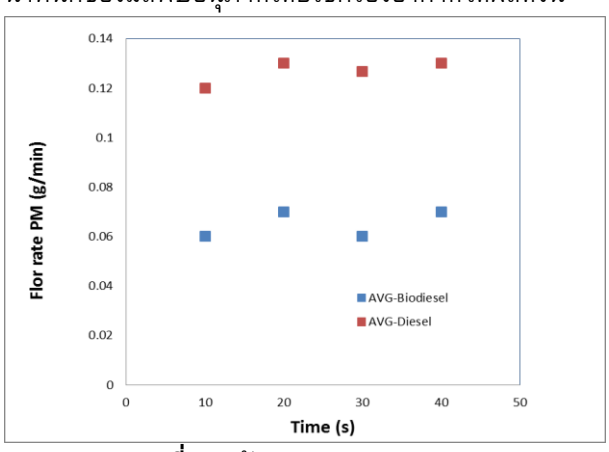


รูปที่ 2.7 ชุดอุปกรณ์ทดลองการดักและสลายมลพิษอนุภาค

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

3.1 อัตราการปล่อยมลพิษอนุภาค(Flow Rate of PMs)

อัตราการปล่อยมลพิษอนุภาค (PMs) ของดีเซลและไบโอดีเซลที่เป็นแบบ partial คือมีส่วนหนึ่งปล่อยสู่บรรยากาศและดักไว้ทดสอบบางส่วน ได้จากการวัดน้ำหนักของมลพิษอนุภาคโดยใช้กรองอากาศได้ผลดังนี้

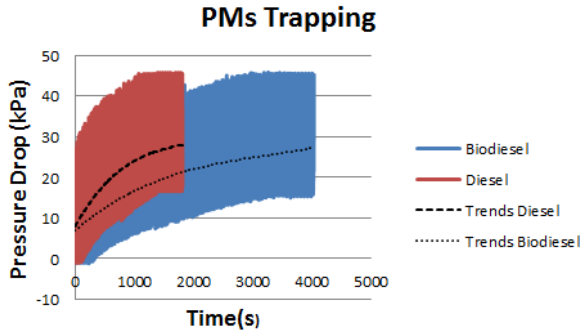


รูปที่ 3.1 อัตราการปล่อย PMs

จากรูปที่ 3.1 ได้อัตราการไหลของมวลมลพิษอนุภาคจากเชื้อเพลิงดีเซลมีค่าประมาณ 0.12 – 0.13 g/min และอัตราการไหลของมลพิษอนุภาคจากเชื้อเพลิงไบโอดีเซลมีค่าประมาณ 0.06 – 0.07 g/min จะเห็นได้ว่าอัตราการปล่อยมลพิษอนุภาคของเชื้อเพลิงดีเซลมีค่าประมาณ 2 เท่าของการปล่อยมลพิษอนุภาคจากเชื้อเพลิงไบโอดีเซล หมายความว่าถ้าเทียบกันเฉพาะเวลาใช้เชื้อเพลิงไบโอดีเซลส่งผลกระทบกับสภาพแวดล้อมน้อยกว่า เป็นเพราะกระบวนการเผาไหม้ไบโอดีเซลทำได้ดีกว่าดีเซลเนื่องจากเชื้อเพลิงไบโอดีเซลมีปริมาณอะตอมออกซิเจนในสูตรทางเคมีมากกว่าเชื้อเพลิงดีเซล

3.2 การดักมลพิษอนุภาค (PMs Trapping)

ความแตกต่างของความดันตกคร่อมเป็นค่าที่นำมาศึกษาพฤติกรรมการดักของอุปกรณ์การกรองเขม่าจากเครื่องยนต์ดีเซล (Diesel Particle Filter : DPF) ค่าที่ได้เป็นไปตามรูปที่3.2



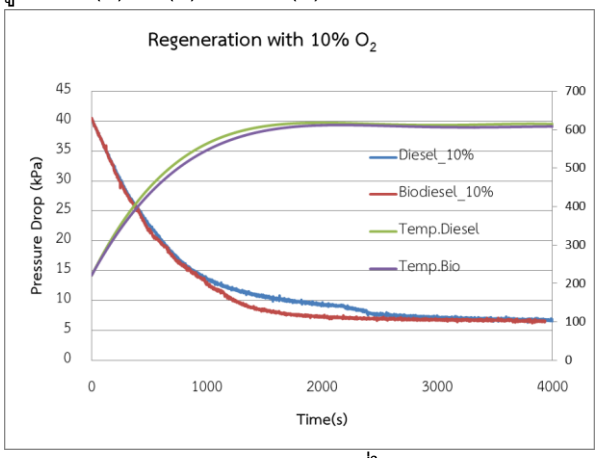
รูปที่3.2 การดักมลพิษอนุภาคของดีเซลและไบโอดีเซล

จากรูป 3.2 จะเห็นว่าค่าของความดันตกคร่อมที่มีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ จนมีค่าคงที่มีค่าประมาณ 45 kPa ของทั้งมลพิษที่ได้จากดีเซล และไบโอดีเซล อุปกรณ์การดักมลพิษอนุภาคดีเซล (DPF) ใช้เวลาในการดักมลพิษอนุภาคเป็นเวลา 1500 วินาทีโดยปริมาณ ในขณะที่ใช้เวลาในการดักมลพิษอนุภาคจากเชื้อเพลิงไบโอดีเซล 3000 วินาทีโดยประมาณ จากผลข้างต้นแสดงให้เห็นว่าปริมาณมลพิษอนุภาคที่ได้จากเชื้อเพลิงดีเซลมีค่าเป็น 2 เท่าโดยประมาณซึ่งสอดคล้องกับการทดลองที่ 1 ที่ค่าอัตราการไหลของมวลมลพิษอนุภาคของไบโอดีเซลมีน้อยกว่า 2 เท่าของมลพิษอนุภาคดีเซล

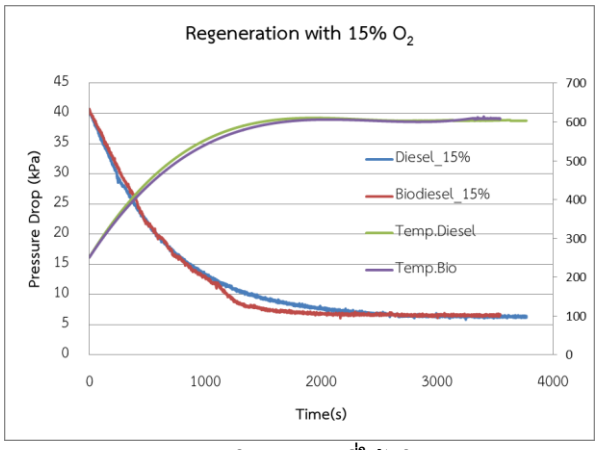
3.3 กระบวนการสลายมลพิษอนุภาค (Regeneration process) และอัตรการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่น (Oxidation Rate)

AEC-37

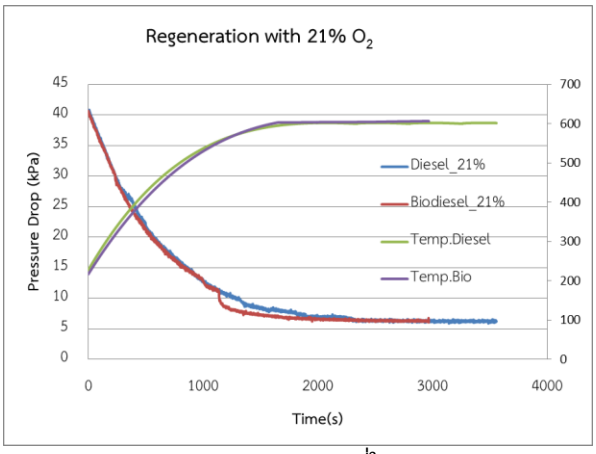
กระบวนการสลายมลพิษอนุภาคต้องอาศัยแก๊สออกซิเจนในการทำปฏิกิริยาและปริมาณออกซิเจนโดยทั่วไปในท่อไอเสียคือ ประมาณ10% ขณะที่ในอากาศมีออกซิเจน 21% จากงานวิจัยอื่นๆ ได้บอกว่ากระบวนการสลายเขม่านี้เกิดขึ้นได้ดีที่ 600 องศาเซลเซียส[4] กระบวนการสลายมลพิษอนุภาคจาก 200 – 600 องศาเซลเซียสและคงที่ที่ 600 องศาเซลเซียส จากรูปที่ 3.3(ก),3.3(ข) และ 3.3(ค)



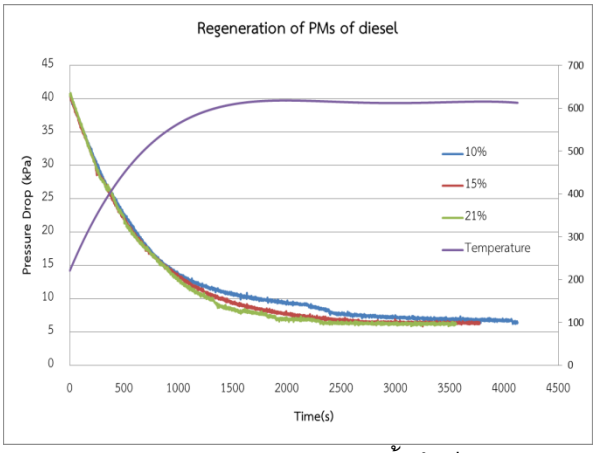
(ก) การสลายมลพิษอนุภาคที่ใช้ปริมาณ O_2 10%



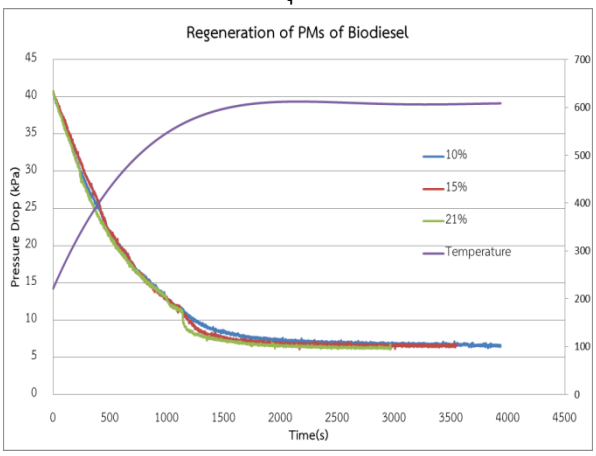
(ข) การสลายมลพิษอนุภาคที่ใช้ปริมาณ O_2 15%



(ค) การสลายมลพิษอนุภาคที่ใช้ปริมาณ O_2 21%



(ง) การสลายมลพิษอนุภาคของน้ำมันดีเซล

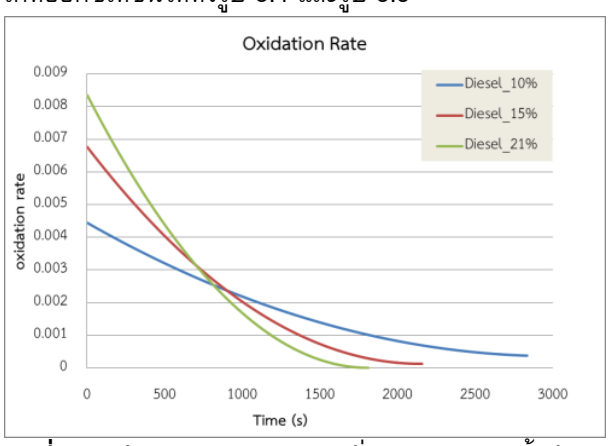


(จ) การสลายมลพิษอนุภาคของน้ำมันไบโอดีเซล

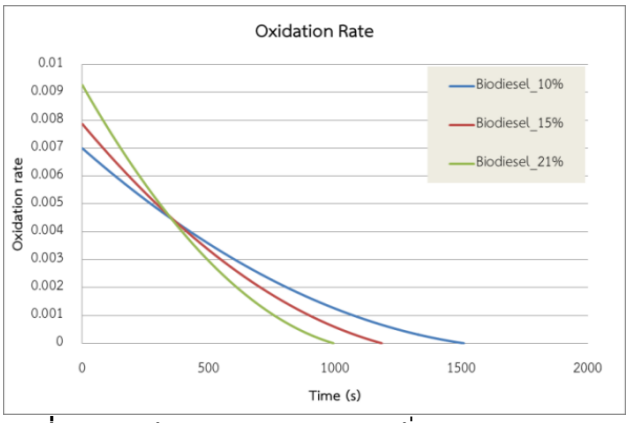
รูปที่3.3 เปรียบเทียบการสลายมลพิษอนุภาคของน้ำมันดีเซลและไบโอดีเซลที่ใช้ปริมาณออกซิเจนค่าต่างๆ (ก) ปริมาณ O_2 10% (ข) ปริมาณO_2 15% (ค) ปริมาณ O_2 21% (ง) การสลายมลพิษอนุภาคของดีเซลที่ปริมาณออกซิเจนต่างกัน (จ) การสลายมลพิษอนุภาคของไบโอดีเซลที่ปริมาณออกซิเจนต่างกัน

AEC-37

ที่ 200 – 600 องศาเซลเซียส มีเพียงก๊าซไนโตรเจนที่ปล่อยออกมาเพื่อวัดความดันตกคร่อมซึ่งมลพิษอนุภาคไม่ทำปฏิกิริยากับ ไนโตรเจนแต่กลับมีการลดลงของความดันตกคร่อมอย่างต่อเนื่อง ซึ่งมีความเป็นไปได้คือ 1. มีอนุภาคออกซิเจนเหลืออยู่เล็กน้อยทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นเกิดขึ้น 2. มีการจัดเรียงมลพิษอนุภาคใหม่ ทำให้โมเลกุลของมลพิษอนุภาคเข้าไปอุดช่องว่างของ DPF เขม่าจะเข้าไปแทรกตามรูเล็กๆของผิว DPF เขม่าจากเชื้อเพลิงดีเซลที่มีขนาดใหญ่จะไปอุดรูบางรูไว้และปล่อยให้อากาศไหลผ่านได้ [4],[5] ได้ดียิ่งขึ้นทำให้ความดันตกคร่อมลดต่ำลง เป็นเพียงการสันนิษฐานเบื้องต้นเท่านั้นต้องมีการศึกษาในเชิงลึกต่อไป ก่อนถึง 600 องศาเซลเซียส ความดันตกคร่อมมีอัตราเริ่มคงที่สังเกตเห็นว่า ความดันตกคร่อมของไบโอดีเซลมีค่าสูงกว่าของดีเซลประมาณ 1 - 2 kPa สันนิษฐานว่าช่วงการจักเรียงใหม่ของมลพิษอนุภาค โมเลกุลของดีเซลซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าของไบโอดีเซลจึงเข้าไปอุดช่องของ DPF ไม่หมดการไหลของก๊าซจึงไหลได้ดีกว่า ในขณะที่มลพิษอนุภาคจากไบโอดีเซลมีขนาดเล็กกว่าจึงเข้าไปอุดช่องของ DPF ได้ดีกว่าความดันตกคร่อมเลยมีค่าสูงกว่า ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสหลังจากปล่อยก๊าซออกซิเจนผสมไนโตรเจนมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในมลพิษอนุภาคที่ได้จากดีเซและไบโอดีเซลวัดอัตราการเกิดออกซิเดชั่นได้ดังรูป 3.4 และรูป 3.5



รูปที่ 3.4 อัตราการเกิดออกซิเดชั่นของเขม่าจากน้ำมันดีเซล



รูปที่ 3.5 อัตราการเกิดออกซิเดชั่นของเขม่าจากน้ำมันไบโอดีเซล

เมื่อกระบวนการRegenerationเกิดนานขึ้นพบว่าค่าความดันตกคร่อมสุดท้ายมีค่าใกล้เคียงกัน หมายความว่าสิ้นสุดกระบวนการ สรุปว่ากระบวนการ Regeneration ของมลพิษอนุภาคจากเชื้อเพลิงดีเซลมีอัตราการเกิดออกซิเดชั่นน้อยกว่าของไบโอดีเซลมากนั้นเป็นเพราะ [6]อนุภาคเขม่าของไบโอดีเซลมีออกซิเจนอยู่ จึงเกิดการออกซิไดซ์ได้ดีกว่าและปริมาณออกซิเจนก็มีผลต่อการเกิดออกซิเดชั่น

4. สรุปผลการทดลอง

อัตราการปล่อยมลพิษอนุภาคของดีเซลมีค่าเป็น 2 เท่าของไบโอดีเซล จึงมีปริมาณเขม่ามากกว่าส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่า ในขณะที่กระบวนการดักเขม่าที่ได้มาจากไบโอดีเซลใช้เวลามากกว่า 2 เท่าของดีเซลเป็นไปตามการทดสอบอัตราการปล่อยเขม่า จึงสรุปได้ว่ากระบวนการ Regeneration ของไบโอดีเซลลดลง ซึ่งสามารถประหยัดพลังงานได้มากกว่าเนื่องจากกระบวนการ Regeneration เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง 600 องศาเซลเซียสในขณะที่อุณหภูมิท่อไอเสียมีค่าเพียง 200 องศาเซลเซียสจึงต้องใช้พลังงานจากห้องเผาไหม้มาใช้ ซึ่งเครื่องยนต์จะสูญเสียพลังงานช่วงนี้ไปการใช้ไบโอดีเซลจึงสามารถลดกระบวนการสูญเสียครั้งนี้ได้ และจากการที่การดักเขม่าไบโอดีเซลเป็นไปอย่างช้าๆ ทำให้ค่าความดันตกคร่อมไม่สูงมาก จึงเป็นการเพิ่มกำลังให้กับเครื่องยนต์ได้อีกทางหนึ่ง

AEC-37

5. เอกสารอ้างอิง

[1] Hong Kong Polytechnic University. “Particulate Trap”, แหล่งที่มา http://www.Industrial Centre ; The Hong Kong Polytechnic University.ac.th,23 มกราคม 2546

[2] Kalogiron M., Samaras Z. (2009). Athermogravimetric kinetic study of uncatalyzed diesel soot oxidation, J Therm Anal Calorim, vol. 98, 2009, pp. 215-224.

[3] Kalogiron M., Samaras Z. (2010). Soot oxidation kinetics from TG experiments, J Therm Anal Calorim, vol.99, 2010, pp. 1005-101.

[4] Karin P., Hanamura K. (2010). Particulate Matter Trapping and Oxidation on a Diesel Particulate. TSMEICOME,2010.

[5] Karin P., Songsaengchan Y., Lausuwan S., Charoenphonphanich C., Hanamura K. Investigation of Biodiesel Particulate Matter in Nanostructure, The 2nd International Conference on Automotive Technology, Engine and Alternative Fuels HCMUT, VNUHCM, December 4-5, 2012

[6] Karin P., Songsaengchan Y., Lausuwan S., Charoenphonphanich C., Chollacoop N. Hanamura K. Nanostructure Investigation of Particle Emission by Using TEM Image Processing Method, *Energy Procedia* 34 (2013) 757 – 766

[7] Karin P., Songsaengchan Y., Lausuwan S., Charoenphonphanich C., Chollacoop N. Hanamura K. Physical Characterization of Biodiesel Particle Emission by Electron Microscopy, *JSAE* 20139150 / *SAE* 2013-32-9150

[8] Koltsakis, G. C.; and Stamatelos, A. M. Prog. Energy Combust. Sci.,1997, 23, 1.

[9] Konstandopoulos, A.G. Kostoglou, M. Vlachos, N. and Kladopoulos, E., Progress in Diesel Particulate Filter Simulation, SAE Technical paper, 2005-01-0946, 2005.

[10] P.Karin, Y. Songsaengchan, S. Laosuwan, ChindaChareonphonphanich, *Nanostructure of Renewable Oxygenated Fuels Particulate Matter*. The 4th AUN/SEED-Net Regional Conference, Vietnam, 2012

[11]S.Laosuwan,P.Karinand,C.Charoenpornpanich,“ Thermo-gravimetric Analysis of Biodiesel Diffusion Flame’s Particulate Matter”, The Second TSME International Conference on Mechanical Engineering (The 2nd TSME-ICoME),19-21October,Krabi-Thailand, 201

[12] Tushima, S. Nakamura, I. Sakashita, S. Hirai, S. and Kitayama, D., Lattice Boltzmann simulation on particle transport and captured behaviors in a 3d-reconstructed micro porous DPF, SAE Technical paper, 2010-01-0534,2010.