

Đánh giá hiệu quả hệ thống cung cấp nước nóng dùng bộ thu năng lượng mặt trời kết hợp với bơm nhiệt

Tạ Văn Chương, Nguyễn Nguyên An*

Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

Ngày nhận bài 29.1.2015, ngày gửi phản biện 4.2.2015, ngày nhận phản biện 16.3.2015, ngày chấp nhận đăng 27.3.2015

Bài báo trình bày việc xây dựng một phương pháp đánh giá hiệu quả của hệ thống sản xuất nước nóng dùng bộ thu năng lượng mặt trời (NLMT) kết hợp với bơm nhiệt (lắp đặt tại khách sạn Thế giới xanh, TP Nha Trang) dựa trên các số liệu hoạt động của hệ thống. Trên cơ sở phân tích hoạt động của hệ thống đã xác định được các đại lượng cần đo và xây dựng được một hệ thống đo, thu thập số liệu tự động. Thông qua các số liệu thu thập được, các chỉ tiêu đặc trưng cho hiệu quả sử dụng của hệ thống như: mức độ tiêu thụ năng lượng, phân bố năng lượng, khả năng tiết kiệm năng lượng, mức độ giảm phát thải CO_2 ... đã được xác định. Đây là cơ sở để phát triển và tối ưu hóa các hệ thống sản xuất nước nóng tương tự trong tương lai.

Từ khóa: bộ thu năng lượng mặt trời, bơm nhiệt, năng lượng, nhiệt độ, phát thải CO_2 .

Chỉ số phân loại 2.11

EVALUATION OF THE EFFECTS OF HOT WATER PRODUCTION SYSTEM USING SOLAR COLLECTOR COMBINED WITH HEAT PUMP

Summary

The paper presents the development of a method to evaluate the effect of hot water production system using solar collector combined with heat pump (at Green World hotel, Nha Trang) based on the operation data of the system. On the basis of analysing the system operation, the parameters to be measured in the system have been determined, and a measuring and data collecting system has been built. Through the collected data, the indicators characterising the efficiency of the system such as energy consumption, energy distribution, energy saving capability, CO_2 emissions reduction, and so on of the system have been determined. These results provide a basis to develop and optimise other similar hot water production systems in the future.

Keywords: CO_2 emission, energy, heat pump, solar collector, temperature.

Classification number 2.11

Bảng các ký hiệu sử dụng

$C_{p, hp}$	Nhiệt dung riêng đẳng áp của nước qua bơm nhiệt	kJ/kg.K
$C_{p, sol}$	Nhiệt dung riêng đẳng áp của nước qua bộ thu NLMT	kJ/kg.K
$C_{p, sd}$	Nhiệt dung riêng đẳng áp của nước đưa đi sử dụng	kJ/kg.K
$EF_{CO_2, e}$	Hệ số phát thải CO_2 trong sản xuất điện	kg/kWh
G_{CO_2}	Khối lượng CO_2	kg/ngày
P_e	Công suất tiêu thụ điện của hệ thống	kWh/ngày
Q_{sd}	Nhiệt lượng dùng sản xuất nước nóng	kWh/ngày
Q_{hp}	Nhiệt lượng cung cấp bởi bơm nhiệt	kWh/ngày
Q_{sol}	Nhiệt lượng cung cấp bởi NLMT	kWh/ngày
$t_{hp, in}$	Nhiệt độ nước vào bơm nhiệt	$^{\circ}C$
$t_{hp, out}$	Nhiệt độ nước ra khỏi bơm nhiệt	$^{\circ}C$
$t_{hp, tb}$	Nhiệt độ trung bình của nước qua bơm nhiệt	$^{\circ}C$
t_{nc}	Nhiệt độ nước lạnh cấp vào hệ thống	$^{\circ}C$
t_{sd}	Nhiệt độ nước nóng đi sử dụng	$^{\circ}C$
t_{tb}	Nhiệt độ trung bình của nước qua hệ thống	$^{\circ}C$
$t_{sol, in}$	Nhiệt độ nước vào bộ thu NLMT	$^{\circ}C$
$t_{sol, out}$	Nhiệt độ nước ra khỏi bộ thu NLMT	$^{\circ}C$
$t_{sol, tb}$	Nhiệt độ trung bình của nước qua bộ thu NLMT	$^{\circ}C$
V_{hp}	Thể tích nước qua bơm nhiệt	m ³ /ngày
V_{sol}	Thể tích nước qua bộ thu NLMT	m ³ /ngày
V_{sd}	Thể tích nước nóng sử dụng	m ³ /ngày
$\rho_{n, hp}$	Khối lượng riêng của nước qua bơm nhiệt	kg/m ³
$\rho_{n, sol}$	Khối lượng riêng của nước qua bộ thu NLMT	kg/m ³
$\rho_{n, sd}$	Khối lượng riêng của nước đưa đi sử dụng	kg/m ³

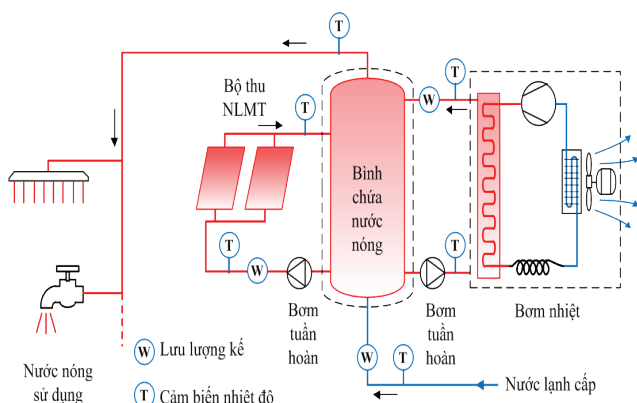
*Tác giả chính: Email: an.nguyennghien@hust.edu.vn

Đặt vấn đề

Năng lượng dùng cho sản xuất nước nóng luôn chiếm tỷ lệ lớn trong các tòa nhà cũng như các hộ dân cư [1, 2]. Vì vậy, việc sử dụng năng lượng hiệu quả trong sản xuất nước nóng có đóng góp không nhỏ trong việc giải quyết vấn đề an ninh năng lượng và rộng hơn là vấn đề biến đổi khí hậu. Có nhiều phương pháp nâng cao hiệu quả sử dụng năng lượng trong sản xuất nước nóng đang được áp dụng hiện nay. Trong đó, nổi bật nhất là phương pháp sử dụng bộ thu NLMT kết hợp với bơm nhiệt vừa được nghiên cứu và đang áp dụng thử nghiệm tại khách sạn Thế giới xanh, TP Nha Trang. Đây là một khách sạn 4 sao với quy mô 201 phòng nghỉ khách sạn và 27 căn hộ du lịch cao cấp được bố trí trong một tòa nhà cao 21 tầng tọa lạc tại số 44, đường Nguyễn Thị Minh Khai, TP Nha Trang, tỉnh Khánh Hòa [3]. Để tạo cơ sở cho việc phát triển và nhân rộng hệ thống sản xuất nước nóng theo phương pháp vừa nêu, những đánh giá, phân tích khoa học về hiệu quả của hệ thống đang thử nghiệm là cần thiết.

Mô tả hệ thống

Hình 1 là sơ đồ nguyên lý của hệ thống sản xuất nước nóng dùng bộ thu NLMT kết hợp với bơm nhiệt (sau đây được gọi là hệ thống), được xây dựng phục vụ cho nghiên cứu này. Trong đó, hệ thống gồm 2 phần chính (kết nối song song với bình chứa nước nóng 30 m³), là các bộ thu NLMT cấu tạo từ các ống hấp thụ NLMT kiểu chân không và phần các bơm nhiệt dự phòng. Ngoài ra, các thiết bị khác như: bơm nước, van một chiều, van chặn, cảm biến nhiệt độ, lưu lượng kế đã được lắp đặt để đảm bảo hệ thống hoạt động.



Hình 1: sơ đồ nguyên lý hệ thống sản xuất nước nóng dùng bộ thu NLMT kết hợp với bơm nhiệt

Về nguyên lý hoạt động, khi có bức xạ mặt trời, nhiệt năng hấp thụ được tại các bộ thu NLMT của hệ thống sẽ làm tăng nhiệt độ của nước. Khi độ tăng nhiệt độ đủ lớn, các bơm nước tuần hoàn của hệ thống NLMT sẽ hoạt động, nhờ đó nhiệt năng hấp thụ được ở các bộ thu NLMT sẽ được tích vào trong bình chứa nước nóng. Trường hợp nhiệt năng thu được từ NLMT không đáp ứng đủ cho nhu cầu sử dụng, các bơm nhiệt sẽ được kích hoạt và nhiệt năng mà nó tạo ra cũng được tích vào bình chứa nước nóng để đáp ứng nhu cầu sử dụng. Với nguyên lý hoạt động nêu trên, hệ thống có khả năng cung cấp nước nóng trong mọi điều kiện thời tiết với các thông số kỹ thuật như ở bảng 1.

Bảng 1: thông số kỹ thuật của hệ thống sản xuất nước nóng dùng bộ thu NLMT kết hợp với bơm nhiệt

TT	Thiết bị	Thông số	Giá trị
1	Bộ thu NLMT	Loại ống hấp thụ	Kiểu thủy tinh chân không
		Kích cỡ ống	Φ 58 mm, L1750 mm
		Số lượng ống hấp thụ	1350 ống
		Số lượng bộ thu NLMT	27 bộ
		Diện tích bề mặt hấp thụ tương đương	179 m ²
2	Bơm nhiệt	Công suất	20 kW
		Số lượng	5 cái
3	Bình chứa nước nóng	Dung tích	30 m ³
		Cách nhiệt	Polyurethal, khối lượng riêng 30 kg/m ³ , dày 90 mm

Quá trình hoạt động của hệ thống phụ thuộc trực tiếp vào điều kiện thời tiết (như: nhiệt độ môi trường, cường độ bức xạ mặt trời...). Tùy theo điều kiện thời tiết và nhiệt độ của nước trong bình chứa nước nóng mà hệ thống có thể hoạt động trong các trạng thái sau: các bộ thu NLMT và bơm nhiệt cùng hoạt động, chỉ các bộ thu NLMT hoạt động hoặc chỉ các bơm nhiệt hoạt động. Khi vận hành thực tế, cả 3 trạng thái hoạt động của hệ thống nêu trên đều có thể xảy ra, trong đó trạng thái chỉ các bộ thu NLMT hoạt động thường gặp khi trời nắng, còn trạng thái chỉ các bơm nhiệt hoạt động thường xảy ra về đêm hoặc sáng sớm khi nhiệt độ nước nóng trong hệ thống thấp mà NLMT không có.

Phương pháp đánh giá

Năng lượng nhiệt cần thiết để sản xuất nước nóng

đáp ứng nhu cầu sử dụng của hộ tiêu thụ được xác định thông qua thể tích nước sử dụng và nhiệt độ vào - ra của nước theo công thức (1).

$$Q_{sd} = V_{sd} \cdot \rho_{n,sd} \cdot C_{p,sd} (t_{sd} - t_{nc}) \quad (1)$$

Trong đó, thể tích nước nóng sử dụng V_{sd} và nhiệt độ nước lạnh cấp vào hệ thống t_{nc} cũng như nước nóng đi sử dụng t_{sd} là những đại lượng có thể đo đạc trực tiếp thông qua hệ thống thí nghiệm, còn khối lượng riêng $\rho_{n,sd}$ và nhiệt dung riêng đẳng áp $C_{p,sd}$ của nước đã sử dụng là những đại lượng vật lý phụ thuộc vào nhiệt độ. Một cách gần đúng có thể xác định $\rho_{n,sd}$ và $C_{p,sd}$ theo nhiệt độ trung bình của nước qua hệ thống theo công thức (2).

$$t_{tb} = \frac{t_{nc} + t_{sd}}{2} \quad (2)$$

Mặt khác, theo phân tích hoạt động của hệ thống, năng lượng nhiệt dùng để sản xuất nước nóng này là tổng hợp của nhiệt năng thu được từ hoạt động của các bộ thu NLMT và các bơm nhiệt xác định theo công thức (3).

$$Q_{sd} = Q_{sol} + Q_{hp} \quad (3)$$

Trong công thức (3), năng lượng nhiệt cung cấp bởi bộ thu NLMT được xác định bởi công thức (4).

$$Q_{sol} = V_{sol} \cdot \rho_{n,sol} \cdot C_{p,sol} (t_{sol,out} - t_{sol,in}) \quad (4)$$

Q_{hp} là phần năng lượng cung cấp bởi bơm nhiệt, nó có thể được tính dựa trên cơ sở cân bằng năng lượng trong thiết bị ngưng tụ giữa nước và môi chất lạnh về phía nước theo công thức (5).

$$Q_{hp} = V_{hp} \cdot \rho_{n,hp} \cdot C_{p,hp} (t_{hp,out} - t_{hp,in}) \quad (5)$$

Tương tự như trên, ta cũng xác định được nhiệt độ trung bình của nước qua bộ thu NLMT và qua bơm nhiệt theo công thức (6) và (7) tương ứng.

$$t_{sol,tb} = \frac{t_{sol,in} + t_{sol,out}}{2} \quad (6)$$

$$t_{hp,tb} = \frac{t_{hp,in} + t_{hp,out}}{2} \quad (7)$$

Một trong những ưu điểm nổi bật của hệ thống là khả năng giảm phát thải CO_2 , một loại khí có hại đối với môi trường. Phát thải CO_2 của hệ thống có thể xác định được dựa trên lượng điện năng tiêu thụ của hệ thống và hệ số phát thải CO_2 trong sản xuất điện theo công thức (8).

$$G_{co_2} = P_e \cdot EF_{CO_2,e} \quad (8)$$

Trong đó, $EF_{CO_2,e}$ là hệ số phát thải CO_2 trong sản xuất điện. Theo [4], trong ngành năng lượng nước ta, các nhà máy điện than đóng góp 54% phát thải CO_2 , các nhà máy điện khí đóng góp 40% và trung bình mỗi kWh điện phát thải 0,62 kg CO_2 . Một điểm quan trọng là hoạt động của hệ thống sản xuất nước nóng dùng bộ thu NLMT kết hợp với bơm nhiệt luôn thay đổi phụ thuộc vào điều kiện môi trường. Để đánh giá hiệu quả hoạt động của hệ thống một cách chính xác cần phải có nhiều số liệu thực nghiệm ứng với các trạng thái hoạt động khác nhau của hệ thống. Do đó, các số liệu thực nghiệm cần được đo đạc và lưu giữ để xử lý. Để làm được điều này, toàn bộ các thiết bị đo, như bố trí tại hình 1, được kết nối với một hệ thống tự ghi số liệu, cho phép ghi nhận sự thay đổi của các thông số làm việc như: nhiệt độ nước lạnh cấp vào hệ thống t_{nc} , nhiệt độ nước nóng đi sử dụng t_{sd} , nhiệt độ nước vào bộ thu NLMT $t_{sol,in}$, nhiệt độ nước ra khỏi bộ thu NLMT $t_{sol,out}$, nhiệt độ nước vào bơm nhiệt $t_{hp,in}$, nhiệt độ nước ra khỏi bơm nhiệt $t_{hp,out}$, thể tích nước nóng sử dụng V_{sd} , thể tích nước qua bộ thu NLMT V_{sol} và thể tích nước qua bơm nhiệt V_{hp} với tần suất 10 s/lần.

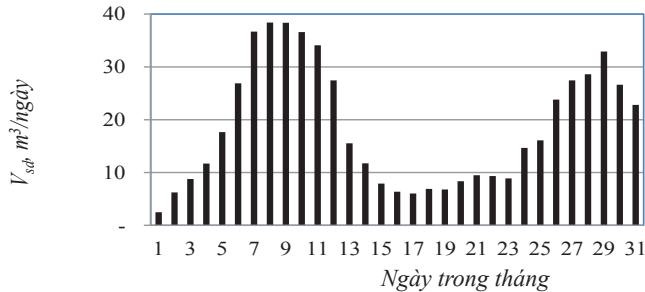
Kết quả

Trên cơ sở phân tích và tính toán các số liệu thực nghiệm từ hệ thống đo và tự ghi số liệu, một số đặc tính làm việc thể hiện hiệu quả làm việc của hệ thống đã được xác định:

Tiêu thụ năng lượng của hệ thống

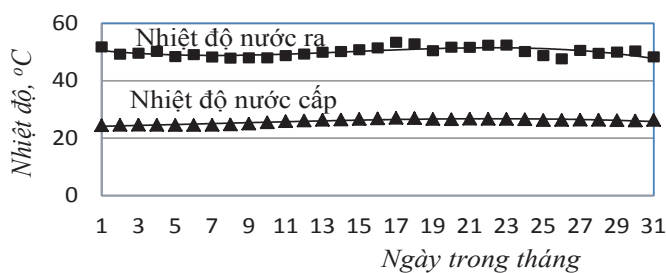
Theo công thức (1), để tính toán tiêu thụ năng lượng của hệ thống cần có các thông số: thể tích nước nóng sử dụng V_{sd} , nhiệt độ nước lạnh cấp vào hệ thống t_{nc} , và nhiệt độ nước nóng đi sử dụng t_{sd} . Yêu cầu quan trọng đối với hệ thống sản xuất nước nóng là phải đáp ứng đủ 100% nhu cầu của hộ tiêu thụ, do đó sản lượng nước nóng của hệ thống cũng chính là lượng nước nóng mà

hệ tiêu thụ sử dụng. Lượng nước này thay đổi theo nhu cầu sử dụng từng ngày và được thể hiện ở hình 2. Theo đó, trong thời gian khảo sát, sản lượng nước nóng của hệ thống đạt giá trị cực đại là 38,4 m³/ngày và cực tiểu là 2,48 m³/ngày.



Hình 2: sản lượng nước nóng của hệ thống trong tháng 1.2014

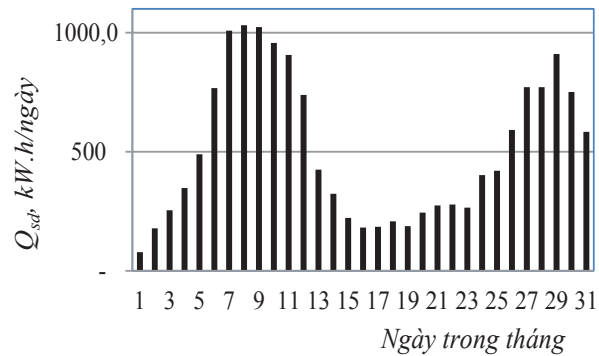
Sau khi thu thập và xử lý các số liệu, ta xác định được nhiệt độ trung bình của nước cấp và nước ra của hệ thống theo từng ngày. Kết quả các giá trị nhiệt độ này được biểu diễn ở hình 3.



Hình 3: nhiệt độ trung bình của nước cấp và nước nóng đưa đi sử dụng trong tháng 1.2014

Theo hình 3, nhiệt độ trung bình của nước lạnh cấp theo ngày ít thay đổi (thấp nhất là 24°C và cao nhất là 27°C). Có điều này là do nhiệt độ môi trường tại TP Nha Trang tương đối ổn định. Nhiệt độ trung bình nước lạnh cấp tính trong cả tháng là 25,9°C. Nhiệt độ nước nóng đầu ra đưa đi sử dụng phụ thuộc vào nhu cầu sử dụng, thời tiết và chế độ điều khiển và có giá trị trung bình trong tháng là 50°C.

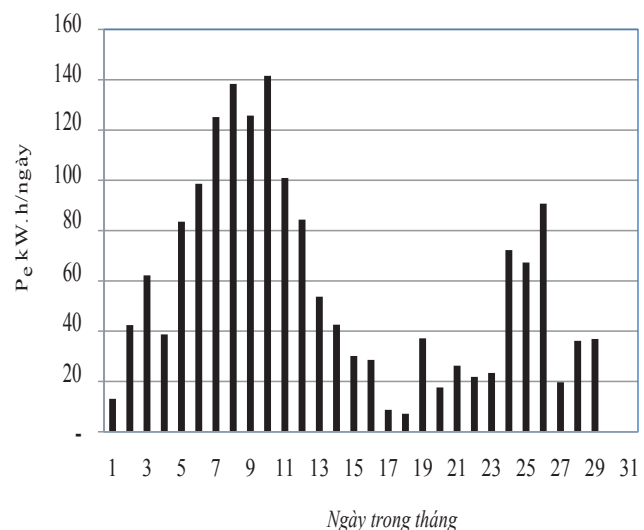
Sử dụng các kết quả về lưu lượng nước nóng sử dụng V_{sd} , nhiệt độ nước lạnh cấp vào hệ thống t_{nc} và nhiệt độ nước nóng đi sử dụng t_{sd} như trên, công thức (1) giúp ta tính được tiêu thụ năng lượng của hệ thống sản xuất nước nóng. Kết quả tính toán trong tháng 1.2014 được biểu diễn ở biểu đồ (hình 4).



Hình 4: tiêu thụ năng lượng của hệ thống trong tháng 1.2014

Công suất tiêu thụ điện của hệ thống

Công suất tiêu thụ điện là một thông số kỹ thuật quan trọng của hệ thống và là cơ sở để so sánh, đánh giá mức độ tiết kiệm năng lượng của hệ thống. Công suất tiêu thụ điện của hệ thống sản xuất nước nóng chính là công suất tiêu thụ điện của hệ thống bơm nhiệt và có thể xác định thông qua số chỉ của công tơ điện ghi lại. Thời gian hoạt động của bơm nhiệt trong hệ thống thay đổi theo từng ngày phụ thuộc nhu cầu tiêu thụ nước nóng và điều kiện thời tiết, do đó công suất tiêu thụ điện của hệ thống cũng thay đổi theo từng ngày (hình 5). Theo số liệu thu thập được, công suất tiêu thụ điện dùng để sản xuất nước nóng của hệ thống lớn nhất là 140 kWh/ngày và nhỏ nhất là 0 kWh/ngày, ứng với ngày NLMT đủ đáp ứng nhu cầu sử dụng.

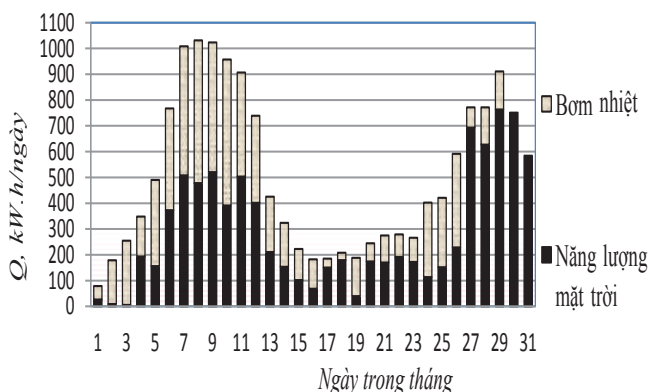


Hình 5: công suất tiêu thụ điện thực tế của hệ thống trong tháng 1.2014

Phân bố năng lượng sử dụng trong hệ thống

Đặc trưng của hệ thống là năng lượng dùng để sản xuất nước nóng được cung cấp bởi hai nguồn, đó là các bộ thu NLMT và hệ thống bơm nhiệt. Việc xác định chính xác từng thành phần là cơ sở để đánh giá mức độ tiêu thụ điện cũng như các chỉ tiêu kinh tế, kỹ thuật, môi trường khác của hệ thống.

Theo (1), tiêu thụ năng lượng của toàn bộ hệ thống đã được xác định. Do đó, ta chỉ cần xác định phần năng lượng được cung cấp từ các bộ thu NLMT hoặc bơm nhiệt. Theo công thức (5) và sử dụng các số liệu thực nghiệm thu thập được trong quá trình hoạt động của hệ thống ta có thể xác định phần năng lượng cung cấp từ bơm nhiệt, từ đó dễ dàng xác định phần năng lượng cung cấp từ NLMT. Kết quả phân bố năng lượng này được thể hiện ở hình 6.



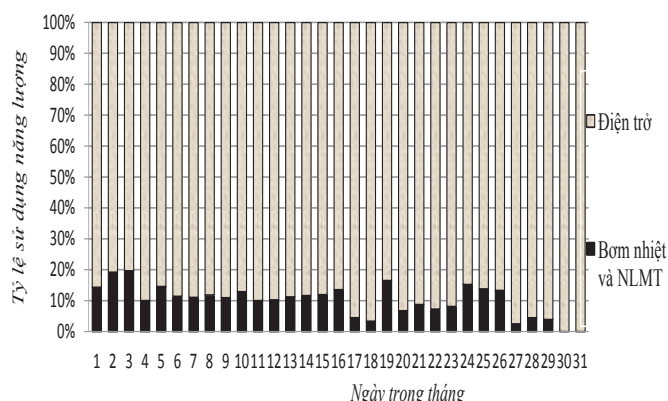
Hình 6: phân bố năng lượng sử dụng trong hệ thống trong tháng 1.2014

Hình 6 thể hiện phân bố NLMT và năng lượng bơm nhiệt trong hệ thống cấp nước nóng trong tháng 1.2014. Trong tháng này, tỷ lệ NLMT để gia nhiệt nước nóng là 53,75%. Với những ngày nhiều nắng (ngày 30, 31), tỷ lệ này là 100%, có nghĩa là hệ thống bơm nhiệt không cần hoạt động cũng đảm bảo nhu cầu sử dụng nước nóng của hộ tiêu thụ.

Khả năng tiết kiệm năng lượng của hệ thống

Ưu điểm chính của hệ thống là khả năng tiết kiệm năng lượng. Vì vậy, trong quá trình hoạt động của hệ thống cần tính toán, phân tích, đánh giá chi tiết về chỉ tiêu tiết kiệm năng lượng của hệ thống, làm cơ sở để so sánh với các hệ thống sản xuất nước nóng khác. Để đánh giá mức độ tiết kiệm năng lượng của hệ thống, ta

so sánh hệ thống với phương án sản xuất nước nóng thay thế thông dụng khác là phương án dùng điện trở. Hiện nay, phương án này vẫn được sử dụng rộng rãi do có ưu điểm là chi phí đầu tư tương đối thấp. Trong phương án sử dụng điện trở, khi giả thiết hiệu suất biến đổi điện thành nhiệt là 100% thì công suất điện cần thiết cũng chính bằng công suất nhiệt của hệ thống. Kết quả so sánh giữa hai phương án được thể hiện ở hình 7.

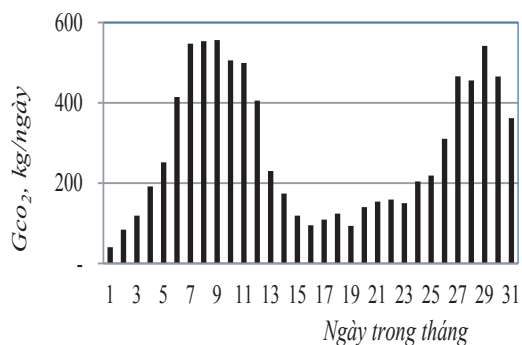


Hình 7: so sánh mức tiêu thụ năng lượng của hệ thống với phương án cấp nhiệt bằng điện trở, tháng 1.2014

Theo hình 7, tiêu thụ điện trung bình của hệ thống sản xuất nước nóng dùng bộ thu NLMT kết hợp với bơm nhiệt chỉ bằng 10,6% phương án sử dụng điện trở. Và trong ngày tiêu thụ điện cao nhất, tỷ lệ này cũng chưa tới 20%. Từ đây có thể thấy khả năng tiết kiệm năng lượng lớn của hệ thống.

Mức độ giảm phát thải CO₂ so với dùng phương pháp truyền thống

Việc sản xuất và sử dụng các nguồn năng lượng truyền thống như điện luôn kèm theo việc phát thải ra khí CO₂ gây hiệu ứng nhà kính. Hệ thống sản xuất nước nóng sử dụng NLMT kết hợp với bơm nhiệt tiêu thụ ít năng lượng điện đồng nghĩa với việc phát thải ít CO₂. Theo công thức (8), lượng phát thải CO₂ trong hệ thống tỷ lệ thuận với điện năng tiêu thụ, do đó hình 7 cũng thể hiện tỷ lệ CO₂ mà hệ thống phát thải so với dùng phương pháp điện trở truyền thống. Ngoài ra, sử dụng công thức (8) ta dễ dàng xác định được lượng giảm phát thải CO₂ của hệ thống. Kết quả lượng giảm phát thải CO₂ này được thể hiện trên hình 8.



Hình 8: lượng giảm phát thải CO₂ của hệ thống đo so với dùng phương án truyền thống, tháng 1.2014

Theo kết quả tính toán thể hiện trên hình 8, trong tháng khảo sát, lượng giảm phát thải CO₂ của hệ thống là 8744,5 kg.

Kết luận

Các tác giả đã xây dựng được một hệ thống đo và tự ghi số liệu cho hệ thống sản xuất nước nóng bằng NLMT kết hợp với bơm nhiệt. Trên cơ sở phân tích, xử lý các số liệu thực nghiệm thu được, các tác giả đã tiến hành đánh giá hiệu quả của hệ thống sản xuất nước nóng sử dụng bộ thu NLMT kết hợp với bơm nhiệt trên một số chỉ tiêu như: mức độ tiêu thụ năng lượng, phân bố năng lượng, khả năng tiết kiệm năng lượng, giảm phát thải CO₂... Kết quả thu được, khi so sánh với phương án sản xuất nước nóng bằng điện trở, tiêu thụ điện trung bình của hệ thống giảm còn 10,6% và lượng giảm phát thải CO₂ của hệ thống là 8744,5

kg/tháng. Qua đó cho thấy ưu điểm về sử dụng năng lượng một cách hiệu quả cũng như khía cạnh bảo vệ môi trường của hệ thống sản xuất nước nóng sử dụng bộ thu NLMT kết hợp với bơm nhiệt.

Đặc trưng của hệ thống sản xuất nước nóng dùng bộ thu NLMT kết hợp với bơm nhiệt là hoạt động của nó phụ thuộc vị trí địa lý, mùa, điều kiện môi trường... Để kết quả nghiên cứu thực nghiệm có ý nghĩa ứng dụng cao thì thời gian thực nghiệm, thu thập số liệu phải đủ lớn, tối thiểu là 1 năm. Do đó, cần tiếp tục duy trì hệ thống đo và tự ghi số liệu để thu thập thêm số liệu làm cơ sở dữ liệu thực nghiệm để mở rộng phạm vi nghiên cứu sau này.

Tài liệu tham khảo

- [1] Lu Aye, W.W.S Charters and C Chaichana (2002), "Solar heat pump systems for domestic hot water", *Solar Energy*, **73**, 169-175.
- [2] T.T Chow, G Pei, K.F Fong, Z Lin, A.L.S Chan, M He (2010), "Modeling and application of direct-expansion solar-assisted heat pump for water heating in subtropical Hong Kong", *Applied Energy*, **87**, 643-649.
- [3] Nguyễn Nguyên An (2013), "Xây dựng hệ thống cung cấp nước nóng gia dụng kết hợp bộ thu NLMT và bơm nhiệt", *Tạp chí Cơ khí Việt Nam*, số **1+24**.
- [4] Tổng cục Năng lượng, Bộ Công thương (2012), *Nghiên cứu, xây dựng hệ số phát thải (EF) của lưới điện Việt Nam*.