

## NGHIÊN CỨU MÔ PHỎNG ẢNH HƯỞNG CỦA ÁP SUẤT PHUN NHIÊN LIỆU TRÊN ĐƯỜNG ỐNG CAO ÁP ĐẾN QUÁ TRÌNH HÌNH THÀNH HỖN HỢP CHÁY TRONG ĐỘNG CƠ DIESEL MÁY CHÍNH TÀU CÁ

A SIMULATION STUDY ON EFFECT OF FUEL INJECTION PRESSURE  
 IN THE HIGH PRESSURE PIPE ON PROCESS OF COMBUSTION MIXTURE  
 FORMATION IN THE MAIN DIESEL ENGINE OF FISHING VESSELS

**Hồ Đức Tuấn<sup>1</sup>, Mai Đức Nghĩa<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Trường Đại học Nha Trang, Việt Nam

<sup>2</sup>Trường Sĩ quan Không quân, Việt Nam

*Ngày toà soạn nhận bài 10/4/2020, ngày phản biện đánh giá 21/4/2020, ngày chấp nhận đăng 04/5/2020*

### TÓM TẮT

*Diễn biến áp suất trên đường ống cao áp của hệ thống phun nhiên liệu động cơ diesel phụ thuộc vào bơm cao áp và ảnh hưởng trực tiếp đến cấu trúc tia phun nhiên liệu, dẫn đến thay đổi quá trình hình thành hỗn hợp cháy và cháy nhiên liệu, làm ảnh hưởng đến công suất và phát thải của động cơ. Do vậy, xác định mức giảm áp suất trên đường ống cao áp để kịp thời sửa chữa, bảo dưỡng hệ thống phun nhiên liệu, đặc biệt là bơm cao áp sẽ giúp nâng cao hiệu suất làm việc và ngăn ngừa các sự cố xảy ra đối với động cơ diesel máy chính tàu cá. Kết quả nghiên cứu mô phỏng bằng phần mềm AVL Boost/Hydsim đối với động cơ diesel tàu cá 4CHE –Yanmar cho thấy, khi áp suất trên đường ống cao áp giảm 12÷14% thì cấu trúc tia phun giảm đến 14,6%.*

**Từ khóa:** *Diễn biến áp suất trên đường ống cao áp; bơm cao áp; trục cam; áp suất phun nhiên liệu; cấu trúc tia phun; hệ thống phun nhiên liệu; động cơ diesel máy chính tàu cá.*

### ABSTRACT

*Fuel injection pressure performance in the high-pressure pipe depends on the high pressure pump and directly affects to spray structure, leading to changes in the process of combustion mixture formation and burning fuel, affects on power and exhaust emissions of engine. Therefore, determining the reduction level of pressure in the high-pressure pipe to timely repair and maintenance of fuel injection systems, especially high-pressure pumps, will help improve working efficiency and prevent incidents for a main diesel engine. The simulation results of AVL Boost/Hydsim software for 4CHE-Yanmar main diesel engine of fishing vessels showed that when the pressure on high-pressure pipe decreased by 12÷14% the spray structure decreased by 14,6%.*

**Keywords:** *Pressure performance in the high pressure pipe; high pressure pump; camshaft; fuel injection pressure; spray structure; fuel injection system; diesel engine of the fishing vessel.*

### 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong thực tế, khi động cơ tàu cá hoạt động trên biển, việc đo các thông số làm việc để chẩn đoán tình trạng kỹ thuật là rất khó khăn, ngoại trừ đo áp suất trên đường ống cao áp ( $p_{inj}$ ) bằng phương pháp thay thế đường

ống tương đương có gắn cảm biến (áp suất trên đường ống cao áp sẽ phản ánh được áp suất nâng kim phun tại vòi phun). Thông số áp suất trên và áp suất trong xy lanh tại thời điểm phun nhiên liệu ( $p_c$ ) quyết định đến cấu trúc tia phun, qua đó ảnh hưởng trực tiếp đến quá trình hình thành hỗn hợp cháy và cháy nhiên

liệu, dẫn đến thay đổi các chỉ tiêu công tác của động cơ diesel [1], [2]. Do đó, xác định ảnh hưởng của áp suất trên đường ống cao áp cũng tương tự như áp suất phun nhiên liệu tại vòi phun và  $p_c$  là yêu cầu cần thiết để đánh giá cấu trúc tia phun, từ đó đánh giá quá trình hình thành hỗn hợp cháy, nhằm chẩn đoán tình trạng kỹ thuật của động cơ. Vì quá trình hình thành hỗn hợp cháy trong động cơ phụ thuộc nhiều vào cấu trúc tia phun, nếu tia phun quá ngắn (độ xuyên sâu s), phun nhỏ giọt hoặc độ mù hóa không cao (góc nón chùm tia  $\theta$ ) đều làm giảm độ đồng nhất của hỗn hợp cháy, khiến hiệu suất nhiệt giảm, dẫn đến giảm công suất của động cơ.

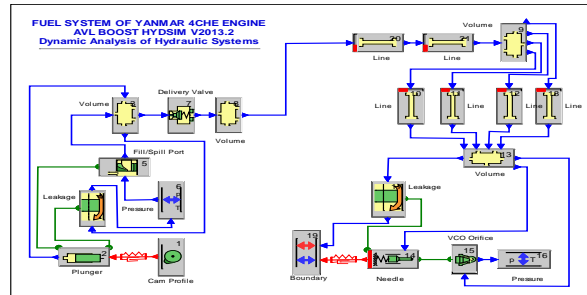
Thông thường, nguyên nhân chủ yếu khiến giảm áp suất trên đường ống cao áp là do mòn cam và rò rỉ các phần tử của bộ phận bơm cao áp. Do vậy, quá trình nghiên cứu sẽ thay đổi mức độ sai lệch về kích thước cam, gia tăng các rò rỉ phần tử để đánh giá ảnh hưởng của các chi tiết này đến  $p_{inj}$  và cấu trúc tia phun (s,  $\theta$ ). Khi  $p_{inj}$  giảm đến một giá trị nhất định, sẽ kéo theo sự suy giảm của s,  $\theta$  và tại đó có thể làm thay đổi đáng kể chỉ tiêu công tác của động cơ do quá trình hình thành hỗn hợp cháy kém hiệu quả [3]. Trên cơ sở này có thể đưa ra cảnh báo sửa chữa, bảo dưỡng hệ thống phun nhiên liệu, đặc biệt là bơm cao áp sẽ giúp nâng cao hiệu suất làm việc và ngăn ngừa các sự cố xảy ra đối với động cơ diesel. Nội dung nghiên cứu mô phỏng hệ thống phun nhiên liệu động cơ diesel máy chính tàu cá (4CHE-Yanmar) với các thông số kết cấu cụ thể và các giả thiết sai lệch (hư hỏng) được thực hiện trên phần mềm AVL Boost/Hydsim.

## 2. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

### 2.1 Phần mềm mô phỏng AVL Boost/Hysim và các thông số hệ thống phun nhiên liệu của động cơ diesel 4CHE-Yanmar

- AVL Boost/Hydsim là một phần mềm phân tích động lực học của những hệ thống thủy lực và thủy cơ, được xây dựng trên cơ sở lý thuyết động lực học và dao động chất lỏng của những hệ thống đa phần tử. Trong động cơ đốt trong, HydSim được dùng để mô

phỏng cho các hệ thống thủy lực như: hệ thống nhiên liệu, hệ thống bôi trơn, các hệ thống truyền động bằng thủy lực. Nhưng chủ yếu phần mềm được ứng dụng để mô phỏng hệ thống phun nhiên liệu [4]. Trên cơ sở này, mô hình mô phỏng hệ thống phun nhiên liệu động cơ diesel 4CHE-Yanmar được xây dựng như trên hình 1.



**Hình 1.** Mô hình mô phỏng hệ thống phun nhiên liệu động cơ diesel 4CHE-Yanmar

- Động cơ diesel 4CHE do Nhật Bản sản xuất, là loại động cơ công suất nhỏ, thường dùng làm máy chính cho các tàu cá tại khu vực Duyên hải Nam trung bộ [5]. Thông số động cơ trình bày trong bảng 1, các thông số đầu vào và thông số sai lệch (hư hỏng) thay đổi khi mô phỏng ở chế độ 1400 v/p, 40% tải (theo tiêu chuẩn thử nghiệm Nhật Bản) với nhiên liệu DO – Petrolimex thể hiện trong bảng 2.

**Bảng 1.** Thông số động cơ 4CHE-Yanmar

Tên các thông số	Đơn vị	Giá trị
Kiểu buồng cháy		Buồng cháy thống nhất dạng w
Số xy lanh x Đường kính xy lanh x hành trình piston	mm	4 x 105x125
Công suất	Hp/rpm	H: 70/2300
Tỷ số nén		16.4:1
Bơm cao áp		Kiểu bosch - bơm cụm
Số lỗ tia phun x đường kính x góc phun	mm, độ	4 x 0,32 x 140 <sup>0</sup>
Góc phun sớm	độ	18 <sup>0</sup>
Áp suất phun	bar	210

**Bảng 2.** Các thông số sai lệch (hư hỏng) thay đổi khi mô phỏng

TT	Ký hiệu	Thông số nhóm chi tiết gây ảnh hưởng	Độ giảm so với tình trạng ban đầu (tiêu chuẩn), %
1	A	Piston - bơm cao áp	0; 2; 4; 6; 8; 10; 12;14; 16
		Các chi tiết lò xo, vòng đệm, độ kín khít	
		Độ sai lệch các cửa vào - ra của ống	
2	B	Cam	0; 2; 4; 6; 8; 10; 12;14; 16

## 2.2 Cơ sở của mô phỏng

- Cơ sở quá trình tính toán các phần tử trong hệ thống nhiên liệu được thể hiện bởi các phương trình bảo toàn động lực học dòng chảy trong đường ống:

Phương trình liên tục:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho \cdot u)}{\partial x} - \rho \cdot u \cdot \frac{1}{A} \cdot \frac{dA}{dx} \quad (1)$$

Phương trình bảo toàn động lượng:

$$\frac{\partial(\rho \cdot u)}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho \cdot u^2 + p)}{\partial x} - \rho \cdot u^2 \cdot \frac{1}{A} \cdot \frac{\partial A}{\partial x} - \frac{F_R}{V} \quad (2)$$

Phương trình năng lượng:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = -\frac{\partial[u \cdot (E + p)]}{\partial x} - u \cdot (E + p) \cdot \frac{1}{A} \cdot \frac{dA}{dx} + \frac{q_w}{V} \quad (3)$$

Trong các phương trình trên:  $\rho$ -khối lượng riêng,  $kg \cdot m^{-3}$ ;  $u$ -tốc độ dòng lưu chất,  $m \cdot s^{-1}$ ;  $x$ -tọa độ,  $m$ ;  $A$ -diện tích mặt cắt ngang đường ống,  $m^2$ ;  $t$ -thời gian,  $s$ ;  $p$ -áp suất tĩnh,  $Pa$ ;  $F_R$ -lực ma sát,  $N$ ;  $E$ - thành phần năng lượng của lưu chất ( $E = \rho \cdot \bar{c}_v \cdot T + \frac{1}{2} F_R \cdot \rho \cdot u^2$ ),

$Kj/Kg$ ;  $c_v$ -nhiệt dung riêng đẳng tích,  $Kj/Kg$ ;  $T$ -nhiệt độ,  $K$ ;  $q_w$ -nhiệt lượng truyền cho vách,  $w/m^2$ .

Lực ma sát với vách có thể được xác định từ hệ số ma sát với vách là  $\lambda_f$  của đường ống có đường kính  $D$ :

$$\frac{F_R}{V} = \frac{\lambda_f}{2D} \cdot \rho \cdot u \cdot |u| \quad (4)$$

Sử dụng phương trình Reynold, dòng nhiệt truyền cho thành ống có thể tích từ lực ma sát và chênh lệch nhiệt độ giữa thành và dòng lưu chất là:

$$\frac{q_w}{V} = \frac{\lambda_f}{2D} \cdot \rho \cdot |u| \cdot c_p \cdot (T_w - T) \quad (5)$$

Lưu lượng của dòng lưu chất tại cửa vào và ra được tính toán từ các phương trình của dòng chảy qua khe hẹp đẳng Entropi có tính đến hệ số lưu lượng, được xác định ở trạng thái dòng ổn định. Lưu lượng khối lượng có thể nhận được từ phương trình năng lượng đối với dòng ổn định qua khe hẹp [6].

$$\frac{dm}{dt} = A_{eff} \cdot p_{in} \cdot \sqrt{\frac{2}{R_o \cdot T_{in}}} \cdot \psi \quad (6)$$

Trong đó:  $\frac{dm}{dt}$  - lưu lượng dòng lưu chất,  $g/s$ ;

$A_{eff}$  - diện tích tiết diện lưu thông,  $m^2$ ;  $p_{in}$  - áp suất trước cửa vào,  $Pa$ ;  $T_{in}$ -Nhiệt độ trước cửa vào,  $K$ ;  $R_o$  - hằng số chất khí,  $-$ ;  $\psi$  - hàm áp suất phụ thuộc vào tính chất của lưu chất và tỷ số áp suất;  $c_p$  - nhiệt dung riêng đẳng áp,  $Kj/Kg$ ;  $T_w$  - nhiệt độ thành ống,  $K$ ;  $T$  - nhiệt độ dòng lưu chất,  $K$ .

- Tốc độ phun nhiên liệu. Tốc độ phun nhiên liệu bị chi phối bởi nhiều yếu tố của hệ thống và vòi phun, trong đó nếu không xét đến yếu tố kết cấu, tính chất nhiên liệu thì áp suất phun có tính chất quyết định đến mức độ lớn nhỏ của lượng nhiên liệu ra khỏi vòi phun. Ngoài ra, thông số có ảnh hưởng trực tiếp đến tốc độ phun nhiên liệu có thể phân thành hai nhóm [7]:

+ Thông số dòng chảy bên ngoài (khối lượng riêng, số Weber) kiểm soát sự tương tác giữa tia phun nhiên liệu lỏng và môi trường (áp suất trong xy lạnh):

$$\text{Số Weber pha lỏng: } w_{el} = \frac{v_1^2 d_{hole} \rho}{\sigma} \quad (7)$$

+ Các thông số dòng chảy bên trong (số Reynolds, tỷ số  $l_{hole}/d_{hole}$ , các hệ số Cd) kiểm soát sự tương tác giữa tia phun nhiên liệu lỏng với vòi phun:

$$\text{Số Reynolds pha lỏng: } R_{el} = \frac{v_1 d_{hole} \rho}{\mu} \quad (8)$$

$$v_1 = n(p_{in} - p_{out}) \cdot \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{Cd_{nsh}^2 \cdot A_{nsh}^2} + \frac{1}{Cd_{hole}^2 \cdot A_{hole}^2}} \cdot \frac{2}{\rho} |\Delta p|} \quad (9)$$

$$\dot{m}_{inj} = A_{hole} \cdot v_1 \cdot \rho \quad (10)$$

Trong đó:  $\Delta p = p_{in} - p_{out}$ , độ chênh áp, Pa;  $v_1$  - tốc độ phun,  $m^3 \cdot s^{-1}$ ;  $Cd_{hole}$  - hệ số lưu lượng dòng chảy trong lỗ phun;  $A_{nsh}$  - diện tích khu vực dòng chảy hẹp nhất trước các lỗ phun,  $m^2$ ;  $Cd_{nsh}$  - hệ số xả dòng chảy trong khu vực trước lỗ phun;  $A_{hole}$  - diện tích mặt cắt ngang của các lỗ phun,  $m^2$ ;  $p_{in}$ ,  $p_{out}$  - áp suất đầu vào và đầu ra, Pa;  $n$  - tốc độ động cơ, vòng/phút;  $\dot{m}$  - lưu lượng phun nhiên liệu, g/h;  $l_{hole}$  - chiều dài lỗ phun, m;  $d_{hole}$  - đường kính lỗ phun, m;  $\mu$  - độ nhớt nhiên liệu,  $mm^2/s$ .

- Tính toán góc nón của tia phun:

$$\alpha = 0,03824 \cdot \frac{d_{hole} \cdot \rho_G^{0,1} \cdot \Delta p^{0,35}}{l_{hole}^{0,3} \cdot \rho^{0,45} \cdot \mu^{0,7}} \quad (11)$$

- Tính toán độ xuyên sâu của tia phun:

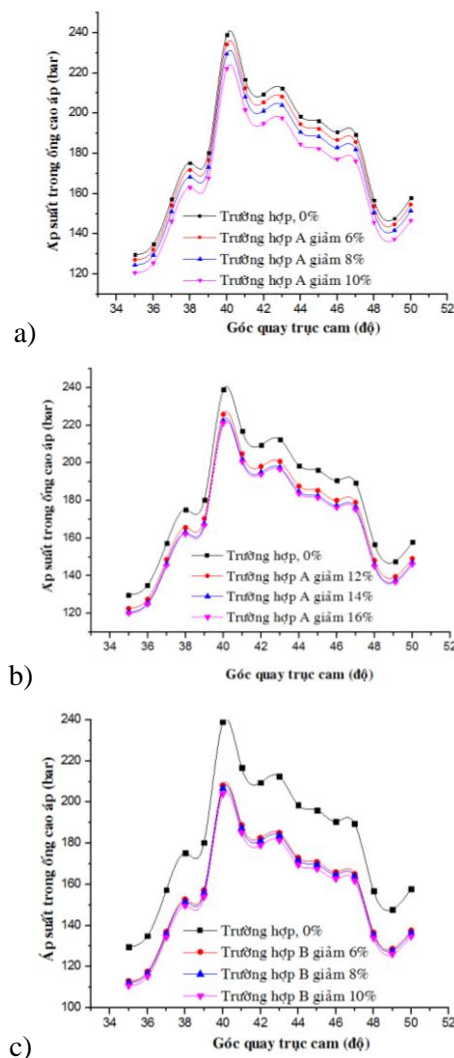
$$S = 0,39 \cdot t \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho_D} \cdot \Delta p} \quad (12)$$

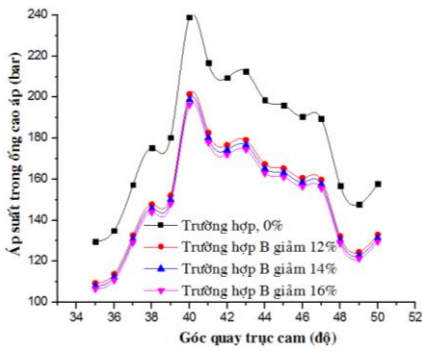
Trong đó:  $t$  - thời gian tính từ khi bắt đầu phun nhiên liệu, s;  $S$  - độ xuyên sâu tia phun, m;  $\rho_D$  - khối lượng riêng của hạt nhiên liệu,  $kg \cdot m^{-3}$ ;  $\alpha$  - góc nón tia phun, độ;  $\rho_G$  - khối lượng riêng của khí,  $kg \cdot m^{-3}$ .

### 3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

#### 3.1 Ảnh hưởng của các sai lệch (hư hỏng) đến các thông số phun nhiên liệu

Với các giả thiết thay đổi khi mô phỏng như trong bảng 2, ảnh hưởng của các sai lệch (hư hỏng, mòn) đến các thông số phun (áp suất trên đường ống cao áp, hành trình nâng kim phun) trình bày trên hình 2. Trong đó, ảnh hưởng của mòn cam (trường hợp B) làm giảm áp suất trong ống cao áp lớn hơn so với các sai lệch của trường hợp A. Áp suất trong ống cao áp giảm đến khoảng 10% khi A giảm đến 16%, ở trường hợp khi B giảm đến 16% thì diễn biến áp suất trong ống cao áp giảm khoảng 18%.

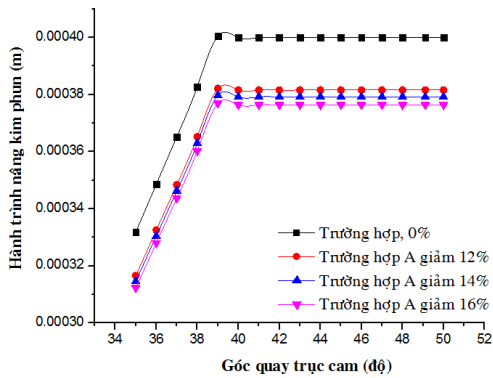




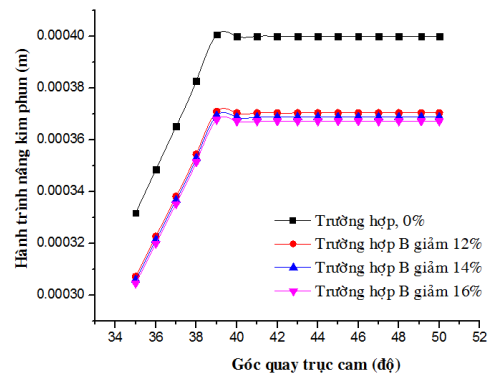
d)

**Hình 2.** Ảnh hưởng của các hư hỏng đến áp suất trong ống cao áp

Tương tự như trên, hành trình nâng kim phun phụ thuộc vào áp suất trong ống cao áp và càng bị hạn chế ở trường hợp cam mòn (trường hợp B). Hành trình nâng kim phun giảm 5% khi trường hợp A giảm đến 16% và giảm khoảng 9% khi trường hợp B giảm đến 16% như trình bày trên hình 3. Các yếu tố này trực tiếp làm giảm cấu trúc tia phun nhiên liệu vào xy lanh.



a)

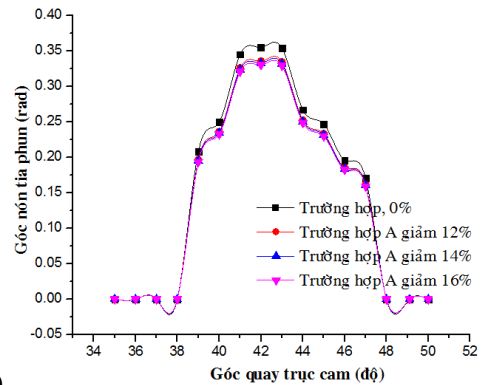


b)

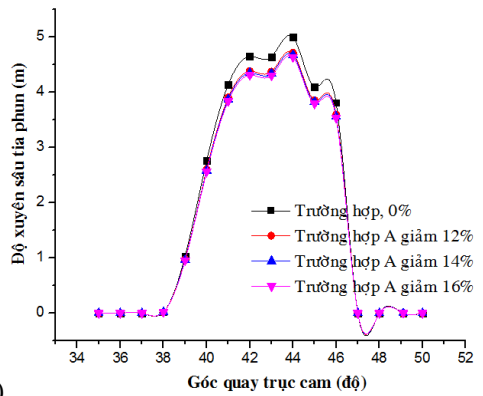
**Hình 3.** Ảnh hưởng của các hư hỏng đến hành trình nâng kim phun

**3.2 Ảnh hưởng của các sai lệch (hư hỏng) đến cấu trúc tia phun**

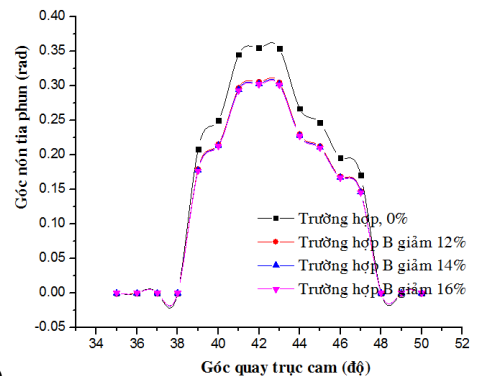
Hai thông số quan trọng của cấu trúc tia phun là độ xuyên sâu  $s$  và góc nón tia phun  $\theta$ , các thông số này phụ thuộc vào áp suất trên đường ống cao áp. Khi áp suất trên đường ống cao áp giảm (các sai lệch, hư hỏng của bơm cao áp gia tăng) sẽ làm hạn chế hành trình nâng kim phun, khiến suy giảm các thông số cấu trúc tia phun, dẫn đến giảm độ đồng đều của hỗn hợp không khí – nhiên liệu. Hình 4 thể hiện ảnh hưởng của hư hỏng và hao mòn các trường hợp đến cấu trúc tia phun. Khi A giảm đến 16%,  $s$  và  $\theta$  của tia phun giảm khoảng 7%. Khi B giảm từ 12÷14% thì độ xuyên sâu tia phun giảm khoảng 12,7%, góc nón giảm đến 14,6%.



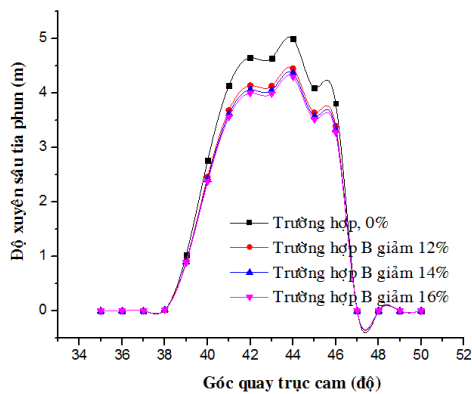
a)



b)



c)



d)

**Hình 4.** Ảnh hưởng của các hư hỏng đến cấu trúc tia phun

#### 4. KẾT LUẬN VÀ KHUYẾN NGHỊ

Từ kết quả mô phỏng trên cho thấy, mức độ ảnh hưởng của sự rò rỉ, lò xo..., hao mòn

piston bơm cao áp (A) và sự mòn cam (B) đều khiến áp suất trong ống cao áp giảm.

Khi áp suất trong ống cao áp giảm 12÷14% thì cấu trúc tia phun suy giảm đáng kể đến 14,6%, làm cho quá trình hình thành hỗn hợp cháy kém hiệu quả. Do vậy, có thể đo áp suất trên đường ống cao áp trong khi động cơ làm việc và đối chiếu với tiêu chuẩn của nhà sản xuất hoặc đối chiếu với giá trị ban đầu của hệ thống nhiên liệu động cơ khi bảo dưỡng (sửa chữa) trước thời điểm đưa xuống tàu, để chẩn đoán tình trạng kỹ thuật hệ thống phun là rất cần thiết, vì động cơ máy chính tàu cá đa phần sau chuyển làm việc dài ngày trên biển đều phải kiểm tra, bảo dưỡng.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Carsten Baumgarten, *Mixture Formation in Internal Combustion Engines*, pp. 57-71, Springer - Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [2] Kazimierz Lejda and Pawel Woschi, *Internal Combustion Engines*, pp. 32-45, Intech chapters published, 2012.
- [3] Kazimierz Lejda, *Fuel Injection in Automotive Engineering*, pp. 126-131, Intech chapters published, 2012.
- [4] Lukasz Grabowski, *AVL Simulation Tools Practical Applications*, pp. 78-86, Politechnika Lubelska Graz – Lublin, 2012.
- [5] Hồ Đức Tuấn, Trần Thanh Hải Tùng, Mai Đức Nghĩa, *Tạp chí Cơ khí Việt Nam*, số 7, trang 14-19, 2019.
- [6] Stasys Slavinskas G.L and Irena Kanapkiene, *Numerical model of common rail electromagnetic fuel injector*, pp. 63-68, Engineering for Rural Development, 2016.
- [7] K.Mollenhauer and H.Tschoeke, *Handbook of Diesel Engines*, pp. 216-260, Springer - Verlag Berlin Heidelberg, 2010.

#### Tác giả chịu trách nhiệm bài viết:

1. Hồ Đức Tuấn

Trường Đại học Nha Trang

Email: tuanhd@ntu.edu.vn

2. Mai Đức Nghĩa

Trường Sĩ quan Không quân

Email: nghiamaiduc@gmail.com