

**NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG
HIỆU ỨNG SEEBECK THU HỒI NHIỆT KHÓI THẢI
TRÊN ĐỘNG CƠ ĐỐT TRONG THÔNG QUA MÁY PHÁT NHIỆT ĐIỆN**
THE STUDY ON APPLICATION
OF THE SEEBECK EFFECT TO THE ENERGY RECOVERY
FROM EXHAUST GAS BY THERMO-ELECTRIC GENERATOR

Đỗ Văn Dũng, Lê Quang Vũ

Trường Đại học Sư Phạm Kỹ Thuật Tp. Hồ Chí Minh

TÓM TẮT

Theo ước tính, khoảng 40% năng lượng từ quá trình cháy trong buồng đốt của động cơ đốt trong phát thải ra môi trường bên ngoài dưới dạng nhiệt năng của khói thải. Điều này có nghĩa là có tới 40% lượng nhiên liệu hóa thạch được đốt cháy hằng ngày chỉ thải nhiệt ra bầu không khí, làm ô nhiễm môi trường. Bài báo trình bày phương pháp ứng dụng hiệu ứng Seebeck, chuyển đổi trực tiếp nhiệt năng khói thải thành điện năng cung cấp cho các phụ tải điện trên ô tô. Kết quả nghiên cứu góp phần giảm tiêu hao nhiên liệu, giảm ô nhiễm môi trường và chống lại sự ấm lên toàn cầu.

Từ khóa: Nhiệt phát thải, hiệu ứng Seebeck, động cơ đốt trong

ABSTRACT

According to the most recent estimates, the internal combustion engine has lost around 40% of energy in the form of emission heat. On average, 40% of fossil fuels are burned daily just wasted heat into the environment. This paper presents the application of the Seebeck effect to recover energy through thermo-electric generator from internal combustion engine emissions. This thermo-electric generator will provide the additional electrical power in automobile to supply electrical loads, thereby, reducing the fuel consumption, emission and global warming.

Keywords: Waste heat, Seebeck effect, Internal combustion engine

I. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ngày nay, mặc dù công nghệ chế tạo và điều khiển động cơ đốt trong đã đạt tới mức tối ưu. Nhưng vì đặc thù riêng nên hiệu suất động cơ vẫn còn thấp và chỉ đạt khoảng từ 25% đến 35%. Một lượng nhiệt lớn chiếm từ 35% đến 40% được phát thải qua đường ống xả [1]. Đây là một lượng tổn hao nhiên liệu rất lớn mà hằng ngày các phương tiện giao thông thải ra làm ô nhiễm môi trường và là một trong những tác nhân gây biến đổi khí hậu. Bên cạnh đó, các phụ tải điện trên ô tô càng ngày càng nhiều và đòi hỏi tỷ lệ nhiên liệu chuyển thành điện năng ngày càng tăng. Chính vì vậy, vấn đề thu hồi nhiệt thải để

phát điện trở nên cấp bách được nhiều cá nhân và tổ chức nghiên cứu. Nghiên cứu này ứng dụng hiệu ứng Seebeck vào máy phát kiểu nhiệt điện chuyển đổi trực tiếp nhiệt năng từ khói thải thành điện năng cung cấp cho hệ thống điện ô tô nhờ các mô đun nhiệt điện. Các thông số được xác định và đánh giá trên động cơ xăng 5S-FE của Toyota. Kết quả nghiên cứu sẽ là đóng góp quan trọng trong lĩnh vực tiết kiệm nhiên liệu, giảm ô nhiễm môi trường cho các phương tiện giao thông.

Nội dung nghiên cứu bao gồm:

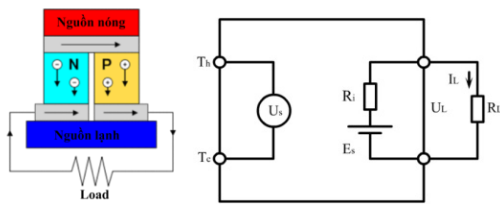
- Nghiên cứu khả năng ứng dụng hiệu ứng Seebeck thu hồi nhiệt khói thải.

- Đánh giá mức độ giảm phát thải nhiệt trên động cơ xăng khi lắp đặt hệ thống thu hồi.

II. Tính toán xác định các thông số cơ bản.

1. Mô hình module nhiệt điện TEG

Module nhiệt điện TEG (*Thermoelectric Generator*) là thiết bị chuyển đổi nhiệt năng thành điện năng dựa vào độ chênh lệch nhiệt độ giữa hai mặt trao đổi nhiệt. Quá trình trao đổi nhiệt trong TEG diễn ra khá phức tạp và tuân theo nhiều hiệu ứng khác nhau. Tuy nhiên, nếu xét về khía cạnh nhiệt điện có thể chọn mô hình như **hình 1** [2].



Hình 1: Mô hình module TEG.

Trong đó: T_h [K] là nhiệt độ mặt nóng, T_c [K] là nhiệt độ mặt lạnh, U_s [V] là điện áp phát ra theo hiệu ứng Seebeck, E_s [V] là suất điện động phát ra của TEG, R_i [Ω] là điện trở trong của TEG, U_L [V] là điện áp ngõ ra của TEG, I_L [A] là dòng điện qua tải, R_L [Ω] là điện trở tải. Từ mô hình trên ta có các phương trình của TEG như sau.

$$U_s = S(T_h - T_c) = S \cdot \Delta T = E_s \quad (1)$$

$$I_L = \frac{E_s}{R_i + R_L} = \frac{S \cdot \Delta T}{R_i + R_L} \cdot I_L = \frac{E_s}{R_i + R_L} = \frac{S \cdot \Delta T}{R_i + R_L} \quad (2)$$

$$U_L = I_L \cdot R_L = E_s - I_L \cdot R_i = S \cdot \Delta T - \frac{S \cdot \Delta T}{R_i + R_L} \cdot R_i \cdot R_L \quad (3)$$

$$P_L = I_L \cdot U_L = \left(1 - \frac{R_i}{R_i + R_L}\right) \cdot \frac{S^2 \cdot \Delta T^2}{R_i + R_L} \cdot R_L \quad (4)$$

Trong đó: ΔT [°K] là độ chênh lệch nhiệt độ

giữa hai mặt trao đổi nhiệt, S là hệ số Seebeck của vật liệu bán dẫn, P_L [W] là công suất đầu ra của TEG. Từ mô hình trên ta thấy: muốn xác định điện áp và công suất phát ra của máy phát nhiệt điện chúng ta cần xác định nhiệt độ hai bề mặt trao đổi nhiệt T_h và T_c của TEG.

2. Xác định nhiệt lượng thu hồi

Nhiệt phát thải trong thì xả của động cơ đốt trong bản chất là nhiệt dư thừa của quá trình cháy giãn nở. Sản vật cháy lúc này có nhiệt độ khá cao và khi đi qua bộ thu nhiệt, nhiệt độ sẽ bị giảm. Nhiệt lượng thu được ở bộ thu, xét trong một chu trình (CT) được xác định qua công thức sau.

$$q = m_f (k_{f-a} \lambda + 1) \int_{T_i}^{T_o} C_p dT \int_{T_i}^{T_o} C_p dT \quad (5)$$

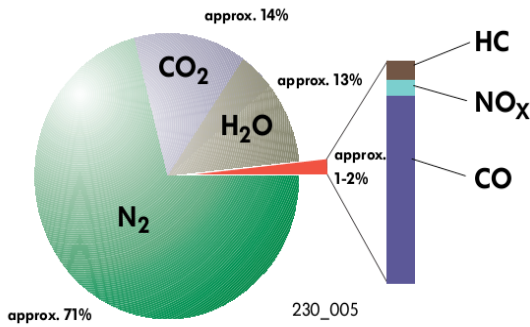
Trong đó: q [kJ/CT] - nhiệt lượng thu hồi, C_p [kJ/kg°K] - nhiệt dung riêng khí xả đi qua bộ thu là một hàm số theo nhiệt độ T , m_f [kg] là khối lượng nhiên liệu, k_{f-a} là tỷ lệ khối lượng không khí nhiên liệu tiêu chuẩn, T_i và T_o [°K] là nhiệt độ khí xả vào và ra bộ thu hồi, λ là hệ số dư lượng không khí.

Trong công thức (5), k_{f-a} là thông số tùy thuộc vào loại nhiên liệu được sử dụng. Với nhiên liệu xăng $k_{f-a} = 14,7$. Hệ số λ được xác định nhờ vào cảm biến A/F đặt trên đường ống thải động cơ, m_f xác định thông qua lưu lượng và thời gian mở kim phun. Động cơ 5S-FE làm thí nghiệm sử dụng kim phun có thông số được xác định qua công thức [5]:

$$m_f = 2,214 \cdot 10^{-6} t_p \quad (6)$$

Trong đó: t_p [ms] - thời gian mở kim phun được xác định trực tiếp khi động cơ hoạt động.

C_p - thành phần rất khó xác định. Giá trị của C_p phụ thuộc vào nhiệt độ và thành phần của khí thải. Tuy nhiên với động cơ xăng hiện đại có sự kiểm soát tỷ lệ hòa khí, ta xem tỷ lệ hòa khí đạt xoay quanh tiêu chuẩn 14,7 và khí xả bao gồm các thành phần như **hình 2**.



Hình 2: Thành phần khí xả động cơ xăng[4].

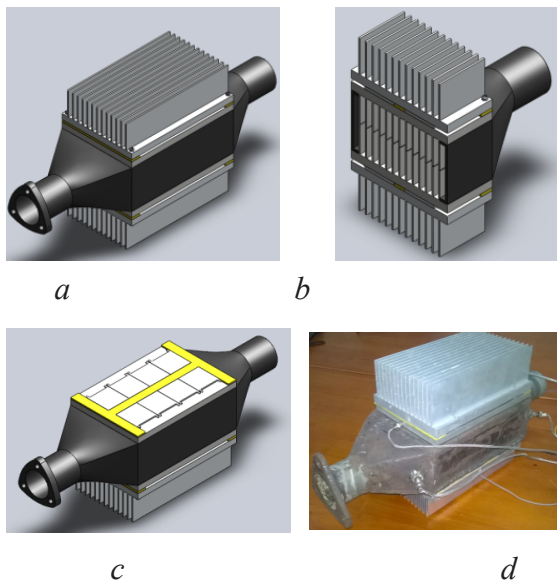
Thành phần khác ở đây bao gồm CO, NO_x, HC với lượng CO chiếm tỷ lệ trên 80% nên ta xem toàn bộ là CO. Với thành phần này, nhiệt dung riêng khối lượng đẳng áp khí xả được xác định theo công thức sau.

$$C_p = 1,105 - 0,099 \cdot 10^{-3} T_e + 0,586 \cdot 10^{-6} T_e^2 - 0,270 \cdot 10^{-9} T_e^3 + 0,002 \cdot 10^{-12} T_e^4 \quad (7)$$

III. Thí nghiệm thu thập dữ liệu

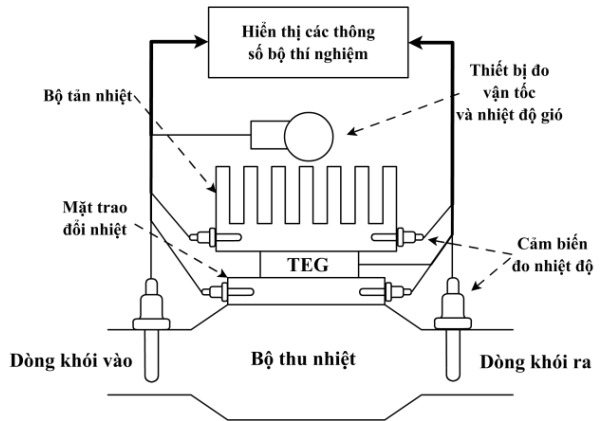
1. Thí nghiệm xác định thông số TEG

Để tiến hành thí nghiệm máy phát nhiệt điện, bộ trao đổi nhiệt được thiết kế đặt trên đường ống xả thay thế ống pô phụ trên xe. Dòng nhiệt từ khí xả động cơ được hấp thụ khi đi qua bộ thu nhiệt và đưa tới mặt nóng máy phát nhiệt điện. Mặt lạnh của máy phát nhiệt điện được giải nhiệt nhờ bộ làm mát kiểu đối lưu cưỡng bức với dòng gió làm mát được tạo ra khi xe chạy. Máy phát nhiệt điện được thiết kế và chế tạo như hình 3.



Hình 3: Máy phát nhiệt điện: a-Hình thiết kế, b-Mặt cắt ngang, c-Bề mặt trao đổi nhiệt, d-Hình chụp máy phát điện.

Trong máy phát nhiệt điện, module nhiệt điện được ghép nối dọc theo chiều dài của bộ thu nhiệt như hình 4-c để tránh tình trạng phân bố không đồng đều của nhiệt độ dọc theo chiều dài bộ thu tạo sự khác biệt giữa các bộ chuyển đổi. Mỗi bộ TEG gồm 500 cặp P-N mắc nối tiếp. Thí nghiệm tiến hành trên động cơ 5S-FE chạy không tải, thay đổi nhiệt độ bằng cách thay đổi số vòng quay động cơ. Sơ đồ bố trí thí nghiệm như hình hình 4.



Hình 4: Thí nghiệm thu thập dữ liệu máy phát nhiệt điện.

Dữ liệu thu thập từ thí nghiệm được trình bày tóm lược trong Bảng 1.

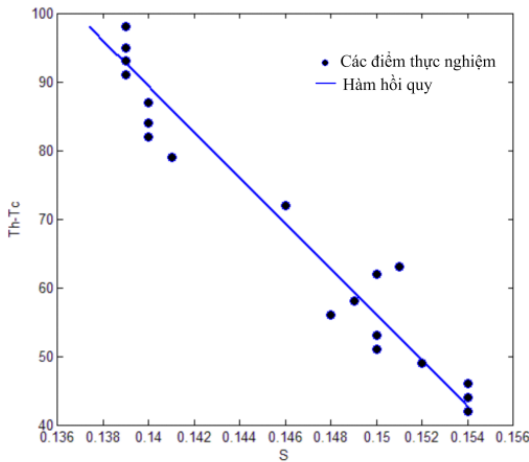
Bảng 1: Dữ liệu thí nghiệm xác định thông số TEG

Th[°C]	Tc[°C]	Th-Tc	U _L [V]	I _L [mA]
98	56	42	5.88	89
104	58	46	6.46	97
111	60	51	6.99	105
117	61	56	7.57	114
127	65	62	8.49	128
139	67	72	9.57	145
149	67	82	10.47	158
156	69	87	11.11	168
163	70	93	11.79	178
168	70	98	12.43	188

Từ thông số thí nghiệm thu được kết hợp với mô hình TEG, bằng phương pháp bình phương nhỏ nhất nhóm làm đề tài tìm được phương trình xác định hệ số S theo sự chênh lệch nhiệt độ như sau.

$$S = -0,003\Delta T + 0,1668 \quad (8)$$

Đồ thị biểu diễn hàm $S=f(\Delta T)$ như **Hình 5**.

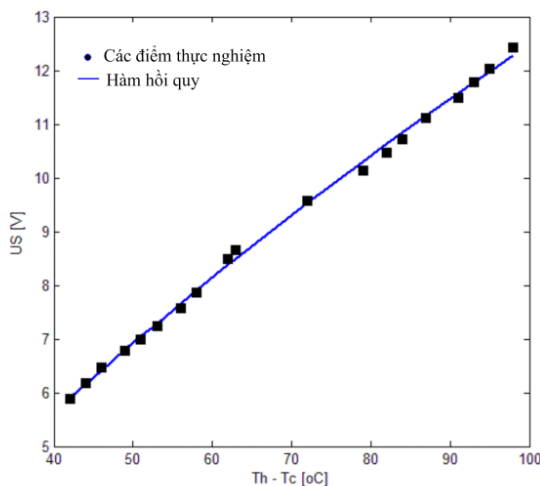


Hình 5: Đặc tuyến S theo chênh lệch nhiệt độ.

Với quy luật biến thiên S như phương trình (8), điện áp phát ra theo hiệu ứng Seebeck có phương trình sau.

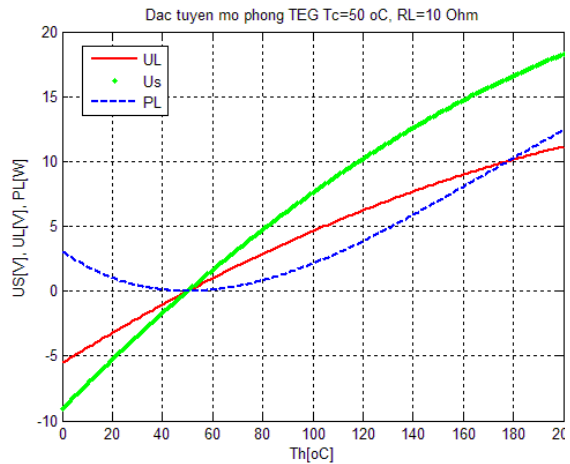
$$U_s = -0,0003\Delta T^2 + 0.1668 \Delta T \quad (9)$$

Đặc tuyến U_s theo chênh lệch nhiệt độ như **hình 7**.



Hình 6: Đặc tuyến U_s theo chênh lệch nhiệt độ.

Với phương trình xác định hệ số Seebeck theo công thức (8) và mô hình TEG như **hình 1**, ta có các đặc tuyến của TEG 500 cặp P-N đặt dọc theo bộ thu nhiệt như sau (**Hình 7**):

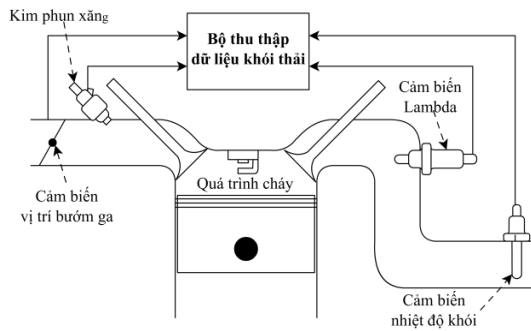


Hình 7: Kết quả mô phỏng module TEG.

Qua dữ liệu thí nghiệm ở **Bảng 1** ta thấy rằng với 500 cặp nhiệt điện hệ số Seebeck có thể đạt tới 0,154 khi nhiệt độ mặt nóng đạt 168 °C và mức độ chênh lệch đạt 98 °C và điện áp phát ra đạt tới 12 V, cả 4 nhánh module đều cho kết quả giống nhau và hoàn toàn có thể mắc song song để tăng dòng điện ngõ ra. Kết quả mô phỏng như **hình 7** cho ta thấy với mức nhiệt độ mặt lạnh là 50 °C điện áp phát ra có thể đạt trên 10V và công suất có thể đạt tới 12W. Kết quả này cho thấy khả năng ứng dụng các module TEG thu hồi nhiệt thải rất tốt.

2. Thí nghiệm đánh giá bộ thu nhiệt

Để đánh giá bộ thu nhiệt, bước đầu nhóm nghiên cứu chỉ đánh giá khả năng thu hồi nhiệt bằng cách đo độ chênh lệch nhiệt độ giữa dòng khí vào $T_i [^{\circ}C]$ và ra bộ thu $T_o [^{\circ}C]$ từ đó, kết hợp với dữ liệu của khối thải để tính nhiệt lượng được hấp thụ bởi bộ thu. Thí nghiệm cũng đánh giá khả năng giải nhiệt bằng gió của bộ làm mát $T_a [^{\circ}C]$ ở tốc độ động cơ Ne từ 1500 rpm tới 2500 rpm và động cơ chạy không tải. Tốc độ gió $W_a [km/h]$ được tạo ra từ quạt gió với vận tốc khoảng 20 km/h. Thí nghiệm xác định thông số khối thải được bố trí theo sơ đồ khối như **hình 7**.



Hình 7: Bố trí thí nghiệm thu thập dữ liệu khí thải.
 Dữ liệu thí nghiệm được trình bày ở **Bảng 2**.

Bảng 2: Dữ liệu thí nghiệm đánh giá bộ trao đổi nhiệt

$T_i [^{\circ}C]$	$T_o [^{\circ}C]$	$T_a [^{\circ}C]$	$t_p [ms]$	$N_e [rpm]$	$Q_e [kW]$	$Q_l [kW]$	$H [\%]$
373	334	49	4,1	1463	2,944	0,307	10,4
377	337	54	4,3	1461	3,119	0,330	10,6
446	379	55	4,4	1719	4,509	0,672	14,9
469	394	55	4,7	1758	5,207	0,825	15,8
503	408	55	4,9	2049	6,842	1,278	18,7
515	415	56	4,9	2351	8,061	1,546	19,2
527	423	56	5,0	2443	8,773	1,709	19,5
535	430	57	5,1	2554	9,516	1,844	19,4

Trong bảng trên, $N_e [rpm]$ là tốc độ động cơ, $Q_e [kW]$ là nhiệt lượng khí xả đi vào bộ thu nhiệt, $Q_l [kW]$ là nhiệt lượng thu được trên bộ thu, $H [\%]$ là hiệu suất thu hồi nhiệt. Dữ liệu thực nghiệm cho thấy bộ phận thu hồi nhiệt có nhiệt độ chênh lệch đạt tới $109^{\circ}C$ trong khi nhiệt độ gió làm mát ra khỏi cánh tản nhiệt chỉ đạt $57^{\circ}C$ với tốc độ gió $20 km/h$. Nhiệt độ vào $283^{\circ}C$ ở tốc độ động cơ $2554 rpm$, công suất bộ thu nhiệt đạt được $1,844 [kW]$. Hiệu suất thu hồi đạt $19,4\%$. Tuy nhiên, đây chỉ mới là khả năng thu hồi nhiệt của bộ thu nhiệt làm mát bằng gió. Hiệu suất tái sử dụng nhiệt còn phụ thuộc vào bộ chuyển đổi nhiệt điện.

IV. Kết quả và bàn luận

Nghiên cứu đã xây dựng được mối quan hệ giữa điện áp phát ra của bộ thu nhiệt gồm 4

dây mắc song song, mỗi dây gồm 500 cặp nhiệt điện cho kết quả đồng đều và có khả năng ứng dụng thu hồi nhiệt phát thải trên ô tô. Tuy nhiên, điện áp phát ra của TEG phụ thuộc vào độ chênh lệch nhiệt độ giữa hai bề mặt trao đổi nhiệt. Bên mặt nóng phụ thuộc vào tải và tốc độ động cơ, bên mặt lạnh phụ thuộc vào tốc độ xe. Các thông số phụ thuộc lại thay đổi thường xuyên khi xe hoạt động nên không thể thu được một kết quả điện áp trực tiếp ổn định. Chính vì vậy, cần sử dụng bộ chuyển đổi DC-DC để đạt điện áp ổn định mức $14V$ cung cấp cho phụ tải. Ở thí nghiệm đánh giá bộ thu hồi nhiệt, do bộ thu đặt xa động cơ và chưa cách nhiệt đường ống thải đồng thời động cơ chạy không tải nên nhiệt độ vào bộ thu thấp. Ở tốc độ $2554 rpm$ nhưng nhiệt độ vào chỉ đạt $280^{\circ}C$, thấp hơn rất nhiều so với con số $510^{\circ}C$ khi vừa

ra khỏi hệ thống thái ở chế độ tải trung bình [5]. Vì thế công suất thu hồi của bộ thu nhiệt mới chỉ đạt $1844W$. Tuy nhiên nghiên cứu cho thấy khả năng giải nhiệt bằng phương pháp đối lưu cưỡng bức nhờ dòng gió khi

xe chạy có thể đáp ứng được chức năng tiết kiệm nhiên liệu. Đồng thời hệ thống cần có quạt làm mát dự phòng khi tốc độ động cơ không đủ tạo vận tốc gió làm mát cần thiết.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Jihad G. Haidar Jamil I. Ghojel, *Waste heat recovery from the exhaust of low-power diesel engine*, Department of Mechanical Engineering Monash University.
- [2]. Dimitri Tatarinov, *Modeling of a Thermoelectric Generator for Thermal Energy Regeneration in Automobiles*, Faculty of Engineering, University of Applied Sciences Trier, Schneidershof, 54293 Trier, Germany.
- [3]. G. Jeffrey Snyder, *Small Thermoelectric Generators*.
- [4]. Audi, *Motor Vehicle Exhaust Emissions*, Self-Study Programmer 230.
- [5]. Đỗ Văn Dũng, Lê Quang Vũ, Huỳnh Phước Sơn, *Nghiên cứu xác định nhiệt lượng khí xả trên động cơ xăng thông qua hệ số dư lượng không khí*, Báo cáo tại Hội nghị Cơ học Thủy khí toàn quốc lần thứ ..., Đồng Hới, 2013.