

Nhiệt điện và tương lai ứng dụng trong ngành công nghiệp ô tô

Nguyễn Tuấn Hưng^{1,2}, Vương Văn Thanh³

¹Viện Nghiên cứu Liên ngành, Đại học Tohoku, Nhật Bản

²Khoa Vật lý, Đại học Tohoku, Nhật Bản

³Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

Mặc dù xe ô tô hiện nay cho thấy hiệu quả cao trong việc sử dụng năng lượng, nhưng một vấn đề lớn vẫn chưa được giải quyết đó là nhiệt thải*. Với công nghệ nhiệt điện (Thermoelectric - TE), phần nhiệt thải này có thể được chuyển hoá trực tiếp thành điện năng giúp tiết kiệm năng lượng. Mặt khác, công nghệ TE cũng tạo ra một phương pháp làm mát mới, được gọi là làm mát cục bộ, thay vì làm mát toàn bộ không khí trong xe ô tô. Do đó, TE hiện được đánh giá là công nghệ tiềm năng giúp các ô tô trong tương lai sử dụng tiết kiệm và hiệu quả năng lượng.

Cúng ta đang chứng kiến một sự thay đổi mang tính cách mạng trong ngành công nghiệp ô tô. Cụ thể là việc thay thế các động cơ chạy bằng xăng dầu sang các động cơ sử dụng pin lithium. Sự thay đổi này hiện đang được thúc đẩy bởi một loạt đầu tư lớn từ các công ty trong ngành ô tô thế giới như Toyota và Tesla. Tại Việt Nam, VinFast cũng đang đón đầu sự thay đổi này với việc rót vốn đầu tư vào các startup công nghệ về pin lithium.

Ý tưởng về xe điện thực tế đã được hình thành vào những năm đầu của thế kỷ XVIII, khi con người nhận ra những hạn chế của động cơ xăng như khí thải và sự phụ thuộc vào nguồn tài nguyên dầu mỏ. Tuy nhiên, tại thời điểm đó, pin dùng trong xe điện rất đắt đỏ và không hiệu quả. Các tiến bộ khoa học đã cho ra đời một loại pin mới được gọi là lithium có mật độ tích trữ năng lượng lớn

và phù hợp để ứng dụng trong xe điện. Đây chính là chìa khoá thúc đẩy sự thay đổi trong ngành công nghiệp ô tô. Câu hỏi được đặt ra là sau sự thành công của pin lithium thì công nghệ mới nào sẽ được ứng dụng để ô tô sử dụng năng lượng hiệu quả hơn?

Tiềm năng ứng dụng của vật liệu TE cho xe ô tô

Khi động cơ hoạt động sẽ sinh ra nhiệt, được gọi là nhiệt thải. Nhiệt thải này cũng có thể được chuyển hoá thành năng lượng điện, sau đó được tích trữ ngược lại vào pin. Công nghệ này được gọi là TEG (Thermoelectric generator). Chúng ta cũng có thể chuyển hoá điện năng thành nhiệt năng, được gọi là TEC (Thermoelectric cooler). Công nghệ TEG và TEC đã được biết đến lần đầu tiên vào năm 1821, khi nhà khoa học người Đức Thomas Johann Seebeck phát hiện ra một dòng điện trong dây dẫn khi cho một đầu dây dẫn đó tiếp xúc với nguồn nhiệt nóng, đầu còn lại tiếp xúc với nguồn nhiệt lạnh. Tỷ

lệ giữa hiệu điện thế đầu ra và sự chênh lệch nhiệt độ đầu vào được gọi là hệ số Seebeck (S). Đối với một thiết bị TE, hiệu quả chuyển hoá năng lượng được đặc trưng bởi một tham số bằng khen không có thứ nguyên (ZT), được định nghĩa như sau:

$$ZT = \frac{S^2 \sigma}{\kappa} T$$

trong đó: σ là độ dẫn điện; κ là độ dẫn nhiệt; T là nhiệt độ trung bình giữa đầu nóng và đầu lạnh.

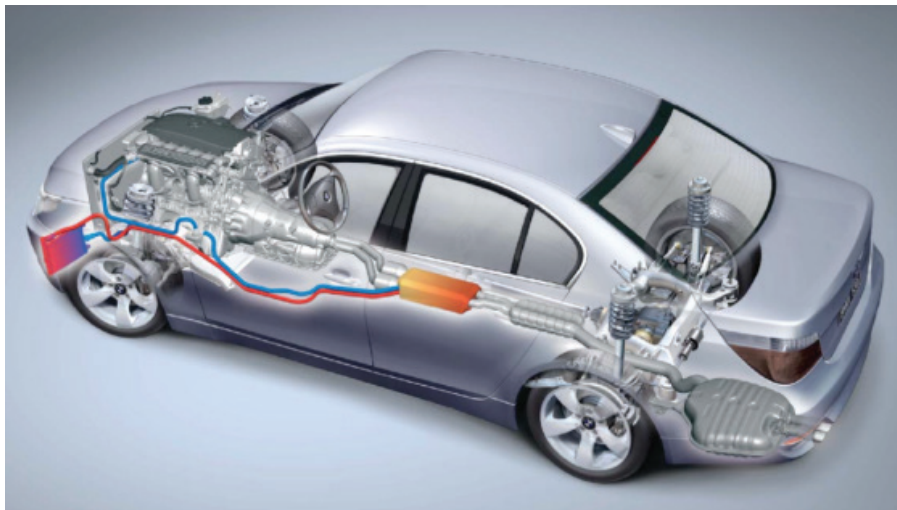
Vào những năm 1950, vật liệu TE chủ yếu được biết đến là vật liệu bán dẫn Bi_2Te_3 . Đây cũng là thời điểm các chất bán dẫn thu hút sự chú ý của hầu hết các ngành khoa học. Vật liệu Bi_2Te_3 có giá trị $ZT \sim 0,6$ tại nhiệt độ phòng. Giá trị này được coi là phù hợp cho một số ứng dụng thực tế. Ví dụ, năm 1976, NASA đã sử dụng TE cho tàu không gian Voyager 1 và 2 [1, 2]. Việc sử dụng các thiết bị TE đã giúp thu hồi nhiệt thải từ pin hạt nhân trong tàu không gian. Năm 1999, Hãng Seiko cũng sử dụng TE trong đồng hồ đeo tay của họ.

*Nhiệt thải là nhiệt năng dư thừa khi chuyển hoá năng lượng trong một động cơ bất kỳ.

Sự chênh lệch nhiệt độ giữa cơ thể và môi trường được chuyển hoá thành năng lượng để duy trì hoạt động của đồng hồ. Tuy nhiên, để ứng dụng trong xe ô tô, vật liệu TE cần có giá trị ZT tối thiểu là 2. Với $ZT=2$, hiệu quả chuyển đổi năng lượng sẽ đạt được khoảng 20% tại nhiệt độ phòng [3], khi đó hiệu suất chuyển đổi năng lượng của TE có thể so sánh với các công nghệ chuyển hoá năng lượng hiện nay như pin mặt trời. Mặc dù vẫn còn một số hạn chế như giá vật liệu đắt đỏ, nhưng các vật liệu có $ZT>2$ đã thực sự được khám phá trong những năm gần đây. Do đó, việc hiện thực hoá ứng dụng TE trong xe ô tô là hoàn toàn khả thi trong giai đoạn này.

TE thu hoạch năng lượng và làm mát trong xe ô tô như thế nào?

Đối với việc thu hoạch năng lượng trong xe ô tô, chúng ta có thể sử dụng TEG để thu hồi nhiệt thải và chuyển hoá chúng thành năng lượng điện. Thực tế hệ thống TEG đã được ứng dụng trong các dòng xe của BMW từ năm 2008. Các kỹ sư của BMW đã lắp đặt máy phát điện dựa trên nhiệt điện trong ống xả dưới gầm xe và trên bộ tản nhiệt của hệ thống tuần hoàn không khí (hình 1). Thiết bị này có thể cung cấp công suất tối đa là 330 W trên dòng xe BMW 116i. Công suất này tương đối thấp đối với xe ô tô, tuy nhiên với việc sử dụng các vật liệu mới, hệ thống TEG trên các mẫu xe BMW 750iA hiện nay đã có công suất tối đa lên tới 1.000 W [4]. BMW cũng báo cáo rằng, TEG có thể giúp giảm lượng tiêu thụ nhiên liệu lên đến 5% trong điều kiện lái xe thực tế hàng ngày.



Hình 1. Thiết bị TE được gắn dọc theo ống xả và hệ thống tuần hoàn không khí của xe ô tô.



Hình 2. Các thiết bị TEC có thể được sử dụng để sưởi hoặc làm mát không khí trong xe ô tô [5].

Sự thành công của TEG đối với động cơ xăng cũng có thể được áp dụng tương tự cho động cơ sử dụng năng lượng điện ở xe điện trong tương lai.

Để tối ưu hoá năng lượng sử dụng trong các hệ thống sưởi và làm mát, các hệ thống TEC sẽ được đặt trực tiếp tại vị trí người ngồi trên xe, thay vì làm ấm hoặc lạnh toàn bộ không khí trong xe (hình 2). Thế hệ xe điện tiếp theo

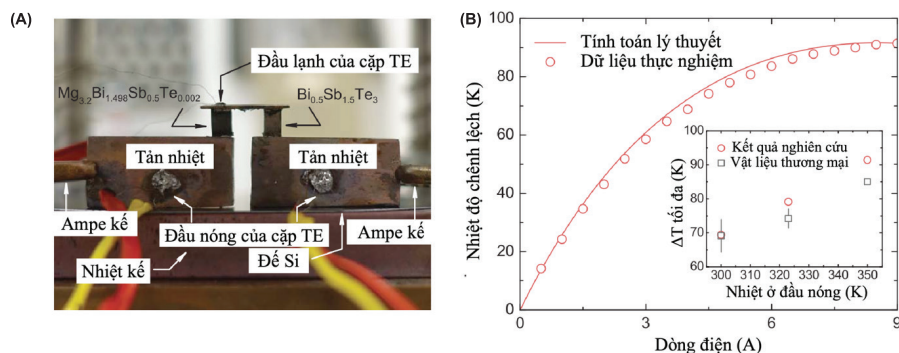
có thể sớm áp dụng giải pháp này bởi vì mỗi một Watt dành cho việc kiểm soát nhiệt độ không khí trong xe cũng dẫn đến việc kém hiệu quả trong việc sử dụng năng lượng điện từ pin lithium. Hệ thống sưởi và làm mát sử dụng thiết bị TEC có thể chuyển hoá trực tiếp điện năng thành nhiệt năng tại các vị trí lắp đặt. Do đó, các thiết bị này sẽ giúp phân bổ việc kiểm soát nhiệt độ chính xác

tại những vị trí cần thiết như vô lăng, cửa kính và ghế ngồi. Các dòng xe ô tô hiện nay yêu cầu một công suất lên đến 5 kW cho hệ thống điều hoà không khí trong xe. Tuy nhiên với hệ thống TEC, các thế hệ xe ô tô mới có thể chỉ phải sử dụng khoảng 100-200 W để làm mát ghế ngồi và các vị trí khác trong xe.

Vật liệu TE giá rẻ cho xe ô tô

Các thiết bị chuyển đổi năng lượng thông thường như động cơ xăng dầu hay pin mặt trời đều đòi hỏi nhiều thành phần cấu tạo với các chi phí vật liệu khác nhau. Tuy nhiên, thành phần chính của một thiết bị chuyển đổi TE chỉ bao gồm vật liệu TE. Do đó giá thành của vật liệu TE sẽ quyết định giá thành của một thiết bị chuyển đổi TE hoàn chỉnh. Giá thành của vật liệu TE được ước tính chiếm gần 1/3 tổng giá thành của một TEG hoặc TEC [7]. Các vật liệu TE thương mại hiện nay bao gồm Bi_2Te_3 và PbTe , là những vật liệu có giá thành cao do Te là nguyên tố hiếm trên trái đất. Giá thành vật liệu cao sẽ hạn chế việc áp dụng hàng loạt TEG/TEC trong ngành công nghiệp nói chung và xe ô tô nói riêng. Do đó, một trong những hướng nghiên cứu TE hiện nay là tìm cách thay thế nguyên tố hiếm Te bằng các nguyên tố phổ biến để giảm giá thành của TEG/TEC.

Các nguyên tố phổ biến trên trái đất hiện nay có thể kể đến như C, Na, Mg, K, trong đó Mg là một trong những nguyên tố tiềm năng nhất để thay thế Te trong Bi_2Te_3 . Gần đây, Mao và cộng sự (2019) [6] trong một công bố trên Tạp chí Science chỉ ra rằng, hiệu quả chuyển đổi TE của Mg_3Bi_2 có



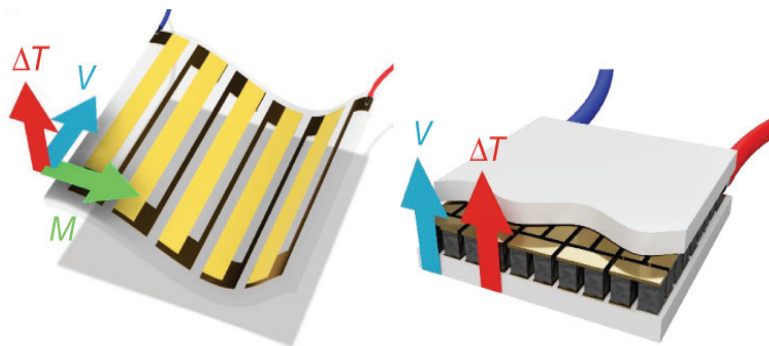
Hình 3. Một TEC dựa trên vật liệu giá rẻ Mg_3Bi_2 (A); quan hệ giữa dòng điện và độ chênh lệch nhiệt độ trong một TEC dựa trên Mg_3Bi_2 (B). Hiệu quả làm mát này có thể so sánh với những vật liệu thương mại hiện nay [6].

thể so sánh với Bi_2Te_3 trong khi giá vật liệu thấp hơn nhiều. Hình 3 cho thấy, thiết bị TEC cho một hiệu suất làm mát cực tốt ở nhiệt độ phòng (tạo ra sự chênh lệch nhiệt độ lên đến gần 90 Kelvin với cường độ dòng điện khoảng 9 A). Hiệu quả làm mát này hoàn toàn phù hợp để ứng dụng TEC dựa trên Mg_3Bi_2 trong xe ô tô. Nghiên cứu lý thuyết của chúng tôi đã cho thấy, hiệu quả chuyển đổi năng lượng cao trong vật liệu Mg_3Bi_2 được bắt nguồn từ tính chất bán kim loại của chúng [8]. Tính chất bán kim loại nghĩa là một vật liệu có khả năng dẫn điện như kim loại nhưng lại chứa một số đặc trưng của chất bán dẫn. Đặc biệt, tính chất bán kim loại của Mg_3Bi_2 liên quan đến tô pô (một khái niệm mới trong vật lý cho các vật liệu có tính chất điện tử không tầm thường) dẫn đến khả năng dẫn điện cao, đồng thời giá trị của hệ số Seebeck cũng cao. Tiềm năng thương mại hoá của Mg_3Bi_2 gần đây cũng được chứng minh bởi nhóm nghiên cứu của Takao Mori đến từ Nhật Bản. Nhóm này đã kết hợp 2 vật liệu là Mg_3Bi_2 và MgAgSb cho một cặp TE. Kết quả cho thấy, công suất đầu ra tối đa của một thiết bị TEG đạt được là

0,12 W với hiệu quả chuyển đổi năng lượng là 2,8% ($ZT \sim 1$) tại nhiệt độ chênh lệch là 95 Kelvin. Mặt khác, đối với một thiết bị TEC, kết quả thu được cho thấy khi áp dụng một dòng điện 5 A, nhiệt độ chênh lệch thu được là 56,5 Kelvin giữa hai đầu của thiết bị. Kết quả này một lần nữa cho thấy, cả TEG và TEC dựa trên vật liệu giá rẻ Mg_3Bi_2 có thể so sánh với vật liệu thương mại Bi_2Te_3 [9]. Ngoài vật liệu giá rẻ là Mg_3Bi_2 được phát hiện gần đây, các vật liệu khác như Mg_3Sb_2 , SnSe ... cũng đang thu hút sự chú ý của cộng đồng khoa học nghiên cứu về TE hiện nay.

Định hướng nghiên cứu TE cho xe ô tô trong tương lai

Một trong những khó khăn lớn của nghiên cứu TE nói chung và TE cho xe ô tô nói riêng là hiệu quả chuyển đổi của chúng tương đối thấp. Mặc dù vật liệu giá rẻ Mg_3Bi_2 có hiệu quả chuyển đổi TE tương đương với vật liệu thương mại Bi_2Te_3 như thảo luận ở trên. Tuy nhiên, bản thân vật liệu Bi_2Te_3 có một hiệu quả chuyển đổi năng lượng không cao (khoảng 3%). Bên cạnh đó, một thiết bị TEG hoặc TEC cần một cặp TE như ở



Hình 4. So sánh một thiết bị TE ngang (phải) và một thiết bị TE thông thường (trái) [10].

hình 3A. Cặp TE này được thiết kế trong một hình dạng Π . Thực tế một thiết bị TEG/TEC hoàn chỉnh sẽ bao gồm hàng trăm cặp TE được nối tiếp nhau. Việc sử dụng hình dạng Π sẽ dẫn đến việc chế tạo phức tạp và hạn chế một số ứng dụng liên quan đến hình dạng của thiết bị. Để vượt qua những hạn chế này, một thiết bị TE ngang có thể là một giải pháp. Thiết bị TE ngang có thiết kế đơn giản và nguyên lý hoạt động hoàn toàn khác thiết bị TE thông thường. Với một thiết bị TE thông thường, chiều của dòng điện V sẽ cùng chiều với dòng nhiệt ΔT (hình 4, trái). Điều này được biết đến như là hiệu ứng Seebeck đã được đề cập ở phần trên. Tuy nhiên, một thiết bị TE ngang sẽ có chiều của dòng điện V vuông góc với chiều của ΔT , được gọi là hiệu ứng Nernst. Hiệu ứng này cũng đòi hỏi một từ trường M , trong đó chiều của M vuông góc với chiều của V và ΔT . Hiệu quả chuyển đổi TE của một thiết bị TE ngang dựa trên hiệu ứng Nernst được biết là cao hơn so với một TEG dựa trên hiệu ứng Seebeck. Điều này là do khi một dòng điện được tạo ra thì bản thân dòng điện đó cũng sinh ra một dòng nhiệt. Hiệu ứng này được biết là Peltier (ngược

với hiệu ứng Seebeck). Đối với một thiết bị TEG thông thường thì chiều của dòng nhiệt phát sinh này cùng chiều với ΔT ban đầu. Do đó, chúng làm bão hòa nhanh độ chênh lệch nhiệt độ, dẫn đến giảm hiệu quả chuyển đổi TE. Tuy nhiên, đối với một thiết bị TE ngang, chiều của dòng nhiệt phát sinh vuông góc với chiều của ΔT . Do đó, hiệu ứng Peltier không gây ảnh hưởng đến hiệu quả chuyển đổi năng lượng.

Phân tích ở trên cho thấy, thiết bị TE ngang là lý tưởng cho xe ô tô bởi thiết kế đơn giản và có hiệu suất chuyển đổi năng lượng tốt. Việc đòi hỏi một từ trường ngoài có thể gây ra khó khăn trong thiết kế. Tuy nhiên, các vật liệu tô pô mới hiện nay cho thấy một hiệu ứng được gọi là “hiệu ứng Nernst dị thường”, hiệu ứng này cho thấy các tính chất giống như hiệu ứng Nernst nhưng lại không cần một từ trường ngoài. Điều này là do đặc trưng của vật liệu tô pô. Việc còn lại của các nhà nghiên cứu hiện nay là tìm kiếm các vật liệu tô pô cho hiệu suất chuyển đổi năng lượng cao trong một thiết bị TE ngang. Chủ đề này đang thu hút sự quan tâm của cộng đồng nghiên cứu về TE. Đặc biệt, Giải Nobel vật lý 2016 cho vật liệu tô

pô đã thúc đẩy một loạt nghiên cứu về vật liệu này và nghiên cứu về TE ngang có thể hưởng lợi từ các nghiên cứu trước đó về vật liệu tô pô ✍

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] N.T. Hung, R. Saito (2021), “The origin of quantum effects in low-dimensional thermoelectric materials”, *Adv. Quantum Technol.*, **4**, DOI: 10.1002/qute.202000115.
- [2] <http://www.nasa.gov>.
- [3] L.E. Bell (2008), “Cooling, heating, generating power, and recovering waste heat with thermoelectric systems”, *Science*, **321**, pp.1457-1461.
- [4] J. Liebl, et al. (2009), “The thermoelectric generator from BMW is making use of waste heat”, *MTZ Worldwide*, **70**, pp.4-11.
- [5] DTP Thermoelectrics, Altadena, CA 91001, USA.
- [6] J. Mao, et al. (2019), “High thermoelectric cooling performance of n-type Mg_3Bi_2 -based materials”, *Science*, **365**, pp.495-498.
- [7] S. LeBlanc, et al. (2014), “Material and manufacturing cost considerations for thermoelectrics”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **32**, pp.313-327.
- [8] N.T. Hung, et al. (2022), “Enhanced thermoelectric performance by van Hove singularities in the density of states of type-II nodal-line semimetals”, *Phys. Rev. B*, **105**, DOI: 10.1103/PhysRevB.105.115142.
- [9] Z. Liu, et al. (2022), “Maximizing the performance of n-type Mg_3Bi_2 based materials for room-temperature power generation and thermoelectric cooling”, *Nat. Commun.*, **13**, DOI: 10.1038/s41467-022-28798-4.
- [10] A. Sakai, et al. (2020), “Iron-based binary ferromagnets for transverse thermoelectric conversion”, *Nature*, **581**, pp.53-57.