

MỘT SỐ VẤN ĐỀ VỀ NĂNG LƯỢNG, EXERGY, MÔI TRƯỜNG VÀ PHÁT TRIỂN BỀN VỮNG

Several problems of energy, exergy, environment and sustainable development

GS.TS. Phạm Văn Tuyền

Hội KHKT Lạnh và ĐHKK Việt nam

Abstract

This paper represents the relations between energy, exergy, environmental impact and sustainable development, at the same time the ties between technical, environmental and economic issues are described. Some practical illustration examples of the more abstract concepts are represented and discussed too. The energy and exergetical analysis method should prove useful in design and improvement activities to engineers and scientists, as well as decision and policy makers.

Key words: Exergy, Exergetical analysis, Entropy, Environment, sustainable development.

1. Mở đầu

Có thể nói rằng đặc tính riêng của nhiệt năng là khả năng biến đổi hạn chế, tính không thuận nghịch của các quá trình thực làm nên sự xuống cấp của nhiệt năng và có quan hệ chặt chẽ với môi trường xung quanh. Đó là những vấn đề đã được đề cập trong nguyên lý II nhiệt động học, đặc trưng cho mật chất lượng của nhiệt năng. Thế nhưng trong nghiên cứu và thực hiện các bài toán thực tế về Nhiệt – lạnh chúng ta thường chỉ sử dụng nguyên lý I nhiệt động trên cơ sở cân bằng số lượng của các dạng năng lượng khác nhau, ở các nhiệt độ khác nhau tham gia vào quá trình. Thực tế này về cơ bản là phù hợp với các bài toán thiết kế hay khi so sánh các phương án trong cùng một điều kiện hoạt động, mà chưa thể làm rõ việc sử dụng năng lượng tối ưu và cũng chưa chỉ ra chính xác nơi xảy ra tổn thất lớn nhất để quy hoạch cải tiến, nâng cấp hiệu quả nhất. Như vậy trong các bài toán nhiệt chúng ta cần xét tới cả số lượng và chất lượng các nguồn năng lượng sử dụng. Mật chất lượng của nhiệt năng thường được đề cập tới khi sử dụng phương pháp phân tích exergy hoặc đôi khi là phương pháp entropy. Exergy được xem như là phần cốt lõi, quý giá nhất thể hiện chất lượng của nhiệt năng. Vì thế mà trong nhiều nghiên cứu gần đây về tác động môi trường và phát triển bền vững các tác giả đều đề cập tới vai trò của exergy và sử dụng nó trong các nghiên cứu của mình [1-8]. Trong [6] M. A. Rosen và các cộng sự coi exergy là hạt nhân, điểm giao nhau của năng lượng, môi trường và phát triển bền vững như minh họa trên hình 1.

Như vậy nhiệt năng cũng cần phải được xem xét trong mối quan hệ với môi trường, phát triển bền vững và trong các bài toán tối ưu hóa kinh tế kỹ thuật cũng như trong nghiên cứu hình thành các công nghệ xanh.

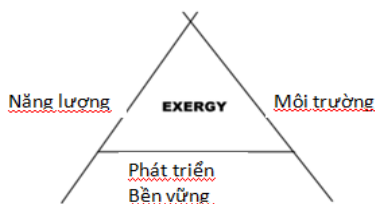
Mối quan hệ giữa năng lượng nhiệt và kinh tế được bắt đầu chú ý nhiều từ những năm 70. Đến những năm 80 người ta phải chú ý nhiều hơn tới các tác động môi trường như mưa axit, sự làm suy giảm tầng ôzôn và mối quan hệ giữa việc sử dụng năng lượng với môi trường sống. Hiện nay do tăng hiệu quả sử dụng năng lượng mà tác động môi trường của những phát thải đã được giảm đi. Tuy nhiên để đạt được hiệu quả sử dụng năng lượng cao, trong công tác nghiên cứu và triển khai các giải pháp khoa học công nghệ giảm thiểu phát thải, nhiều nhà nghiên cứu như Makarytchev, Creyts, Von Spakovsky, Ayres, ... đã đề nghị tốt nhất là dựa trên cơ sở phân tích exergy để đánh giá tác động môi trường [6-9].

Exergy của một dạng năng lượng hay của một chất được đo bằng độ hữu ích hoặc chất lượng hay khả năng tạo nên các biến động của nó/ tức exergy có thể là cơ sở xác định mức độ hiệu quả của khả năng tác động môi trường. Exergy và phương pháp phân tích exergy ngày càng được chú ý nghiên cứu và mở rộng phạm vi áp dụng không chỉ trong tối ưu hóa các quá trình công nghiệp mà còn cho cả lĩnh vực xã hội và quản lý môi trường, sinh thái [9-11].

Trong bài viết này, trên cơ sở phân tích lý thuyết và áp dụng thực tế, chúng tôi sẽ trình bày một số mặt đặc trưng trong mối quan hệ giữa các dạng năng lượng, exergy, kinh tế, môi trường và phát triển bền vững.

2. Năng lượng, exergy và phương pháp năng lượng, exergy

Vật lý học xem *năng lượng* (NL) là biểu thị mức độ chuyển động của vật chất. Cách phân loại NL được chú ý nhiều nhất là theo khả năng biến đổi của NL [2]: Gồm 3 nhóm (i) NL có khả năng biến đổi hoàn toàn thành các dạng NL khác, như các dạng



Hình 1. Quan hệ NL-Exergy-Môi trường-Phát triển bền vững trong phân tích exergy

năng lượng “có trật tự” là cơ năng và điện năng, (ii) NL có khả năng biến đổi hạn chế hay một phần là NL “không có trật tự” như nhiệt năng và nội năng, (iii) NL không có khả năng biến đổi như NL nhiệt tích lũy trong môi trường xung quanh hay ở các hệ thống lớn như hồ ao, sông, biển. Các dạng NL nhóm (i) còn được gọi là exergy. Các dạng NL thuộc nhóm (iii) gọi là anergy, tên gọi này ngày càng được ít dùng mà được kết hợp vào khái niệm tổn thất. Nhiệt năng có thể biến hoàn toàn hay một phần thành anergy nhưng chỉ biến được một phần thành exergy (công cơ học/điện năng). Đặc tính này làm cho các quá trình thực khi biến đổi nhiệt năng luôn là những quá trình có entropy tăng lên và kèm theo đó là tổn thất exergy gây nên hiện tượng xuống cấp của năng lượng.

Thuật ngữ “Exergy” được Zoran Rant đề xuất vào năm 1956, dựa trên cơ sở phát triển lý thuyết nhiệt động học của J.W. Gibbs năm 1873. “Exergy” bắt nguồn từ tiếng Hy Lạp là “ex” và “ergon” có nghĩa là “khởi đầu” và “công”. Mở rộng khái niệm exergy là công lớn nhất, ông quan niệm rằng “Exergy là số lượng năng lượng lớn nhất mà trong trạng thái đã cho của môi trường xung quanh trong những điều kiện

của các quá trình hoàn toàn thuận nghịch có thể biến thành bất cứ dạng năng lượng nào”.

- Exergy có đặc điểm là được bảo toàn khi và chỉ khi mọi quá trình trong hệ thống và môi trường đều thuận nghịch và ngược lại, nên không có định luật bảo toàn Exergy. Trường hợp tổng quát nếu hệ thống nhận vào các công suất công/exergy E_e^+ (Điện năng hay công cơ học), Công suất nhiệt Q^+ (có exergy E_q^+), Công suất biến đổi nhận được từ các dòng NL trong các quá trình nhiệt động W^+ (với exergy E_w^+) và tổng tổn thất exergy Π do các tổn thất không thuận nghịch (Theo nguyên lý II nhiệt động học ta luôn có $\Pi \geq 0$). Cân bằng NL và cân bằng exergy khi đó có thể biểu thị dưới dạng:

$$\Sigma E_e^+ + \Sigma Q^+ + \Sigma W^+ = 0, (1) \text{ và } \Sigma E_e^+ + \Sigma E_q^+ + \Sigma E_w^+ = \Pi \geq 0, (2)$$

Phương trình cân bằng exergy (2) được thiết lập trên cơ sở kết hợp cả hai nguyên lý I và II nhiệt động học. Đó là biểu thức chung nhất, đặc trưng nhất của phương pháp exergy. Nếu tách riêng các thành phần đầu ra có ích (E^-) với các thành phần nhận vào (E^+) thì ta có thể viết: $\Sigma E_e^- + \Sigma E_q^- + \Sigma E_w^- = \Sigma E_e^+ + \Sigma E_q^+ + \Sigma E_w^+ - \Pi$ và hiệu suất exergy có dạng tổng quát sau:

$$\eta_e = \frac{(\Sigma E_e^- + \Sigma E_q^- + \Sigma E_w^-)}{(\Sigma E_e^+ + \Sigma E_q^+ + \Sigma E_w^+)}, (3)$$

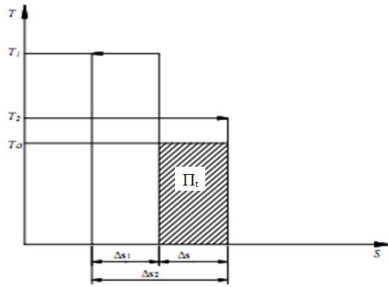
Lâu nay chúng ta thường chỉ sử dụng nguyên lý I nhiệt động trong tính toán kỹ thuật mà không kể tới giá trị sử dụng và giá trị kinh tế khác nhau của các dạng năng lượng, những vấn đề liên quan đến nguyên lý II nhiệt động. Phương pháp cân bằng năng lượng theo nguyên lý I chỉ tính tới số lượng mà không kể tới chất lượng của năng lượng. Hiệu suất nhiệt $\eta = L^+ / (E^+ + A^+)$ và hệ số lạnh ϵ hay $COP = Q_0^+ / E^+$ được lấy làm chỉ tiêu đánh giá. Cả η và COP đều mang ý nghĩa của hiệu suất biến đổi năng lượng nhưng ϵ lại thường có giá trị lớn hơn 100%, hơn nữa nhiệt lượng cấp vào chu trình động cơ $Q^+ = E^+ + A^+$ đã chứa sẵn một lượng anergy A (không có khả năng sinh công), phép tính so sánh giữa hai đại lượng không ngang giá là nhiệt lượng Q và điện năng E là không đảm bảo tính chính xác khoa học. Tương tự như vậy thì khi đánh giá hiệu quả bơm nhiệt chúng ta cũng hay dùng hệ số ϕ hay $COP_{bn} = (Q_K^- + Q_0^+) / E^+$. Ở đây nhiệt thải ở dàn nóng Q_K và nhiệt nhận vào ở dàn lạnh Q_0 ở các nhiệt độ rất khác nhau (nên có chất lượng rất khác nhau) cũng được vô tư tính tổng để đem so sánh với điện năng (exergy) có chất lượng rất cao.

Như vậy khi ứng dụng nguyên lý II và quan tâm tới chất lượng của năng lượng chúng ta phải sử dụng các khái niệm và phương pháp phân tích exergy.

Có thể hiểu exergy biểu thị số đo của sự có ích hoặc giá trị hay là chất lượng của một dạng năng lượng. Về mặt kỹ thuật, theo những nhà nghiên cứu nổi tiếng nhất về exergy như Szargut (1980, 1988), Moran (1989), Edgerton (1992) thì exergy biểu thị khả năng gây biến động khi nó chưa hoàn toàn cân bằng với môi trường, exergy của nhiên liệu là một ví dụ. Không giống như năng lượng, exergy không tuân theo luật bảo toàn (trừ khi ở các quá trình lý tưởng). Exergy bị tiêu thụ hoặc bị phá hủy do tính không lý tưởng hay không thuận nghịch trong các quá trình thực. Sự tiêu thụ hay tổn

thất exergy trong các quá trình như vậy tỷ lệ với độ tăng entropy ΔS do tính không thuận nghịch của quá trình và phụ thuộc nhiệt độ môi trường T_a xác định theo nguyên lý Guy-Stodola (1889): $\Pi = T_a \Delta S$, kW, (4)

Exergy của hệ thống kín, hệ thống hở và của môi chất đều được xác định theo các công thức tương ứng $E = \Delta U_e - \Pi$ và $E = \Delta H - \Pi$. Như vậy ở trạng thái cân bằng với môi trường exergy sẽ bằng không. Vật chất càng ở xa trạng thái cân bằng với môi trường, thế nhiệt động $(H - T_a S)$ càng lớn và cũng sở hữu exergy càng lớn ($E = (H - T_a S) - (H_a - T_a S_a)$), đó chính là khả năng gây tác động đến môi trường. Khi môi trường càng hỗn loạn, có nhiều biến động (đặc biệt là nhiệt độ, áp suất và các chất thành phần) thì entropy lớn và exergy càng nhỏ. Điều đó và sự xuất hiện của T_a đã phần nào nói lên quan hệ giữa exergy và môi trường.



Hình 2. Tổn thất Π_i của quá trình Truyền nhiệt

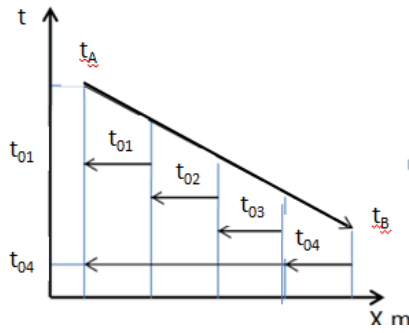
Như vậy, exergy hay khả năng sinh công của một hệ thống không chỉ thể hiện ở nội năng của nó (như ta vẫn thường xét) mà còn phụ thuộc vào nhiệt độ T_a và áp suất P_a của môi trường ngoài. Từ đó, những gì liên quan đến kết luận này đã được các nhà nghiên cứu xem xét và phát triển ở nhiều nước dưới đầu đề lý thuyết exergy [2].

Để tiện biểu thị exergy của các dạng NL công/điện, của nhiệt, entanpy hay của năng lượng biến đổi, chúng tôi đã đề nghị sử dụng các từ và thuật ngữ trong tiếng Việt như trình bày ở [1]. Theo [2] chỉ nên sử dụng khái niệm exergy và tính từ exergy trong các nghiên cứu chung như lý thuyết exergy, phương pháp exergy, cân bằng exergy, tổn thất exergy, hiệu suất exergy, tính toán (comptability) exergy, kinh tế exergy.

- Tồn tại cơ bản của nguyên lý I là không phân biệt chất lượng của các dạng năng lượng khác nhau tham gia vào quá trình mà chưa chú ý tới các kết luận về khả năng thực tế cải thiện các quá trình và sự tham gia của các dòng NL khác nhau. Thay cho hệ số lạnh, mức độ hiệu quả ở đây được đánh giá bằng hiệu suất exergy $\eta_e = E_{Q_0}^- / E^+$ như dạng công thức (2). Nó chẳng những biểu thị mức độ thực của việc sử dụng năng lượng hữu ích thông qua việc phân tích các tổn thất exergy, mà còn chỉ ra phương hướng và tầm quan trọng của các biện pháp cần đạt được để cải thiện các điều kiện thực hiện và nâng cao hiệu quả quá trình.

So với điều kiện lý tưởng có các quá trình thuận nghịch (KTN), trong đó exergy có trị số không đổi thì các lời giải kỹ thuật dựa trên cơ sở các quá trình thực KTN sẽ có exergy giảm. Rõ ràng exergy có xét tới sự xuống cấp của năng lượng (tức là sự suy giảm chất lượng hay exergy của nó) trong quá trình biến đổi – một đặc trưng của nhiệt năng. Như thế có bao nhiêu yếu tố tạo nên sự KTN của quá trình (biểu thị qua ΔS) thì cũng có bấy nhiêu yếu tố tiêu thụ exergy hay làm suy giảm hoặc tạo nên tổn thất exergy. Chẳng hạn như trong quá trình truyền nhiệt, tính KTN sẽ do độ KTN gây nên từ độ chênh nhiệt độ ΔT (ΔS_t) và tổn thất áp suất ΔP (ΔS_p) do sự ma sát: $\Delta S = \Delta S_t + \Delta S_p$, $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$, (5)

Ví dụ 1: Sự xuống cấp của năng lượng do các tổn thất KTN bên trong: Ở thiết bị



Hình 4. Làm lạnh bậc thang trong bơm nhiệt sấy lạnh hút ẩm

TĐN bề mặt giữa 2 chất lỏng thì biến đổi entropy của hệ: $\Delta S_t = \Delta S_1 + \Delta S_2$ với ΔS_1 của môi chất nóng và ΔS_2 của môi chất lạnh được trình bày trên đồ thị hình 2.

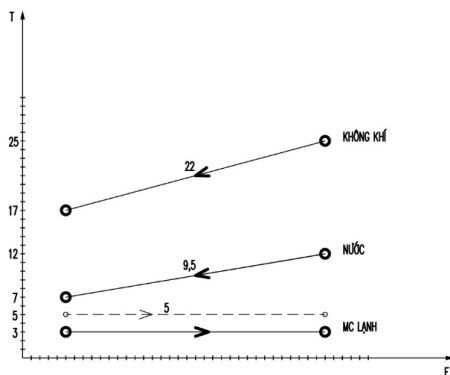
Tổn thất do truyền nhiệt không thuận nghịch $\Pi_t = T_a \Delta S_t$. Với $\Delta S_t = (\Delta T/T_1 T_2)Q$. Thành phần ΔS_p là nên tổn thất do ma sát Π_r . Với khí lý tưởng: $\Pi_r = M.R_k.T_a.\ln(P_1/P_2)$, với chất lỏng giọt: $\Pi_r = M.(T_a/T).v.(P_1-P_2)$. Với phương pháp tính này, exergy của dòng chất lỏng nóng tỏa ra sẽ lớn hơn exergy bề mặt nhận được và lớn hơn exergy dòng lạnh nhận được. Điều đó làm cho hiệu suất exergy luôn nhỏ hơn 100%,

khác với phương pháp cân bằng năng lượng coi nhiệt nhận được của dòng lạnh bằng với lượng nhiệt dòng nóng tỏa ra nên có hiệu suất 100%.

Ví dụ 2. Sự xuống cấp NL do sử dụng lãng phí năng lượng “cao cấp” (Noble-điện năng, công cơ học):

Công cơ học, điện năng là các dạng năng lượng gồm toàn exergy, vì vậy khi biến đổi nó thành năng lượng nhiệt có nhiệt độ gần nhiệt độ môi trường thì hiệu quả biến đổi này là cực kỳ thấp ($\eta_e < 10\%$) [1,2], cách làm này được ví như dùng búa tạ nhưng chỉ để đập chết ruồi, mặc dù hiệu quả biến đổi năng lượng theo nguyên lý I là 100%.

- Dùng điện năng sưởi ấm trực tiếp không gian cách nhiệt: Sử dụng điện trở sưởi duy trì nhiệt độ phòng 25°C khi nhiệt độ ngoài trời là 10°C thì cần bằng năng lượng cho $E^+ = Q^-$ (Nhiệt năng nhận được bằng điện năng tiêu thụ) nhưng cân bằng exergy chỉ cho $E_q^- = 0,05Q^-$ tức là đến 95% là tổn thất và hiệu suất exergy chỉ là 5%. Ở đây 95% exergy tổn thất là do sự giảm chất lượng hay sự xuống cấp của NL khi ta sử dụng exergy (điện) chỉ để sưởi ấm ở nhiệt độ gần nhiệt độ môi trường. Điều đó khác hẳn với hiệu suất nhiệt 100% ở trường hợp này. Tình huống này cũng giống như khi ta cố gắng khuấy chất lỏng để tăng nhiệt độ của nó



Hình 3. Biến đổi nhiệt độ ở các phương án ĐHKK làm lạnh trực tiếp và Water Chiller.

- Dùng cơ năng nén không khí để tách ẩm: Khi hơi nước trong không khí bị nén đoạn nhiệt/đẳng nhiệt sẽ hóa lỏng (tách ẩm) tạo không khí khô. Ở đây, ta đã sử dụng cơ năng/điện năng là dạng năng lượng cao cấp (nhóm 1) để tách ẩm mà lẽ ra dùng bơm nhiệt khử ẩm/ máy ĐHKK sẽ tiết kiệm điện năng tiêu thụ rất nhiều, việc nén khí chỉ đơn thuần là tạo nguồn không khí áp suất cao, để gia nhiệt chất lỏng ta có thể dùng các nguồn nhiệt khác nhau.

Ví dụ 3. Giảm tổn thất không thuận nghịch khi giảm độ chênh nhiệt độ trong quá trình truyền nhiệt:

- *Làm mát kh ín ín*: Không khí sau nén không chỉ có áp suất tăng lên mà nhiệt độ cũng tăng rất nhiều, khi nén tới áp suất khoảng 8 bar, nhiệt độ đã khoảng 150°C. Để làm mát trở lại nhiệt độ môi trường (khoảng 30°C) nếu dùng máy lạnh thì độ chênh nhiệt độ cũng hàng trăm độ nên tổn thất KTN sẽ rất lớn và tốn kém hơn nhiều khi dùng nước làm mát tới khoảng 35°C rồi sau đó tùy nhiệt độ yêu cầu thấp đến bao nhiêu rồi mới dùng máy lạnh. Trong cả hai đoạn làm mát độ chênh nhiệt độ sẽ thấp hơn nhiều.

- *Làm lạnh dịch bia*: Dịch bia sau khi nấu có nhiệt độ khoảng 80-85°C, người ta cũng dùng nước để làm mát rồi sau đó mới làm lạnh bằng máy lạnh. Hiện nay hay dùng nước 1°C để làm lạnh trong sơ đồ ngược chiều, nhờ vậy mà độ chênh nhiệt độ không cao và tổn thất KTN được giảm đi đáng kể.

- *Sử dụng hệ thống ĐHKK Water Chiller để giảm tổn thất KTN*: Biến đổi nhiệt độ được biểu thị trên hình 3. Ví dụ khi làm lạnh trực tiếp ta phải dùng môi chất lạnh sôi ở 5°C để làm mát không khí từ 25°C xuống 17°C (trung bình 22°C) và $\Delta t = 17K$. Ở Water Chiller nước được làm mát từ 12 xuống 7°C (trung bình 9,5°C) ở nhiệt độ bốc hơi 3°C, tiếp theo là làm mát không khí từ 25 xuống 17°C (trung bình 22°C), như vậy Δt chỉ là 4,5 và 12,5K.

- *Áp dụng làm lạnh và gia nhiệt theo sơ đồ bậc thang trong công nghệ sấy lạnh và hút ẩm*: Để làm lạnh không khí từ t_A đến t_B (Hình 4), đã sử dụng 4 dàn lạnh với các nhiệt độ sôi $t_{01}, t_{02}, t_{03}, t_{04}$ [1], Δt của quá trình truyền nhiệt trong mỗi dàn lạnh nhỏ hơn nhiều khi cùng dùng một nhiệt độ sôi t_{04} , nhờ vậy giảm được tổn thất KTN.

3.Exergy, môi trường và phát triển bền vững

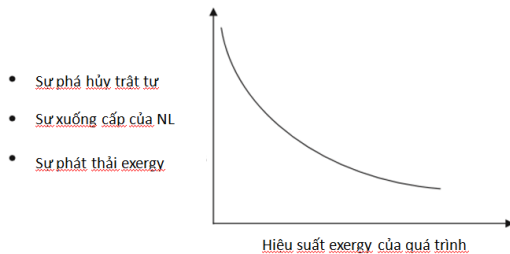
Các nguồn năng lượng có thể được sử dụng để thỏa mãn những nhu cầu của con người và cải thiện chất lượng sống nhưng nó thường dẫn tới *tác động môi trường*. Từ năm 1992 liên hợp quốc đã phát động chiến lược bảo vệ hiệu quả môi trường khí quyển mà trong lĩnh vực năng lượng là tăng hiệu quả và ứng dụng các hệ thống năng lượng thân thiện với môi trường. Có thể giảm thiểu phát thải CO₂ do tăng hiệu quả và giảm sử dụng nhiên liệu hóa thạch và sử dụng các nguồn năng lượng thay thế.

Exergy vốn biểu thị khả năng sinh công hay khả năng gây nên các biến động của môi trường. Theo Tandeusz Ktas [8] “Chất lượng của năng lượng đồng nghĩa với khả năng gây nên biến động của nó”. Việc tác động gây mất cân bằng của môi trường và exergy của các chất gây ô nhiễm nói chung là những yếu tố đáng kể nhất. Thường người ta lấy điều kiện của môi trường xung quanh là điều kiện chuẩn cho các tính toán kỹ thuật. Như vậy khi nhiệt độ lạnh hoặc nóng hơn, áp suất tăng hoặc giảm hơn, nồng độ kh i lo ăng hoặc đặc hơn môi trường thì khả năng tác động của chúng đến môi trường cũng tăng lên.

Một trong những mối liên hệ giữa exergy và môi trường được thể hiện qua sự sụt giảm exergy do tính không thuận nghịch mà nó thường là hậu quả của những sự hỗn loạn (chaos creation) hoặc sự phá vỡ trật tự trong các hệ thống có tổ chức.

Người ta đã chứng minh rằng [8] Sự giảm exergy như là sự xuống cấp của môi trường sạch tạo nên môi trường náo loạn và nó được đo bằng công nhỏ nhất/exergy được yêu cầu để làm sạch môi trường đưa nó về trạng thái sạch vốn có.

Ý tưởng này chắc chắn chưa phải là đã được nghiên cứu đầy đủ mà còn nhiều mặt phải được nghiên cứu tiếp tục, trong đó thì exergy hóa học có nhiều khả năng là có ý nghĩa nhất trong tất cả các thành phần exergy can dự vào tác động môi trường. Nhưng trong khi exergy chưa lộ diện trong các mối quan hệ với một số tác động môi trường như là những ph ả ả ả ảnh hưởng đến sức khỏe con người và động vật, ví dụ chất độc hại, thì theo Marc A. Rosen [8] hiển nhiên là có tồn tại mối quan hệ giữa exergy và



Hình 5. Quan hệ giữa hiệu suất exergy của quá trình và tác động môi trường do sự hủy hoại trật tự/sự xuống cấp của NL/sự phát thải exergy

năng lượng và do các ph ả ả ả thải exergy của các chất thải tỷ lệ thuận với việc tăng hiệu suất exergy của quá trình (h ả ả ả 5).

Tuy nhiên khi áp dụng các biện pháp điều khiển nhằm bản thì tác động môi trường có thể giảm ngay cả khi hiệu quả giảm. Sự x ả ả ả trộn hay sự phá vỡ trật tự là một dạng x ả ả ả hại môi trường. Về cơ bản, *entropy biểu thị sự mất trật tự, còn exergy biểu thị cho sự trật tự*. Một hệ thống có entropy cao sẽ hỗn loạn hơn hệ thống có entropy thấp và với cùng một môi trường xung quanh thì exergy của hệ thống trật tự lớn hơn hệ thống mất trật tự. Một ví dụ trực quan hơn: Vùng nền nhà có gió thổi các tờ giấy tung t ả ả ả sẽ có entropy cao hơn và exergy thấp hơn vùng có các tờ giấy vẫn được xếp gọn gàng cạnh nhau. Độ chênh lệch exergy của hai hệ thống được xác định bằng exergy (và trật tự) bị phá hủy khi gió thổi tung đồng giấy và bằng công nhỏ nhất cần có để đưa hệ thống mất trật tự về hệ thống trật tự (có nghĩa là để xếp lại các tờ giấy đã bị làm tung t ả ả ả).

- *Tác hại môi trường của sự xuống cấp của năng lượng*: Sự xuống cấp của các nguồn năng lượng được tìm thấy trong tự nhiên là một dạng của sự hủy hoại môi trường. Kestin (1980) khẳng định rằng các nguồn năng lượng vốn là vật chất hình thành trong tự nhiên hay nhân tạo đều ở trong trạng thái mất cân bằng với môi trường và có exergy xem như là hậu quả của sự mất cân bằng này. Hai đặc tính của các nguồn NL đó là tính chất và thành phần của nó. Quá trình làm tăng giá trị (và exergy) của nguồn NL bằng cách làm tinh khiết để tăng exergy của nó cần tiêu thụ một lượng exergy từ một nguồn khác. Hiện có hai cách để giảm tác động môi trường ở các nguồn năng lượng bị xuống cấp [7]:

+ *Tăng hiệu quả* thông qua giảm exergy cần thiết cho quá trình do đó giảm sự phá hủy môi trường. Việc tăng hiệu quả cũng thường luôn giảm exergy ph ả ả ả thải.

môi trường và ông cho rằng nếu ai tìm ra được những mối quan hệ đặc biệt giữa exergy và tác động môi trường thì sẽ rất xứng đáng được nhận Giải thưởng Nobel. Hãy xem xét một số vấn đề liên quan:

- *Phát thải exergy và sự phá hủy trật tự môi trường*

Theo Rosen và Dincer (1997) [8] sự giảm tác động môi trường của một quá trình do giảm sự phá vỡ trật tự, do sự xuống cấp của

+ *Sử dụng các nguồn exergy từ bên ngoài* (Chẳng hạn như năng lượng mặt trời): Trái đất là một hệ thống hở dễ dàng đón nhận dòng exergy từ mặt trời. Đó là exergy được cấp ra cùng bức xạ mặt trời và cuối cùng lại bức xạ trở lại vũ trụ. Sự hủy hoại môi trường có thể được giảm bớt do thay thế các nguồn NL xuống cấp trong tự nhiên và do tính mở của trái đất. Nếu vì một lý do nào đó trái đất trở nên một hệ kín thì nguồn NL này sẽ trở nên ngày càng xuống cấp do nhiệt độ môi trường tăng lên. Đây chính là ảnh hưởng trái đất bị một lớp khí quyển như bao bọc.

- Tác hại của sự phát thải exergy của các chất thải

Khi exergy bị thải ra do sự mất cân bằng với môi trường có khả năng tạo nên các biến động th exergy của nó được xem như là một khả năng phá hủy môi trường. Khi phát thải vào môi trường, exergy này là hiệu ứng làm biến đổi môi trường. Các biến đổi này thường theo hướng phá hủy môi trường (ví dụ khí thải), ít khi tác động tốt cho môi trường (ví dụ vùng sông, hồ gần chỗ thải của nước làm mát ở các nhà máy điện về mùa đông). Exergy phát thải vào môi trường có thể bị cản trở của CO₂ và các



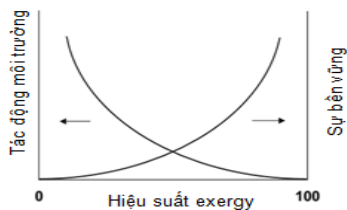
Hình 6. Exergy bị kìm hãm và exergy được giải phóng

khí quyển khác, vì vậy cần xác định rõ exergy là dạng bị kìm chế hay được giải phóng (hình 6). Đây là minh họa so sánh thể hiện exergy bị kìm hãm trong một hệ thống là một nguồn, còn exergy phát thải vào môi trường là dạng được giải phóng và có khả năng xâm hại môi trường [6, 8]

Theo Reistad [6] hầu hết các nguồn exergy tìm thấy trong môi trường đều là dạng bị kìm hãm và là nguồn exergy có giá trị, còn các exergy phát thải đều là dạng không bị kìm hãm và tự do tác động hủy hoại môi trường hoặc có tiềm ẩn nguy cơ gây hại. Như vậy exergy bị kìm hãm (ví dụ trong nhiên liệu) là luôn luôn có giá trị và giá trị của nó phụ thuộc vào các chỉ tiêu kinh tế.

4.Exergy và phát triển bền vững

Phát triển bền vững không chỉ yêu cầu là phải sử dụng các nguồn năng lượng bền vững mà các nguồn năng lượng này còn phải được sử dụng có hiệu quả. Phương pháp exergy chủ yếu được sử dụng



Hình 7. Quan hệ giữa tác động môi trường và sự bền vững của quá trình - với hiệu suất exergy của nó

trong việc cải thiện hiệu quả, nó cho phép kết nối tối đa những lợi thế của các nguồn năng lượng đồng thời giảm thiểu tới mức thấp nhất những tác động tiêu cực (như là sự phá hủy môi trường). Hiệu quả sử dụng lớn hơn sẽ cho phép những nguồn năng lượng như vậy đóng góp vào sự phát triển lâu dài. Điều đó có thể đạt được khi sử dụng các nguồn năng lượng ít hoặc không có chất thải vào môi trường, hoặc là sử dụng các công nghệ không có hoặc có ít tác động xấu đến môi trường.

Phương pháp phân tích exergy có thể được sử dụng để cải thiện tính bền vững. Do exergy có thể bị mất đi do những quá trình không thuận nghịch bên trong, nên cần

giảm thiểu đến mức tối đa các tổn thất exergy, đặc biệt là khi sử dụng các dạng năng lượng không tái tạo được, để có được sự phát triển bền vững.

Từ hình 5 đã trình bày ở trên ta có thể biểu thị rõ hơn mối quan hệ giữa việc tăng hiệu suất exergy với việc tăng độ bền vững và giảm tác động môi trường như ở hình 7.

Khi hiệu suất exergy đạt 100% thì tác động môi trường coi như bằng không, exergy chỉ được biến đổi từ dạng này sang dạng khác mà không có tổn thất (do tiêu thụ bên trong hoặc do phát thải) và tính bền vững cũng vô cùng lớn vì quá trình trở nên thuận nghịch. Khi hiệu suất exergy 0% thì sự bền vững không có vì nguồn exergy bị kìm hãm được sử dụng nhưng không trọn vẹn và tác động môi trường là rất lớn vì để cung cấp cho một dịch vụ cố định thì phải tăng số lượng phát thải exergy bị kìm hãm.

Các quan hệ giữa môi trường và sự bền vững với hiệu suất exergy có thể được minh họa (định tính) qua các ví dụ 4,5. Trước tiên chúng ta hãy phát triển một số quan hệ cần thiết cho sự phân tích này.

- Hiệu suất exergy của chu trình nhà máy nhiệt điện: $\eta_{eD} = E^-/E^+$, (6). Ở đây E^- là công suất exergy nhận được ở đầu ra (công suất công của tua bin), E^+ là công suất exergy đưa vào (CS exergy của nhiên liệu tiêu hao)

- Hiệu suất exergy của chu trình lạnh: $\eta_{eL} = E_{Q_0}^-/E^+ = 1 - (\Pi/E^+)$, (7). Với tổn thất

$$\text{exergy } \Pi = E^+ - E_{Q_0}^-$$

Ở đây $E_{Q_0}^-$ là công suất exergy cung cấp cho đối tượng cần làm lạnh, E^+ là CS exergy đưa vào (Công suất điện tiêu thụ). Đối với máy lạnh nén hơi ta cũng có thể tính η_{eL} thông qua các hệ số lạnh $COP_t = Q_0/E^+$ của chu trình thực và $COP_C = Q_0/E_{Q_0}^+$

của chu trình lý tưởng Carnot (thuận nghịch) tương đương: $\eta_{eL} = COP_t/COP_C$, (8)

COP_C của chu trình thuận nghịch lý tưởng được xác định theo nhiệt độ nguồn lạnh T_0 và nhiệt độ của nguồn nhiệt độ cao T_K : $COP_C = T_0/(T_K - T_0)$, (9)

Theo Connely và Koshland (1997) [9], hiệu quả tiêu thụ nhiên liệu hóa thạch được đặc trưng bởi độ suy giảm (depletion number) D_p là tỷ số giữa độ phá hủy exergy Ex_D (hay là tổn thất exergy Π) và exergy đầu vào Ex_{in} : $D_p = Ex_D/Ex_{in} = \Pi / Ex_{in}$, (10)

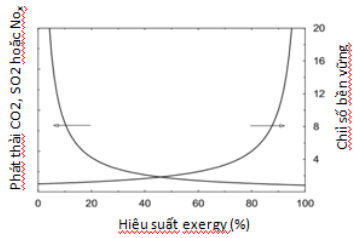
Ta có quan hệ giữa hiệu suất exergy và D_p : $\eta_e = 1 - D_p$, (11)

Như vậy độ suy giảm càng lớn thì hiệu suất exergy càng nhỏ. Tính bền vững của một nguồn nhiên liệu được biểu thị bằng chỉ số bền vững SI là nghịch đảo của độ suy giảm: $SI = 1/D_p$, (12)

Ví dụ 4 : Ảnh hưởng phát thải CO_2 : Áp dụng phương pháp này, có thể xây dựng quan hệ giữa hiệu suất exergy với chỉ số bền vững SI và tổng phát thải các chất độc hại, gây hiệu ứng nhà kính gồm CO_2 , SO_2 , NO_x tính ứng với 1kWh điện năng sản xuất ra và được biểu thị trên đồ thị hình 8 cho trường hợp nhà máy sử dụng khí thiên

nhì ên (chủ yếu làm êtan) làm nhì ên liệu. Ở đây tác động môi trường được biểu thị qua lượng CO_2 phát thải 2,75 kg/1kg CH_4 với exergy hóa học của m êtan là 51,84 kJ/kg (Szargut, 1988). Quan hệ định tính (hình 6) được cụ thể hơn ở hình 8 với độ bền vững biểu thị qua chỉ số SI.

Ví dụ 5 : Ảnh hưởng phát thải SO_2 và NO_x : Một máy ĐHKK cục bộ duy trì nhiệt độ phòng 25°C khi nhiệt độ ngoài trời là 32°C. Coi rằng điện năng tiêu thụ được sản xuất từ nhà máy nhiệt điện đốt than với công suất đơn vị 1kW sinh ra 6,38g SO_2 và 3,69g NO_x phát thải (theo số liệu của USDOE, 1998). Trên đồ thị hình 8 không nhìn thấy giá trị tuyệt đối ở trục phát thải. Ở hiệu suất exergy 50%, các lượng phát thải CO_2



Hình 8. Quan hệ giữa phát thải CO_2 , SO_2 hoặc NO_x và chỉ số bền vững SI của một quá trình với hiệu suất exergy

là 0,38kg, còn phát thải SO_2 là 0,43kg, NO_x là 0,25g. Tác động môi trường được biểu thị qua lượng SO_2 và NO_x phát thải. Các phát thải này và chỉ số bền vững SI phụ thuộc vào hiệu suất exergy cho 1kWh tải lạnh cũng được minh họa trên hình 8.

Trong các ví dụ trên, các nhì ên liệu sử dụng thuộc loại bị kìm hãm là nhì ên liệu hóa thạch. Nếu sử dụng các nguồn NL tái tạo như NL địa nhiệt, NL gió,... thì chỉ số bền vững sẽ cao hơn, tác động môi trường ít hơn.

5.Exergy, kinh tế exergy và bài toán tối ưu hóa

Trong việc phân tích phương án và thiết kế các hệ thống năng lượng ta phải sử dụng kết hợp các mặt kỹ thuật (chủ yếu là các đặc tính nhiệt động học) với tính kinh tế để có được phương án thiết kế tối ưu. Mặt kinh tế có ý nghĩa quan trọng trong việc đánh giá các công nghệ năng lượng xanh. Với các thiết bị biến đổi năng lượng, giá thành thường được dựa trên giá năng lượng. Tuy nhiên từ những năm 80 nhiều nhà nghiên cứu đề xuất và áp dụng tính giá thành chính xác hơn là dựa trên giá của exergy đầu ra, mà không phải là giá năng lượng [2,9]. Theo các cách tính này có thể nhận biết khâu nào cần đầu tư tối ưu hóa thiết kế và vận hành hệ thống.

- *Giá thành exergy:* Lâu nay giá thành năng lượng không tính tới mức độ nhiệt độ của nhiệt năng cung cấp, do vậy rất không chính xác khoa học và sát thực [1]. Phương pháp exergy không xếp năng lượng điện ra như một loại năng lượng ưu tiên như phương pháp năng lượng đã làm là trừ ngay giá bán điện vào chi phí thiết bị. Theo phương pháp kinh tế - exergy các dạng năng lượng khác nhau được tính tới trong mối quan hệ thống nhất, giá nhiệt năng được tính theo các nhiệt độ của số lượng nhiệt năng được bán ra, giá exergy độc lập với dạng biểu hiện của nó (công, điện, nhiệt hay năng lượng biến đổi).

Giá thành trung bình năm của exergy (P_x) đối với năm vận hành có thể được xác định qua tổng chi phí hàng năm D_n , VNĐ: $P_x = \frac{D_n}{\int_1 \text{ năm} (\Sigma e + \Sigma E_q + \Sigma E_w) dt}$ VNĐ/kWh,

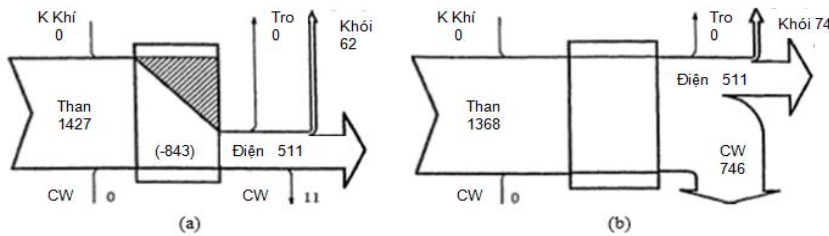
(13). Mẫu số là tiêu tốn exergy hàng năm tính theo tổng (tích phân) theo thời gian τ của các đường cong hàng năm với các công suất khác nhau (điện, nhiệt, năng lượng biến đổi) E_e^- , E_q^- , E_w^- . Giá thành NL nhiệt được tính chỉ cho exergy P_x của nó $P_q =$

$$\theta P_x = [1 - (T_a / T)] P_x,$$

(14). Giá thành của lạnh có nhiệt độ T_f : $P_{qf} = (E_{qf}^- / E_f^+) P_x = -\theta_f P_x$

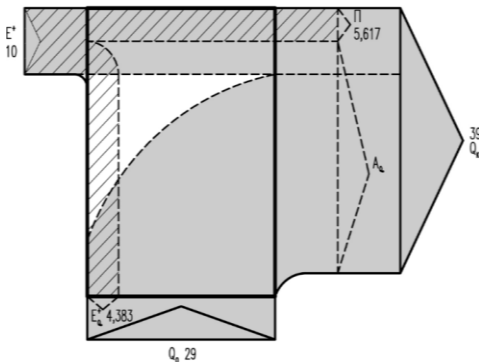
$$= [(T_a / T_f) - 1] P_x, \quad (15).$$

Từ (13) cho thấy phương pháp exergy cho phép xác định các giá tương ứng của các dạng NL khác nhau



Hình 9. Cân bằng năng lượng, exergy tổng thể của một nhà máy nhiệt điện đốt than 505 kW

theo cách làm logic và khoa học. Các công thức (14) và (15) cho thấy khi ta sưởi đến nhiệt độ càng cao hay làm lạnh tới nhiệt độ càng thấp thì giá nhiệt năng sẽ càng cao và tiến dần tới giá điện năng (P_q , P_{qf} dần tới P_x). Ở $T = T_a$ hay $T_f = T_a$ giá nhiệt năng đều bằng không nhưng khi nhiệt độ sưởi tăng một lượng Δt bằng với độ giảm nhiệt độ lạnh thì $P_q < P_{qf}$ ta nói rằng lạnh đắt hơn nhiệt.



Hình 10. Cân bằng Năng lượng-Exergy của bơm nhiệt sưởi ấm 39 kW máy nén nửa kín

-Về bài toán tối ưu hóa nhiệt lạnh: Cũng

do phương pháp exergy cho phép đánh giá chính xác hơn giá trị đích thực của năng lượng và chỉ ra đầy đủ, đúng chỗ xảy ra tổn thất cũng như độ lớn của các tổn thất này mà nó đáng được ưu tiên sử dụng trong các bài toán tối ưu hóa kỹ thuật và kinh tế, cả khi đánh giá so sánh để chọn phương án thiết kế hay vận hành tối ưu hệ thống. Ví như khi chọn phương pháp cân bằng năng lượng để xác định hiệu quả các hệ thống máy lạnh/bơm nhiệt và các thiết bị trao đổi

nhiệt ta đã bỏ qua các tổn thất không thuận nghịch của quá trình truyền nhiệt, quá trình tiết lưu. Khi chọn đối tượng đầu tư cải tiến nâng cao hiệu quả cũng cần theo thứ tự ưu tiên những đối tượng gây tổn thất exergy nhiều nhất. Hàm mục tiêu tối ưu hóa các bài toán nhiệt – lạnh không chỉ dựa trên giá thành năng lượng mà phải là giá thành exergy của mọi dạng năng lượng tham gia quá trình. Cách tính dựa trên cân bằng các số lượng của các dạng năng lượng như cơ năng, điện năng, nhiệt năng, ... và cách đánh giá so sánh các số lượng năng lượng này với nhau theo kiểu hiệu suất năng lượng hay hệ số bơm nhiệt, hệ số lạnh là rất ít tính thuyết phục. Trong bài toán tối ưu hóa tổng hợp thì cả hiệu suất nhiệt hay hệ số lạnh và hiệu suất exergy cũng chỉ dùng làm định

hướng tối ưu về mặt kỹ thuật, còn cần phải xét tới cả các mặt kinh tế và tác động môi trường của hệ thống, tức là phải thực hiện các tính toán kinh tế exergy và tác động môi trường để tạo ra các công nghệ xanh thực sự.

Ví dụ 6: *Cân bằng năng lượng, exergy nhà máy nhiệt điện:* Trong [6] đã thực hiện phân tích exergy cho một nhà máy nhiệt điện đốt than ở Ontario, Canada công suất 505 MW với 8 lò hơi đốt bột than, áp suất hơi 16,89 MPa, 538°C. Khí thải qua ống khói cao 198m, có nhiệt độ 120°C, lọc bụi tĩnh điện hiệu quả 95%. Nhiệt độ nước làm mát lưu lượng 18,9 m³/s tăng 8,3K khi qua bình ngưng. Hơi ra khỏi thân tuabin cao áp được gia nhiệt lại trong lò hơi để vào phần tua bin trung áp trước khi qua 2 tua bin hạ áp kéo máy phát điện.

Cân bằng năng lượng và cân bằng exergy được trình bày trên hình 9. Hiệu suất NL (điện năng SX / nhiệt do than mang vào) đạt khoảng 37 %, hiệu suất exergy tương ứng là 36%, hiệu suất NL của lò hơi là 95%, Hiệu suất exergy 50%, tức là gần như toàn bộ NL đưa vào được nước hấp thụ, còn tổn thất exergy hầu như do quá trình cháy và tổn thất do truyền nhiệt. Trong bình ngưng thì gần như 100% NL vào bị thải bỏ, còn chỉ có khoảng 25% exergy bị thải bỏ còn 75% được tiêu thụ cho quá trình truyền nhiệt bên trong. Tổn thất NL trong các bộ phận khác được xác định là rất nhỏ (10MW), tổn thất exergy cũng tương đối nhỏ (150 MW). Các tổn thất exergy chủ yếu do các tiêu thụ bên trong.

Phát thải exergy từ nhà máy chủ yếu do khí thải, chất thải rắn, nhiệt thải ra khí quyển và hồ nước cung cấp nước làm mát ngưng tụ. Exergy của các phát thải này có khả năng tác động xấu đến môi trường qua các khí độc hại trong khí thải và nhiệt thải vào vùng nước quanh điểm xả nước làm mát. Trong quá trình biến đổi và truyền NL trong lò hơi, exergy của than bị xuống cấp, Nếu các quá trình xảy ra hoàn hảo gần với điều kiện lý tưởng để hiệu suất exergy tăng từ 37 đến 100% thì phát thải có thể giảm tới 60%. Đặc tính hủy hoại trật tự môi trường xuất hiện khi tiêu thụ exergy của nhiên liệu để chuyển thành khí và chất thải rắn có độ trật tự thấp hơn và tạo nên sự xáo trộn thải vào môi trường để tạo động lực cho khí thoát ở dạng không bị kìm hãm. Cũng phải nói thêm là với ống khói cao ở đây đã có tác dụng phần nào giảm ô nhiễm cục bộ nơi dân cư sinh sống.

Ví dụ 7: *Cân bằng năng lượng, exergy của máy lạnh/bơm nhiệt:* Xét bơm nhiệt R22, loại nước/nước để sưởi bằng nước nóng về mùa đông nhiệt độ môi trường 10°C, công suất sưởi 39 kW, máy nén nửa kín tiêu thụ điện 10 kW, nước nguồn lạnh bị làm lạnh đi 5K. Chu trình không quá lạnh, có quá nhiệt 5K, nhiệt độ nước sưởi vào/ra = 40/47°C. Cân bằng NL và exergy có dạng như ở hình 10 (Phần gạch chéo: CB exergy, Phần nền đậm: CB năng lượng). Hệ thống đạt hiệu quả sưởi COP_s = 390%, hiệu suất exergy $\eta_e = 48,3\%$. Các tổn thất ở các thiết bị chính theo thứ tự giảm dần là Máy nén 2,35kW, Van tiết lưu 1,324kW, Bình ngưng 1,15kW, Bình bốc hơi 0,78kW.

Sự xuống cấp NL ở đây đã giảm nhiều so với trường hợp sưởi ấm trực tiếp bằng điện năng (hiệu suất <10%), khi ấy ta chỉ nhận được 10kW nhiệt. Sự xuống cấp NL xảy ra mạnh nhất vẫn là ở máy nén, ở đây phải tiêu tốn exergy (điện/cơ năng) để thực hiện quá trình nén môi chất lạnh tới nhiệt độ khoảng 100°C thấp xa để có thể coi nhiệt năng này tương đương với exergy, đó là một sự tiêu thụ exergy bên trong, ít khả năng

phát thải vào môi trường. Tồn thất exergy có độ lớn tiếp sau là ở van tiết lưu mà trong cách tính cân bằng NL ta đã hoàn toàn bỏ qua. Nói chung đối với máy lạnh nói chung và bơm nhiệt nói riêng thì exergy phát thải có giá trị thấp (ở gần nhiệt độ môi trường), số lượng lại nhỏ so với nhà máy nhiệt điện và nhiều hệ thống năng lượng khác, lại thường ở phân tán nên tác động môi trường thấp hơn. Vấn đề còn nằm ở tác động của môi chất lạnh với tầng ôzôn và gây hiệu ứng nhà kính như trường hợp của R22 ở ví dụ này. Giải pháp sử dụng hệ thống lạnh/bơm nhiệt và ĐHKK trung tâm sẽ dễ giải quyết triệt để tác động môi trường hơn. ĐHKK các kiểu cục bộ, phân tán/VRF tuy phát thải nhỏ nhưng số lượng lại lớn, rải ra trong khu vực dân cư sẽ lại là vấn đề ô nhiễm nhiệt cục bộ ảnh hưởng tới cụm dân cư và môi trường.

6. Kết luận

Bài viết đã cố gắng làm rõ mối quan hệ giữa năng lượng, exergy, môi trường và phát triển bền vững cùng với các minh họa liên hệ thực tế. Qua đó đã nhấn mạnh vai trò của việc vận dụng Nguyên lý II nhiệt động và phương pháp phân tích exergy trong nghiên cứu, thiết kế tối ưu hóa sử dụng năng lượng, giảm tác động môi trường trong ngành Nhiệt – Lạnh. Lý thuyết exergy là một công cụ làm việc có ý nghĩa thực tế to lớn cho phép phán đoán chính xác những khía cạnh liên quan đến “sức khỏe nhiệt động” của hệ thống khi làm rõ tất cả những khiếm khuyết tương ứng nhằm tạo nên những công nghệ xanh cho công nghiệp, đời sống và phát triển bền vững.

Tài liệu tham khảo

1. Phạm Văn Tùy – Phương pháp phân tích chất lượng và tính toán hiệu quả các hệ thống Nhiệt – Lạnh. NXB Bách Khoa Hà Nội. Hà Nội, 2011.
2. Lucien Borel et al. – Thermodynamique et Energetique, Vol. I+II, Tome II – Presses Polytechniques Romandes. Lausanne, Suisse. 1987
3. Phạm Văn Tùy, Lương Thế Ngọc – Một số vấn đề tự động hóa tính toán và quản lý vận hành các hệ thống lạnh – Tuyển tập báo cáo khoa học, ĐHBK Hà Nội. 1996.
4. Trịnh Quốc Dũng – Tính toán, phân tích hiệu quả làm việc của hệ thống Bơm nhiệt sấy lạnh theo phương pháp exergy – Luận văn Thạc sỹ khoa học, ĐHBK Hà Nội. 2006
5. Trần Quốc Sơn – Nghiên cứu xác định giới hạn kỹ thuật của bơm nhiệt hút ẩm và sấy lạnh - Luận văn Thạc sỹ khoa học, ĐHBK Hà Nội. 2014.
6. Marc A. Rosen, Ibrahim Dincer – Exergy as the confluence of energy, environment and sustainable development – Exergy Int. J. 1(1) (2001) 3-13
7. Marc A. Rosen, Associate Editor – Can exergy help us understand and address environmental concerns? – Exergy, an International Journal 2 (2002) 214-217.
8. Marc A. Rosen, Ibrahim Dincer, Mehmet Kanoglu – Role of exergy in increasing efficiency and sustainability and reducing environmental impact – Energy Policy 36 (2008) 128-137.

9. A.J.G.G. Graveland, E. Gisolf – Exergy analysis: An efficient tool for process optimization and understanding – Computers chem. Engng Vol. 22, Suppl., pp. s545-s552, 1998.

10. Jizhong Zhou, Shijun Ma, George W. Hinman – Ecological exergy analysis: a new method for ecological energetic research – Ecological Modelling 84 (1996) 291-303.

11. Enrico Sciubba, Simone Bastianoni, Enzo Tiezzi – Exergy and extended exergy accounting of very large complex systems with an application to the province of Siena, Italy – Journal of environmental Management 86 (2008) 372-382.

Tóm tắt

Bài báo trình bày các quan hệ giữa năng lượng, exergy, tác động môi trường và phát triển bền vững, đồng thời trình bày về mối quan hệ chặt chẽ giữa các mặt kỹ thuật, môi trường và kinh tế. Một số ví dụ minh họa thực tế cho những khái niệm có tính trừu tượng cũng được trình bày và thảo luận. Exergy và phương pháp phân tích exergy cần được sử dụng hữu ích trong thiết kế và nghiên cứu cải tiến cho các kỹ sư, các nhà khoa học cũng như những người hoạch định chính sách.

Từ khóa: Exergy, Phân tích exergy, Entropy, Môi trường, Phát triển bền vững