

## ĐÁNH GIÁ KHẢ NĂNG THU HỒI NHIỆT LẠNH TỪ QUÁ TRÌNH TÁI HÓA KHÍ LNG ĐỂ CẤP LẠNH VÀ PHÁT ĐIỆN

### EVALUATING THE EFFICIENCY OF UTILIZATION COLD ENERGY FROM LNG REGASIFICATION FOR POWER GENERATION AND COOLING

Nguyễn Mai Bích Tiên, Huỳnh Phước Hiền, Nguyễn Thế Bảo\*

Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

#### TÓM TẮT

Trong giai đoạn hiện tại, khi mà các hệ thống năng lượng tái tạo vẫn còn đang từng bước hoàn thiện, sử dụng khí thiên nhiên (NG) thay thế cho than đá được xem là phương án có thể cân bằng giữa bài toán năng lượng và các vấn đề môi trường. Với trữ lượng và vị trí địa lý của Việt Nam, việc nhập khẩu khí hóa lỏng (LNG) bằng đường biển để bổ sung vào nguồn khí tự khai thác là tất yếu. Tuy nhiên, do LNG là khí tự nhiên được hóa lỏng ở nhiệt độ khoảng  $-162^{\circ}\text{C}$ , nên tiêu tốn nhiều năng lượng để sản xuất cũng như phải được tái hóa khí trước khi cung cấp đến nơi sử dụng trực tiếp dẫn đến giá thành cao. Do đó, để tận dụng nhiệt lạnh của LNG, nhóm tác giả đề xuất sơ đồ sử dụng LNG làm nguồn lạnh cho chu trình Rankine hữu cơ (ORC) và đồng thời là nguồn cấp lạnh cho các hệ cấp trữ đông trong các nhà máy chế biến thủy hải sản. Giải pháp này sẽ cung cấp điện năng và đáp ứng được nhu cầu sử dụng lạnh trong nhà máy thủy hải sản vốn cũng thường được xây dựng gần biển cũng là vị trí xây dựng các trạm tái hóa khí LNG. Hiệu quả của việc thu hồi nhiệt lạnh được tính toán và phân tích dựa trên hiệu suất năng lượng và hiệu suất exergy. Hiệu suất exergy cao nhất là 29,29%, với công suất phát tổng đạt 13,762 MW khi trạm LNG làm việc với năng suất tái hóa khí là 3 triệu tấn/năm và lượng nhiệt lạnh thu hồi để cấp lạnh là 6 MW. Các tính toán trong bài báo được thực hiện bằng phần mềm EES (Engineering Equation Software).

**Từ khóa:** Tái hóa khí LNG; Thu hồi nhiệt lạnh LNG; Chu trình ORC; Cấp trữ đông; Chu trình  $\text{CO}_2$ ; EES.

#### ABSTRACT

In the current stage of ongoing development in renewable energy systems, utilizing natural gas (NG) as a substitute for coal is considered a solution that balances energy and environmental concerns. Given Vietnam's reserves and geographical location, it is essential to import liquefied natural gas (LNG) by sea to supplement domestically extracted gas. However, LNG, which is natural gas liquefied at a temperature of approximately  $-162^{\circ}\text{C}$ , requires significant energy consumption for production and needs to be regasified before direct usage, resulting in high costs. Therefore, to leverage the cooling potential of LNG, the authors propose a scheme that utilizes LNG as a refrigerant for an organic Rankine cycle (ORC) and simultaneously as a cooling source for refrigeration systems in seafood processing plants. This solution provides power generation and meets the cooling demand in seafood processing plants, which are often located near the coast, 

where LNG regasification stations are also built. The efficiency of heat recovery is calculated and analyzed based on energy and exergy efficiency. The highest exergy efficiency achieved is 29.29%, with a total power output of 13.762 MW when the LNG station operates with a regasification capacity of 3 million tons/year and recovers 6 MW of cooling heat. The calculations in the paper are performed using the Engineering Equation Software (EES).

**Keywords:** LNG regasification; LNG heat recovery; ORC cycle; Cold storage; CO<sub>2</sub> cycle; EES.

## 1. GIỚI THIỆU

Theo xu hướng cắt giảm phát thải khí nhà kính, các hệ thống sử dụng nhiên liệu hóa thạch như than đá đang dần được thay thế bằng các nguồn năng lượng tái tạo. Tuy nhiên, với nhu cầu hiện tại, nguồn cung từ năng lượng tái tạo vẫn chưa đáp ứng đủ và ổn định, do đó khí đốt tự nhiên (natural gas) đang được xem là nguồn năng lượng thay thế chính, ít phát thải trong giai đoạn hiện nay và tương lai gần. So với dầu HFO, lượng khí CO<sub>2</sub> sinh ra từ quá trình đốt khí thiên nhiên ít hơn 25%, lượng NO<sub>x</sub> giảm đi khoảng 80%, hầu như không phát thải khí SO<sub>2</sub> và tạo ra các hạt bụi mịn lơ lửng trong không khí [1]. Với các quốc gia có trữ lượng khí đốt không phong phú, khí tự nhiên có thể được nhập khẩu thông qua hệ thống ống dẫn hoặc dưới dạng khí hóa lỏng LNG bằng tàu biển khi khoảng cách giữa nơi tiêu thụ và sản xuất vượt quá 2000 km, hoặc bị ngăn cách bởi đại dương. Việc nhập khẩu LNG bằng tàu biển giúp đa dạng hóa nguồn cung, tránh phụ thuộc vào một nguồn duy nhất. Hạn chế của việc sử dụng LNG là giá thành tương đối cao liên quan đến chi phí sản xuất LNG [2]. Việc hóa lỏng khí tự nhiên bằng phương pháp làm lạnh đến nhiệt độ -162°C giúp quá trình vận chuyển được thuận lợi, tuy nhiên nó lại tiêu tốn một lượng năng lượng đáng kể, ước tính khoảng 805 kWh điện/tấn LNG [3]. Đồng thời, LNG sau khi được nhập khẩu lại phải được tái hóa khí lại thành NG để phân phối đến khách hàng

sử dụng. Quá trình này có thể được thực hiện bằng cách lấy nhiệt của nước biển, hoặc cấp nhiệt bằng quá trình đốt khí để hóa khí LNG. Với phương pháp này, các trạm LNG khi vận hành sẽ tiêu tốn thêm năng lượng, ít nhiều ảnh hưởng đến hệ sinh thái tại trạm tái hóa khí LNG cũng như không thể sử dụng lại được nhiệt độ thấp của LNG.

Với nhiệt độ -162°C, nhiệt lạnh của LNG có thể được tận dụng trong các ứng dụng điển hình như làm nguồn lạnh trong chu trình ORC, cấp lạnh cho các nhà máy cấp, trữ đông, chưng cất và phân tách không khí, tăng hiệu quả chu trình thiết bị động lực hơi nước và chu trình Brayton [4]. Trong đó, phương án tận dụng LNG làm nguồn lạnh cho chu trình ORC và cung cấp lạnh cho các kho cấp trữ đông rất được quan tâm. Nghiên cứu của Dispenza và các cộng sự [5] [6] đã đánh giá khả năng thu hồi exergy của LNG lỏng thông qua chu trình Rankine làm việc với Helium. Nhóm Wang Qiang [7] đánh giá hiệu quả của sơ đồ sử dụng nhiệt lạnh của LNG trong chu trình ORC kết hợp quá trình giãn nở LNG để tận dụng lại áp năng LNG. Kết quả của nhóm Alessandro Franco và cộng sự [8] cho thấy khi áp dụng chu trình ORC với một số hiệu chỉnh, công suất phát có thể đạt từ 8,3 đến 11,4 MW nếu năng suất tái hóa của LNG là 80 kg/s. Ngoài ra, nhiệt lạnh từ quá trình tái hóa khí LNG cũng được sử dụng trong các nhà máy cấp đông, trữ đông thủy hải sản và thực phẩm. Li và cộng sự [9] đã thực

hiện nghiên cứu sử dụng nhiệt lạnh LNG để hạ nhiệt độ ngưng tụ trong chu trình máy lạnh R32 với nhiều cấp nhiệt độ khác nhau, từ đó giảm công suất của máy nén. Trong nghiên cứu của K.H. Yang [10], nhiệt lạnh của LNG được sử dụng để làm lạnh dung dịch glycol và sử dụng bơm để phân phối đến nguồn sử dụng. Phương án này giúp nhiệt lạnh LNG được tận dụng hiệu quả hơn, không tiêu hao năng lượng cho máy nén khi nhu cầu sử dụng lạnh ở các nhiệt độ khác nhau. Ngoài ra, nguồn nhiệt lạnh này cũng có thể áp dụng trong các ứng dụng điều hòa không khí. Kết quả của nhóm Sermsuk [11] cho thấy có thể tiết kiệm được 9,78 triệu USD và cắt giảm 33772 tấn  $\text{CO}_2$  phát thải mỗi năm nếu sử dụng nhiệt lạnh LNG trong các trung tâm dữ liệu thay vì sử dụng các hệ thống điều hòa không khí trung tâm truyền thống.

Với quy hoạch điện VIII vừa được phê duyệt, tổng công suất điện năng được sản xuất từ nguồn LNG nhập khẩu đạt giá trị tối đa 22400 MW vào năm 2030. Tuy nhiên, Việt Nam chỉ đang trong giai đoạn lên kế hoạch và bắt đầu xây dựng các cơ sở hạ tầng phục vụ cho việc nhập khẩu và phân phối LNG. Đây là thách thức nhưng cũng là lợi thế để Việt Nam có thể triển khai các giải pháp tận dụng lại nguồn nhiệt lạnh của LNG để nâng cao hiệu quả các hệ thống sử dụng khí đốt cả về mặt kinh tế lẫn năng lượng. Với bờ biển dài, quy mô ngành thủy hải sản lớn, nên Việt Nam có nhu cầu cao về lạnh để cấp và trữ đông. Do đó, việc tận dụng lại nhiệt lạnh của LNG đáp ứng cho nhu cầu này hứa hẹn rất tiềm năng. Đồng thời, để khai thác hết lượng nhiệt lạnh thu được từ quá trình tái hóa khí LNG, có thể kết hợp thêm với chu trình ORC để phát điện [3]. Vì vậy, trong bài báo này, nhóm tác giả đề xuất sơ đồ tận dụng nhiệt lạnh của LNG để vừa làm nguồn lạnh cho chu trình ORC, vừa cấp lạnh cho các nhà máy thủy sản. Trong chu trình

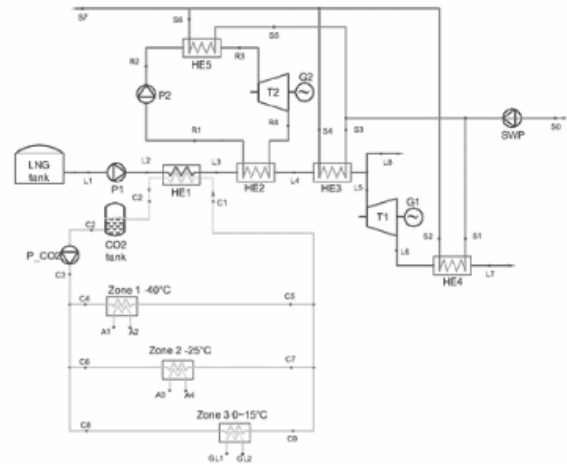
ORC, Propane được lựa chọn là môi chất làm việc, nước biển đóng vai trò là nguồn nóng của chu trình và quá trình ngưng tụ được làm mát bằng LNG. Để cấp lạnh cho các quá trình cấp và trữ đông,  $\text{CO}_2$  lỏng được lựa chọn làm chất tải lạnh từ LNG đến khu vực sử dụng lạnh bên trong nhà máy. Bài báo sử dụng phần mềm EES (Engineering Equation Software) để tính toán và phân tích hiệu quả sơ đồ thu hồi nhiệt lạnh trong các trường hợp với trạm tái hóa khí năng suất lần lượt là 1 triệu tấn/năm và 3 triệu tấn/năm, năng suất lạnh yêu cầu của các nhà máy được chọn ở hai mức là 6 MW và 12 MW. Các thông số này dựa trên thông số của các trạm tái hóa khí được quy hoạch trong thời gian tới tại Việt Nam. Hiệu quả của chu trình được đánh giá dựa trên hai tiêu chí là hiệu suất năng lượng (energy efficiency) và hiệu suất exergy (exergy efficiency). Trong bài báo, LNG được giả thuyết là hoàn toàn 100% methane, không có lẫn tạp chất.

## 2. SƠ ĐỒ NGUYÊN LÝ VÀ MÔ HÌNH TOÁN

### 2.1. Sơ đồ nguyên lý chu trình tận dụng nhiệt lạnh LNG để đồng phát điện và cấp lạnh

Hình 1 thể hiện sơ đồ nguyên lý của hệ thống tận dụng nhiệt lạnh của quá trình tái hóa khí LNG để phát điện và cấp lạnh. LNG khi nhập khẩu thường ở trạng thái có áp suất  $p_{L1} = 1,2$  bar, nhiệt độ  $t_{L1} = -162^\circ\text{C}$ , được bơm P1 tăng áp và đẩy qua các bộ trao đổi nhiệt HE1, HE2, HE3, HE4 để được tái hóa khí. Để cung cấp đến nơi sử dụng, LNG ra khỏi trạm tái hóa khí có nhiệt độ  $t_{L7}$  thường được duy trì trong khoảng từ 0 đến  $5^\circ\text{C}$ , áp suất  $p_{L7}$  có thể nằm trong khoảng từ 20 bar đến 70 bar, tùy thuộc vào nhu cầu sử dụng. Trong bài báo, áp suất LNG sau bơm P1 là 7 MPA và tại đầu ra của trạm tái hóa khí là 3000 kPa. Nhiệt lạnh của LNG sẽ được thu hồi lại tại bộ trao đổi nhiệt

HE1 và HE2. Tại bộ trao đổi nhiệt HE1, LNG nhận nhiệt từ quá trình ngưng tụ của dòng CO<sub>2</sub> bão hòa ẩm đi từ nhà máy đông lạnh trở về. Dòng CO<sub>2</sub> lỏng ra khỏi HE1 sẽ được bơm P<sub>CO2</sub> đưa tới các bộ trao đổi nhiệt trong nhà máy. Tại nhà máy, CO<sub>2</sub> làm lạnh không khí trong khu vực cấp đông, trữ đông và làm lạnh dung dịch glycol để duy trì nhiệt độ của các khu vực này lần lượt là -40°C, -25°C và 5°C tương ứng với ba mục đích sử dụng là cấp đông, trữ đông và các hệ cung cấp nước lạnh và điều hòa. Với điều kiện này, nhiệt độ ngưng tụ của CO<sub>2</sub> tại HE1 được lựa chọn tại -50°C. Sau bộ HE1, LNG tiếp tục được tái hóa khí tại bộ trao đổi nhiệt HE2. Tại đây, LNG sẽ đóng vai trò như nguồn lạnh của chu trình ORC với chất làm việc bên trong là Propane. Tại thiết bị bay hơi HE5, nước biển cấp nhiệt cho propane để chuyển từ trạng thái lỏng R2 thành hơi quá nhiệt R3. Hơi R3 giãn nở qua tuabin T2 thành hơi R4 đi vào bộ trao đổi nhiệt HE2. Tại HE2, propane nhả nhiệt cho dòng LNG để ngưng tụ thành lỏng R1, sau đó qua bơm P2 để hoàn thành chu trình ORC. Với chu trình này, việc sử dụng LNG làm nguồn lạnh giúp tăng hiệu suất chuyển đổi nhiệt năng của nước biển thành công quay tuabin T2. Trạng thái của LNG đi ra bộ HE2 có nhiệt độ càng cao thì lượng nhiệt lạnh thu hồi được sẽ tăng lên, tuy nhiên nó sẽ giảm hiệu suất của chu trình ORC do nâng nhiệt độ ngưng tụ của môi chất trong chu trình ORC. Do đó, trong sơ đồ này chấp nhận một phần quá trình tái hóa khí sẽ được thực hiện bằng nước biển tại bộ trao đổi nhiệt HE3. LNG ra khỏi HE3 được giãn nở qua tuabin T1 để tận dụng thêm phần áp năng. Quá trình giãn nở này cũng làm giảm nhiệt độ của LNG nên để đạt được nhiệt độ phù hợp, LNG được gia nhiệt một lần nữa qua bộ trao đổi nhiệt HE4 với nhiệt năng cũng được lấy từ nước biển. Các thông số làm việc của hệ thống được trình bày chi tiết trong bảng 1.



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý hệ thống tận dụng nhiệt lạnh của LNG để đồng phát điện và lạnh

Bảng 1. Các thông số làm việc của hệ thống

| Thông số                                                  | Ký hiệu         | Giá trị |
|-----------------------------------------------------------|-----------------|---------|
| Lưu lượng LNG tái hóa, triệu tấn                          | $G_L$           | 1~3     |
| Áp suất LNG đầu vào, kPa                                  | $p_{L1}$        | 120     |
| Nhiệt độ LNG đầu vào, °C                                  | $t_{L1}$        | -162    |
| Áp suất của LNG sau bơm P1, kPa                           | $p_{L2}$        | 70000   |
| Áp suất đầu ra của LNG, kPa                               | $p_{L7}$        | 3000    |
| Nhiệt độ đầu ra của LNG, °C                               | $t_{L7}$        | 0       |
| Thay đổi nhiệt độ nước biển qua các bộ trao đổi nhiệt, °C | $\Delta T_{wa}$ | 7       |
| Nhiệt độ nước biển vào bộ trao đổi nhiệt, °C              | $t_{s0}$        | 30      |
| Áp suất nước biển sau bơm, kPa                            | $p_{s1}$        | 300     |
| Nhiệt độ ngưng tụ của dòng CO <sub>2</sub> , °C           | $t_{c1}$        | -50     |
| Hiệu suất thuận nghịch của bơm                            | $\eta_p$        | 0.9     |
| Hiệu suất thuận nghịch của tuabin                         | $\eta_T$        | 0.85    |
| Tổn áp của LNG, propane các qua bộ trao đổi nhiệt, %      | deltap          | 0.03    |

Bảng 2 trình bày chi tiết về tải lạnh của nhà máy cấp trữ đông tại các ứng dụng với nhiệt độ làm việc khác nhau.

Bảng 2. Tải lạnh tương ứng với các nhiệt độ sử dụng khác nhau trong nhà máy

|                        | Nhà máy 6 MW |                | Nhà máy 12 MW |                |
|------------------------|--------------|----------------|---------------|----------------|
|                        | Tỷ lệ        | Năng suất lạnh | Tỷ lệ         | Năng suất lạnh |
| Tải lạnh khu vực -40°C | 20%          | 1,2 MW         | 20%           | 2,4 MW         |
| Tải lạnh khu vực -25°C | 12,5%        | 0,75 MW        | 12,5%         | 1,5 MW         |
| Tải lạnh khu vực 5°C   | 67,5%        | 4,05 MW        | 67,5%         | 8,1 MW         |

## 2.2. Phương trình toán

Các quá trình nhiệt động xảy ra bên trong các thiết bị của sơ đồ được thể hiện trên phần mềm EES để tính toán trạng thái và các thông số năng lượng như nhiệt lượng và công suất. Các thông số sau được tính để đánh giá hiệu quả thu hồi nhiệt lạnh LNG.

Công suất phát tổng từ toàn bộ chu trình:

$$W_{\text{net}} = W_{T1} + W_{T2} - (W_{P1} + W_{P2} + W_{\text{sw}}) \quad (1)$$

Nhiệt lạnh thu hồi được từ chu trình CO<sub>2</sub>:

$$Q_{\text{CO2}} = Q_{\text{HE1}} \quad (2)$$

Trong chu trình này, do nhà máy đông lạnh sử dụng nhiệt lạnh từ quá trình tái hóa khí LNG, nên sẽ tiết kiệm được một phần công suất để chạy máy lạnh truyền thống. Có thể sử dụng hệ số ERR [3] tham chiếu để xác định phần công suất này. Từ đó, công suất phát tổng tương

đương từ chu trình có thể xác định như sau:

$$W_{\text{net,eq}} = W_{\text{net}} + W_{\text{CO2,eq}} = W_{\text{net}} + Q_{\text{CO2}} \text{EER}_{\text{REF}} \quad (3)$$

Theo [5], EER = 3,128.

Hiệu suất của chu trình LNG:

$$\eta_{\text{LNG}} = \frac{W_{T1} + W_{\text{CO2,eq}} - W_{\text{sw,LNG}}}{Q_{\text{HE1}} + Q_{\text{HE2}} + Q_{\text{HE3}} + Q_{\text{HE4}}} \quad (4)$$

Hiệu suất của chu trình ORC:

$$\eta_{\text{ORC}} = \frac{W_{T2} - W_{\text{sw,ORC}}}{Q_{\text{HE5}}} \quad (5)$$

Hiệu suất tổng của chu trình:

$$\eta_{\text{TOTAL}} = \frac{W_{\text{net,eq}}}{Q_{\text{HE1}} + Q_{\text{HE2}} + Q_{\text{HE3}} + Q_{\text{HE4}} + Q_{\text{HE5}}} \quad (6)$$

Ngoài ra, bài báo cũng sử dụng hiệu suất exergy để đánh giá được lượng exergy thu hồi được từ dòng LNG như sau:

$$\eta_{\text{Ex,TOTAL}} = \frac{W_{T1} + W_{T2} + \Delta \text{Ex}_{A12} + \Delta \text{Ex}_{A34} + \Delta \text{Ex}_{GL12}}{(W_{P1} + W_{P2} + W_{\text{sw}}) + G_L(\text{ex}_{L7} - \text{ex}_{L1})} \quad (7)$$

Với:

$\Delta \text{Ex}_{A12}$  là độ lớn biến thiên Exergy của không khí qua dàn lạnh trong khu cấp đông -40°C.

$\Delta \text{Ex}_{A34}$  là độ lớn biến thiên Exergy của không khí qua dàn lạnh trong khu trữ đông -25°C.

$\Delta \text{Ex}_{GL12}$  là độ lớn biến thiên Exergy của dòng dung dịch glycol với nồng độ glycol là 30%.

Tỷ lệ năng lượng sử dụng được từ nhiệt lạnh LNG:



$$\eta_{re} = \frac{W_{net} + Q_{CO2}}{G_L(h_{L7} - h_{L1})} \quad (8)$$

Khi tính toán, giả thiết các thiết bị không trao đổi nhiệt với không khí môi trường xung quanh.

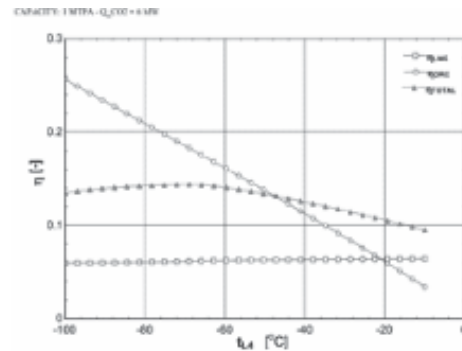
### 3. KẾT QUẢ VÀ PHÂN TÍCH

Với sơ đồ được giới thiệu trong hình 1, nhiệt lạnh của LNG được thu hồi có thể phục vụ để cung cấp lạnh trực tiếp và sản sinh điện thông qua các tuabin T1 và tuabin T2. Do lượng nhiệt lạnh được thu hồi phụ thuộc vào nhu cầu sử dụng thực tế trong nhà máy nên hiệu quả tận dụng nhiệt lạnh của LNG cơ bản phụ thuộc vào trạng thái LNG ra khỏi bộ trao đổi nhiệt HE2. Nếu tăng nhiệt độ  $t_{L4}$  của LNG ra khỏi HE2, có thể gia tăng lượng nhiệt lạnh thu hồi nhưng lại giảm hiệu suất của chu trình ORC. Do đó, kết quả của bài báo sẽ xác định nhiệt độ  $t_{L4}$  để tối ưu hiệu quả tận dụng nhiệt lạnh LNG, từ đó làm cơ sở để tính toán cho các trường hợp cụ thể.

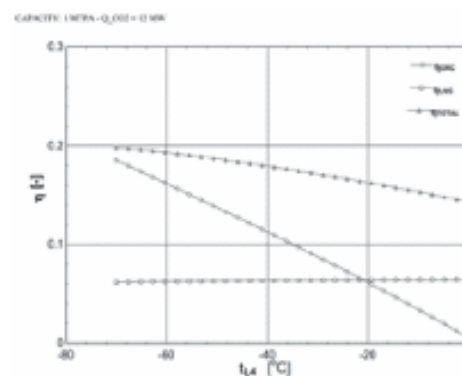
#### 3.1. Xác định giá trị nhiệt độ $t_{L4}$ của LNG ra khỏi bộ trao đổi nhiệt HE2

Hình 2 cho thấy ảnh hưởng của nhiệt độ  $t_{L4}$  của LNG lên hiệu suất năng lượng của các chu trình ORC, chu trình LNG và cả chu trình. Nhìn chung, nhiệt độ  $t_{L4}$  ít ảnh hưởng lên hiệu suất của chu trình LNG, tuy nhiên, hiệu suất năng lượng của chu trình ORC giảm nhanh theo chiều tăng của  $t_{L4}$  dẫn đến hiệu suất năng lượng tổng của cả chu trình cũng phụ thuộc vào giá trị nhiệt độ này. Trừ trường hợp năng suất tái hóa khí là 1 triệu tấn/năm và năng suất cấp lạnh là 12 MW (hình 2b), các trường hợp còn lại đều cho ra điểm cực trị của hiệu suất năng lượng tổng theo  $t_{L4}$  trong dãy giá trị khảo sát. Trong các trường hợp khảo sát, hiệu suất năng lượng tổng của hình 2b là cao nhất đạt 19,77%,

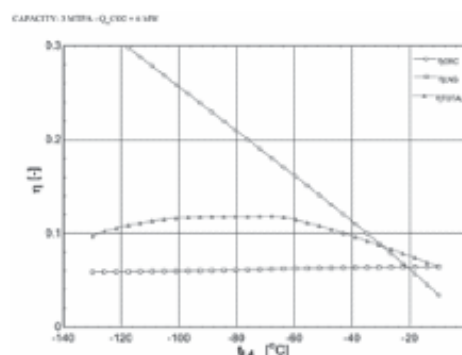
và hiệu suất năng lượng tổng có xu hướng giảm khi lượng nhiệt lạnh thu hồi để cấp lạnh giảm với cùng một năng suất tái hóa khí.



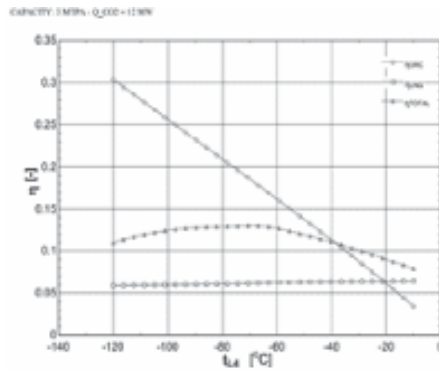
a) Năng suất tái hóa khí 1 MPTA  
Năng suất cấp lạnh trực tiếp 6 MW  
Điểm tối ưu  $t_{L4} = -70^\circ\text{C}$ ;  $\eta_{TOTAL} = 14,38\%$



b) Năng suất tái hóa khí 1 MPTA  
Năng suất cấp lạnh trực tiếp 12 MW  
Điểm tối ưu  $t_{L4} = -70^\circ\text{C}$ ;  $\eta_{TOTAL} = 19,77\%$

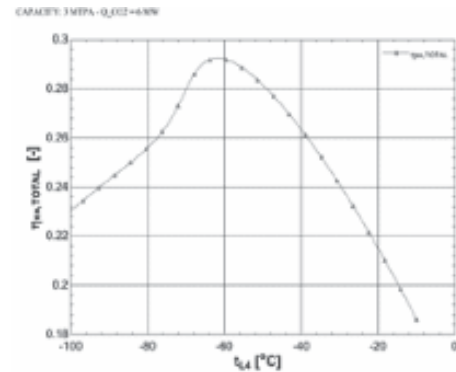


c) Năng suất tái hóa khí 3 MPTA  
Năng suất cấp lạnh trực tiếp 6 MW  
Điểm tối ưu  $t_{L4} = -70^\circ\text{C}$ ;  $\eta_{TOTAL} = 11,75\%$

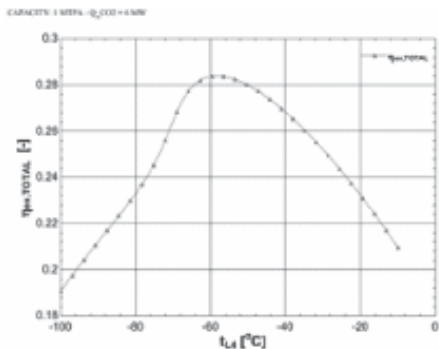


d) Năng suất tái hóa khí 3 MPTA  
Năng suất cấp lạnh trực tiếp 12 MW  
Điểm tối ưu  $t_{L4} = -70^{\circ}\text{C}$ ;  $\eta_{TOTAL} = 13\%$

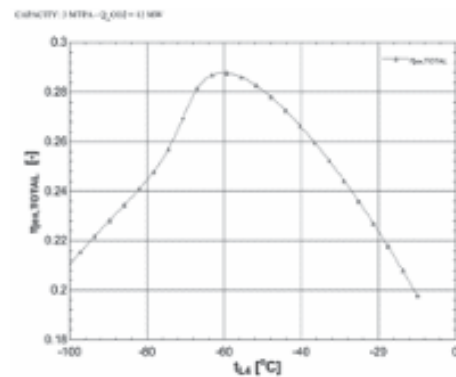
Hình 2. Ảnh hưởng của nhiệt độ  $t_{L4}$  lên hiệu suất năng lượng của chu trình khi làm việc với các năng suất tái hóa khí và năng suất cấp lạnh khác nhau



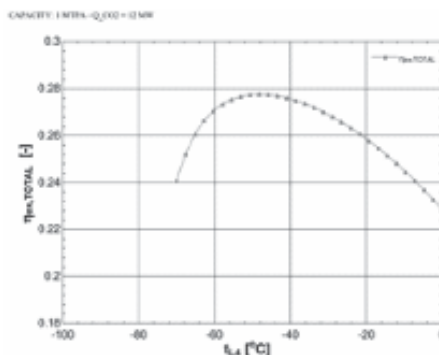
c) Năng suất tái hóa khí 3 MPTA  
Năng suất cấp lạnh trực tiếp 6 MW  
Điểm tối ưu  $t_{L4} = -62^{\circ}\text{C}$ ;  $\eta_{EX,TOTAL} = 29,25\%$



a) Năng suất tái hóa khí 1 MPTA  
Năng suất cấp lạnh trực tiếp 6 MW  
Điểm tối ưu  $t_{L4} = -58^{\circ}\text{C}$ ;  $\eta_{EX,TOTAL} = 28,37\%$



d) Năng suất tái hóa khí 3 MPTA  
Năng suất cấp lạnh trực tiếp 12 MW  
Điểm tối ưu  $t_{L4} = -60^{\circ}\text{C}$ ;  $\eta_{EX,TOTAL} = 28,75\%$   
Hình 3. Ảnh hưởng của nhiệt độ  $t_{L4}$  lên hiệu suất exergy của chu trình khi làm việc với các năng suất tái hóa khí và năng suất cấp lạnh khác nhau



b) Năng suất tái hóa khí 1 MPTA  
Năng suất cấp lạnh trực tiếp 12 MW  
Điểm tối ưu  $t_{L4} = -48^{\circ}\text{C}$ ;  $\eta_{EX,TOTAL} = 27,7\%$

Ảnh hưởng của nhiệt độ  $t_{L4}$  lên hiệu suất exergy tổng của sơ đồ được thể hiện trên hình 3. So với hiệu suất năng lượng, hiệu suất exergy của chu trình đều có giá trị tối ưu trong dãy nhiệt độ khảo sát. Trong các trường hợp khảo sát, giá trị nhiệt độ  $t_{L4}$  ứng với các điểm tối ưu này cao hơn so với các điểm tối ưu về hiệu suất năng lượng. Kết quả này có thể được giải thích do trong công thức hiệu suất năng lượng, chủ yếu quan tâm giữa thành phần công suất thực sinh ra so với nhiệt lượng cấp vào cho chu trình, trong khi đó, hiệu suất exergy

có liên quan đến các dòng exergy cấp vào quá trình như công suất tiêu tốn cho các bơm LNG, bơm trong chu trình ORC và nước biển, nên giá trị  $t_{L4}$  thấp sẽ tăng lưu lượng nước biển qua bộ trao đổi nhiệt HE3, tăng công suất bơm P2 dẫn đến chưa tối ưu về hiệu suất exergy. Cần lưu ý là trong sơ đồ này, nước biển đóng vai trò là nguồn nhiệt cấp vào cho propane và LNG trước khi giãn nở qua các tuabin và đây là các nguồn nhiệt miễn phí, exergy do nước biển mang vào không đáng kể, do đó nhiệt độ  $t_{L4}$  sẽ được lựa chọn theo điểm tối ưu của hiệu suất exergy để

làm thông số tính toán tiếp theo.

## 3.2. Kết quả tính toán các trường hợp điển hình

Với giá trị của nhiệt độ  $t_{L4}$  xác định được từ theo giá trị tối ưu của hiệu suất exergy, các đại lượng công suất, nhiệt lượng, lưu lượng của các dòng lưu chất, các loại hiệu suất là tỷ lệ thu hồi LNG của sơ đồ tận dụng nhiệt lạnh LNG để đồng cấp lạnh và phát điện được tính toán và trình bày trong bảng 3.

*Bảng 3. Kết quả tính toán sơ đồ tận dụng nhiệt lạnh LNG để cấp lạnh và phát điện với nhiệt độ  $t_{L4}$  được xác định theo giá trị tối ưu của hiệu suất exergy*

|                           | TH1   | TH2   | TH3   | TH4   |
|---------------------------|-------|-------|-------|-------|
| $G_L$ (MTPA)              | 1     | 1     | 3     | 3     |
| $Q_{CO2}$ (MW)            | 6     | 12    | 6     | 12    |
| $t_{L4}$ (°C)             | -58   | -48   | -62   | -60   |
| $G_{ORC}$ (kg/s)          | 26,44 | 16,51 | 100,7 | 90,19 |
| $G_{CO2}$ (kg/s)          | 35,02 | 70,03 | 35,02 | 70,03 |
| $G_{SW}$ (kg/s)           | 855,5 | 604,7 | 3077  | 2821  |
| $Q_{HE2}$ (kW)            | 11339 | 6961  | 43418 | 38791 |
| $Q_{HE3}$ (kW)            | 7951  | 6329  | 26452 | 25078 |
| $Q_{HE4}$ (kW)            | 2651  | 2651  | 7954  | 7954  |
| $Q_{HE5}$ (kW)            | 13244 | 7898  | 51312 | 45576 |
| $W_{T1}$ (kW)             | 2401  | 2401  | 7203  | 7203  |
| $W_{T2}$ (kW)             | 2207  | 1124  | 9042  | 7813  |
| $W_{p1}$ (kW)             | 570,4 | 570,4 | 1711  | 1711  |
| $W_{p2}$ (kW)             | 25,74 | 15,27 | 99,3  | 88,42 |
| $W_{SW}$ (kW)             | 187   | 132,2 | 672,6 | 616,7 |
| $W_{net}$ (kW)            | 3825  | 2808  | 13762 | 12600 |
| $W_{net,eq}$ (kW)         | 5743  | 6645  | 15681 | 16437 |
| $\eta_{TOTAL}$ (%)        | 13,94 | 18,54 | 11,6  | 12,7  |
| $\eta_{Ex,TOTAL-max}$ (%) | 28,39 | 27,76 | 29,24 | 28,8  |
| $\eta_R$ (%)              | 33,57 | 50,6  | 22,51 | 28,02 |

Nhìn chung, hiệu suất exergy của các trường hợp chênh lệch không đáng kể trong khi hiệu suất năng lượng có sự thay đổi theo năng suất tái hóa khí và lượng nhiệt lạnh thu hồi được sử dụng để cấp lạnh trực tiếp. Với các trường hợp phân tích, cùng một lưu lượng LNG, các thông số năng lượng liên quan đến bộ trao đổi nhiệt HE4 và tuabin  $W_{T1}$  không đổi khi tăng tỷ trọng nhiệt lạnh thu hồi tại bộ trao đổi nhiệt HE1 để làm lạnh, trong khi đó hiệu suất năng lượng và tỷ lệ sử dụng nhiệt lạnh được thu hồi tăng, và làm cho hiệu suất exergy có xu hướng giảm. Kết quả này là do nhiệt lạnh được thu hồi tại HE1 sẽ được sử dụng trực tiếp không phải tham gia quá trình chuyển hóa năng lượng từ nhiệt thành công như trong chu trình ORC dẫn đến lượng nhiệt này được bảo toàn. Ngoài ra, lượng nhiệt cần cấp vào cho các bộ trao đổi nhiệt HE3, HE5 giảm xuống, nên lưu lượng nước biển và công suất tiêu hao cho bơm nước biển sẽ giảm theo, và kết quả là hiệu suất năng lượng của sơ đồ sẽ tăng lên. Tuy nhiên, với phần nhiệt lạnh thu hồi được sử dụng để cấp lạnh tăng lên dẫn đến phần nhiệt lạnh thu được tại HE2 giảm, nhiệt độ LNG  $t_{L4}$  ra khỏi HE2 tăng, làm giảm hiệu suất và công suất của chu trình ORC cũng như công suất phát tổng  $W_{net}$  của toàn sơ đồ, kết quả là hiệu suất exergy của trường hợp 1 và 3 lần lượt cao hơn hiệu suất exergy của trường hợp 2 và 4. Nếu xét trên tỷ lệ thu hồi nhiệt lạnh được sử dụng theo công thức (8), tỷ lệ thu hồi nhiệt lạnh cao nhất ứng với trường hợp 2 là 50,6% trong khi ở TH3, giá trị này chỉ là 22,5%. Kết quả này cho thấy, phương án tận dụng lại nhiệt lạnh của LNG để làm lạnh trực tiếp sẽ đem lại hiệu quả thu hồi cao hơn.

#### 4. KẾT LUẬN

Bài báo đã xây dựng được các mô hình toán để phân tích hiệu quả của sơ đồ tận dụng

nhiệt lạnh của LNG để vừa cấp lạnh và phát điện. Các công cụ được sử dụng để phân tích là hiệu suất năng lượng và hiệu suất exergy của sơ đồ trong các trường hợp có năng suất tái hóa khí là 1 triệu tấn/năm và 3 triệu tấn/năm, lượng nhiệt lạnh thu hồi để làm lạnh có giá trị là 6 MW và 12 MW. Bài báo cũng đã tìm giá trị của nhiệt độ  $t_{L4}$  ra khỏi bộ trao đổi nhiệt HE2 để tối ưu về hiệu suất năng lượng và hiệu suất exergy của sơ đồ. Kết quả cho thấy hiệu suất exergy của trường hợp 3 ( $G_L = 3$  MTPA,  $Q_{CO2} = 6$  MW) cao nhất là 29,29%, và công suất phát của sơ đồ sau khi trừ đi các công suất tiêu hao bởi các hệ thống bơm trong hệ thống là 13,762 MW. Trong khi đó, khi tăng lượng nhiệt lạnh thu hồi tại bộ trao đổi nhiệt HE1 sẽ tăng hiệu suất năng lượng và tỷ lệ sử dụng nhiệt lạnh được thu hồi do phần nhiệt lạnh này sẽ được sử dụng trực tiếp, không phải biến đổi như trong chu trình ORC.

#### Lời cảm ơn:

Chúng tôi xin cảm ơn Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh đã hỗ trợ thời gian, phương tiện và cơ sở vật chất cho nghiên cứu này. ❖

Ngày nhận bài: 11/6/2023

Ngày phản biện: 28/6/2023

#### Tài liệu tham khảo:

- [1]. "Elengy," 27 January 2022. [Online]. Available: <https://www.elengy.com/en/media/press-releases/elengy-signs-first-commercial-agreement-satellite-storage-lng-reichstett>.
- [2]. B. Q. Hiếu; "Báo cáo ngành khí Tháng 08/2017", FPT securities, 2017.
- [3]. Antonio Atienza-Márquez, J.C. Bruno, A. Akisawa, A. Coronas; "Performance analysis of a combined cold and power (CC P) system with exergy recovery from LNG-regasification", Energy, vol. 183, pp. 448-461, 2019.

- [4]. Công ty CP Tư vấn Xây dựng Điện 2, Viện Nghiên cứu Năng lượng bền vững; "*Nghiên cứu tận dụng nhiệt lạnh từ quá trình tái hóa khí LNG*", 2022.
- [5]. Dispenza, C., Dispenza, G., La Rocca, V., & Panno, G., "*Exergy recovery during LNG regasification: Electric energy production – Part one*", Applied Thermal Engineering, Vols. 29(2-3), pp. 380-387, 2009.
- [6]. Dispenza, C., Dispenza, G., La Rocca, V., & Panno, G., "*Exergy recovery during LNG regasification: electric energy production – Part two*", Applied thermal engineering, Vols. 29(2-3), pp. 388-399, 2009.
- [7]. Qiang, W., Yanzhong, L., & Jiang, W., "*Analysis of power cycle based on cold energy of liquefied natural gas and low-grade heat source*", Applied thermal engineering, vol. 24(4), pp. 539-548, 2004.
- [8]. Franco A., & Casarosa, C., "*Thermodynamic analysis of direct expansion configurations for electricity production by LNG cold energy recovery*", Applied Thermal Engineering, vol. 78, pp. 649-657, 2015.
- [9]. Li, S., Wang, B., Dong, J. & Jiang, Y., "*Thermodynamic analysis on the process of regasification of LNG and its application in the cold warehouse*", Thermal Science and Engineering Progress, vol. 4, pp. 1-10, 2017.
- [10]. K.H. Yang and S.C. Wu, "*Design analysis of a refrigerated warehouse using lng cold energy*". International Journal on Architectural Science, vol. 4, pp. 14-23, 2003.
- [11]. Maytungkorn Sermsuk, Yanin Sukjai, Montri Wiboonrat and Kunlanan Kiatkittipong, "*Utilising Cold Energy from Liquefied Natural Gas (LNG) to Reduce the Electricity Cost of Data Centres*", Energies, vol. 14, 2021.