

# ĐỘNG CƠ STIRLING: TỪ THIẾT KẾ ĐẾN KHẢ NĂNG ỨNG DỤNG VÀO THỰC TẾ VÀ GIÁO DỤC

## STIRLING ENGINE: FROM DESIGN TO APPLICATION INTO PRACTICE AND EDUCATION

Phạm Văn Ngành<sup>1</sup>, Hà Anh Tùng<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Công ty cổ phần đầu tư xây dựng Cát Linh

<sup>2</sup> Trường đại học Bách Khoa TP. Hồ Chí Minh

Ngày tòa soạn nhận bài 16/10/2015, ngày phản biện đánh giá 04/11/2015, ngày chấp nhận đăng 15/02/2016.

### TÓM TẮT

Động cơ Stirling là một dạng động cơ nhiệt đốt ngoài có thể sử dụng nhiều nguồn nhiên liệu khác nhau từ các dạng truyền thống (than, dầu, củi, trấu, vv...) cho đến các nguồn năng lượng tái tạo (năng lượng mặt trời, tận dụng nhiệt thải, vv...). Bài báo tập trung trình bày những nét chính về lịch sử phát triển, đặc điểm hoạt động và phương pháp thiết kế một số loại động cơ Stirling, từ đó đưa ra khả năng ứng dụng vào thực tế cũng như đào tạo bậc đại học cho sinh viên chuyên ngành Kỹ thuật Nhiệt ở nước ta hiện nay.

**Từ khóa:** Động cơ Stirling; năng lượng tái tạo; thiết kế; chương trình đào tạo.

### ABSTRACT

Stirling engine is an external combustion engine which is able to use different fuel sources from traditional forms (coal, oil, firewood, rice husks, etc ...) to renewable energy sources (solar, waste energy, etc ...). This paper focuses on presenting the main features of development history, performance characteristics, design methods of typical types of Stirling engine and the possibility of their applications into practice as well as into the current university curriculum for thermal engineering students in Vietnam.

**Keywords:** Stirling engines; sustainable energy; design; curriculum.

## 1. TỔNG QUAN VỀ ĐỘNG CƠ STIRLING

Động cơ Stirling là một dạng động cơ nhiệt đốt ngoài sử dụng piston, được sáng chế bởi Robert Stirling vào năm 1816 [1]. Về nguyên lý hoạt động, động cơ Stirling sử dụng một loại chất khí (thường là không khí, hydrogen hoặc helium) làm môi chất hoạt động trong một chu trình khép kín. Khác với động cơ đốt trong, động cơ Stirling không có van hút và xả, nghĩa là không có sự lưu thông vào ra của môi chất. Quá trình hoạt động của động cơ Stirling dựa trên sự giãn nở và co lại của khối khí trong quá trình chuyển động trong chu trình kín bên trong động cơ nhờ sự chênh lệch nhiệt độ giữa hai nguồn nóng, lạnh. Trong quá trình hoạt động, khối khí trong động cơ sẽ được đẩy qua đẩy lại từ phần nóng sang phần lạnh hoặc ngược lại, nhờ vào sự di chuyển của các piston hoặc các con chạy

có chức năng hoán đổi thể tích chứa khí giữa hai phần. Khối khí khi dao động qua lại giữa phần nóng và phần lạnh sẽ thực hiện công lên một piston chịu lực, qua đó vận hành bánh đà và máy móc bên ngoài.

Từ ứng dụng thực tế ban đầu của một động cơ Stirling trong việc bơm nước trong mỏ đá vào năm 1818 [2], động cơ Stirling đã phát triển khá mạnh trong nửa cuối thế kỷ 19 [2-5]. Đến đầu thế kỷ 20, với sự xuất hiện của các loại động cơ đốt trong sử dụng chu trình nhiệt Otto và Diesel, cùng với sự bùng nổ của ngành công nghiệp khai thác và sản xuất dầu mỏ, các loại động cơ đốt ngoài như động cơ Stirling và động cơ hơi nước đã dần bị thay thế [6]. Tuy nhiên bắt đầu từ giai đoạn sau của thế kỷ 20, do các ảnh hưởng xấu đến môi trường và trái đất (hiệu ứng nhà kính, sự nóng

lên của trái đất, nước biển dâng cao, vv...), xu hướng sử dụng các nguồn nhiên liệu hóa thạch đang được nhiều quốc gia khuyến nghị cắt giảm dần để chuyển đổi sang các nguồn nhiên liệu sạch và thân thiện với môi trường hơn. Xu hướng này đã thúc đẩy nhiều cá nhân, tổ chức cũng như các công ty trong thời gian gần đây quay lại tập trung nghiên cứu, chế tạo và phát triển nhiều loại động cơ Stirling [7-8] để đưa vào sử dụng trong nhiều lĩnh vực khác nhau như: máy phát điện dùng năng lượng mặt trời [9], động cơ xe hơi [10], bộ phận làm mát chip máy tính [11], động cơ tàu ngầm [12], vv...

Trong thời gian gần đây, các công trình nghiên cứu về động cơ Stirling đã thu hút nhiều sự quan tâm của nhiều nhà khoa học, tổ chức nghiên cứu trên thế giới. Một số hướng nghiên cứu chính có thể kể đến như sau:

- Hướng nghiên cứu về thay đổi môi chất sử dụng bên trong động cơ để tăng hiệu suất và công suất động cơ, điển hình như một loạt công trình nghiên cứu của Hãng Philips nhằm phát triển dòng động cơ Stirling sử dụng Hydro với dãy công suất hoạt động lên đến 30kW, hiệu suất đạt đến 36% [8].
- Hướng nghiên cứu sử dụng Biogas làm nguồn nhiên liệu cấp nhiệt cho động cơ Stirling để phát điện cho nông thôn. Ví dụ như Podesser [13] đã thiết kế và chế tạo một loại ĐC Stirling sử dụng nhiên liệu biogas để cung cấp điện cho vùng nông thôn, công suất 3.2 kW, hiệu suất 25%.
- Một số hướng nghiên cứu khác tập trung vào thiết kế, chế tạo các hệ thống sản xuất điện từ Năng lượng mặt trời, sử dụng động cơ Stirling với các kiểu kết cấu khác nhau nhằm tăng hiệu suất sử dụng [14, 15].

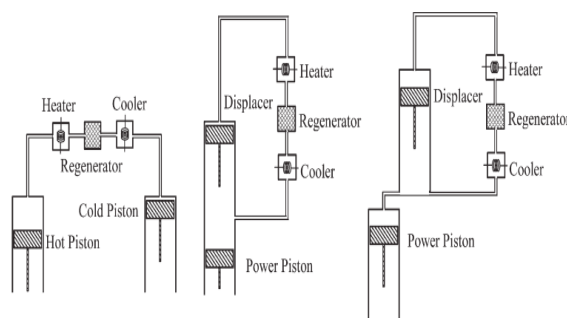
Trong khu vực Đông Nam Á, nhiều công trình nghiên cứu từ lý thuyết đến chế tạo và ứng dụng vào thực tế liên quan đến động cơ Stirling đã được các nước như Thái Lan, Malaysia, Singapore, Trung Quốc, vv... tập trung phát triển trong những năm trở lại đây [16-21]. Trong số đó, đa phần các tác giả tập trung nghiên cứu khả năng phát điện của động cơ

Stirling [21], ngoài ra một số tác giả khác đi vào phân tích ứng dụng động cơ Stirling trong việc tận dụng nhiệt thải [16, 17], bơm nước [18, 19], cũng như một số ứng dụng lạnh [20].

Như vậy, các công trình nghiên cứu về động cơ Stirling trên thế giới đã hình thành và phát triển từ đầu thế kỷ 20 đến tận ngày nay, tạo thành một hệ thống kiến thức mang tính kế thừa khá cao, phát triển song hành giữa lý thuyết và thực nghiệm, kết hợp từ việc nghiên cứu chế tạo từ các mô hình nhỏ cho đến các ứng dụng thực tế phức tạp. Tại Việt Nam, các công trình nghiên cứu về loại động cơ đốt ngoài này còn khá hạn chế. Một số công trình nghiên cứu chính có thể kể đến như: nghiên cứu khảo sát công nghệ chảo nhiệt điện mặt trời (CNĐMT) và khả năng chế tạo tại Việt Nam [22]; nghiên cứu động cơ Stirling nhận nhiệt từ bộ thu năng lượng mặt trời để sinh công bơm nước [23]; luận văn Thạc sĩ “Ứng dụng động cơ Stirling trong các thiết bị làm lạnh” [24], vv... Các công trình nghiên cứu trong nước nhìn chung còn mang tính rời rạc, chưa có sự tổng hợp và thống nhất giữa tính toán lý thuyết và thực nghiệm. Bên cạnh đó các kết quả đạt được để có thể áp dụng vào thực tế vẫn còn một khoảng cách khá xa.

## 2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VỀ TÍNH TOÁN ĐỘNG CƠ STIRLING VÀ MỘT SỐ KẾT QUẢ ĐẠT ĐƯỢC

Về kết cấu, nhìn chung các loại động cơ Stirling đã chế tạo trên thế giới có thể được xếp vào một trong ba loại Alpha, Beta, và Gamma như thể hiện trên Hình 1.



a) Loại Alpha b) Loại Beta c) Loại Gamma

**Hình 1.** Kết cấu ba loại động cơ Stirling

Về nguyên lý hoạt động, cả 3 loại động cơ Stirling trên đều có chung đặc điểm là cùng

có 3 bộ phận chính bố trí nối tiếp với nhau là: bộ phận nhận nhiệt (Heater), bộ phận hồi nhiệt (Regenerator) và bộ phận làm mát (Cooler). Tuy nhiên, do đặc điểm cấu tạo (số xy lanh, cách bố trí piston trong xy lanh, vv...) khác nhau, nên 3 loại động cơ **Alpha**, **Beta** và **Gamma** sẽ có một số đặc điểm khác nhau như thể hiện trong Bảng 1 bên dưới.

**Bảng 1.** Đặc điểm về cấu tạo và hoạt động của 3 loại động cơ Stirling

| TT | Loại động cơ Stirling | Đặc điểm về cấu tạo và hoạt động   |
|----|-----------------------|--|
| 1  | Alpha                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Có 2 xy lanh;</li> <li>- Phần nhận nhiệt (Heater) và làm mát (Cooler) nằm trên 2 xy lanh khác nhau;</li> <li>- Tỉ số nén lớn;</li> <li>- Cần roong kín ở cả 2 pittông;</li> <li>- Pittông sinh công phải làm việc ở nhiệt độ cao.</li> </ul>  |
| 2  | Beta                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Chỉ có 1 xy lanh;</li> <li>- Phần nhận nhiệt (Heater) và làm mát (Cooler) nằm trên cùng một xy lanh;</li> <li>- Tỉ số nén nhỏ hơn loại Alpha;</li> <li>- Chỉ cần roong kín ở 1 pittông, pittông còn lại di chuyển không ma sát trong xy lanh;</li> <li>- Pittông sinh công làm việc ở nhiệt độ thấp.</li> </ul>       |
| 3  | Gamma                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 2 xy lanh tách biệt;</li> <li>- Phần nhận nhiệt (Heater) và làm mát (Cooler) nằm trên 2 xy lanh khác nhau;</li> <li>- Tỉ số nén nhỏ hơn loại Alpha;</li> <li>- Chỉ cần roong kín ở 1 pittông, pittông còn lại di chuyển không ma sát trong xy lanh;</li> <li>- Pittông sinh công làm việc ở nhiệt độ thấp.</li> </ul> |

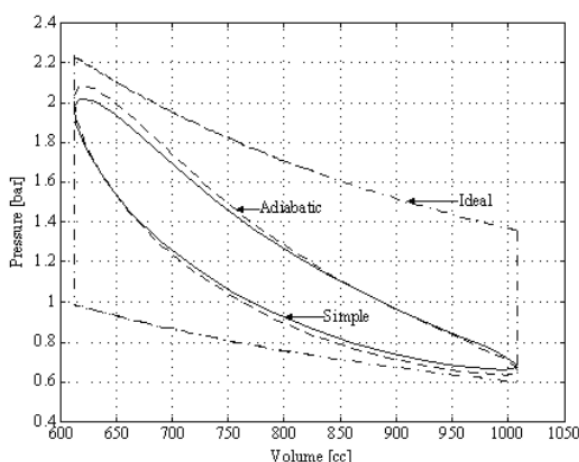
Tương ứng với 3 loại động cơ Stirling trên, nhiều mô hình tính toán lý thuyết đã được phát triển trên thế giới. Mô hình lý thuyết đầu tiên được phát triển bởi Schmidt [25] dựa trên giả thuyết quá trình nén và giãn nở của khí bên trong động cơ là quá trình đẳng nhiệt của khí lý tưởng. Lý thuyết của Schmidt dẫn đến việc thiết lập hệ các phương trình nhiệt động tuyến tính có thể giải dễ dàng, từ đó xác định công suất và hiệu suất nhiệt của động cơ Stirling. Do tính chất đơn giản và sai lệch chấp nhận được giữa kết quả lý thuyết và thực tế, mô hình tính toán của Schmidt đã được sử dụng rộng rãi trong việc thiết kế sơ bộ động cơ Stirling. Tuy nhiên, một số nghiên cứu cho thấy khi tốc độ động cơ vượt quá 1000 vòng/phút, quá trình nén và giãn nở của khí trong xy lanh động cơ Stirling gần với quá trình đoạn nhiệt hơn là quá trình đẳng nhiệt [26], dẫn đến việc hình thành và phát triển của mô hình đoạn nhiệt lý tưởng [27, 28] và tiếp theo là đoạn nhiệt không lý tưởng có xét đến ảnh hưởng của các tổn thất do ma sát dòng và tổn thất nhiệt tại bộ hồi nhiệt [29-31]. Với hai mô hình tính toán đoạn nhiệt lý tưởng và đoạn nhiệt không lý tưởng, quan hệ giữa các thông số áp suất, thể tích, nhiệt độ tại các vùng trong động cơ Stirling được thể hiện qua hệ các phương trình vi phân và được xác định bằng phương pháp số. Bài báo này không trình bày chi tiết về trình tự tính toán động cơ Stirling sử dụng ba mô hình trên, tuy nhiên việc đánh giá mức độ khác biệt giữa ba phương pháp lý thuyết này với kết quả thực nghiệm có thể được kiểm chứng một cách tương đối thông qua các kết quả tham khảo trong tài liệu [32] (Xem Bảng 2, 3 và Hình 2).

**Bảng 2.** Thông số thực nghiệm của động cơ [32]

| Thông số hoạt động                | Giá trị   |
|-----------------------------------|-----------|
| Áp suất trung bình ( $P_{mean}$ ) | 1.148 bar |
| Nhiệt độ nguồn lạnh ( $T_k$ )     | 46°C      |
| Nhiệt độ nguồn nóng ( $T_n$ )     | 448°C     |
| Tần số (f)                        | 1.22 Hz   |

**Bảng 3.** Kết quả mô phỏng và thực nghiệm [32]

|               | Thực nghiệm | Đoạn nhiệt không lý tưởng | Đoạn nhiệt lý tưởng | Schmidt |
|---------------|-------------|---------------------------|---------------------|---------|
| Công suất (W) | 14          | 14.21                     | 16.2                | 21.81   |
| Hiệu suất (%) | 35.1        | 38.4                      | 42.1                | 55.76   |



**Hình 2.** Chu trình hoạt động của động cơ theo 3 phương pháp Schmidt (Ideal), đoạn nhiệt lý tưởng (Adiabatic) và đoạn nhiệt không lý tưởng (Simple)

Kết quả cho thấy phương pháp Schmidt có sai số nhiều nhất so với hai phương pháp còn lại. Bảng 3 cũng cho thấy phân tích lý thuyết theo đoạn nhiệt không lý tưởng là gần với kết quả thực nghiệm nhất.

### 3. KHẢ NĂNG ỨNG DỤNG VÀO THỰC TẾ VÀ ĐÀO TẠO BẠC ĐẠI HỌC

Kết quả từ các công trình nghiên cứu trên thế giới cho thấy về mặt lý thuyết, động cơ Stirling có thể đạt được 50% đến 80% hiệu suất lý tưởng của chu trình nhiệt động lực học thuận nghịch (như chu trình Carnot) trong việc chuyển hóa nhiệt năng thành công năng. Khác với động cơ đốt trong, loại động cơ nhiệt này có thể hoạt động được với nhiều nguồn nhiệt

khác nhau, từ các nhiên liệu rẻ tiền, sẵn có tại địa phương cho đến các nguồn năng lượng tái tạo như năng lượng mặt trời, nhiệt sinh ra do phản ứng hóa học, các nguồn nhiệt thải, đến phản ứng hạt nhân. Bên cạnh các ưu điểm nổi trội, động cơ Stirling cũng có các nhược điểm riêng của nó. Dựa trên việc phân tích các công trình nghiên cứu về động cơ Stirling, các ưu, nhược điểm chính của loại động cơ này có thể được tổng hợp như sau:

#### Ưu điểm:

- Dễ dàng sử dụng với nhiều nguồn nhiệt khác nhau: đốt nóng trực tiếp, năng lượng mặt trời, địa nhiệt, phản ứng hạt nhân, nhiệt thải công nghiệp, vv...;
- Có thể hoạt động với độ chênh nhiệt độ giữa nguồn nóng và nguồn lạnh chỉ từ vài chục độ Celcius;
- Cấu tạo đơn giản hơn động cơ đốt trong do không cần van hút, van xả; buồng đốt có cấu tạo đơn giản, cần ít dầu bôi trơn, vv...;
- Hoạt động êm, ít rung động và ổn định hơn các động cơ đốt trong;
- Bảo trì đơn giản hơn động cơ đốt trong;
- An toàn hơn trong vận hành do áp suất làm việc thấp hơn các loại động cơ hơi nước, động cơ đốt trong;
- Môi chất làm việc bên trong là không khí hoặc một loại khí trơ nào đó (như Helium), hoạt động trong không gian kín bên trong động cơ nên không có khả năng gây cháy nổ, độ an toàn sử dụng cao;
- Buồng đốt đặt ngoài, việc đốt diễn ra liên tục, có thể kiểm soát không để dư thừa nhiên liệu, nên hạn chế phát thải độc hại so với việc đốt theo chu trình trong buồng bên trong;
- Không cần nguồn cung cấp không khí (nếu nguồn nhiệt không lấy từ việc đốt nhiên liệu) nên có thể hoạt động dưới tàu ngầm hay trong vũ trụ;

- Có thể khởi động dễ dàng hơn trong thời tiết giá lạnh so với các động cơ đốt trong.

**Nhược điểm:**

- Do hệ số truyền nhiệt của không khí (cũng như các loại khí trơ khác sử dụng trong động cơ Stirling) không cao, động cơ Stirling (nhất là với các loại hoạt động với độ chênh nhiệt độ thấp giữa nguồn nóng và nguồn lạnh) có kích thước lớn hơn động cơ đốt trong ở cùng công suất, dẫn đến chi phí tiêu hao vật liệu chế tạo trên một đơn vị công suất cao hơn động cơ đốt trong;
- Khác với động cơ đốt trong, động cơ Stirling có sự chênh lệch nhiệt độ khá lớn giữa hai phần nóng và phần lạnh, dẫn đến yêu cầu về chất lượng vật liệu sử dụng và cần có bộ phận trao đổi nhiệt ở phần nóng và phần lạnh có hiệu suất cao;
- Do sự phức tạp của quá trình trao đổi nhiệt trong động cơ Stirling, chu trình nhiệt thực tế của động cơ có hiệu suất thấp hơn khá nhiều so với chu trình lý thuyết;
- Động cơ Stirling không thể khởi động tức thì mà cần có thời gian làm nóng, điều này dẫn đến loại động cơ này thích hợp nhiều hơn với các ứng dụng có vận tốc hoạt động đều, ổn định.

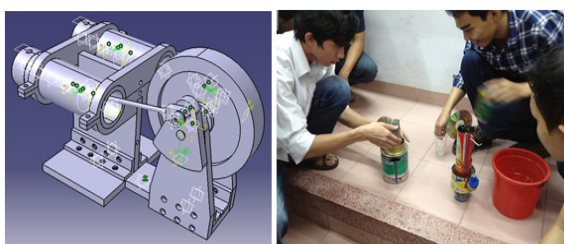
Với các đặc điểm về hoạt động như trên, động cơ Stirling có tiềm năng lớn ở nước ta trong việc tận dụng nhiều nguồn nhiên liệu rẻ tiền sẵn có tại địa phương, các vùng sâu, vùng xa, hải đảo, vv... để cung cấp cơ năng ứng dụng trong nhiều lĩnh vực trong đời sống như: phát điện, bơm nước, xay xát lúa, sản xuất nước đá, làm lạnh vv... Ngoài ra, do đặc điểm có khả năng hoạt động với độ chênh nhiệt độ thấp, một hướng đi cũng rất đáng chú ý của động cơ Stirling tại Việt Nam là khả năng ứng dụng của loại động cơ này trong việc tận dụng các nguồn nhiệt thải từ hoạt động sản xuất công nghiệp và nông nghiệp (như khói

thải tại các nhà máy xi măng, luyện cán thép, sản xuất phân bón, vv...), cũng như sử dụng năng lượng mặt trời làm nguồn cấp nhiệt cho động cơ.

Bên cạnh tiềm năng ứng dụng trong thực tế, động cơ Stirling còn có thể được sử dụng như một công cụ giảng dạy hữu ích trong trường Đại học, đặc biệt thích hợp cho các sinh viên khoa Cơ khí, Giao thông và Nhiệt lạnh. Một số cách thức tích hợp động cơ Stirling vào các môn học (như “Nhiệt động lực học kỹ thuật”, “Truyền nhiệt”, “Động cơ nhiệt”, “Thiết kế cơ khí”, “Đồ án môn học”, vv...) có thể áp dụng như sau:

- Sử dụng như một mô hình trực quan giảng dạy trên lớp: trong cách thức này, người giáo viên sẽ sử dụng một mô hình động cơ Stirling có bán sẵn trên thị trường với thân xy lanh được chế tạo bằng một số vật liệu trong suốt (thủy tinh, nhựa), hoạt động với các nguồn nóng đơn giản (đèn cầy, bấc đốt từ cồn) để giúp sinh viên dễ dàng quan sát trực tiếp hoạt động của các bộ phận động cơ từ trong ra ngoài, từ đó phân tích, thảo luận cũng như tự tay đo đạc các thông số về nhiệt độ nguồn nóng, nguồn lạnh, kích thước động cơ, vv... và vận dụng các kiến thức lý thuyết vào việc tính toán các quá trình trao đổi nhiệt liên quan.
- Sử dụng như một bài tập thiết kế máy: trong cách thức này, từ yêu cầu ban đầu về công suất động cơ, sinh viên có thể vận dụng một trong 3 mô hình lý thuyết (đẳng nhiệt, đoạn nhiệt lý tưởng, đoạn nhiệt không lý tưởng) để tính toán và thiết kế sơ bộ một loại động cơ Stirling (Alpha, Beta hoặc Gamma). Các bản vẽ thiết kế và bản vẽ lắp có thể được giáo viên hướng dẫn và yêu cầu thực hiện với sự hỗ trợ của một số phần mềm thiết kế cơ khí 3D như: Solidworks, Solid edge, Catia, Pro Engineer, vv...
- Sử dụng như một đồ án chế tạo giúp nâng cao kỹ năng làm việc nhóm và tính sáng tạo cho sinh viên: với cách thức

này, người giáo viên có thể giới thiệu động cơ Stirling thông qua các video clips, hình ảnh hoặc một số mô hình thực hiện từ khóa trước, sau đó yêu cầu sinh viên tự tìm hiểu thêm trên Internet, sách vở, vv... và kết hợp với các kiến thức chuyên ngành đã học để tự chế tạo một mô hình động cơ Stirling đơn giản từ các vật dụng sẵn có (lon nước ngọt, đĩa CD, dây kẽm, vv...). Tùy theo mức độ đơn giản hay phức tạp mà đề án này có thể được yêu cầu thực hiện theo cá nhân hay nhóm. Điểm cuối cùng sẽ bao gồm phần đánh giá việc trình bày, báo cáo của sinh viên về trình tự tính toán, thiết kế, chế tạo và phần đánh giá hoạt động thực tế của mô hình.



a) Mô hình động cơ thiết kế 3D      b) Chế tạo và thử nghiệm động cơ Stirling trên lớp từ các vật dụng đơn giản

**Hình 3.** Ứng dụng thiết kế và chế tạo động cơ Stirling trong chương trình đào tạo kỹ sư ngành Kỹ thuật nhiệt trường Đại học Bách Khoa Tp.HCM.

Hình 3 thể hiện một số hình ảnh về việc áp dụng tích hợp động cơ Stirling trong quá trình giảng dạy một số môn chuyên ngành Nhiệt lạnh tại trường Đại học Bách khoa Tp.HCM. Kết quả cho thấy việc ứng dụng các mô hình tính toán, thiết kế và chế tạo như động cơ Stirling vào giảng dạy đã mang lại hiệu quả tốt trong việc nâng cao tính năng động, sáng tạo của sinh viên, giúp các em hiểu và yêu thích hơn ngành kỹ thuật mà mình đã chọn.

#### 4. KẾT LUẬN

Trải qua lịch sử phát triển gần 200 năm, động cơ Stirling vẫn đang chứng tỏ được vai trò và vị trí của mình như một thiết bị hữu ích có khả năng chuyển đổi được nhiệt lượng cung cấp từ nhiều nguồn năng lượng khác nhau thành cơ năng sử dụng trong nhiều ứng dụng thực tế. Thông qua bài báo, các tác giả mong muốn mang lại một cách nhìn rõ hơn về các tiềm năng ứng dụng trong thực tế cũng như trong giảng dạy của loại động cơ đốt ngoài này, hy vọng từ đó thúc đẩy nhiều nghiên cứu chuyên sâu hơn từ vật liệu, kết cấu bên trong, cách bố trí nguồn nhiệt bên ngoài, vv... của các kỹ sư, chuyên gia, nhà khoa học trong nước nhằm phát triển và áp dụng rộng rãi loại động cơ này tại Việt Nam trong tương lai.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] English patent 4081 of 1816, *Improvements for diminishing the consumption of fuel and in particular an engine capable of being applied to the moving (of) machinery on a principle entirely new.*
- [2] <http://www.stirlinginternational.org/docs/presentations/history.asp>
- [3] J.R. Senft, Ringbom, *Stirling engines*, New York: Oxford University Press, 1993.
- [4] K. Banacha and W. Somchai, A review of solar-powered Stirling engines and low temperature differential Stirling engines, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 7, pp. 131–154, 2003.
- [5] G. Walker, *Stirling engines*, Oxford: Clarendon Press, 1980.
- [6] [http://en.wikipedia.org/wiki/Stirling\\_engine](http://en.wikipedia.org/wiki/Stirling_engine)
- [7] S. H. Walpita, *Development of the solar receiver for a small Stirling engine, Special study project report no. ET-83-1*, Bangkok: Asian Institute of Technology; 1983
- [8] C. D. West, A historical perspective on Stirling engine performance, *Proceedings of the 23rd Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, Paper 889004, Denver: American Society of Mechanical Engineers, 1988.

- [9] *Solar Dish Stirling Systems report for NREL CSP Technology Workshop*, March 7, 2007.
- [10] D. E. William and K. S. Richard, Automotive Stirling Engine Development Project, DOE/NASA/0032-34, NASA CR-190780, *MTI Report 91TR15*, February 1997.
- [11] *World's First Powerless Air Cooler on a Motherboard*, Micro-Star International (MSI), February 29, 2008.
- [12] D. Thimsen, *Stirling Engine Assessment*, Final report of EPRI Project, October 2002.
- [13] E. Prodesser, Electricity production in rural villages with biomass Stirling engine, *Renew Energy*, Vol.16, pp.1049–52, 1999.
- [14] D. M. Artin and R. H. Seth, Stirling Engines for Distributed Low-Cost Solar-Thermal-Electric Power Generation, *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 133, 2011.
- [15] D. Menniti, N. Sorrentino, A. Pinnarelli, A. Burgio, G. Brusco and G. Belli, The concentrated solar power system with Stirling technology in a micro-grid: The simulation model, *2014 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, pp.253-260, 2014.
- [16] V. M. Alpers, K. G. Rajdeysinh, P. B. Jaydeepkumar and J. S. Biren, Waste Heat Recovery using Stirling Engine, *International Journal of Advanced Engineering Technology*, Vol.3, No.1, pp.305-310, 2012.
- [17] M. J. Dadi, I. M. Molvi and A. V. Mehta, The most efficient waste heat recovery device: a gamma type Stirling engine, *International Journal of Advanced Engineering Technology*, January – March, pp.189 – 195, 2012.
- [18] K. B. Rakesh and K. P. Nikul, Review of Stirling Engines for Pumping Water using Solar Energy as a source of Power, *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, Vol. 3, Issue 1, January -February, pp.864-868, 2013.
- [19] [19] K. Pongsakorn, M. Maung, T. Sombat, H. Jongjit, K. Joseph and Z. Belkacem, Development of a new solar thermal engine system for circulating water for aeration, *Solar Energy*, Vol.78, No.4, pp.518-527, 2005.
- [20] O. D. A. Khalid, *Simulation on the Performance of a Stirling Cooler for use in Solar Powered Refrigerator*, Doctor of Philosophy, University of Putra, Malaysia, 2004.
- [21] Y. Li, S. S. Choi and C. Yang, An average-value model of kinematic Stirling engine for the study of variable-speed operations of dish-stirling solar-thermal generating system, *11th IEEE International Conference on Control & Automation (ICCA)*, June 18-20, Taichung, Taiwan, 2014.
- [22] Trịnh Quang Dũng, *Nghiên cứu khảo sát công nghệ chảo nhiệt điện mặt trời và khả năng chế tạo tại Việt Nam*, Đề tài nghiên cứu cấp Sở, Cơ quan chủ trì: Viện Vật lý Tp.HCM, 2014.
- [23] Phan Quang Xung, Phan Quý Trà và Hoàng Dương Hùng, *Nghiên cứu bơm nước sử dụng năng lượng mặt trời*, Đề tài nghiên cứu khoa học trọng điểm cấp Bộ, 2005.
- [24] Trần Quang Thạch, *Ứng dụng động cơ Stirling trong các thiết bị làm lạnh*, Luận văn Thạc sĩ, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp.HCM, 10/2012.
- [25] G. Schmidt, The theory of Lehmann's Calorimetric Machine, *Z.ver.Dtsch.ing*, 15, part 1, 1871.
- [26] G. Walker, *Stirling-cycle machines*, Clarendon Press, Oxford, 1973.
- [27] T. Finkelstein, Analogue simulation of Stirling engine, *Simulation*, No.2, March, 1975.

- [28] I. Urieli, D. M. Berchowitz, *Stirling cycle engine analysis*, Bristol: Adam Hilger, 1984.
- [29] S. N. Backhaus and G. W. Swift, Fabrication and use of parallel-plate regenerators in thermoacoustic engines, *In Proceedings of the 36th Intersociety Energy, Conversion Engineering Conference*, Savannah, GA, 2001.
- [30] Y. Z. Shan, *Oscillatory flow and heat transfer in a Stirling engine regenerator*, PhD thesis, Case Western Reserve University, 1993.
- [31] M. J. Cheadle, G. F. Nellis and S. A. Klein, Regenerator friction factor and Nusselt number information derived from CFD analysis, *In Proceedings of the 16th International Cryocooler Conference*, Atlanta, GA, 2008.
- [32] H. Snyman, T. M. Harms and J. M. Strauss, Design analysis methods for Stirling engines, *Journal of Energy in Southern Africa*, Vol. 19, No. 3, August 2008.