



RESEARCH OF HOMOGENEOUS CHARGE COMPRESSION IGNITION CHARACTERISTICS ON 1 CYLINDER DIESEL ENGINE - BD178F(E) WHEN CHANGING COMPRESSION RATIO BY AVL BOOST SOFTWARE

Ha Khuong Thi

Faculty of Mechanical Engineering, University of Transport and Communications, No.3 Cau Giay Str., Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 28/04/2022

Revised: 10/05/2022

Accepted: 08/06/2022

Published online: 15/06/2022

<https://doi.org/10.47869/tcsj.73.5.8>

Corresponding author: khuongha82@utc.edu.vn; Tel: 84-985477788

Abstract. The engine works according to the homogeneous charge compression ignition characteristic received a lot of attention due to the great advantage of reducing most of PM and NO_x emissions while effective and indicative parameters are still equivalent. Therefore, study the conversion of diesel engines to operate according to the HCCI characteristic is necessary. This research presents the results of the influence of compression ratio on the combustion characteristics of HCCI engines on simulation software AVL - BOOST. The simulation process was carried out on a single cylinder engine Kubota BD178F(E) equipped with the modified intake manifold at engine speed from 1200rpm to 3200 rpm and Load modes: 10%, 20%, 30% and 50%; compression ratio reduced from 20 to 18.1; 17.0; 15.4 and 13.5. The simulation results show that: Reducing the engine compression ratio still works according to the HCCI characteristic, the time of starting combustion is gradually delayed, the compression ratio should not be reduced to less than 13.5.

Keywords: Homogeneous charge compression ignition, compression ratio, AVL – Boost software.



NGHIÊN CỨU ĐẶC TÍNH CHÁY HCCI TRÊN ĐỘNG CƠ DIESEL 1 XI LẠNH - BD178F(E) KHI THAY ĐỔI TỶ SỐ NÉN BẰNG PHẦN MỀM AVL BOOST

Khương Thị Hà

Bộ môn Máy động lực, Khoa Cơ khí, Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Láng Thượng, Đống Đa, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 28/04/2022

Ngày nhận bài sửa: 10/05/2022

Ngày chấp nhận đăng: 08/06/2022

Ngày xuất bản Online: 15/06/2022

<https://doi.org/10.47869/tcsj.73.5.8>

Tác giả liên hệ: khuongha82@utc.edu.vn; ĐT: +84 985477788

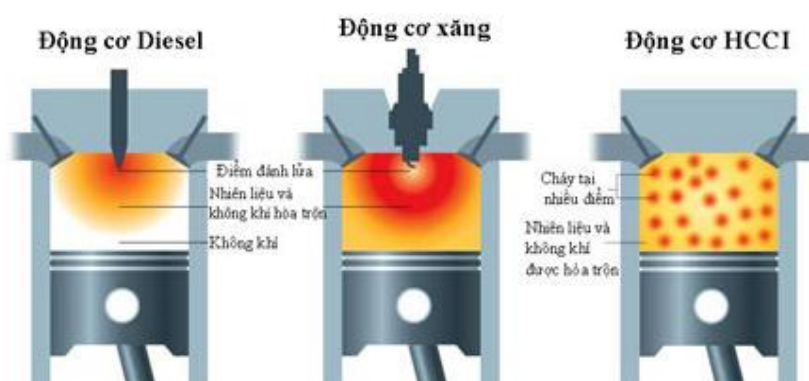
Tóm tắt. Động cơ hoạt động theo nguyên lý cháy do nén hỗn hợp đồng nhất đang nhận được rất nhiều sự quan tâm do có ưu điểm lớn là giảm được phần lớn phát thải PM và NO_x trong khi các thông số có ích và chi thị vẫn tương đương động cơ nguyên bản, do đó nghiên cứu chuyển đổi động cơ diesel truyền thống sang hoạt động theo nguyên lý HCCI là rất cần thiết. Trong nghiên cứu này trình bày kết quả ảnh hưởng của tỷ số nén tới đặc tính cháy của động cơ HCCI trên phần mềm mô phỏng AVL – BOOST. Động cơ được sử dụng cho nghiên cứu là động cơ một xylanh Kubota BD178F(E) với đường nạp đã được cải tiến. Các chế độ làm việc của động cơ mô phỏng là: Tốc độ từ 1200 vg/ph đến 3200 vg/ph; Các chế độ tải: 10%, 20%, 30% và 50%; Tỷ số nén giảm từ 20 xuống 18,1; 17; 15,4 và 13,5. Kết quả mô phỏng cho thấy: Giảm tỷ số nén động cơ vẫn làm việc theo nguyên lý HCCI, thời điểm bắt đầu cháy muộn dần, không nên giảm tỷ số nén nhỏ hơn 13,5.

Từ khóa: cháy do nén hỗn hợp đồng nhất (HCCI), tỷ số nén, AVL – Boost,.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Năm 1979 được coi là mốc ra đời của một mô hình cháy mới có tên gọi là cháy do nén hỗn hợp đồng nhất (HCCI - Homogeneous compression charge ignition) [1,2]. Kể từ khi ra đời tới nay, động cơ HCCI đã được các nhà khoa học trên toàn thế giới tập trung nghiên cứu do loại động cơ này được cho là sẽ khắc phục các nhược điểm của động cơ truyền thống với các ưu thế: phát thải NO_x và PM thấp (Động cơ HCCI giảm NO_x do giảm nhiệt độ cháy so với động cơ nguyên bản và cháy với nhiều tâm cháy phân bố đồng đều trong không gian buồng cháy nên cháy sạch, giảm PM) [3,4,5], hiệu suất nhiệt tương đương động cơ phun xăng trực tiếp [1,2,6], có khả năng sử dụng đa dạng các loại nhiên liệu thay thế như dimethyl ether (DME), diethyl ether (DEE), biodiesel [7-12].

Mô hình cháy HCCI có sự khác biệt so với mô hình cháy thông thường được thể hiện như trên hình số 1.

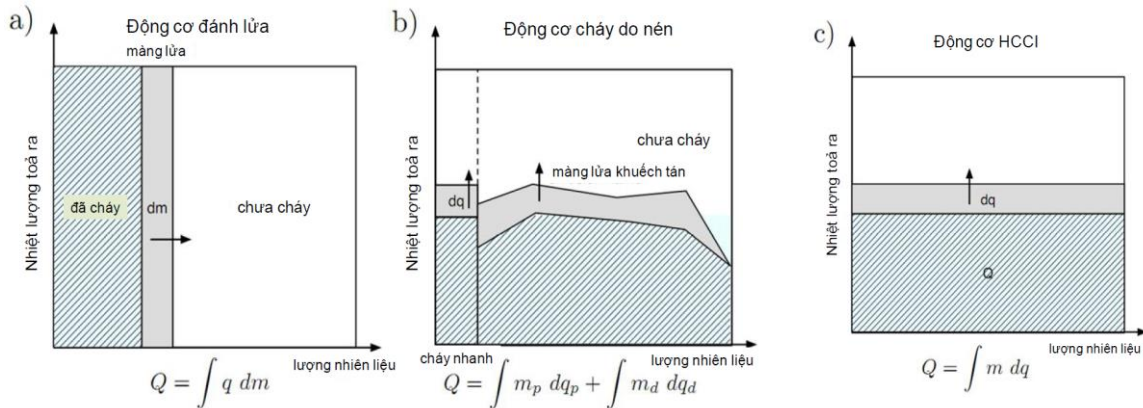


Hình 1. Quá trình cháy thông thường và quá trình cháy HCCI.

Trên động cơ xăng nguyên bản, màng lửa lan tràn bắt nguồn từ bugi, trong khi trên động cơ hoạt động với nguyên lý HCCI, không có hiện tượng lan tràn màng lửa trong xi lanh, quá trình cháy diễn ra đồng thời ở mọi vị trí trong xi lanh (trường hợp này bugi không đánh lửa, bugi phục vụ cho quá trình chuyển tiếp giữa chế độ thông thường và chế độ HCCI). Tương tự như động cơ xăng, khác với động cơ diesel thông thường với động cơ HCCI hỗn hợp nhiên liệu và không khí được hình thành từ trước (trên đường nạp hoặc trong xi lanh). Sau đó hỗn hợp được nén lên đến nhiệt độ tự cháy vào cuối kỳ nén, tương tự như với động cơ diesel.

Hiện nay tại Việt Nam việc nghiên cứu về động cơ HCCI đã bắt đầu được thực hiện, tuy nhiên việc nghiên cứu còn gặp nhiều khó khăn về trang thiết bị thử nghiệm cho nên các nghiên cứu lý thuyết nhằm giảm các chi phí khi tiến hành thực nghiệm là rất cần thiết. Trong nội dung nghiên cứu này sẽ trình bày về ảnh hưởng của tỷ số nén tới động cơ bằng phần mềm mô phỏng AVL – Boost vì đây là phần mềm chuyên dụng cho mô phỏng động cơ đốt trong và các mô hình cháy của động cơ, kết quả thu được trên mô hình có giá trị tương đương động cơ thực tế do đó sẽ giúp ích cho các nghiên cứu thực nghiệm trên băng thử, đồng thời giảm thời gian và chi phí thực nghiệm.

2. QUÁ TRÌNH CHÁY CỦA ĐỘNG CƠ HCCI



Hình 2. Đặc tính tỏa nhiệt của các loại động cơ.

Tính chất tỏa nhiệt của quá trình cháy HCCI cũng có một vài điểm khác biệt so với quá trình cháy thông thường như trên hình 2 [13].

Trên động cơ đánh lửa, quá trình cháy diễn ra thông qua quá trình đánh lửa của bugi, màng lửa từ bugi sẽ lan tràn khắp buồng cháy. Phần hỗn hợp chưa cháy được ngăn cách với phần đã cháy thông qua màng lửa. Tổng nhiệt lượng tỏa ra trong động cơ đánh lửa được tính như sau:

$$Q = \int_{mix} q dm \quad (1)$$

Trong đó: q là nhiệt lượng trên một đơn vị khối lượng hỗn hợp nhiên liệu/không khí và dm là phần khối lượng của màng lửa cháy (hình 2a).

Trên động cơ diesel, nhiên liệu được phun trực tiếp vào khí có nhiệt độ cao sau quá trình nén. Một lượng nhỏ hỗn hợp đạt được điều kiện tự cháy giống như quá trình cháy HCCI, trong khi đó một lượng lớn nhiên liệu còn lại sẽ cháy khuếch tán sau khi quá trình cháy đầu tiên diễn ra. Vì vậy, trên động cơ diesel, quá trình tỏa nhiệt chia làm hai giai đoạn là kết quả của quá trình cháy nhanh và cháy khuếch tán:

$$Q = \int_{premix} m_p dq_p + \int_{dif} m_d dq_d \quad (2)$$

Trong đó: m_p và dq_p lần lượt là khối lượng và nhiệt lượng của hỗn hợp trong quá trình cháy nhanh (premixed); m_d và dq_d là khối lượng và nhiệt lượng của hỗn hợp trong mỗi vùng của quá trình cháy khuếch tán (diffusion) (hình 2b). Giá trị nhiệt lượng tỏa ra phụ thuộc vào độ đậm nhạt (λ) của mỗi vùng đó, vì vậy khi cháy, mỗi vùng có lượng nhiệt tỏa ra khác nhau.

Trên động cơ HCCI do quá trình cháy diễn ra gần như đồng thời, không có hiện tượng lan tràn màng lửa, vì vậy tổng lượng nhiệt tỏa ra được tính bằng tổng nhiệt lượng các vùng dq

từ quá trình cháy hỗn hợp trong xy lanh với khối lượng mỗi vùng là m (hình 2c):

$$Q = \int_{mix} mdq \quad (3)$$

Tuy nhiên trên thực tế, do hỗn hợp không hoàn toàn đồng nhất nên quá trình cháy có thể một phần giống với quá trình cháy khuếch tán trên động cơ diesel.

3. MÔ PHỎNG ĐỘNG CƠ HCCI KHI THAY ĐỔI TỶ SỐ NÉN TRÊN TRÊN AVL – BOOST

3.1. Đối tượng mô phỏng

Bảng 1. Các thông số cơ bản của động cơ thử nghiệm

STT	Thông số	Đơn vị	Giá trị
1	Đường kính xy lanh, (D)	mm	78
2	Hành trình piston, (S)	mm	57
3	Thể tích công tác, (V_h)	cm ³	273
4	Tỷ số nén, (ϵ)	-	20
5	Công suất định mức, ($N_{e_{dm}}$)	kW	4.4
6	Tốc độ định mức, (n_{dm})	vg/ph	3.600
7	Mômen cực đại, (Me_{max})	Nm	13
8	Tốc độ tại Me_{max} , (n_M)	vg/ph	2000
9	Suất tiêu hao nhiên liệu, ($g_{e_{min}}$)	g/kW.h	378
10	Tốc độ tại $g_{e_{min}}$, (n_{ge})	vg/ph	2.400

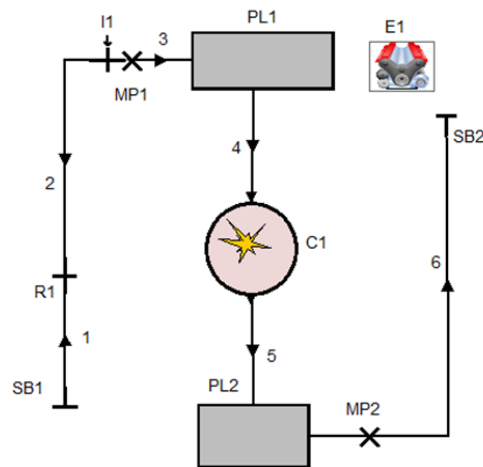
Động cơ nghiên cứu là động cơ diesel Kubota BD178F (E) 1 xi lanh 4 kỳ, không tăng áp, làm mát bằng không khí, có 2 xupap (1 nạp và 1 xả) và sử dụng buồng cháy thống nhất có các thông số kỹ thuật như trong bảng 1.

Lựa chọn động cơ diesel 1 xy lanh Kubota BD178F(E) sản xuất tại Nhật Bản để nghiên cứu thử nghiệm vì động cơ này nhỏ gọn, độ bền tốt, có tính kinh tế nhiên liệu tốt, 1 xi lanh nên tiêu hao nhiên liệu ít. Các kết quả nghiên cứu trên động cơ 1 xi lanh này có thể tham khảo và áp dụng đối với những động cơ nhiều xi lanh.

3.2. Mô hình mô phỏng

Dựa vào kết cấu thực tế động cơ thử nghiệm, ta có phương án kết nối mô hình động cơ Kubota BD178F(E). Trong hình 3 xây dựng mô hình mô phỏng động cơ với đường nạp được cải tiến để cấp nhiên liệu bên ngoài xy lanh nhờ phần tử vòi phun I1 được bố trí trên đoạn ống P2-3, nhiên liệu sau đó hòa trộn với không khí trong phần tử PL1 trước khi vào xy lanh C1

thông qua đường ống P4, sau đó khí xả được đưa ra ngoài nhờ các phần tử đường ống P5, phần tử PL2 và SB2. Sau khi kết nối ta có mô hình động cơ ta có mô hình mô phỏng động cơ Kubota



Hình 3. Mô hình mô phỏng động cơ hoạt động theo nguyên lý HCCI trong AVL – Boost.

BD178F(E) trên AVL – BOOST với mục đích chuyển đổi quá trình cháy của động cơ diesel nguyên bản sang HCCI [13].

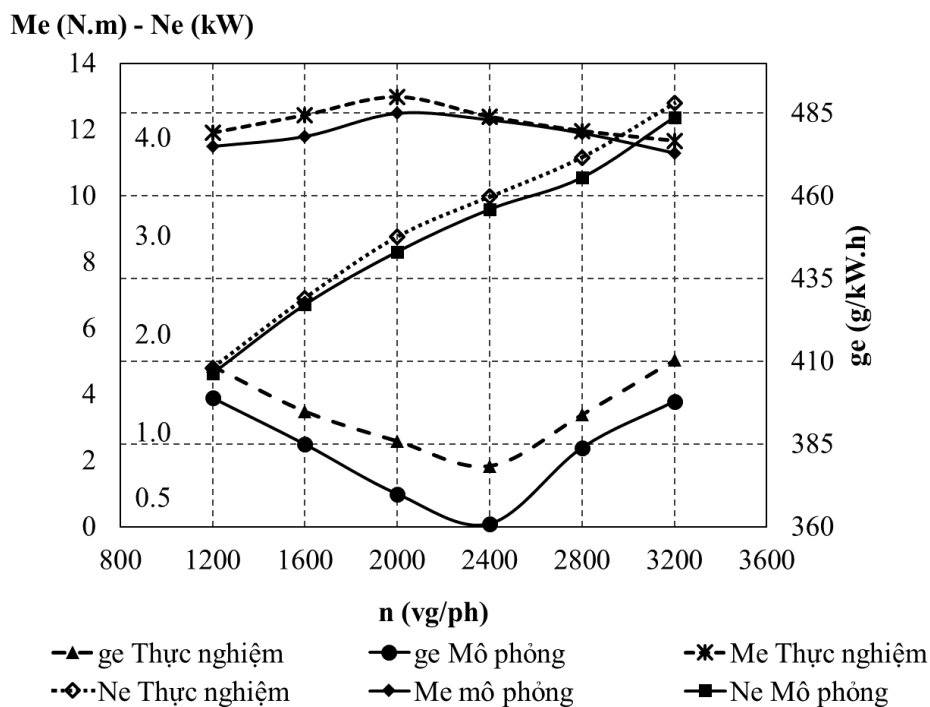
3.3. Chế độ mô phỏng

- Mô phỏng xác định đường đặc tính ngoài của động cơ diesel nguyên bản: Tốc độ từ 1200 vg/ph đến 3200 vg/ph với khoảng chia 400 vg/ph và 100% tải. (Tải của động cơ được tính thông qua các giá trị mô men tương ứng với 10%, 20%, 30% và 50% mô men cực đại của động cơ diesel nguyên bản)
- Mô phỏng thiết lập quá trình cháy HCCI cho động cơ diesel: Mô hình được chạy ở các chế độ tốc độ từ 1200 vg/ph đến 3200 vg/ph với khoảng chia 400 vg/ph và các chế độ tải: 10%, 20%, 30% và 50% tương ứng với mô men có giá trị lần lượt là: 1,24 (N.m); 2,48 (N.m); 3,72 (N.m) và 6,2 (N.m)
- Mô phỏng ảnh hưởng khi thay đổi tỷ số nén tới động cơ HCCI đã thiết lập, chế độ mô phỏng: Mô hình được chạy ở các chế độ tốc độ từ 2000 vg/ph đến 3200 vg/ph với khoảng chia 400 vg/ph và các chế độ tải: 10%, 20%, 30% và 50% tương ứng với mô men có giá trị lần lượt là: 1,24 (N.m); 2,48 (N.m); 3,72 (N.m) và 6,2 (N.m).

3.4. Đánh giá tính chính xác của mô hình mô phỏng

Đặc tính ngoài của động cơ Kubota BD178F(E) khi mô phỏng và thực nghiệm được thể hiện qua hình 4. Các kết quả thấy rằng:

Sai lệch cực đại giữa mô phỏng và thực nghiệm đối với mô men, suất tiêu hao nhiên liệu của động cơ lần lượt là: 5,12% và 5,48% sai lệch trung bình là: 3,6% và 3,0%. Với những kết quả trên, ta thấy mô hình mô phỏng xây dựng trên phần mềm AVL - Boost là hợp lý, đạt độ tin cậy.



Hình 4. Kết quả so sánh công suất, mô men và suất tiêu hao nhiên liệu giữa mô phỏng và thực nghiệm của động cơ diesel Kubota BD178F(E).

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

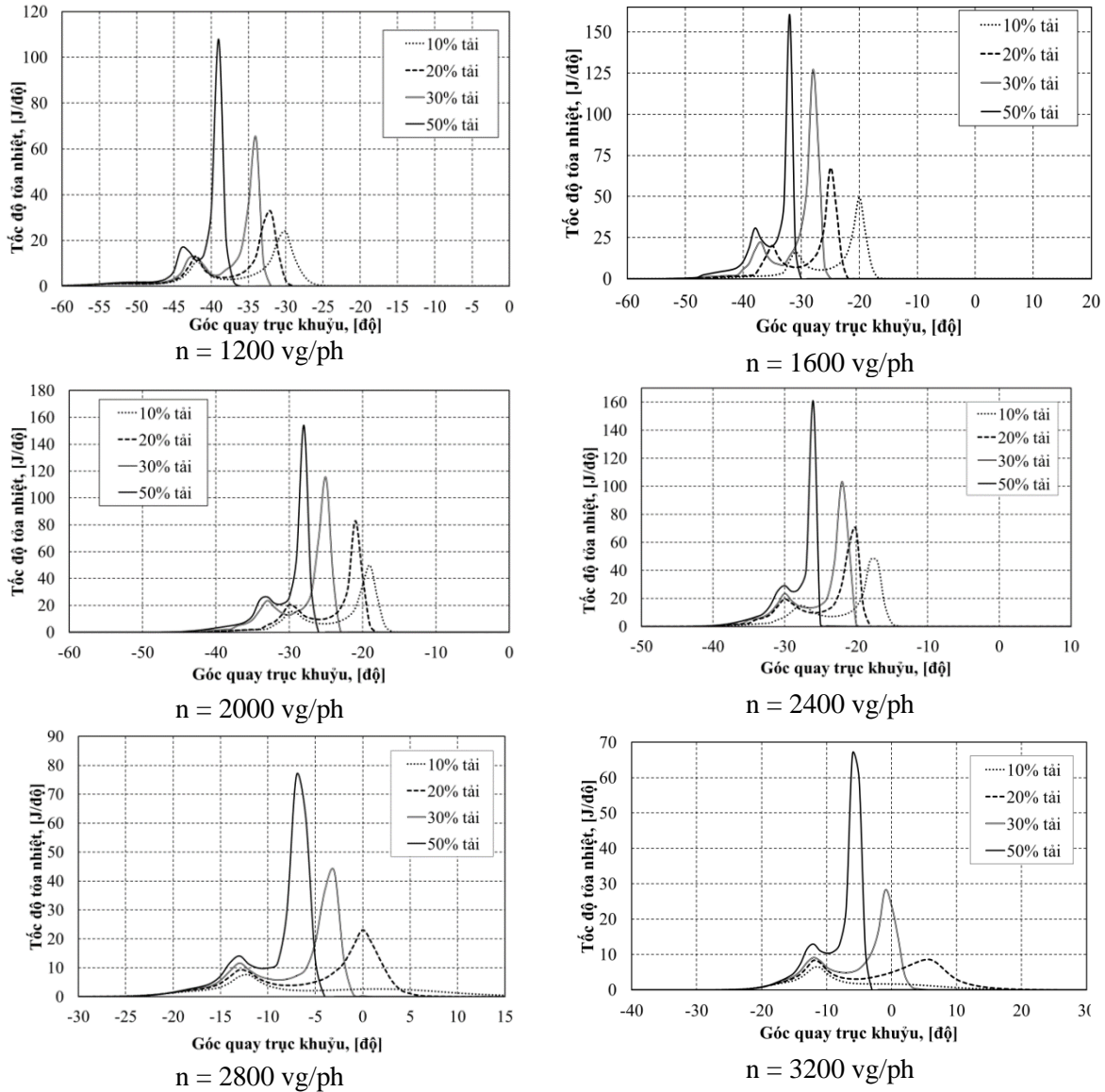
4.1. Kết quả mô phỏng thiết lập quá trình cháy HCCI trên động cơ diesel

Kết quả mô phỏng động cơ HCCI khi mô phỏng gồm: Đặc tính cháy, các thông số chỉ thị và có ích của động cơ HCCI tại tỷ số nén 20:1, tốc độ 1200vg/ph ÷ 3200vg/ph, 10% tải ÷ 50% tải.

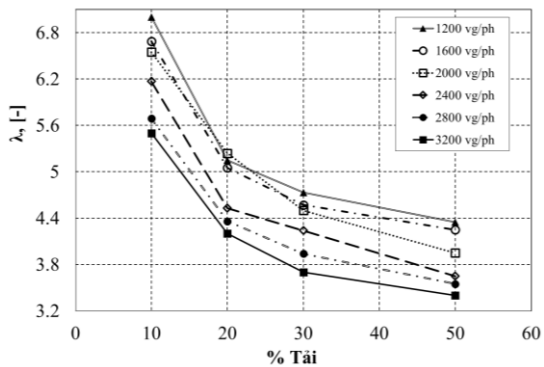
4.1.1. Đặc tính cháy của động cơ HCCI khi mô phỏng

Diễn biến tốc độ tỏa nhiệt của động cơ HCCI khi mô phỏng (Hình 5) cho thấy động cơ diesel khi này đã chuyển sang quá trình cháy HCCI với đặc trưng là đường tốc độ tỏa nhiệt có hai đỉnh đặc trưng cho ngọn lửa lạnh và ngọn lửa nóng. Tuy nhiên do hỗn hợp được hình thành từ trước, n – heptan lại có khả năng bay hơi tốt nên quá trình cháy diễn ra sớm trước ĐCT. Giá trị cực đại của tốc độ tỏa nhiệt tăng dần khi tăng tải và thời điểm bắt đầu cháy cũng sớm dần.

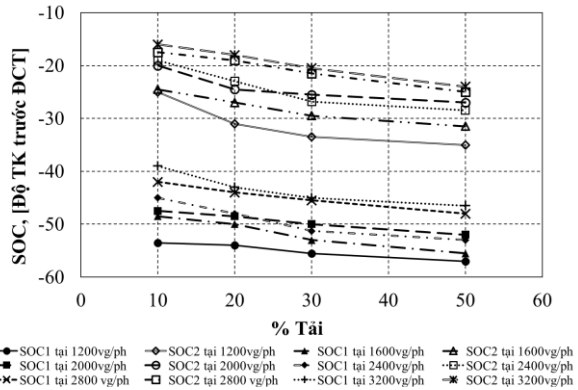
Hệ số dư không khí của động cơ HCCI khi mô phỏng được thể hiện qua hình 6, λ giảm dần khi tăng tải và tăng tốc độ nên thời điểm bắt đầu cháy (SOC1 – Thời điểm xuất hiện ngọn lửa lạnh; SOC2 – Thời điểm xuất hiện ngọn lửa nóng) sẽ sớm dần (Hình 7), quá trình cháy ngày càng sớm trước ĐCT sẽ ảnh hưởng tới các chỉ tiêu kỹ thuật của động cơ.



Hình 5. Tốc độ tỏa nhiệt của động cơ HCCI khi mô phỏng.

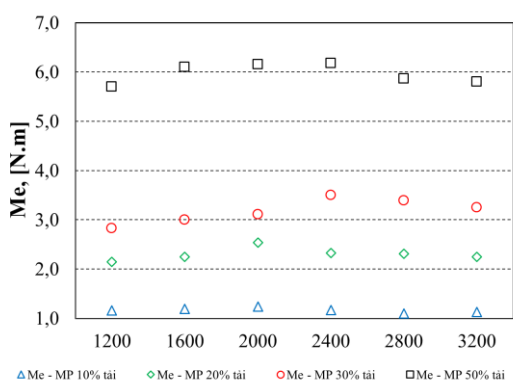


Hình 6. Hệ số dư không khí của động cơ HCCI khi mô phỏng.

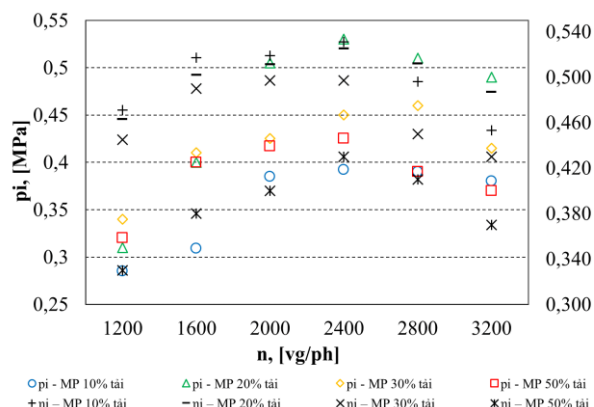


Hình 7. Thời điểm bắt đầu cháy của động cơ HCCI khi mô phỏng.

4.1.2. Các thông số có ích và chỉ thị của động cơ HCCI khi mô phỏng



Hình 8. Mô men có ích của động cơ HCCI khi mô phỏng.



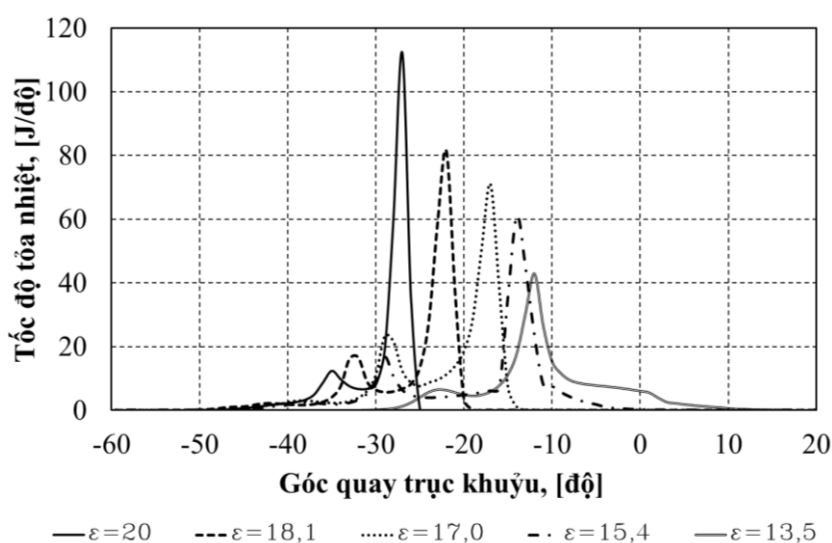
Hình 9. Áp suất và hiệu suất chỉ thị của động cơ HCCI khi mô phỏng.

Các thông số có ích và chỉ thị của động cơ HCCI khi mô phỏng được thể hiện qua hình 8 và hình 9, tại cùng chế độ tải và tốc độ động cơ HCCI có thể phát huy được mô men tương đương với mô men của động cơ diesel nguyên bản, tuy nhiên các thông số chỉ thị của động cơ cho thấy: Tại các chế độ tải nhỏ hơn 30% và tốc độ nhỏ hơn 2400 vg/ph thì các thông số chỉ thị có xu hướng tăng, tại 50% tải và tốc độ lớn hơn 2400 vg/ph do ảnh hưởng của việc cháy quá sớm nên các thông số chỉ thị giảm nhanh.

4.2. Kết quả mô phỏng ảnh hưởng của tỷ số nén

Kết quả mô phỏng động cơ HCCI khi thay đổi tỷ số nén gồm: Đặc tính cháy, các thông số chỉ thị và có ích của động cơ HCCI với tỷ số nén giảm từ 20 xuống 18,1; 17; 15,4 và 13,5 tại 2000vg/ph, 30% tải.

4.2.1. Đặc tính cháy của động cơ HCCI khi thay đổi tỷ số nén

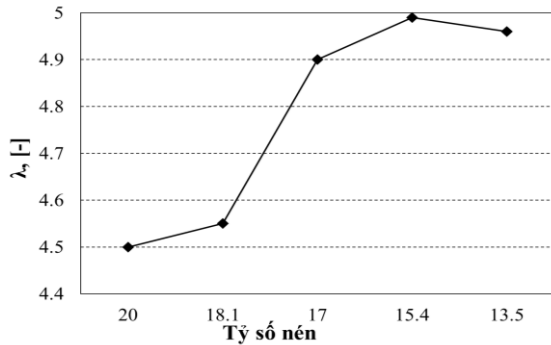


Hình 10. Tốc độ tỏa nhiệt của động cơ HCCI khi mô phỏng thay đổi tỷ số nén.

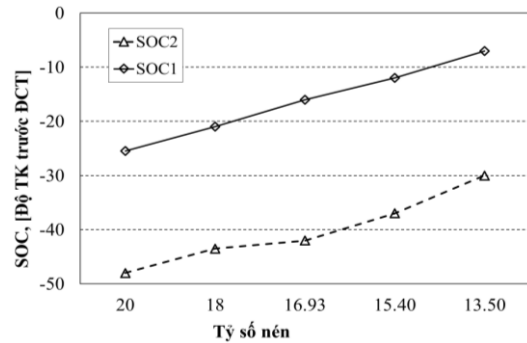
Khi giảm tỷ số nén tốc độ tỏa nhiệt trong xy lạnh giảm dần (Hình 10) vì khi giảm tỷ số nén hệ số dư không khí tăng dần (Hình 11), hỗn hợp cháy loãng hơn dẫn đến quá trình cháy

không được tốt như trước, tuy nhiên khi giảm tỷ số nén thì thời điểm bắt đầu cháy muộn dần (Hình 12), cải thiện tình trạng cháy quá sớm khi động cơ chuyển sang cháy HCCI.

Đồng thời khi giảm tỷ số nén giá trị cực của tốc độ tăng áp suất tỷ số nén 13,5 giảm rất nhanh do đó không nên giảm tỷ số nén nữa.

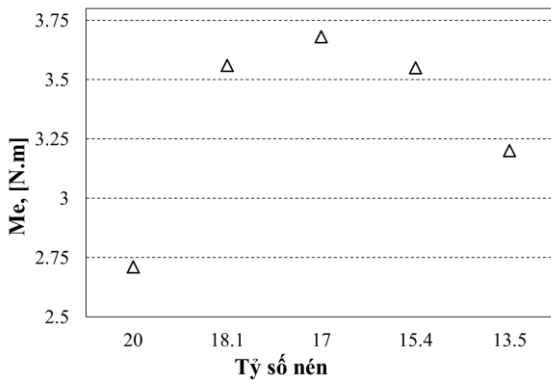


Hình 11. Hệ số dư không khí của động cơ HCCI khi mô phỏng thay đổi tỷ số nén.

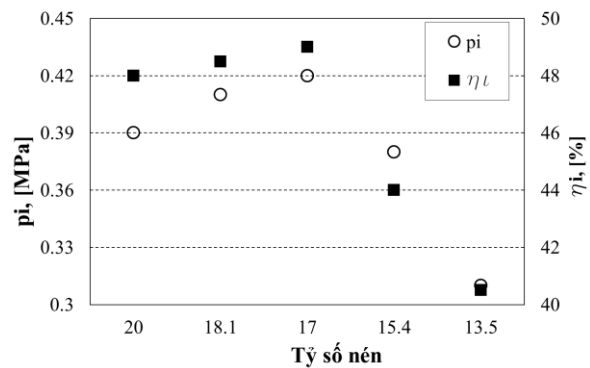


Hình 12. Thời điểm bắt đầu cháy của động cơ HCCI khi mô phỏng thay đổi tỷ số nén.

4.2.2. Các thông số chỉ thị và có ích khi thay đổi tỷ số nén



Hình 13. Các thông số có ích của động cơ HCCI khi mô phỏng thay đổi tỷ số nén.



Hình 14. Áp suất và hiệu suất chỉ thị của động cơ HCCI khi mô phỏng thay đổi tỷ số nén.

Các thông số có ích của động cơ khi giảm tỷ số nén được thể hiện qua hình 13, mô men tăng dần và đạt giá trị lớn nhất tại tỷ số nén 15,4:1, tiếp tục giảm tỷ số nén thì các thông số có ích giảm rất nhanh.

Các thông số chỉ thị của động cơ khi giảm tỷ số nén được thể hiện qua hình 14, áp suất chỉ thị trung bình và hiệu suất chỉ thị tại tỷ số nén 17; 18,1 tăng, tiếp tục giảm tỷ số nén thì các thông số chỉ thị giảm dần, tại tỷ số nén 13,5:1 thì giảm rất nhanh.

5. KẾT LUẬN

Với động cơ chuyển đổi sang HCCI tại tỷ số nén 20 thấy rằng:

Tại cùng chế độ tải và tốc độ động cơ HCCI có thể phát huy được mô men tương đương với mô men của động cơ diesel nguyên bản;

Tại các chế độ tải nhỏ hơn 30% và tốc độ nhỏ hơn 2400 vg/ph thì động cơ HCCI làm việc ổn định, tại 50% tải và tốc độ lớn hơn 2400 vg/ph do ảnh hưởng của việc cháy quá sớm nên các thông số chỉ thị giảm nhanh.

Khi nghiên cứu ảnh hưởng của tỷ số nén đến quá trình HCCI thấy rằng: Giảm tỷ số nén động cơ vẫn làm việc theo nguyên lý HCCI, thời điểm bắt đầu cháy muộn dần, không nên giảm tỷ số nén nhỏ hơn 13,5.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông vận tải (ĐH GTVT) trong đề tài mã số T2022-CK-005

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Noguchi, M., Tanaka., et al, A study on gasoline engine combustion by observation on intermediate reactive products during combustion, 1979 SAE International Off-Highway and Powerplant Congress and Exposition, (1979) 790840. <https://doi.org/10.4271/790840>
- [2]. O. Onishi, S., et al, Active thermo-atmosphere combustion (ATAC) – A new combustion process for internal combustion engines, SAE paper (1979) 790507. <https://doi.org/10.4271/790501>.
- [3]. Hyung Jun Kim, Kwan Soo Lee, Chang Sik Lee, A study on the reduction of exhaust emissions through HCCI combustion by using a narrow spray angle and advanced injection timing in a DME engine, Fuel Processing Technology, 92 (2011) 1756–1763. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.04.024>
- [4]. Suyin Gan, Hoon Kiat Ng, Kar Mun Pang, Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) combustion: Implementation and effects on pollutants in direct injection diesel engines, Applied Energy, 88 (2011) 559–5. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.09.005> [Get rights and content](#)
- [5]. Tuan Le Anh, Vinh Nguyen Duy, Ha Khuong Thi, Hoi Nguyen Xa, Experimental Investigation on Establishing the HCCI Process Fueled by N-Heptane in a Direct Injection Diesel Engine at Different Compression Ratios, Sustainability, 10 (2018) 11, 3878. <https://doi.org/10.3390/su10113878>
- [6]. Z. Wang, S. Shuai, J. Wang, G. Tian, A computational study of direct injection gasoline HCCI engine with secondary injection, Fuel, 85 (2006) 1831–41. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.02.013>
- [7]. Can Cinar, Ozer Can, Fatih Sahin, H. Serdar Yucesu, Effects of premixed diethyl ether (DEE) on combustion and exhaust emissions in a HCCI-DI diesel engine, Applied Thermal Engineering, 30 (2010) 360–365. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.09.016>
- [8]. H.J. Curran, S.L. Fischer, F.L. Dryer, The reaction kinetics of dimethyl ether. II: Lowtemperature oxidation in flow reactors, Int J Chem Kinet, 32 (2000) 741–59. [https://doi.org/10.1002/1097-4601\(2000\)32:12<741::AID-KIN2>3.0.CO;2-9](https://doi.org/10.1002/1097-4601(2000)32:12<741::AID-KIN2>3.0.CO;2-9)
- [9]. Kitae Yeom, Jinyoung Jang, Choongsik Bae, Homogeneous charge compression ignition of LPG and gasoline using variable valve timing in an engine, Fuel, 86 (2007) 494–503. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.07.027>
- [10]. S. Swami Nathan, J.M. Mallikarjuna, A. Ramesh, An experimental study of the biogas–diesel HCCI mode of engine operation, Energy Conversion and Management, 51 (2010) 1347–1353. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.09.008> [Get rights and content](#)
- [11]. Toshio Shudo, Yosuke Shima, Tatsuya Fujii, Production of dimethyl ether and hydrogen by methanol reforming for an HCCI engine system with waste heat recovery – Continuous control of fuel

ignitability and utilization of exhaust gas heat, international journal of hydrogen energy, 34 (2009) 7638 – 7647. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.06.077>

[12]. Akhilendra Pratap Singh, Avinash Kumar Agarwal, Effect of intake charge temperature and EGR on Biodiesel fuelled HCCI engine, SAE technical Paper, (2016) 2016-28-0257. <https://doi.org/10.4271/2016-28-0257>

[13]. AVL–List GmbH, BOOST Users Guide, Hans–List–Platz 1, 2011, A–8020 Graz, Austria.