

# Nghiên cứu và đánh giá ảnh hưởng của cấu trúc ống thu hồi nhiệt khí thải đến hiệu quả tận dụng nhiệt trong hệ thống chưng cất nước ngọt từ nước biển

Study and Evaluation of the Effect of Exhaust Heat Recovery Tube Structure on the Efficiency of Heat Recovery in a Sea Water to Fresh Water Distillation System

**Khổng Vũ Quảng<sup>1\*</sup>, Nguyễn Duy Tiến<sup>1\*</sup>, Vũ Minh Diễn<sup>1,2</sup>, Nguyễn Thế Trục<sup>1</sup>, Lê Mạnh Tới<sup>1</sup>, Lê Đăng Duy<sup>1</sup>, Hồ Văn Đàm<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Trường Đại học Bách khoa Hà Nội - Số 1, Đại Cồ Việt, Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

<sup>2</sup>Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội - Đường Cầu Diễn, Minh Khai, Bắc Từ Liêm, Hà Nội, Việt Nam

<sup>3</sup>Trường CD nghề KTCN Việt Nam - Hàn Quốc - Hồ Tông Thốc, Nghi Phan, TP. Vinh, Nghệ An, Việt Nam

Đến Tòa soạn: 18-11-2019; chấp nhận đăng: 25-9-2020

## Tóm tắt

Năng lượng nói chung hay nhiên liệu nói riêng là yếu tố quan trọng, quyết định tới sự phát triển của các quốc gia trên thế giới. Tuy nhiên, nguồn nhiên liệu dầu mỏ - nhiên liệu phổ biến nhất, được dự báo sẽ cạn kiệt trong tương lai gần. Vì vậy, quản lý và nâng cao hiệu quả sử dụng năng lượng đang là một trong những thách thức lớn nhất hiện nay. Trong Động cơ đốt trong, tận dụng các nguồn nhiệt thải (từ nước làm mát, khí thải) là một trong những giải pháp đơn giản nhưng mang lại hiệu quả cao trong việc cải thiện hiệu suất sử dụng nhiệt của động cơ. Bài báo này sẽ trình bày các kết quả nghiên cứu mô phỏng thông qua phần mềm Ansys Fluent nhằm tối ưu hóa kết cấu ống thu hồi nhiệt khí thải trong hệ thống tận dụng năng lượng nhiệt khí thải và nước làm mát để chưng cất nước ngọt từ nước biển. Kết quả cho thấy diện tích và hệ số trao đổi nhiệt là hai thông số quan trọng, ảnh hưởng trực tiếp tới hiệu suất thu hồi. Với kết cấu hợp lý, hiệu suất thu hồi nhiệt khí thải có thể đạt tới 10,44%, như vậy hiệu suất sử dụng nhiệt của động cơ có thể tăng từ 32,09% lên tới 42,53%. Ngoài ra, việc dự báo hiệu suất thu hồi sẽ là cơ sở quan trọng trong các nghiên cứu tiếp theo nhằm xác định các thông số kỹ thuật khác của các chi tiết trong hệ thống chưng cất nước ngọt từ nước biển.

Từ khóa: Nhiệt khí thải, tận dụng nhiệt thải, hiệu suất nhiệt

## Abstract

Energy and fuel are the most important factors affecting the progression of countries worldwide. However, fossil fuel reserves were forecasted to be exhausted in the near future. Therefore, managing and improving energy usage efficiency has been a major challenge. Regarding the internal combustion engine, utilizing waste heat sources (from coolant, exhaust gas) is a simple solution and an effective method in improving engine heat efficiency. This paper will demonstrate the simulation research results by Ansys Fluent Program to optimize the structure of the exhaust heat recovery tube in the system of utilizing exhaust and coolant heat to distill fresh water from seawater. The outcomes show that the heat exchange area and heat transfer coefficient are two important parameters, which directly affect the heat recovery efficiency. With a reasonable structure, the exhaust heat recovery efficiency can archive 10.44%, thus heat usage efficiency of the internal combustion engine can increase from 32.09% to a peak of 42.53%. In addition, predicting heat recovery efficiency will be a fundamental base of upcoming researches to determine other specifications of the seawater to the freshwater distillation system.

Keywords: Exhaust heat, utilizing waste heat, thermal efficiency

## 1. Đặt vấn đề

Hiện nay, Động cơ đốt trong (ĐCĐT) vẫn đang là nguồn động lực chính trong các lĩnh vực giao thông vận tải, nông - lâm - ngư nghiệp. Tăng công suất, giảm tiêu thụ nhiên liệu và phát thải độc hại luôn là những mục tiêu chính trong quá trình nghiên cứu phát triển ĐCĐT. Để đạt được các mục tiêu nêu trên, hàng loạt

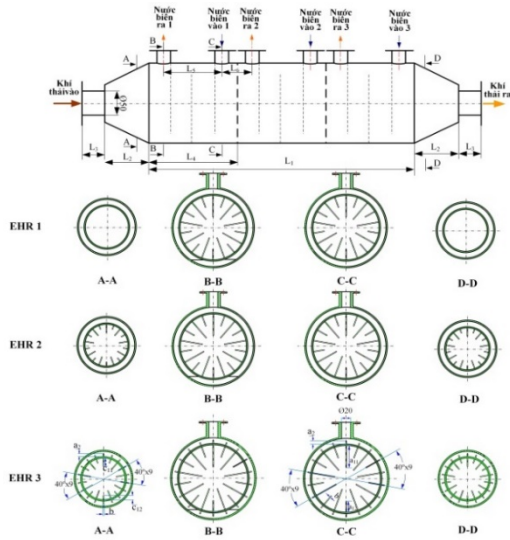
các công nghệ hiện đại và thân thiện môi trường đã và đang được áp dụng như: cơ cấu phân phối khí thông minh VVT-i (Variable Valve Timing intelligence); hệ thống nhiên liệu điện tử EFI (Electronic Fuel Injection), DFI (Direct Fuel Injection), Common rail; các phương pháp hình thành hỗn hợp mới HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition), PCCI (Premixed Charge Compression Ignition), RCCI

\* Địa chỉ liên hệ: Tel.: (+84) 989787410

Email: tien.nguyenduy@hust.edu.vn



ống và khí thải. Trong bài báo này, nhóm nghiên cứu tiến hành mô phỏng đối chứng với ba trường hợp nhằm lựa chọn kết cấu phù hợp. Trong đó, trường hợp 1 (EHR 1) chỉ có các cánh tiếp xúc với khí thải được bố trí dọc theo thân ống; Trường hợp 2 (EHR 2) kết cấu ống như trường hợp 1, tuy nhiên có bố trí thêm các cánh trao đổi nhiệt ở hai đầu côn; Trường hợp 3 (EHR 3) được cải tiến từ trường hợp 2 khi bổ sung thêm các cánh trao đổi nhiệt trong các khoang tiếp xúc với nước biển ( $a_2$ ).



Hình 2. Kết cấu EHR với 3 trường hợp khác nhau

### 3. Phương pháp nghiên cứu

#### 3.1. Đối tượng thử nghiệm

Động cơ diesel D243 được chọn làm đối tượng nghiên cứu, đây là động cơ đang được sử dụng phổ biến trong nhiều lĩnh vực khác nhau như phương tiện giao thông đường bộ, tàu sông, máy nông nghiệp tại Việt Nam. Các thông số kỹ thuật của động cơ được thể hiện trong bảng 1.

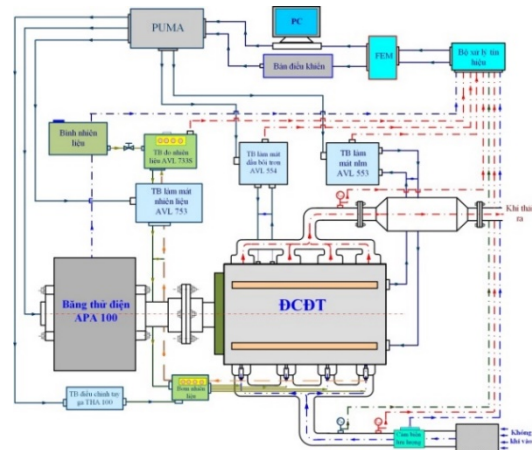
Bảng 1. Thông số kỹ thuật của động cơ D243

Các thông số	Giá trị
Loại động cơ	Diesel, 4 kỳ, không tăng áp
Thể tích công tác	4,75 L
Đường kính x hành trình piston	110mm x 125mm
Tỷ số nén	16,7
Tốc độ định mức	2200 v/ph
Công suất cực đại	56 kW/2200 v/ph
Mômen cực đại	286 Nm/1500 v/ph

#### 3.2. Xác định điều kiện biên của mô hình

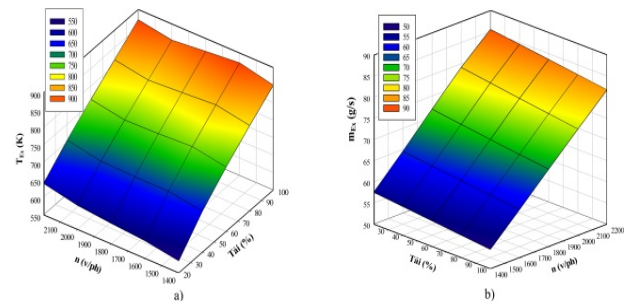
Các thông số điều kiện biên, đầu vào của mô hình mô phỏng trên Ansys Fluent, như nhiệt độ và lưu lượng khí thải được xác định bằng thực nghiệm trên băng thử

động lực học cao tại trung tâm nghiên cứu động cơ, nhiên liệu và khí thải, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội. Sơ đồ hệ thống thử nghiệm được thể hiện như trên hình 3. Trong đó, động cơ được lắp đặt trên băng thử điện AVL APA 100 với các thông số cơ bản của băng thử: công suất cực đại 220 mã lực; mô-men xoắn lớn nhất 934 Nm trong dải tốc độ 0÷8000 v/ph. Thiết bị đo tiêu thụ nhiên liệu AVL Fuel Balance 733S, hoạt động theo nguyên lý trọng lực, dải đo 0÷150 kg/h với độ chính xác 0,01%. Ngoài ra, băng thử còn được trang bị các thiết bị phụ trợ nhằm giúp ĐCĐT hoạt động ổn định như thiết bị làm mát dầu bôi trơn AVL 554, thiết bị điều chỉnh và ổn định nhiệt độ nước làm mát AVL 553, thiết bị điều chỉnh tay ga THA 100.



Hình 3. Sơ đồ thử nghiệm xác định các thông số điều kiện biên của mô hình

Ngoài ra, nhiệt độ khí thải ( $T_{Ex}$ ) được xác định bằng cảm biến loại K (dải đo 0÷800°C), lưu lượng khí thải  $m_{Ex}$  được xác định thông qua lượng nhiên liệu tiêu thụ và lưu lượng khí nạp theo định luật bảo toàn khối lượng. Trong đó, lưu lượng khí nạp được xác định bởi thiết bị ABB Sensyflow 14241-5-7962633 (Mass Flow Meter) với dải đo 0 ÷ 720 kg/giờ. Các thông số điều kiện biên được xác định trong miền làm việc phổ biến của ĐCĐT với dải tốc độ 1400÷2200 v/ph, bước tốc độ 200 v/ph; tải trọng 20÷100, bước tải 20%. Các kết quả được thể hiện trên hình 4.



Hình 4. Điều kiện biên của mô hình mô phỏng trong Ansys Fluent. a) Nhiệt độ khí thải  $T_{Ex}$ ; b) Lưu lượng khí thải  $m_{Ex}$

**4. Mô hình hóa và mô phỏng EHR trên Ansys Fluent**

**4.1. Cơ sở lý thuyết Ansys Fluent**

Ansys Fluent là phần mềm có khả năng mô hình hóa các dòng chảy nén được và không nén được, dòng chảy tầng, chảy rối. Trong nghiên cứu này, mô hình mô phỏng về dòng chảy và truyền nhiệt được thực hiện dựa trên một số giả thiết sau đây [10]:

- (1) Môi chất là chất lỏng nhớt (độ nhớt phụ thuộc vào nhiệt độ và áp suất)
- (2) Dòng chảy là dòng ổn định
- (3) Xét tới ảnh hưởng của trọng lực
- (4) Môi chất ở đầu vào và ra là chất lỏng đồng nhất
- (5) Sử dụng mô hình rối  $k-\epsilon$  tiêu chuẩn

Quá trình tính toán được dựa trên nền tảng là hệ các phương trình:

- (6) Phương trình bảo toàn khối lượng:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

- (7) Phương trình bảo toàn động lượng:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_i}(\mu \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) - \frac{\partial p}{\partial x_j} \tag{2}$$

- (8) Phương trình bảo toàn năng lượng:

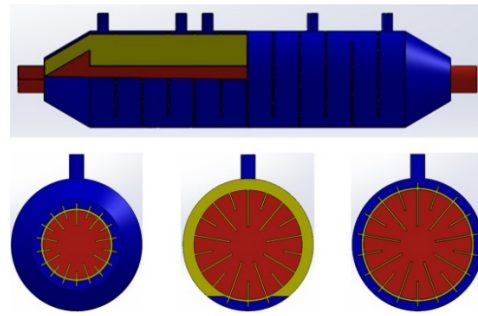
$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i}(\frac{k}{C_p} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) \tag{3}$$

**4.2. Mô hình hóa**

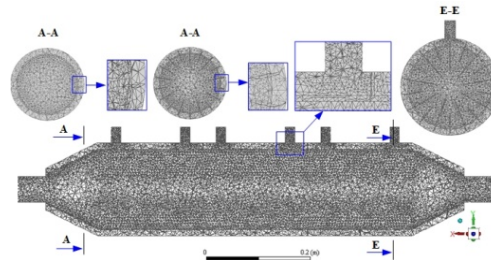
Các thông số kết cấu của EHR được thể hiện trong bảng 2. Từ các thông số này tiến hành xây dựng bản vẽ thiết kế trên phần mềm Solidwork (hình 5) trước khi đưa vào Ansys Fluent để chia lưới (hình 6). Trong quá trình chia lưới, phân mô hình khí thải, nước biển và cánh tản nhiệt được phân thành các vùng để chia lưới với mật độ khác nhau nhằm giảm thời gian tính toán trong quá trình mô phỏng nhưng kết quả vẫn đảm bảo độ tin cậy.

**Bảng 2.** Thông số kết cấu chung của EHR

Các thông số	Giá trị
Tổng chiều dài	900 mm
Độ dày của ống	3 mm
Góc côn	63°
Độ dày của các cánh	3 mm
Số cánh: $a_{11}; a_{12}; a_2$	9; 9; 18
Chiều cao các cánh: $a_{11}; a_{12}; a_2$	50; 25; 7 mm
Đường kính đầu vào và ra của khí thải	50 mm
Đường kính đầu vào ra của nước biển	20 mm



**Hình 5.** Mặt cắt 1/4 mô hình 3D của EHR 3

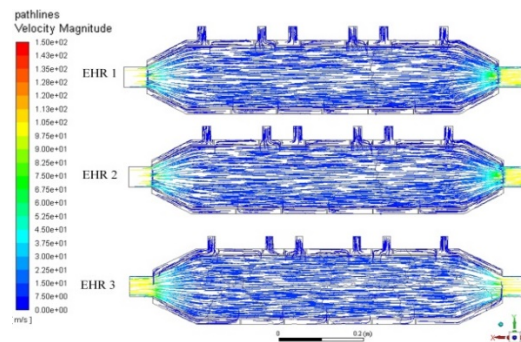


**Hình 6.** Mô hình chia lưới của EHR 3

**5. Kết quả và thảo luận**

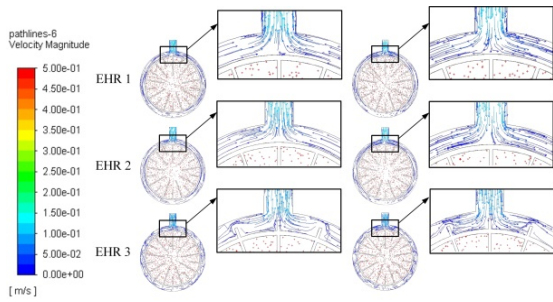
**5.1. Ảnh hưởng của kết cấu EHR đến khả năng thu hồi nhiệt khí thải ở chế độ định mức**

Phân bố vận tốc dòng khí thải và nước biển lưu động trong EHR ứng với 3 trường hợp được thể hiện trên hình 7 và hình 8. Trong đó, hình 7 thể hiện phân bố vận tốc theo chiều ngang, hình 8 thể hiện phân bố vận tốc theo chiều dọc của ống. Kết quả cho thấy, trong cả 3 trường hợp tốc độ dòng khí thải lưu động trong EHR là khá tương đồng, vận tốc tại cửa vào và cửa ra lớn hơn so với các vị trí bên trong ống, hiện tượng này là do tiết diện tại các vị trí này nhỏ hơn so với tiết diện ống, tại các vị trí còn lại thì phân bố vận tốc khí thải tương đối đều.

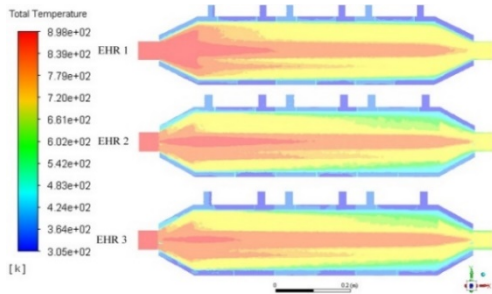


**Hình 7.** Phân bố vận tốc của khí thải và nước biển dọc theo chiều ngang của ống trong 3 trường hợp khi ĐCĐT làm việc ở 100% tải và 2200 v/ph

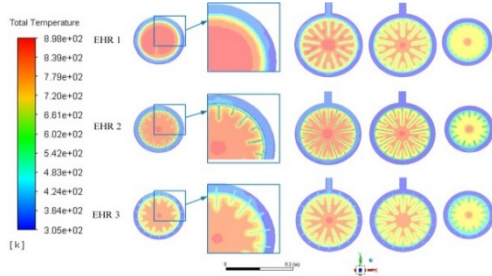




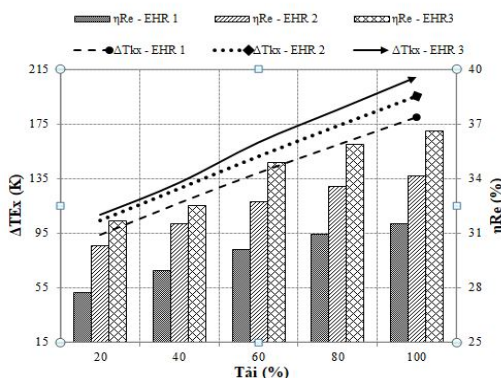
**Hình 8.** Phân bố vận tốc của khí thải và nước biển theo chiều dọc của ống trong 3 trường hợp khi ĐCĐT làm việc ở 100% tải và 2200 v/ph



**Hình 9.** Phân bố nhiệt độ của khí thải và nước biển dọc theo chiều ngang của EHR trong 3 trường hợp khi ĐCĐT làm việc ở 100% tải và 2200 v/ph



**Hình 10.** Phân bố nhiệt độ của khí thải và nước biển theo chiều dọc của EHR trong 3 trường hợp khi ĐCĐT làm việc ở 100% tải và 2200 v/ph



**Hình 11.** Hiệu suất thu hồi nhiệt và độ giảm nhiệt độ của khí thải trong 3 trường hợp khi ĐCĐT làm việc tại 100% tải, tốc độ 2200 v/ph

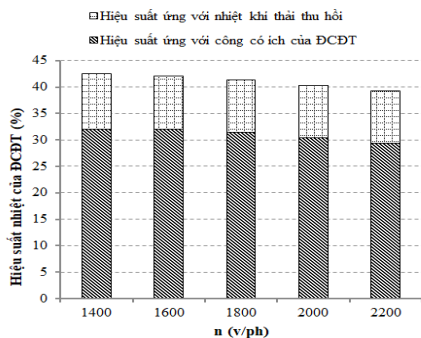
Phân bố vận tốc nước biển tại các khoang trao đổi nhiệt trong 3 trường hợp có sự khác biệt đáng kể. Đối với trường hợp không có cánh trao đổi nhiệt tiếp xúc nước biển (EHR 1 và EHR 2) thì phân bố vận tốc trong các khoang tương đối giống nhau, nước biển lưu động chủ yếu theo phương hướng kính như thể hiện trên hình 8. Trường hợp EHR 3 (có cánh trao đổi nhiệt tiếp xúc với nước biển) thì ngoài các hiện tượng xảy ra tương tự như 2 trường hợp trên, dòng nước biển còn bị tác động do hiệu ứng tạo rối khi chuyển động qua các cánh trao đổi nhiệt như thể hiện qua các tiết diện cắt trên hình 8.

Hình 9 và hình 10 thể hiện phân bố nhiệt độ khí thải và nước biển trong EHR trong 3 trường hợp. Kết quả cho thấy, trong cả 3 trường hợp nhiệt độ khí thải và nhiệt độ nước biển phân bố tương đối giống nhau, nhiệt độ khí thải có xu hướng giảm dần dọc theo chiều dài EHR như thể hiện trên hình 8 và tại các vị trí gần tâm EHR, cách xa cánh trao đổi nhiệt tiếp xúc khí thải, thì nhiệt độ khí thải luôn lớn hơn các vị trí còn lại (hình 10). Trong khi đó, nhiệt độ nước biển có xu hướng tăng dần từ cửa vào đến cửa ra trong mỗi khoang trao đổi nhiệt, chỉ tiết như thể hiện tại các tiết diện trên hình 10. Tuy nhiên, trong trường hợp EHR 1 thì nhiệt lượng của khí thải (phần diện tích màu đỏ tại tiết diện A-A) còn khá lớn, nhưng khi có thêm các cánh trao đổi nhiệt tiếp xúc với khí thải ở 2 đầu côn (tiết diện A-A của EHR 2) thì nhiệt lượng khí thải đã giảm đi khá nhiều (phần diện tích màu đỏ bị thu hẹp). Trường hợp EHR 3, khi có thêm các cánh trao đổi nhiệt tiếp xúc với nước biển thì nhiệt độ khí thải giảm đi khá rõ rệt như thể hiện tại các tiết diện A-A, B-B, C-C, D-D.

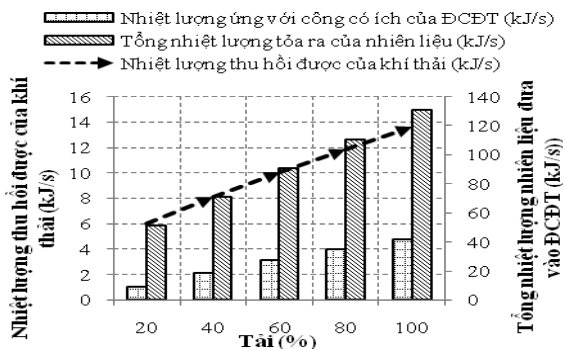
Độ giảm nhiệt độ khí thải ( $\Delta T_{Ex}$ ) và hiệu suất thu hồi nhiệt khí thải;  $\eta_{Re}$  (nhiệt lượng khí thải thu hồi được của EHR/nhiệt lượng khí thải của ĐCĐT thải ra môi trường) trong 3 trường hợp được thể hiện trên hình 11. Kết quả cho thấy, trong cả 3 trường hợp  $\Delta T_{Ex}$  và  $\eta_{Re}$  đều tăng khi tải ĐCĐT tăng. Tuy nhiên trong trường hợp EHR 3,  $\Delta T_{Ex}$  và  $\eta_{Re}$  cao hơn so với trường hợp EHR 1 và EHR 2. Điều này có thể do ở trường hợp EHR 3, diện tích trao đổi nhiệt giữa thành vách và nước biển tăng do bổ sung các cánh trao đổi nhiệt tiếp xúc với nước biển và hệ số trao đổi nhiệt được cải thiện do tăng chuyển động rối trong ống dẫn tới nhiệt lượng khí thải truyền cho nước biển sẽ lớn hơn so với 2 trường hợp còn lại. Cụ thể, trường hợp EHR 1 có  $\Delta T_{Ex} = 180$  K và  $\eta_{Re} = 31,48\%$ ; trường hợp EHR 2 có  $\Delta T_{Ex} = 195$  K và  $\eta_{Re} = 34,11\%$ ; trường hợp EHR 3 có  $\Delta T_{Ex} = 209$  K và  $\eta_{Re} = 36,59\%$  khi ĐCĐT làm việc tại chế độ 100% tải, tốc độ 2200 v/ph. Như vậy có thể thấy, khi bố trí thêm cánh trao đổi nhiệt tại 2 đầu côn và cánh trao đổi nhiệt tiếp xúc với nước biển thì  $\eta_{Re}$  sẽ tăng lên đáng kể. Vì vậy, trong nội dung nghiên cứu tiếp theo khi đánh giá ảnh hưởng của chế độ làm việc trong động cơ đến  $\eta_{Re}$  nhóm nghiên cứu sẽ chỉ khảo sát trường hợp EHR 3.

**5.2. Ảnh hưởng của chế độ làm việc đến khả năng thu hồi nhiệt khí thải**

Hình 12 thể hiện hiệu suất sử dụng nhiệt của ĐCĐT ( $\eta_{DCDT}$ ) khi có và không trang bị thiết bị EHR. Kết quả cho thấy ở vùng tốc độ thấp thì  $\eta_{re}$  (nhiệt lượng khí thải thu hồi được bởi EHR/tổng nhiệt lượng nhiên liệu được đưa vào ĐCĐT) lên tới 10,44%. Do đó  $\eta_{DCDT}$  kết hợp EHR được cải thiện đáng kể (lên đến 42,53% so với 32,09% khi chỉ có ĐCĐT). Kết quả này có thể do khi ĐCĐT làm việc ở vùng tốc độ thấp dẫn đến tốc độ lưu động của dòng khí thải thấp hơn, do đó làm tăng thời gian trao đổi nhiệt giữa khí thải và nước biển, dẫn tới nhiệt lượng truyền từ khí thải qua thành ống tăng.



**Hình 12.** Hiệu suất sử dụng nhiệt của ĐCĐT khi có và không trang bị EHR tại đường đặc tính ngoài



**Hình 13.** Nhiệt lượng thu hồi từ khí thải của ĐCĐT tại đặc tính tải, tốc độ 1400 v/ph

Hình 13 thể hiện nhiệt lượng thu hồi từ khí thải của ĐCĐT tại đường đặc tính tải, tốc độ 1400 v/ph. Kết quả cho thấy, nhiệt lượng thu hồi từ khí thải ( $Q_{re}$ ) tăng tỷ lệ với tải trọng của động cơ và đạt giá trị cao nhất là 13,67 (kJ/s) tại 100% tải.

**6. Kết luận**

Trên cơ sở các kết quả được trình bày và thảo luận ở trên có thể đưa ra một số kết luận sau:

+ Bố trí cánh trao đổi nhiệt trong ống thu hồi nhiệt khí thải là thông số quan trọng ảnh hưởng lớn tới hiệu suất thu hồi nhiệt khí thải, với kết cấu ống thu hồi có thêm các cánh trao đổi nhiệt tiếp xúc với nước biển thì

hiệu suất thu hồi nhiệt khí thải sẽ cho kết quả tốt nhất.

+  $\eta_{re}$  còn phụ thuộc nhiều vào chế độ làm việc của ĐCĐT. Cụ thể,  $\eta_{re}$  tỷ lệ thuận với tải và tỷ lệ nghịch với tốc độ động cơ. Với EHR có thêm các cánh trao đổi nhiệt tiếp xúc với nước biển,  $\eta_{re}$  có thể đạt tới 10,44%. Vì vậy, hiệu suất sử dụng nhiệt của động cơ khi trang bị thêm thiết bị tận dụng được cải thiện đáng kể (từ 32,09% lên tới 42,53% tại chế độ 100% tải, tốc độ 1400 v/ph).

+  $\eta_{re}$  và lượng nhiệt thu hồi của EHR trong trường hợp EHR 3 sẽ là tham số cơ sở để nhóm nghiên cứu tính toán các thông số kết cấu của các thiết bị khác trong hệ thống.

**Tài liệu tham khảo**

- [1] Jianbing Gao et al, An analysis of energy flow in a turbocharged diesel engine of a heavy truck and potentials of improving fuel economy and reducing exhaust emissions, Energy Conversion and Management 184 (2019) 456 – 465.
- [2] Yahui Zhang, et al, Combustion variation control strategy with thermal efficiency optimization for lean combustion in spark-ignition engines, Applied Energy, Vol 251, 1 October 2019, 113329.
- [3] Euijoon Shim, et al, Comparisons of advanced combustion technologies (HCCI, PCCI, and dualfuel PCCI) on engine performance and emission characteristics in a heavyduty diesel engine, Fuel, Vol 262, 15 February 2020, 116436.
- [4] J.S. Jadhao, D.G. Thombare, Review on Exhaust Gas Heat Recovery for I.C. Engine, International Journal of Engineering and Innovative Technology(IJEIT), Vol 2, Issue 12, June 2013.
- [5] Jianqin Fu, et al, A new approach for exhaust energy recovery of internal combustion engine: Steam turbocharging, Applied Thermal Engineering, Vol. 52, Issue 1, pp. 150-159, 2013.
- [6] Xing Niu, et al, Experimental study on low-temperature waste heat thermoelectric generator, Journal of Power Sources, Volume 188, Issue 2, pp. 621-626, 15 March 2009.
- [7] FU Jian-qin, et al, An approach for IC engine coolant energy recovery based on low temperature organic Rankine cycle, Journal of Central South University, Vol. 22, Issue 2, pp. 727-734, 2015.
- [8] Duc Luong Cao, et al, Chemical Heat Storage for Saving the Exhaust Gas Energy in a Spark Ignition Engine, Journal of Clean Energy Technologies, Vol. 6, No. 1, January 2018.
- [9] Sasakura Fresh Water Generator, Available: <http://www.sasakura.co.jp/products/water/117.html>. [Accessed: July, 2018].
- [10] Ansys Fluent Theory Guide, Available: <https://fr.scribd.com/document/342817281/ANSYS-Fluent-Theory-Guide>. [Accessed: August 2018]