

NGHIÊN CỨU MÔ PHỎNG ẢNH HƯỞNG CỦA ÁP SUẤT VÀ NHIỆT ĐỘ KHÍ NẠP ĐẾN QUÁ TRÌNH CHÁY CỦA ĐỘNG CƠ CHÁY DO NÉN HỖN HỢP ĐỒNG NHẤT

A SIMULATION STUDY ON EFFECT OF PRESSURE AND TEMPERATURE OF INTAKE AIR ON COMBUSTION CHARACTERISTICS OF A HOMOGENOUS CHARGE COMPRESSION IGNITION ENGINE

Trần Thị Thu Hương

Trường Đại học Bách khoa Hà Nội; huong.tranthithu@hust.edu.vn

Tóm tắt - Các kết quả nghiên cứu mô phỏng đặc tính cháy của động cơ hoạt động theo nguyên lý cháy do nén hỗn hợp đồng nhất (HCCI) khi thay đổi áp suất và nhiệt độ của không khí nạp được thể hiện trong bài báo này. Nghiên cứu được thực hiện trên phần mềm mô phỏng AVL Boost. Động cơ sử dụng cho nghiên cứu là động cơ một xilanh AVL 5402 với nhiên liệu được phun trên đường nạp. Chế độ làm việc của động cơ là tốc độ 2000 vòng/phút, lượng nhiên liệu chu trình thay đổi từ 10 mg đến 11,2 mg với bước thay đổi 0,4 mg, ứng với mỗi giá trị của lượng nhiên liệu chu trình áp suất khí nạp biến thiên từ 1 bar đến 1,3 bar (nhiệt độ khí nạp giữ ở 298K), và nhiệt độ khí nạp thay đổi từ 298K đến 398K (áp suất khí nạp cố định 1 bar). Kết quả nghiên cứu cho thấy thời điểm bắt đầu cháy diễn ra sớm hơn khi tăng áp suất nạp và nhiệt độ khí nạp. Tuy nhiên khi tăng nhiệt độ khí nạp dẫn đến hiệu suất nhiệt giảm.

Từ khóa - cháy do nén hỗn hợp đồng nhất (HCCI); áp suất nạp; nhiệt độ khí nạp; mô phỏng; n-heptane.

Abstract - This papers presents a study of HCCI combustion characteristics of a single cylinder internal combustion (IC) engine, named AVL-5402, fueled with n-heptane under different intake pressures (from 1 bar to 1.3 bar) using a turbocharger, while intake temperature is kept constant of 298K. For a study of intake temperature on the combustion process, the temperature is varied from 298K to 338K, while intake air pressure is 1 bar. The research is carried out on AVLBoost software. The engine speed is 2000 rpm, fuel mass-flow rate is 10, 10.4, 10.8 and 11.2 mg. The simulation results show that the start of ignition timing becomes advanced when the inlet air pressure and temperature increase. However, indicated efficiency decreases when the temperature increases.

Key words - HCCI; intake air temperature; intake air pressure; simulation; n-heptane.

1. Đặt vấn đề

Động cơ cháy do nén hỗn hợp đồng nhất (HCCI) hội tụ được cả ưu điểm của động cơ đốt cháy cưỡng bức và tự cháy (cháy do nén). Phương pháp này cho phát thải NOx rất thấp và phát thải bồ hóng gần như bằng không trong khi hiệu suất tương đương hoặc cao hơn so với động cơ diesel thông thường [1-3]. Tuy nhiên việc điều khiển quá trình cháy vẫn còn là thách thức, bên cạnh hàm lượng phát thải CO và HC cao và khó khăn trong việc mở rộng dải tải trọng làm việc của động cơ [4, 5]. Vì vậy việc nghiên cứu các yếu tố quyết định để điều khiển đặc tính cháy HCCI là rất cần thiết. Trên thế giới đã có nhiều nghiên cứu nhằm tìm ra các thông số có thể điều khiển quá trình cháy động cơ này như [6]: tỷ số nén, áp suất nạp, nhiệt độ khí nạp, luân hồi khí xả, hình dạng đỉnh piston, đặc điểm phun, áp suất phun... Trong những thông số điều khiển trên thì áp suất và nhiệt độ khí nạp dễ dàng thay đổi mà ít phải can thiệp đến kết cấu của động cơ. Các yếu tố này được dùng để điều khiển quá trình cháy thông qua việc làm tăng vận động rối và tăng nhiệt độ để nhiên liệu dễ bay hơi hơn, và tạo thành hỗn hợp đồng nhất khi nhiên liệu được phun trên đường nạp.

Nghiên cứu thử nghiệm của Mustafa Canakci [7] xác định ảnh hưởng của áp suất khí nạp đến hoạt động và phát thải của động cơ xăng DI-HCCI. Các thí nghiệm được thực hiện tại áp suất khí nạp là 14,7 psi (1,01 bar), 17 psi (1,17 bar) và 20 psi (1,38 bar) trong khi giữ động cơ với hệ số dư lượng không khí 4,54 và nhiệt độ không khí nạp là 119°C. Nghiên cứu khẳng định, khi tăng áp suất nạp thì thời điểm bắt đầu cháy diễn ra sớm hơn, hiệu suất nhiệt tăng, nhiệt độ khí xả tăng, và mô men động cơ tăng. Đồng thời

phát thải CO tăng, phát thải HC giảm xuống. Ở mỗi giá trị áp suất nạp trong dải tốc độ động cơ, xu hướng phát thải NOx ngược với phát thải HC. Phát thải NOx tăng cùng với tốc độ động cơ. Sự hình thành NOx rất nhạy cảm với thời điểm bắt đầu cháy, điều này được cho là do sự phụ thuộc nhiều vào tính đồng nhất của hỗn hợp.

Singh, A. và Agarwal [9] sử dụng phần mềm mô phỏng một chiều nghiên cứu hiệu suất và đặc tính phát thải của động cơ HCCI, thực hiện trên động cơ 4 xilanh, tăng áp tua bin máy nén có hiệu suất 0,64. Nghiên cứu khẳng định hiệu suất nhiệt có thể tăng lên khi tăng tỷ số nén và nhiệt độ khí nạp thấp. Trên động cơ có tỷ số nén 21 và áp suất tăng áp là 1,9 bar, hiệu suất nhiệt có thể lên đến 0,43 trong khi phát thải NOx chỉ còn 10ppm hoặc thấp hơn.

Các nghiên cứu trên, mặc dù đã xét đến ảnh hưởng của áp suất tăng áp đến hoạt động, hiệu suất và phát thải của động cơ HCCI, có nghiên cứu trên động cơ xăng, có nghiên cứu thực hiện trên động cơ disel, tuy nhiên các tác giả chưa nghiên cứu ảnh hưởng của áp suất và nhiệt độ khí nạp đến đặc tính cháy HCCI. Trong bài báo này, tác giả nghiên cứu ảnh hưởng của hai thông số điều khiển trên làm cơ sở giải thích xu hướng thay đổi của các thông số làm việc của động cơ HCCI, thông qua phần mềm mô phỏng 1 chiều AVL Boost.

2. Quy trình mô phỏng

2.1. Cơ sở lý thuyết

Trong mô hình mô phỏng được xây dựng trên phần mềm AVL Boost, mô hình truyền nhiệt của Woschni [9], và mô hình cháy HCCI một vùng [10] được lựa chọn. Tốc độ tỏa nhiệt dQ_F/da của mô hình cháy HCCI được xác định

như sau:

$$\frac{dQ_F}{d\alpha} = \sum_{i=1}^n u_i MW_i \dot{\omega} \tag{1}$$

Tỷ lệ theo khối lượng các thành phần khí được tính toán theo biểu thức sau:

$$\rho \frac{dw_i}{d\alpha} = MW_i \dot{\omega} \tag{2}$$

Trong đó:

- n* - số lượng các thành phần chất khí [-];
- MW* - khối lượng mol thành phần [kg/kmol];
- u* - nội năng thành phần [J/kg.K];
- w* - tỷ lệ khối lượng các thành phần [-];
- ρ* - khối lượng riêng của hỗn hợp [kg/m³];
- ω*- tốc độ phản ứng [kmol/m³.s].

2.2. Đối tượng mô phỏng

Bảng 1. Thông số kỹ thuật của động cơ

Thông số	Giá trị
Tên động cơ	AVL 5402
Kiểu động cơ	1 xylanh, 4 kỳ
Đường kính xylanh	85 mm
Hành trình piston	90 mm
Dung tích xylanh	510,7 cm³
Tỷ số nén	17,3:1
Xupap nạp	Mở sớm 16°TK Đóng muộn 46°TK
Xupap thải	Mở sớm 53,5°TK Đóng muộn 16,5°TK

Động cơ mô phỏng là động cơ nghiên cứu một xylanh AVL 5402, đường nạp được cải tiến và lắp vòi phun để cung cấp nhiên liệu bên ngoài xylanh. Các thông số kỹ thuật của động cơ được cho trong Bảng 1.

Nhiên liệu được sử dụng trong mô phỏng là n-heptane với một số tính chất hóa lý cơ bản như trong Bảng 2.

Bảng 2. Tính chất lý hóa của nhiên liệu

Tính chất	Giá trị
Công thức hoá học	n-C ₇ H ₁₆
Khối lượng mol	100,16 g/mol
Khối lượng riêng	0,692 g/ml
Nhiệt trị thấp	44,5 MJ/kg
Nhiệt ẩn hóa hơi	0,317 MJ/kg
Hệ số A/F	15,132

2.3. Mô hình mô phỏng trong AVL Boost

Mô hình động cơ AVL 5402 được xây dựng trên phần mềm AVL Boost cho nghiên cứu ảnh hưởng của áp suất và nhiệt độ khí nạp tương ứng trong Hình 1 và Hình 2.

Trong Hình 1 cụm tua bin máy nén TC1 được dùng để thay đổi áp suất khí nạp, bộ làm mát trung gian CO1 hạn chế nhiệt độ khí nạp tăng quá cao ảnh hưởng đến hệ số nạp.

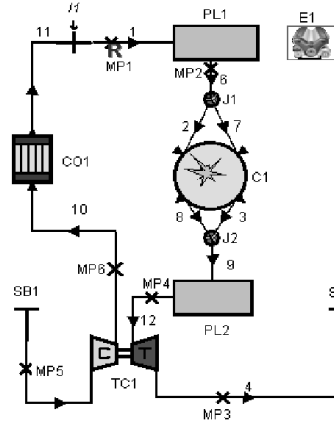
2.4. Chế độ mô phỏng

Chế độ làm việc của động cơ mô phỏng được thể hiện trong Bảng 3. Trong đó tốc độ động cơ là 2000 v/ph. Lượng nhiên liệu chu trình được thay đổi với bốn giá trị 10mg;

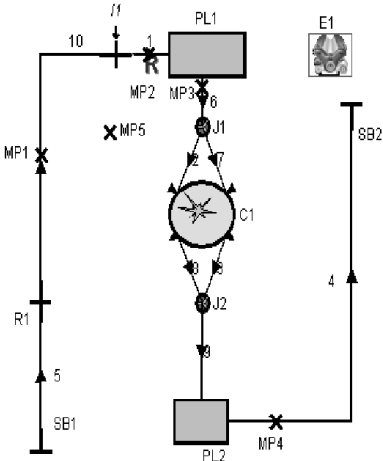
10,4mg; 10,8mg; và 11,2mg, tại mỗi giá trị của lượng nhiên liệu chu trình, áp suất nạp được thay đổi từ 1 bar đến 1,3 bar. Trong nghiên cứu về nhiệt độ khí nạp, tại mỗi giá trị của lượng nhiên liệu chu trình nhiệt độ được thay đổi từ 298K đến 338K. Tại các điểm làm việc đó, các kết quả mô phỏng tốc độ tỏa nhiệt, áp suất trong xylanh và hiệu suất nhiệt của động cơ được phân tích để khảo sát ảnh hưởng của các thông số điều khiển quá trình cháy và xác định giá trị tối ưu của các thông số đó cho quá trình làm việc của động cơ HCCI sử dụng nhiên liệu n-heptane.

Bảng 3. Chế độ làm việc của động cơ khi mô phỏng

Thông số	Giá trị
Tốc độ động cơ [v/ph]	2000
Lượng nhiên liệu chu trình [mg]	10; 10,4; 10,8; 11,2
Áp suất khí nạp [bar]	1; 1,15; 1,25; 1,3
Nhiệt độ khí nạp [K]	298; 308; 318; 328; 338



Hình 1. Mô hình động cơ AVL 5402 khi lắp tua bin tăng áp



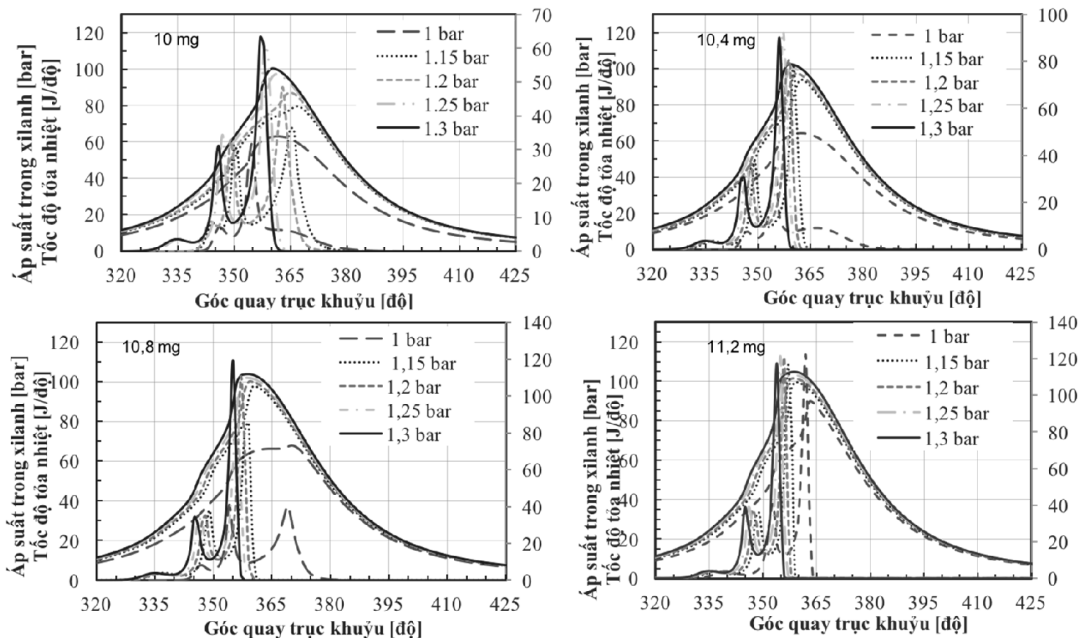
Hình 2. Mô hình mô phỏng động cơ AVL 5402 khi sấy khí nạp

3. Kết quả và thảo luận

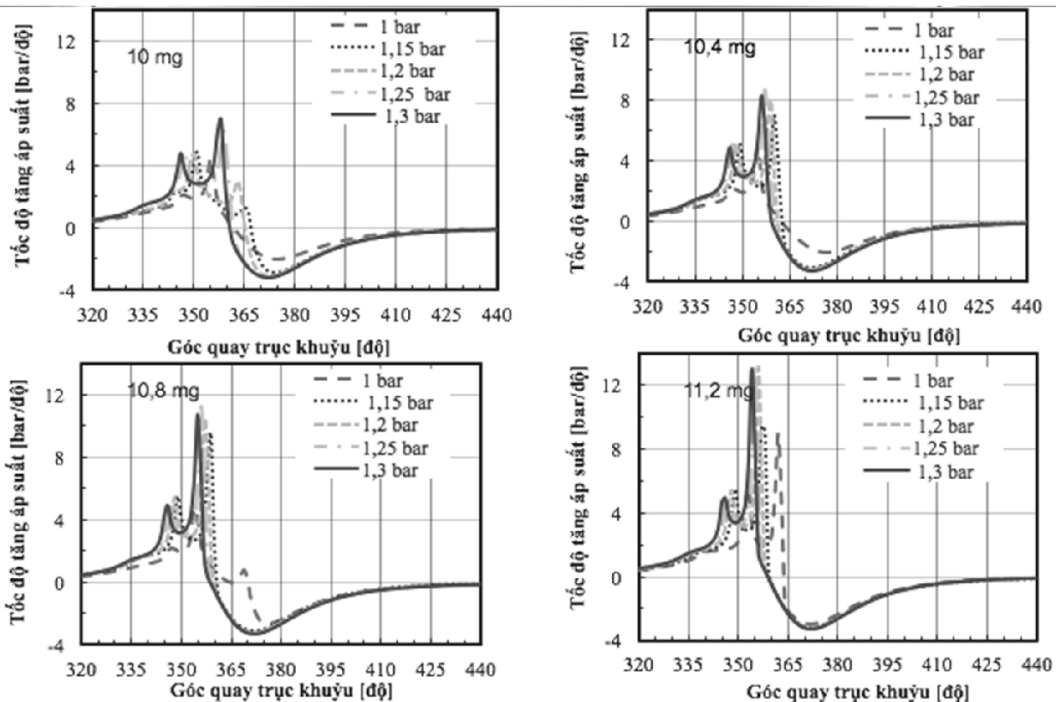
Hình 3 thể hiện ảnh hưởng của áp suất khí nạp đến tốc độ tỏa nhiệt của động cơ tại các giá trị lưu lượng cấp chu trình: 10mg, 10,4mg, 10,8 mg, và 11,2 mg. Kết quả mô phỏng cho thấy, tại tất cả các giá trị của lượng nhiên liệu chu trình, khi tăng áp suất khí nạp, tốc độ tỏa nhiệt đều tăng và quá trình cháy diễn ra sớm hơn. Đặc biệt, có sự khác biệt rất lớn khi so sánh giữa trường hợp có tăng áp so với

trường hợp không tăng áp (1 bar). Điều này có thể được lý giải như sau: Khi áp suất khí nạp tăng làm tăng nhiệt độ và mật độ không khí trong xilanh và tăng cường khả năng vận động rối của hỗn hợp nhiên liệu và không khí, dẫn đến tăng

lượng ô xy tham gia vào quá trình cháy, làm cho hỗn hợp đồng nhất hơn và dễ dàng, nhanh chóng đạt được các điều kiện để quá trình cháy bắt đầu hơn. Vì thế quá trình cháy triệt để, dẫn đến tốc độ tỏa nhiệt lớn hơn.



Hình 3. Biến thiên áp suất trong xi lanh và tốc độ tỏa nhiệt khi thay đổi áp suất khí nạp



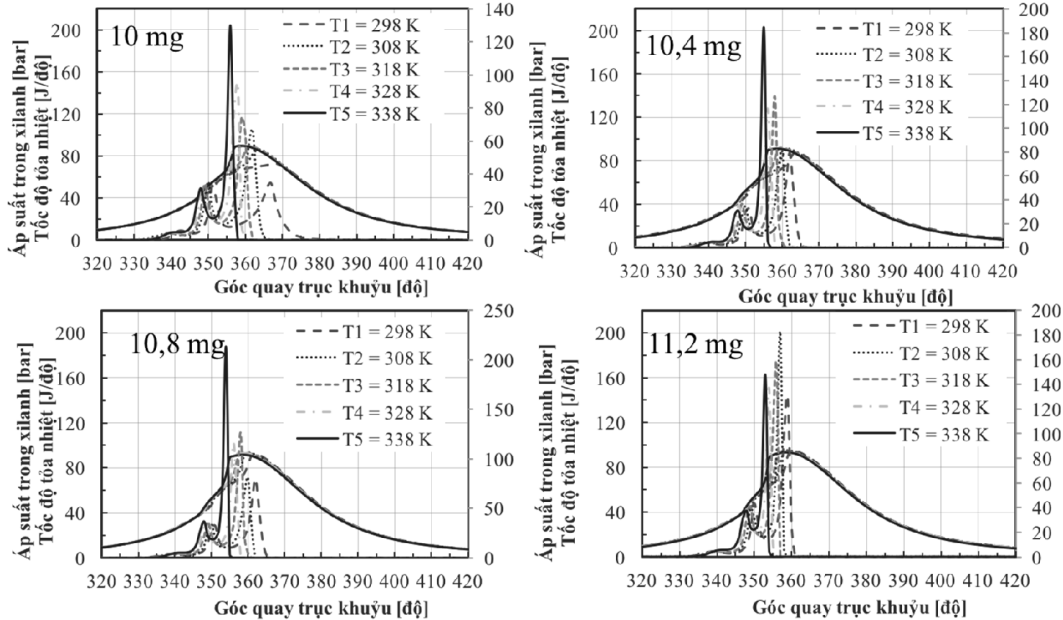
Hình 4. Tốc độ tăng áp suất khi thay đổi áp suất khí nạp

Áp suất khí nạp tăng làm khối lượng hỗn hợp nạp vào xilanh trong một chu trình nhiều hơn, do đó khi cô định lượng nhiên liệu trong một chu trình thì hệ số dư không khí tăng lên. Trong trường hợp lượng nhiên liệu cấp là 10 mg/chu trình, áp suất tăng áp lần lượt là $p_1 = 1$ bar, $p_2 = 1.15$ bar, $p_3 = 1.2$ bar, $p_4 = 1.25$ bar, $p_5 = 1.3$ bar thì hệ số dư lượng không khí tương ứng: $\lambda_1 = 3.74$, $\lambda_2 = 4.00$, $\lambda_3 = 4.04$, $\lambda_4 = 4.15$, $\lambda_5 = 4.23$.

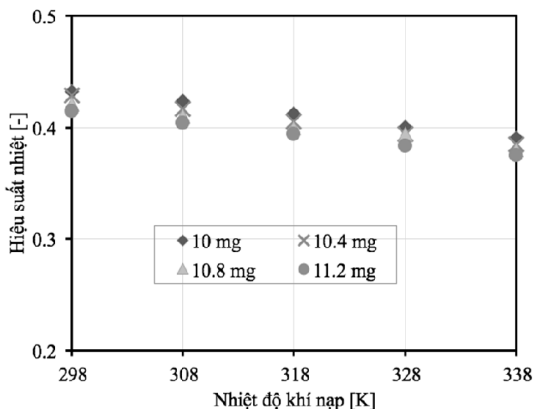
Kết quả mô phỏng về biến thiên tốc độ tỏa nhiệt cho thấy khi tăng áp càng cao tốc độ tỏa nhiệt càng tăng, thời gian đạt nhiệt độ tự cháy của hỗn hợp càng sớm hơn. Điều này được giải thích là do khi tăng áp suất khí nạp, nhiệt độ khí nạp tăng lên, áp suất cuối quá trình nén cũng tăng và lượng không khí tham gia quá trình cháy nhiều hơn, dẫn đến điều kiện để hỗn hợp tự cháy đạt được sớm hơn và quá trình cháy diễn ra triệt để và đồng bộ hơn, dẫn đến nhiệt độ

trong xilanh trước và sau quá trình cháy đều tăng.

Trên Hình 4 thể hiện ảnh hưởng của tăng áp đến tốc độ tăng áp suất trong xilanh. Kết quả cho thấy, cả khi tăng áp và khi tăng lượng nhiên liệu chu trình tốc độ tăng áp suất trong xilanh đều tăng lên. Khi tốc độ tăng áp suất tăng lên quá cao, vượt giới hạn “10 bar/độ”, tạo nên các xung áp suất đập vào các bề mặt chi tiết trong buồng cháy, gây nên tiếng gõ đanh, sắc. Điều này có thể giải thích là do khi tăng áp dẫn đến áp suất cuối quá trình nén và nhiệt độ của hỗn hợp tăng lên, hỗn hợp hòa trộn hoàn hảo hơn. Kết quả là hỗn hợp bùng cháy mạnh mẽ hơn, làm cho tốc độ tăng áp suất tăng. Trên đồ thị cho ta thấy, khi tăng lượng nhiên liệu chu trình tốc độ tăng áp suất tăng lên, với lượng nhiên liệu chu trình 10mg/chu trình và 10.4 mg/chu trình tốc độ tăng áp suất nằm trong giới hạn cho phép, và động cơ làm việc êm dịu hơn. Khi tăng lượng nhiên liệu chu trình (tăng tải), 10.8mg/chu trình, 11.2mg/chu trình, tốc độ tăng áp suất đều lớn hơn “10 bar/độ”. Ở chế độ này, các chi tiết trong các hệ thống của động cơ chịu các xung áp suất gây va đập có thể dẫn tới hỏng hóc. Vì vậy, để khắc phục hiện tượng này cần tăng áp cao khi động cơ làm việc ở chế độ tải nhỏ, còn khi động cơ làm việc ở chế độ tải cao thì tăng áp ít hơn.

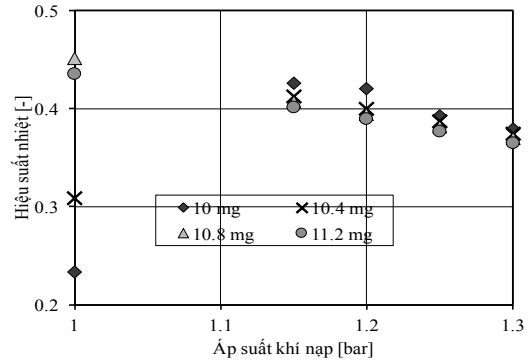


Hình 6. Biến thiên áp suất trong xi lanh và tốc độ tỏa nhiệt khi thay đổi nhiệt độ khí nạp



Hình 7. Biến thiên hiệu suất nhiệt động cơ theo nhiệt độ khí nạp

Kết quả tính toán hiệu suất nhiệt (Hình 5) của động cơ khi áp suất khí nạp thay đổi cũng thể hiện xu hướng phù hợp. Khi động cơ làm việc với hỗn hợp nhát dần tương ứng với áp suất tăng áp tăng dần thì hiệu suất nhiệt động cơ tăng. Cụ thể, khi áp suất nạp lên 1,15 bar thì hiệu suất nhiệt tăng lên đáng kể với $\eta_i = 42,54\%$ so với chế độ không tăng áp $\eta_i = 23,38\%$. Công suất động cơ cũng cao hơn khi tăng áp. Trường hợp áp suất nạp $p = 1.2$ bar ($\lambda = 4.04$) công suất động cơ đạt 3,26 kW so với khi không tăng áp là 1,8 kW.



Hình 5. Hiệu suất nhiệt động cơ theo áp suất khí nạp

Hình 6 thể hiện ảnh hưởng của nhiệt độ khí nạp đến biến thiên áp suất trong xi lanh và tốc độ tỏa nhiệt tại các giá trị lượng nhiên liệu chu trình khác nhau. Kết quả mô phỏng cho thấy, khi nhiệt độ khí nạp tăng thì áp suất trong xi lanh và tốc độ tỏa nhiệt đều tăng, và quá trình cháy diễn ra sớm hơn. Tuy nhiên quá trình cháy diễn ra quá sớm, và lượng khí nạp giảm dẫn đến hiệu suất nhiệt của động cơ (Hình 7) giảm.

4. Kết luận

Từ các kết quả nghiên cứu trên có thể rút ra các kết luận sau:

Tăng áp suất khí nạp thì thời điểm hỗn hợp cháy diễn ra sớm hơn. Tại mỗi giá trị áp suất nạp, thời điểm cháy diễn ra sớm tỷ lệ với lượng nhiên liệu chu trình.

Khi áp suất khí nạp nhỏ và trung bình, hiệu suất nhiệt động cơ tăng tỷ lệ với áp suất nạp ở chế độ tải nhỏ. Khi áp suất khí nạp lớn, đặc biệt ở chế độ tải lớn, động cơ làm việc rung ồn và hiệu suất nhiệt giảm.

Nhiệt độ khí nạp tăng làm hiệu suất nhiệt động cơ giảm do hỗn hợp cháy quá sớm.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Onishi S, Jo SH, Shoda K, Jo PD, Kato S., “Active thermo-atmosphere combustion (ATAC) a new combustion process for internal combustion engines”, SAE paper 790501, 1979.
- [2] Duret P, Gatellier B, Monteiro L, Miche M, Zima P, Maroteaux D, et al., “Progress in diesel HCCI combustion within the European SPACE LIGHT project”, SAE paper 2004-01-1904, 2004.
- [3] Sjoberg M, Dec JE, “An investigation of the relationship between measured intake temperature, BDC temperature, and combustion phasing for premixed and DI HCCI engines”, SAE paper 2004-01-1900, 2004.
- [4] Hampson GJ, “Heat release design method for HCCI in diesel engines”, SAE paper 2005-01-3728, 2005.
- [5] Hosseini V, Checkel MD, “Using reformer gas to enhance HCCI combustion of NG in a CFR engine”, SAE paper 2006-01-3247, 2006.
- [6] 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, p.559–567, 2011.
- [7] Mustafa Canakci, “An experimental study for the effects of boost pressure on the performance and exhaust emissions of a DI-HCCI gasoline engine”, Fuel 87, pages 1503-1514, 2005.
- [8] Singh, A. and Agarwal, A., “Effect of intake charge temperature and EGR on biodiesel fuelled HCCI engine”, SAE technical paper 2016-28-0257, 2016, doi: 10.4271/2016-28-0257.
- [9] G. Woschni, “A Universally Applicable Equation for the Instantaneous Heat Transfer Coefficient in Internal Combustion Engines”, SAE 6700931, 1967.
- [10] AVL-List GmbH, BOOST v.2009 Users Guide & Theory, Hans-List-Platz 1, A-8020 Graz, Austria, 2009.

(BBT nhận bài: 16/05/2016, phản biện xong: 23/05/2016)