

Đánh giá suất tiêu thụ nhiên liệu và phát thải của nhiên liệu biodiesel dầu cọ sử dụng trên máy phát điện động cơ diesel

• Tôn Nữ Thanh Phương

• Lê Hoàng Giang

• Tô Thị Hiền

Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, ĐHQG-HCM

• Takenaka Norimichi

Trường Đại học Phủ Osaka, Nhật Bản

(Bài nhận ngày 25 tháng 02 năm 2015, nhận đăng ngày 22 tháng 06 năm 2015)

TÓM TẮT

Nghiên cứu đánh giá suất tiêu thụ nhiên liệu của động cơ và phát thải thông thường của nhiên liệu biodiesel dầu cọ (BDF dầu cọ) sử dụng trên máy phát điện động cơ diesel. Các thí nghiệm được thực hiện ở chế độ không tải và tải cao với các tỷ lệ phối trộn của BDF dầu cọ và nhiên liệu diesel (0 %, 5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 50 %, 100 % tương ứng với B0, B5, B10, B15, B20, B50, B100). Kết quả cho thấy, suất tiêu thụ nhiên liệu tăng khi thể tích BDF dầu cọ tăng trong nhiên liệu. Ở chế độ không tải, so với nhiên liệu diesel suất tiêu thụ nhiên liệu tăng 1,32 %; 1,8 %; 2,8 %; 3,74 %, 5,61 %;

6,54 % tương ứng với B5, B10, B15, B20, B50, B100. Ở chế độ tải cao, suất tiêu thụ nhiên liệu tăng 1,51 %; 1,86 %; 2,18 %; 4,78 %; 5,36 %; 6,76 % tương ứng với B5, B10, B15, B20, B50, B100 so với nhiên liệu diesel. Đối với phát thải động cơ, ở cả hai chế độ tải, khi tăng thể tích BDF phát thải khí CO, SO₂ và hợp chất C_xH_y giảm; phát thải khí NO, NO₂, CO₂ tăng. Với cùng một loại nhiên liệu, hệ số phát thải khí CO, SO₂, CO₂ của động cơ ở chế độ tải cao thấp hơn chế độ không tải; hệ số phát thải khí NO, NO₂ của động cơ cho kết quả ngược lại.

Từ khóa: Nhiên liệu BDF, phát thải khí, động cơ diesel.

GIỚI THIỆU

Sử dụng năng lượng là một trong những yêu cầu cơ bản cho sự tồn tại của con người. Năng lượng được sử dụng cho các ngành công nghiệp, sản xuất thực phẩm và nông nghiệp, đặc biệt là ngành vận tải. Nguồn năng lượng chủ yếu hiện nay phần lớn xuất phát từ nhiên liệu hóa thạch. Tuy nhiên, trữ lượng dầu thô trên thế giới đang cạn kiệt rất nhanh với tốc độ tăng trưởng kinh tế như hiện nay. Ngoài ra, việc sử dụng nhiên liệu

hóa thạch là nguồn phát thải chính CO₂ trong khí quyển, góp phần gây hiệu ứng nhà kính làm biến đổi khí hậu toàn cầu. Vì vậy, việc nghiên cứu nhằm tìm ra nguồn nguyên liệu sạch, thân thiện với môi trường nhằm thay thế nhiên liệu hóa thạch đang được thực hiện tại nhiều quốc gia trên thế giới [2, 3]. Với tiêu chí trên, nhiên liệu sinh học được lựa chọn là nguồn nhiên liệu thay thế trong tương lai.

Nhiên liệu sinh học chủ yếu gồm ethanol sinh học (bioethanol) và diesel sinh học (BDF - BDF), khí sinh học (biogas). Trong đó, BDF hoàn toàn có thể thay thế nhiên liệu diesel dựa trên những tính chất tương tự về trị số cetane, nhiệt trị riêng... và tính thân thiện môi trường của nó [6, 7].

Ở Việt Nam, BDF đã được điều chế từ nhiều nguyên liệu khác nhau ở quy mô phòng thí nghiệm như mỡ cá basa, dầu hạt bông vải, dầu mỡ đã qua sử dụng, dầu hạt Jatropha, dầu mè...[23, 14]. Đồng thời, các thử nghiệm BDF trên động cơ đốt trong cũng đã được tiến hành. Kết quả của các thử nghiệm này cho thấy BDF có thể sử dụng trên động cơ ở bất kỳ tỷ lệ phối trộn với nhiên liệu diesel mà không cần thay đổi kết cấu của động cơ. Ngoài ra, sử dụng BDF giảm các khí thải độc hại vào môi trường như CO, SO₂, bụi, C_xH_y....[9, 10]. Hệ số phát thải các chất ô nhiễm từ động cơ, hiệu quả cháy của nhiên liệu và công suất của động cơ phụ thuộc vào tỷ lệ phối trộn BDF trong nhiên liệu và tải trọng của động cơ [13, 22]. Tuy nhiên, tỷ lệ phối trộn BDF trong nhiên liệu vừa không làm ảnh hưởng đến suất tiêu thụ nhiên liệu của động cơ và hệ số phát thải chất ô nhiễm là ít và thấp vẫn chưa được nêu ra trong các nghiên cứu trước tại Việt Nam. Do

đó, đề tài này tập trung nghiên cứu suất tiêu thụ nhiên liệu của động cơ và phát thải của BDF dầu cò sử dụng trên máy phát điện động cơ diesel ở các tải trọng khác nhau.

THỰC NGHIỆM

Hỗn hợp BDF dầu cò và nhiên liệu diesel

BDF dầu cò sử dụng trong đề tài được tổng hợp bởi nhóm nghiên cứu của Khoa Hóa, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Hà Nội. BDF được tổng hợp theo phương pháp nhiệt với tác chất là MeOH, xúc tác KOH. Quy trình sản xuất đạt tiêu chuẩn BDF của Nhật Bản. Nhiên liệu diesel sử dụng trong nghiên cứu này là nhiên liệu diesel thương phẩm 0,05 % S. Phối trộn nhiên liệu BDF và dầu diesel ở các tỷ lệ: 0 % (100 % DO + 0 % BDF), 5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 50 %, và 100 % BDF (v/v). Khuấy trộn hỗn hợp ở nhiệt độ phòng trong 15 phút với vận tốc 500 vòng/phút được nhiên liệu B0, B5, B10, B15, B20, B50 và B100. Hỗn hợp được gia nhiệt để loại trừ hiện tượng nhũ tương hóa, để yên trong 1 giờ, sau đó bảo quản trong can nhựa cho đến khi thử nghiệm. Thể tích hỗn hợp nhiên liệu sau pha trộn là 3 lít. Độ tinh khiết của BDF dầu cò và một số tính chất của nhiên liệu được trình bày trong Bảng 1.

Bảng 1. Độ tinh khiết của BDF dầu cò và một số tính chất của nhiên liệu

NL	Độ nhớt (*) (mm ² /s)			Nhiệt lượng (MJ/kg) *	Độ tinh khiết của BDF **	
	Giá trị	Phương pháp thử nghiệm	QCVN 01:2009/BKHCN		% Methyl ester	EN 590 ***
B0	2,68	ASTM D445-10	2 – 4,5	45,59		
B5	2,65					
B10	2,81		1,9 – 6,0			
B15	2,89					
B20	2,96					
B50	3,47					
B100	4,51			39,90	97,7	96,5

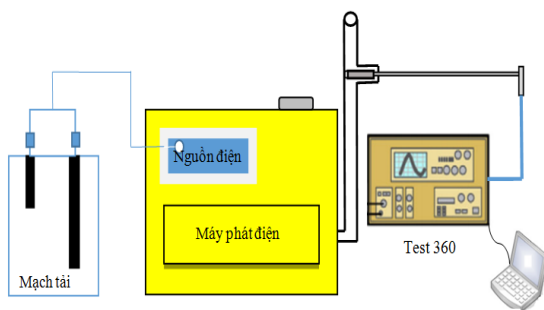
* Mẫu BDF được gửi phân tích tại Trung tâm Kỹ thuật Tiêu chuẩn Đo lường Chất lượng 3

**: Mẫu BDF được gửi phân tích tại Trung tâm Nghiên cứu và Triển khai-Khu Công nghệ cao- Q9

***: Tiêu chuẩn chất lượng BDF của cộng đồng EU

Đo phát thải khí của BDF trên máy phát điện động cơ diesel

Máy phát điện động cơ diesel (LAUNTOP LDG3600CLE) chạy bằng hỗn hợp BDF và nhiên liệu diesel ở chế độ không tải và tải cao (80 % tổng tải trọng). Khí thải của các nhiên liệu này được đo trực tiếp từ ống khói của máy phát điện. Nồng độ khí CO, CO₂, SO₂, NO, NO₂ và hợp chất C_xH_y được đo bằng thiết bị Testo 360, model D – 79849 Lenzkirch, được kết nối với máy tính CQ - Compaq 40. Khí CO, NO, NO₂, SO₂ trong khí thải được đo theo nguyên lý của đầu dò 3 điện cực. Khí CO₂ được đo bằng đầu dò hồng ngoại. Hợp chất C_xH_y được đo bằng đầu dò tín hiệu nhiệt. Hệ thống lấy mẫu được lắp đặt như Hình 1. Thêm nhiên liệu B0 và chạy máy phát điện ở điều kiện không tải trong 10 phút để động cơ hoạt động ổn định (nồng độ CO và CO₂ ổn định – dữ liệu hiện trực tiếp trên máy tính). Tiếp đó, tiến hành đo khí thải trực tiếp từ động cơ bằng thiết bị Testo 360 – D9849 Lenzkirch, Germany. Thời gian đo khí là 5 giây/lần. Thời gian thử nghiệm là 15 phút, thí nghiệm được lặp lại 3 lần. Dữ liệu đo khí thải được xuất trực tiếp trên máy tính CQ - Compaq 40. Thực hiện thí



Hình 1. Mô hình đo khí thải từ máy phát điện

thí nghiệm tương tự với nhiên liệu B5, B10, B15, B20, B50 và B100 ở chế độ không tải và chế độ tải cao 2,5 kW.

Đo lưu lượng khí thải và suất tiêu hao nhiên liệu.

Đo lưu lượng khối thải: thiết bị đo tốc độ gió Exttech model 380771 được sử dụng để đo vận tốc khối thải (V) tại miệng ống khói. Lưu lượng khối thải (Q) sẽ được tính theo công thức sau:

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} \times T \quad (\text{m}^3/\text{phút})$$

T (m/phút): vận tốc khối thải đo tại miệng ống khói ở điều kiện thường (áp suất 1 atm, nhiệt độ phòng 29,5 °C).

D (m): đường kính ống khói.

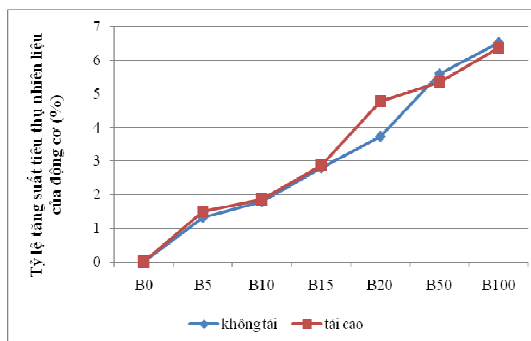
Suất tiêu hao nhiên liệu (P): là lượng nhiên liệu tiêu hao cho động cơ trên một đơn vị thời gian. P được tính bằng công thức sau:

$$P = \frac{V_1 - V_2}{t} \quad (\text{mL}/\text{phút})$$

V₁ là thể tích nhiên liệu ban đầu cho vào bình nhiên liệu (mL)

V₂ là thể tích nhiên liệu còn lại bình nhiên liệu (mL)

t là thời gian động cơ hoạt động



Hình 2. Tỷ lệ tăng suất tiêu thụ nhiên liệu của động cơ ở các chế độ tải

KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Suất tiêu thụ nhiên liệu của động cơ

Suất tiêu thụ nhiên liệu của động cơ là lượng nhiên liệu động cơ sử dụng trong một đơn vị thời gian để tạo ra công suất vận hành cho động cơ hoạt động tại những chế độ tải trọng của động cơ. Ở cùng chế độ tải, khi tăng tỷ lệ BDF trong hỗn hợp nhiên liệu thì suất tiêu thụ nhiên liệu của động cơ cũng tăng dần. Cụ thể là, ở chế độ không tải, suất tiêu thụ nhiên liệu của động cơ dao động từ 6,45 đến 7,35 mL/phút. So với nhiên liệu B0 suất tiêu thụ nhiên liệu của động cơ tăng 1,32 %; 1,8 %; 2,8 %; 3,74 %; 5,61 %; 6,54 % tương ứng với nhiên liệu B5, B10, B15, B20, B50 và B100. Ở chế độ tải cao, suất tiêu thụ nhiên liệu dao động từ 19,35 đến 21,65 mL/phút. So với nhiên liệu B0 suất tiêu thụ nhiên liệu của động cơ tăng 1,51 %; 1,86 %; 2,18 %; 4,78 %; 5,36 %; 6,76 % tương ứng với nhiên liệu B5, B10, B15, B20, B50 và B100 (Hình 2). BDF dầu cò có suất tiêu thụ nhiên liệu cao hơn nhiên liệu diesel do BDF dầu cò có nhiệt trị thấp hơn nhiên liệu diesel 12,48 % ($Q_{\text{diesel}} = 45,59 \text{ MJ/kg}$, $Q_{\text{BDF}} = 39,90 \text{ MJ/kg}$). Vì vậy, trong hỗn hợp BDF và nhiên liệu diesel, khi tăng tỷ lệ BDF thì nhiệt trị của hỗn hợp nhiên liệu giảm. Nên ở cùng một tải trọng, để tạo đủ năng lượng cho động cơ hoạt động, động cơ phải cung cấp một nhiệt lượng lớn hơn cho quá trình cháy. Nhiệt lượng này có nguồn gốc từ nhiên liệu tỏa ra khi đốt và có giá trị bằng tích của nhiệt trị và lượng nhiên liệu tiêu thụ. Vì vậy, để bù lại lượng nhiệt trị đã mất, động cơ phải tiêu thụ nhiên liệu nhiều hơn. Nhiều nghiên cứu trước đây ở trong và ngoài nước đã chỉ ra rằng khi sử dụng nhiên liệu BDF sẽ làm tăng suất nhiên liệu tiêu thụ của động cơ [5,8,7,13,22]. Ngoài ra, độ nhớt cao của BDF cũng làm tăng áp lực của quá trình phun nhiên liệu gây ảnh hưởng cho quá trình đốt và tiêu thụ nhiên liệu ($RE_{B100} =$

4,51 mm²/s, $RE_{B50} = 3,47 \text{ mm}^2/\text{s}$, $RE_{B0} = 2,68 \text{ mm}^2/\text{s}$) [19].

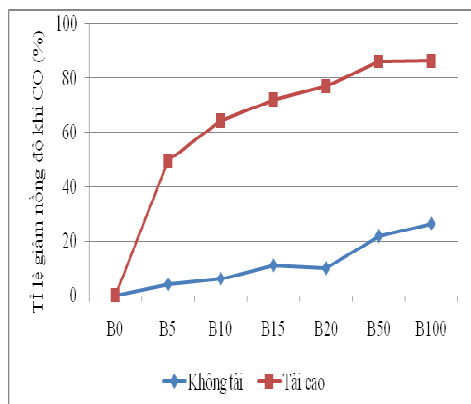
Khi sử dụng cùng một loại nhiên liệu cho 2 chế độ tải, suất tiêu thụ nhiên liệu tăng từ chế độ không tải lên tải cao. Diễn hình là khi tăng từ chế độ không tải lên tải cao, suất tiêu thụ nhiên liệu tăng 79,51 %; 80,23 %; 82,38 %; 84,56 %; 88,01 %; 91,32% tương ứng với nhiên liệu B0, B5, B10, B20, B50 và B100. Sử dụng BDF gây giảm nhẹ hiệu suất động cơ do đặc điểm của quá trình phun nhiên liệu, tỷ lệ phối trộn không khí, độ nhớt cao và độ bay hơi cao và nhiệt trị thấp của BDF. Nhiên liệu BDF có nhiệt trị thấp (thấp hơn 12,51 % so với nhiên liệu diesel), đồng thời BDF có trọng lượng riêng (0,88 g/mL) cao hơn so với nhiên liệu diesel (0,85 g/mL) dẫn đến tác động năng lượng tổng thể sẽ giảm 5 %/L so với nhiên liệu diesel [11]. Do đó, khi hoạt động ở chế độ tải cao, việc sử dụng BDF gây giảm hiệu suất nhiều hơn so với động cơ hoạt động ở không tải. Vì vậy, với cùng một loại nhiên liệu, để đạt được công suất 2,5 kW (chế độ tải cao) động cơ sẽ tiêu thụ nhiều nhiên liệu hơn để cung cấp lại lượng năng lượng thiếu hụt so với chế độ không tải.

Kết quả nghiên cứu của đề tài phù hợp với các nghiên cứu khác như trên thế giới [13,15, 27]. Theo nghiên cứu của Pi – Qiang Tan, hiệu suất động cơ khi sử dụng BDF *Jatropha* giảm 4,87 % so với nhiên liệu diesel trên động cơ đốt trong.

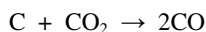
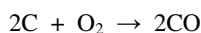
Phát thải khí ô nhiễm của nhiên liệu BDF

Khí carbon monoxide (CO)

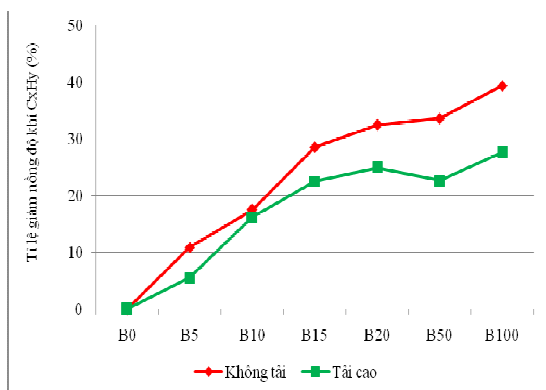
Carbon monoxide (CO) là sản phẩm trung gian của quá trình cháy. Lượng khí thải CO phụ thuộc vào quá trình oxy hóa hiệu quả của nhiên liệu. Sự hiện diện của CO trong khí thải của động cơ đốt trong kết quả chủ yếu từ quá trình đốt cháy nhiên liệu không hoàn toàn.



Hình 3. Tỷ lệ giảm phát thải khí CO của hỗn hợp BDF đầu cò so với nhiên liệu diesel



Một số điều kiện có thể dẫn đến đốt cháy không hoàn toàn như không cung cấp đủ oxy (O_2), tỷ lệ phối trộn nhiên liệu/không khí thấp, nhiệt độ đốt cháy giảm, giảm thời gian lưu khí đốt và giảm tải [7]. Hình 3 thể hiện tỷ lệ giảm phát thải CO của BDF ở chế độ không tải và tải cao. Trong cùng một chế độ tải, phát thải khí CO giảm dần theo tăng tỷ lệ của BDF đầu cò trong hỗn hợp nhiên liệu. Ở chế độ tải cao, so với B0, B5, B10, B15, B20, B50, B100 giảm phát thải khí CO lần lượt là 49,57 %; 64,12 %; 71,83 %; 76,84 %; 85,89 %; 86,18 % tương ứng; Tương tự, ở chế độ không tải, so với nhiên liệu B0, phát thải khí CO giảm 4,12 %; 6,16 %; 11,13 %; 10,11 %; 21,83 %; 26,39 % lần lượt tại B5, B10, B15, B20, B50, B100. Sự giảm hàm lượng CO trong phát thải của động cơ khi sử dụng BDF có thể giải thích dựa vào thành phần cấu tạo của BDF với cấu trúc phân tử chứa nhiều oxy (oxy chiếm 10 – 11 % khối lượng phân tử BDF [1]). Do đó, các hỗn hợp BDF và nhiên liệu diesel sẽ cháy hoàn toàn hơn và cung cấp lượng oxy cần thiết để chuyển CO thành CO_2 . So sánh với các nghiên cứu khác nhận thấy, phát thải khí CO



Hình 4. Tỷ lệ giảm phát thải khí C_xH_y của hỗn hợp BDF đầu cò so với nhiên liệu diesel

cũng giảm khi tăng hàm lượng BDF trong hỗn hợp nhiên liệu. Cụ thể, kết quả nghiên cứu của Roberto chỉ ra rằng nồng độ phát thải CO của B20 và B50 giảm so với B0 là 17,24 % và 41,38 % [22]. Tác giả Tôn Nữ Thanh Phương nghiên cứu phát thải CO từ BDF dầu Jatropha cho thấy so với B0, nồng độ khí CO trong phát thải của B10, B30 và B50 giảm 22,83 %; 33,96 % và 40,38 % [4].

Hợp chất hydrocarbon (C_xH_y) Hợp chất hydrocarbon bao gồm các hợp chất hữu cơ đơn giản như methane đến các hydrocarbon thơm đa vòng. Quá trình cháy của nhiên liệu trong động cơ diesel là một quá trình phức tạp, trong quá trình đó diễn ra đồng thời sự bay hơi nhiên liệu, hoà trộn nhiên liệu với không khí và tự đốt cháy của nhiên liệu. Quá trình tự đốt cháy của nhiên liệu diesel trong động cơ có thể tóm tắt như sau: thành phần chính của nhiên liệu diesel bao gồm các hợp chất hydrocarbon có cấu trúc mạch carbon từ C_{16} đến C_{21} [25] trong quá trình đốt cháy các hydrocarbon này dễ dàng bị bẻ gãy thành các phân tử nhỏ hơn và sau đó tái tổ hợp lại với nhau để hình thành các hydrocarbon có phân tử lượng thấp hơn [18].

Quá trình tự đốt cháy của nhiên liệu diesel phụ thuộc vào nhiều yếu tố như: thành phần nhiên liệu, nồng độ nhiên liệu, độ nhớt của nhiên liệu, nồng độ oxy và sự phân bố nhiệt độ trong ngọn lửa... Khi độ nhớt của nhiên liệu quá lớn hoặc quá bé đều làm giảm khả năng tự bốc cháy, do đó làm tăng nồng độ C_xH_y chưa cháy. Ngoài ra, nồng độ C_xH_y trong phát thải của động cơ sẽ cao hơn ở chế độ tải đầy (tải 100 %) [24].

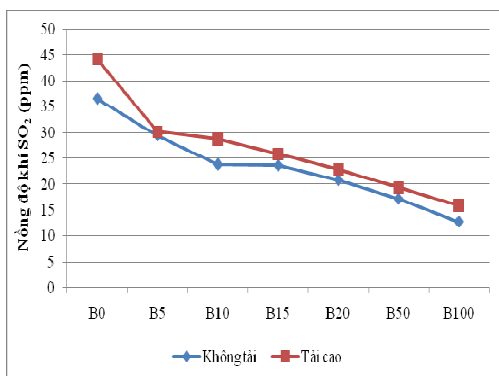
Trong cùng chế độ tải, phát thải C_xH_y giảm theo chiều tăng tỷ lệ phối trộn BDF (Hình 4). So với nhiên liệu diesel (B0), ở chế độ không tải, nồng độ C_xH_y trong phát thải của B5, B10, B15, B20, B50, B100 giảm 10,88 %; 17,52 %; 28,52 %; 32,46 %; 33,59 %; 39,38 %. Tương tự, ở chế độ tải cao, nồng độ C_xH_y trong phát thải của B5, B10, B15, B20, B50, B100 giảm 5,49 %; 16,19 %; 22,52 %; 24,87 %; 22,67 %; 27,64 %. Nồng độ C_xH_y giảm trong phát thải của BDF có thể được giải thích như sau: BDF là những monoalkyl của các acid béo, trong thành phần cấu tạo không chứa các hydrocarbon thơm. Ngoài ra, trong phân tử còn chứa nhiều nguyên tử oxy nên quá trình cháy của các BDF sẽ hoàn toàn hơn vì vậy phát thải các hợp chất hydrocarbon ít hơn so với nhiên liệu diesel. Như đã biết, một trong những hợp chất chính của hydrocarbon là PAHs và các hợp chất carbonyl, hai nhóm chất có khả năng gây ung thư cho con người ở hàm lượng rất thấp [29]. Do đó, việc sử dụng BDF thay cho nhiên liệu diesel sẽ làm giảm các rủi ro sức khỏe lên con người [16].

Khi động cơ chạy cùng một loại nhiên liệu, xét ở hai chế độ không tải và tải cao, nồng độ C_xH_y trong phát thải của động cơ tăng theo chế độ tải trọng. Cụ thể là, ở chế độ tải cao nồng độ C_xH_y trong phát thải của B0, B5, B10, B15, B20, B50, B100 tăng gấp 3,30; 3,15; 2,95; 2,63; 2,56; 2,19; 2,03 lần so với chế độ không tải. Khi

chuyển từ chế độ không tải lên chế độ tải cao số vòng quay của động cơ tăng; điều này, đồng nghĩa với số lần màng lửa bị dập tắt sẽ tăng lên, dẫn đến lượng nhiên liệu chứa trong các không gian không cháy được và làm tăng nồng độ phát thải C_xH_y . Ngoài ra, ở chế độ tải cao sự hòa trộn nhiên liệu vào khu vực cháy không đều có thể làm cho hỗn hợp nhiên liệu phun ra quá nhiều hay quá ít cục bộ. Bên cạnh đó, sự làm mát đột ngột của động cơ có thể làm tắt vùng cháy và dẫn đến quá trình cháy không hoàn toàn của nhiên liệu và phát thải nhiều hợp chất C_xH_y .

Khí sulfur dioxide (SO_2)

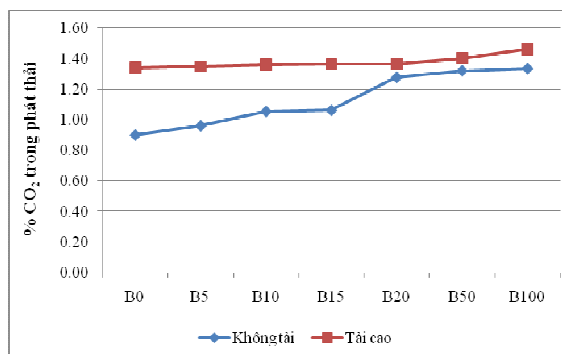
Trong nhiên liệu diesel, lưu huỳnh tồn tại chủ yếu ở dạng sulfur, disulfur hay dị vòng [17]. Lượng khí thải SO_2 được tạo ra trong quá trình đốt nhiên liệu từ quá trình oxy hóa của lưu huỳnh trong thành phần nhiên liệu. Do đó, hàm lượng SO_2 trong khí thải phụ thuộc hoàn toàn vào hàm lượng lưu huỳnh của nhiên liệu. Trung bình hơn 95 % lưu huỳnh trong nhiên liệu được chuyển thành SO_2 , khoảng 1–5 % là tiếp tục bị ôxi hóa thành sulfur trioxide (SO_3) và 1 – 3 % được phát ra như hạt sulfate. SO_3 dễ dàng phản ứng với hơi nước (cả ở ngoài không khí và trong khí thải) để tạo thành acid sulfuric [28]. Sau khi được hình thành, phần lớn khí SO_2 sẽ thoát ra ngoài cùng với khí thải, nhưng có thể một phần lọt vào trong ngăn chứa dầu, khi nhiệt độ trong ngăn chứa xuống thấp SO_2 sẽ kết hợp với hơi nước để tạo các acid tương ứng gây ăn mòn các bề mặt chi tiết khi dầu được bơm trở lại các bề mặt bôi trơn. Khi hàm lượng lưu huỳnh trong nhiên liệu tăng sẽ làm giảm nhiệt độ cháy của nhiên liệu diesel vì vậy làm tăng hàm lượng hydrocarbon chưa cháy, bồ hóng, muội than trong sản phẩm cháy do đó càng làm mài mòn máy móc [12].



Hình 5. Nồng độ khí SO₂ trong phát thải của động

Hình 5 cho thấy, trong cùng chế độ tải, nồng độ SO₂ trong khí thải giảm dần, khi tăng tỷ lệ BDF dầu cọ trong nhiên liệu. Ở chế độ tải cao, nồng độ khí SO₂ dao động trong khoảng 15,91 đến 44,32 ppm. So với B0, nồng độ khí SO₂ trong khí thải của B5, B10, B15, B20, B50, B100 giảm 31,83 %, 35,00 %, 41,58 %; 48,23 %; 56,25 %; 64,12 %. Ở chế độ không tải, nồng độ khí SO₂ dao động trong khoảng 12,75 đến 36,56 ppm. So với B0, nồng độ khí SO₂ trong khí thải của B5, B10, B15, B20, B50, B100 giảm 19,34 %; 34,87 %; 35,39 %; 43,08 %; 53,10%; 65,13%. BDF dầu cọ có nguồn gốc thực vật, do đó trong thành phần cấu tạo ít chứa các hợp chất lưu huỳnh. Vì vậy, khi bị đốt cháy phát thải khí SO₂ của các hỗn hợp nhiên liệu diesel và BDF dầu cọ giảm so với nhiên liệu diesel [11].

So sánh nồng độ khí SO₂ trong phát thải của động cơ chạy ở hai chế độ tải, Hình 5 cho thấy khi tải trọng động cơ tăng, phát thải khí SO₂ cũng tăng theo. Cụ thể là, ở chế độ tải cao, nồng độ khí SO₂ trong phát thải của B0, B5, B10, B15, B20, B50, B100 tăng 21,22 %; 2,45 %; 20,98 %; 9,62 %; 10,25 %, 13,08 %; 24,79 % so với chế độ không tải. Khi máy phát điện hoạt động ở các chế độ tải cao, động cơ sẽ tiêu thụ nhiều nhiên liệu hơn ở chế độ không tải (Hình 2) và phát thải nhiều khí SO₂ hơn là hoàn toàn hợp lý.



Hình 6. % CO₂ trong phát thải của máy phát điện

Khí carbon dioxide (CO₂)

Khí carbon dioxide (CO₂) là sản phẩm cháy hoàn toàn của nhiên liệu trong môi trường giàu oxy và nhiệt độ cao. Trong cùng một chế độ tải, nồng độ CO₂ tăng khi tỷ lệ BDF tăng trong nhiên liệu (Hình 6). Ở chế độ không tải so với B0, nhiên liệu B5, B10, B15, B20, B50 và B100 có phát thải khí CO₂ tăng 6,74 %; 17,04 %; 17,89 %; 41,72 %; 46,58 %; 48,17 %. Ở chế độ tải cao, so với B0, phát thải khí CO₂ của nhiên liệu B5, B10, B15, B20, B50 và B100 tăng 0,59 %; 1,60 %; 1,77 %; 2,06 %; 4,79 %; 9,24 %. Nồng độ CO₂ trong phát thải tăng là do thành phần cấu tạo của BDF bao gồm các cấu trúc phân tử chứa nhiều oxy (chiếm 10 – 11 % khối lượng phân tử BDF) [1]. Do đó, các hỗn hợp BDF cung cấp đủ lượng oxy cần thiết so với nhiên liệu diesel để chuyển hóa CO thành CO₂. Kết quả trong nghiên cứu này tương tự với nghiên cứu của Tôn Nữ Thanh Phương về phát thải CO₂ từ BDF dầu Jatropha. So với nhiên liệu diesel, phát thải CO₂ từ BDF dầu Jatropha tăng 1,57 %; 2,34 %; Biểu đồ thời gian gel hóa của hydrogel chitosan oxi hóa và không oxi hóa 2,72 %; 4,58 %; 4,94 %; 7,06 %; 7,75 % tương ứng với nhiên liệu B5, B10, B15, B20, B25, B50, B100 [4].

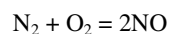
Ngoài ra, cũng thấy rằng ở các chế độ tải hoạt động khác nhau thì phát thải nồng độ CO₂ cũng khác nhau, nồng độ CO₂ trong khí thải tăng khi tăng tải trọng của động cơ.

Cụ thể là, % CO₂ trong phát thải của B0, B5, B10, B15, B20, B50, B100 ở chế độ tải cao tăng 48,78 %; 40,21 %; 29,14 %; 28,44 %; 7,14 %; 6,37 %; 9,69 % so với ở chế độ không tải. Điều này có thể được giải thích như sau, khi tăng tải trọng của động cơ lượng nhiên liệu nạp vào động cơ cũng sẽ tăng, dẫn tới phát thải CO₂ sẽ tăng so với động cơ hoạt động ở chế độ không tải. Bên cạnh đó, khi tăng tải trọng, hiệu suất động cơ tăng dần do tăng áp suất và tăng chất lượng phun nhiên liệu vào buồng đốt làm quá trình đốt cháy nhiên liệu triệt để hơn nên lượng khí thải sinh ra sẽ nhiều CO₂ hơn CO. Do đó, ở tải trọng % CO₂ trong phát thải tăng.

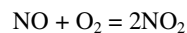
Khí nitơ oxide (NO_x)

Ở điều kiện bình thường, nitơ là một chất khí không màu, không mùi, không vị, khá trơ về mặt hóa học ở điều kiện nhiệt độ thường (nhỏ hơn 1100 °C). Trên 1100 °C, nitơ bắt đầu tham gia vào các phản ứng cháy với oxy trong khí quyển và làm lạnh nhanh chóng để tránh sự phân hủy.

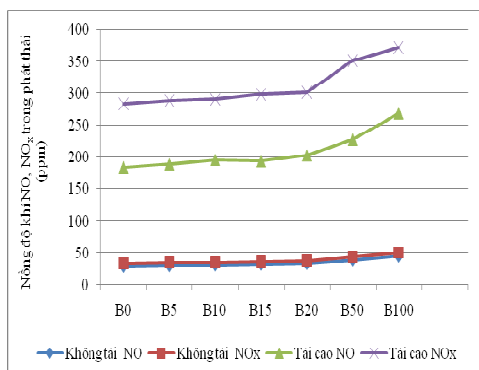
Phản ứng cháy của nitơ khí quyển khi nhiệt độ trên 1100 °C.



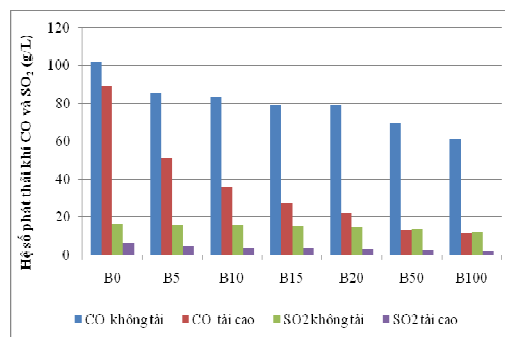
Sau đó NO kết hợp với O₂ trong không khí tạo thành NO₂.



Theo nghiên cứu Agarwal [11], NO_x được tạo ra khi nhiên liệu cháy hoàn toàn ở nhiệt độ cao. Trong chu kỳ hoạt động của động cơ, vào cuối quá trình đốt cháy, nhiệt độ khí đốt bên trong xi lanh khoảng 1500 °C. Tại nhiệt độ này, xảy ra sự oxy hóa nitơ khi có sự hiện diện của oxy bên trong xi lanh. Theo nghiên cứu của Nurun Nabi, hầu hết các hệ thống đốt cháy nhiên liệu hóa thạch, trên 95 % NO_x phát thải dưới dạng của nitric oxide (NO) [20]. Đồng thời, sự hình thành NO_x bị ảnh hưởng bởi bốn yếu tố: nhiệt độ cực đại, nồng độ nitơ, nồng độ oxy và thời gian tiếp xúc ở nhiệt độ cực đại. Lượng khí thải nitơ oxide có thể giảm từ 0,5 – 1 % đối với việc giảm chế độ tải trọng [11].



Hình 7. Nồng độ khí NO, NO_x trong phát thải của máy phát điện



Hình 8. Hệ số phát thải khí CO và khí SO₂ của BDF đầu cò

Hình 7 cho thấy, phát thải NO_x của các hỗn hợp BDF cao hơn so với nhiên liệu diesel tại các chế độ tải của động cơ. Ở chế độ không tải, so với B0, B5, B10, B15, B20, B50, B100 có nồng độ NO tăng 2,57 %; 6,06 %; 9,93 %, 12,87 %; 29,40 %; 49,15 %; nồng độ NO_x tăng 1,89 %; 3,86 %; 5,66 %; 11,53 %; 29,44 %; 47,58 %. Ở chế độ tải cao, so với B0, nhiên liệu B5, B10, B15, B20, B50, B100 có nồng độ NO tăng 2,75 %; 6,55 %; 5,32 %; 10,30 %; 23,62 %; 46,05 %; nồng độ NO_x tăng 1,97 %; 2,54 %; 5,32 %; 6,43 %; 23,96 %; 31,12 %. Nồng độ khí NO_x tăng trong phát thải của các nhiên liệu có chứa BDF có thể được giải thích như sau: BDF dầu cò có nguồn gốc từ thực vật nên thành phần chứa nhiều nguyên tử nitơ hơn nhiên liệu diesel, nên khi bị đốt cháy các nhiên liệu có chứa BDF sẽ phát thải nhiều khí NO_x hơn nhiên liệu diesel. Ngoài ra, do sự hiện diện của oxy trong các phân tử của BDF nên quá trình đốt cháy của nhiên liệu diễn ra hoàn toàn và mạnh mẽ hơn. Điều này làm tăng nhiệt độ của khí đốt bên trong xi lanh

khoảng 1500 $^{\circ}\text{C}$ và phản ứng hình thành khí NO_x từ nitơ và oxy được diễn ra.

Kết quả nghiên cứu của đề tài khá tương tự với kết quả của các nghiên cứu khác được thực hiện trên thế giới và Việt Nam. So với nhiên liệu diesel, phát thải NO_x tăng 10 % khi động cơ chạy bằng BDF dầu cải ở tỷ lệ phối trộn 30 % [20], tăng 1,42 % và 4,64 % khi động cơ chạy bằng BDF dầu dừa tại vòng quay động cơ 2200 vòng/phút ở tỷ lệ phối trộn 5 % và 15 % [15]. Theo một nghiên cứu khác về BDF dầu Jatropha. Ở chế độ không tải, so với B0, phát thải NO_x của B20 và B100 tăng 50 % và 57 % [4].

Hệ số phát thải khí ô nhiễm của BDF dầu cò

Hệ số phát thải chất ô nhiễm của nhiên liệu (mgL^{-1}) (emission factor - ký hiệu là EF) được định nghĩa là lượng chất ô nhiễm sinh ra khi đốt một đơn vị thể tích nhiên liệu trong một đơn vị thời gian. Hệ số phát thải chất ô nhiễm được tính theo công thức:

$$EF_i = \frac{C_i \times Q}{P}$$

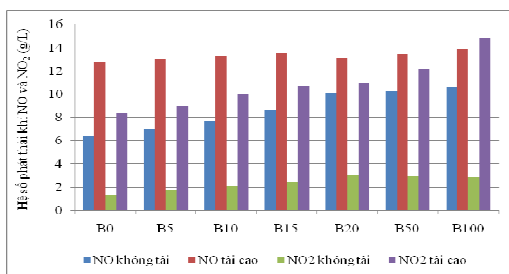
Trong đó:

EF_i : hệ số phát thải của chất i trong phát thải của nhiên liệu.

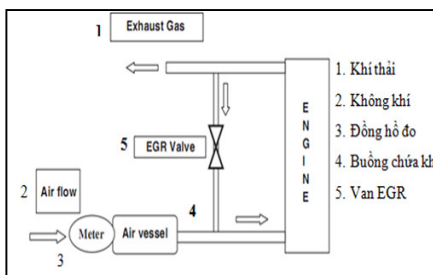
C_i : nồng độ chất i có trong phát thải (mg/m^3).

P : suất tiêu thụ nhiên liệu của động cơ ($\text{mL}/\text{phút}$).

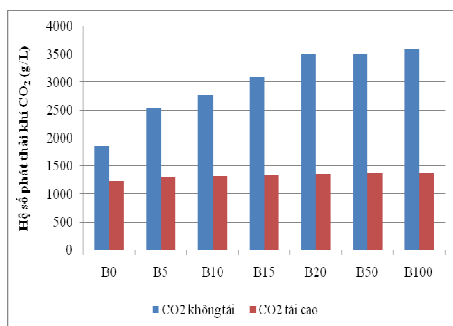
Q : lưu lượng khí thải của động cơ ($\text{m}^3/\text{phút}$).



Hình 9. Hệ số phát thải khí NO và khí NO_2 của nhiên liệu BDF dầu cò



Hình 10. Hệ thống HOT EGR



Hình 11. Hệ số phát thải khí CO₂ của BDF dầu cò

Hệ số phát thải chất ô nhiễm là một thông số quan trọng để đánh giá và so sánh mức độ phát thải chất ô nhiễm từ các quá trình đốt khác nhau. Trong động cơ diesel, ở các chế độ tải khác nhau thì quá trình đốt cháy nhiên liệu là khác nhau và phụ thuộc vào hệ số thừa không khí α [21,26]. Nhìn chung, ở cùng một chế độ tải, hệ số phát thải khí CO và SO₂ giảm, hệ số phát thải khí NO₂, NO, CO₂ tăng khi tỷ lệ BDF tăng trong hỗn hợp nhiên liệu (Hình 7, 8). Ở chế độ không tải, hệ số phát thải khí CO của B5, B10, B15, B20, B50 và B100 giảm 4,12 %; 6,16 %; 10,84 %; 10,78 %; 21,82 %; 31,32 % so với B0; Tương tự, ở chế độ tải cao, so với nhiên liệu diesel hệ số phát thải khí CO của B5, B10, B15, B20, B50 và B100 giảm lần lượt là 49,96 %; 65,06 %; 73,08 %; 78,40 %; 87,30 %; 88,62 %. Như vậy, phối trộn BDF trong nhiên liệu giúp giảm phát thải một số các chất ô nhiễm ra ngoài môi trường. Mặc dù, hệ số phát thải khí NO và NO₂ của nhiên liệu tăng nhưng có thể giảm thiểu chúng trong khí thải bằng cách sử dụng hệ thống tuần hoàn khí thải (HOT- exhaust gas recirculation viết tắt là HOT EGR) khi vận hành động cơ. Hệ thống HOT EGR là phương pháp hiệu quả điều khiển phát thải NO_x của động cơ. Khí thải phát ra từ ống khói được dẫn đến đầu vào động cơ (Hình 9). Khí thải này trở thành không khí đầu vào và được đốt với nhiên liệu khi động cơ ở chu kỳ cháy. Quá trình này giảm nhiệt cần thiết để làm nóng và đốt cháy nhiên liệu do nhiệt độ trong khí thải

là rất cao vì vậy hiệu suất nhiệt giảm giúp giảm hình thành các khí NO_x. Bên cạnh đó, khí CO và hợp chất C_xH_y được đốt cháy thêm một lần nữa hình thành các hợp chất chất ít độc hại hơn (khí CO₂, H₂O).

Khi so sánh hệ số phát thải chất ô nhiễm của nhiên liệu ở chế độ không tải và chế độ tải cao, từ Hình 7, 8 và 10 cho thấy hệ số phát thải khí CO, SO₂ và CO₂ của nhiên liệu ở chế độ tải cao thấp hơn chế độ không tải. Ngược lại, hệ số phát thải khí NO, NO₂ của nhiên liệu ở chế độ tải cao cao hơn chế độ không tải. Điển hình là, hệ số phát thải khí CO của B0, B5, B10, B15, B20, B50 và B100 ở chế độ không tải cao gấp 1,14; 1,67; 2,34; 2,89; 3,61; 5,38 và 5,27 lần so với chế độ tải cao. Hệ số phát thải khí SO₂ của B0, B5, B10, B15, B20, B50 và B100 ở chế độ không tải cao gấp 2,45; 3,60; 4,45; 4,67; 4,98; 5,86 và 6,23 lần so với chế độ tải cao. Hệ số phát thải khí NO₂ của B0, B5, B10, B15, B20, B50 và B100 ở chế độ tải cao cao gấp 6,38; 4,88; 4,75; 4,29; 3,60; 4,14 và 5,08 lần so với chế độ không tải. Hệ số phát thải khí NO của B0, B5, B10, B15, B20, B50 và B100 ở chế độ tải cao cao gấp 2,01; 1,86; 1,73; 1,58; 1,31; 1,31 và 1,31 lần so với chế độ không tải. Ở mỗi chế độ tải, động cơ sẽ thực hiện một số chu kỳ piston trên một đơn vị thời. Khi tăng chế độ tải, số chu kỳ quay của piston cũng tăng tương ứng. Trong quá trình hoạt động, động cơ sẽ lấy oxy từ không khí bên ngoài và hòa trộn với nhiên liệu diesel. Tiếp đó, hỗn hợp nhiên liệu và không khí bị nén ở áp suất cao và tự đốt cháy. Khi động cơ hoạt động ở chế độ không tải, quá trình hòa trộn không khí và nhiên liệu ít hơn so với hoạt động ở chế độ tải cao, lượng không khí lấy từ môi trường vào động cơ thấp. Khi tăng tải trọng, lượng không khí được đưa vào động cơ tăng dần, lượng oxy phối trộn với nhiên liệu cũng tăng lên nên quá trình cháy diễn ra hoàn toàn hơn, lúc này động cơ làm việc hiệu quả hơn. Do đó, ở chế độ tải cao hệ số phát thải các khí ô nhiễm của nhiên liệu như CO, SO₂ và CO₂ ít hơn chế độ không tải

KẾT LUẬN

Nghiên cứu tiến hành đo đạc các phát thải khí thông thường của BDF dầu cọ với nhiên liệu diesel ở các tỷ lệ phối trộn 0 %, 5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 50 % và 100 % (ứng với nhiên liệu B0, B5, B10, B15, B20, B50, B100) sử dụng trên máy phát điện diesel ở chế độ không tải và tải cao. Thông qua các kết quả đo đạc, nghiên cứu rút ra một số kết luận như sau:

Suất tiêu thụ nhiên liệu của động cơ dao động từ 6,45 đến 7,35 mL/phút và từ 19,35 đến 21,65 mL/phút tương ứng ở chế độ không tải và tải cao. Ở cả 2 chế độ tải, khi tăng tỷ lệ phối trộn BDF trong nhiên liệu thì suất tiêu thụ nhiên liệu của động cơ tăng.

Ở cùng một chế độ tải, nồng độ khí SO₂, CO, C_xH_y trong khí thải của động cơ giảm khi tỷ lệ

BDF trong nhiên liệu tăng. Ngược lại, nồng độ khí CO₂, NO và NO₂ trong khí thải của động cơ giảm. BDF dầu cọ được tổng hợp từ dầu thực vật do đó trong phân tử chứa nhiều nguyên tố oxy và không chứa lưu huỳnh. Do đó, khi cháy trong động cơ, nhiên liệu có chứa BDF sẽ cháy hoàn toàn hơn và thải ít khí CO, SO₂ hơn. Các khí NO_x trong khí thải của động cơ có nguồn gốc từ BDF và quá trình oxy hóa nitơ trong không khí tại nhiệt độ cao trong buồng đốt của động cơ.

Khi so sánh hệ số phát thải chất ô nhiễm của nhiên liệu ở chế độ không tải và chế độ tải cao, nghiên cứu cho thấy hệ số phát thải khí CO, SO₂ và CO₂ của nhiên liệu ở chế độ tải cao thấp hơn chế độ không tải. Hệ số phát thải khí NO, NO₂ của nhiên liệu cho kết quả ngược lại.

Evaluating brake specific fuel consumption and gas emissions from palm biodiesel fuel used in diesel generator

• Ton Nu Thanh Phuong

• Le Hoang Giang

• To Thi Hien

University of Science, VNU - HCM

• Takenaka Norimichi

Osaka Prefecture University - Japan

ABSTRACT

This study evaluated brake specific fuel consumption and regulated emissions from palm biodiesel fuel (palm BDF) used on diesel generators. The tests were performed at an idle and high load with

different mixing rate blends between diesel fuel and palm BDF (0 %, 5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 50 %, 100 % which was called B0, B5, B10, B15, B20, B50 and B100) respectively.

The results showed at each loading mode, brake specific fuel consumption increased when the volume of palm BDF rose in the blends. At the idle mode, brake specific fuel consumption increased 1.32 %, 1.8 %, 2.8 %, 3.74 %, 5.61 %, 6.54 % for B5, B10, B15, B20, B50, B100, compared with B0. Similarly at the high load mode, brake specific fuel consumption improved 1.51 %, 1.86 %, 2.18 %, 4.78 %, 5.36 %, 6.76 % for B5, B10, B15, B20, B50, B100, compared with B0. In

both two load modes, when the volume of palm BDF in the fuel blends grew gradually, the concentration of CO, SO₂ and C_xH_y emission reduced while the concentration of NO and NO₂, CO₂ went up. Emission factors of CO, SO₂ and CO₂ at high load are higher than those at an idle load, regardless the ratio of palm BDF to diesel fuel. Conversely, emission factors of NO, NO₂ at high load are higher.

Keywords: Biodiesel fuel, gas emission, diesel generator.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. N.K.D. Hồng, L.N. Thụy, Nghiên cứu tính chất của khói thải động cơ khi sử dụng nhiên liệu sinh học BDF, *Dầu khí*, 3, 41-44 (2010).
- [2]. H.S. Lâm, V. Đ. M. Hoàng, Nghiên cứu thành phần khí thải của động cơ có sử dụng nhiên liệu BDF, *Tạp chí Phát triển Khoa học và Công nghệ*, ĐHQG-HCM, 47, 177 – 184 (2009).
- [3]. T.N.T. Phương, L. V. Hải, T.T. Hien, Nhiên liệu BDF từ dầu hạt Jatropha: tổng hợp và đánh giá phát thải trên động cơ diesel, *Tạp chí Phát triển Khoa học và Công nghệ*, ĐHQG - HCM, 14, 75 – 85 (2011).
- [4]. T.N.T. Phương, Đánh giá phát thải PAHs trên động cơ máy phát điện sử dụng nhiên liệu biodiesel dầu cọ, Luận văn Thạc sỹ, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, ĐHQG - HCM (2012).
- [5]. L.X. Vĩnh, Đánh giá phát thải PAHs trên động cơ máy phát điện có tải sử dụng nhiên liệu BDF dầu cọ, Luận văn Thạc sỹ, Trường Đại học Bách Khoa, ĐHQG - HCM (2013).
- [6]. A. Galadima, O. Muraza, Biodiesel production from algae by using heterogeneous catalysts: A critical review. *Energ*, 43, 7887-7916 (2014).
- [7]. M.Y. Koh, T.I. Mohd. Ghazi, A review of biodiesel production from Jatropha curcas L. oil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 2240-2251 (2011).
- [8]. C. Özer, Combustion characteristics, performance and exhaust emissions of a diesel engine fueled with a waste cooking oil biodiesel mixture. *Energy Conversion and Management*, 87, 676-686 (2014).
- [9]. W.N.W.A. Rashid, Y. Uemura, K. Kusakabe, N.B. Osman, B. Abdullah, Synthesis of biodiesel from palm oil in capillary millichannel reactor: effect of temperature, methanol to oil molar ratio, and KOH concentration on FAME yield. *Procedia Chemistry*, 9, 165-171 (2014).
- [10]. I. M. Rizwanul Fattah, H.H. Masjuki, M.A. Kalam, M. Mofijur, M. J. Abedin, Effect of antioxidant on the performance and emission characteristics of a diesel engine fueled with palm biodiesel blends. *Energy Conversion and Management*, 79, 265-272 (2014).
- [11]. A.K. Agarwal, Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 33, 233-271 (2007).
- [12]. EPA, *External Combustion Sources* [Online] (2013). Available: <http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch01/final/c01s03.pdf>.
- [13]. E.G. Giakoumis, C.D. Rakopoulos, A.M. Dimaratos, D.C. Rakopoulos, Exhaust emissions of diesel engines operating under transient conditions with biodiesel fuel blends. *Progress in Energy and Combustion Science*, 38, 691-715 (2012).
- [14]. N. Hoang, L. Vinh, T. Hien, Biodiesel production from waste shortening oil from instant noodle factories. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 1-9 (2014).

- [15]. A.M. Liaquat, H. H. Masjuki, M. A. Kalam, I. M.R. Fattah, M.A. Hazrat, M. Varman, M. Mofijur, M. Shahabuddin, Effect of coconut biodiesel blended fuels on engine performance and emission characteristics. *Procedia Engineering*, 56, 583-590 (2013).
- [16]. C. Lim, J. Lee, J. Hong, C. Song, J. Han, J.S. Cha, Evaluation of regulated and unregulated emissions from a diesel powered vehicle fueled with diesel/biodiesel blends in Korea. *Energy*, 77, 533-541 (2014).
- [17]. H. Liu, J. Xu, Z. Zheng, S. Li, M. Yao, Effects of fuel properties on combustion and emissions under both conventional and low temperature combustion mode fueling 2,5-dimethylfuran/diesel blends. *Energy*, 62, 215-223 (2013).
- [18]. A.M. Mastral, M.S. Callén, A Review on polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) emissions from energy generation. *Environmental Science & Technology*, 34, 3051-3057 (2000).
- [19]. R. Mohsin, Z.A. Majid, A. H. Shihnan, N.S. Nasri, Z. Sharer, Effect of biodiesel blends on engine performance and exhaust emission for diesel dual fuel engine. *Energy Conversion and Management*, 88, 821-828 (2014).
- [20]. M.N. Nabi, M.M. Rahman, M.S. Akhter, Biodiesel from cotton seed oil and its effect on engine performance and exhaust emissions. *Applied Thermal Engineering*, 29, 2265-2270 (2009).
- [21]. Z. Niu, H. Diao, S. Yu, K. Jiao, Q. Du, G. Shu, Investigation and design optimization of exhaust-based thermoelectric generator system for internal combustion engine. *Energy Conversion and Management*, 85, 85-101 (2014).
- [22]. R.G. Pereira, C.D. Oliveira, J.L. Oliveira, P. C.P. Oliveira, C.E. Fellows, O.E. Piamba, Exhaust emissions and electric energy generation in a stationary engine using blends of diesel and soybean biodiesel. *Renewable Energy*, 32, 2453-2460 (2007).
- [23]. S. Rabl, T.J. Davies, A.P. McDougall, R.F. Cracknell, Understanding the relationship between ignition delay and burn duration in a constant volume vessel at diesel engine conditions. *Proceedings of the Combustion Institute*, (2014).
- [24]. S.M. A. Rahman, H.H. Masjuki, M.A. Kalam, M.J. Abedin, A. Sanjid, H. Sajjad, Impact of idling on fuel consumption and exhaust emissions and available idle-reduction technologies for diesel vehicles – A review. *Energy Conversion and Management*, 74, 171-182 (2013).
- [25]. X. Sun, X. Liang, G. Shu, H. Tian, H. Wei, X. Wang, Comparison of the two-stage and traditional single-stage thermoelectric generator in recovering the waste heat of the high temperature exhaust gas of internal combustion engine. *Energy*, 77, 489-498 (2014).
- [26]. P.Q. Tan, Z.Y. Hu, D.M. Lou, Z.J. Li, Exhaust emissions from a light-duty diesel engine with Jatropha biodiesel fuel. *Energy*, 39, 356-362 (2012).
- [27]. E. Torres-Jimenez, M. S. Jerman, A. Gregorc, I. Lisec, M.P. Dorado, B. Kegl, Physical and chemical properties of ethanol–diesel fuel blends. *Fuel*, 90, 795-802 (2011).
- [28]. M. Vojtisek-Lom, J. Czerwinski, J. Leníček, M. Sekyra, J. Topinka, Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in exhaust emissions from diesel engines powered by rapeseed oil methyl ester and heated non-esterified rapeseed oil. *Atmospheric Environment*, 60, 253-261 (2012).