



SIMULATION STUDY ON THE HEAT TRANSFER PROCESS OF UTILIZING WASTE EXHAUST GAS ENERGY OF INTERNAL COMBUSTION ENGINE USED FOR THERMOELECTRIC GENERATOR

Khong Vu Quang*, Dong Minh Hieu

Department of Vehicle and Energy Conversion Engineering, School of Mechanical Engineering, Hanoi University of Science and Technology, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 07/04/2023

Revised: 13/06/2023

Accepted: 14/06/2023

Published online: 15/06/2023

<https://doi.org/10.47869/tcsj.74.5.10>

* *Corresponding author*

Email: quang.khongvu@hust.edu.vn

Abstract. Thermoelectric Generator (TEG) are one of the potential solutions for utilizing waste exhaust gas energy from internal combustion engines due to their direct conversion of heat energy into electrical power. Previous research on utilizing heat with TEGs has shown that highly hot surface temperatures and large temperature differentials can have an impact on the efficiency and lifespan of the devices. In order to address this issue, TEGs are being combined with exhaust gas heat recovery systems. The current paper will simulate the heat transfer process of utilizing waste exhaust gas energy for TEGs used in power generation, by determining the hot and cold surface temperatures of the TEG using the Ansys Fluent software. The simulation results demonstrate that the recovered heat by the TEG module with 24 thermoelectric elements is 1420 W, with a temperature difference between the hot surfaces and the cold surfaces ranging from 50 °C to 100 °C.

Keywords: Thermoelectric generators, Exhaust heat recovery tank.



NGHIÊN CỨU MÔ PHỎNG QUÁ TRÌNH TRUYỀN NHIỆT CỦA THIẾT BỊ TẬN DỤNG NĂNG LƯỢNG NHIỆT KHÍ THẢI ĐỘNG CƠ ĐỐT TRONG SỬ DỤNG CHO MÁY PHÁT NHIỆT ĐIỆN

Khổng Vũ Quang*, Đồng Minh Hiếu

¹Khoa Cơ khí Động Lực, Trường Cơ Khí, Đại học Bách Khoa Hà Nội, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 07/04/2023

Ngày nhận bài sửa: 13/06/2023

Ngày chấp nhận đăng: 14/06/2023

Ngày xuất bản Online: 15/06/2023

<https://doi.org/10.47869/tcsj.74.5.10>

* Tác giả liên hệ

Email: quang.khongvu@hust.edu.vn

Tóm tắt. Máy phát điện nhiệt (TEG) là một trong những giải pháp tiềm năng để tận dụng năng lượng nhiệt khí thải của động cơ đốt trong vì khả năng chuyển đổi trực tiếp nhiệt năng thành điện năng. Các nghiên cứu tận dụng nhiệt bằng máy phát điện nhiệt có nhiệt độ mặt nóng cao và có độ chênh lệch nhiệt độ mặt nóng của TEG rất lớn gây ảnh hưởng tới hiệu suất và giảm tuổi thọ của thiết bị. Để giải quyết vấn đề trên, máy phát điện nhiệt sẽ được sử dụng kết hợp với kết thu hồi nhiệt khí thải. Bài báo này sẽ mô phỏng quá trình truyền nhiệt của thiết bị tận dụng năng lượng nhiệt khí thải sử dụng cho máy phát điện nhiệt để đưa ra nhiệt độ mặt nóng và mặt lạnh của TEG trên phần mềm Ansys fluent. Kết quả mô phỏng cho thấy, nhiệt lượng thu hồi được bởi ống TEG với 24 mô-đun nhiệt điện là 1420W và độ chênh lệch nhiệt độ mặt nóng và nhiệt độ mặt lạnh từ 50 °C đến 100 °C.

Từ khóa: Máy phát điện nhiệt, Kết thu hồi nhiệt khí thải

© 2023 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ngày nay, hiệu suất sử dụng nhiên liệu của động cơ đốt trong (ĐCĐT) đã được cải thiện đáng kể nhờ áp dụng nhiều công nghệ hiện đại như: điều khiển van biến thiên VVT (Variable Valve Timing) [1]; tỷ số nén thay đổi VCR (Variable Compression Ratio) [2]; hệ thống phun xăng trực tiếp GDI (Gasoline direct injection) [3]; cháy ở nhiệt độ thấp LTC (Low Temperature Combustion) [4]. Tuy nhiên, vẫn còn khoảng trên 50% năng lượng nhiên liệu bị mất cho khí thải (25÷35%) và nước làm mát (15÷25%). Trong đó, năng lượng nhiệt khí thải chiếm phần lớn, do vậy, tận dụng năng lượng nhiệt khí thải để sinh công được coi là giải pháp tiềm năng và hiệu quả trong việc tăng hiệu suất sử dụng năng lượng nhiên liệu của ĐCĐT. Hiện nay nhiều giải pháp công nghệ tận dụng năng lượng nhiệt khí thải đã được nghiên cứu và ứng dụng, như: Tăng áp khí nạp cho ĐCĐT bằng tuabin – máy nén [5]; sử dụng chu trình Rankine hữu cơ ORC (Organic Rankine Cycle) [6]; sử dụng vật liệu thay đổi pha PCM (Phase-Change Material) [7]; tận dụng nhiệt khí thải để chưng cất nước ngọt từ nước biển hoặc sấy hải sản [8].

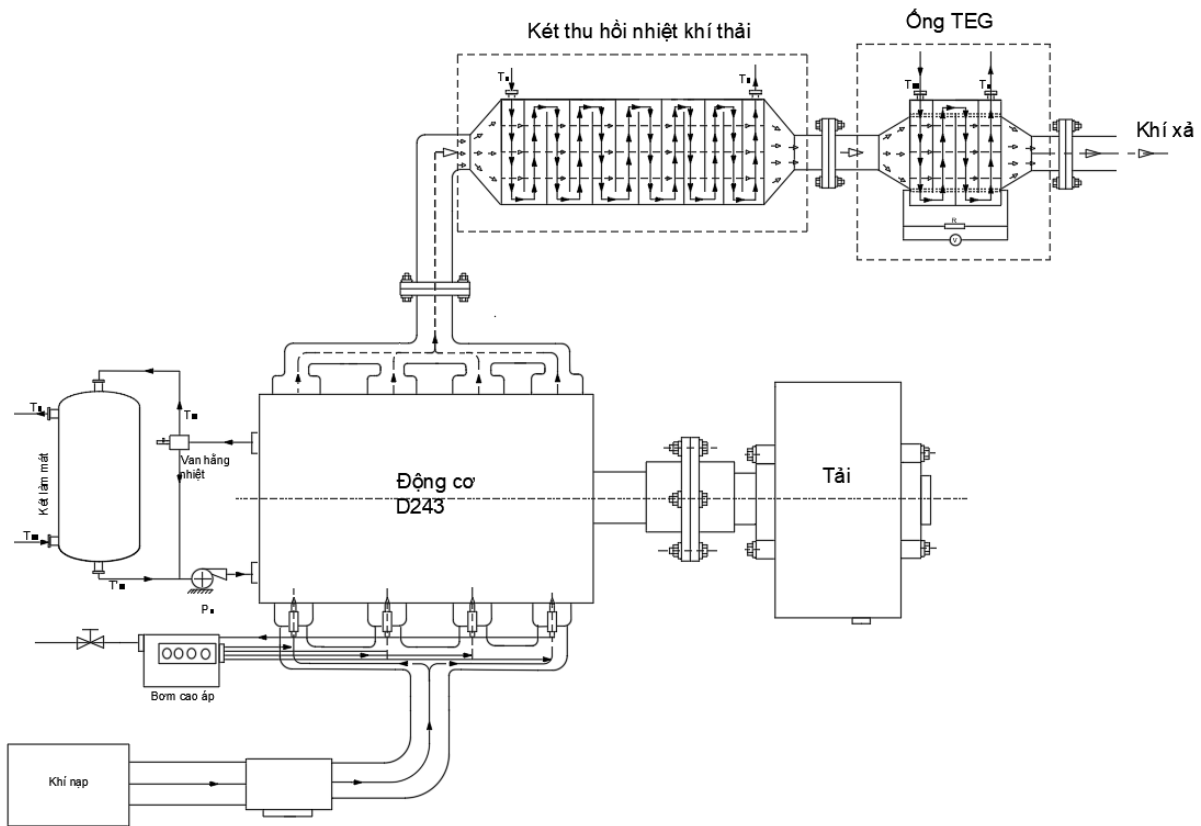
Ngoài các giải pháp trên, sử dụng máy phát điện nhiệt (TEG – Thermoelectric Generator) để chuyển đổi nhiệt khí thải thành điện là một giải pháp tiềm năng vì thực hiện chuyển đổi trực tiếp nhiệt năng thành điện năng, không có tiếng ồn và rung động. Chính vì vậy, nghiên cứu sử dụng TEG trên ĐCĐT để chuyển đổi nhiệt năng khí thải thành điện năng ngày càng trở nên phổ biến. Ví dụ như: Rui Quan và các cộng sự [9] đã nghiên cứu cải thiện hiệu suất đầu ra của máy phát nhiệt điện bằng cách tối ưu hóa cấu trúc bộ trao đổi nhiệt với thiết kế có sáu bề mặt truyền nhiệt được bao phủ bởi 30 TEM. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng khi tăng chiều dài vây, chiều rộng vây, góc giao nhau của vây sẽ giúp cải thiện khả năng truyền nhiệt và phát điện của hệ thống TEG và khi tăng khoảng cách giữa các vây khác nhau thì tính đồng nhất nhiệt độ và công suất tối đa của hệ thống sẽ bị giảm đi. Klein và cộng sự [10] đã thiết kế và xây dựng mô hình thực nghiệm sử dụng vật liệu thay đổi pha (PCM) kết hợp với máy phát nhiệt điện. Kết quả chỉ ra rằng khi nhiệt độ đầu vào thay đổi trong khoảng từ 420 đến 920 °C thì nhiệt độ mặt nóng của mô-đun nhiệt điện thay đổi trong khoảng 350÷410 °C và cũng chỉ ra rằng mô hình PCM-TEG có thể hiệu quả hơn 29% so với máy phát nhiệt điện thông thường. Yang và cộng sự [11] đã nghiên cứu mô hình máy phát nhiệt điện kết hợp với vật liệu chuyển pha phát triển từ ống dẫn nhiệt khí thải và TEG. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng độ chênh lệch nhiệt độ ở mặt nóng của TEG giảm từ 147,7 K xuống 18÷20 K, dao động điện áp đầu ra cũng giảm từ 3,69 V xuống 0,4÷0,5 V.

Đa phần các nghiên cứu tận dụng nhiệt bằng máy phát nhiệt điện đều làm việc với khí thải ở nhiệt độ mặt nóng cao và có độ chênh lệch nhiệt độ mặt nóng của TEG rất lớn gây ảnh hưởng tới hiệu suất và giảm tuổi thọ của thiết bị. Khi sử dụng kết hợp với các thiết bị trung gian khác sẽ làm ổn định được nhiệt độ của đầu vào TEG nhưng kết cấu trở nên phức tạp hơn và nhiệt qua thiết bị khác cũng không có thể thất thoát ra ngoài môi trường. Trong “Nghiên cứu đưa ra kết cấu kết thu hồi nhiệt khí thải mới có hiệu suất cao sử dụng trong hệ thống chưng cất nước ngọt từ nước biển” đã đưa ra nhiệt độ đầu ra của khí thải nằm trong khoảng 250 °C đến 300 °C có độ chênh lệch nhiệt độ nhỏ và phù hợp với nhiệt làm việc của TEG [12]. Chính vì vậy, kết thu hồi nhiệt khí thải được kết hợp với thiết bị tận dụng năng lượng nhiệt khí thải sử dụng cho máy phát nhiệt điện. Bài báo này sẽ tính toán thiết kế và mô phỏng quá trình truyền nhiệt của thiết bị tận dụng năng lượng nhiệt khí thải sử dụng cho máy phát nhiệt điện trên phần mềm Ansys Fluent.

2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH VÀ TÍNH TOÁN MÔ PHỎNG

2.1. Cơ sở xây dựng mô hình TEG kết hợp với kết thu hồi nhiệt

Kết quả “Nghiên cứu đưa ra kết cấu kết thu hồi nhiệt khí thải mới có hiệu suất cao sử dụng trong hệ thống chung cất nước ngọt từ nước biển” đã cho thấy, nhiệt độ khí thải sau khi qua kết thu hồi nhiệt nằm trong khoảng $250\text{ }^{\circ}\text{C} \div 300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Với nhiệt độ của khí thải sau khi ra khỏi kết thu hồi nhiệt phù hợp với nhiệt độ làm việc của các TEG phổ biến trên thị trường và độ chênh lệch nhiệt độ thấp thì kết thu hồi nhiệt khí thải sẽ phù hợp để kết hợp với thiết bị tận dụng năng lượng nhiệt để sinh điện. Như vậy, khí thải sau khi đi qua kết thu hồi nhiệt sẽ vào ống TEG để tiếp tục được tận dụng năng lượng nhiệt như hình 1.



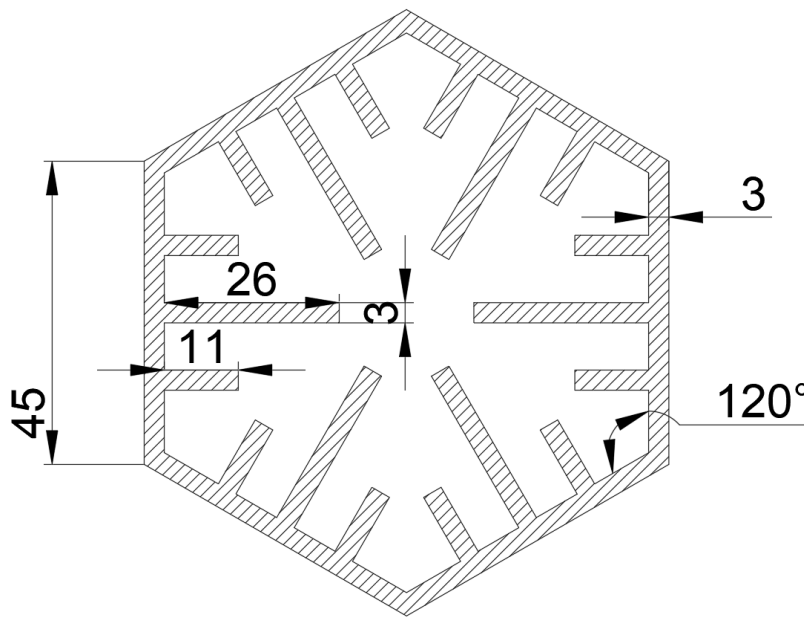
Hình 1. Sơ đồ bố trí kết thu hồi nhiệt kết hợp với TEG trong hệ thống chung cất nước ngọt từ nước biển.

2.2. Cơ sở thiết kế kết cấu thiết bị tận dụng năng lượng nhiệt khí thải sử dụng TEG

Đã có nhiều kết cấu thu hồi nhiệt khí thải ĐCĐT dùng cho TEG được đưa ra, kết cấu dòng khí thải và nước làm mát xen kẽ nhau có thể giúp thu hồi năng lượng nhiệt khí thải nhiều hơn và thực hiện bố trí được nhiều mô-đun điện nhiệt hơn. Tuy nhiên, với kết cấu này việc thiết kế chế tạo dòng khí thải và nước làm mát trở nên phức tạp. Với kết cấu dạng dẹt cũng có khả năng thu hồi năng lượng cao nhưng kết cấu này sẽ gây cản quá trình lưu động dòng khí thải và đặc biệt có thể xuất hiện những vị trí không có khí thải đi qua để trao đổi nhiệt [13]. Còn các kết cấu TEG cơ bản có dạng hình chữ nhật, hình lục giác rất dễ chế tạo và ít gây ảnh hưởng đến sự lưu động dòng khí thải, tuy nhiên khả năng thu hồi năng lượng nhiệt lại không cao, do kết cấu

các loại này chỉ thuận lợi thu nhiệt ở vùng bên ngoài tiếp xúc với vỏ ống dẫn, còn vùng tâm ống dẫn rất khó thu hồi nhiệt, hơn nữa khả năng môi chất làm mát đi làm mát đều các bề mặt là rất khó [14]. Trên cơ sở kết quả phân tích đánh giá các thuận lợi và khó khăn của các kết cấu ống thu hồi nhiệt dùng cho TEG trình bày ở trên, kết cấu ống hình lục giác có bề mặt trong ống dẫn có thêm các cánh phẳng được lựa chọn để thiết kế ống thu hồi nhiệt khí thải sử dụng TEG vì kết cấu dễ chế tạo và ít gây ảnh hưởng đến sự lưu động dòng khí thải và có nhiều bề mặt tiếp xúc với thiết bị nhiệt điện. Các cánh phẳng được thêm vào để tăng cường khả năng trao đổi nhiệt vùng tâm ống dẫn. Mặt khác, để đơn giản cho việc làm mát các mặt thay vì sử dụng mỗi mặt một thiết bị làm mát thì sử dụng ống dẫn môi chất làm mát có các tấm hướng dòng để dòng môi chất có thể làm mát hầu hết các mô-đun điện nhiệt.

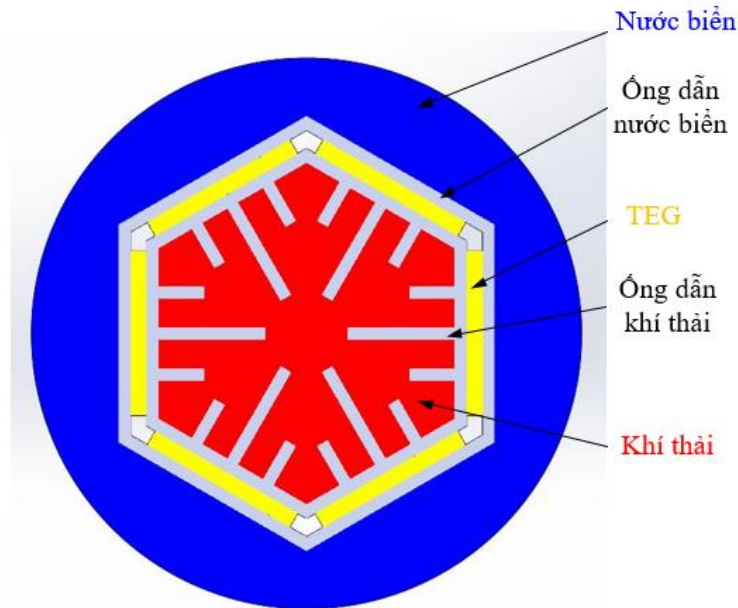
Trong nghiên cứu này mô-đun điện nhiệt TGM-127-1.4-1.5 của hãng Kryotherm được lựa chọn để tính toán và mô phỏng. Đây là mô-đun loại nhỏ, sử dụng vật liệu bán dẫn Bi_2TE_3 có kích thước dài - rộng - cao tương ứng là 40 mm - 40 mm - 3,9 mm. Nhiệt độ làm việc cao nhất là 220 °C. Trên cơ sở kích thước của mô-đun điện nhiệt, độ dài cạnh lục giác của bề mặt trong ống dẫn khí thải được xác định. Các cánh phẳng trong ống có kích thước giống nhau ở các mặt thể hiện trong hình 2.



Hình 2. Mặt cắt ống TEG.

2.3. Cơ sở lý thuyết tính toán thiết bị tận dụng năng lượng nhiệt khí thải sử dụng TEG

Hình 3 thể hiện mặt cắt ngang mô hình ống thu hồi nhiệt khí thải sử dụng TEG. Khí thải nhiệt độ cao sau khi vào ống dẫn sẽ trao đổi nhiệt với vách trong ống và các cánh, và nhiệt lượng khí thải được truyền nhiệt qua thành ống đến mặt nóng của TEG để thực hiện chuyển nhiệt năng thành điện năng khi mặt lạnh có nhiệt độ thấp. Một phần nhiệt còn lại sẽ truyền qua mặt lạnh TEG và thành ống đến môi chất làm mát (nước biển). Trong kết cấu này, TEG được gắn với bề mặt của ống dẫn khí thải và ống dẫn nước biển bằng keo tản nhiệt. Sự chênh lệch nhiệt độ giữa hai mặt của TEG sẽ quyết định cường độ dòng điện sinh ra.



Hình 3. Mặt cắt ngang ống thu hồi nhiệt khí thải sử dụng TEG.

Quá trình truyền nhiệt của khí thải qua ống dẫn khí thải đến TEG rồi qua ống dẫn nước biển đến nước biển được tính toán cơ sở lý thuyết truyền nhiệt qua vách phẳng có cánh, vách phẳng nhiều lớp và trao đổi nhiệt đối lưu cưỡng bức. Các thông số đầu vào để tính toán thiết kế TEG được lấy từ kết quả tính toán kết thu hồi nhiệt khí thải để chưng cất nước ngọt từ nước biển (kết thu hồi nhiệt) và thông số đầu vào của động cơ D243 như thể hiện trong bảng 1.

Bảng 1 Thông số khí thải của động cơ D243 và nước biển.

STT	Các thông số vật lý	Khí thải	Nước biển	Đơn vị
1	Nhiệt dung riêng C_p	1110,64	4182	J/kg.K
2	Khối lượng riêng ρ	0,376	998,2	kg/m ³
3	Độ nhớt động lực học μ	$3,89.10^{-5}$	0.001	kg/m.s
4	Hệ số dẫn nhiệt λ	0,061	0,6	W/m.K
5	Độ nhớt động học ν	$10,35.10^{-5}$	10^{-6}	m ² /s

Trong trường hợp tại chế độ $n = 2200$ v/ph và 100% tải, khí thải sau khi qua kết thu hồi nhiệt và trước khi vào ống thu hồi có lắp TEG có nhiệt độ là 283 °C, giả thiết được làm mát xuống còn tối đa là 260 °C và lưu lượng khối lượng của khí thải $m_{kt} = 0,082$ kg/s., trong khi đó nước làm mát vào ống giả thiết là 35 °C, sau khi nhận nhiệt sẽ là 50 °C.

Diện tích ướt của ống dẫn khí thải khi bỏ qua các cánh phẳng là diện tích của hình lục giác đều với có cạnh l_1 là cạnh của lục giác trong của ống dẫn:

$$S = 6 \cdot \frac{\sqrt{3}}{4} \cdot l_1^2 \text{ (m}^2\text{)} \quad (1)$$

Kích thước xác định của ống dẫn: $l_{kt} = 4 \frac{S}{C}$ (m) (2)

Vận tốc dòng khí thải qua ống dẫn: $\omega_{kt} = \frac{m_{kt}}{\rho_{kt} \cdot S}$ (m/s) (3)

Sử dụng các công thức tiêu chuẩn của quá trình trao đổi nhiệt đối lưu cưỡng bức [15], có hệ số tỏa nhiệt của khí thải tính theo biểu thức sau:

$$\alpha_{kx} = \frac{Nu_f \cdot \lambda_{kx}}{l_{kt}} \text{ (W/m}^2\text{.K)} \quad (4)$$

Giả thiết bỏ qua sự tỏa nhiệt của thiết bị vào môi trường xung quanh, khi đó nhiệt lượng khí xả tỏa ra cũng chính bằng nhiệt lượng nước làm mát nhận được:

$$Q_{kt} = Q_{nb} = m_{nb} C_{pnb} \cdot \Delta t_{nb} \text{ (J/s)} \quad (5)$$

Từ công thức (5) tính được lưu lượng khối lượng nước làm mát là:

$$m_{nb} = \frac{Q_{nb}}{C_{pnb} \Delta T_{nb}} \text{ (kg/s)} \quad (6)$$

Giả thiết kích thước của mặt trao đổi nhiệt của ống dẫn nước biển có chiều dài cạnh của lục giác là 55 mm. Và diện tích mặt cắt ngang của mặt trao đổi nhiệt và kích thước xác định của ống dẫn nước biển được tính theo công thức (1) và (2):

Như vậy, diện tích mặt cắt của dòng chảy trong lòng ống dẫn nước biển:

$$S_{nb} = (d_v - l_{nb})B \quad (7)$$

Trong đó, d_v (m) là đường kính trong của vỏ ống dẫn nhiệt, l_{nb} (m) là kích thước xác định mặt trong ống dẫn nước biển B (m) là khoảng cách giữa các tâm hướng dòng của ống dẫn nước biển lấy bằng kích thước của các mô-đun điện nhiệt. Do vậy chọn lưu lượng khối lượng nước làm mát vào ống dẫn nước biển là $m_{nlm} = 0,1$ kg/s

Tương tự như công thức (3), vận tốc dòng nước biển qua ống được xác định: $\omega_{nb} = \frac{m_{nb}}{\rho_{nb} \cdot S_{nb}}$ (m/s)

Tương tự như công thức (4) tính hệ số tỏa nhiệt của khí thải, hệ số tỏa nhiệt của nước biển được xác định:

$$\alpha_{nb} = \frac{Nu_f \cdot \lambda_{nb}}{l_{nb}} \text{ (W/m}^2\text{.K)} \quad (8)$$

Như vậy nhiệt lượng khí thải truyền cho nước làm mát của thiết bị được tính bằng biểu thức:

$$Q = \frac{(t_{f1} - t_{f2})}{\frac{1}{\alpha_1 F_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1 F_2} + \frac{\delta_2}{\lambda_2 F_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3 F_2} + \frac{1}{\alpha_2 F_3}} \quad (9)$$

Trong đó với $F_1=3,4.F_2$ và $F_3=1,375.F_2$

Mô-đun điện nhiệt TGM-127-1.4-1.5 có kích thước dài - rộng - cao là 40 mm – 40 mm – 3,9 mm và có công suất chuyển nhiệt năng thành điện năng khoảng 100 W với $\Delta T = 170^\circ\text{C}$. Giả thiết TEG là một vách phẳng, do vậy hệ số dẫn nhiệt trung bình của TEG xác định như sau:

$$\lambda = \frac{Q}{F} \cdot \frac{\delta}{\Delta T} \text{ (W/m.K)} \quad (10)$$

Vật liệu chế tạo vỏ các ống dẫn khí thải và ống dẫn nước biển là Đồng, do vậy có $\lambda = 380$ W/m.K, với độ dày 3 mm, nên mật độ dòng nhiệt của qua mô-đun điện nhiệt được tính là:

$$q_2 = \frac{Q}{F_2} \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (11)$$

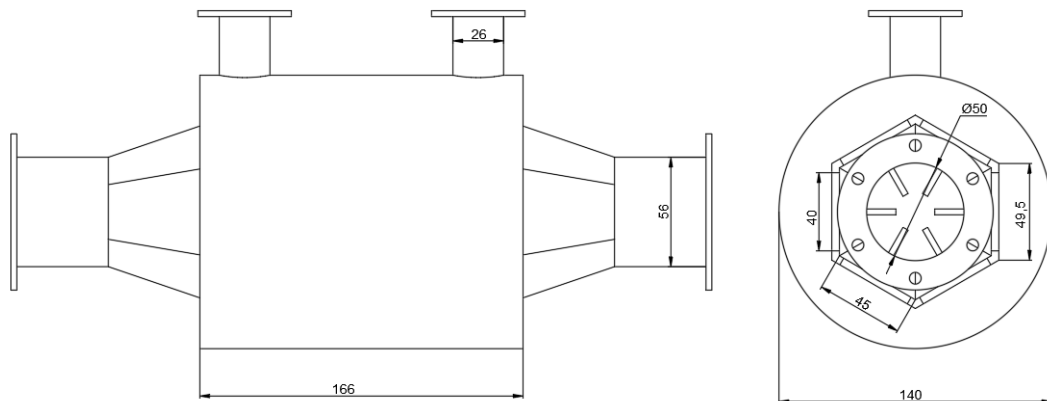
Và nhiệt độ mặt nóng của TEG được tính theo:

$$t_h = t_{f1} - q_2 \cdot F_2 \left(\frac{1}{\alpha_1 F_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1 F_2} \right) \text{ (K)} \quad (12)$$

Độ chênh lệch nhiệt độ mặt nóng và mặt lạnh của TEG được tính theo:

$$\Delta t = q_2 \cdot \frac{\delta_2}{\lambda_2} \text{ (K)} \quad (13)$$

Kết quả tính toán đảm bảo nhiệt độ làm việc của mặt nóng TEG nhỏ hơn giới hạn cho phép của mô-đun điện nhiệt TGM-127-1.4-1.5, kết quả này là cơ sở để xây dựng mô hình ống thu hồi nhiệt khí thải cho TEG. Với kết cấu và kích thước của mô hình, các mô-đun điện nhiệt được ghép nối tiếp với nhau tại mỗi mặt của ống dẫn khí thải. Như vậy tại mỗi mặt sẽ có 4 mô-đun điện nhiệt, nên các TEG sẽ được mô hình hóa thành khối với kích thước là 40 mm x 160 mm x 3,9 mm. Do đó ống thu hồi nhiệt khí thải cho TEG có kết cấu và kích thước như thể hiện trên hình 4.

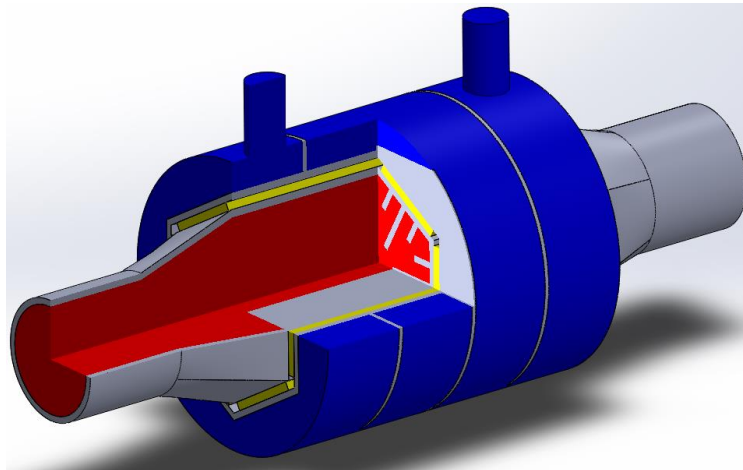


Hình 4. Kết cấu ống TEG.

3. MÔ PHỎNG QUÁ TRÌNH TRAO ĐỔI NHIỆT CỦA ỚNG THU HỒI NHIỆT CHO TEG

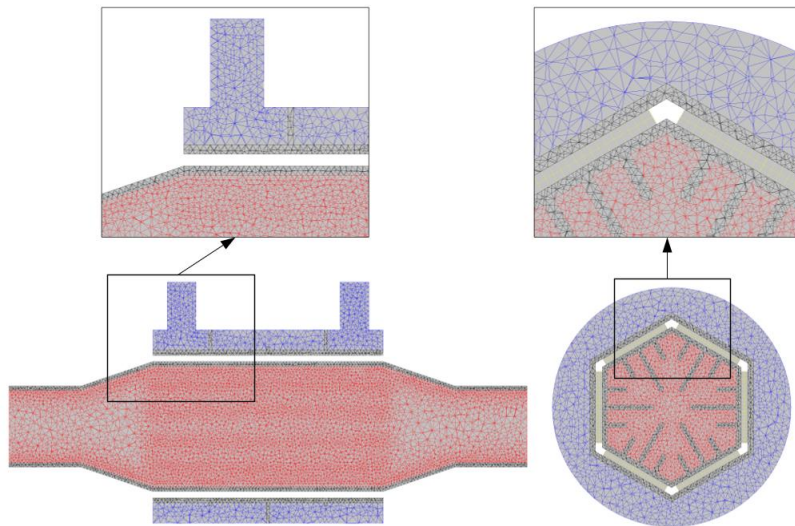
3.1. Xây dựng mô hình mô phỏng

Trên cơ sở kết cấu ống thu hồi nhiệt khí thải dùng cho TEG gồm phần ống dẫn khí thải và phần ống dẫn nước biển như đã thể hiện ở trên. Mô hình 3D của phần khí thải, ống dẫn khí thải, mô-đun điện nhiệt, ống dẫn nước biển và nước biển được xây dựng trên phần mềm Solidwork như thể hiện trên hình 5.



Hình 5. Mô hình 3D ống thu hồi nhiệt khí thải sử dụng cho TEG.

Mô hình 3D sau khi thực hiện xong bên Solidwork được đưa sang Ansys Fluent để thực hiện định nghĩa các khối và cửa vào và ra của các môi chất rồi chia lưới như thể hiện trên hình 6.



Hình 6. Mô hình sau khi được chia lưới.

Điều kiện biên biên cho mô hình gồm phần cho nước biển và phần khí thải. Trong đó phần nước biển có nhiệt độ đầu vào là $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ và lưu lượng khối lượng là $0,1\text{ kg/s}$. Còn phần khí thải, đầu vào cho phần khí thải chính là đầu ra của ống thu hồi nhiệt khí thải để chưng cất nước ngọt

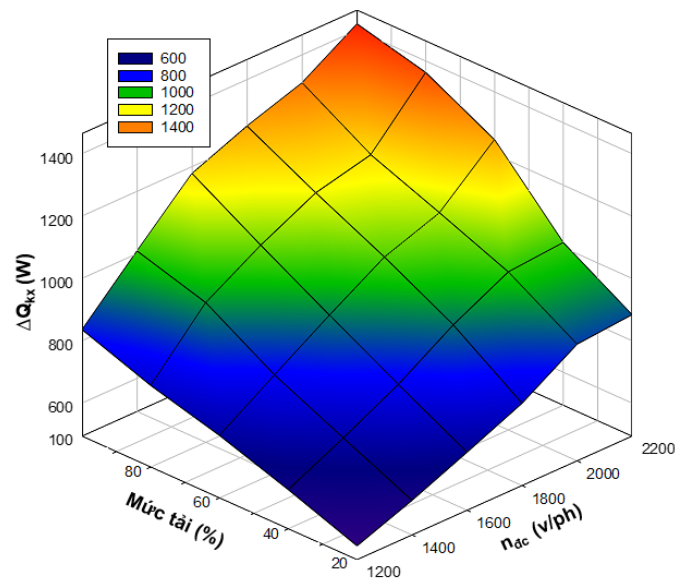
từ nước biển của hệ thống, thông số đầu vào khí thải được lấy từ kết quả “Nghiên cứu đưa ra kết cấu kết thu hồi nhiệt khí thải mới có hiệu suất cao sử dụng trong hệ thống chưng cất nước ngọt từ nước biển” thể hiện ở bảng 2 [12].

Bảng 2. Thông số nhiệt độ và lưu lượng khí thải sau khi qua kết thu hồi nhiệt tại các chế độ tải và tốc độ động cơ.

Tốc độ độ	1200 (v/ph)		1400 (v/ph)		1600 (v/ph)		1800 (v/ph)		2000 (v/ph)		2200 (v/ph)	
	Nhiệt độ (K)	Lưu lượng (g/s)	Nhiệt độ (K)	Lưu lượng (g/s)	Nhiệt độ (K)	Lưu lượng (g/s)	Nhiệt độ (K)	Lưu lượng (g/s)	Nhiệt độ (K)	Lưu lượng (g/s)	Nhiệt độ (K)	Lưu lượng (g/s)
20	413	49,72	425	57,52	438	64,59	448	71,91	457	79,14	470	85,49
40	434	48,92	453	56,79	466	63,75	474	70,94	481	78,12	495	84,59
60	450	48,16	472	56,04	487	62,93	494	69,99	501	77,08	516	83,65
80	464	47,43	488	55,29	506	62,11	513	69,09	521	76,09	535	82,68
100	477	46,75	504	54,55	528	61,33	533	68,25	541	75,09	556	81,73

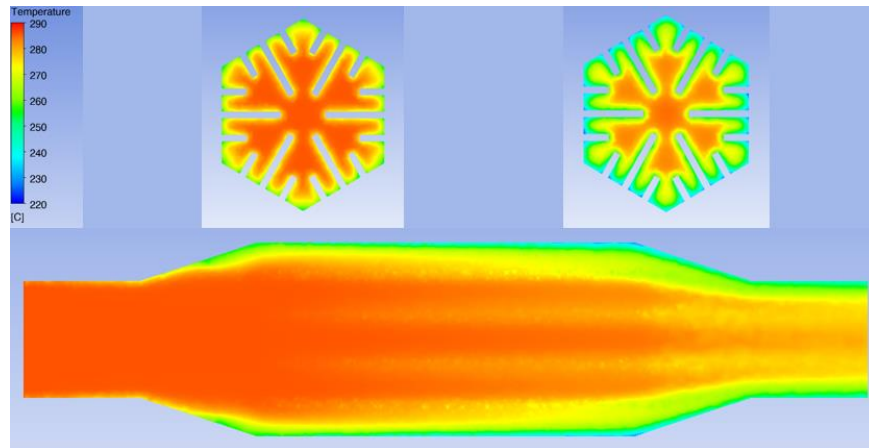
3.2. Kết quả mô phỏng

Mô hình sẽ được mô phỏng ở các chế độ tải khác nhau và các tốc độ động cơ khác nhau. Nhiệt lượng được khí thải truyền cho nước biển được theo các chế độ tải và tốc độ được thể hiện trên hình 7. Kết quả cho thấy nhiệt lượng tận dụng được của khí thải nằm trong khoảng từ 600 ÷ 1400 W, và nhiệt lượng thu hồi có xu hướng tăng khi tăng tải và tốc độ của động cơ vì khi tải và tốc độ lớn thì nhiệt độ khí thải lúc này sẽ càng cao dẫn đến khí thải truyền nhiệt lượng đi nhiều hơn.



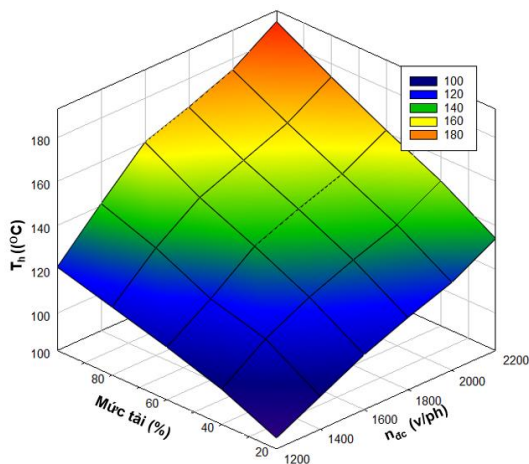
Hình 7. Nhiệt lượng khí thải thu hồi qua hệ thống.

Hình 8 thể hiện phân bố nhiệt độ khí thải và nước biển trong ống thu hồi dọc theo ống thu hồi và ở phía đầu vào và đầu ra của ống thu hồi. Kết quả cho thấy, khí thải nhiệt độ cao tập trung phân bố ở tâm ống thu hồi và khí thải có nhiệt độ thấp phân bố xung quanh thành ống và các cánh tản nhiệt. Với kết cấu có dạng các cánh tản nhiệt, nhiệt độ tại tâm ống thu hồi nhiệt đã được truyền ra ngoài khiến cho nhiệt độ tại tâm cũng đã được giảm đi. Việc thêm các cánh đã làm tăng khả năng truyền nhiệt của thiết bị so với việc không sử dụng cánh dẫn nên khả năng tận dụng nhiệt của thiết bị được nâng cao.

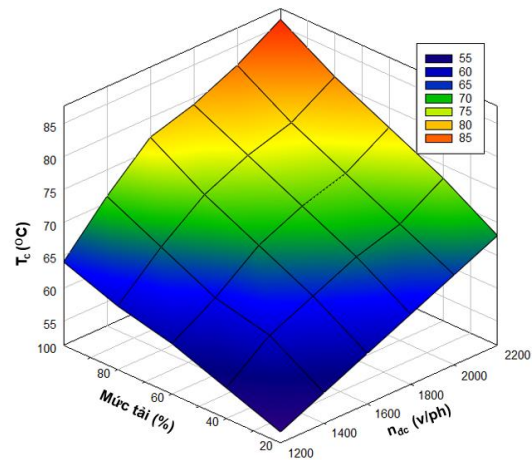


Hình 8. Phân bố nhiệt độ khí thải trong ống thu hồi nhiệt.

Nhiệt độ trung bình của mặt nóng và mặt lạnh TEG được thể hiện trên hình 9 và 10. Kết quả cho thấy nhiệt độ tại mặt nóng và mặt lạnh của TEG có xu hướng tăng khi tăng tải và tốc độ của động cơ. Nhiệt độ mặt nóng mô-đun nhiệt điện thay đổi trong khoảng $100\text{ }^{\circ}\text{C} \div 180\text{ }^{\circ}\text{C}$ có độ chênh lệch không quá cao so với việc dùng PCM có nhiệt độ mặt nóng của mô-đun nhiệt điện thay đổi trong khoảng $350 \div 410\text{ }^{\circ}\text{C}$ như nghiên cứu [10]. Kết quả này sẽ là thông số đầu vào quan trọng trong phần tính toán mô phỏng quá trình chuyển hóa từ nhiệt năng sang điện năng xảy ra bên trong TEG.



Hình 9. Nhiệt độ mặt nóng của mô-đun TEG.



Hình 10. Nhiệt độ mặt lạnh của mô-đun TEG.

4. KẾT LUẬN

Trên cơ sở kết quả tính toán thiết kế mô hình ống thu hồi nhiệt khí thải sử dụng TEG, có thể đưa ra một vài kết luận sau:

- Đã thành công trong việc tính toán, thiết kế và mô phỏng quá trình truyền nhiệt diễn ra trong ống thu hồi nhiệt sử dụng TEG.

- Kết quả mô phỏng cho thấy ống thu hồi nhiệt sử dụng cho TEG với 24 mô-đun điện nhiệt có thể tận dụng tốt đa được 1420 W tại chế độ 100% tải và tốc độ 2200 v/ph chiếm khoảng 7% năng lượng khí thải đi qua thiết bị.

- Nhiệt độ trung bình giữa mặt nóng dao động trong khoảng $100\text{ }^{\circ}\text{C} \div 180\text{ }^{\circ}\text{C}$ và mặt lạnh của TEG dao động trong khoảng $60\text{ }^{\circ}\text{C} \div 90\text{ }^{\circ}\text{C}$, đây sẽ là cơ sở để đưa ra các giải pháp điều chỉnh lượng nước vào kết làm mát để làm giảm bớt sự chênh lệch nhiệt độ khi tải và tốc độ động cơ thay đổi nhằm nâng cao công suất chuyển đổi từ nhiệt năng sang điện năng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Julian D. Osorioa, Alejandro Rivera-Alvarez, Efficiency enhancement of spark-ignition engines using a Continuous Variable Valve Timing system for load control, *Energy*, 161 (2018) 649-662. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.07.009>
- [2]. Ahmad O. Hasan, Hani Al-Rawashdeh, Ahmad Abu-jrai, Mohamed R. Gomaa, Farrukh Jamil, Impact of variable compression ratios on engine performance and unregulated HC emitted from a research single cylinder engine fueled with commercial gasoline, *International Journal of Hydrogen Energy*, in press (2022). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.09.025>
- [3]. Mengzhao Chang, Minuk Jeong, Sungwook Park, Hyung Ik Kim, Jeong Hwan Park, Suhan Park, Study on predictions of spray target position of gasoline direct injection injectors with multi-hole using physical model and machine learning, *Fuel Processing Technology*, 247 (2023) 107774. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2023.107774>.
- [4]. M. Krishnamoorthi, R. Malayalamurthi, Zhixia He, Sabariswaran Kandasamy, A review on low temperature combustion engines: Performance, combustion and emission characteristics, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 116 (2019) 109404. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109404>
- [5]. Adam J. Feneleya, Apostolos Pesiridisa, Amin Mahmoudzadeh Andwaria, Variable Geometry Turbocharger Technologies for Exhaust Energy Recovery and Boosting-A Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71 (2017) 959-975. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.125>
- [6]. Ulli Drescher, Dieter Brüggemann, Fluid selection for the organic Rankine cycle (ORC) in biomass power and heat plants, *Applied Thermal Engineering*, 27 (2007) 223–228. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.04.024>
- [7]. E. Korin, R. Reshef, D. Tshernichovsky, E. Sher, Reducing cold start emission from internal combustion engines by means of a catalytic converter embedded in a phase change material, *Journal of Automobile Engineering*, 213 (1999) 575–583. <https://doi.org/10.1243/0954407991527116>
- [8]. Khổng Vũ Quang, Nguyễn Duy Tiến, Vũ Minh Diễn, Bằng độc quyền sáng chế: Hệ thống tận dụng năng lượng nhiệt của nước làm mát và khí thải của động cơ đốt trong để chưng cất nước ngọt trên tàu khai thác thủy sản xa bờ, ngày cấp: 21/05/2020, mã số: 24229.
- [9]. Rui Quan, Junhui Wang, Tao Li, Compatibility optimization of a polyhedral-shape thermoelectric generator for automobile exhaust recovery considering backpressure effects, *Heliyon*, 8 (2022) e12348. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12348>

- [10]. Mirko Klein Altstedde, Frank Rinderknecht, Horst Friedrich, Integrating Phase-Change Materials into Automotive Thermoelectric Generators, *Journal of Electronic materials*, 6 (2014) 2134-2140. <https://doi.org/10.1007/s11664-014-2990-z>
- [11]. Yurong Yang, Shixue Wang, Weu He, Simulation study on regenerative thermoelectric generators for dynamic waste heat recovery, *Energy Procedia*, 158 (2019) 571-576. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.154>
- [12]. Không Vũ Quang, Đồng Minh Hiếu, Nghiên cứu đưa ra kết cấu kết thu hồi nhiệt khí thải mới có hiệu suất cao sử dụng trong hệ thống chưng cất nước ngọt từ nước biển, *Tạp chí Khoa học công nghệ trường Sư phạm Kỹ thuật Hưng Yên*, 34 (2022) 18-24.
- [13]. M. Mori, T. Yamagami, M. Sorazawa, T. Miyabe, S. Takahashi, T. Haraguchi, Simulation of fuel economy effectiveness of exhaust heat recovery system using thermoelectric generator in a series hybrid, *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, 4 (2011) 1268–1276. <https://doi.org/10.4271/2011-01-1335>
- [14]. B. Orr, A. Akbarzadeh, M. Mochizuki, R. Singh, A review of car waste heat recovery systems utilising thermoelectric generators and heat pipes, *Applied Thermal Engineering*, 101 (2016) 490–495. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.10.081>
- [15]. Bùi Hải, Trần Thế Sơn, *Kỹ thuật nhiệt*, NXB khoa học và kỹ thuật, 2004.