

NGHIÊN CỨU TĂNG HIỆU QUẢ BỘ XÚC TÁC CHUYỂN ĐỔI KHÍ THẢI XE MÁY TRONG GIAI ĐOẠN KHỞI ĐỘNG LẠNH VÀ CHẠY ẤM MÁY NHỜ SẤY NÓNG BẰNG DÒNG ĐIỆN CAO TẦN

STUDY ON IMPROVEMENT OF THE EFFICIENCY OF MOTORCYCLE CATALYTIC CONVERTER IN COLD START AND WARM-UP PHASE BY HIGH FREQUENCY ELECTRICAL HEATING

HOÀNG ĐÌNH LONG

Khoa Kỹ thuật ô tô và Năng lượng, Trường Đại học Phenikaa

Email liên hệ: long.hoangdinh@phenikaa-uni.edu.vn

Tóm tắt

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu tăng hiệu quả chuyển đổi khí thải của bộ xúc tác (BXT) khí thải xe máy trong giai đoạn khởi động lạnh và chạy ấm máy nhờ phương pháp sấy nóng bổ sung BXT bằng dòng điện cao tần. Quá trình nghiên cứu được thực hiện bằng phương pháp tính toán mô phỏng BXT trên xe máy Honda Lead 110. Kết quả nghiên cứu cho thấy với công suất sấy 400W được duy trì trong thời gian 30 giây (s) ngay sau khi động cơ được khởi lạnh và chạy không tải nhanh ở 2000v/ph, BXT được kích hoạt rất nhanh, giúp giảm thời gian không làm việc của BXT trong giai đoạn này từ 150s xuống 20s. Do đó hiệu quả chuyển đổi khí thải của BXT trong giai đoạn này được cải thiện đáng kể, góp phần giảm phát thải chung của xe.

Từ khóa: Sấy nóng bộ xúc tác, kích hoạt nhanh bộ xúc tác, khởi động lạnh.

Abstract

This paper presents the results of study on improvement of the efficiency of the motorcycle exhaust catalytic converter (Catalyst) during the engine cold start and warm up phase by the additional heating method of the catalyst by high-frequency electrical current. The study was carried out by the simulation method of the catalyst on Honda Lead 110 motorcycle. The study results showed that with a heating capacity of 400W maintained for 30 seconds (s) right after the engine was cold and started with fast idling at 2000 rpm, the convertor is activated very quickly, reducing the idle time of the catalyst during this period from 150s to 20s. Therefore, the emission conversion efficiency of the catalyst in this period is significantly improved, contributing to reducing the overall emissions of the vehicle.

Keywords: Catalyst heating, fast catalyst light-off, cold start.

1. Giới thiệu chung

BXT có hiệu quả xử lý khí thải khá cao trên các xe ô tô chạy xăng khi đạt trạng thái nhiệt đủ ấm (trên 400°C) nên được sử dụng rất phổ biến để kiểm soát phát thải cho loại phương tiện này [1]. Tuy nhiên, BXT khí thải có nhược điểm là không hoạt động hiệu quả trong giai đoạn xe khởi động lạnh và chạy ấm máy, khi đó nhiệt độ BXT thường thấp dưới 523K (250°C) do năng lượng khí thải trong giai đoạn này thấp không đủ để sấy nóng nhanh BXT [2]. Đặc biệt, đối với xe máy, số lần khởi động lạnh và thời gian chạy ấm máy trên cùng độ dài chu trình hoạt động so với ô tô thường lớn hơn nhiều do cung đường di chuyển của xe máy thường ngắn. Do vậy, vấn đề ô nhiễm khí thải của xe máy trầm trọng hơn nhiều so với ô tô mặc dù đã được trang bị BXT [3]. Do đó, để kiểm soát phát thải một cách hiệu quả cho xe máy có trang bị BXT khí thải, cần phải nghiên cứu nâng cao hiệu quả chuyển đổi khí thải của BXT trong giai đoạn khởi động lạnh và chạy ấm máy. Dựa trên nguyên lý hoạt động của BXT có thể thấy giải pháp hữu hiệu cho vấn đề này là sấy nóng nhanh BXT trong giai đoạn khởi động lạnh và chạy ấm máy bằng nguồn nhiệt bổ sung.

Có một số cách cấp nhiệt bổ sung để sấy nóng nhanh BXT như tăng nhiệt khí thải bằng chiến lược điều chỉnh đánh lửa muộn [4], sấy nóng khí thải trước khi đi vào BXT bằng điện [5] và sấy nóng BXT bằng dòng điện cao tần [6]. Trong đó, công nghệ đốt nóng trực tiếp lõi BXT bằng năng lượng cao tần cho phép đốt nóng nhanh và ít tổn thất nhiệt. Ở đây, dòng cao tần đốt nóng trực tiếp các lá thép của lõi BXT làm nhiệt độ lõi BXT tăng nhanh trong khi mát mát nhiệt ra bên ngoài do truyền nhiệt giảm. Do đó, công suất điện yêu cầu thấp hơn so với đốt nóng bằng điện [6].

Để đánh giá hiệu quả giảm phát thải của việc sấy nóng BXT bằng dòng cao tần, bài báo trình bày kết quả nghiên cứu mô phỏng BXT trên xe máy Honda Lead 110 có trang bị BXT và cuộn dây đốt nóng cao tần công suất 400W.

2. Mô hình mô phỏng BXT

2.1. Sơ đồ BXT và cuộn dây cao tần

Hình 1 giới thiệu sơ đồ BXT và cuộn dây cao tần quấn quanh lõi BXT làm bằng lá thép phủ chất xúc tác. Khi cấp dòng cao tần vào cuộn dây, từ trường biến thiên sẽ tạo trên các lá thép dòng điện cảm ứng đốt nóng trực tiếp các lá thép nên nhiệt độ tăng rất nhanh. Công suất đốt nóng BXT có thể điều chỉnh để phù hợp yêu cầu. Các lá thép có hình sóng dày 0,05mm phủ Al_2O_3 và chất xúc tác JM (gồm Pt, Pd, Rh và CeO_2) được xếp thành lõi BXT với độ rỗng (tỉ số thể tích rỗng/thể tích thép) $\delta=0,76$ và tỉ trọng $1,85g/cm^3$. Lõi BXT có đường kính $D=35mm$, chiều dài $L_{BXT}=60mm$, thể tích $V=51,3 cm^3$, khối lượng 95g. Tỉ lệ khối lượng chất xúc tác trên thể tích lõi BXT là $2119g/m^3$, tỉ lệ diện tích bề mặt của 1g chất xúc tác $15m^2/g$. Động cơ nghiên cứu là động cơ xe Honda Lead 110 có tốc độ chạy ầm máy ở không tải nhanh là 2000v/ph.

2.2. Chế độ tính toán

Các xe có trang bị BXT thường có chế độ tự động chạy không tải nhanh sau khởi động lạnh để tăng nhiệt khí thải sấy nóng nhanh BXT; tốc độ không tải nhanh ở xe máy thường là 2000v/ph và cũng được chọn cho nghiên cứu trong bài báo này.

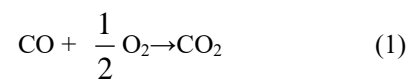
Việc sấy nóng bổ sung BXT được thực hiện trong thời gian ngắn (30s đến 50s) sau khởi động lạnh để tránh quá tải cho ắc quy. Ở cuối quá trình sấy nóng, yêu cầu nhiệt độ BXT phải đạt đến nhiệt độ trên 523K (250°C). Trên cơ sở này, có thể tính sơ bộ được công suất đốt nóng tối thiểu là 340W và công suất điện của bộ đốt nóng cao tần khoảng 400W. Với bộ ắc quy 12 vôn, thì dòng điện cấp vào để đạt công suất này vào khoảng 33A, hoàn toàn có thể được. Việc tính toán mô

phòng được thực hiện trong giai đoạn khởi động lạnh và chạy ầm máy không tải nhanh 2000v/ph, sử dụng công suất cao tần 400W, thời gian sấy 30s.

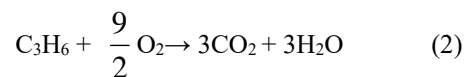
2.3 Mô hình hoá BXT

2.3.1. Các phản ứng hóa học và tốc độ phản ứng

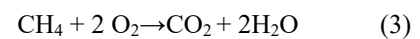
Các phản ứng diễn ra bên trong BXT rất phức tạp. Có thể có tới hàng trăm các phản ứng khác nhau tùy thuộc vào thành phần khí thải, nhiệt độ, thành phần các chất phủ của BXT. Tuy nhiên, để đơn giản hóa quá trình tính toán, chỉ cần quan tâm đến các phản ứng liên quan tới giảm các thành phần khí độc hại có trong khí thải động cơ. Các phản ứng xúc tác chính cùng biểu thức tốc độ phản ứng tương ứng bao gồm [7]:



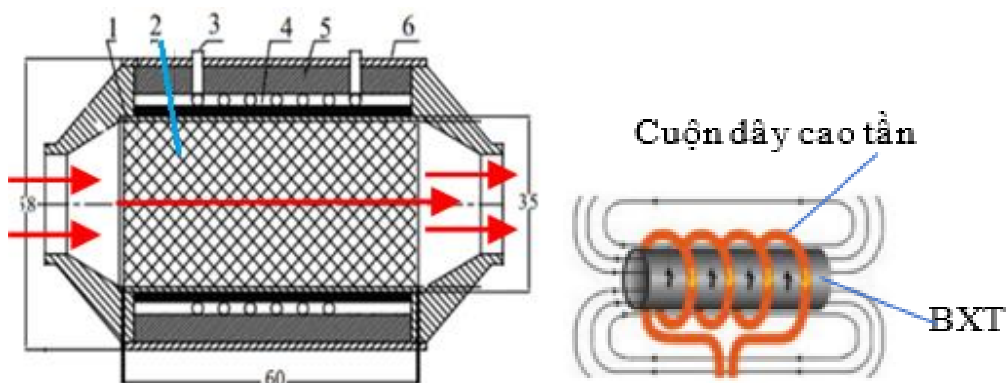
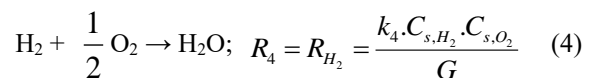
$$R_1 = R_{CO} = \frac{k_1 \cdot C_{s,CO} \cdot C_{s,O_2}}{G} + \frac{k_5 C_{s,CO}^{1.4} \cdot C_{s,O_2}^{0.3} \cdot C_{s,NO}^{0.13}}{S} \quad (1')$$



$$R_2 = R_{C_3H_6} = \frac{k_2 \cdot C_{s,C_3H_6} \cdot C_{s,O_2}}{G} \quad (2')$$

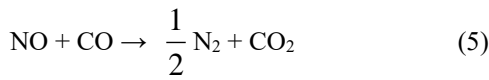


$$R_3 = R_{CH_4} = \frac{k_3 \cdot C_{s,CH_4} \cdot C_{s,O_2}}{G} \quad (3')$$



Hình 1. Sơ đồ BXT và cuộn dây cao tần

1. Lớp cách nhiệt, 2. Lõi bằng lá thép, 3. Cuộn dây cao tần, 4. Lớp cách điện, cách nhiệt, 5. Lớp sợi thủy tinh, 6. Vỏ BXT



$$R_5 = R_{NO} = \frac{k_5 C_{s,CO}^{1,4} \cdot C_{s,O_2}^{0,3} \cdot C_{s,NO}^{0,13}}{S} \quad (5')$$

$$G = T_s (1 + K_1 C_{s,CO} + K_2 C_{s,C_3H_6})^2 \cdot (1 + K_3 C_{s,CO}^2 C_{s,C_3H_6}^2) \cdot (1 + K_4 C_{s,NO_x}^{0,7}) \quad (6)$$

$$S = (1 + K_4 C_{s,NO_x}^{0,7})^2 \quad (7)$$

R_1, R_2, R_3, R_4, R_5 (mol/m²/s) là tốc độ phản ứng của CO, C₃H₆, CH₄, H₂ và NO. Biểu thức hệ số động học phản ứng của oxy được tính toán từ việc cân bằng nồng độ oxy từ các phản ứng trên do đó ta có:

$$R_6 = 0,5R_1 + 4, 5R_2 + 2R_3 + 0, 5R_4$$

Các hằng số tốc độ phản ứng k_j ($j=1, 5$) có dạng

$$k_j = A_j e^{-E_j/T}; \text{ trong đó, hệ số } A_j \text{ và năng lượng kích}$$

hoạt E_j được xác định từ việc phân tích các dữ liệu thực nghiệm và được xác định như sau [7]:

$$k_1 = 1,005 \cdot 10^{14} e^{-166574/T_s}; \quad k_2 = 1,392 \cdot 10^{15} e^{-19250/T_s}$$

$k_3 = 7,32 \cdot 10^{10} e^{-25080/T_s}$; Tốc độ ô xy hóa của H₂ tương đương với tốc độ oxy hóa của CO do đó $k_4 = k_1$ [8].

$$k_5 = 3,067 \cdot 10^{12} e^{8771/T_s}$$

Các hằng số cân bằng hấp thụ được xác định theo Voltz [7]; $K_1 = 65,5 e^{961/T_s}$; $K_2 = 2,1 \cdot 10^3 e^{361/T_s}$

$$K_3 = 4,0 e^{11611/T_s}; \quad K_4 = 4,8 \cdot 10^5 e^{-3773/T_s}$$

$$K_5 = 5,9028 \cdot 10^6 e^{654,5/T_s}$$

2.3.2. Mô hình trao đổi nhiệt và chuyển đổi khí thải trong bộ xúc tác

Vì lõi BXT được cách nhiệt khá tốt với môi trường bên ngoài và từ trường trong lõi BXT được giả thiết phân bố đều, khi đó nhiệt sấy nóng từ dòng điện cao tần được phân bố đồng đều trong thể tích lõi BXT, nên quá trình truyền nhiệt và phản ứng xúc tác chủ yếu thay đổi theo hướng dòng chảy của khí dọc theo chiều dài BXT. Do đó, mô hình toán biểu diễn các quá trình trong BXT được xây dựng trên cơ sở mô hình một chiều không ổn định (tính đến yếu tố thời gian) dọc theo chiều dài BXT.

Phương trình cân bằng năng lượng và phương trình và khối lượng của pha khí trong BXT có dạng:

$$\delta \rho_g c_{pg} \frac{\partial T_g}{\partial t} = -\rho_g u c_{pg} \frac{\partial T_g}{\partial x} + hS(T_s - T_g) \quad (8)$$

$$\delta \frac{\partial C_{gj}}{\partial t} = -u \frac{\partial C_{gj}}{\partial x} - h_{Dj} S(C_{gj} - C_{sj}) \quad (9)$$

Phương trình cân bằng năng lượng và phương trình cân bằng khối lượng của pha rắn trong BXT được viết như sau:

$$S_{cat} R_j = \frac{\rho_g}{M} h_{Dj} S(C_{gj} - C_{sj}) \quad (10)$$

$$(1 - \delta) \rho_s c_{ps} \frac{\partial T_s}{\partial t} = (1 - \delta) k_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + hS(T_g - T_s) +$$

$$S_{cat} \sum_{j=1}^5 (-\Delta H_j) R_j + \frac{\partial C_w}{\partial t} h_{fg} + P_{sáy} \eta \frac{S}{S_{tổng}} \partial t \quad (11)$$

Trong đó: ρ_s, c_{ps}, T_s lần lượt là khối lượng riêng, nhiệt dung riêng đẳng áp và nhiệt độ của thành BXT;

ρ_g, c_{pg}, T_g là khối lượng riêng, nhiệt dung riêng đẳng áp và nhiệt độ của khí thải; k_s là độ dẫn nhiệt của lõi BXT; S, S_{cat} (m²/m³) là diện tích bề mặt truyền nhiệt và diện tích bề mặt xúc tác trên một đơn vị thể tích BXT; $S_{tổng}$ là tổng diện tích bề mặt truyền nhiệt của BXT; $P_{sáy}$ là công suất dòng cao tần; η là hiệu suất sấy nóng của dòng cao tần; j là thành phần khí j ($j=1$ đối với CO, 2 đối với C₃H₆, 3 đối với CH₄, 4 đối với H₂, 5 đối với NO và 6 đối với O₂); h là hệ số truyền nhiệt (W/m²/k); h_{Dj} là hệ số trao đổi chất (m/s); C_j : là nồng độ của khí j (%); u là tốc độ dòng khí dọc BXT; $(-\Delta H_j)$ là Entanpi của phản ứng tỏa nhiệt j , giá trị của nó được xác định theo các tài liệu tham khảo [7, 8].

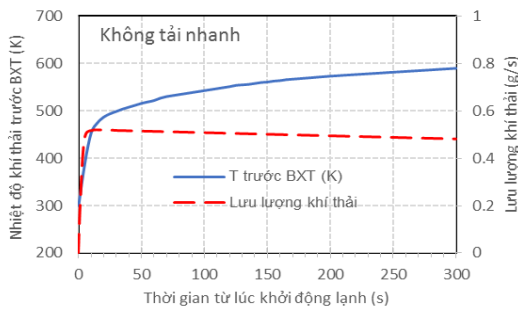
$$\text{Điều kiện đầu: } T_s(x, 0) = T_a; \quad C_w(x, 0) = 0 \quad (12)$$

Điều kiện biên: Tại mặt đầu vào của BXT, các thông số của dòng khí thải (vận tốc, nhiệt độ, nồng độ các chất trong khí thải) được lấy từ số liệu thực nghiệm; tại thời điểm động cơ được khởi động lạnh (thời gian $t=0$), nhiệt độ thành của BXT bằng nhiệt độ môi trường xung quanh:

$$c_{gv}(0, t) = c_{gv}^{in} \quad T_g(0, t) = T_g^{in} \quad (13)$$

$$C_{g,i}(0, t) = C_{g,i}^{in} \quad \frac{dT_s}{dx}(0, t) = \frac{dT_s}{dx}(L, t) = 0 \quad (14)$$

Thông số khí thải vào BXT được xác định bằng thực nghiệm và được thể hiện trên các đồ thị Hình 2.



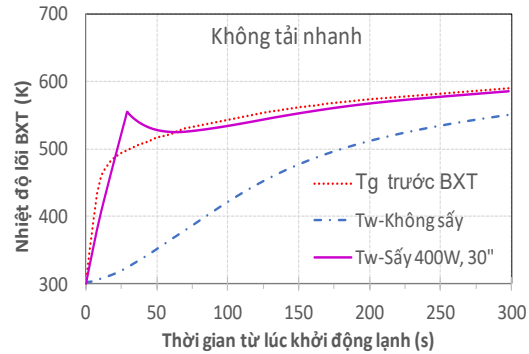
Hình 2. Nhiệt độ và lưu lượng khí thải vào BXT ở chế độ không tải nhanh

3. Kết quả nghiên cứu

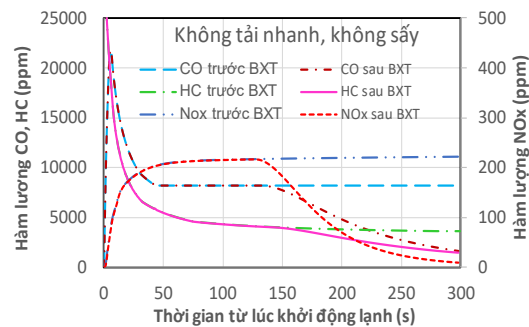
Các phương trình ở trên kết hợp các điều kiện đầu (12) và điều kiện biên (13, 14) được giải bằng phương pháp sai phân hữu hạn, thực hiện trên máy tính sử dụng ngôn ngữ lập trình FORTRAN cho BXT lắp trên động cơ xe Honda Lead 110 ở chế độ khởi động lạnh và chạy ấm máy không tải nhanh. Lưu lượng G_g , nhiệt độ và thành phần khí thải vào BXT được xác định dựa trên các số liệu thực nghiệm. Kết quả tính toán nhiệt độ trung bình của lõi BXT, thành phần khí thải sau BXT và hiệu quả chuyển đổi khí thải của BXT được thể hiện trên các Hình 3 đến Hình 7. Các đồ thị Hình 3 thể hiện nhiệt độ trung bình của lõi BXT ở chế độ không tải nhanh được sấy với công suất 400W trong 30s so với trường hợp không sấy. Có thể thấy, khi không sấy bổ sung, BXT đạt nhiệt độ làm việc hiệu quả sau 220s từ lúc khởi động lạnh. Khi sấy với công suất 400W trong 30s, BXT đạt nhiệt độ làm việc hiệu quả sau 20s từ lúc khởi động lạnh. So với trường hợp không sấy bổ sung BXT thì chiến lược sấy này đã rút ngắn thời gian BXT làm việc không hiệu quả từ 220s xuống 20s, tương ứng rút ngắn được 90% thời gian BXT không làm việc hoặc làm việc không hiệu quả.

Hình 4 mô tả sự thay đổi hàm lượng các chất độc hại trong khí thải, phía trước và sau BXT theo thời gian kể từ lúc khởi động lạnh. Lúc đầu do nhiệt độ bộ xúc tác còn thấp, các phản ứng xúc tác trong BXT chưa diễn ra nên hàm lượng các chất độc hại không thay đổi khi qua BXT, các đường biểu diễn hàm lượng chất độc hại phía trước và sau BXT nằm chồng lên nhau. Khoảng 130s sau, khi nhiệt độ BXT tăng lên, các phản ứng oxy hóa CO, HC và khử NO bắt đầu diễn ra mạnh làm cho hàm lượng các chất độc hại giảm xuống, đường biểu thị hàm lượng các chất độc hại phía sau BXT tách khỏi đường phía trước BXT và đi xuống.

Hình 5 cho thấy rằng ở khoảng 130s đầu tiên ở chế độ không tải nhanh hiệu quả xử lý CO, HC và NO bằng không. Sau đó bắt đầu làm việc tuy nhiên hiệu quả xử lý lúc này còn rất thấp. Bộ xúc tác được coi chính thức làm việc hiệu quả tại 270s sau khởi động lạnh khi mà hiệu quả xử lý HC đạt 50%.



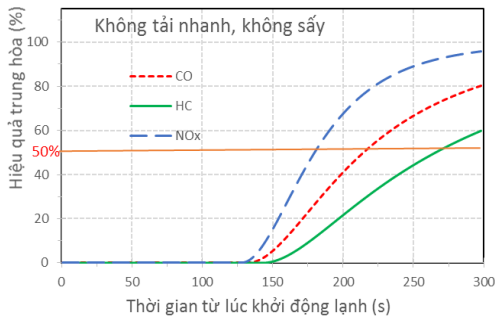
Hình 3. Nhiệt độ lõi BXT ở chế độ không tải nhanh với chiến lược sấy nóng 400W



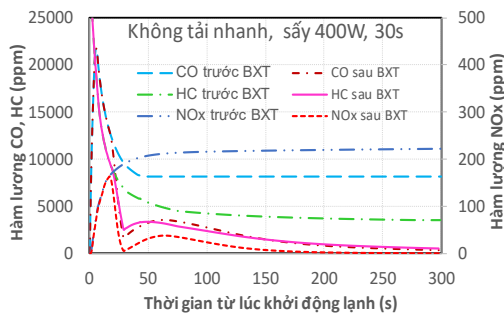
Hình 4. Hàm lượng các chất độc hại trong khí thải phía trước và sau BXT theo thời gian

Hình 6 thể hiện hàm lượng CO, HC và NO phía trước và sau BXT ở trường hợp sấy nóng 400W, 30s. Hàm lượng CO, HC và NO trong khoảng 20s đầu sau khởi động lạnh là không thay đổi, do nhiệt độ BXT chưa đạt tới nhiệt độ làm việc nên hàm lượng các chất này không thay đổi khi qua BXT. Ở những giây tiếp theo do BXT tiếp tục được sấy nóng, nó bắt đầu làm việc do đó hàm lượng các chất này giảm mạnh, mức giảm lớn nhất tại 30s sau khởi động sau đó hàm lượng các chất này tăng lên một chút do lúc này nhiệt độ BXT giảm nhẹ. Cuối cùng hàm lượng các chất này giảm dần do nhiệt độ BXT tăng nhờ được khí thải sấy nóng. Trong trường hợp này có thể thấy BXT làm việc hiệu quả sau 30" từ lúc khởi động lạnh.

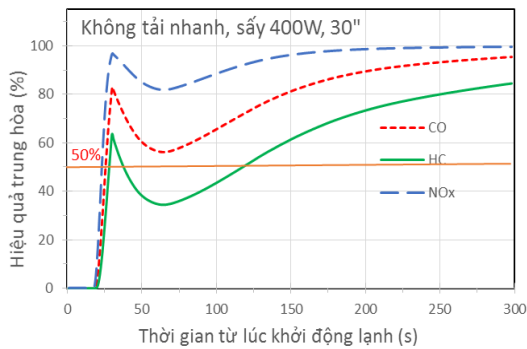
Hình 7 thể hiện hiệu quả trung hòa khí BXT được sấy nóng với công suất sấy nóng 400W và thời gian sấy nóng 30s. Ở chế độ này, BXT bắt đầu làm việc sau khi sấy 20s, sau đó hiệu quả trung hòa HC tăng nhanh đến 60% ở cuối giai đoạn sấy 30". Sau khi kết thúc quá trình sấy nóng, hiệu quả chuyển đổi giảm một chút rồi từ từ tăng, nên có thể nói với chiến lược sấy này, BXT đạt hiệu quả tại 30" từ lúc khởi động lạnh.



Hình 5. Hiệu quả xử lý CO, HC và NOx ở chế độ khởi động lạnh



Hình 6. Hàm lượng các chất độc hại trong khí thải phía trước và sau BXT khi có sấy 400W, 30s



Hình 7. Hiệu quả xử lý khí thải của BXT khi sấy 400W, 30s

4. Kết luận

Xe máy thường hoạt động với cung đường ngắn, số giai đoạn khởi động lạnh và chạy ấm máy nhiều. Trong giai đoạn này, BXT thường hoạt động không hiệu quả hoặc thậm chí không hoạt động do năng

lượng khí thải thấp không đủ để sấy nóng nhanh BXT, gây phát thải độc hại lớn. Biện pháp khắc phục là sấy nóng bổ sung cho BXT. Sấy nóng bằng năng lượng điện cao tần ở chế độ không tải nhanh là biện pháp hữu hiệu để giúp BXT xe máy nhanh đạt chế độ làm việc hiệu quả. Ở nghiên cứu này sấy nóng BXT với công suất 400W trong 30s ở chế độ chạy ấm máy không tải nhanh giúp BXT đạt nhiệt độ làm việc hiệu quả sau 20s từ lúc khởi động lạnh và đạt hiệu quả chuyển đổi 50% HC từ giây thứ 30 của quá trình chạy ấm máy so với giây thứ 230 khi không sấy nóng, từ đó tăng đáng kể hiệu quả chuyển đổi của BXT trong giai đoạn xe máy khởi động lạnh và chạy ấm máy.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Hu et al. (2008), *Three-way catalyst meeting euro III emission standards for motorcycles*, Chinese Journal of Catalysis, Vol. 29, pp.677-679.
- [2] Burch, S.D., T.F. Porter et al. (1995). *Reducing cold start emissions by catalytic converter thermal management*. SAE paper 950409.
- [3] Manqun Lin et al. (2009), *Influence factor analysis of light-off tests for motorcycle catalytic converters*, SAE Technical Paper No. 2009-32-0023.
- [4] Chan, S. H. (2001), *A Practical Approach for Rapid Catalyst Lightoff by Means of Strategic Engine Control*, Pro. Instn. Mech. Engrs., Part D, Journal of Automobile Engineering, Vol.215(4).
- [5] Fatemeh M., Alireza S., Masoud A.(2017), *Effect of electrically heated catalytic converter on emission characteristic of a motorcycle engine in cold-start conditions*, Applied Thermal Engineering, Vol.127, pp.453-464.
- [6] Nickolas Leahey, et al. (2018), *Induction Heating of Catalytic Converter Systems and its Effect on Diesel Exhaust Emissions during Cold Start*. SAE 2018-01-0327.
- [7] Voltz, S. E., Morgan, C. R., Liederman, D. and Jacob, S. M. (1973). *Kinetic Study of Carbon Monoxide and Propylene Oxidation on Platinum Catalysts*. Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev., Vol.2(4), pp.294-301.
- [8] Stetter, J. R. and K. F.Blurton (1980). *Catalytic oxidation of CO and H₂ mixtures in air*. Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev., Vol.19(2), pp.214-215.

Ngày nhận bài:	11/08/2023
Ngày nhận bản sửa:	24/08/2023
Ngày duyệt đăng:	29/08/2023