



DOI:10.22144/ctujos.2026.080

ĐÁNH GIÁ ẢNH HƯỞNG CỦA NHIÊN LIỆU DIESEL SINH HỌC SẢN XUẤT TỪ BÃ CÀ PHÊ PHẾ THẢI ĐẾN HIỆU SUẤT VÀ PHÁT THẢI ĐỘNG CƠ DIESEL

Trần Văn Định^{1,2*}, Lê Văn Vang³, Trương Thanh Hải⁴, Nguyễn Hoài Tân¹ và Phan Công Minh Toàn²

¹Khoa Kỹ thuật Cơ khí, Trường Bách Khoa, Đại học Cần Thơ, Việt Nam

²Học viên cao học ngành Kỹ thuật ô tô, Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

³Viện Hàng hải, Trường Đại học Giao thông Vận tải Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

⁴Viện Năng lượng và Giao thông, Trường Đại học Giao thông Vận tải Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

*Tác giả liên hệ (Corresponding author): tvdinh@ctu.edu.vn

Thông tin chung (Article Information)

Nhận bài (Received): 20/01/2026

Sửa bài (Revised): 05/03/2026

Duyệt đăng (Accepted): 11/05/2026

Title: Performance and Emissions Assessment of the D229-4 Diesel Engine Fueled with Biodiesel Derived from Spent Coffee Grounds

Author(s): Tran Van Dinh^{1,2*}, Le Van Vang³, Trương Thanh Hải⁴, Nguyễn Hoài Tân¹ and Phan Cong Minh Toan²

Affiliation(s): ¹Faculty of Mechanical Engineering, College of Engineering, Can Tho University, Viet Nam; ²Graduate student in Automotive Engineering, Ho Chi Minh City University of Transport, Viet Nam; ³Institute of Maritime, Ho Chi Minh City University of Transport, Ho Chi Minh City, Viet Nam; ⁴Institute of Energy and Transportation, Ho Chi Minh City University of Transport, Viet Nam

TÓM TẮT

Nghiên cứu này được thực hiện nhằm đánh giá hiệu suất và phát thải của động cơ D229-4 sử dụng Biodiesel từ bã cà phê thải. Nhiên liệu Diesel và Biodiesel được pha trộn theo tỷ lệ 0%, 20%, 40% và 100%. Kết quả mô phỏng 1200 – 2400 vòng/phút cho thấy khi tăng tỷ lệ Biodiesel, hiệu suất giảm nhẹ, công suất và moment xoắn giảm 2 – 5% ở B20, B40 và 15 – 20% ở B100; suất tiêu hao nhiên liệu tăng 2 – 4% ở B20, B40 và 20 – 25% ở B100. Về phát thải khi sử dụng B20, B40 và B100, hàm lượng muội than, SO₂, CO₂ giảm lần lượt khoảng 70 – 79%, 65 – 85% và 12 – 40%; riêng NO_x tăng 3 – 10% ở B20 và B40, nhưng giảm 45 – 65% ở B100. Kết quả cho thấy Biodiesel từ bã cà phê là một nguồn nhiên liệu tái tạo tiềm năng, không cạnh tranh với lương thực và góp phần đáng kể làm giảm ô nhiễm môi trường.

Từ khóa: Bã cà phê đã qua sử dụng, Diesel sinh học, hiệu suất động cơ, nhiên liệu thay thế, phát thải động cơ

ABSTRACT

This study evaluates the performance and emissions of the D229-4 engine fueled with Biodiesel derived from waste coffee grounds. Fuel blends were formulated by mixing Diesel and Biodiesel at 0%, 20%, 40%, and 100%. Simulation results at 1,200 – 2,400 rpm show that increasing the Biodiesel ratio slightly reduces engine efficiency, with power and torque decreasing by 2 – 5% for B20 and B40, and 15 – 20% for B100; while brake specific fuel consumption rises by 2 – 4% for B20 and B40, and 20 – 25% for B100. Regarding emissions, B20, B40, and B100 reduce Particulates Matter (PM), SO₂, and CO₂ by approximately 70 – 79%, 65 – 85%, and 12 – 40%, respectively. NO_x increases by 3 – 10% for B20 and B40, but decreases by 45 – 65% for B100. These results demonstrated that coffee-ground Biodiesel is a promising renewable fuel that does not compete with food resources and can substantially mitigate environmental pollution.

Keywords: Alternative fuel, biodiesel, engine efficiency, engine emissions, spent coffee grounds

1. GIỚI THIỆU

Hiện nay, hầu hết các nguồn năng lượng có nguồn gốc từ nhiên liệu hóa thạch. Xã hội càng phát triển nguồn nhiên liệu tiêu thụ càng nhiều, kéo theo lượng khí thải độc hại như Carbon monoxide (CO), Hydrocarbon (HC), các Oxit Nitơ (NO_x), Carbon dioxide (CO_2) và chất thải dạng hạt (Particulates Matter – PM) thải ra môi trường càng lớn, gây ra ô nhiễm môi trường, biến đổi khí hậu và ảnh hưởng trực tiếp đến sức khỏe con người. Bên cạnh đó, với đà tiêu thụ nhiên liệu hóa thạch thì nhiên liệu hóa thạch cũng dần bị cạn kiệt. Để khắc phục hiện trạng này, hàng loạt giải pháp được thực hiện như phát triển xe điện, xe lai, xe hydro,... Trong đó, việc tìm nguồn năng lượng mới thay thế nguồn năng lượng hóa thạch cũng là hướng đi mới đầy hứa hẹn.

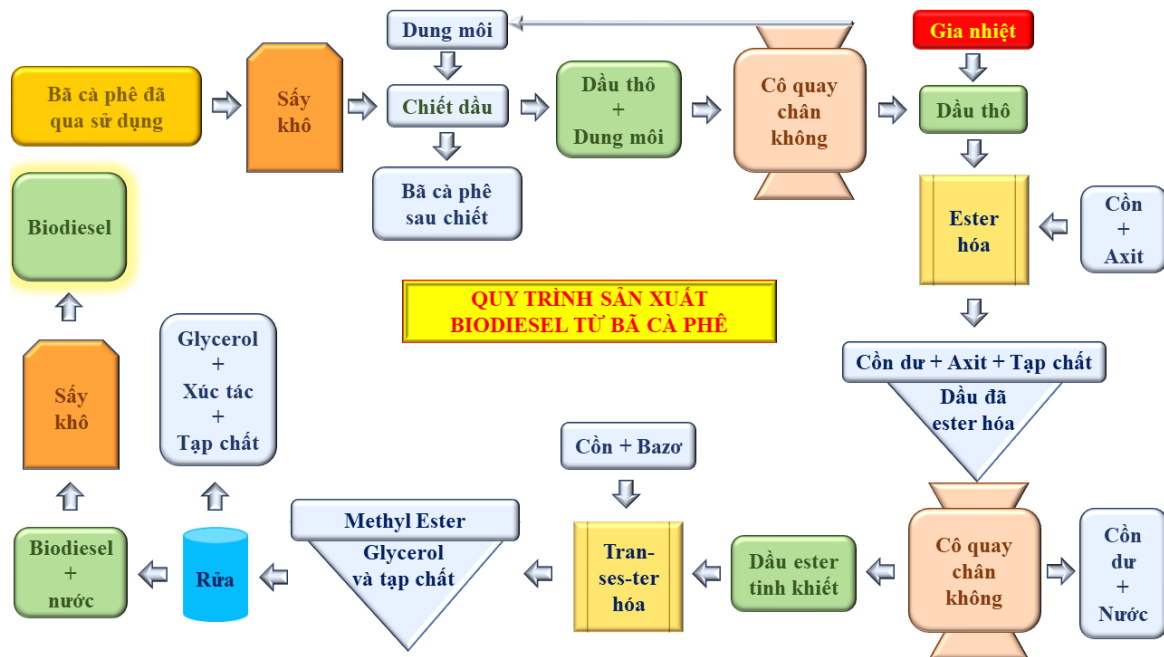
Nhiên liệu Biodiesel là nhiên liệu sinh học có nguồn gốc từ dầu thực vật (hạt hướng dương, hạt cải, dầu dừa, dầu cọ,...), mỡ động vật (mỡ bò, mỡ lợn,...) hoặc dầu ăn phế thải... Nhiên liệu Biodiesel là nguồn năng lượng tái tạo thân thiện với môi trường, giảm đáng kể phát thải ô nhiễm khi sử dụng trên động cơ. Cụ thể, hỗn hợp nhiên liệu Diesel gốc và Biodiesel có nguồn gốc từ dầu đậu nành – soybean oil methyl ester (SME) đã được sử dụng nhằm đánh giá ảnh hưởng đến tính năng làm việc và phát thải của động cơ Diesel (Al-Dawody & Bhatti, 2011). Ở một nghiên cứu khác, độ tin cậy của nhiên liệu Biodiesel thông số công tác, mức phát thải động cơ sử dụng trên các phương tiện vận tải tại các mỏ khai thác khoáng sản, phương tiện cơ giới quân sự,... đã được đánh giá (Yến, 2015). Bên cạnh đó, việc đánh giá ảnh hưởng của Biodiesel từ dầu cải rapeseed methyl ester (RME) trong hỗn hợp Biodiesel B30, B50 và B100 đến đặc tính phát thải CO, HC, NO_x , CO_2 và chất thải dạng hạt (PM) của động cơ Diesel thông qua việc thử nghiệm trên băng thử chassis dynamometer (Bielaczyc et al., 2009). Ngoài ra, nhiên liệu Biodiesel từ dầu cọ – palm methyl ester (PME) đã chứng minh có tiềm năng cung cấp một phần giải pháp giảm khí thải cho động cơ Diesel hạng nhẹ, cả ở dạng nguyên chất và dạng pha trộn. Việc sử dụng PME nguyên chất đã làm giảm đáng kể NO, Unburned Hydrocarbons – tức Hydrocarbon chưa cháy hết và độ mờ khói trong ống xả lần lượt là 5,0%, 26,2% và 66,7% (Ng et al., 2012)

Nhìn chung, Biodiesel là một nhiên liệu thay thế lý tưởng, góp phần làm giảm đáng kể phát thải ô

nhiễm môi trường bởi động cơ đốt trong. Tuy vậy, phần lớn các nguồn nguyên liệu dùng để sản xuất Biodiesel hiện nay như đậu nành, dầu cải, dầu cọ, dầu dừa hay mỡ động vật đều có giá trị thực phẩm. Việc khai thác và sử dụng các nguồn nguyên liệu này cho mục đích năng lượng có thể làm gia tăng áp lực lên an ninh lương thực cũng như cạnh tranh sử dụng đất cho sản xuất nông nghiệp (Rathmann et al., 2010). Do vậy, một hướng tiếp cận mới bền vững hơn là phát triển nhiên liệu Biodiesel có nguồn gốc từ phụ phẩm, phế phẩm thải mà không còn giá trị sử dụng trong thực phẩm. Một trong những nguồn sản xuất Diesel sinh học tiết kiệm đó là bã cà phê phế thải, đây được xem như là cách góp phần vào việc tái sử dụng bã cà phê. Điều này giúp đảm bảo không cạnh tranh với nguồn nguyên liệu tham gia vào chuỗi cung ứng lương thực, thực phẩm của con người hiện nay. Đặc biệt khi Việt Nam là một trong những quốc gia có sản lượng và xuất khẩu cà phê lớn nhất thế giới. Tuy nhiên, việc thực hiện các nghiên cứu nhằm tìm hiểu về việc sử dụng Biodiesel có nguồn gốc từ bã cà phê trên động cơ Diesel vẫn còn hạn chế.

Nghiên cứu của Efthymiopoulos et al. (2019) khi được thực hiện đã tập trung vào việc tối ưu hóa quá trình sản xuất và đặc tính cháy của Biodiesel Spent Coffee Ground (SCG) trên động cơ thử nghiệm một xylanh. Ngoài ra, việc đánh giá ảnh hưởng của hỗn hợp Biodiesel SCG đến phát thải và tính năng làm việc của động cơ Diesel một xylanh hút khí tự nhiên đã được tiến hành trong nghiên cứu của Kamil et al. (2019). Tuy vậy, các nghiên cứu trước được thực hiện chủ yếu dừng lại ở quy mô động cơ đơn xylanh. Mặt khác, các nghiên cứu được tiến hành còn tập trung vào việc phân tích các chỉ tiêu hiệu suất và phát thải tổng thể, hiệu suất nhiệt, quá trình cháy và diễn biến áp suất, nhiệt độ trong xylanh chưa thể hiện rõ, đặc biệt với tỷ lệ pha trộn trung bình và cao.

Vì vậy, việc sử dụng nhiên liệu Biodiesel SCG có nguồn gốc từ bã cà phê đã qua sử dụng, phế phẩm cà phê, cà phê bị lỗi trong quá trình chế biến trong nghiên cứu này nhằm đánh giá hiệu suất năng lượng (công suất, moment xoắn, hiệu suất nhiệt, suất tiêu hao nhiên liệu) và phát thải trên động cơ Diesel bốn xylanh ở các tỷ lệ pha trộn Biodiesel khác nhau. Hơn nữa, kết quả nghiên cứu cung cấp cái nhìn chi tiết về diễn biến áp suất, nhiệt độ trong xylanh cũng như cơ chế hình thành phát thải NO_x và muội than theo góc quay trục khuỷu.



Hình 1. Quy trình sản xuất Biodiesel từ bã cà phê phế thải

Kết quả nghiên cứu kỳ vọng sẽ cung cấp cơ sở khoa học, tạo tiền đề cho việc ứng dụng hiệu quả dầu từ bã cà phê như một nhiên liệu thay thế tiềm năng trong tương lai. Đảm bảo an ninh năng lượng và hạn chế những tác động tiêu cực của nhiên liệu hóa thạch nói chung và nhiên liệu Diesel truyền thống nói riêng đến môi trường và sức khỏe con người.

Biodiesel SCG phục vụ quá trình mô phỏng được thu thập từ những công bố khoa học đáng tin cậy, với quy trình sản xuất được mô tả bằng việc đầu tiên là thu gom bã cà phê phế thải hoặc bị hỏng trong quá trình chế biến, sau đó sấy khô nhằm loại bỏ độ ẩm, tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình chiết dầu. Dầu thô sau chiết cùng với dung môi được loại bỏ thông qua thiết bị cô quay chân không. Tiếp theo, nhằm giảm hàm lượng axit béo tự do trong dầu thô, hỗn hợp được đưa vào quá trình ester hóa có xúc tác axit. Sau khi phản ứng kết thúc, sản phẩm được chuyển sang phễu chiết, tại đây hình thành hai pha riêng biệt gồm còn dư, axit và tạp chất, cùng với dầu sau ester hóa. Trước khi tiến hành bước tiếp theo, dầu đã ester hóa được thu hồi bằng thiết bị cô quay, nhằm tách methanol dư và nước ra khỏi hỗn hợp (Harb & Salloum Abou Jaoudeh, 2025).

Công đoạn tiếp theo là tạo methyl ester thông qua phản ứng transester hóa, sử dụng cồn và xúc tác bazơ. Sản phẩm sau phản ứng tiếp tục được tách pha trong phễu chiết, tạo thành hai pha riêng biệt. Pha

trên là methyl ester (Biodiesel thô), trong khi pha dưới bao gồm glycerol và các tạp chất. Biodiesel thô sau đó được rửa nhiều lần bằng nước ấm (có thể kết hợp với dung dịch axit sulfuric loãng) nhằm trung hòa xúc tác dư, đồng thời loại bỏ xà phòng và các tạp chất còn sót lại. Cuối cùng, Biodiesel được làm khô để loại bỏ lượng nước còn lại, qua đó đảm bảo chất lượng nhiên liệu Biodiesel (Harb & Salloum Abou Jaoudeh, 2025).

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Phần mềm Diesel-RK (Release: 4.3.0.189, May 2023) được sử dụng để mô phỏng quá trình công tác của động cơ Diesel. Động cơ sử dụng nhiên liệu Diesel gốc pha trộn với Biodiesel nguyên chất theo tỷ lệ 0% (B0), 20% (B20), 40% (B40) và 100% (B100). Trong đó, hỗn hợp Diesel và Biodiesel (Bx) gồm có B0 đại diện cho nhiên liệu Diesel khoáng nguyên chất, còn các mẫu B20, B40 và B100 là hỗn hợp pha trộn khác nhau giữa Diesel khoáng và Biodiesel nguyên chất theo tỷ lệ lần lượt là 20%, 40% và 100% hàm lượng Biodiesel nguyên chất.

Phương pháp được thực hiện bằng việc nhập các thông số kỹ thuật động cơ vào phần mềm Diesel-RK. Sau đó đặc tính nhiên liệu Biodiesel SCG được khai báo trong phần mềm. Sau khi hoàn tất thiết lập các thông số đầu vào, quá trình chạy mô phỏng được tiến hành.

Trong quá trình mô phỏng, kết cấu và đặc tính kỹ thuật của động cơ được giữ nguyên, chỉ thay đổi loại nhiên liệu sử dụng. Các phép mô phỏng được thực hiện tại năm chế độ tốc độ động cơ lần lượt là 1200, 1500, 1800, 2100 và 2400 vòng/phút (trong đó vòng tua định mức tại 1800 vòng/phút). Kết quả dữ liệu đầu ra được xử lý, tổng hợp và biểu diễn dưới dạng bảng biểu và đồ thị bằng phần mềm Microsoft Excel (2023) và Origin (2026) nhằm phục vụ cho việc phân tích và đánh giá kết quả.

2.1. Thông số của nhiên liệu

Bảng 1 trình bày các thông số hóa lý của nhiên liệu Biodiesel SCG, bao gồm các đặc tính hóa lý, phục vụ quá trình mô phỏng hoạt động của nhiên liệu trong động cơ.

Thông số Biodiesel SCG được thu thập từ công bố khoa học có liên quan. Bên cạnh đó, thành phần và đặc tính của nhiên liệu cũng được thu thập từ cơ sở dữ liệu tích hợp sẵn trong phần mềm Diesel-RK giúp đảm bảo mô hình mô phỏng phản ánh chính xác đặc tính làm việc của nhiên liệu trong điều kiện thực

tế, từ đó nâng cao độ tin cậy và tính chính xác của các kết quả mô phỏng và tính toán thu được (Al-Hamamre et al., 2012; Kamil, et al., 2020; Carlucci et al., 2017; Lee et al., 2019; Sugebo, 2022; Deligiannis et al., 2015).

Do dữ liệu thực nghiệm cho hỗn hợp B20 và B40 chưa được công bố hoàn toàn đầy đủ, việc tổng hợp bao gồm xem xét yếu tố độ ẩm, nhiệt độ môi trường, điều kiện bảo quản, điều kiện nhiên liệu và đặc tính của các động cơ Diesel phổ biến đang được sử dụng tại Việt Nam. Một số thông số tương ứng được xác định bằng phương pháp nội suy tuyến tính nhằm phục vụ mục đích chẩn đoán kỹ thuật như thông số khối lượng riêng, nhiệt trị thấp, chỉ số Xê-tan, các thành phần nguyên tố,... Bên cạnh đó, các thông số về mật độ và độ nhớt trong hỗn hợp Biodiesel cũng được xác định bởi nghiên cứu có liên quan (Mengistu et al., 2024). Các giá trị này đều nằm trong giới hạn tiêu chuẩn ASTM D6751-24 (USA) và EN 14214:2012 + A2:2019 (Europe), sai số ước tính trong phạm vi <5%.

Bảng 1. Thông số nhiên liệu Biodiesel SCG (Al-Hamamre et al., 2012; Kamil et al., 2020; Carlucci et al., 2017; Lee et al., 2019; Sugebo, 2022; Deligiannis et al., 2015)

Thông số	Đơn vị	Nhiên liệu Biodiesel SCG				
		B0	B20	B40	B100	
Thành phần (Theo khối lượng)	Carbon	%	87	83,57	82,18	74,90
	Hydro	%	12,6	12,10	11,76	9,90
	Oxy	%	0,40	2,47	4,73	9,63
Hàm lượng lưu huỳnh		%	0,002	0,00220	0,00208	0,00105
Trị số tỏa nhiệt thấp		MJ/kg	42,5	41,24	39,89	36,22
Chỉ số Xê-tan		-	48	49,60	51,22	56,11
Khối lượng riêng của nhiên liệu ở 323 ⁰ K		kg/m ³	830	841	852	1005
Hệ số sức căng bề mặt ở 323 ⁰ K		N/m	0,028	0,031	0,034	0,038
Độ nhớt động học ở 323 ⁰ K		Pas	0,0030	0,0033	0,0036	0,0043
Nhiệt hóa hơi riêng		kJ/kg	250	265,8	281,2	325
Khối lượng mol		g/mol	190	211,5	232,5	292,2
Hệ số khếch tán ở điều kiện khí quyển		s	3,1.10 ⁻¹⁰			
Áp suất hơi bão hòa ở nhiệt độ thấp (465 ⁰ K)		bar	-	-	-	0,0409
Áp suất hơi bão hòa ở nhiệt độ thấp (480 ⁰ K)		bar	0,0477	0,0409	0,0331	-
Áp suất hơi bão hòa tại nhiệt độ tới hạn		bar	1,616	1,630	1,621	1,576
Nhiệt độ tới hạn		⁰ K	710	721,2	734,0	786,0

2.1. Thông số kỹ thuật động cơ

Động cơ Diesel MWM D229-4 đã được nghiên cứu và mô phỏng, thường được sử dụng cho các thiết

bị công nghiệp, máy phát điện, máy bơm tưới tiêu, máy kéo, máy phun,...

Bảng 2. Thông số kỹ thuật động cơ Diesel D229 – 4 (Al-Dawody & Bhatti, 2011)

TT	Thông số kỹ thuật	Giá trị
1	Nhà sản xuất	MWM
2	Mã động cơ	D229-4
3	Loại động cơ	I4
4	Đường kính xy lanh (mm)	102
5	Hành trình piston (mm)	120
6	Tỷ số nén	17:1
7	Dung tích công tác (dm ³)	3,922
8	Thứ tự làm việc	1-3-4-2
9	Kiểu hút khí	Tự nhiên
10	Hệ thống làm mát	Chất lỏng
11	Kiểu phun nhiên liệu	Trực tiếp
12	Công suất cực đại/ vòng quay (kW/(vòng/phút))	44/1800
13	Góc phun sớm nhiên liệu (độ góc quay trục khuỷu)	10
14	Số lỗ phun trên một vòi phun	4
15	Số vòi phun trên một xy lanh	1
16	Số xéc măng khí	2
17	Số xéc măng dầu	1
18	Số xupap nạp	2
19	Số xupap xả	2

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

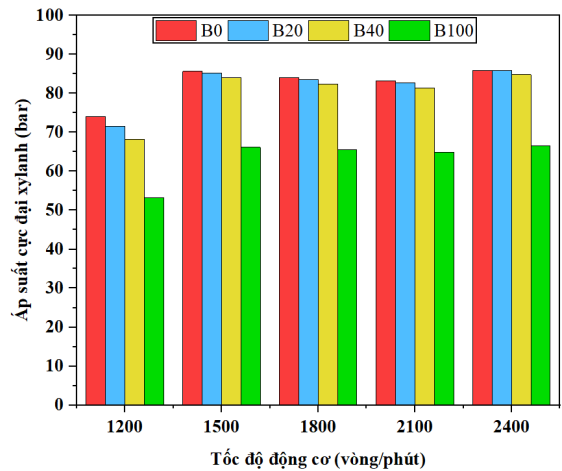
Kết quả sau khi chạy mô phỏng bằng phần mềm Diesel-RK, động cơ Diesel D229-4 được mô phỏng hoạt động với bốn hỗn hợp nhiên liệu gồm B0, B20, B40 và B100 như sau:

3.1. Phân tích quá trình cháy

Hình 2 và Hình 3 cho thấy áp suất và nhiệt độ cực đại của động cơ giảm khi tăng hàm lượng Biodiesel trong nhiên liệu.

Tại chế độ làm việc với vòng tua định mức 1800 vòng/phút có thể nhận thấy sự khác biệt rõ về đặc tính nhiệt độ giữa các loại nhiên liệu. Cụ thể, nhiệt độ cực đại B0 là 1916,9⁰K, trong khi đó B100 giá trị này được ghi nhận là 11567⁰K. Đồng thời, giá trị áp suất cực đại cũng có sự chênh lệch đáng kể, với B0 là 84,04 bar, B100 là 56,51 bar.

Ngoài ra, khi so sánh nhiên liệu B0 với B20 và B40 thì cho thấy mức suy giảm không đáng kể, chỉ giảm nhẹ (<4% về nhiệt độ cực đại, <8% về áp suất cực đại), trong khi B100 giảm 16 – 28% về nhiệt độ, 21,96 – 28,12% về áp suất, đặc biệt ở 1200 vòng/phút (Bảng 3).



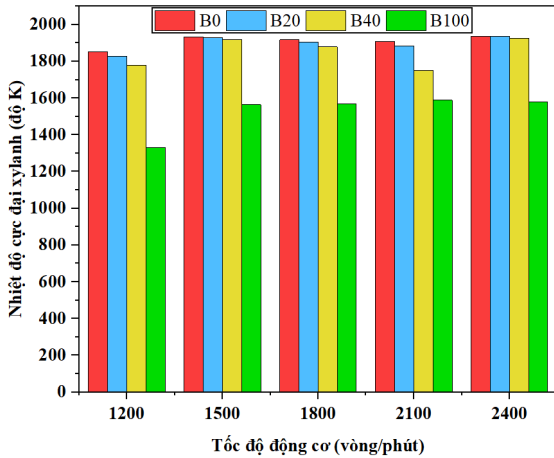
Hình 2. Đồ thị biểu diễn áp suất cực đại của động cơ tại các chế độ làm việc khác nhau

Bảng 3. So sánh sự thay đổi nhiệt độ và áp suất cực đại động cơ khi sử dụng nhiên liệu Biodiesel (%)

Vòng tua (vòng/phút)	B0 (°K)	Mức giảm nhiệt độ so với B0		
		B20	B40	B100
1200	1853,2	1,47	3,97	28,15
1500	1932,9	0,26	0,80	19,00
1800	1916,9	0,60	2,00	18,27
2100	1908,4	1,33	8,29	16,77
2400	1936,9	0,99	0,58	18,43

Vòng tua (vòng/phút)	B0 (bar)	Mức giảm áp suất so với B0		
		B20	B40	B100
1200	74,09	3,52	7,84	28,12
1500	85,63	0,51	1,76	22,71
1800	84,04	0,56	2,05	22,03
2100	83,20	0,60	2,16	21,96
2400	85,93	0,12	1,32	22,59

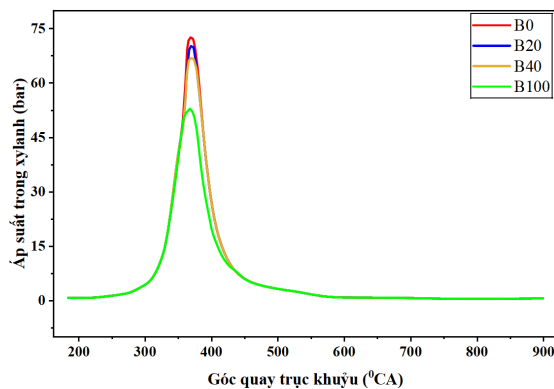
Dựa vào đặc tính hóa lý của nhiên liệu Biodiesel (Bảng 1) có thể thấy, tuy hàm lượng oxy cao nhưng độ nhớt lớn khiến khả năng bay hơi kém làm thay đổi quá trình cháy, nhiên liệu - không khí phân bố chưa đồng đều, làm giảm vùng quá nhiệt và áp suất đỉnh trong buồng đốt, quá trình cháy có xu hướng diễn biến áp suất ít đỉnh nhọn hơn (Hình 4). Thực tế, khi động cơ Diesel sử dụng nhiên liệu Biodiesel thường cho ra áp suất cực đại và nhiệt độ cực đại thấp hơn so với nhiên liệu gốc (Magín Lapuerta, 2007; Agarwal, 2007).



Hình 3. Đồ thị biểu diễn nhiệt độ cực đại của động cơ tại các chế độ làm việc khác nhau

3.1.1. Diễn biến áp suất trong xi lanh

Đồ thị Hình 4 thể hiện diễn biến áp suất trong xi lanh theo góc quay trục khuỷu (crank angle – CA) tại vòng tua định mức 1800 vòng/phút (các tốc độ động cơ khác cũng có diễn biến tương tự như tại 1800 vòng/phút). Đường cong áp suất của B0, B20, B40 và B100 khá tương đồng, quá trình cháy gần như cùng pha và cùng quy luật, khác biệt chủ yếu ở đỉnh áp suất cực đại. Đỉnh áp suất xuất hiện ngay sau khi piston đi qua điểm chết trên., khi hàm lượng Biodiesel tăng, đỉnh áp suất có xu hướng giảm dần.



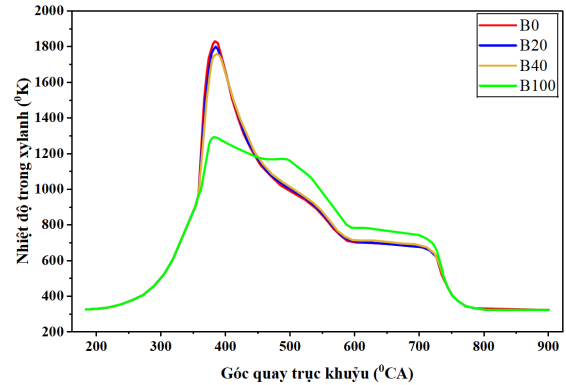
Hình 4. Đồ thị diễn biến áp suất trong xi lanh động cơ tại vòng tua định mức

3.1.2. Diễn biến nhiệt độ trong xi lanh

Đồ thị Hình 5 mô phỏng sự biến thiên nhiệt độ trong xi lanh theo góc quay trục khuỷu tại 1800 vòng/phút cho thấy đường cong nhiệt độ của B0, B20, B40 và B100 gần như tương đồng. Điểm cực đại xuất hiện ở giai đoạn chính của quá trình cháy, piston vừa qua điểm chết trên, rồi giảm dần. Nhiệt độ cực đại giảm tuyến tính khi hàm lượng Biodiesel

tăng, cho thấy sự thay đổi quá trình cháy ảnh hưởng đến tốc độ phản ứng, áp suất sinh công và phát thải (Wei, et al., 2017).

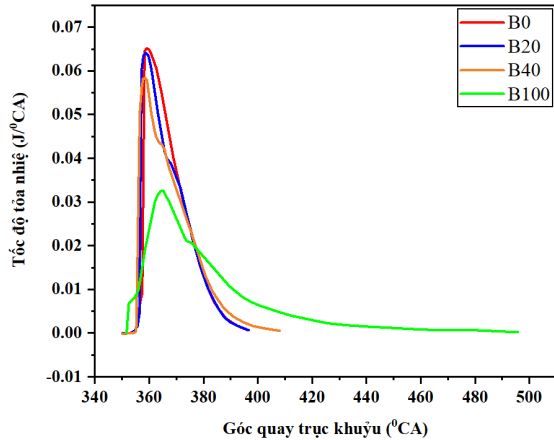
Ở giai đoạn sau khi cháy, từ thời điểm khoảng 450°CA, mức nhiệt của B100 cao hơn các nhiên liệu khác, do độ nhớt trong Biodiesel cao khiến tốc độ bay hơi nhiên liệu giảm, làm quá trình phân tán và hòa trộn với không khí diễn ra chậm hơn. Điều này dẫn đến thời gian cháy bị kéo dài qua quá trình giãn nở (Nguyen et al., 2020).



Hình 5. Đồ thị diễn biến nhiệt độ trong xi lanh động cơ tại vòng tua định mức

3.1.3. Diễn biến tốc độ tỏa nhiệt trong xi lanh

Đồ thị Hình 6 cho thấy đỉnh HRR giảm dần khi tăng hàm lượng Biodiesel. Diesel thuần đạt HRR cực đại cao nhất, tiếp theo là B20, B40 và B100. Đỉnh tỏa nhiệt của Biodiesel xuất hiện sớm hơn Diesel do chỉ số Xê-tan cao thúc đẩy bẻ lửa sớm (Mengistu et al., 2024). Ở giai đoạn khuếch tán, HRR của B100 duy trì ở mức cao hơn trong khoảng góc quay lớn hơn, cho thấy quá trình cháy kéo dài hơn do tốc độ bay hơi chậm và sự phân bố năng lượng cháy đồng đều hơn trong buồng đốt (Nguyen et al., 2020). Nhìn chung, việc tăng hàm lượng Biodiesel làm giảm tốc độ tỏa nhiệt cực đại và kéo dài thời gian cháy, có thể làm giảm hiệu suất cháy và công suất động cơ



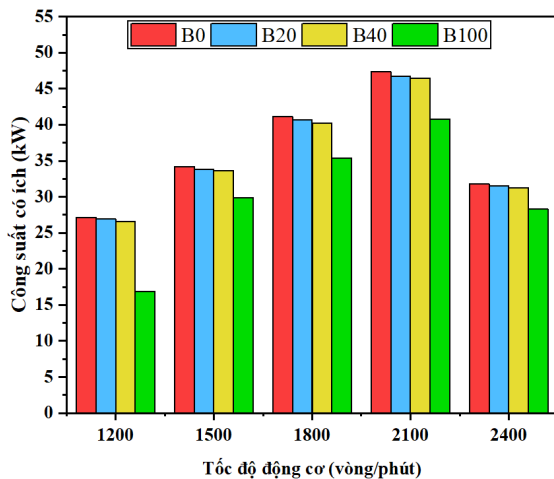
Hình 6. Đồ thị diễn biến tốc độ tỏa nhiệt (Heat Release Rate – HRR) trong xy lanh động cơ tại vòng tua định mức

3.2. Đánh giá hiệu suất

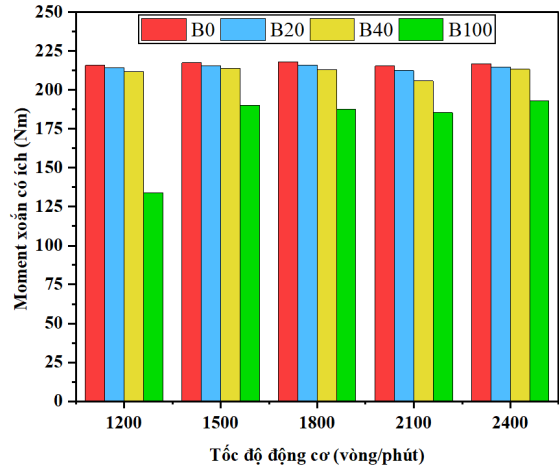
Hiệu suất làm việc của động cơ được đánh giá nhằm xác định khả năng sinh công, mức tiêu thụ nhiên liệu cũng như hiệu quả chuyển đổi năng lượng của động cơ khi thay đổi các loại nhiên liệu.

3.2.1. Công suất và moment xoắn động cơ

Ở mọi vòng tua (Hình 7 và Hình 8), công suất Diesel gốc luôn cao nhất và B100 là thấp nhất. Tại vòng tua định mức 1800 vòng/phút, công suất và moment xoắn nhiên liệu B0 đạt lần lượt là 41,12 kW và 218,18 Nm so với B100 đạt 35,36 kW và 187,62 Nm (công suất và moment xoắn giảm 14,01%). Điều này cho thấy công suất động cơ có xu hướng giảm khi thay thế nhiên liệu Diesel bằng Biodiesel. Mức giảm khi dùng B20, B40, B100 dao động 0,74 – 37,91%, rõ nhất tại 1200 vòng/phút (Bảng 4).



Hình 7. Đồ thị biểu diễn công suất động cơ tại các chế độ làm việc khác nhau



Hình 8. Đồ thị biểu diễn moment xoắn động cơ tại các chế độ làm việc khác nhau

Bảng 4. So sánh sự thay đổi công suất và moment xoắn động cơ khi sử dụng nhiên liệu Biodiesel (%)

Vòng tua (vòng/phút)	B0 (kW)	Mức giảm công suất so với B0		
		B20	B40	B100
1200	27,12	0,74	1,84	37,91
1500	34,17	0,94	1,73	12,61
1800	41,12	1,05	2,26	14,01
2100	47,31	1,29	1,75	13,84
2400	31,76	0,85	1,57	10,99

Vòng tua (vòng/phút)	B0 (Nm)	Mức giảm moment xoắn so với B0		
		B20	B40	B100
1200	215,83	0,76	1,85	37,92
1500	217,57	0,92	1,72	12,62
1800	218,18	1,05	2,31	14,01
2100	215,33	1,37	4,45	13,90
2400	216,67	0,86	1,58	11,01

Nguyên nhân của sự thay đổi công suất và moment xoắn động cơ là do trị số tỏa nhiệt thấp của Biodiesel thấp hơn Diesel khiến năng lượng sinh ra trong quá trình cháy giảm (Al-Dawody & Bhatti, 2011).

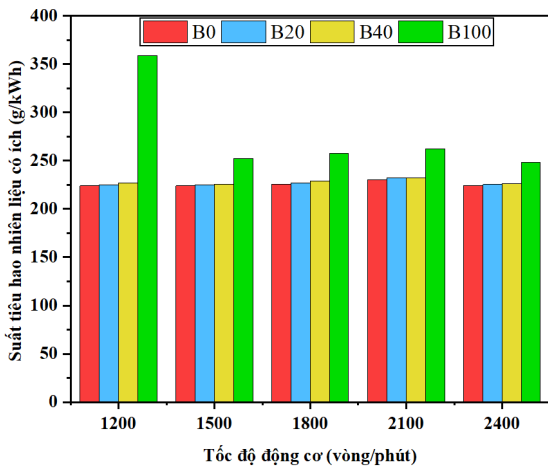
Bên cạnh đó, nhiên liệu Biodiesel có độ nhớt và khả năng bay hơi kém hơn so với nhiên liệu Diesel, làm việc phun và hòa trộn nhiên liệu-không khí kém hiệu quả dẫn đến tốc độ cháy chậm hơn (Agarwal, 2007).

3.2.2. Suất tiêu hao nhiên liệu động cơ

Đồ thị Hình 9 cho thấy suất tiêu hao nhiên liệu (Brake Specific Consumption – BSFC) tăng theo tỷ lệ Biodiesel.

Cụ thể, ở mọi vòng tua, Diesel (B0) có BSFC thấp nhất, B100 cao nhất. Tại 1800 vòng/phút, BSFC B0 là 225,61 g/kWh, B100 257,68 g/kWh (tăng ~14%). B100 có hàm lượng năng lượng trên mỗi đơn vị khối lượng giảm, nên cần một lượng nhiên liệu lớn hơn để tạo ra cùng một công suất như B0.

Thêm vào đó, độ nhớt động học cao và mật độ các phân tử trong nhiên liệu Biodiesel cao hơn, ảnh hưởng xấu đến quá trình phun của động cơ, việc phun toi sương và hòa trộn với không khí kém hiệu quả, góp phần làm tăng mức tiêu thụ nhiên liệu.



Hình 9. Đồ thị biểu diễn suất tiêu hao nhiên liệu của động cơ tại các chế độ làm việc khác nhau

Bảng 5. So sánh sự thay đổi BSFC của động cơ khi sử dụng nhiên liệu Biodiesel (%)

Vòng tua (vòng/phút)	B0 ($\frac{g}{kWh}$)	Mức tăng so với B0		
		B20	B40	B100
1200	224,07	0,37	1,16	60,18
1500	223,99	0,43	0,80	12,58
1800	225,61	0,55	1,38	14,21
2100	230,19	0,09	0,09	13,96
2400	224,18	0,45	0,75	10,67

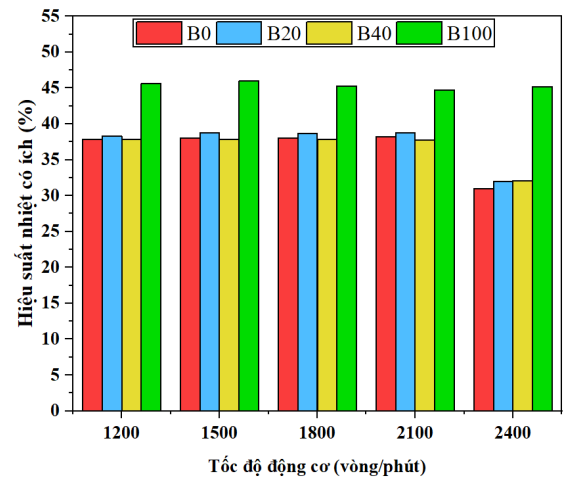
Kết quả tại Bảng 5 cho thấy tại B20 và B40 thì BSFC chỉ tăng nhẹ (<5%) và gần như không ảnh hưởng đến vận hành, trong khi B100 tăng rõ rệt, dao động 10,67 – 60,18% tùy tốc độ làm việc của động cơ (Bảng 5). Điều này có thể thấy rằng, xu hướng BSFC tăng rõ rệt khi tỷ lệ pha trộn Biodiesel trong nhiên liệu càng cao.

3.2.3. Hiệu suất nhiệt động cơ

Hiệu suất nhiệt động cơ (Brake Thermal Efficiency – BTE) là tỷ lệ giữa năng lượng cơ học hữu ích tạo ra và năng lượng nhiệt cung cấp từ nhiên

liệu, phản ánh trực tiếp chất lượng cháy, đặc tính nhiên liệu và hiệu quả chuyển đổi năng lượng (Hình 10).

Nhiên liệu B0 có hiệu suất nhiệt trung bình 37 – 38% và ổn định trong dải vòng tua 1200 đến 2100 vòng/phút. Tương tự với B20 và B40 khi chênh lệch hiệu suất nhiệt chỉ khoảng 1% tại các chế độ làm việc. Riêng B100 có hiệu suất nhiệt cao nhất, nhưng ngược lại thì BSFC cũng tăng đáng kể (Hình 9). Điều này cho thấy hiệu suất nhiệt cao không đồng nghĩa với hiệu quả kinh tế tốt, động cơ D229-4 sử dụng B100 chưa thể chuyển hóa năng lượng thành công cơ học hiệu quả và tiêu thụ nhiên liệu lớn làm ảnh hưởng chi phí vận hành động cơ.



Hình 10. Đồ thị biểu diễn hiệu suất nhiệt của động cơ tại các chế độ làm việc khác nhau

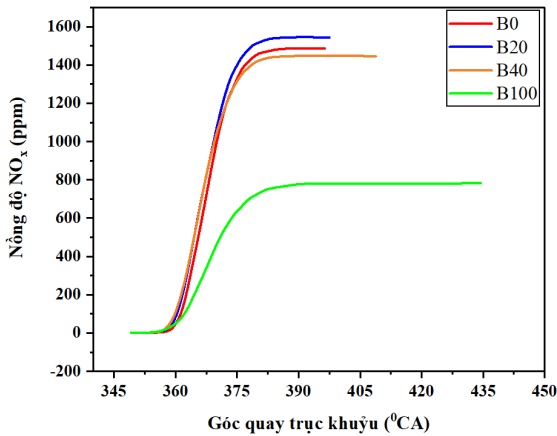
3.3. Đánh giá đặc tính phát thải

3.3.1. Phát thải NO_x

Đồ thị (Hình 11) biểu diễn sự biến thiên nồng độ NO_x theo góc quay trục khuỷu khi động cơ sử dụng các loại nhiên liệu B0, B20, B40 và B100 tại vòng tua 1800 vòng/phút (trong phạm vi nghiên cứu này, chỉ trình bày kết quả tại vòng tua định mức, do các chế độ khác, quá trình hình thành và xu hướng biến thiên NO_x có đặc điểm tương tự).

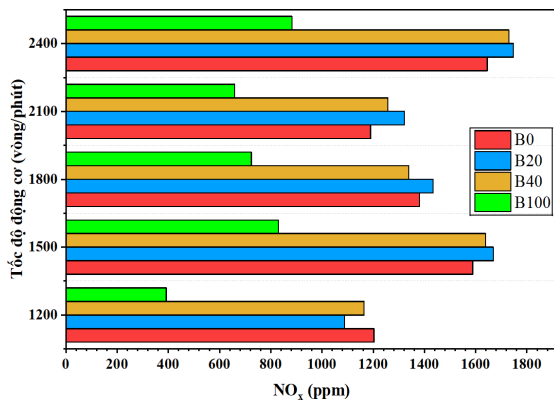
Cụ thể, NO_x được hình thành chủ yếu từ nitơ trong không khí khi nhiệt độ cháy trong buồng đốt tăng cao. Kết quả quan sát từ đồ thị cho thấy nồng độ NO_x bắt đầu tăng mạnh ngay sau thời điểm cháy chính, tương ứng với trong khoảng góc quay từ 360 – 375° CA, đây là thời điểm mà nhiệt độ buồng cháy đạt giá trị cực đại. Khi đó, điều kiện hình thành NO_x thuận lợi nhất bởi nhiệt độ cao và đặc biệt là sự hiện diện của hàm lượng oxy dư thừa trong hỗn hợp khí cháy.

Sau giai đoạn này, trong xy lanh động cơ, khi mà piston tiếp tục di chuyển xuống điểm chết dưới trong quá trình giãn nở, thể tích buồng cháy tăng làm nhiệt độ trong xy lanh giảm dần, điều này dẫn đến tốc độ hình thành NO_x chậm lại. Do vậy, kể từ khoảng 380°CA trở đi, nồng độ NO_x đạt trạng thái gần như ổn định, gần như không còn tăng thêm và được duy trì ở mức gần như không đổi cho đến khi quá trình cháy kết thúc hoàn toàn.



Hình 11. Đồ thị diễn biến nồng độ NO_x của động cơ tại vòng tua định mức

Khi so sánh cơ chế hình thành NO_x trong buồng đốt theo góc quay trục khuỷu của từng nhiên liệu (Hình 11), qua đó nồng độ NO_x tức thời trong xy lanh được đánh giá, có thể thấy giá trị từ cao đến thấp lần lượt là B20, B0, B40 và B100. Cụ thể, tốc độ hình thành NO_x của Biodiesel 20% trong nhiên liệu tăng so với Diesel thuần, tương đồng với nghiên cứu của Yên (2015). Khi tăng Biodiesel là B40 thì nồng độ NO_x giảm nhẹ và với B100 giảm rất đáng kể.



Hình 12. Đồ thị biểu diễn mức phát thải NO_x của động cơ tại các chế độ làm việc khác nhau

Đồ thị Hình 12 đánh giá tổng mức phát thải NO_x phục vụ đánh giá ảnh hưởng môi trường và các tiêu

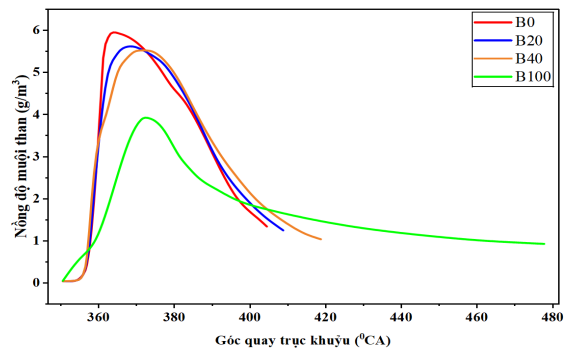
chẩn khí thải của động cơ tại các vòng tua máy. Phát thải NO_x cao nhất ở 2400 vòng/phút và thấp nhất tại 1200 vòng/phút ở cả bốn loại nhiên liệu. Xét theo nhiên liệu, ở hầu hết các chế độ làm việc, NO_x có xu hướng tăng khi dùng B20 và B40, giá trị cao lần lượt 1324,4 ppm và 1256,3 ppm tại 2100 vòng/phút và tăng hơn Diesel gốc 3,17 – 11,11%. Tuy nhiên, khi tăng Biodiesel lên 100%, NO_x giảm ở mọi chế độ, mức giảm mạnh nhất khi 391,7 ppm tại 1200 vòng/phút, các giá trị khác giảm 44,64 – 67,44% so với B0. Kết quả về sự thay đổi được thể hiện cụ thể ở Bảng 6 (các giá trị có dấu trừ nghĩa là giảm so với B0).

Bảng 6. So sánh sự thay đổi lượng phát thải NO_x của động cơ khi sử dụng nhiên liệu Biodiesel (%)

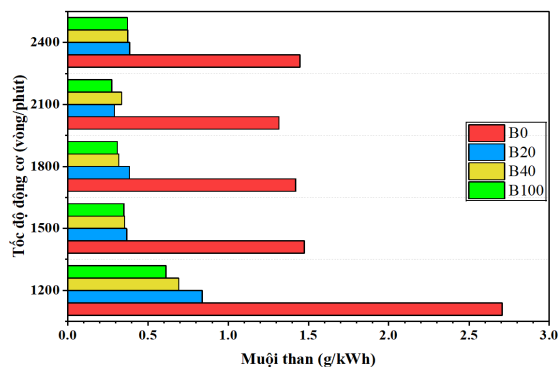
Vòng tua (vòng/phút)	B0 (ppm)	Thay đổi so với B0		
		B20	B40	B100
1200	1202,7	-9,6	-3,23	-67,44
1500	1588,1	5,05	3,17	-47,77
1800	1379,5	3,87	-2,96	-47,52
2100	1189,2	11,11	5,65	-44,64
2400	1644,8	6,18	5,11	-46,32

3.3.2. Phát thải muội than

PM được hình thành chủ yếu do quá trình cháy không hoàn toàn của nhiên liệu, đặc biệt là ở vùng giàu nhiên liệu và thiếu oxy trong buồng đốt (Hình 13). Biodiesel có hàm lượng oxy trong nhiên liệu cao (Bảng 1), giúp giảm PM hơn so với Diesel.



Hình 13. Đồ thị diễn biến nồng độ muội than (PM) của động cơ tại vòng tua định mức



Hình 14. Đồ thị biểu diễn mức phát thải muội than động cơ tại các chế độ làm việc khác nhau

Hình 14 cho thấy hàm lượng Biodiesel càng cao thì PM càng giảm. Sự giảm này do hàm lượng oxy sẵn có trong Biodiesel cao, giúp cải thiện oxy hóa nhiên liệu trong vùng cháy thiếu không khí, giảm hình thành PM (Magin Lapuerta, 2007). Ngoài ra, nhiên liệu Diesel sinh học không chứa (hoặc chứa thấp) tác nhân sinh ra PM như nhiên liệu hóa thạch là hydrocacbon thơm và lưu huỳnh (Agarwal, 2007).

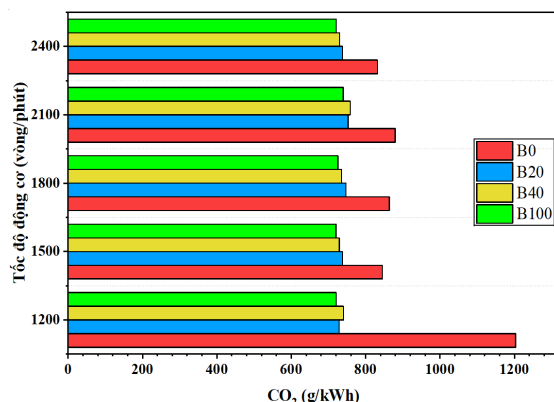
Có thể thấy, mặc dù Biodiesel có độ nhớt cao và bay hơi kém, nhưng ở tỷ lệ pha trộn cao, lượng oxy nội tại khắc phục hạn chế này, làm quá trình cháy sạch hơn và PM bị oxy hóa mạnh hơn (Lapuerta et al., 2009). Kết quả chứng minh hiệu quả giảm mức phát thải PM giảm đáng kể khi tăng hàm lượng Biodiesel, đặc biệt ở B100 có thể giảm PM đạt 60 – 80% so với B0, tương đồng với kết quả nghiên cứu của Magin Lapuerta et al. (2007) và Agarwal (2007).

Bảng 7. So sánh sự thay đổi lượng PM của động cơ khi sử dụng nhiên liệu Biodiesel (%)

Vòng tua (vòng/phút)	B0 (g/kWh)	Giảm so với B0		
		B20	B40	B100
1200	2,706	70,0	74,4	77,4
1500	1,474	75,0	75,9	76,3
1800	1,420	72,9	77,6	78,2
2100	1,315	77,8	74,4	79,1
2400	1,447	73,3	74,2	74,3

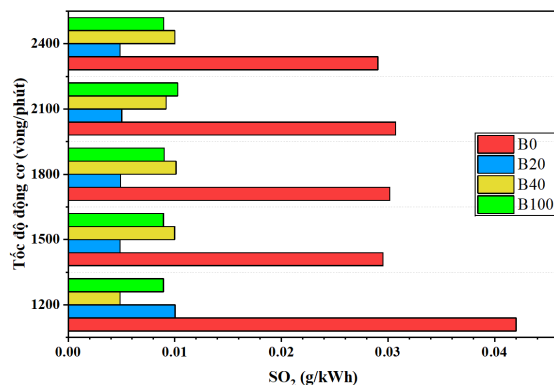
3.3.3. Phát thải CO₂ và SO₂

Hình 15 thể hiện phát thải CO₂ có sự giảm khi tăng Biodiesel ở mọi vòng tua máy, B0 cao nhất (831,56 – 1202,7 g/kWh) trong khi B20, B40 và B100 thấp hơn đáng kể.



Hình 15. Đồ thị biểu diễn phát thải CO₂ của động cơ tại các chế độ làm việc khác nhau

Trong quá trình cháy hoàn toàn, carbon phản ứng với oxy trong không khí tạo thành CO₂ (C + O₂ → CO₂), đây là sản phẩm của phản ứng oxy hóa và là khí nhà kính gây biến đổi khí hậu. Về thành phần hóa học, lượng hydro trong B0 thấp và carbon cao hơn Biodiesel trên mỗi đơn vị năng lượng, do đó khiến sản phẩm cháy tạo CO₂ nhiều hơn (Magin Lapuerta, 2007; Agarwal, 2007).



Hình 16. Đồ thị biểu diễn phát thải SO₂ của động cơ tại các chế độ làm việc khác nhau

Hình 16 và Bảng 8 cho thấy SO₂ cao nhất với B0 (0,02904 – 0,042 g/kWh) và giảm khi thay bằng Biodiesel, giảm rõ nhất với B40 tại 1200 vòng/phút. Nguyên nhân là do B0 chứa lưu huỳnh cao hơn (Bảng 1), khi cháy đã sản sinh SO₂ (S + O₂ → SO₂), SO₂ có thể tiếp tục oxy hóa trong khí quyển (2SO₂ + O₂ → 2SO₃); sau đó SO₃ phản ứng với nước tạo thành axit sunlfuric (SO₃ + H₂O → H₂SO₄), góp phần hình thành mưa axit (Agarwal, 2007). Trong khi đó, Biodiesel từ dầu thực vật hoặc mỡ động vật có lưu huỳnh thấp (Bảng 1) nên sinh ít SO₂, tuy nhiên mô phỏng (Hình 16) cho thấy B40 và B100 đôi khi cao hơn B20 do tăng độ nhớt và sức căng bề mặt gây sai lệch lượng phun và hòa trộn,

điều này làm thay đổi độ giàu-nghèo cục bộ trong vùng cháy và ảnh hưởng tốc độ hình thành và oxy hóa lưu huỳnh (Feng, et al., 2025).

Bảng 8. So sánh sự thay đổi phát thải CO₂ và SO₂ của động cơ khi sử dụng nhiên liệu Biodiesel (%)

Vòng tua (vòng/phút)	B0 (g/kWh)	Mức giảm CO ₂ so với B0		
		B20	B40	B100
1200	1202,7	39,4	38,5	40,1
1500	845,08	12,7	13,7	14,8
1800	863,48	13,5	14,9	16,0
2100	878,95	14,4	13,7	15,8
2400	831,56	11,3	12,3	13,3

Vòng tua (vòng/phút)	B0 (g/kWh)	Mức giảm SO ₂ so với B0		
		B20	B40	B100
1200	0,04200	76,1	88,4	78,7
1500	0,02951	83,5	66,2	69,7
1800	0,03016	83,8	66,5	70,1
2100	0,03070	83,6	70,1	66,5
2400	0,02904	83,2	65,6	69,2

4. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, hiệu suất và phát thải động cơ Diesel D229-4 sử dụng nhiên liệu Biodiesel SCG đã được mô phỏng và đánh giá được bằng phần mềm Diesel-RK. Việc thay thế Diesel thuần bằng Biodiesel ở các mức phối trộn khác nhau (B20, B40, B100) giúp giảm đáng kể phát thải động cơ như PM, CO₂, SO₂, mang lại hiệu quả tích cực, giảm ô nhiễm môi trường. Thay vào đó, điều này đánh đổi về mặt

hiệu suất khi các giá trị công suất và moment xoắn động cơ giảm, trong khi suất tiêu hao nhiên liệu tăng. Tuy nhiên, những giá trị này vẫn còn nằm trong giá trị cho phép và có thể chấp nhận được.

Trong phạm vi nghiên cứu, nhiên liệu B20 có thể được xem là mức phối trộn tối ưu trong thực tế, đảm bảo hiệu quả môi trường mà đồng thời vẫn duy trì hiệu suất tốt. Nhiên liệu B100 nên được dùng cho nghiên cứu hoặc động cơ đã được hiệu chỉnh nhằm giảm tổn thất hiệu suất mà vẫn duy trì được khả năng giảm phát thải có hại hiệu quả.

Trong thời gian tới, đề tài có thể được phát triển theo hướng mở rộng nghiên cứu thực nghiệm, thay đổi tỷ lệ nhiên liệu cung cấp để đo đạc và phân tích trực tiếp các thông số vận hành, qua đó nâng cao độ chính xác của kết quả mô phỏng. Cụ thể, kết quả mô phỏng có thể được kiểm chứng qua thí nghiệm thực tế trên băng thử động học động cơ (APA 204/8/093 hoặc tương đương) trang bị hệ thống đo công suất, moment xoắn bằng dynamometer, kết hợp hệ thống phân tích khí thải và các cảm biến trên động cơ sẽ giúp ghi lại diễn biến quá trình cháy theo góc quay trục khuỷu.

Ngoài ra, việc kết hợp phần mềm mô phỏng 3D sẽ giúp phân tích chi tiết hơn diễn biến quá trình cháy và đánh giá tối ưu hơn các tỷ lệ phối trộn Biodiesel. Hơn nữa, hướng nghiên cứu tiếp theo khi được thực hiện có thể tập trung vào tối ưu hóa kết cấu động cơ và hệ thống phun nhiên liệu, đặc biệt hiệu chỉnh thời điểm phun phù hợp với đặc tính cháy của Biodiesel, bù đắp sự suy giảm hiệu suất và vẫn duy trì khả năng giảm phát thải.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Agarwal, A. K. (2007). Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 33(3), 233-271. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2006.08.003>
- Al-Dawody, M. F., & Bhatti, S. (2011). Effect of soybean oil biofuel blending on the performance and emissions of diesel engine using Diesel-RK software. *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*, 3(6), 4539-4555.
- Al-Hamamre, Z., Foerster, S., Hartmann, F., Kröger, M., & Kaltschmitt, M. (2012). Oil extracted from spent coffee grounds as a renewable source for fatty acid methyl ester manufacturing. *Fuel*, 96, 70-76. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.12.032>
- Bielaczyc, P., Szczotka, A., Gizynski, P., & Bedyk, I. (2009). *The Effect of Pure RME and Biodiesel Blends with High RME Content on Exhaust Emissions from a Light-Duty Diesel Engine*. Warrendale, PA: SAE International. <https://doi.org/10.4271/2009-01-2653>
- Carlucci, A. P., Ficarella, A., Jalilian Tabar, F., Santino, A., & Strafella, L. (2017). Cynara cardunculus and coffee grounds as promising biodiesel sources for internal combustion compression ignition engines. *Energy Procedia*, 126, 947-954. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.181>
- Deligiannis, A., Papazafeiropoulou, A., Anastopoulos, C., & Zannikos, F. (2015). Waste Coffee Grounds as an Energy Feedstock. *14th International Conference on Environmental Science and Technology (CEST 2015)*, (pp. 657-664). Rhodes.
- Efthymiopoulos, I., Hellier, P., Ladommatos, N., & Mills-Lamptey, B. (2019). Transesterification of high-acidity spent coffee ground oil and

- subsequent combustion and emissions characteristics in a compression-ignition engine. *Fuel*, 247, 257–271.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.03.040>
- Feng, Z., Zhang, J., Gu, J., Leng, X., He, Z., & Nishida, K. (2025, August 11). Improving Biodiesel Atomization Performance in CI Engines: A Review of Spray Behavior, Droplet Impingement, and Advanced Techniques. *Processes*, 13(8), Art. no. 2527.
<https://doi.org/10.3390/pr13082527>
- Harb, R., & Salloum Abou Jaoudeh, L. (2025). Oil extraction from the spent coffee grounds and its conversion into biodiesel. *Energies*, 18, 4603.
<https://doi.org/10.3390/en18174603>
- Kamil, M., Ramadan, K. M., Olabi, A. G., Al-Ali, E. I., Ma, X., & Awad, O. I. (2020). Economic, technical, and environmental viability of biodiesel blends derived from coffee waste. *Renewable Energy*, 147, 1880-1894.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.147>
- Kamil, M., Ramadan, K. M., Awad, O. I., Ibrahim, T. K., Inayat, A., & Ma, X. (2019). Environmental impacts of biodiesel production from waste spent coffee grounds and its implementation in a compression ignition engine. *Science of the Total Environment*, 675, 13–30.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.156>
- Kulkarni, M. G., & Dalai, A. K. (2006, March 24). Waste Cooking Oil An Economical Source for Biodiesel: A Review. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 45(9), 2901-2913.
<https://doi.org/10.1021/ie0510526>
- Lapuerta, M., Ballesteros, R., & Fernández, J. (2009). Diesel particulate emissions from biofuels derived from animal fats. *Fuel*, 88(4), 855-863.
- Lee, S., Choi, Y., & Kang, K. (2019). Application of blended fuel containing coffee ground pyrolysis oil in a diesel generator. *Fuel*, 256, 115998.
doi:10.1016/j.fuel.2019.115998
- Magín Lapuerta, O. A.-F. (2007, July 10). Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(2008), 198-203.
<https://doi.org/10.1016/j.pecs.2007.07.001>
- Mengistu, N. G., Mekonen, M. W., Ayalew, Y. G., Demisie, L. F., & Nega, T. (2024, November 01). Experimental investigation on diesel engine performance and emission characteristics using waste cooking oil blended with diesel as biodiesel fuel. *Discover Energy*, 4(26).
<https://doi.org/10.1007/s43937-024-00051-7>
- Nayyar, P. (2010). *The Use of Biodiesel Fuels in the U.S. Marine Industry*. PRIME Inc. U.S. Department of Transportation, Maritime Administration.
- Ng, J.-H., Ng, H. K., & Gan, S. (2012, February). Characterisation of engine-out responses from a light-duty diesel engine fuelled with palm methyl ester (PME). *Applied Energy*, 90(1), 58-67.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.01.028>
- Nguyen, V. H., Duong, M. Q., Nguyen, K. T., Pham, T. V., & Pham, P. X. (2020). An extensive analysis of biodiesel blend combustion characteristics under a wide-range of thermal conditions of a cooperative fuel research engine. *Sustainability*, 12(18), 7666.
<https://doi.org/10.3390/su12187666>
- Ramírez-Verduzcoa, L. F., García-Floresb, B. E., Rodríguez-Rodríguez, J. E., & Jaramillo-Jacob, A. d. (2011, May). Prediction of density and viscosity in biodiesel blends at various temperatures. *Fuel*, 90(5), 1751–1761.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.12.032>
- Rathmann, R., Szklo, A., & Schaeffer, R. (2010, January). Land use competition for production of food and liquid biofuels: An analysis of the arguments in the current debate. *Renewable Energy*, 35(1), 14-22.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.02.025>
- Sugebo, B. (2022). A review on enhanced biofuel production from coffee by-products using different enhancement techniques. *Materials for Renewable and Sustainable Energy*, 11, 91–103.
<https://doi.org/10.1007/s40243-022-00209-0>
- Wei, L., Cheng, R., Mao, H., Geng, P., Yanjie, Z., & You, K. (2017, December). Combustion process and NOx emissions of a marine auxiliary diesel engine fuelled with waste cooking oil biodiesel blends. *Energy*, 144, 73-80.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.012>
- Yến, Đ. P. (2015). *Nghiên cứu ảnh hưởng của nhiên liệu diesel sinh học B10, B20 đến các chỉ tiêu kinh tế, năng lượng và môi trường của động cơ Diesel* (Luận án tiến sĩ). Học viện Kỹ thuật Quân sự.