

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ พอลิไซคลิกแอโรแมติกไฮโดรคาร์บอนในก๊าซที่เกิดจาก
เครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้น้ำมันไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิง

**Gas-Phase Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Emission of
Diesel Engine Fueled by Biodiesel**

โดย

ผศ.ดร. สุรจิตร ทิมสกุล

คณะวิทยาศาสตร์

รศ.ดร. พีระพงศ์ ทิมสกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

รศ. กำพล ประทีปชัยกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก งบประมาณแผ่นดิน

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ประจำปีงบประมาณ 2555-2556 รหัสโครงการ SCI 550058S-1

ชื่อโครงการวิจัย (ภาษาไทย) พอลิไซคลิกแอโรแมติกไฮโดรคาร์บอนในก๊าซที่เกิดจากเครื่องยนต์
ดีเซลที่ใช้น้ำมันไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิง

(ภาษาอังกฤษ) Gas-Phase Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Emission of
Diesel Engine Fueled by Biodiesel

คณะนักวิจัย และหน่วยงานต้นสังกัด (คณะ/ภาควิชาหรือหน่วยงาน)

1. ผศ.ดร.สุรจิตร์ ทิมสกุล
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112
2. รศ.ดร.พีระพงษ์ ทิมสกุล
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่
จ.สงขลา 90112
3. รศ.กำพล ประทีปชัยกูร
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่
จ.สงขลา 90112

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก งบประมาณแผ่นดินมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ประจำปีงบประมาณ 2555-2556

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาคุณลักษณะของอนุภาค (Particulate matter, PM) และสารพอลิไซคลิกแอโรแมติกไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) ในไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลทั่วไปที่ใช้น้ำมันดีเซล (B0) น้ำมันไบโอดีเซล (B100) และน้ำมันผสมไบโอดีเซล-ดีเซล ที่มีปริมาณไบโอดีเซลเป็น 10 % (B10) 20 % (B20) 40 % (B40) และ 60 % (B60) และน้ำมันที่ผสมเอทานอล 5 % 10 % และ 20 % ในน้ำมัน B20 B40 และ B60 เครื่องยนต์ได้รับการทดสอบบนแท่นทดสอบสมรรถนะเพื่อทำการเก็บตัวอย่างไอเสียที่ผ่านการเจือจางแล้ว ด้วยเครื่องเก็บตัวอย่างอนุภาค Andersen sampler ที่มีชั้นของ inertial filter แทรกอยู่ก่อนชั้น back up filter (ANIF) เมื่อควบคุมอัตราการไหลให้ได้ 28.3 L min^{-1} จะสามารถแยกอนุภาคที่มีขนาดตัดแตกต่างกันได้ 10 ช่วง คือ > 11.0 , $11.0-7.0$, $7.0-4.7$, $4.7-3.3$, $3.3-2.1$, $2.1-1.1$, $1.1-0.65$, $0.65-0.43$, $0.43-0.07$ และ $< 0.07 \mu\text{m}$ ไอเสียที่ผ่านจากเครื่องเก็บตัวอย่างอนุภาคส่วนหนึ่งผ่านเข้าสู่ XAD-2 cartridge เพื่อเก็บตัวอย่างก๊าซ หลังจากนั้นใช้เทคนิคลิควิดโครมาโตกราฟีสมรรถนะสูง (HPLC) ร่วมกับตัวตรวจวัด 2 ชนิด คือ Diode array detector (DAD) และ Fluorescence detector (FLD) เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณสารพอลิไซคลิกแอโรแมติกไฮโดรคาร์บอนทั้ง 16 ชนิดในตัวอย่างอนุภาค และตัวอย่างก๊าซ ผลการทดลองพบว่าอนุภาคที่เกิดจากการเผาไหม้ของน้ำมันทุกชนิดที่ใช้ทดสอบ แสดงการกระจายขนาดอนุภาคแบบโหมคเดี่ยว ขนาดของอนุภาคส่วนใหญ่อยู่ในช่วงของ accumulation mode มีขนาดเล็กกว่า $0.4 \mu\text{m}$ และเมื่อปริมาณของน้ำมันไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณของอนุภาคโดยรวมเพิ่มขึ้น โดยที่ปริมาณของอนุภาคที่เพิ่มขึ้นเป็นอนุภาคขนาด $\leq 1.1 \mu\text{m}$ ส่วนอนุภาคขนาด $> 1.1 \mu\text{m}$ มีปริมาณลดลง ทั้งนี้เป็นผลของปริมาณน้ำในน้ำมันไบโอดีเซล ทำให้อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ลดลง เมื่อนำน้ำมันไบโอดีเซลที่ใช้ทดสอบไปผ่านกระบวนการกำจัดน้ำเพิ่มเติมจนปริมาณน้ำน้อยกว่า 0.05 % พบว่าสามารถลดปริมาณอนุภาคได้ถึง 18 % เมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซล อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าปริมาณของอนุภาคโดยรวมเพิ่มขึ้น ตามสัดส่วนของน้ำมันไบโอดีเซลและน้ำมันที่ผสมเอทานอล แต่ความเข้มข้นของสาร PAHs แต่ละชนิดทั้งในส่วนของก๊าซและส่วนของอนุภาคลดลง โดยผลรวมของสาร PAHs ทั้งหมดในไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลเมื่อใช้น้ำมันผสมไบโอดีเซล-ดีเซลเป็นเชื้อเพลิง ลดลง 19.2-40.4 % ในขณะที่การใช้น้ำมันผสมเอทานอล-ไบโอดีเซล-ดีเซล มีประสิทธิภาพในการลดลงได้มากกว่าเป็น 26.7-43.9 % เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล และโดยส่วนใหญ่กลุ่มสารที่พบเป็นกลุ่มที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ๆ ได้แก่ Naphthalene (Nap) Acenaphylene (Act) Acenaphthene (Ace) และ Fluorene (Flu) นอกจากนี้การใช้น้ำมันไบโอดีเซล (B100) สามารถลดค่า carcinogenic potency equivalent (BaP_{eq}) ได้ 18 % เมื่อเทียบกับการใช้น้ำมันดีเซล (B0)

Abstract

The characteristics of particulate matter (PM) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) emitted from a conventional diesel engine fueled by diesel (B0), biodiesel (B100), blends of 10 %, 20 %, 40 % and 60 % biodiesel in diesel (named as B10, B20, B40 and B60, respectively) and blends of 5 %, 10 % and 20 % ethanol in B20, B40 and B60. (named as B20E5, B20E10, B20E20, B40E5, B40E10, B40E20, B60E5, B60E10 and B60E20) were investigated. The exhaust from the engine operated on a dynamometer was diluted before it was sampled. The particulates from the exhaust were collected using an Andersen cascade impactor with an inertial filter stage (ANIF) attached before a backup filter stage. With the flow rate of 28.3 L min^{-1} , the 50 % cut-off aerodynamic diameters for the first 8 stages are 11.0, 7.0, 4.7, 3.3, 2.1, 1.1, 0.65 and $0.43 \mu\text{m}$, while the inertial filter has a cut-off size of $0.07 \mu\text{m}$ and all particles smaller than $1 \mu\text{m}$ are collected on the backup filter. After ANIF, XAD-2 cartridges were used to retain the gas phase PAHs. Sixteen PAH compounds were analyzed using a high performance liquid chromatography (HPLC) with diode array detector (DAD) and fluorescence detector (FLD). For all fuel types, the size distributions of PM emitted from the engine showed a unimodal behavior in the accumulation mode. The dominant PMs were ultra fine particle ($< 0.4 \mu\text{m}$). The total PM concentration was increased when increasing the blending ratio of biodiesel and the particulates with the size $\leq 1.1 \mu\text{m}$ found to be increased while the particulates with the size $> 1.1 \mu\text{m}$ found to be slightly decreased. This can be explained in the terms of water content in the biodiesel and some properties of blended fuels cause the decreasing of the temperature in the combustion chamber which leads to incomplete combustion. After the biodiesel was heated to remove water to be less than 0.05 %, the total PM concentration was reduced by 18 % in comparison to the use of diesel (B0). Even the total PM concentration was increased with the increasing ratios of biodiesel and ethanol in the blended fuels, the concentration of individual PAH compounds for both gaseous and particulate phases were decreased. The total PAHs emitted from the engine fueled with biodiesel blends were reduced by 19.2-40.4 %, while using ethanol-biodiesel-diesel blends was much more effective for the reduction of the total PAHs by 26.7-43.9 %, compared to diesel fuel. The patterns of PAH compounds indicated a dominance of low molecular weight, including Napthalene (Nap), Acenaphtylene (Act), Acenaphtene (Ace) and Fluorene (Fle). In addition, using biodiesel can reduce the value of carcinogenic potency equivalent (BaP_{eq}) by 18 % compared to diesel.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	i
บทคัดย่อ	ii
ABSTRACT	iii
สารบัญ	iv
- สารบัญตาราง	vi
- สารบัญภาพประกอบ	vii
1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญ และที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	3
2. การตรวจเอกสาร	4
3. วิธีดำเนินการวิจัย	6
3.1 สารเคมีและน้ำมันเชื้อเพลิง	6
3.1.1 สารเคมีสำหรับการสกัดและวิเคราะห์ PAHs	6
3.1.2 น้ำมันเชื้อเพลิง	7
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	8
3.2.1 อุปกรณ์เก็บตัวอย่าง	8
3.2.2 เครื่องยนต์	9
3.2.3 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการสกัด	10
3.3 วิธีการทดลอง	11
3.3.1 การติดตั้งอุปกรณ์และเงื่อนไขการปฏิบัติงาน	11
3.3.2 การสกัดสาร PAHs ด้วยเทคนิค Sonication	12
3.3.3 การวิเคราะห์สาร PAHs ด้วยเทคนิค HPLC	12
4. ผลการทดลองและวิจารณ์	18
4.1 การกระจายของขนาดอนุภาคและความเข้มข้นของอนุภาค	18
4.2 ปริมาณของ PAHs ในส่วนของก๊าซ	22
4.3 ปริมาณของ PAHs ในส่วนของอนุภาค	24

4.4	การประเมินระดับค่าความเป็นพิษของ PAHs	26
4.5	ผลของการผสมเอทานอลในน้ำมันเชื้อเพลิง	27
5.	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยต่อไป	37
5.1	สรุปผลการทดลอง	37
5.2	ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยต่อไป	38
6.	เอกสารอ้างอิง	39
7.	ภาคผนวก	43

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	คุณสมบัติน้ำมันดีเซล (B0) และน้ำมันไบโอดีเซล (B100)	7
2	รายละเอียดของเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้ในงานวิจัย	10
3	เงื่อนไขสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณสาร PAHs ในส่วนของอนุภาค ด้วย HPLC-DAD	13
4	เงื่อนไขสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณสาร PAHs ในส่วนของก๊าซ ด้วย HPLC-FLD	14
5	ความยาวคลื่นสำหรับกระตุ้นและสำหรับตรวจวัดในการวิเคราะห์ ด้วย HPLC-FLD	14
6	ค่าความเข้มข้นต่ำสุดของสาร PAHs ที่สามารถตรวจพบได้	16
7	เปอร์เซ็นต์การคืนกลับ (Recovery) ของสาร PAHs แต่ละชนิด	17
8	คุณสมบัติน้ำมันดีเซล (B0) และน้ำมันไบโอดีเซล (B100)	21
9	แสดงค่า BaP _{eq} ของสาร PAHs แต่ละชนิดของน้ำมันดีเซลและไบโอดีเซล	27
10	คุณสมบัติน้ำมันดีเซล (B0) และน้ำมันไบโอดีเซล (B100) ที่ใช้ในการผสมเอทานอล	28

สารบัญภาพประกอบ

ภาพที่		หน้า
1	XAD-2 cartridge, 400mg/200mg, SKC	8
2	Andersen sampler with inertial filter option (Hata <i>et al.</i> , 2009)	9
3	เครื่องยนต์ดีเซลทั่วไป (Conventional diesel engine) ที่ใช้ในการทดลอง	10
4	แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง	11
5	เครื่อง HPLC-FLD couple with DAD (Agilent, 1100) ที่ใช้ในการวิเคราะห์สาร PAHs	13
6	โครมาโตแกรมของสารมาตรฐาน PAHs 16 ชนิด ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC-DAD	15
7	โครมาโตแกรมของสารมาตรฐาน PAHs 16 ชนิด ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC-FLD	15
8	การกระจายของขนาดอนุภาคที่เกิดจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลเมื่อใช้น้ำมันไบโอดีเซลผสมแต่ละชนิด	19
9	ความเข้มข้นของอนุภาคโดยรวมที่เกิดจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลเมื่อใช้น้ำมันไบโอดีเซลผสมแต่ละชนิด	19
10	ปริมาณอนุภาคทั้งหมดในไอเสียจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลเมื่อใช้น้ำมันที่มีส่วนผสมของน้ำมันไบโอดีเซลแตกต่างกัน	20
11	สัดส่วนของอนุภาคขนาดต่าง ๆ ในไอเสียจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลเมื่อใช้น้ำมันที่มีส่วนผสมของน้ำมันไบโอดีเซลแตกต่างกัน	20
12	เปรียบเทียบความเข้มข้นของอนุภาคโดยรวมที่เกิดจากเครื่องยนต์ดีเซลเมื่อใช้น้ำมันดีเซล (B0) ไบโอดีเซล (B100) และไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการกำจัดน้ำ (B100 heated)	21
13	ความเข้มข้นของPAHs แต่ละชนิดที่อยู่ในก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลเมื่อใช้น้ำมันไบโอดีเซลผสมแต่ละชนิด	22
14	สัดส่วนโดยมวลของ PAHs ที่อยู่ในก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลเมื่อใช้น้ำมันไบโอดีเซลผสมแต่ละชนิด เปรียบเทียบ 2-3 ring PAHs และ 4-6 ring PAHs	23
15	ผลรวมของPAHs ที่อยู่ในก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลเมื่อใช้น้ำมันไบโอดีเซลผสมแต่ละชนิด	23

16	PAHs ในอนุภาคขนาดต่าง ๆ ที่เกิดจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซล เมื่อใช้น้ำมันไบโอดีเซลผสมที่แตกต่างกัน	24
17	ความเข้มข้นของPAHs แต่ละชนิดที่อยู่ในอนุภาคที่ได้จากการเผาไหม้ของ เครื่องยนต์ดีเซลเมื่อใช้น้ำมันไบโอดีเซลผสมแต่ละชนิด	25
18	สัดส่วนโดยมวลของ PAHs ที่อยู่ในอนุภาค (แบ่งตามน้ำหนักโมเลกุล) ที่ได้ จากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลเมื่อใช้น้ำมันไบโอดีเซลผสมแต่ละชนิด	25
19	ผลรวมของPAHs ที่อยู่ในอนุภาคที่ได้จากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซล เมื่อใช้น้ำมันไบโอดีเซลผสมแต่ละชนิด	26
20	ความเข้มข้นของอนุภาคโดยรวมที่เกิดจากเครื่องยนต์ดีเซลเมื่อใช้น้ำมันผสม เอทานอล 5% 10% และ 20% ในน้ำมันไบโอดีเซล-ดีเซลแต่ละชนิด	29
21	สัดส่วนของอนุภาคขนาดต่าง ๆ ในไอเสียจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซล เมื่อใช้น้ำมันผสมเอทานอล 5% 10% และ 20% ในน้ำมันไบโอดีเซล-ดีเซล แต่ละชนิด	30
22	ความเข้มข้นของPAHs แต่ละชนิดที่อยู่ในก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ของ เครื่องยนต์ดีเซลเมื่อใช้น้ำมันผสมเอทานอล 5% 10% และ 20% ในเชื้อเพลิง ไบโอดีเซล-ดีเซลแต่ละชนิด (a) B20 (b) B40 และ (c) B60	32
23	ผลรวมของPAHs ที่อยู่ในก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซล เมื่อใช้น้ำมันผสมเอทานอล 5% 10% และ 20% ในเชื้อเพลิงไบโอดีเซล-ดีเซล แต่ละชนิด	32
24	PAHs ในอนุภาคขนาดต่าง ๆ ที่เกิดจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซล เมื่อใช้น้ำมันผสมเอทานอล 5% 10% และ 20% ในเชื้อเพลิงไบโอดีเซล-ดีเซล แต่ละชนิด (a) B20 (b) B40 และ (c) B60	34
25	ความเข้มข้นของPAHs แต่ละชนิดที่อยู่ในอนุภาคที่ได้จากการเผาไหม้ของ เครื่องยนต์ดีเซลเมื่อใช้น้ำมันผสมเอทานอล 5% 10% และ 20% ในเชื้อเพลิง ไบโอดีเซล-ดีเซล แต่ละชนิด (a) B20 (b) B40 และ (c) B60	36
26	ผลรวมของPAHs ที่อยู่ในอนุภาคที่ได้จากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซล เมื่อใช้น้ำมันผสมเอทานอล 5% 10% และ 20% ในเชื้อเพลิงไบโอดีเซล-ดีเซล แต่ละชนิด	36

1. บทนำ

1.1 ความสำคัญ และที่มา

ปัจจุบันวิกฤติการณ์ทางด้านพลังงานเป็นที่ตระหนักทั่วโลก โดยเฉพาะอย่างยิ่งราคาน้ำมันที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตลอดจนปริมาณการใช้เชื้อเพลิงจากปิโตรเลียมที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งพบว่าในทศวรรษที่ 20 มีการใช้เชื้อเพลิงสูงขึ้นถึงยี่สิบเท่า (Owen และคณะ 2010) โดยความต้องการน้ำมันดิบของโลกจากปี 1994 ถึง 2006 เพิ่มขึ้นเฉลี่ย 1.76 % ต่อปี ซึ่งสูงสุด 3.4 % ในช่วงปี 2003-2004 ได้มีการคาดการณ์ไว้ว่าความต้องการน้ำมันดิบของโลกจากปี 2006 จนถึง ปี 2030 จะเพิ่มขึ้นอีกประมาณ 37% และความต้องการจะมากกว่ากำลังการผลิตในปี 2015 ทั้งนี้เนื่องมาจากการขยายตัวทางด้านเศรษฐกิจ รวมไปถึงความต้องการจากภาคคมนาคมขนส่งที่เพิ่มสูงขึ้น (Energy Information Administration, 2007)

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา หลายๆ ประเทศให้ความสนใจกับพลังงานที่จะมาทดแทนพลังงานจากปิโตรเลียม โดยในปี 2004 ทั่วโลกมีการใช้พลังงานทางเลือกเป็นสัดส่วนประมาณ 7% ของการใช้พลังงานทั้งหมด ซึ่งการใช้พลังงานทางเลือกนอกจากเป็นการทดแทนน้ำมันจากปิโตรเลียมแล้ว ยังช่วยรักษาสีสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

ประเทศไทยก็ประสบกับวิกฤติทางด้านพลังงานเช่นกัน เนื่องจากแหล่งพลังงานหลักของประเทศ คือ น้ำมันปิโตรเลียมที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ โดยในปี 2007 มีการใช้น้ำมันดีเซลสูงถึง 322 พันล้านบาร์เรลต่อวัน (กระทรวงพลังงาน, 2006) และมีการประเมินความต้องการใช้พลังงานของประเทศไทยในปี 2035 จะเพิ่มขึ้นถึง 80% โดยจะนำเข้าน้ำมันเพิ่มขึ้นเกือบ 100% จากปัจจุบันที่นำเข้า 65% (กระทรวงพลังงาน, 2013) ทางภาครัฐจึงได้มีนโยบายส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทน โดยเฉพาะการพัฒนาและส่งเสริมการผลิตน้ำมัน ไบโอดีเซลจากผลิตผลทางการเกษตร เพื่อเป็นการลดการนำเข้าน้ำมันดีเซล

เครื่องยนต์ดีเซลโดยทั่วไปก่อให้เกิดอนุภาคเขม่าที่มีขนาดเล็กมาก ซึ่งเป็นอนุภาคที่มีคาร์บอนรวมตัวกันอยู่ในปริมาณสูง (soot) เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ไม่สมบูรณ์ รวมไปถึงก๊าซต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อสภาวะอากาศของสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเขตอุตสาหกรรมและเขตเมืองที่เป็นที่อยู่อาศัย นอกจากนี้ในประเทศไทยมีการใช้เครื่องยนต์ดีเซลเป็นหลักไม่ว่าจะเป็นการคมนาคมขนส่ง หรือในโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้เครื่องจักร

ก๊าซและอนุภาคที่ปล่อยมาจากเครื่องยนต์โดยเฉพาะเครื่องยนต์ดีเซลสามารถส่งผลเสีย คือ มีโอกาสทำให้เกิดมะเร็งปอดและโรคอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับระบบทางเดินหายใจ (IARC, 1983) ทำให้ทัศนวิสัยในการมองเห็นน้อยลง และทำให้มีการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (MacCracken, 2008) การ

ปลดปล่อยไอเสียของยานพาหนะ โดยทั่วไปขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมัน ประเภทของเครื่องยนต์ การใช้งานและการดูแลรักษาเครื่องยนต์ เป็นต้น

สารพอลิไซคลิกแอโรแมติกไฮโดรคาร์บอน (PAHs) เป็นกลุ่มสารก่อมะเร็งและสารก่อการกลายพันธุ์ เกิดจากการเผาไหม้ของสารชีวมวล (Furuuchi และคณะ 2006) สาร PAHs ส่วนใหญ่พบได้ในอนุภาคขนาดเล็กที่มีขนาด 0.5 μm หรือน้อยกว่า (DeMartinis และคณะ 2002) ซึ่งอนุภาคขนาดเล็กเหล่านี้สามารถเล็ดลอดเข้าไปสู่ระบบทางเดินหายใจชั้นในที่สุดได้ จึงก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพ นอกจากนี้อนุภาคที่มีขนาดละเอียดสามารถแพร่กระจายได้เป็นระยะทางไกลๆ ดังนั้นจึงสามารถแพร่กระจายสาร PAHs ที่เกาะอยู่ด้วยไปสู่บรรยากาศ เกิดเป็นมลภาวะทางอากาศที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และยังพบอีกว่าสาร PAHs ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะพบมากในส่วนของก๊าซ ในขณะที่สาร PAHs ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะพบมากในส่วนของอนุภาคที่ปล่อยออกมาจากเครื่องยนต์ (Bidleman และคณะ 1986)

การศึกษาเกี่ยวกับสารพอลิไซคลิกแอโรแมติกไฮโดรคาร์บอนในไอเสียจากเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้ น้ำมันไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงนั้นยังมีอยู่น้อย และโดยส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาในส่วนของอนุภาค (Chien และคณะ 2009; He และคณะ 2010; Ho และคณะ 2009; Lin และคณะ 2006a; Lin และคณะ 2006b; Turrio-Baldassarri และคณะ 2004; Yang และคณะ 2007) และทางกลุ่มวิจัยได้มีการศึกษาเบื้องต้นโดยวิเคราะห์สาร PAHs ในอนุภาคขนาดต่างๆ (ตั้งแต่ขนาดมากกว่า 11.0 μm จนขนาดละเอียดน้อยกว่า 0.07 μm) ที่เกิดจากการเผาไหม้ของน้ำมันปาล์มผสมในเครื่องยนต์ทางทะเล พบสาร PAHs ทั้ง 16 ชนิดที่ทำกรวิเคราะห์ คือ Naphthalene (Nap), Acenaphthylene (Act), Acenaphthene (Ace), Phenanthrene (Phe), Anthracene (Ant), Fluorene (Fle), Fluoranthene (Flu), Pyrene (Pyr), Benz[a]anthracene (BaA), Chrysene (Chr), Benzo[a]pyrene (BaP), Benzo[b]fluoranthene (BkF), Benzo[k]fluoranthene (BkF), Dibenz[a,h]anthracene (DBA), Indeno[1,2,3-cd]pyrene (IDP), and Benzo[ghi]perylene (BghiPe) โดยชนิดที่มีความเข้มข้นสูงสุด คือ Pyrene (Phoungthong และคณะ 2009) แต่ไม่มีข้อมูลในส่วนของก๊าซ

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาลักษณะของสาร PAHs ทั้งในส่วนของอนุภาคและในส่วนของก๊าซที่ปล่อยออกมาจากเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิง เพื่อที่จะได้เข้าใจถึงสภาพปัญหาที่เกิดขึ้น และความรู้ในส่วนนี้เป็นประโยชน์สำหรับการวางแผนในระดับนโยบาย ไม่ว่าจะเป็นการออกกฎหมาย หรือการส่งเสริมการใช้น้ำมันไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิง ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาลักษณะของอนุภาคในไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลทั่วไปที่ใช้น้ำมันไบโอดีเซลและน้ำมันไบโอดีเซลผสม

2. เพื่อศึกษาคุณลักษณะของสาร PAHs ทั้งในส่วนของอนุภาคและในส่วนของก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้น้ำมันไบโอดีเซลและน้ำมันไบโอดีเซลผสม
3. เพื่อศึกษาผลของชนิดน้ำมันเชื้อเพลิงและอัตราส่วนผสมของน้ำมันเชื้อเพลิงที่กระทบต่อคุณลักษณะของอนุภาค และสาร PAHs ที่ปล่อยจากเครื่องยนต์ดีเซลทั่วไป

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. สร้างระบบเก็บตัวอย่างก๊าซเพื่อต่อกับท่อไอเสียของเครื่องยนต์ที่ใช้ทดสอบ
2. เก็บตัวอย่างอนุภาคโดยใช้ Andersen sampler ที่มีชั้นของ inertial filter แทรกอยู่ก่อนชั้น back up filter (ANIF)
3. เก็บตัวอย่างก๊าซโดยใช้ PUF/XAD-2/PUF cartridge
4. สกัดและวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสาร PAHs ในตัวอย่าง โดยเฉพาะกลุ่มสารก่อมะเร็ง และสารก่อการกลายพันธุ์ โดยใช้เทคนิคลิควิดโครมาโตกราฟีสมรรถนะสูง ร่วมกับตัวตรวจวัดชนิดไดโอดอะเรย์ (HPLC-DAD) และตัวตรวจวัดชนิดฟลูออเรสเซนซ์ (HPLC-FLD)
5. ศึกษาผลของชนิดน้ำมันเชื้อเพลิง และอัตราส่วนผสมของน้ำมันเชื้อเพลิงที่กระทบต่อคุณลักษณะของสาร PAHs ในก๊าซที่ปล่อยจากท่อไอเสีย

2. การตรวจเอกสาร

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้น้ำมันไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงโดยส่วนใหญ่จะศึกษาคุณลักษณะของอนุภาคโดยรวม ตลอดจนสาร PAHs ที่ถูกปล่อยออกมาจากอนุภาค ในส่วนของก๊าซ การศึกษาสาร PAHs ยังมีอยู่น้อย แต่ที่เป็นที่สนใจอย่างมากจะเป็นก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) เนื่องจากมีอันตรายค่อนข้างสูง และเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้น้ำมันไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงจะมีการปล่อยก๊าซ NO_x สูงกว่าเมื่อใช้น้ำมันดีเซล จึงได้มีความพยายามที่จะลดและหาวิธีการควบคุมการเกิดก๊าซ NO_x จากเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้น้ำมันไบโอดีเซล

ในการศึกษา PAHs ทั้งในสภาวะก๊าซและในอนุภาคที่ปล่อยออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก ที่ใช้น้ำมันดีเซลที่กำหนดตามท้องตลาดเป็นเชื้อเพลิงของ Abrantes และคณะ (2004) พบว่าปริมาณ PAHs โดยรวมอยู่ในช่วง $1.133\text{-}5.8801 \text{ mg kg}^{-1}$ และปริมาณของก๊าซ CO_2 จะแปรผกผันกับปริมาณของ PAHs ที่น่าสนใจก็คือ ปริมาณ PAHs ที่พบในส่วนของก๊าซมีมากกว่าในส่วนของอนุภาค โดยที่ในอนุภาคมีปริมาณ 21.5 mg ในขณะที่ส่วนของก๊าซมีปริมาณ 31.4 mg คิดเป็นสัดส่วน 40.6 และ 59.4% ตามลำดับ ส่วนการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างน้ำมันดีเซลและน้ำมันไบโอดีเซลนั้น จากการทบทวนวรรณกรรมของงานวิจัยที่ศึกษาสาร PAHs ที่ปล่อยออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซล พบว่าปริมาณสาร PAHs โดยรวมจะลดลงเมื่อใช้น้ำมันไบโอดีเซลแทนน้ำมันดีเซล แต่จะมีแตกต่างกันในรายละเอียดเมื่อใช้เครื่องยนต์ที่ทดสอบและชนิดของน้ำมันต่างกัน ดังนี้

การศึกษาสาร PAHs และ nitro-PAHs จากเครื่องยนต์ดีเซลของรถบัส โดยใช้น้ำมันดีเซลและไบโอดีเซลจากน้ำมัน Rape seed เป็นเชื้อเพลิง ของ Turrio-Baldassarri และคณะ (2004) ซึ่งทำการทดสอบเครื่องยนต์ตามมาตรฐาน (ECE R49) ผลที่ได้พบว่าการใช้น้ำมันไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงสามารถลดปริมาณของสาร PAHs และ nitro-PAHs ได้ แต่ทำให้เกิดสารในกลุ่มฟอร์มัลดีไฮด์ (formaldehyde) ถึง 18% และการกระจายตัวของขนาดอนุภาคจะอยู่ในช่วง $0.06\text{-}0.3 \mu\text{m}$ โดยที่การใช้ไบโอดีเซลจะให้ขนาดของอนุภาคเล็กกว่าการใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง ในการศึกษาของ Lin และคณะ (2006a และ 2006b) ได้ตรวจสอบสาร PAHs ทั้งในอนุภาคและในก๊าซที่ปล่อยจากเครื่องยนต์ดีเซลประเภทเครื่องยนต์หนักโดยใช้น้ำมันผสมปาล์มไบโอดีเซล-ดีเซล และพาราฟินิก-ปาล์มไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิง ผลที่ได้พบว่า เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล (P0) แล้ว PAHs ที่ปล่อยออกมาจะมีค่าลดลงเมื่อส่วนผสมของน้ำมันปาล์มไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์ที่ลดลงโดยเฉลี่ยของ PAHs เป็น 13.2% ถึง 98.8% และของ BaP_{eq} เป็น 15.2% ถึง 97.6% สำหรับน้ำมันผสมปาล์มไบโอดีเซล-ดีเซล P10 ถึง P100 ในส่วนของอนุภาค (PM) จะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนผสมของน้ำมันปาล์มไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นจาก 0% ถึง 10% และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนผสมของน้ำมันปาล์มไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นจาก 10% ถึง 100%

นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณสารไฮโดรคาร์บอนทั้งหมด (THC) และ CO มีค่าสูงขึ้น ในขณะที่ NO_x และ PAHs มีค่าลดลงกับเวลา

สำหรับการศึกษาน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้วนั้น Yang และคณะ (2007) ได้ศึกษาคุณลักษณะของ PAHs และ trans,trans-2,4-decadienal (*tt*-DDE) ทั้งในส่วนของอนุภาคและในก๊าซจากเครื่องยนต์ดีเซล (Mitsubishi) แบบ 4-สูบ โดยการใช้ น้ำมันดีเซลและน้ำมันดีเซลผสมไบโอดีเซล 20% (B20) เป็นเชื้อเพลิง พบว่าค่าเฉลี่ยในการปล่อย PAHs จากน้ำมันไบโอดีเซลแบบ B20 นั้นมีค่าต่ำกว่าในกรณีของน้ำมันดีเซลเพียงอย่างเดียว (1403 และ 1051 mg bhp-h⁻¹, ตามลำดับ) และพบว่าแม้จะใช้ B20 เป็นเชื้อเพลิง *tt*-DDE ก็ถูกปล่อยออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซลด้วยเช่นเดียวกัน ในส่วนของก๊าซ PAHs ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะมีปริมาณมากกว่าสำหรับเชื้อเพลิงทั้งสองชนิด นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อสตาร์ทเครื่องยนต์ในขณะที่เครื่องยนต์จะมีการปล่อยอนุภาคทั้งในส่วนของ PAHs และ *tt*-DDE ในเปอร์เซ็นต์ที่สูงกว่าเมื่อสตาร์ทตอนเครื่องอุ่น Chien และคณะ (2009) ได้ทดสอบน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้วด้วยเครื่องยนต์ดีเซล (Mitsubishi) แบบ 6 สูบ เพื่อศึกษาการกระจายตัวของอนุภาคและสาร PAHs ที่ระดับชั้นต่างๆ ตั้งแต่ 0.01-10 μm โดยใช้เครื่องเก็บตัวอย่างแบบ micro orifice uniform deposit impactor (MOUDI) และ Nano-MOUDI จากผลการทดลองพบว่าเมื่อมีการเพิ่มสัดส่วนของน้ำมันไบโอดีเซล ทั้งปริมาณของอนุภาคและ PAHs จะลดลงตามลำดับ และค่าการปลดปล่อยของ Bap_{eq} นั้น ก็ลดลงเช่นเดียวกัน

งานวิจัยล่าสุดของ He และคณะ (2010) ศึกษาสาร PAHs ทั้ง 16 ชนิดในไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซล (EURO II) ที่ใช้น้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันถั่วเหลือง พบว่าเมื่อใช้น้ำมันไบโอดีเซล 100% (B100) และน้ำมันดีเซลผสมไบโอดีเซล 20% (B20) สามารถลดปริมาณสาร PAHs โดยรวมได้ 19.4 และ 13.1 % ตามลำดับ โดยที่สามารถลดสาร Benzo[a]Pyrene (BaP) ซึ่งเป็นสาร PAHs ที่มีความเป็นพิษมากที่สุดได้ถึง 15.0% เมื่อใช้น้ำมัน B100 เป็นเชื้อเพลิง ในส่วนของอนุภาคที่พบโดยทั่วไปจะพบสาร PAHs ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ซึ่งจะแตกต่างจากกรณีสถานะก๊าซจะพบสาร PAHs ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า โดยเฉพาะพวก Naphthalene และ Phenanthrene การใช้น้ำมันไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงสามารถที่จะลดปริมาณของ PAHs ได้ทั้งในกรณีของอนุภาคและของก๊าซ โดยเฉพาะในกรณีของอนุภาคที่สามารถลดปริมาณของสาร PAHs ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงได้ ซึ่งสาร PAHs ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะมีความเป็นพิษที่สูงกว่าพวกที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาที่ไม่ได้เก็บตัวอย่างจากเครื่องยนต์โดยตรงแต่เป็นการศึกษาตัวอย่างอากาศที่เก็บในอุโมงค์ Shing Mun ของฮ่องกงซึ่งเป็นที่ที่มีการจราจรหนาแน่น ของ Ho และคณะ (2009) พบว่าสาร PAHs ในส่วนของก๊าซส่วนใหญ่จะเป็น Naphthalene, Acenaphthylene และ Acenaphthene ในส่วนของอนุภาคจะพบ Fluoranthene และ Pyrene ในปริมาณมาก

3. วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาคุณลักษณะของอนุภาคและสารพอลิไซคลิกแอโรแมติกไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) ทั้งในส่วนของอนุภาคและในส่วนของก๊าซที่ถูกปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลทั่วไป (conventional diesel engine) เมื่อใช้น้ำมันไบโอดีเซลและน้ำมันผสมไบโอดีเซล-ดีเซล เป็นเชื้อเพลิงเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล ทำการทดลองโดยเก็บตัวอย่างอนุภาคและศึกษาการกระจายของขนาดอนุภาค โดยเฉพาะอนุภาคขนาดนาโน เก็บตัวอย่างก๊าซ ศึกษาชนิดและปริมาณของสาร PAHs ด้วยเทคนิค high performance liquid chromatography (HPLC)

3.1 สารเคมีและน้ำมันเชื้อเพลิง

3.1.1 สารเคมีสำหรับการสกัดและวิเคราะห์ PAHs

- Acetonitrile (HPLC grade, Lab-scan)
- Dichloromethane (HPLC grade, Lab-scan)
- Dimethylsulphoxide (HPLC grade, Lab-scan)
- Ultra pure water เป็นน้ำที่ผ่านการกำจัดอออนด้วยระบบรีเวิร์สออสโมซิส และทำให้บริสุทธิ์ด้วยเครื่อง Maxima ultrapure water (ELGA) จนได้ค่าความต้านทาน 18.2 MΩ
- สารมาตรฐานของพอลิไซคลิกแอโรแมติกไฮโดรคาร์บอน (PAHs) ตามมาตรฐาน USEPA 610 (certified solution with purity 95.9% - 99.9%, Supelco) ประกอบด้วย PAHs 16 ชนิด ได้แก่

Acenaphthene	: 1000 $\mu\text{g mL}^{-1}$
Acenaphthylene	: 2000 $\mu\text{g mL}^{-1}$
Anthracene	: 100.2 $\mu\text{g mL}^{-1}$
Benz (a) anthracene	: 99.9 $\mu\text{g mL}^{-1}$
Benzo (a) pyrene	: 100.1 $\mu\text{g mL}^{-1}$
Benzo (b) fluoranthene	: 200.0 $\mu\text{g mL}^{-1}$
Benzo (g, h, i) perylene	: 199.9 $\mu\text{g mL}^{-1}$
Benzo (k) fluoranthene	: 99.9 $\mu\text{g mL}^{-1}$
Chrysene	: 100.2 $\mu\text{g mL}^{-1}$
Dibenz (a,h) anthracene	: 199.9 $\mu\text{g mL}^{-1}$
Fluoranthene	: 200.0 $\mu\text{g mL}^{-1}$
Fluorene	: 200.1 $\mu\text{g mL}^{-1}$

Indeno (1, 2, 3-cd) pyrene	: 100.1 $\mu\text{g mL}^{-1}$
Naphthalene	: 1000 $\mu\text{g mL}^{-1}$
Phenanthrene	: 100.1 $\mu\text{g mL}^{-1}$
Pyrene	: 99.9 $\mu\text{g mL}^{-1}$

3.1.2 น้ำมันเชื้อเพลิง

น้ำมันที่ใช้ทดสอบ เป็นน้ำมันไบโอดีเซล (B100) น้ำมันดีเซล (B0) และน้ำมันผสมไบโอดีเซล-ดีเซล อัตราส่วนไบโอดีเซลที่จะศึกษาเป็น 10%, 20%, 40% และ 60% เรียกเป็น B10, B20, B40 และ B60 ตามลำดับ น้ำมันดีเซลซื้อจากปั้มน้ำมันเอสโซ่ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา น้ำมันไบโอดีเซลซื้อมาจากสถานวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจากน้ำมันปาล์มและพืชน้ำมัน มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ซึ่งผลิตจากน้ำมันปาล์มที่ใช้ทอดแล้ว (จากร้านอาหาร และครัวเรือน ในเขตอ.หาดใหญ่) นำมาผ่านกระบวนการทำปฏิกิริยา Transesterification 2 ครั้ง ด้วย Methanol ซึ่งมี Potassium hydroxide (KOH) เป็นคะตะลิสต์ คุณสมบัติของน้ำมันดีเซล (B0) และน้ำมันไบโอดีเซล (B100) แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติน้ำมันดีเซล (B0) และน้ำมันไบโอดีเซล (B100)

คุณสมบัติน้ำมัน	ชนิดน้ำมัน		วิธีทดสอบ
	ดีเซล	ไบโอดีเซล	
Flash Point ($^{\circ}\text{C}$)	73	171	ASTM D93
Cloud Point ($^{\circ}\text{C}$)	9	12	ASTM D97
Pour Point ($^{\circ}\text{C}$)	1	10	ASTM D97
Density at 15 $^{\circ}\text{C}$ (kg m^{-3})	833	878	ASTM D1298
Viscosity at 40 $^{\circ}\text{C}$ (cSt)	3.54	4.66	ASTM D445
Copper Strip Corrosion	No.1a	No.1a	ASTM-D130
Acid Number (mgKOH g^{-1})	0.006	0.32	ASTM D664
Oxidation Stability at 110 $^{\circ}\text{C}$ (hrs)	39.09	2.15	EN 14112:2003-001
Water content (%wt)	0.009	0.090	ISO 12937:2000
Carbon Residue (%wt)	0.1	Less than limit of method	ASTM D4530
Sulfate Ash, mass	< 0.005%	Less than limit of method	ASTM D874-07
Ester content (%)	24.06	95.50	BSEN 14103:2003
Linolenic Acid Methyl Ester content (%)	-	0.56	BSEN 14103:2003

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.2.1 อุปกรณ์เก็บตัวอย่าง

- Diluter สำหรับเจือจางไอเสียจากเครื่องยนต์เพื่อลดอุณหภูมิ และลดการควบแน่นของไอน้ำ

- Air compressor

- อุปกรณ์กำจัดไอน้ำ (Silica gel, GF₆₀, MERCK)

- อุปกรณ์ดักจับอนุภาค และละอองน้ำมัน (HEPA 0.3 μm , 99.97% efficiency)

- อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของกระแสก๊าซ (0.0 - 40.0 mL min⁻¹, Rotameter, Cole-Parmer)

- อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของกระแสก๊าซ (0.0 -1.0 mL min⁻¹, Rotameter, DWYER)

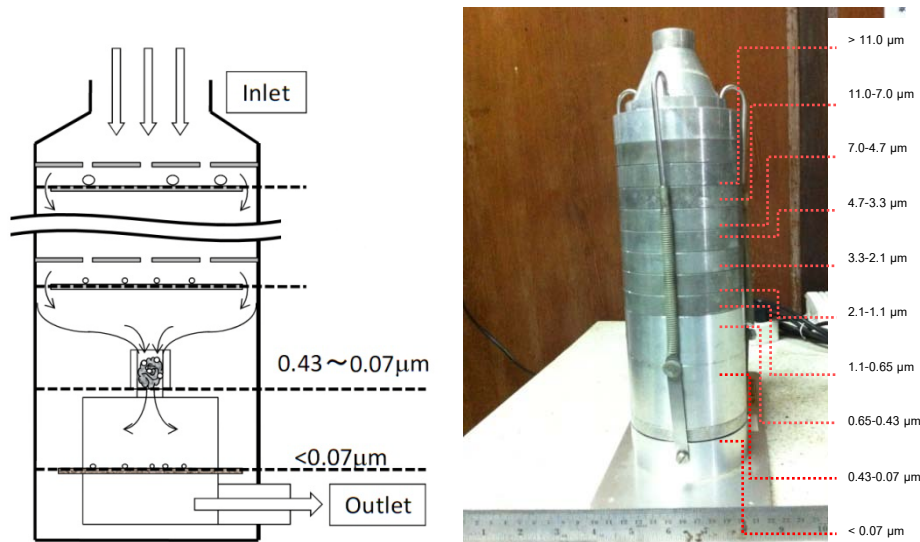
- ปุ่มสุญญากาศ (Ruppracht & Patashnick Co.,Inc.)

- อุปกรณ์เก็บตัวอย่างก๊าซ (XAD-2 cartridge, 400mg/200mg, SKC) แสดงในรูปที่ 1 การเก็บตัวอย่างก๊าซจะอาศัยหลักการการดูดซับ เนื่องจากสาร PAHs ที่จะวิเคราะห์ เป็นกลุ่มสารที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นจึงเลือกใช้ตัวดูดซับที่มีคุณสมบัติไม่มีขั้ว (non-polar หรือ hydrophobic) ซึ่งตัวดูดซับที่เหมาะสมคือ เรซิน XAD-2 (Amberlite XAD-2 Polymeric Absorbent) ทำการบรรจุ เรซิน XAD-2 ในอุปกรณ์ที่ใช้เก็บตัวอย่าง (cartridge) โดยปิดทางเข้าและทางออกด้วยแผ่น PUF (Polyurethane Foam) ปริมาณและความหนาของชั้น เรซิน XAD-2 ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของกระแสก๊าซและเวลาที่ใช้ในการเก็บตัวอย่าง



รูปที่ 1 XAD-2 cartridge, 400mg/200mg, SKC

- อุปกรณ์เก็บตัวอย่างอนุภาค ใช้เป็นตัวดักจับอนุภาคในกระแสดังกล่าวก่อนเก็บตัวอย่างก๊าซ ประกอบด้วย Andersen sampler (AN200 Dylec) ซึ่งมีชั้นของ inertial filter แทรกอยู่ก่อนชั้นของ back up filter (ANIF) ดังแสดงในรูปที่ 2 เมื่อควบคุมอัตราการไหลของกระแสดังกล่าวให้ได้ 28.3 L min^{-1} จะสามารถแยกอนุภาคที่มีขนาดตัดแตกต่างกันได้ 10 ช่วง คือ > 11.0 , $11.0-7.0$, $7.0-4.7$, $4.7-3.3$, $3.3-2.1$, $2.1-1.1$, $1.1-0.65$, $0.65-0.43$, $0.43-0.07$ และ $< 0.07 \mu\text{m}$ อนุภาคจะถูกดักจับบนแผ่นกรองชนิดเส้นใยควอตซ์ (Binder-less quartz fiber filter, Pallflex, 2500QAT-UP) ยกเว้นชั้น inertial filter ($0.43-0.07 \mu\text{m}$) ซึ่งจะใช้เส้นใยสแตนเลส (webbed stainless steel fiber, Nippon Seisen Co. Ltd., SUS-304)



รูปที่ 2 Andersen sampler with inertial filter option (Hata *et al.*, 2009)

3.2.2 เครื่องยนต์

เครื่องยนต์ที่ใช้ทดสอบ เป็นเครื่องยนต์ดีเซลทั่วไป (Conventional diesel engine) สำหรับยานพาหนะ ระบบหัวฉีดแบบ indirect injection (IDI) 4 สูบ ยี่ห้อ TOYOTA แสดงในรูปที่ 3 เป็นเครื่องยนต์มือสองที่ทำการปรับสภาพใหม่ รายละเอียดเพิ่มเติมของเครื่องยนต์ตามตารางที่ 2 ในการทดลองเครื่องยนต์จะวางบนแท่นทดสอบ dynamometer ยี่ห้อ ESSOM รุ่น MT504



รูปที่ 3 เครื่องยนต์ดีเซลทั่วไป (Conventional diesel engine) ที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 2 รายละเอียดของเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้ในงานวิจัยนี้

Parameters	Specifications
Brand	Toyota
Model	2L-T
Engine type	Water cooling serial 4 cylinder SOHC turbo diesel engine
Injection	Indirect injection (IDI)
Displacement	2446 c.c.
Bore × stroke	92 × 92 mm
Volumetric compression ratio	21.0 : 1
Maximum power	69.14 kW @ 4,000 rpm (94 HP @ 4,000 rpm)
Maximum torque	22.0 kg-m @ 2,400 rpm (215.75 N-m @ 2,400 rpm)
Fuel system	Bosch type distribution type (jet pump)

3.2.3 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการสกัด

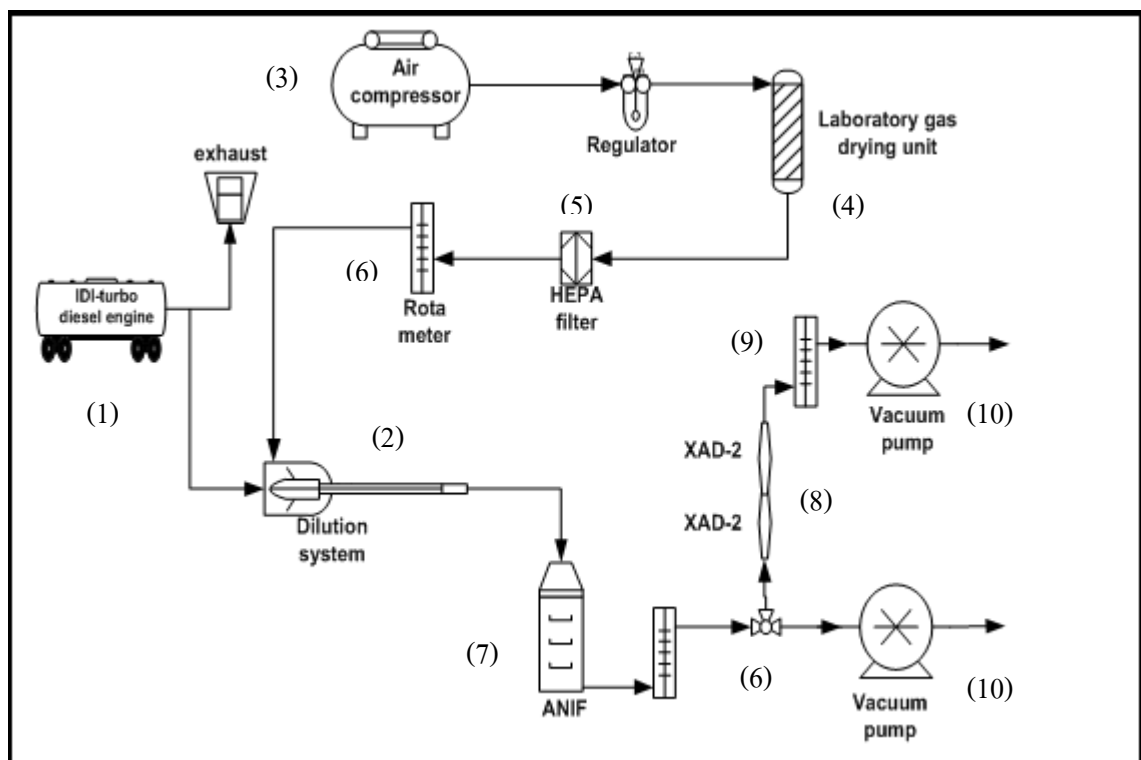
- Ultrasonic bath (Tru-sweep, 2800 HT)
- Rotary evaporator (Buchi, R-210)
- PTFE Syringe filters with pore size of 0.45 μm , diameter of 25 mm and 4 mm

(Vertical, Thailand)

- PTFE membrane disc filter with pore size of 0.45 μm and diameter of 47 mm (Vertical, Thailand)
- Nylon membrane disc filter with pore size of 0.45 μm and diameter of 47 mm (Vertical, Thailand)
- Filter paper No. 42 with diameter of 125 mm (Whatman, USA)
- Disposable syringe, 3 mL (Vertical, Thailand)
- Amber vial, 2 mL with polypropylene screw cap, blue and white silicone/red PTFE septa (Vertical, Thailand)
- Microliter pipette : model NPX-200, 50-200 μL (Nichiryo, Japan)
- General glasswares, such as round bottom flask, volumetric flask, etc.

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การติดตั้งอุปกรณ์และเงื่อนไขการปฏิบัติงาน แสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง

การเก็บตัวอย่าง 1 ครั้ง จะเติมน้ำมันปริมาณ 15 L ลงในเครื่องยนต์ซึ่งวางอยู่บนแท่นทดสอบไดนาโมมิเตอร์ สตาร์ทเครื่องยนต์ ปรับให้มีแรงบิดสูงสุด (Maximum torque) ที่ 2400 รอบต่อ นาที แล้วจึงทำการเก็บตัวอย่าง

ในการเก็บตัวอย่าง (ดูรูปที่ 4) ไอเสียจากเครื่องยนต์ (1) จะถูกเจือจาง 3 เท่าใน Diluter (2) ด้วยอากาศจาก Air compressor (3) ที่ผ่านการกำจัดความชื้น (4) ทำให้สะอาด (5) และควบคุมอัตราการไหลด้วย Needle valve และ Rotameter (6) หลังจากนั้นปั๊มสุญญากาศ (10) จะดูดไอเสียที่เจือจางแล้ว ผ่าน ANIF (7) เพื่อทำการเก็บตัวอย่างอนุภาคเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อัตราการไหล 28.3 L min^{-1} (6) ส่วนหนึ่งของก๊าซที่ผ่าน ANIF แล้วจะถูกดูดผ่าน XAD-2 (8) เป็นเวลา 15 นาที ที่อัตราการไหล 0.5 L min^{-1} (9) เพื่อเก็บตัวอย่างก๊าซ

แผ่นกรองชนิดเส้นใยควอทซ์ (Binder-less quartz fiber filter) และเส้นใยสแตนเลส (webbed stainless steel fiber) ทั้งก่อนและหลังเก็บตัวอย่างจะต้องเก็บไว้ใน Desiccator ที่อุณหภูมิคงที่ ($25 \text{ }^{\circ}\text{C}$) และความชื้นสัมพัทธ์คงที่ (50 \%RH) เป็นเวลา 72 ชั่วโมง แล้วจึงชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งละเอียด ($0.01 \text{ mg precision}$, Sartorius, CP225D) ปริมาณอนุภาคบนตัวอย่างคำนวณได้จากผลต่างของน้ำหนักก่อนและหลังเก็บตัวอย่าง

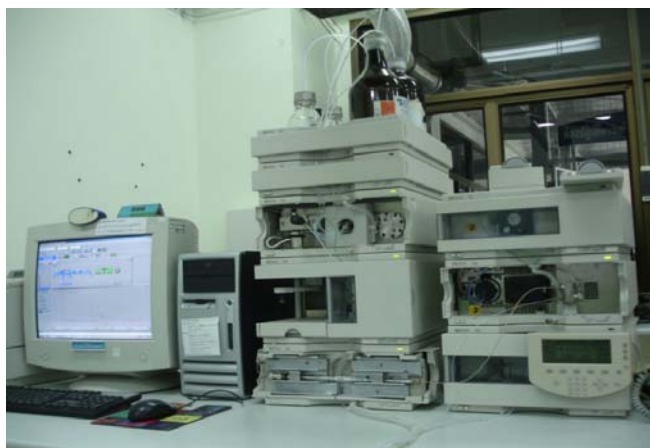
3.3.2 การสกัดสาร PAHs ด้วยเทคนิค Sonication

สาร PAHs ทั้ง 16 ชนิด ในตัวอย่างอนุภาคและตัวอย่างก๊าซจะถูกสกัดด้วยวิธี ซึ่งพัฒนามาจากมาตรฐาน 3550C (method 3550C) โดยใช้เทคนิค Sonication มี Dichloromethane เป็นตัวทำละลาย สำหรับตัวอย่างอนุภาคใช้ครั้งละ 40 mL และตัวอย่างก๊าซใช้ครั้งละ 20 mL สกัดด้วยเครื่อง ultrasonic เป็นเวลา 20 นาที 2 ครั้ง ควบคุมอุณหภูมิของน้ำใน Ultrasonic bath ให้อยู่ในช่วง $4\text{-}10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ กรองส่วนที่สกัดได้ด้วย Syringe filter ($0.45 \text{ }\mu\text{m}$ PTFE) แล้วเติม Dimethyl sulphoxide (DMSO) $50 \text{ }\mu\text{L}$ ก่อนนำไประเหยตัวทำละลายด้วย Rotary evaporator ที่อุณหภูมิห้อง แล้วจึงทำให้เป็น $500 \text{ }\mu\text{L}$ ด้วย Acetonitrile หลังจากนั้นกรองผ่าน Syringe filter ($0.45 \text{ }\mu\text{m}$ PTFE) อีกครั้ง เก็บใน Amber glass vial ขนาด 1.5 mL ที่อุณหภูมิ $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ รอวิเคราะห์ด้วย เทคนิค high performance liquid chromatography (HPLC)

3.3.3 การวิเคราะห์สาร PAHs ด้วยเทคนิค HPLC

การวิเคราะห์หาปริมาณ PAHs ทั้ง 16 ชนิดในตัวอย่างใช้เครื่อง HPLC (Agilent, 1100) ร่วมกับตัวตรวจวัด 2 ชนิด คือ Diode array detector (DAD) และ Fluorescence detector (FLD) แสดงในรูปแบบที่ 5 คอลัมน์ที่ใช้เป็น Vertisep UPS C 18 reversed phase column ($250 \times 4.6 \text{ mm I.D.}$, particle size $5 \text{ }\mu\text{m}$) ต่อกับ Vertisep C18 ($7.5 \times 4.6 \text{ mm I.D.}$, particle size $5 \text{ }\mu\text{m}$) guard column ซึ่งมี injection volume เป็น $25 \text{ }\mu\text{L}$ ซึ่งเงื่อนไขที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างอนุภาคและตัวอย่างก๊าซ แสดงในตารางที่ 3 และ 4 โดยที่ความยาวคลื่น (λ) สำหรับกระตุ้น (excite) และสำหรับตรวจวัด (emit) แสดงในตารางที่ 5

Chromatogram ของสารมาตรฐาน PAHs 16 ชนิด ที่ใช้ในการทดลอง ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC-DAD ดังแสดงในรูปที่ 6 โดยความเข้มข้นของสาร PAH แต่ละชนิดคำนวณได้จากการเทียบ peak area ของ PAH ชนิดนั้น ๆ ใน Chromatogram กับ calibration graph ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสาร PAHs ใน สารละลายมาตรฐาน กับ peak area ให้ความสัมพันธ์เชิงเส้น โดยมีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.9993-1 และสำหรับ Chromatogram ของสารมาตรฐาน PAHs ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC-FLD ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยมีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.9995-1



รูปที่ 5 เครื่อง HPLC-FLD couple with DAD (Agilent, 1100) ที่ใช้ในการวิเคราะห์สาร PAHs

ตารางที่ 3 เงื่อนไขสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณสาร PAHs ในส่วนของอนุภาคด้วย HPLC-DAD

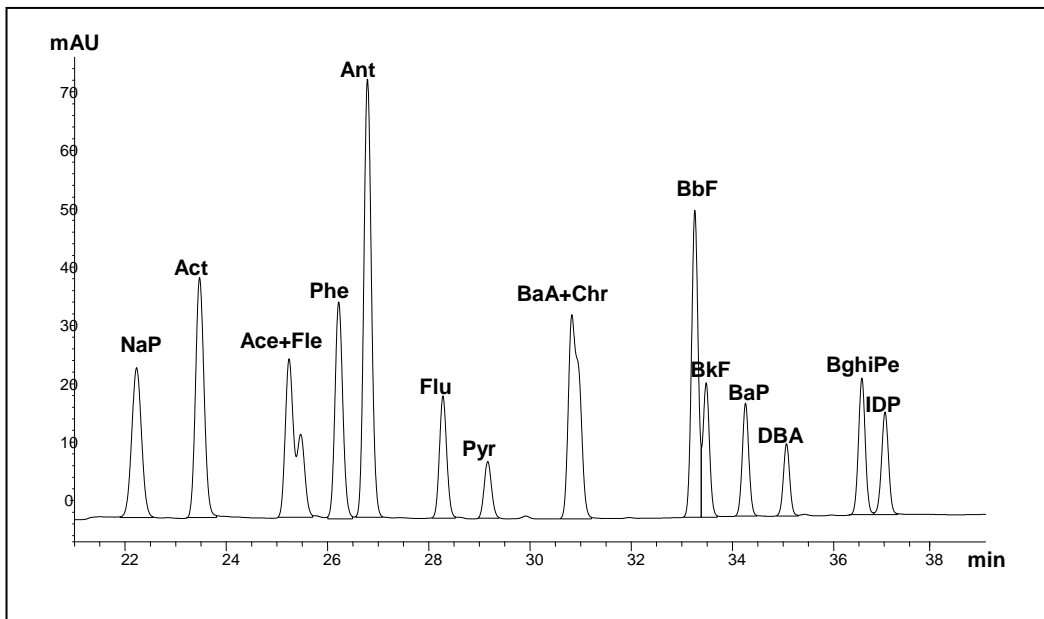
Time (min)	Acetonitrile (%)	Ultra pure water (%)	Flow rate (mL min ⁻¹)
0	35	65	1.0
5	35	65	1.0
20	80	20	1.0
35	100	0	1.0
35	100	0	1.2
37	100	0	1.2
40	100	0	1.0

ตารางที่ 4 เงื่อนไขสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณสาร PAHs ในส่วนของก๊าซด้วย HPLC-FLD

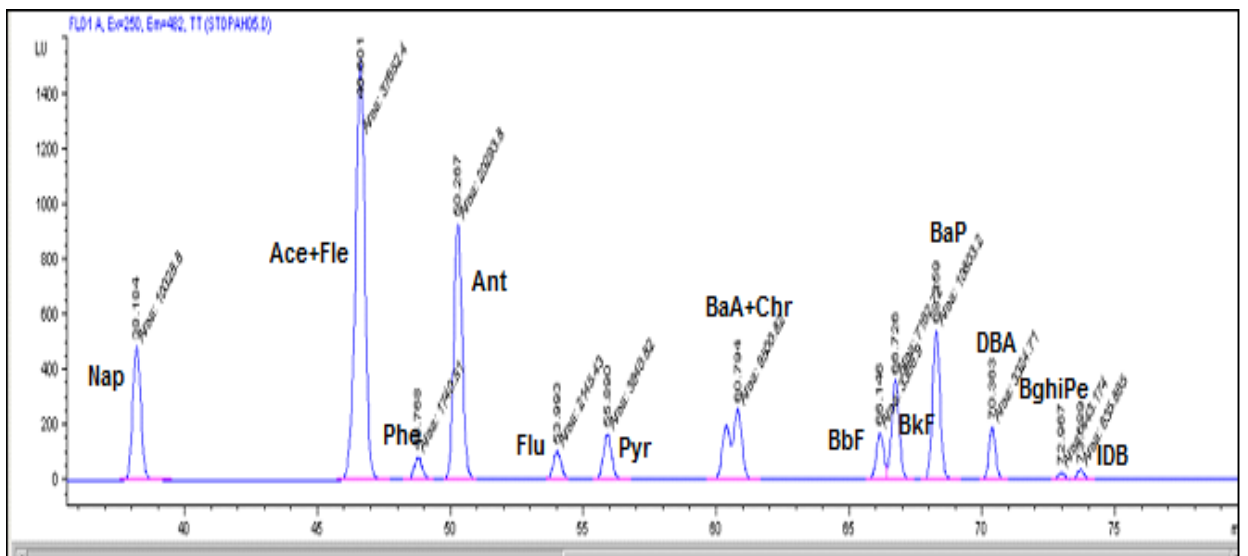
Time (min)	Acetonitrile (%)	Ultra pure water (%)	Flow rate (mL min ⁻¹)
0	35	65	0.6
5	35	65	0.6
20	60	40	0.6
60	90	10	0.6
70	100	0	0.6
80	35	65	0.6

ตารางที่ 5 ความยาวคลื่น (λ) สำหรับกระตุ้น (excite) และสำหรับตรวจวัด (emit) ในการวิเคราะห์ด้วย HPLC-FLD

PAHs compounds	Excitation (nm)	Emission (nm)
Nap, Ace, Fle	280	340
Phe, Ant	250	400
Flu	286	433
Pyr	331	392
BaA, Chr, BbF, BkF, BaP, DBA, BghiPe	264	407
IDP	294	482
-	280	340



รูปที่ 6 โครมาโตแกรมของสารมาตรฐาน PAHs 16 ชนิด ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC-DAD



รูปที่ 7 โครมาโตแกรมของสารมาตรฐาน PAHs 16 ชนิด ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC-FLD

Limit of detection

Limit of detection (LOD) คือความเข้มข้นต่ำสุดที่เครื่องสามารถตรวจพบได้โดยทั่วไปโดยคำนวณจากค่า signal to noise ratio เท่ากับ 3:1 โดยเทียบ peak area ของ PAH ชนิดนั้น ๆ กับ signal to noise ratio ซึ่งพบว่า การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC-DAD มีค่า LOD ของสาร PAHs อยู่ในช่วงที่น้อยกว่า 2.3 - 48.4 ng mL⁻¹ ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ค่าความเข้มข้นต่ำสุดของสาร PAHs ที่สามารถตรวจพบได้

PAHs	Limit of detection(ng mL ⁻¹)
NaP	<24.1
Act	<48.4
Ace+Fle	<28.7
Phe	<2.4
Ant	<2.4
Flu	<4.9
Pyr	<2.3
BaA+Chr	<4.8
BbF	<4.9
BkF	<2.4
BaP	<2.3
DBA	<4.8
BghiPe	<4.8
IDP	<2.3

Recovery

Recovery คือการ spike ความเข้มข้นน้อย ๆ ของสารมาตรฐานที่รู้ค่าที่แน่นอน ลงไปในตัวอย่างเพื่อดูค่าคืนกลับของสารมาตรฐานนั้นๆ โดยคำนวณจากสูตร

$$\% R = \frac{\text{Measured value}}{\text{Real value}} \times 100$$

Measured value = ค่าความเข้มข้นของ PAH ที่วัดได้เมื่อผ่านกระบวนการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ

Real value = ค่าความเข้มข้นจริงของ PAH ที่ใช้ในการทดสอบ

Recovery ของการวิเคราะห์สาร PAHs สำหรับงานวิจัยนี้ พบว่าอยู่ในช่วงระหว่าง 52-101% ดังแสดงในตารางที่ 7

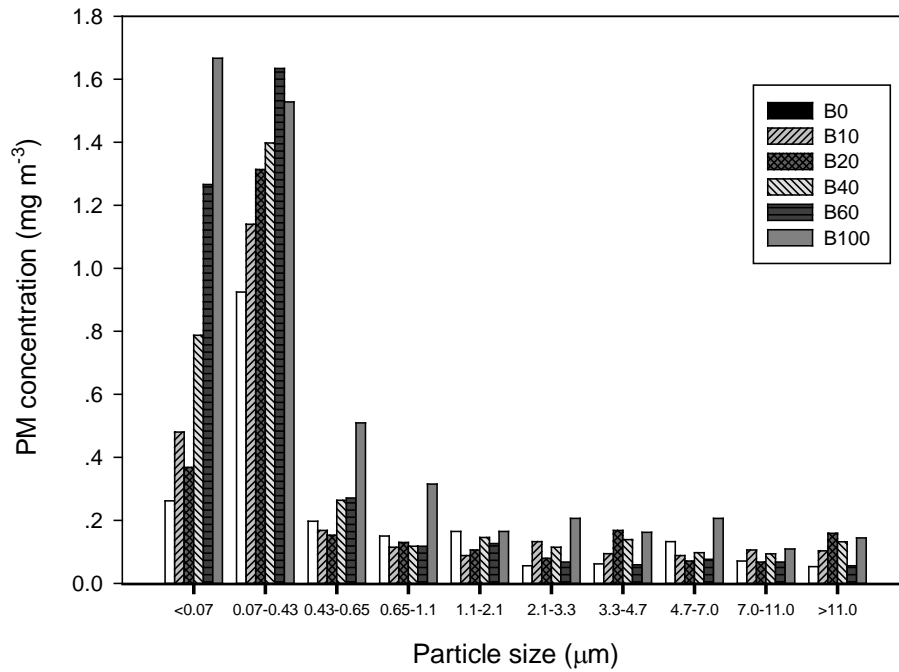
ตารางที่ 7 เปอร์เซ็นต์การคืนกลับ (Recovery) ของสาร PAHs แต่ละชนิด

PAHs	Recovery (%)
Nap	52.41
Act	58.47
Ace+Fle	67.38
Phe	56.53
Ant	76.94
Flu	69.83
Pyr	91.73
BaA+Chr	88.58
BbF	99.14
BkF	100.10
BaP	101.49
DBA	93.12
BghiPe	95.10
IDP	94.89

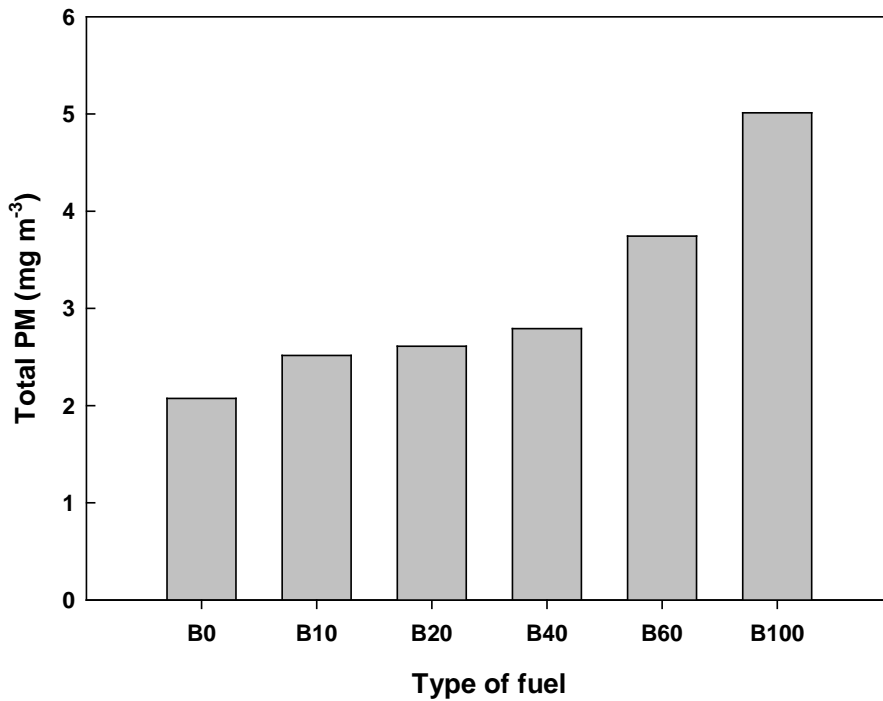
4. ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 การกระจายของขนาดอนุภาคและความเข้มข้นของอนุภาค

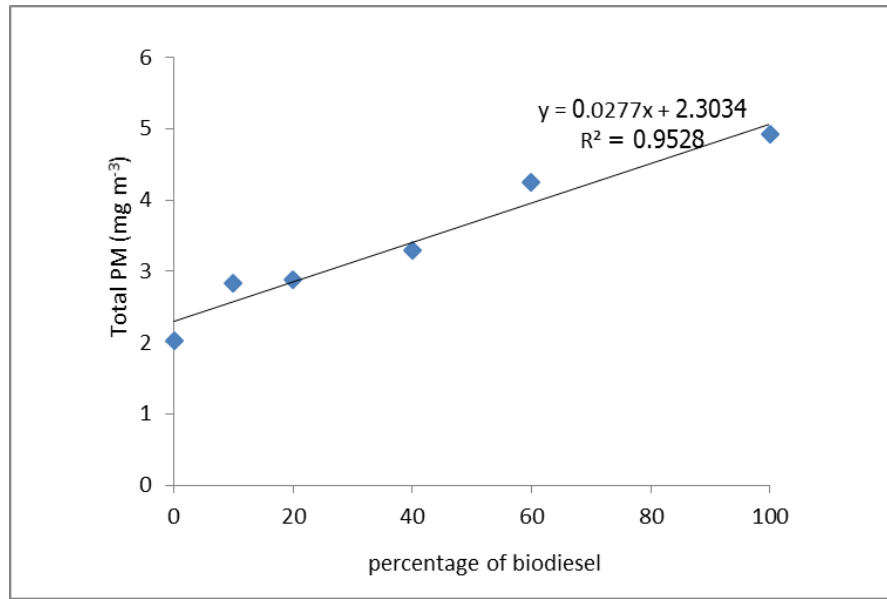
จากการศึกษาไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลที่ความเร็วรอบ 2400 รอบต่อนาที สำหรับน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ศึกษา คือ B0 B10 B20 B40 B60 และ B100 ผลการกระจายของขนาดอนุภาคที่ได้จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแต่ละชนิด เป็นแบบโหมดเดี่ยว (unimodal behavior) แสดงในรูปที่ 8 ซึ่งขนาดของอนุภาคส่วนใหญ่อยู่ในช่วงของ accumulation mode มีขนาดเล็กกว่า $0.4 \mu\text{m}$ และพบว่าเมื่ออัตราส่วนของน้ำมันไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณของอนุภาคโดยรวม (total particulate matter, PM) เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 9 และจากกราฟในรูปที่ 10 แสดงให้เห็นว่าปริมาณอนุภาคในไอเสียของเครื่องยนต์แปรผัน โดยตรงกับปริมาณส่วนผสมของไบโอดีเซล เมื่อใช้น้ำมันที่มีอัตราส่วนผสมของไบโอดีเซลมากขึ้น ทำให้อนุภาคขนาด $\leq 1.1 \mu\text{m}$ มีปริมาณมากขึ้น แต่อนุภาคขนาด $> 1.1 \mu\text{m}$ มีปริมาณน้อยลง ดังแสดงในรูปที่ 11 เมื่อพิจารณาสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลเทียบกับน้ำมันดีเซลในตารางที่ 8 จะเห็นว่าปริมาณน้ำในน้ำมันไบโอดีเซลมากกว่าในน้ำมันดีเซลถึง 10 เท่า จึงทำให้ความร้อนของการเผาไหม้ของน้ำมันไบโอดีเซลลดลง ประกอบกับน้ำมันไบโอดีเซลที่ใช้ในการทดลองนี้ได้จากน้ำมันที่ใช้ทอดแล้วซึ่งพบว่ามีปริมาณเมทิลเอสเทอร์ต่ำกว่ามาตรฐาน (คือต่ำกว่าร้อยละ 96.5) มีผลให้ปริมาณออกซิเจนในไบโอดีเซลน้อยลงตามไปด้วย และมีค่าความหนืดสูงกว่าน้ำมันดีเซลทำให้แตกตัวได้ไม่ดี จึงเผาไหม้ได้ไม่หมด และควบแน่นเป็นส่วนหนึ่งของ SOF (soluble organic fraction) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของอนุภาค ก่อให้เกิดเขม่า (อนุภาค) มากขึ้น และอนุภาคที่เกิดมากขึ้นเป็นอนุภาคขนาดละเอียด ($\leq 1.1 \mu\text{m}$) ซึ่งไม่ดีต่อสุขภาพเนื่องจากสามารถเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจลึกเข้าไปในส่วนของขั้วปอดได้ง่าย จึงได้นำน้ำมันไบโอดีเซลไปผ่านกระบวนการกำจัดน้ำ ให้ปริมาณน้ำในน้ำมันเป็นไปตามข้อกำหนดของกระทรวงพาณิชย์ พบว่าเมื่อนำน้ำมันไบโอดีเซลที่ผ่านการกำจัดน้ำมาทดสอบกับเครื่องยนต์ทำให้ปริมาณอนุภาคลดลงร้อยละ 66.4 เมื่อเทียบกับน้ำมันไบโอดีเซลที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการกำจัดน้ำ และปริมาณอนุภาคน้อยกว่าเมื่อใช้น้ำมันดีเซลถึงร้อยละ 18 ดังแสดงในรูปที่ 12



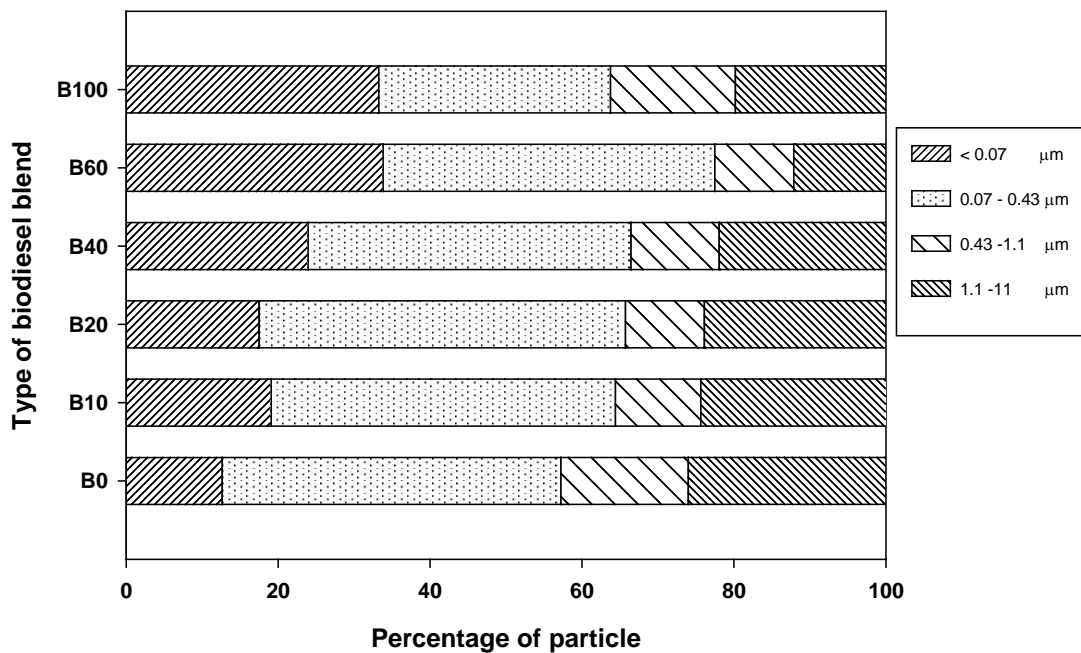
รูปที่ 8 การกระจายของขนาดอนุภาคที่เกิดจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลเมื่อใช้น้ำมันไบโอดีเซลผสมแต่ละชนิด



รูปที่ 9 ความเข้มข้นของอนุภาคโดยรวมที่เกิดจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลเมื่อใช้น้ำมันไบโอดีเซลผสมแต่ละชนิด



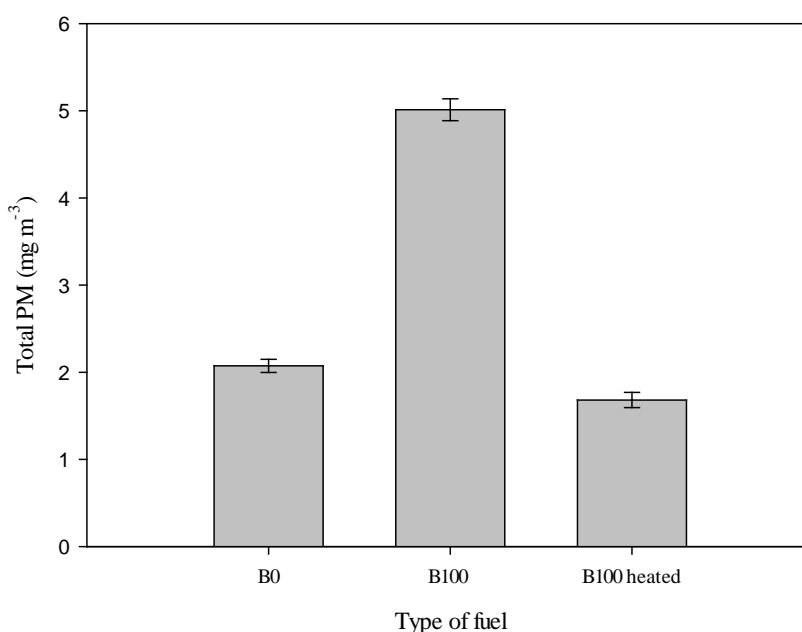
รูปที่ 10 ปริมาณอนุภาคทั้งหมดในไอเสียจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลเมื่อนำน้ำมันที่มีส่วนผสมของน้ำมันไบโอดีเซลแตกต่างกัน



รูปที่ 11 สัดส่วนของอนุภาคขนาดต่าง ๆ ในไอเสียจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลเมื่อนำน้ำมันที่มีส่วนผสมของน้ำมันไบโอดีเซลแตกต่างกัน

ตารางที่ 8 คุณสมบัติของน้ำมันดีเซล (B0) และน้ำมันไบโอดีเซล (B100)

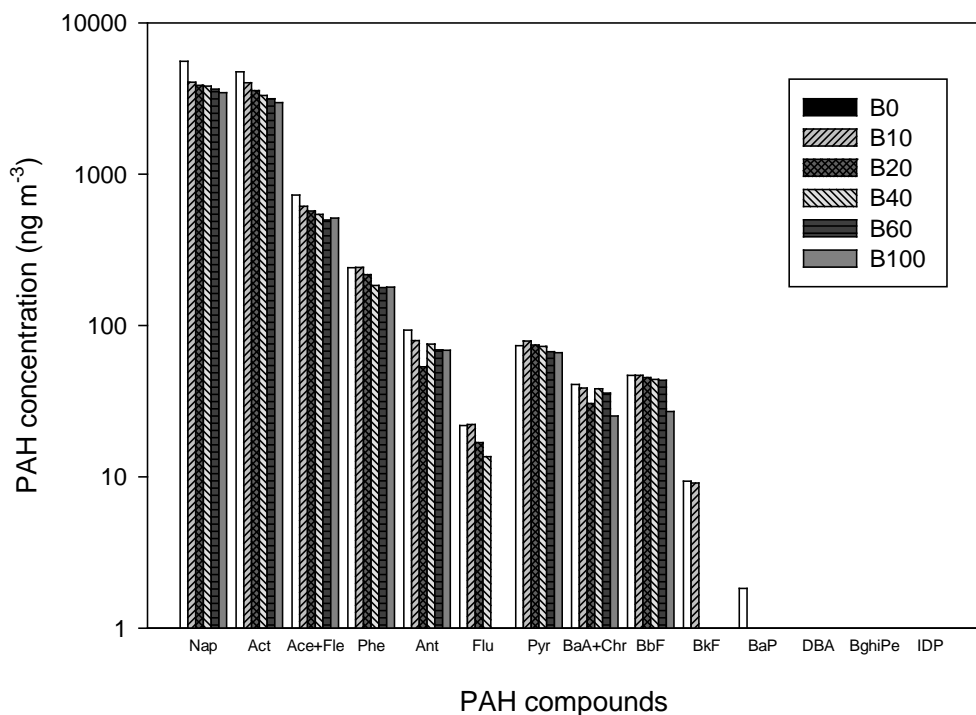
คุณสมบัติน้ำมัน	ชนิดน้ำมัน		วิธีทดสอบ
	ดีเซล (B0)	ไบโอดีเซล (B100)	
Flash Point (°C)	73	171	ASTM D93
Cloud Point (°C)	9	12	ASTM D97
Pour Point (°C)	1	10	ASTM D97
Density at 15 °C (kg m ⁻³)	833	878	ASTM D1298
Viscosity at 40 °C (cSt)	3.54	4.66	ASTM D445
Copper Strip Corrosion	No.1a	No.1a	ASTM-D130
Acid Number (mgKOH g ⁻¹)	0.006	0.32	ASTM D664
Oxidation Stability at 110 °C (hrs)	39.09	2.15	EN 14112:2003-001
Water content (%wt)	0.009	0.090	ISO 12937:2000
Carbon Residue (%wt)	0.1	Less than limit of method	ASTM D4530
Sulfate Ash, mass	< 0.005%	Less than limit of method	ASTM D874-07
Ester content (%)	24.06	95.50	BSEN 14103:2003
Linolenic Acid Methyl Ester content (%)	-	0.56	BSEN 14103:2003



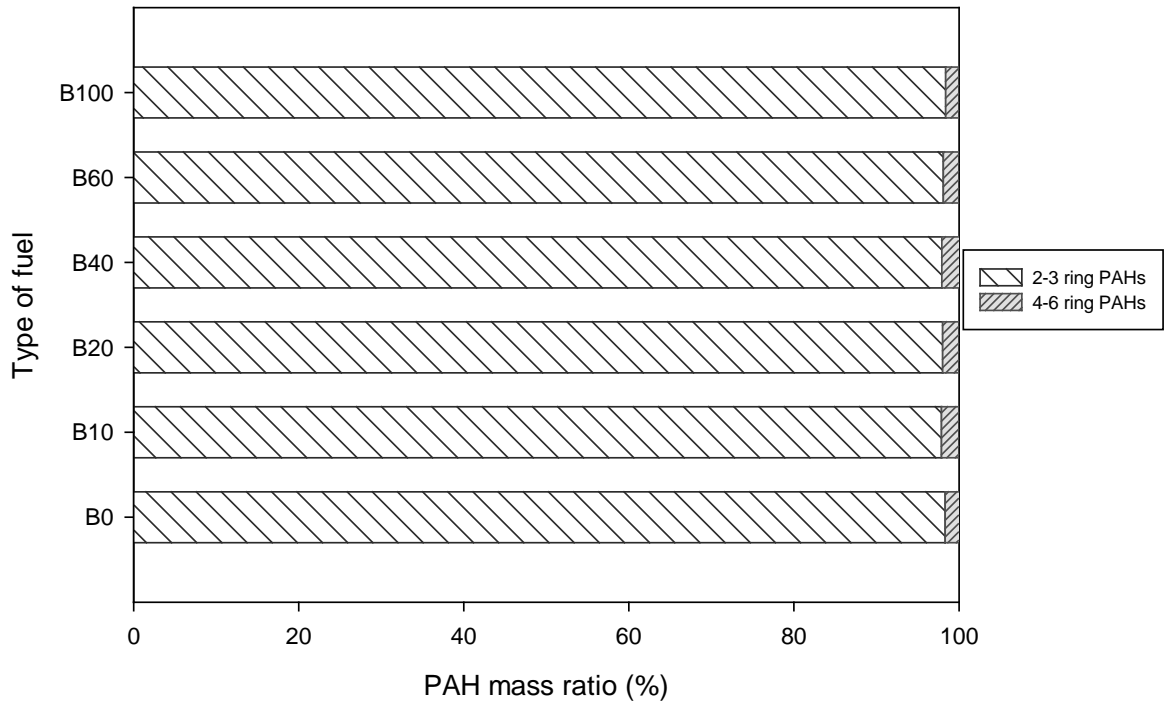
รูปที่ 12 เปรียบเทียบความเข้มข้นของอนุภาคโดยรวมที่เกิดจากเครื่องยนต์ดีเซลเมื่อใช้น้ำมันดีเซล (B0) ไบโอดีเซล (B100) และไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการกำจัดน้ำ (B100 heated)

4.2 ปริมาณของ PAHs ในส่วนของก๊าซ

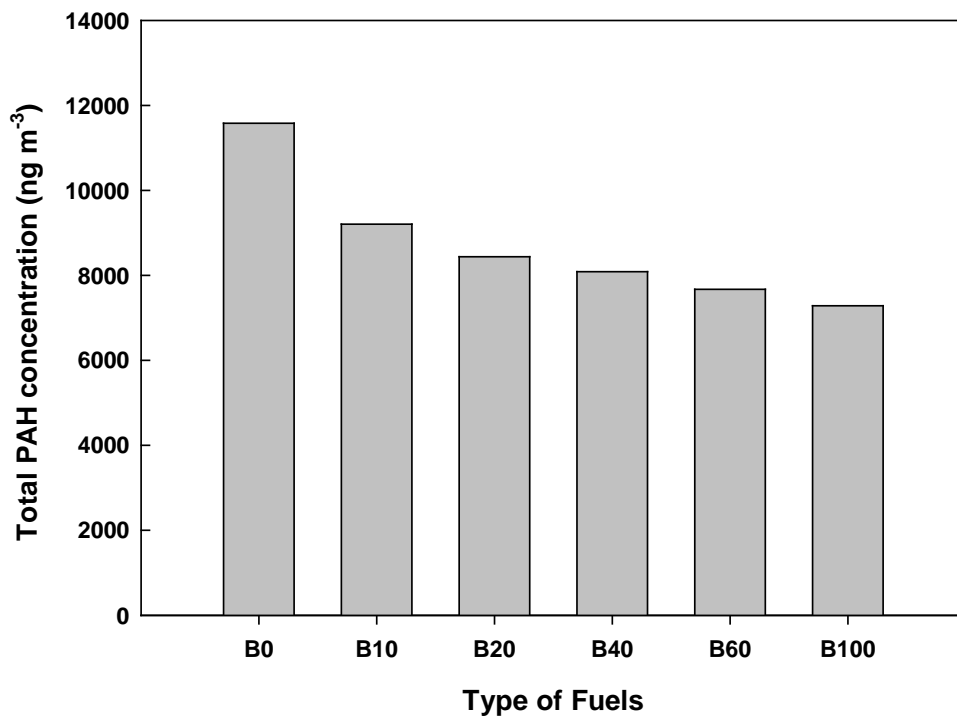
จากการวิเคราะห์ปริมาณของสารพอลิไซคลิกแอโรแมติกไฮโดรคาร์บอน (PAHs) ที่อยู่ในก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ของน้ำมัน B0 B10 B20 B40 B60 และ B100 แสดงในรูปที่ 13 พบว่าความเข้มข้นของ PAHs แต่ละชนิดในก๊าซลดลงเมื่อสัดส่วนน้ำมันไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น และ PAHs ที่พบในก๊าซจะเป็นกลุ่มที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำๆเป็นส่วนใหญ่ เช่น Naphthalene (Nap) และ Acenaphthylene (Act) จากรูปที่ 14 จะเห็นว่าสัดส่วนโดยมวลของ 2-3 ring PAHs มีมากกว่า 4-6 ring PAHs คิดเป็น 98% เมื่อเปรียบเทียบกับทั้งหมด และรูปที่ 15 แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้น้ำมันไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงทำให้ผลรวมของสารพอลิไซคลิกแอโรแมติกไฮโดรคาร์บอน (PAHs) ที่พบในก๊าซลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล (B0) โดยการลดลงคิดเป็นร้อยละ 20 27 30 34 และ 37 สำหรับน้ำมัน B10 B20 B40 B60 และ B100 ตามลำดับ ผลที่ได้สอดคล้องกับรายงาน He และคณะ(2010) ซึ่งพบว่าเมื่อสัดส่วนไบโอดีเซลในเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นทำให้สาร PAHs ในก๊าซลดลงคิดเป็น 3.5-5.7% เช่นเดียวกับ Corrêa และ Arbilla (2006) พบว่าการปล่อยสาร PAHs ลดลง 2.7-17.2% เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล



รูปที่ 13 ความเข้มข้นของ PAHs แต่ละชนิดที่อยู่ในก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลเมื่อใช้น้ำมันไบโอดีเซลผสมแต่ละชนิด



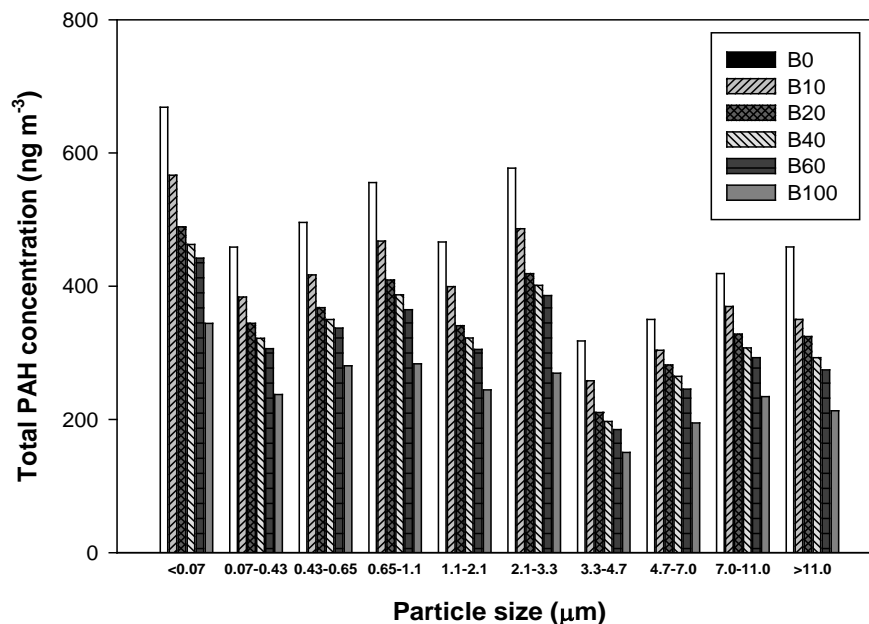
รูปที่ 14 สัดส่วนโดยมวลของPAHs ที่อยู่ในก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลเมื่อใช้น้ำมันไบโอดีเซลผสมแต่ละชนิด เปรียบเทียบ 2-3 ring PAHs และ 4-6 ring PAHs



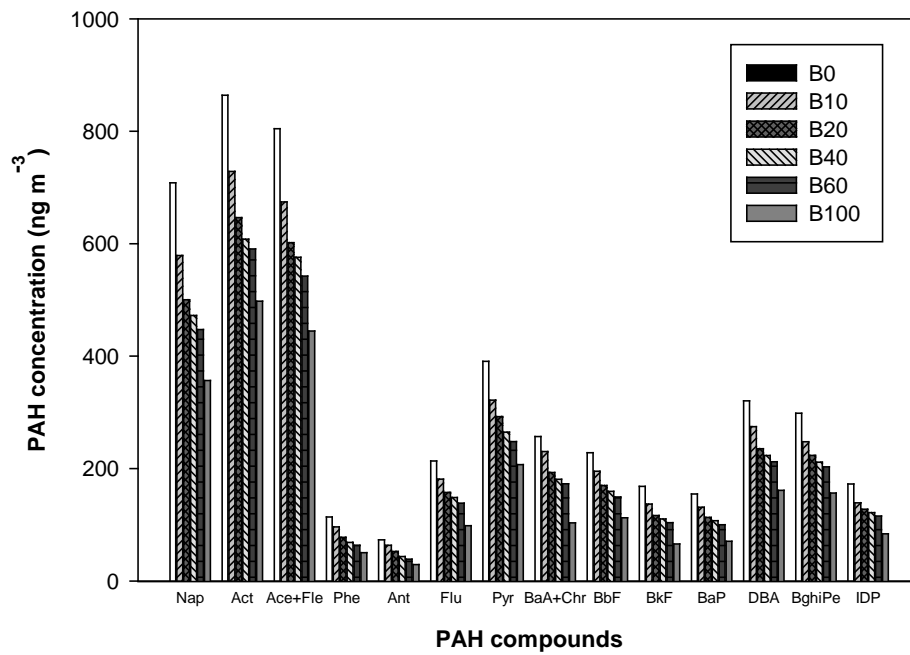
รูปที่ 15 ผลรวมของPAHs ที่อยู่ในก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลเมื่อใช้น้ำมันไบโอดีเซลผสมแต่ละชนิด

4.3 ปริมาณของ PAHs ในส่วนของอนุภาค

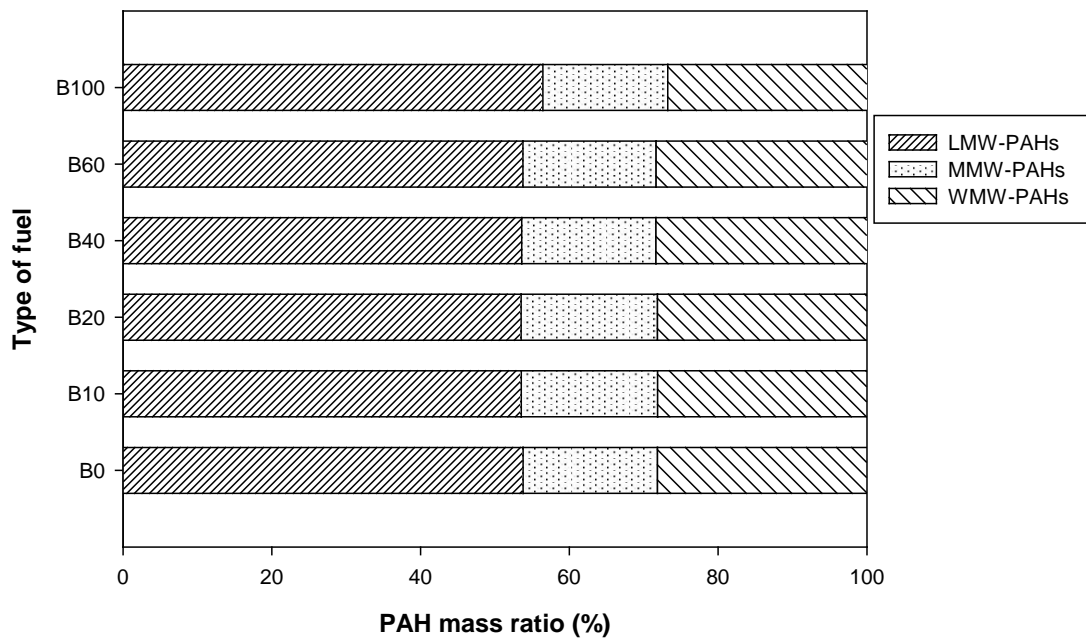
ผลจากการวิเคราะห์ปริมาณสาร PAHs ทั้ง 16 ชนิดที่พบในอนุภาค แสดงในรูปที่ 16 พบว่าผลรวมของสาร PAHs ในอนุภาคทุกขนาดลดลง เมื่อสัดส่วนน้ำมันไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น และ PAHs ส่วนใหญ่จะพบในอนุภาคที่มีขนาด < 3.3 μm ความเข้มข้นของสาร PAHs แต่ละชนิดลดลงตามสัดส่วนน้ำมันไบโอดีเซลที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 17 ซึ่งสาร PAHs ที่พบส่วนใหญ่จะเป็น Napthalene (Nap) Acenaphtylene (Act) Acenaphtene (Ace) และ Fluorene (Fle) เป็นกลุ่มสาร PAHs ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิง (Staat และคณะ 1995, Marr และคณะ 1999) สาร PAHs ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (Low molecular weights, LMW) ประกอบด้วยวงเบนซีน 2-3 วง ได้แก่ Nap, Act, Ace, Fle, Phe และ Ant สาร PAHs ที่มีน้ำหนักโมเลกุลปานกลาง (Mid molecular weights, MMW) ประกอบด้วยวงเบนซีน 4 วง ได้แก่ Flu, Pyr, BaA และ Chr และสาร PAHs ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (High molecular weights, HMW) ประกอบด้วยวงเบนซีน 5-7 วง ได้แก่ BaP, BbF, BkF, DBA, IDP และ BghiPe (Yang และคณะ 2002, Tsai และคณะ 2010) รูปที่ 18 แสดงสัดส่วนโดยมวลของ PAHs ที่แบ่งตามน้ำหนักโมเลกุล ส่วนใหญ่พบสาร PAHs ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ (Staat และคณะ 1995, Lin และคณะ 2006b, Liu และคณะ 2012) สำหรับผลรวมของสาร PAHs แสดงในรูปที่ 19 พบว่าเมื่อสัดส่วนน้ำมันไบโอดีเซลในน้ำมันเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น ทำให้ผลรวมของสาร PAHs ที่พบในอนุภาคลดลง คิดเป็นร้อยละ 16, 26, 30, 34 และ 48 สำหรับน้ำมัน B10, B20, B40, B60 และ B100 ตามลำดับ



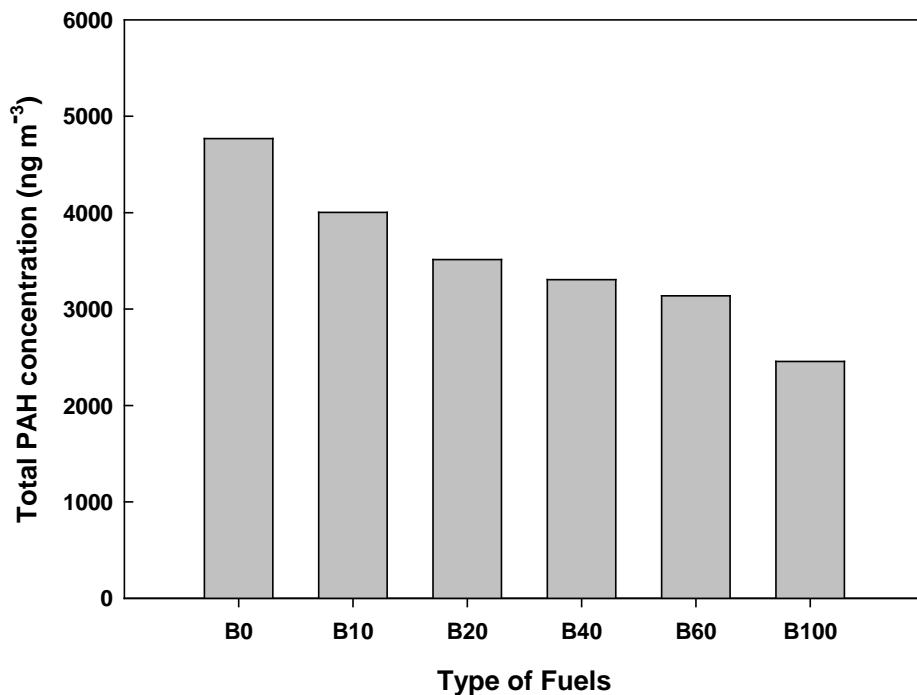
รูปที่ 16 PAHs ในอนุภาคขนาดต่าง ๆ ที่เกิดจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลเมื่อใช้น้ำมันไบโอดีเซลผสมแต่ละชนิด



รูปที่ 17 ความเข้มข้นของPAHs แต่ละชนิดที่อยู่ในอนุภาคที่ได้จากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลเมื่อใช้น้ำมันไบโอดีเซลผสมแต่ละชนิด



รูปที่ 18 สัดส่วนโดยมวลของ PAHs ที่อยู่ในอนุภาค (แบ่งตามน้ำหนักโมเลกุล) ที่ได้จากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลเมื่อใช้น้ำมันไบโอดีเซลผสมแต่ละชนิด



รูปที่ 19 ผลรวมของ PAHs ที่อยู่ในอนุภาคที่ได้จากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลเมื่อใช้น้ำมันไบโอดีเซลผสมแต่ละชนิด

4.4 การประเมินระดับค่าความเป็นพิษของ PAH (Evaluation of PAH corresponding carcinogenicity)

ค่า Toxic equivalency factors (TEFs) ได้ถูกนำมาใช้ในการประเมินค่าความเป็นพิษของสาร PAHs ที่เกิดจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซล โดยเทียบกับ BaP ซึ่งถือว่าเป็นสาร PAHs ที่มีค่าความเป็นพิษ สูง จะกำหนดค่าความเป็นพิษของ BaP ไว้เท่ากับ 1 และสาร PAHs ตัวอื่นจะมีค่าแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับค่าความเป็นพิษของมันเมื่อเทียบกับ BaP สมการสำหรับคำนวณคือ

$$BaP_{eq} = \sum_{i=1}^n TEF_i \times [PAH_i]$$

TEF_i คือ ค่าแฟกเตอร์ค่าความเป็นพิษของสาร PAHs (toxic equivalent factor for PAH congener) แต่ละชนิด

i คือ จำนวน PAH ในที่นี้มีทั้งหมด 16 ตัว

ตารางที่ 9 แสดงค่า BaP_{eq} จากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลและไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิง พบว่าน้ำมันดีเซลจะให้ค่า BaP_{eq} สูงกว่าน้ำมันไบโอดีเซล ดังนั้นเมื่อใช้น้ำมันไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงจะสามารถลดค่าความเป็นพิษของสาร PAHs ได้ 18% เมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซล ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ He และคณะ (2010) ที่สามารถลดค่า BaP_{eq} ได้ 15% เมื่อใช้ไบโอดีเซล (B100) เป็นเชื้อเพลิง

ตารางที่ 9 แสดงค่า BaP_{eq} ของสาร PAHs แต่ละชนิดของน้ำมันดีเซลและไบโอดีเซล

PAHs	B0 (ng/m ³)	B100 (ng/m ³)
Nap	6280.69	3804.22
Act	5615.03	3460.70
Ace+Fle	1532.27	957.05
Phe	354.82	230.14
Ant	166.49	98.45
Flu	235.23	99.16
Pyr	464.42	273.91
BaA+Chr	297.79	129.57
BbF	274.98	140.14
BkF	177.61	66.69
BaP	156.65	71.46
DBA	320.55	162.20
BghiPe	298.41	157.43
IDP	172.48	84.86

4.5 ผลของการผสมเอทานอลในน้ำมันเชื้อเพลิง

จากผลการศึกษาทั้งหมดที่ผ่านมา จะเห็นว่าการใช้น้ำมันไบโอดีเซลผสมเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซล จะช่วยลดปริมาณสาร PAHs ในไอเสียจากเครื่องยนต์ได้ก็จริง แต่อย่างไรก็ตาม น้ำมันไบโอดีเซลที่ใช้ได้มาจากกระบวนการ Transesterification ที่มีเมทานอลเป็นวัตถุดิบ ซึ่งเมทานอลเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจากปิโตรเลียมอยู่ดี ดังนั้นจึงมีรายงานการใช้อทานอลผสมกับน้ำมันดีเซล (ดีโซฮอล์) เนื่องจากเอทานอลเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมักผลผลิตทางการเกษตร เช่น อ้อย น้ำตาล กากน้ำตาล กากอ้อย บีทรูท แป้งมันสำปะหลัง มันเทศ หรือธัญพืชต่างๆ เพื่อเปลี่ยนแปลงจากพืชให้เป็นน้ำตาลแล้วเปลี่ยนจากน้ำตาลเป็นแอลกอฮอล์ โดยอัตราส่วนผสมของเอทานอลต้องไม่เกิน 30% จึงสามารถใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลที่มีจังหวะการฉีดที่สภาวะปกติ (Hulwan และ Josh 2011) และด้วยเหตุที่เอทานอลไม่สามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำมันดีเซลได้ จึงต้องใช้ไบโอดีเซลเป็นสารเติมแต่ง

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาเพิ่มเติมจากข้อเสนอโครงการเดิม คือศึกษาผลของการผสมเอทานอลเข้ากับน้ำมันผสมไบโอดีเซล-ดีเซล ในอัตราส่วนเอทานอล 5% 10% และ 20% ในน้ำมันไบโอดีเซล-ดีเซล (B20 B40 และ B60) เรียกเป็น B20E05, B20E10, B20E20, B40E05, B40E10, B40E20,

B60E05, B60E10 และ B60E20 ตามลำดับ โดยที่คุณสมบัติของ B0 และ B100 ที่ใช้ศึกษาแสดงในตารางที่ 10

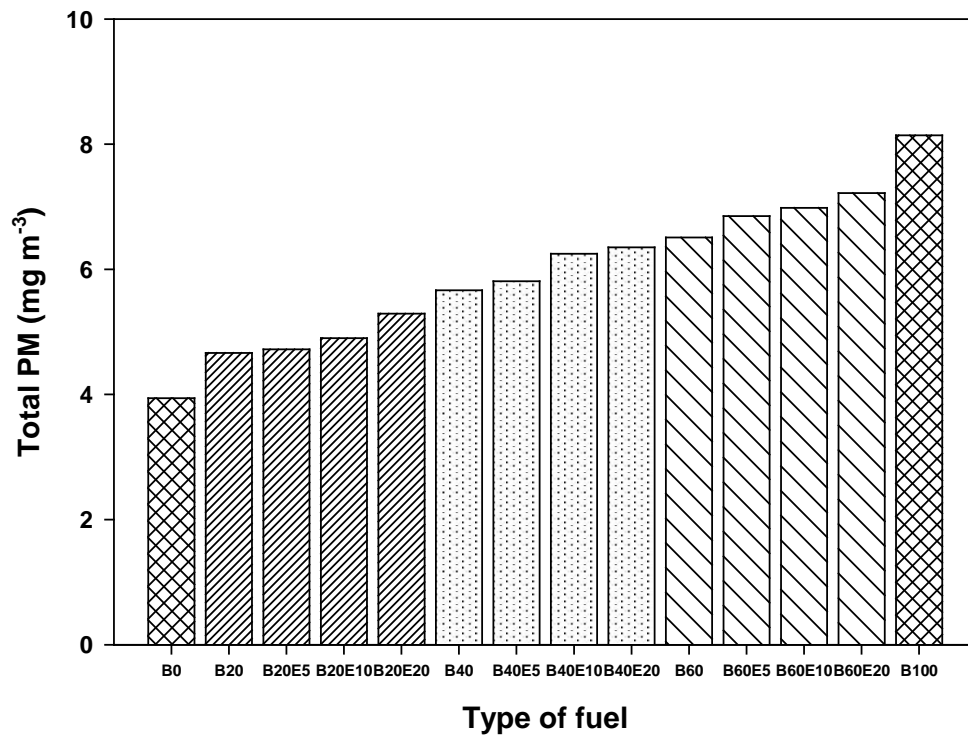
ตารางที่ 10 คุณสมบัติน้ำมันดีเซล (B0) และน้ำมันไบโอดีเซล (B100) ที่ใช้ในการผสมเอทานอล

คุณสมบัติน้ำมัน	ชนิดน้ำมัน		วิธีทดสอบ
	ดีเซล (B0)*	ไบโอดีเซล (B100)	
Flash Point (°C)	72	180	ASTM D93
Pour Point (°C)	-3	7	ASTM D97
Viscosity at 40 °C (cSt)	3.31	5	ASTM D445
Copper Strip Corrosion	No.1a	No.1a	ASTM-D130
Acid Number (mgKOH g ⁻¹)	0.02	0.41	ASTM D664
Oxidation Stability at 110 °C (hrs)	>6	1.13	EN 14112:2003-001
Water content (%wt)	0.009	0.114	ISO 12937:2000
Carbon Residue (%wt)	<0.1	<0.1	ASTM D4530
Sulfate Ash, mass	0.044	0.094	ASTM D874-07
Ester content (%)	34.10	98.08	BSEN 14103:2003
Linolenic Acid Methyl Ester content (%)	0.26,	0.84	BSEN 14103:2003

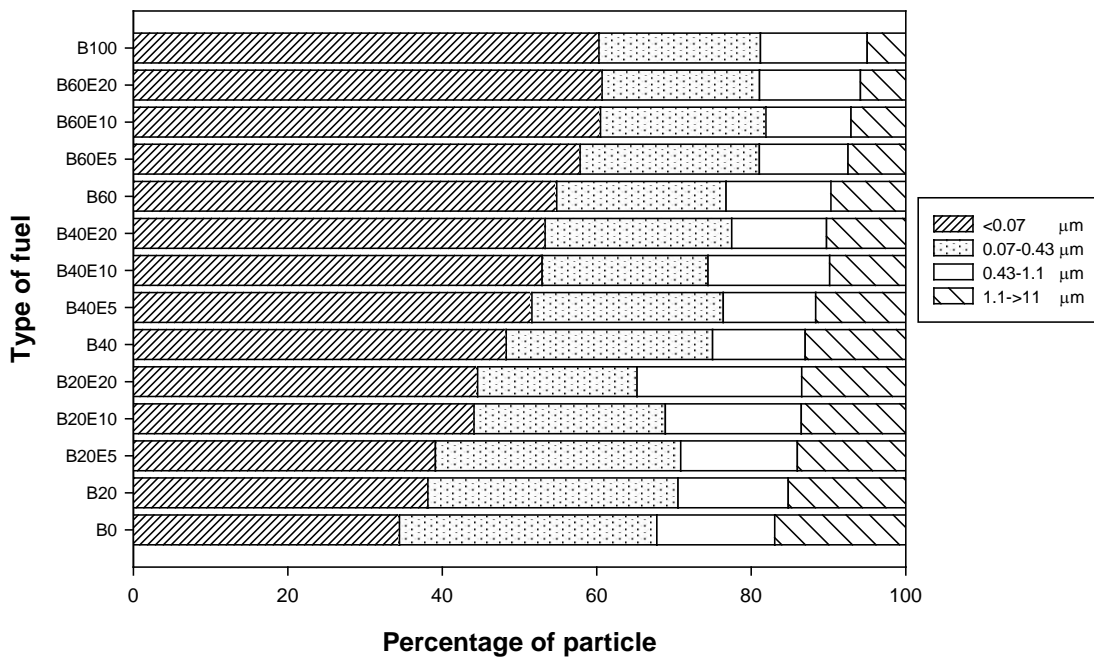
*น้ำมันดีเซลซื้อจากปั้มน้ำมันจาก อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา

ซึ่งผลจากการศึกษา พบว่าปริมาณของเอทานอลที่เพิ่มขึ้นในน้ำมันไบโอดีเซล-ดีเซล ทำให้ปริมาณของอนุภาคโดยรวม (total particulate matter, PM) เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 20 ปริมาณอนุภาครวมเพิ่มขึ้น 1.2, 5.0 และ 13.4% สำหรับ B20E5, B20E10 และ B20E20 ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับ B20 ปริมาณอนุภาครวมเพิ่มขึ้น 2.5, 10.3 และ 12.1% สำหรับ B40E05, B40E10 และ B40E20 ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับ B40 และปริมาณอนุภาครวมเพิ่มขึ้น 5.2, 7.2 และ 10.9% สำหรับ B60E05, B60E10 และ B60E20 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับ B60 ซึ่งโดยปกติแล้วเมื่อออกซิเจนในเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น ปริมาณอนุภาคในไอเสียก็ควรลดลง (Lin และคณะ 2010, Pidol และคณะ 2012, Zhang และ Blasubramanian 2014) แต่เนื่องจากเอทานอลมีค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอสูงกว่าน้ำมันดีเซลเมื่อใช้เอทานอลเพิ่มขึ้นทำให้อุณหภูมิในการเผาไหม้ลดลง จึงนำไปสู่การเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ (Yusop และคณะ 2013) จากรูปที่ 21 การเพิ่มเอทานอลในน้ำมันไบโอดีเซล-ดีเซล แม้ทำให้อนุภาคที่มีขนาดเล็ก

<1.1 μm เพิ่มขึ้นเป็นส่วนใหญ่ แต่อนุภาคที่มีขนาดใหญ่ (>1.1 μm) จะลดลง เนื่องจากการรวมตัว (coagulation) และการเกาะตัว (agglomeration) ของอนุภาคขนาดเล็กเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ซ้ำลง จึงเป็นผลให้จำนวนอนุภาคขนาดใหญ่ที่พบลดลง (Ning และคณะ 2004 และ Di และคณะ 2009) นอกจากนี้ ปริมาณน้ำในน้ำมันไบโอดีเซลก็เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ปริมาณอนุภาคเพิ่มขึ้นด้วย ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1

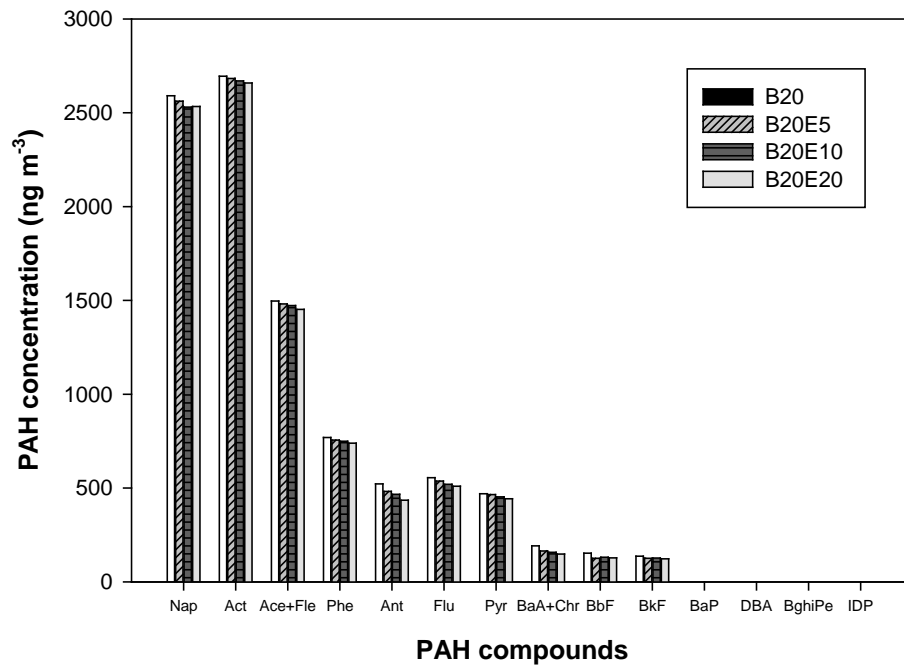


รูปที่ 20 ความเข้มข้นของอนุภาคโดยรวมที่เกิดจากเครื่องยนต์ดีเซลเมื่อน้ำมันผสมเอทานอล 5% 10% และ 20% ในน้ำมันไบโอดีเซล-ดีเซลแต่ละชนิด

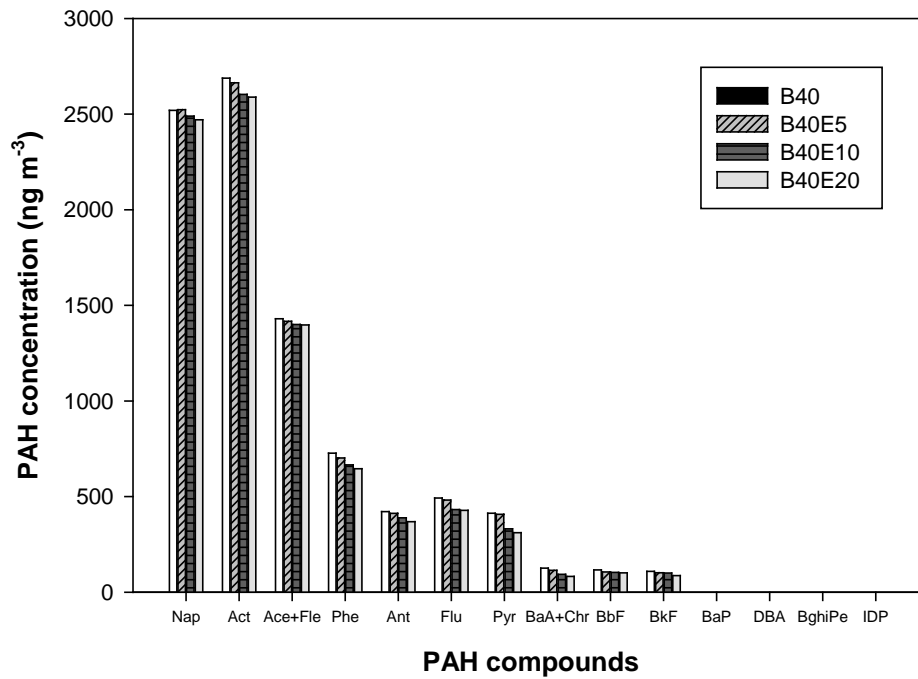


รูปที่ 21 สัดส่วนของอนุภาคขนาดต่าง ๆ ในไอเสียจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลเมื่อใช้น้ำมันผสมเอทานอล 5% 10% และ 20% ในน้ำมันไบโอดีเซล-ดีเซลแต่ละชนิด

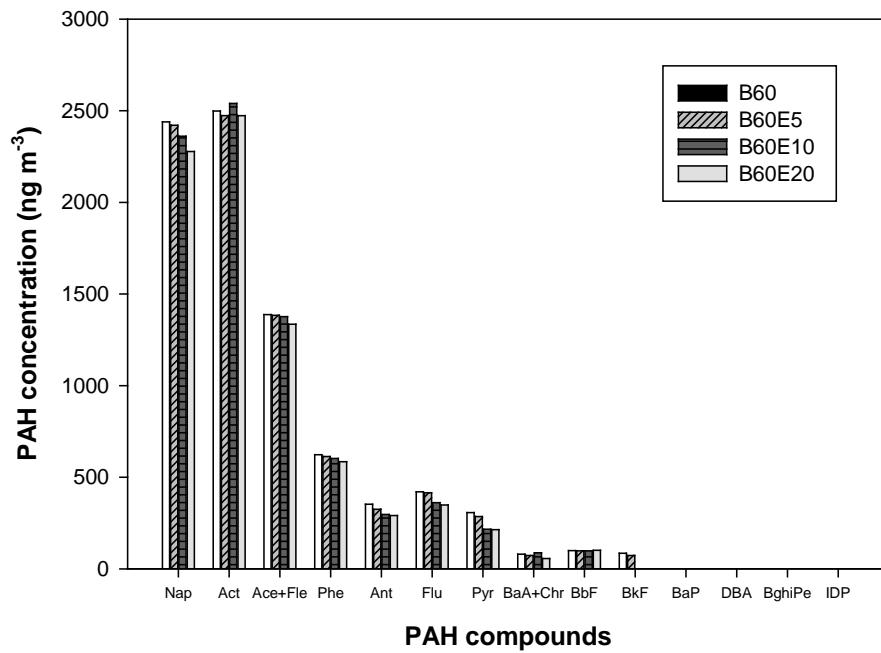
สำหรับความเข้มข้นของ PAHs แต่ละชนิดในส่วนของก๊าซลดลงเมื่อเพิ่มเอทานอล ดังแสดงในรูปที่ 22 (a-c) และสาร PAHs ที่พบส่วนใหญ่ก็เป็นกลุ่มของ Naphthalene (Nap) Acenaphthylene (Act) Acenaphthene (Ace) และ Fluorene (Fle) เช่นเดียวกับเชื้อเพลิงไบโอดีเซล แต่การเพิ่มเอทานอลนั้นช่วยให้ปริมาณผลรวมของสาร PAHs ลดลงได้มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ B0 ดังแสดงในรูปที่ 23 การลดลงคิดเป็นร้อยละ 27, 28, 29, 30.5, 33, 34, 36, 38 และ 40 สำหรับน้ำมัน B20E5, B20E10, B20E20, B40E05, B40E10, B40E20, B60E05, B60E10 และ B60E20 ตามลำดับ จะเห็นว่าเชื้อเพลิงผสมเอทานอล-ไบโอดีเซล-ดีเซล จะช่วยลดสาร PAHs ได้มากกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลและไบโอดีเซล



(a)

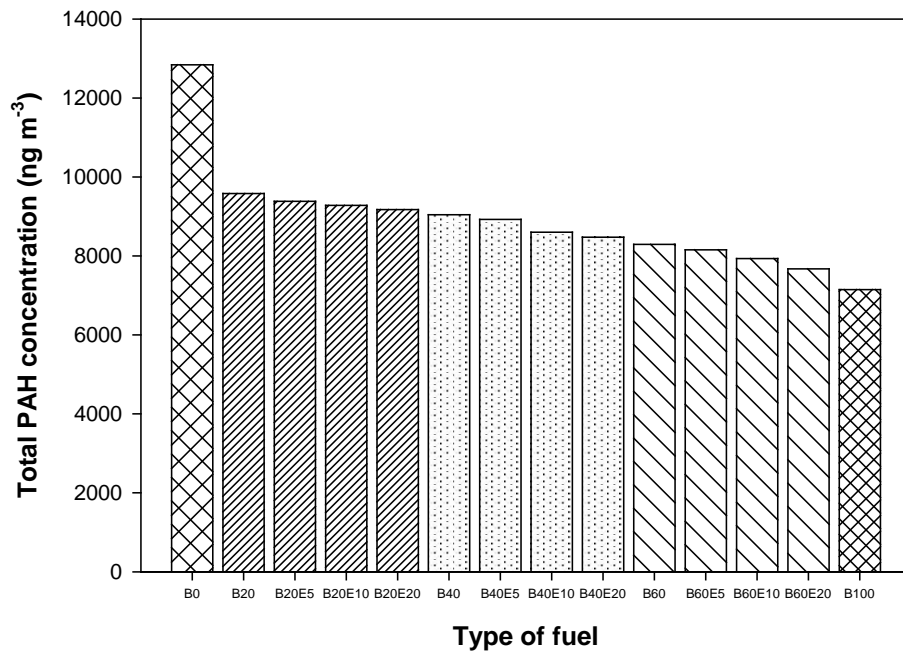


(b)



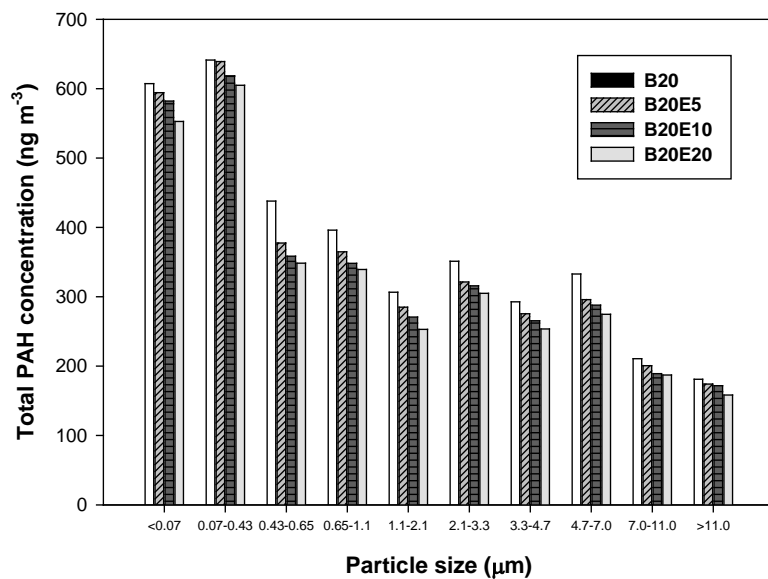
(c)

รูปที่ 22 ความเข้มข้นของPAHs แต่ละชนิดที่อยู่ในก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลเมื่อใช้น้ำมันผสมเอทานอล 5% 10% และ 20% ในเชื้อเพลิงไบโอดีเซล-ดีเซลแต่ละชนิด (a) B20 (b) B40 และ (c) B60

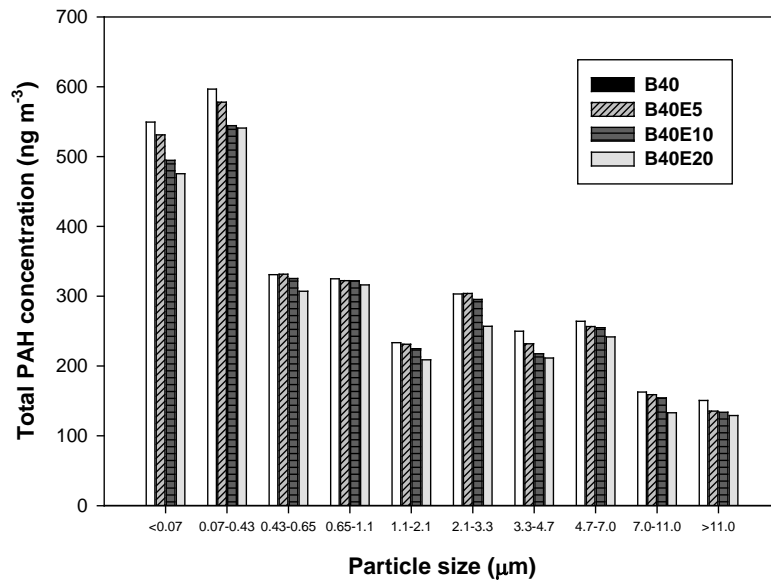


รูปที่ 23 ผลรวมของPAHs ที่อยู่ในก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลเมื่อใช้น้ำมันผสมเอทานอล 5% 10% และ 20% ในเชื้อเพลิงไบโอดีเซล-ดีเซลแต่ละชนิด

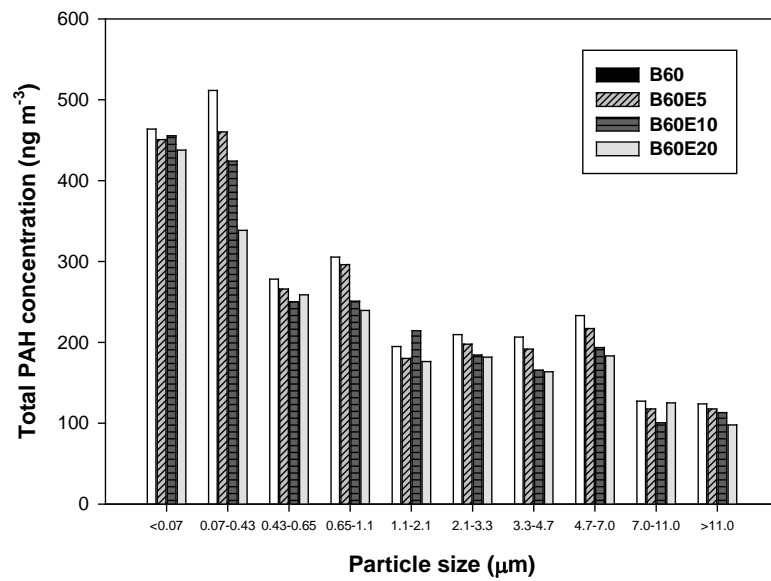
สำหรับ PAHs ในส่วนของอนุภาค พบว่าการเพิ่มเอทานอลในเชื้อเพลิงไบโอดีเซลสามารถช่วยให้ PAHs ในอนุภาคที่มีขนาดเล็กลดลงได้มากกว่าน้ำมันดีเซลและไบโอดีเซล และส่วนใหญ่มีแนวโน้มเช่นเดียวกับการใช้น้ำมันไบโอดีเซล ดังแสดงในรูปที่ 24 (a-c) สาร PAHs ในอนุภาคที่มีขนาด < 3.3 μm เฉลี่ยร้อยละ 74 เมื่อเปรียบเทียบกับสาร PAHs ทั้งหมดในอนุภาคที่ปล่อยออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซล ในขณะที่สาร PAHs ในอนุภาคที่มีขนาด > 3.3 μm พบในอัตราร้อยละ 26 ซึ่งอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะมีความสำคัญ เพราะสามารถเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจลึกเข้าไปในส่วนของขั้วปอดได้ง่าย มีความเสี่ยงต่อสุขภาพของมนุษย์ (Ji และคณะ 2007) สำหรับกลุ่มสาร PAHs ที่พบส่วนใหญ่ เป็น Naphthalene (Nap) Acenaphthylene (Act) Acenaphthene (Ace) และ Fluorene (Flu) เช่นเดียวกับน้ำมันไบโอดีเซล แต่ปริมาณที่พบในเชื้อเพลิงที่มีเอทานอลผสมจะลดลงได้มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับไบโอดีเซลแต่ละชนิด ดังแสดงในรูปที่ 25 (a-c) และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณการลดลงของผลรวมของสาร PAHs กับเชื้อเพลิงไบโอดีเซลแต่ละชนิด ดังแสดงในรูปที่ 26 พบว่ามีอัตราการลดลงดังนี้ สำหรับเอทานอล (5, 10 และ 20%) ใน B20 ปริมาณผลรวมของสาร PAHs ลดลงร้อยละ 6, 9 และ 13 สำหรับ B20E5, B20E10, B20E20 ตามลำดับ การเพิ่มเอทานอลเปรียบเทียบกับ B40 คิดเป็นร้อยละ 3, 6 และ 11 สำหรับ B40E5, B40E10 และ B40E20 ตามลำดับ และการเพิ่มเอทานอลใน B60 ลดลงร้อยละ 6, 11, 17 สำหรับ B60E5, B60E10 และ B60E20 ตามลำดับ ซึ่งสามารถลดลงได้มากกว่าใน B20 และ B40 เนื่องจากสาร PAHs ในน้ำมันไบโอดีเซลโดยทั่วไปและเอทานอลมีค่าเกือบเป็นศูนย์เมื่อเปรียบเทียบกับดีเซลและผลของการเพิ่มปริมาณออกซิเจนในเชื้อเพลิงผสม ทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ขึ้น จึงเป็นผลให้การปล่อยสาร PAHs จากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลลดลงเช่นเดียวกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ ซึ่งพบว่า การเพิ่มปริมาณออกซิเจนในเชื้อเพลิงผสมสามารถลดการปล่อยสาร PAHs ได้สูงสุด 90.2% (Bagley และคณะ 1998, Kalam และคณะ 2003, Lin และคณะ 2006b และ Lee และคณะ 2011)



(a)

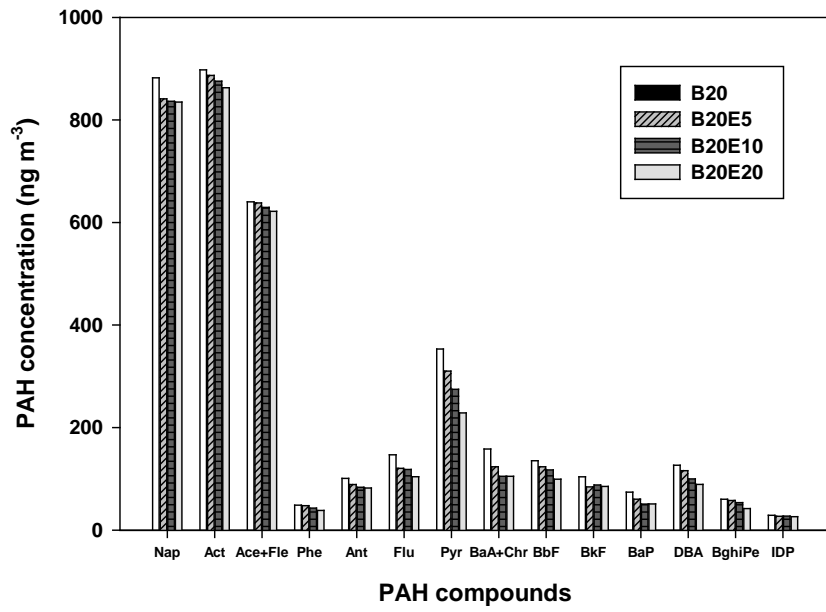


(b)

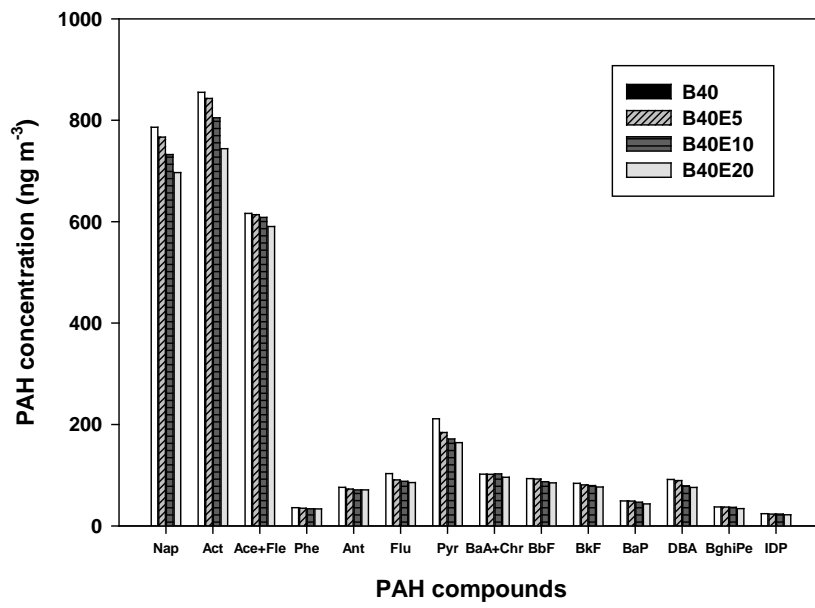


(c)

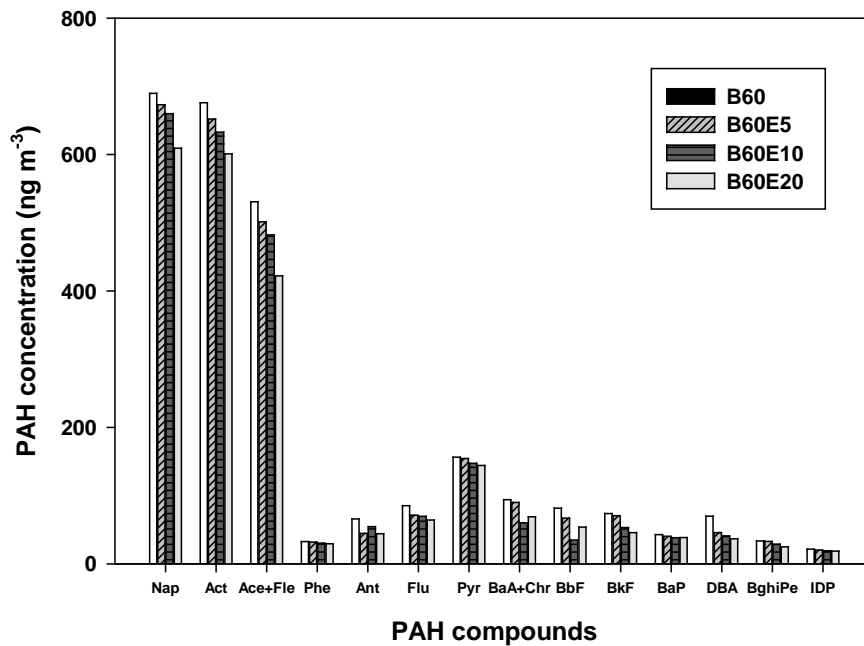
รูปที่ 24 PAHs ในอนุภาคขนาดต่าง ๆ ที่เกิดจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลเมื่อใช้น้ำมันผสมเอทานอล 5% 10% และ 20% ในเชื้อเพลิงไบโอดีเซล-ดีเซล แต่ละชนิด (a) B20 (b) B40 และ (c) B60



(a)

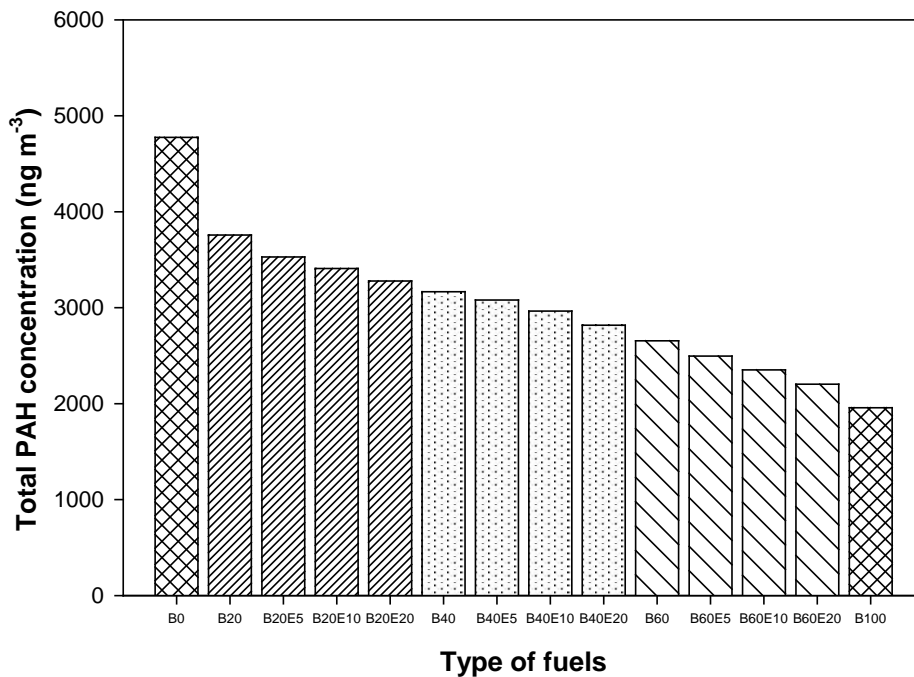


(b)



(c)

รูปที่ 25 ความเข้มข้นของPAHs แต่ละชนิดที่อยู่ในอนุภาคที่ได้จากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลเมื่อใช้น้ำมันผสมเอทานอล 5% 10% และ 20% ในเชื้อเพลิงไบโอดีเซล-ดีเซล แต่ละชนิด (a) B20 (b) B40 และ (c) B60



รูปที่ 26 ผลรวมของPAHs ที่อยู่ในอนุภาคที่ได้จากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลเมื่อใช้น้ำมันผสมเอทานอล 5% 10% และ 20% ในเชื้อเพลิงไบโอดีเซล-ดีเซลแต่ละชนิด

5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยต่อไป

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลทั่วไป (Conventional diesel engine) ที่ความเร็วรอบ 2400 รอบต่อนาที เมื่อใช้น้ำมันไบโอดีเซล (B100) น้ำมันดีเซล (B0) น้ำมันผสมไบโอดีเซล-ดีเซล (B10, B20, B40 และ B60) และน้ำมันผสมเอทานอล-ไบโอดีเซล-ดีเซล (B20E5, B20E10, B20E20, B40E05, B40E10, B40E20, B60E05, B60E10 และ B60E20) เป็นเชื้อเพลิง โดยศึกษาการกระจายขนาดของอนุภาค คุณลักษณะของสาร PAHs ซึ่งเป็นสารที่อาจก่อให้เกิดมะเร็ง ทั้งในส่วนของอนุภาค ตลอดจนในส่วนของก๊าซ และนอกจากนี้ศึกษาผลของอัตราส่วนผสมของน้ำมันเชื้อเพลิงที่กระทบต่อคุณลักษณะของสาร PAHs ปล่อยจากท่อไอเสีย สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การกระจายขนาดของอนุภาคที่เกิดจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลเมื่อใช้น้ำมัน B10 B20 B40 B60 และ B100 เป็นเชื้อเพลิง ผลการทดลองพบว่าอนุภาคส่วนใหญ่มีขนาดอยู่ในช่วงที่น้อยกว่า $0.4 \mu\text{m}$ เมื่ออัตราส่วนของน้ำมันไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณของอนุภาคโดยรวม (total particulate matters, PM) เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณน้ำในน้ำมันไบโอดีเซลมากกว่าในน้ำมันดีเซลแต่หลังจากผ่านกระบวนการกำจัดน้ำในน้ำมันไบโอดีเซลให้เป็นไปตามข้อกำหนดของกระทรวงพาณิชย์แล้ว พบว่าปริมาณอนุภาคโดยรวมลดลงร้อยละ 18 เมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซล

2. ความเข้มข้นของ PAHs แต่ละชนิดในก๊าซลดลงเมื่อใช้สัดส่วนน้ำมันไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น และ PAHs ที่พบในก๊าซจะเป็นกลุ่มที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำๆ เป็นส่วนใหญ่ เช่น Naphthalene (Nap) Acenaphthylene (Act) Acenaphthene (Ace) และ Fluorene (Fle)

3. สำหรับปริมาณสาร PAHs ในอนุภาค ส่วนใหญ่พบในอนุภาคที่มีขนาด $< 3.3 \mu\text{m}$ โดยเป็นกลุ่มสาร PAHs ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (Low molecular weights, LMW) ประกอบด้วยวงเบนซีน 2-3 วง ได้แก่ Nap, Act, Ace, Fle, Phe และ Ant และพบว่าเมื่อใช้สัดส่วนน้ำมันไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของสาร PAHs แต่ละชนิดลดลง เนื่องจากปริมาณออกซิเจนที่มีอยู่ในน้ำมันไบโอดีเซลและสาร PAHs ในน้ำมันไบโอดีเซลโดยทั่วไปมีอยู่น้อยมาก จึงเป็นผลให้การปล่อยสาร PAHs จากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลลดลงเมื่อสัดส่วนน้ำมันไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น

4. การประเมินระดับค่าความเป็นพิษของสาร PAHs พบว่าค่า BaP_{eq} ของน้ำมันไบโอดีเซลต่ำกว่าน้ำมันดีเซล จึงสามารถลดสาร PAHs ที่อาจก่อให้เกิดการกลายพันธุ์ได้

5. สำหรับผลการเติมเอทานอล 5% 10% และ 20% ในเชื้อเพลิงไบโอดีเซล-ดีเซล (B20, B40 และ B60) พบว่ามีแนวโน้มผลการทดลองเช่นเดียวกับน้ำมันไบโอดีเซล แต่การเพิ่มเอทานอลจะลดการปล่อยสาร PAHs ทั้งในสภาวะก๊าซและอนุภาคได้มากกว่าน้ำมันดีเซลและไบโอดีเซล เนื่องจากปริมาณออกซิเจนที่เพิ่มขึ้นในเชื้อเพลิงช่วยให้เกิดการเผาไหม้ได้สมบูรณ์มากขึ้น

5.2 ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยต่อไป

1. ศึกษาเพิ่มเติมถึงผลของปริมาณน้ำในน้ำมันไบโอดีเซล ที่กระทบต่อปริมาณและคุณลักษณะของอนุภาคที่เกิดจากการเผาไหม้ เพื่อนำไปสู่การกำหนดมาตรฐานคุณภาพของน้ำมันไบโอดีเซล
2. ศึกษาสมบัติในการดูดซับน้ำหรือความชื้นของน้ำมันไบโอดีเซล เนื่องจากระหว่างการเก็บรอจำหน่าย อาจทำให้ปริมาณน้ำในน้ำมันไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นได้
3. ศึกษาผลของการใช้น้ำมันไบโอดีเซลที่ใช้เอทานอลเป็นวัตถุดิบ (Ethyl ester) เพื่อเป็นการลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล
4. ศึกษาการเผาไหม้ของน้ำมันไบโอดีเซลชนิดต่าง ๆ ในเครื่องยนต์ดีเซลชนิดคอมมอนเรล เนื่องจากในปัจจุบันมีการใช้เครื่องยนต์ประเภทนี้เป็นจำนวนมาก

6. เอกสารอ้างอิง

- Abrantesa, R.D.; Assunção, J.V.D. and Pesquero, C.R. 2004. "Emission of polycyclic aromatic hydrocarbons from light-duty diesel vehicles exhaust". *Atmospheric Environment*. **38**: 1631-1640.
- Bagley, S.T.; Gratz, L.D.; Johnson, J.H.; McDonald, J.F. 1998. "Effects of an oxidation catalytic converter and a biodiesel fuel on the chemical, mutagenic, and particle size characteristics of emissions from a diesel engine". *Environmental Science and Technology*. **32**:1183-1191.
- Bidleman, T.F.; Billings, W.N. and Foreman, W.T. 1986. "Vapor particle partitioning of semivolatile organic compounds-estimates from field collections". *Environmental Science and Technology*. **20**: 1038-1043.
- Chien, S.M.; Huang, Y.J.; Chuang, S.C. and Yang, H.H. 2009. "Effects of Biodiesel Blending on Particulate and Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Emissions in Nano/Ultrafine/Fine/Coarse Ranges from Diesel Engine". *Aerosol and Air Quality Research*. **9(1)**: 18-31.
- Corrêa, S.M. and Arbilla, G. 2006. "Aromatic hydrocarbons emissions in diesel and biodiesel exhaust". *Atmospheric Environment*. **40**: 6821-6826.
- De Martinis, B.S.; Okamoto, R.A.; Kado, N.Y.; Gundel, L.A. and Carvalho, L.R.F. 2002. "Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in A Bioassay-Fractionated Extract of PM10 Collected in São Paulo, Brazil". *Atmospheric Environment*. **36**: 307-314.
- Di, Y.; Cheung, C.S. and Huang, Z. 2009. "Experimental study on particulate emission of a diesel engine fueled with blended ethanol–dodecanol–diesel". *Aerosol Science*. **40**: 101-112.
- Furuuchi, M.; Tekasakul, P.; Murase, T.; Otani, Y.; Tekasakul, S. and Bai, Y. 2006. "Characteristics of particulates emitted from rubber-wood burning". *Journal of Ecotechnology Research*. **12**: 135-139.
- Hata, M.; Fukumoto, M.; Otani, Y.; Yunhe, B.; Sekiguchi, K.; Tajima, N. and Furuuchi, M. 2009. "Performance of New Samplers Based on "Inertial Filter" Technology Applied for Classification of Ambient Aerosol Nano-Particles". *Proc. 6th Asian Aerosol Conference (AAC2009)*, Bangkok, AM-P-03
- He, C.; Ge, Y.; Tan, j.; You, K.; Han, X. and Wang, J. 2010. "Characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons emissions of diesel engine fueled with biodiesel and diesel". *Fuel*. **89**: 2040-2046.

- Ho, K.F.; Ho, S.S.H.H.; Lee, S.C.; Cheng, Y.; Chow, J.C.; Watson, J.G.; Louie, P.K.K. and Tian, L. 2009. "Emissions of gas- and particle-phase polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the Shing Mun Tunnel, Hong Kong". *Atmospheric Environment*. **43**: 6343-6351.
- Hulwan, D.B. and Joshi, S.V. 2011. "Performance, emission and combustion characteristic of a multicylinder DI diesel engine running on diesel-ethanol-biodiesel blends of high ethanol content". *Applied Energy*. **88**: 5042-5055.
- Kalam, M.A.; Husnawan, M.; Masjuki, H.H. 2003. "Exhaust emission and combustion evaluation of coconut oil-powered indirect diesel engine". *Renewable Energy*. **28**:2405-2415.
- Lee, W.J.; Liu, Y.C.; Mwangi, F.K.; Chen, W.H.; Lin, S.L.; Fukushima, Y.; Liao, C.N. and Wang, L.C. 2011. "Assessment of energy performance and air pollutant emissions in a diesel engine generator fueled with water-containing ethanol-biodiesel-diesel blend of fuels". *Energy*. **36**: 5591-5599.
- Lin, S.L.; Lee, W.J.; Lee, C.F. and Chen, S.J. 2010. "Energy savings and emission reduction of nitrogen oxides, particulate matter, and polycyclic aromatic hydrocarbons by adding water-containing acetone and neat soybean oil to a diesel-fueled engine generator". *Energy Fuels*. **24**: 4522-4533.
- Lin, Y.C.; Lee, W.J.; Wu, T.S.; and Wang, C.T. 2006a. "Comparison of PAH and regulated harmful matter emissions from biodiesel blends and paraffinic fuel blends on engine accumulated mileage test". *Fuel*. **85**: 2516-2523.
- Lin, Y.C.; Lee, W.J.; and Hou, H.C. 2006b. "PAH emissions and energy efficiency of palm-biodiesel blends fueled on diesel generator". *Atmospheric Environment*. **40**: 3930-3940.
- Lu, T.; Huang, Z.; Cheung, C.S.; Ma, J. 2012. "Size distribution of EC, OC and particle-phase PAHs emissions from a diesel engine fueled with three fuels". *Science of the Total Environment*. **438**:33-41.
- MacCracken, M.C. 2008. "Critical review: prospects for future climate change and the reasons for early action". *Journal of the Air & Waste Management Association*. **58(6)**: 735-786.
- Marr, L.C.; Kirchstetter, T.W.; Harley, R.A.; Miguel, A.H.; Hering, S.V. 1999. "Characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons in motor vehicles fuels and exhaust emissions". *Environmental Science and Technology*. **33**:3091-3099.
- Ministry, http://eduserv.ku.ac.th/001/udomkati/vichakarn_44/data/Direct.pdf, 2006.
- Ministry, <http://sos-energy.net/exhibition.html>, 2013.

- Ning, Z.; Cheung, C.S. and Liu, S.X. 2004. "Experimental investigation of the effect of exhaust gas cooling on diesel particulate". *Aerosol Science*. **35**: 333-345.
- Owen, N.A.; Inderwildi, O.R. and King, D.A. 2010. "The status of conventional world oil reserves—Hype or cause for concern?". *Energy Policy*. doi:10.1016/j.enpol.2010.02.026.
- Phoungthong, K., Tekasakul, S., Tekasakul, P., Prateepchaikul, G., Furuuchi, M., Otani, Y. and Hata, M. 2009 "Characteristics of particulate matters and associated polycyclic aromatic hydrocarbons from emission of agricultural diesel engines fueled by palm oil blends" Oral presentation in Asian Aerosol Conference (AAC09), Bangkok, Thailand, Nov 24-27, 2009.
- Phoungthong, K., **Tekasakul, S.**, Tekasakul, P., Prateepchaikul, G., Jindapetch, N., Furuuchi, M., Hata, M. 2013. "Emissions of particulate matter and associated polycyclic aromatic hydrocarbons from agricultural diesel engine fueled with degummed, deacidified mixed crude palm oil blends" *J. Environmental Sciences*, **25**(4) 751–757.
- Pidol, L.; Lecointe, B.; Starck, L. and Jeuland, N. 2012. "Ethanol–biodiesel–diesel fuel blends: performances and emissions in conventional diesel and advanced low temperature combustions". *Fuel*.**93**: 329-338.
- Staat, F.; Gateau, P. 1995. "The effects of rapeseed oil methyl ester on diesel engine performance, exhaust emissions and long term behaviour—a summary of three years of experimentation". *SAE paper 1995*, 950053.
- Tsai, J.H.; Chen, S.J.; Huang, K.Lin.; Lin, Y.C.; Lee, W.J.; Lin, C.C.; Lin, W.Y. 2010. "PM, carbon, and PAH emissions from a diesel generator fuelled with soy-biodiesel blends". *Journal of Hazardous Materials*. **179**: 237-243.
- Turrio-Baldassarri, L.; Battistelli, C.; Conti, L.; Crebelli, R.; De Berardis, B.; Iamiceli, A.L.; Gambino, M. and Iannaccone, S. 2004. "Emission comparison of urban bus engine fueled with diesel oil and 'biodiesel' blend". *Science of the Total Environment*. **327**: 147-162.
- Yang, H.H.; Lai, S.O.; Hsieh, L.T.; Hsueh, H.J.; Chi, T.W. 2002. "Profiles of PAH emission from steel and iron industries". *Chemosphere*.**48**:1061-1074.
- Yang, H.H.; Lo, M.Y.; Lan, J.C.W.; Wang, J.S. and Hsieh, D.P.H. 2007. "Characteristics of *trans*, *trans*-2,4-decadienal and polycyclic aromatic hydrocarbons in exhaust of diesel engine fueled with biodiesel". *Atmospheric Environment*. **41**: 3373-3380.
- Yusop, A.F.; Yasin, M.H.M.; Mamat, R.; Abdullah, A.A. and Aziz, A. 2013. "PM emission of diesel engines using ester-ethanol-diesel blended fuel". *Procedia Engineering*. **53**: 530-535.

Zhang, Z.H. and Balasubramanian, R. 2014. "Influence of butanol addition to diesel–biodiesel blend on engine performance and particulate emissions of a stationary diesel engine". *Applied Energy*. **119**: 530-536.

7. ภาคผนวก

7.1 นิพนธ์ต้นฉบับสำหรับส่งตีพิมพ์ (Manuscript)

อยู่ระหว่างเตรียม Manuscript 2 ฉบับ

7.2 บทความวิจัยที่นำเสนอที่ประชุมวิชาการ (Proceedings)

Chenaphan, S., Tekasakul, S. and Tekasakul, P. “The effect of ethanol in biodiesel-diesel blended fuel on characteristic of particulate matters emitted from diesel engine”. Proceedings of Pure and Applied Chemistry International Conference 2014 (PACCON2014), January 8-10, 2014, Khon Kaen, Thailand, 783-785.

7.3 นำเสนอผลงานแบบโปสเตอร์ (Poster Presentation)

Samae, H., Tekasakul, S. and Tekasakul, P. “Polycyclic aromatic hydrocarbons from biodiesel combustion”. The International Congress for Center of Excellence for Innovation in Chemistry (PERCH-CIC Congress VIII), May 5-8, 2013, Chonburi, Thailand, S3-P15.

THE EFFECT OF ETHANOL IN BIODIESEL-DIESEL BLENDED FUEL ON CHARACTERISTIC OF PARTICULATE MATTERS EMITTED FROM DIESEL ENGINE

Sudatip Chenaphan¹, Surajit Tekasakul^{1*} and Perapong Tekasakul²

¹Department of Chemistry, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112, Thailand

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112, Thailand

* Author for correspondence; E-Mail: surajit.t@psu.ac.th.

Abstract: An experimental study of particulate matters emitted from a conventional diesel engine is carried out using ethanol-biodiesel-diesel blended fuels. The immiscibility is a major drawback of blending ethanol with diesel, which leads to phase separation. In this work biodiesel, another renewable fuel, was used as an additive to stabilise ethanol in diesel blends. The mixing ratios of blended fuels were chosen using the phase diagram of the ethanol-biodiesel-diesel ternary system. Then the ethanol-biodiesel-diesel blended fuels were kept for 30 days to observe their stability during one-month storage. The fuels used in this study were diesel (B0), blend of 20% biodiesel in diesel (B20), and blends of 5%, 10% and 20% ethanol in B20 named as B20E5, B20E10 and B20E20, respectively. All of them showed no phase separation during one-month storage. The particulate matters emitted from the exhaust of diesel engine were collected using an Andersen sampler with inertial filter option (ANIF) to separate the particles into ten size ranges: > 11.0, 11.0-7.0, 7.0-4.7, 4.7-3.3, 3.3-2.1, 2.1-1.1, 1.1-0.65, 0.65-0.43, 0.43-0.07 and < 0.07 μm . The results indicated that they are mostly in the particle diameter range of less than 0.4 μm . In comparison to B20, the total particulate matter concentrations increase by 1.2, 5.0 and 13.4% for B20E5, B20E10 and B20E20, respectively.

1. Introduction

Ethanol can be used as an alternative fuel to reduce the consumption of fossil fuels, as well as to reduce air pollution. It can be produced by converting starch content of biomass feedstock into alcohol (bioethanol) and then can be mixed with diesel (called diesohol) or gasoline (called gasohol). One of the main problems of ethanol-diesel blends is the occurrence of phase separation because ethanol and diesel are immiscible. Biodiesel, produced from transesterification of vegetable oil or animal fat feedstock, has potential to be used as an additive to improve the solubility of ethanol in diesel fuel [1].

It has been revealed that emissions of particulate matter (PM), unburned hydrocarbons (HC) and carbon monoxide (CO) from renewable fuels are reduced relative to diesel fuel. However, there are differences in some details such as engines, fuels and the mixing ratio of fuels used in the experiments. Shi et al. [2] found that ethanol-biodiesel-diesel blended fuel can reduce soot and particulate matter of 48% due to more oxygen content in the blended fuel. Similarly,

Can et al. [3] found that ethanol-diesel confirmed reductions in soot, CO and SO₂.

In this study, the mixing ratios of blended fuels were chosen using the phase diagram of the ethanol-biodiesel-diesel system. Additionally, the effects of ethanol in biodiesel-diesel blends on characteristic of particulate matter emitted from diesel engine were investigated.

2. Materials and Methods

2.1 Phase behaviour of ethanol-biodiesel-diesel system

A phase diagram of ternary system (ethanol-biodiesel-diesel) was studied. Mixtures of ethanol-diesel were prepared ranging from 5% ethanol (E5) to 95% ethanol (E95). Then, biodiesel was slowly added to each ethanol-diesel mixture until clear solution was obtained. The volume percentages of each component (ethanol, diesel and biodiesel) at the point where the mixture was homogeneous were calculated and plotted on the triangular diagram.

2.2 Fuel preparation

The fuels used in this study are as follows: diesel fuel (B0), blend of 20% biodiesel in diesel (B20) and blends of 5%, 10% and 20% ethanol in B20 (B20E5, B20E10 and B20E20). Diesel fuel was purchased from Bangchank Petroleum Public Company Limited. Biodiesel was obtained from Specialized R&D Center for Alternative Energy from Palm Oil and Oil Crops, faculty of engineering, Prince of Songkla University, Thailand.

To prepare blended fuels, first, ethanol (Merck, 99.5% absolute) was mixed with biodiesel to lower ethanol surface tension then the mixture was added to diesel fuel. All blends were stirred for 15 min to obtain a homogeneous mixture. Then the ethanol-biodiesel-diesel blended fuels were kept motionless at room temperature for 30 days to observe their stability during one-month storage.

2.3 Engine and operating conditions

The engine used in this experiment was a conventional indirect injection (IDI) turbocharged diesel engine (Type 2LT, Toyota, Thailand). The bore to stroke ratio is 92 mm: 92 mm and the compression

ratio is 21: 1. The maximum power is 69.14 kW at 4000 rpm and maximum torque is 215.75 Nm at 2400 rpm.

Before each experiment, the engine was warmed up for a period of 15 min to reach steady state condition. The exhaust emissions were collected using an Andersen sampler with inertial filter option (ANIF), which can separate the particles into ten size ranges: > 11.0, 11.0-7.0, 7.0-4.7, 4.7-3.3, 3.3-2.1, 2.1-1.1, 1.1-0.65, 0.65-0.43, 0.43-0.07 and < 0.07 μm . The particles were collected on quartz fiber filters (Pallflex, 2500QAT-UP, USA). Before sampling, the filters were treated in a desiccator at constant temperature (25°C) and constant humidity (50% relative humidity) for at least 72 hr then weighed using a five-digit readability analytical balance (Sartorius, CP225D, Germany). After sampling, the filters were treated under the same conditions as before sampling and weighed using the same analytical balance. The weights of the particles collected on each filter were then calculated.

3. Results and Discussion

3.1 Phase diagram of the ternary system

Figure 1 represents the phase diagram of the three-component system (ethanol-biodiesel-diesel). It shows that ethanol and diesel are completely miscible when ethanol content is less than 20% or more than 80%. Biodiesel is soluble in both ethanol and diesel. Therefore, adding biodiesel can improve the solubility of ethanol and diesel. The mixtures with biodiesel more than 5% give homogeneous (one-phase) solutions. The mixing ratios of blended fuels used in this study were selected from one-phase region of the ternary phase diagram.

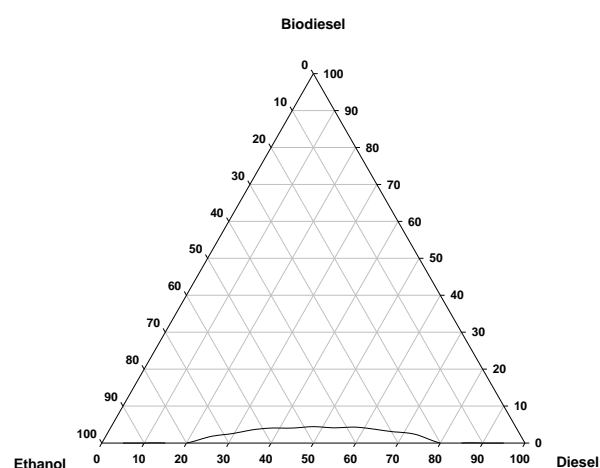


Figure 1 The phase diagram of the three-component system.

3.2 Particulate matter emissions

Figure 2 shows that the total particulate matter concentrations increase with an increasing of ethanol in biodiesel-diesel blends. The emitted particulate matters from engine increased by 1.2, 5.0 and 13.4%

for B20E5, B20E10 and B20E20, respectively, in comparison to B20. Many researchers concluded that the main factor affecting particulate matter emission is the fuel oxygen content [4-6]. However, the increases of particulate matter concentrations also depend on other properties of the fuel such as cetane number, viscosity, density and vaporization of fuel. For instance, Yusop et al. [7] found that the heat of vaporization of ethanol is much higher than diesel, thus adding ethanol in diesel will decrease the temperature in the combustion chamber which leads to incomplete combustion.

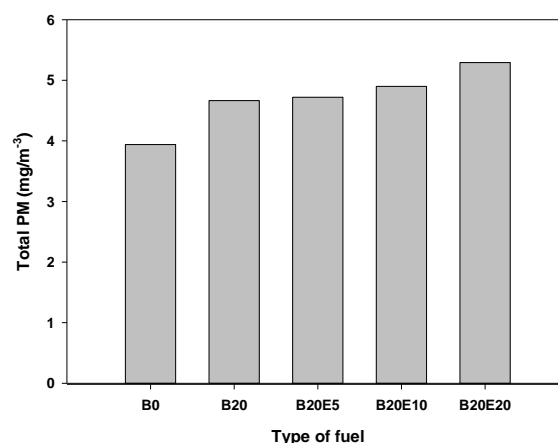


Figure 2 Total particulate matter concentrations from emission of conventional diesel engine using different blended fuels.

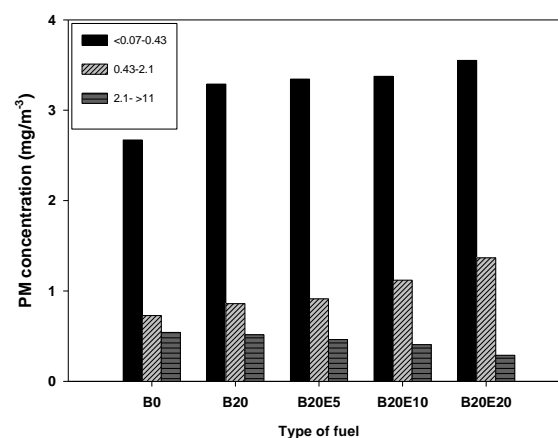


Figure 3 Concentration of particulate matter emitted from a conventional diesel engine using different blended fuels for nuclei mode (particle size < 0.1 μm), accumulation mode (0.1 μm < particle size < 2 μm) and coarse-particle mode (particle size > 2 μm).

3.3 Size distributions of particulate matter

The size distributions of particulate matters emitted from the engines fueled with B0, B20, B20E5, B20E10 and B20E20 are shown in Figure 3. The particle sizes are divided into the nuclei mode (particle size < 0.1 μm), accumulation mode (0.1 μm < particle size < 2 μm) and coarse-particle mode (particle size >

2 μm) [8]. For all cases, most particulate mass was found in the $< 0.4 \mu\text{m}$ diameter range. The particles in this mode are formed during exhaust dilution and cooling, and may also include solid carbon [9]. It can be observed that the increase of ethanol in blended fuel causes an increase in the nuclei and accumulation mode but a reduction of coarse-particle mode.

4. Conclusions

The particulate matters emitted from the conventional diesel engine fueled with ethanol-biodiesel-diesel blends were investigated. Increasing the ethanol concentration in the biodiesel-diesel blends led to an increase of the total particulate matter concentrations. Most of particulate matters associated with the diameter range $< 0.4 \mu\text{m}$.

Acknowledgements

The authors are grateful to the Prince of Songkla University for financial support received from the annual research grant for fiscal years 2012-2013.

References

- [1] <http://www.eia.gov/todayinenergy/> (July 25, 2013).
- [2] X. Shi, Y. Yu, H. He, S. Shuai, J. Wang and R. Li, *Fuel*, **84** (2005) 1543-1549.
- [3] O. Can, İ. Çelikten and N. Usta, *Energ Convers Manage*, **45** (2004) 2429-2440.
- [4] N. Miyamoto, H. Ogawa, N. Nurun, K. Obata, et al., *SAE TRANSACTIONS*, vol.107, (1998), pp. 171-177.
- [5] D. Kannan, S. Pachamuthu, Md.N. Nabi, J.E. Hustad and T. Løvås, *Energ Convers Manage*, **53** (2012) 322-331.
- [6] K. Phoungthong, S. Tekasakul, P. Tekasakul, G. Prateepchaikul, N. Jindapetch, M. Furuuchi and M. Hata, *J. Environ. Sci.* **25** (2013) 751-757.
- [7] A.F. Yusop, *Procedia Engineering*, **53** (2013) 530-535.
- [8] R.M. Harrison, J.P. Shi, S. Zi, A. Khan, D. Mark, R. Kinnersley and J. Yin, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, **358** (2000) 2567-2580.
- [9] D.B. Kittelson, *J. Aerosol. Sci.* **29** (1998) 575-588.

Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Biodiesel Combustion

Hisam Samae,^a Surajit Tekasakul^a and Perapong Tekasakul^b

^a Department of Chemistry and Center for Innovation in Chemistry (PERCH-CIC), Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112, Thailand

^b Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112, Thailand

Introduction and Objective

Biodiesel, a fuel that can be made from renewable biological sources, such as vegetable oils, animal fats and waste cooking oils, may reduce pollutant emission from diesel engines. In the present work the characteristics of particles and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from emission of engine fueled by biodiesel were studied. The fuel used in this study were commercial diesel (B0), biodiesel derived from waste cooking oil (B100) and blends of both diesel and biodiesel with the ratio of biodiesel to be 10% (B10), 20% (B20), 40% (B40) and 60% (B60).

Methods

Particle bound PAHs and gas phase PAHs from diesel engine (Toyota, type 2L-T) using different blend ratio fuels were collected. Particles were size-fractionated by an Andersen sampler with inertial filter option (ANIF) and XAD-2 cartridge (SKC 226-30-06, 400/200mg) was used to absorb gas phase PAHs. Filters (Binder-less quartz fiber filter, Pallflex, 2500QAT-UP) and XAD-2 resin were extracted ultrasonically with dichloromethane. The extracts were concentrated using a rotary evaporator and redissolved with 450 μ L of acetonitrile. PAHs were determined using high performance liquid chromatography (HPLC) with Diode array detector (DAD) coupled with fluorescence detector (FLD).

Results

Most PAHs found in gas phase were low molecular weight compounds such as Napthalene (Nap), Acenaphtylene (Act) and Acenaphtene (Ace), when the percentage of biodiesel was increased total PAHs from emissions of the engine were decreased by 20%, 27%, 30%, 34% and 37% for B10, B20, B40, B60 and B100, respectively.

Conclusion

PAH concentrations from emission of the conventional diesel engine were decreased with increasing biodiesel fraction.

Keywords: polycyclic aromatic hydrocarbons, diesel engine

Selected References:

1. He, C.; Ge, Y.; Tan, J.; You, K.; Han, X.; Wang, J. *Fuel*, **2010**, *89*, 2040–2046.
2. Liu, S.H.; Lin, Y.C.; Hsu, K.H. *AAQR*, **2012**, *12*, 218–227.



Hisam Samae M.Sc. Student

b 1987 in Yala, Thailand

Prince of Songkla University, Thailand, Chemistry, B.Sc. 2009

Research field: Physical chemistry