

PHÂN TÍCH HIỆU SUẤT VÀ CÔNG SUẤT CỦA CHU TRÌNH JOULE-BRAYTON

Lê Chí Kiên

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp. HCM

(Manuscript Received on June 5th, 2008, Manuscript Revised August 27th, 2008)

TÓM TẮT: Những phân tích về hiệu suất và công suất cho chu trình Joule-Brayton, một chu trình có thể áp dụng cho những hệ thống phát điện hiệu suất cao, cũng như những điều kiện để đạt hiệu suất cực đại, công suất cực đại đã được đề cập thông qua các thông số nhiệt độ, áp suất. Kết quả là, nhiệt độ làm lạnh càng nhỏ hoặc nhiệt độ đầu vào tua-bin càng lớn thì hiệu suất chu trình càng lớn. Qua phân tích về hiệu suất và công suất, điều kiện về tỉ số nhiệt độ ra trên nhiệt độ vào của máy nén cũng như tỉ số áp suất của máy nén để cho ra hiệu suất cực đại và công suất ra cực đại là khác nhau. Hiệu suất cực đại chủ yếu mang ý nghĩa nhiều hơn về tính kỹ thuật, trong khi công suất ra cực đại mang nhiều ý nghĩa về tính kinh tế và kích thước của hệ thống hơn. Như vậy, tùy theo yêu cầu của hệ thống cho hiệu suất cực đại hay cho công suất ra cực đại mà các thông số về nhiệt độ, áp suất được thiết kế sao cho phù hợp.

Từ khóa: Phân tích chu trình Joule-Brayton, công suất cực đại, hiệu suất cực đại, tỉ số áp suất, tỉ số nhiệt độ.

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Trong lĩnh vực nhiệt động lực, chu trình máy nhiệt Carnot được xem là chu trình có hiệu suất nhiệt cao nhất. Để đạt được hiệu suất này, các quá trình trong chu trình phải là thuận nghịch và không đổi entropy. Điều này cũng có nghĩa chu trình Carnot chỉ là một chu trình lý tưởng bởi vì thực tế không có một quá trình của máy nhiệt nào là thuận nghịch và không có tăng entropy. Năm 1975, Curzon và Ahlborn (CA) đã mở rộng mô hình chu trình Carnot với 2 quá trình trao đổi nhiệt là không thuận nghịch và hiệu suất của mô hình này được xác định theo công thức:

$$\eta_{CA} = 1 - \sqrt{\frac{T_C}{T_H}} \quad (1)$$

Trong đó, T_C và T_H lần lượt là nhiệt độ của nguồn lạnh và nguồn nóng.

Hiệu suất này có thể dùng để đánh giá hiệu quả của một chu trình chính xác hơn hiệu suất Carnot vì nó được xem như gần với giá trị hiệu suất thực tế của chu trình hơn. Điều này có thể thấy rõ ở Bảng 1 bên dưới [1].

Bảng 1. Hiệu suất một số nhà máy điện

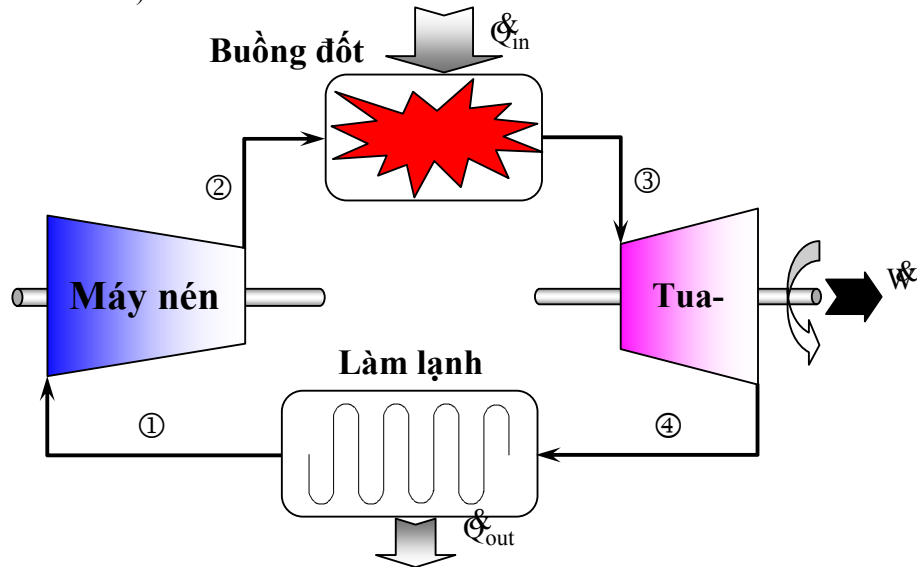
Nhà máy điện	T_C [°C]	T_H [°C]	η Carnot	η_{CA}	η thực tế
Đốt than West Thurrock (UK)	25	565	0,64	0,40	0,36
Điện nguyên tử CANDU (Canada)	25	300	0,48	0,28	0,30
Địa nhiệt điện Larderello (Italy)	80	250	0,33	0,17	0,16

Đã có nhiều nghiên cứu về hiệu suất cũng như công suất xung quanh mô hình chu trình Carnot và chu trình Curzon và Ahlborn [2–6]. Trong phạm vi bài báo này, những phân tích về

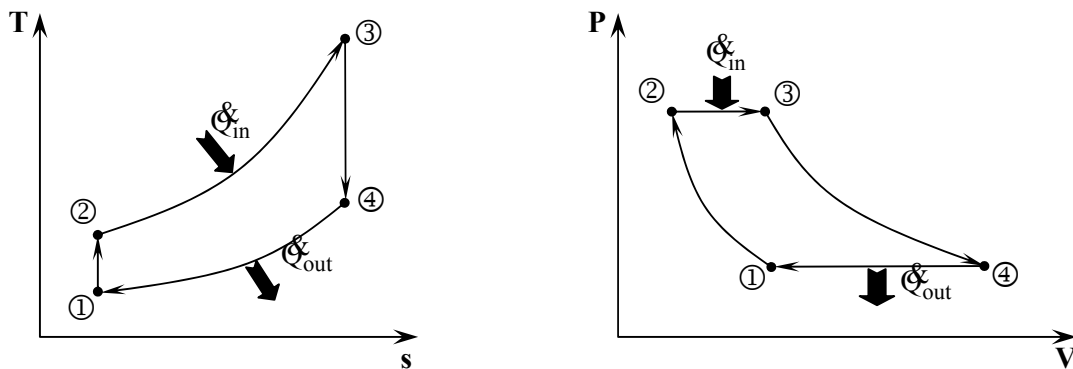
hiệu suất và công suất được mở rộng cho chu trình Joule-Brayton, một chu trình đặc trưng cho hệ thống phát điện tua-bin khí cũng như chu trình động cơ tua-bin khí và có thể mở rộng áp dụng cho những chu trình hệ thống phát điện hiệu suất cao dùng các dạng phát điện khác. Ngoài ra, những điều kiện để đạt hiệu suất cực đại, công suất cực đại cũng được đề cập và phân tích thông qua các thông số nhiệt độ, áp suất của máy nén.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Chu trình Joule-Brayton liên quan đến 2 quá trình đẳng áp và 2 quá trình đoạn nhiệt (xem Hình 1 và Hình 2).



Hình 1. Chu trình Joule-Brayton



Hình 2. Đồ thị T-s, P-V của chu trình Joule-Brayton

Công suất ra của chu trình này có thể được viết theo công thức sau:

$$\dot{W} = \dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out} \quad (2)$$

Với, \dot{Q}_{in} là công suất cung cấp vào chu trình, \dot{Q}_{out} là công suất thải ra từ chu trình và được xác định lần lượt theo các công thức sau:

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}c_p(T_3 - T_2) \quad (3)$$

$$\dot{Q}_{out} = \dot{m}c_p(T_4 - T_1) \quad (4)$$

Trong đó, \dot{m} là lưu lượng khối lượng, c_p là nhiệt dung riêng đẳng áp, và T_1, T_2, T_3, T_4 lần lượt là nhiệt độ tại ngõ vào của máy nén, nhiệt độ tại ngõ ra của máy nén, nhiệt độ tại ngõ vào tua-bin, nhiệt độ tại ngõ ra tua-bin.

Thay công thức (3), (4) vào (2), ta có:

$$\dot{W} = \dot{m}c_p[(T_3 - T_2) - (T_4 - T_1)] \quad (5)$$

Đặt tỉ số áp suất và tỉ số nhiệt độ là các hằng số a và b như sau:

$$a = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(\gamma-1)/\gamma} \quad (6)$$

$$b = \frac{T_3}{T_1} \quad (7)$$

Với, P_1 và P_2 lần lượt là áp suất vào và ra của máy nén, γ là tỉ số nhiệt dung riêng đẳng áp trên nhiệt dung riêng đẳng tích, T_3 và T_1 lần lượt là nhiệt độ cực đại và cực tiểu của chu trình.

Đối với quá trình nén, giãn đoạn nhiệt thuận nghịch và với $P_2 = P_3, P_4 = P_1$, ta có quan hệ:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(\gamma-1)/\gamma} = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{(\gamma-1)/\gamma} = \frac{T_3}{T_4} = a \quad (8)$$

Thay (7), (8) vào (5) ta được:

$$\dot{W} = \dot{m}c_p T_1 (a - 1) \left(\frac{b}{a} - 1\right) \quad (9)$$

Nếu nguồn nhiệt, nguồn lạnh được xác định trước, tức là biết trước b, từ công thức (9), ta dễ dàng tìm được điều kiện để công suất ra cực đại \dot{W}_{max} là:

$$a = \sqrt{b} \text{ hay } \frac{T_2}{T_1} = \sqrt{\frac{T_3}{T_1}} \quad (10)$$

Và khi đó công suất ra cực đại được xác định theo biểu thức:

$$\dot{W}_{max} = \dot{m}c_p T_1 (\sqrt{b} - 1)^2 \quad (11)$$

Để cho đơn giản khi khảo sát, ta xét tỉ số:

$$\frac{\dot{W}}{\dot{W}_{max}} = \frac{(a - 1) \left(\frac{b}{a} - 1\right)}{(\sqrt{b} - 1)^2} \quad (12)$$

Hiệu suất nhiệt η_{th} của chu trình được định nghĩa:

$$\eta_{th} = \frac{W_c}{Q_{in}} = 1 - \frac{Q_{out}}{Q_{in}} \quad (13)$$

Kết hợp công thức (3), (4), và (8), hiệu suất nhiệt trở thành:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{a} \quad (14)$$

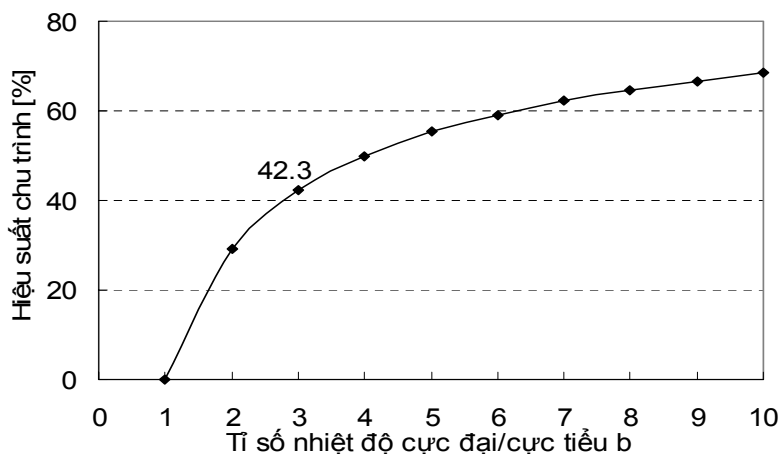
Thay (14) vào (12) ta có:

$$\frac{W_c}{W_{max}} = \frac{\left(\frac{1}{1 - \eta_{th}} - 1\right) [b(1 - \eta_{th}) - 1]}{(\sqrt{b} - 1)^2} \quad (15)$$

Từ đây, có nhiều vấn đề có thể được đặt ra chẳng hạn như đối với một hệ thống được chọn trước (nhiệt độ cực đại được định trước) thì tỉ số nhiệt độ ra/vào của máy nén cũng như tỉ số nén của máy nén nên như thế nào để hiệu suất nhiệt và công suất ra đạt giá trị cực đại. Tiêu chí nào nên được dùng khi thiết kế các hệ thống: hiệu suất nhiệt cực đại hay công suất ra cực đại. Những vấn đề này sẽ được bàn đến chi tiết ở phần sau.

3. KẾT QUẢ VÀ PHÂN TÍCH

Thay công thức (10) vào (14), ta có hiệu suất chu trình tại giá trị công suất ra cực đại (cũng chính là hiệu suất Curzon và Ahlborn – η_{CA}), và đồ thị của hiệu suất theo tỉ số nhiệt độ b được biểu diễn ở Hình 3. Dễ dàng nhận thấy rằng nhiệt độ làm lạnh càng nhỏ hoặc nhiệt độ đầu vào tua-bin càng lớn, hay nói cách khác tỉ số nhiệt độ cực đại/cực tiểu b càng lớn thì hiệu suất chu trình càng lớn. Tuy nhiên, nhiệt độ làm lạnh không thể nhỏ hơn 300K (27°C) vì đây được coi là nhiệt độ trung bình của môi trường không khí, và nhiệt độ đầu vào tua-bin không thể quá cao vì giới hạn về nhiệt độ của vật liệu, thiết bị. Trong phạm vi bài báo này, nhiệt độ đầu vào tua-bin được giới hạn tối đa 900K vì đây có thể coi là giá trị đặc trưng phổ biến với công nghệ hiện nay. Kết quả là hiệu suất chu trình cao nhất chỉ có thể đạt được là 42,3% ứng với nhiệt độ làm lạnh đầu ra $T_1=300K$ và nhiệt độ đầu vào tua-bin $T_3=900K$.

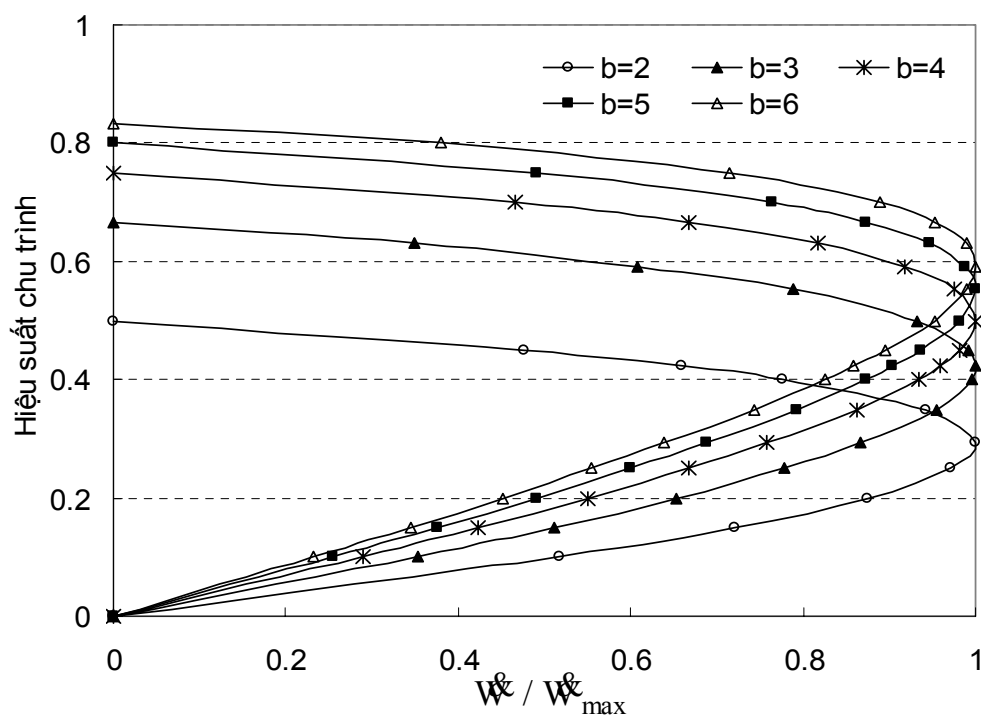


Hình 3. Hiệu suất theo tỉ số nhiệt độ cực đại/cực tiểu b

Từ công thức (15), mối liên hệ giữa các đại lượng hiệu suất, công suất và nhiệt độ có thể được biểu diễn như Hình 4. Theo công thức (14), chúng ta nhận thấy để hiệu suất càng cao thì tỉ số a phải càng lớn. Với quan hệ như ở công thức (8), muốn a càng lớn thì T_2 (nhiệt độ ngõ ra máy nén) càng lớn, hay nói cách khác T_2 phải càng tiến tới giá trị T_3 (giá trị nhiệt độ cực đại trong chu trình). Điều này cũng có nghĩa là T_4 (nhiệt độ ngõ ra tua-bin) càng tiến tới giá trị T_1 (giá trị nhiệt độ cực tiểu trong chu trình) theo công thức (8), kết quả là công suất ra của chu trình sẽ tiến đến giá trị 0 để cho ra hiệu suất cực đại (từ Hình 4 cũng nhận thấy điều này). Như vậy từ những phân tích trên, điều kiện để hiệu suất cực đại sẽ là:

$$a = b \text{ hay } \frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_1} \quad (16)$$

Một tiêu chí khác để khảo sát một hệ thống, đó là công suất ra cực đại, và điều kiện để cho ra công suất cực đại. Từ công thức (10) và (16), chúng ta nhận thấy điều kiện của tỉ số nhiệt độ ra/vào máy nén để cho ra hiệu suất cực đại và công suất cực đại là khác nhau. Trên thực tế, điều kiện cho ra công suất cực đại có ý nghĩa hơn vì muốn hiệu suất đạt cực đại thì theo phân tích trên, công suất ra phải tiến đến 0. Điều này có nghĩa là hiệu suất cực đại chỉ mang tính lý thuyết và hoàn toàn không có ý nghĩa thực tế. Hơn nữa, nếu ta xét thêm một thông số là mật độ công suất (được định nghĩa là công suất trên một đơn vị khối lượng) thì thông số này sẽ bao hàm các yếu tố như kích thước, khối lượng của hệ thống. Điều này có nghĩa là khi mật độ công suất cực đại, kích thước hệ thống sẽ là nhỏ nhất để cho công suất tối ưu. Đó có thể coi là một lợi ích kinh tế rất lớn, nhất là đối với những hệ thống mà ngoài các thông số kỹ thuật thì những yếu tố về kinh tế, kích thước cũng cần được đặc biệt quan tâm chẳng hạn như những hệ thống phát điện dùng trong không gian hoặc những hệ thống yêu cầu kích thước nhỏ.



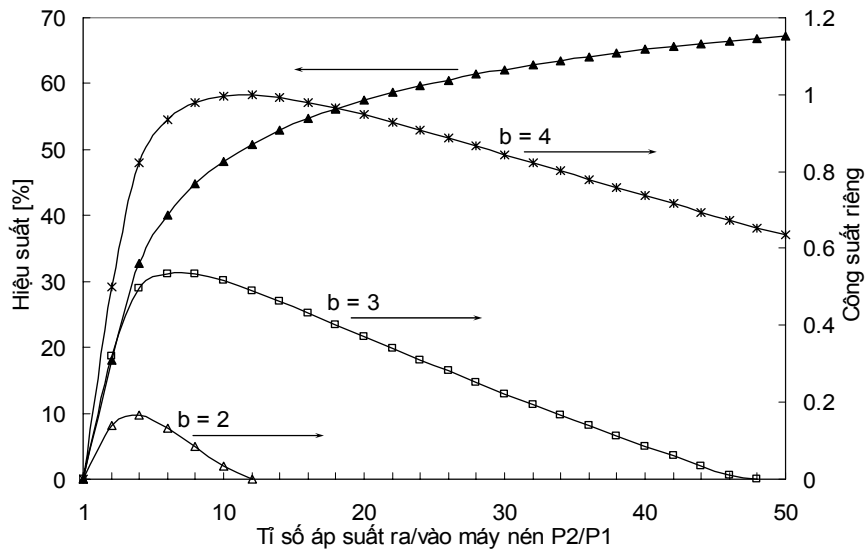
Hình 4. Đồ thị biểu diễn mối liên hệ giữa hiệu suất và công suất

Từ công thức (9), để cho đơn giản khi phân tích, chúng ta định nghĩa một đại lượng tạm gọi là công suất riêng W_S được định nghĩa là:

$$W_S = \frac{W}{\dot{m} c_p T_1} = (a-1) \left(\frac{b}{a} - 1 \right) \quad (17)$$

Từ đây, ta có thể khảo sát mối quan hệ giữa công suất riêng, tỉ số áp suất ra/vào của máy nén và tỉ số nhiệt độ (ví dụ với môi chất là không khí $\gamma=1,4$), và các đường biểu diễn mối quan hệ này cho ở Hình 5. Hình này cũng cho thấy mối liên hệ giữa tỉ số áp suất ra/vào của máy nén và hiệu suất chu trình. Ứng với tỉ số nhiệt độ $b=3$ thì để cho ra công suất lớn nhất thì tỉ số nén áp suất phải bằng 6. Thông thường đối với tua-bin khí hoặc tua-bin hơi thì tỉ số áp suất máy nén bằng 4, do vậy hiệu suất đạt được theo tính toán là 32,7%. Tuy nhiên trong một số ứng dụng đặc biệt với công nghệ hiện nay, tỉ số nén có thể đạt đến giá trị >40 , do vậy hiệu suất của các hệ thống này rất cao. Ngoài ra, hệ thống phát điện dùng nguyên lý Từ thủy động lực (Magnetohydrodynamic – MHD) thay vì dùng tua-bin khí hoặc tua-bin hơi có thể dùng tỉ số nén lên đến trên dưới 15. Vì vậy, đây cũng là một trong những lý do hệ thống phát điện MHD được kỳ vọng cho hiệu suất cao hơn những hệ thống phát điện kiểu truyền thống.

Từ Hình 5, ta thấy điều kiện của tỉ số nén để hiệu suất cực đại và để công suất cực đại là khác nhau. Hiệu suất lớn chủ yếu mang ý nghĩa nhiều hơn về thông số kỹ thuật nhưng không thực tế, trong khi công suất riêng lớn mang nhiều ý nghĩa về tính kinh tế của hệ thống hơn. Như vậy, tùy theo yêu cầu của hệ thống cho ra hiệu suất lớn hay cho ra công suất lớn mà các thông số về tỉ số nhiệt độ, tỉ số áp suất được thiết kế sao cho phù hợp.



Hình 5. Quan hệ giữa hiệu suất, công suất riêng và tỉ số áp suất ra/vào của máy nén

4.KẾT LUẬN

Qua khảo sát và phân tích hiệu suất và công suất của chu trình Brayton, một số kết luận sau đây đã được rút ra.

- Tỉ số nhiệt độ cực đại trên nhiệt độ cực tiểu của chu trình càng lớn thì hiệu suất chu trình

càng lớn. Tuy nhiên, vì nhiệt độ cực tiểu không thể nhỏ hơn 300K và nhiệt độ cực đại không thể lớn hơn 900K nên tỉ số này không thể lớn hơn 3, hay nói cách khác hiệu suất lớn nhất có thể đạt được là 42,3%.

- Điều kiện về tỉ số nhiệt độ ra của máy nén trên nhiệt độ vào của máy nén để cho ra hiệu suất cực đại và công suất cực đại là khác nhau. Cụ thể là:

➤ Điều kiện để hiệu suất nhiệt cực đại: $\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_1}$, hay nói cách khác nhiệt độ ngõ ra máy

nén tiến đến nhiệt độ cực đại và nhiệt độ ngõ ra tua-bin tiến đến nhiệt độ cực tiểu. Điều này có thể được áp dụng để nâng cao hiệu suất bằng các bộ trao đổi nhiệt trung gian tận dụng nhiệt từ ngõ ra tua-bin gia nhiệt thêm cho ngõ ra máy nén.

➤ Điều kiện để công suất ra cực đại: $\frac{T_2}{T_1} = \sqrt{\frac{T_3}{T_1}}$.

- Điều kiện của tỉ số áp suất của máy nén để hiệu suất lớn nhất và để công suất lớn nhất cũng là khác nhau. Tỉ số nén áp suất càng cao thì hiệu suất chu trình càng cao, tuy nhiên để cho ra công suất cực đại thì tỉ số nén áp suất này phải bằng 6 ứng với tỉ số nhiệt độ cực đại/cực tiểu là 3.

Điều kiện về tỉ số nhiệt độ và tỉ số áp suất máy nén để đạt được công suất ra cực đại sẽ có ý nghĩa rất quan trọng trong việc thiết kế những hệ thống phát điện đòi hỏi tính kinh tế cao, kích thước nhỏ gọn ví dụ những hệ thống phát điện dùng trong không gian hoặc những hệ thống yêu cầu công suất lớn.

ANALYSES OF THE THERMAL EFFICIENCY AND THE OUTPUT POWER IN A JOULE-BRAYTON CYCLE

Le Chi Kien

University of Technical Education – Ho Chi Minh City

ABSTRACT: *The analyses on Joule-Brayton cycle, which could be used for a high efficiency power generation system, using the temperature and the pressure of compressor have been carried out. As a result, when the ratio of maximum temperature to the minimum temperature in the cycle increased, the thermal efficiency increased. By analyzing the efficiency and the output power, it is understood that the ratio of compressor outlet pressure to the compressor inlet pressure, as well as the pressure ratio across the compressor for maximum thermal efficiency and maximum output power are different. The maximum thermal efficiency could be an important technical parameter; however, the maximum output power is significant in the cost and the size of system. For that reason, depending on the required system for maximum efficiency or for maximum power, the ratio of temperature and pressure are designed.*

Keywords: *Joule-Brayton cycle analysis, maximum power, maximum efficiency, pressure ratio, temperature ratio.*

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. F.L. Curzon, B. Ahlborn, *Efficiency of a Carnot Engine at Maximum Power Output*, American Journal of Physics, Vol.43, 22-24, (1975).
- [2]. A. De Vos, *Efficiency of Some Heat Engines at Maximum-Power Conditions*, American Journal of Physics, Vol.53, 570-573, (1985).
- [3]. Z. Yan, J. Chen, *A Class of Irreversible Carnot Refrigeration Cycles with a General Heat Transfer Law*, Journal of Physics D: Applied Physics, Vol.23, 136-141, (1990).
- [4]. Adrian Bejan, *Entropy Generation Minimization: The New Thermodynamics of Finite-Size Devices and Finite-Time Processes*, Journal of Applied Physics, Vol.79, 1191-1218, (1996).
- [5]. E. Rebhan, *Efficiency of Nonideal Carnot Engines with Friction and Heat Losses*, American Journal of Physics, Vol.70, 1143-1149, (2002).
- [6]. T.T. Cai, C.L. Montague, J.S. Davis, *The Maximum Power Principle: An Empirical Investigation*, Journal of Ecological Modelling, Vol.190, Iss3-4, 317-335, (2006).