

NGHIÊN CỨU SẢN XUẤT KHÍ HÊLI TỪ KHÍ THIÊN NHIÊN

RESEARCH ON HELIUM EXTRACTION FROM NATURAL GASES

Phan Quý Trà

Trường Cao đẳng Công nghệ - Đại học Đà Nẵng; pqtra@dct.udn.vn

Tóm tắt - Bài báo này giới thiệu tóm tắt các phương pháp tách khí heli hiện đang được áp dụng trên thế giới, phân tích ưu, nhược điểm của các phương pháp này, đồng thời giới thiệu, tính toán, thiết kế một hệ thống lạnh cryo để tách khí heli từ khí thiên nhiên. Các kết quả tính toán cho thấy chu trình hệ thống lạnh cryo này có hệ số làm lạnh (COP) cao (lên đến 39%) đối với việc tách khí heli, đồng thời chu trình còn được kết hợp để thu nito lỏng. Trong chu trình lạnh cryo này có sử dụng máy giãn nở, vì vậy, có thể tận dụng công sinh giãn nở ra để cấp cho máy nén, góp phần tiết kiệm năng lượng, tăng COP của toàn chu trình hệ thống và bảo vệ môi trường.

Từ khóa - heli; hệ thống lạnh cryo; khí thiên nhiên; khí heli; kỹ thuật cryo; tách khí heli.

Abstract - This paper shows a brief of methods of helium extraction being applied in the world, analyzes the advantages and disadvantages of these methods as well as introduces, calculates and designs a cryogenic refrigeration system to extract helium from natural gases. Computational results show that the cryogenic refrigeration cycle has a high coefficient of performance (COP) (up to 39%) for the separation of helium, and the cycle is also combined to collect liquid nitrogen. In this cryogenic refrigeration cycle, expansion machines are used, so it is possible to use the work produced from expansion to power the compressor, thus contributing to saving energy, increasing the COP of the whole cycle and protecting the environment.

Key words - helium; cryogenic refrigeration system; natural gases; helium gas; cryo technique; helium extraction.

1. Đặt vấn đề

Trong những thập niên gần đây, kỹ thuật lạnh cryo đã được chú trọng nghiên cứu và phát triển ở các nước tiên tiến thuộc châu Âu hay Mỹ. Các khí hóa lỏng được dùng làm môi chất lạnh cryo để tạo nhiệt độ rất thấp như: nito, oxy, hydro, argon, neon và heli, không chỉ thử nghiệm trong phòng thí nghiệm mà đã đi vào sản xuất công nghiệp, phục vụ nhiều lĩnh vực nghiên cứu khoa học và nhiều ngành công nghiệp quan trọng như kỹ thuật siêu dẫn, vật lý nguyên tử, khoa học vũ trụ, sinh học, y học.

Trong bầu khí quyển của Trái Đất, nồng độ của heli theo thể tích chỉ có 5,2 phần triệu. Hầu hết heli trên Trái Đất là kết quả của sự phân rã phóng xạ. Do có nhiều tính chất độc đáo bao gồm điểm sôi rất thấp, mật độ thấp, độ hòa tan thấp, không gây cháy, có độ dẫn nhiệt cao, trọng lượng phân tử nhẹ, kích thước phân tử nhỏ, không độc hại và tính trơ, heli được sử dụng rất rộng rãi trong nhiều lĩnh vực kỹ thuật như: lạnh cryo, hàn, luyện kim; lĩnh vực y tế như: máy chụp cộng hưởng từ MRI; lĩnh vực vật lý siêu dẫn; lĩnh vực vũ trụ...

Heli được ứng dụng nhiều trong kỹ thuật và đời sống, tuy nhiên nó lại được xem là khí hiếm, vì việc sản xuất khí heli còn rất khó khăn. Ngoài ra, các mỏ khí thiên nhiên có chứa nồng độ khí heli cao đang dần cạn kiệt. Vì vậy, việc sản xuất khí heli từ khí thiên nhiên có nồng độ heli thấp hơn là điều tất yếu. Nhưng nếu hệ thống chỉ sản xuất riêng khí heli thì hiệu quả đem lại rất thấp, chính vì vậy, việc sản xuất khí heli kết hợp với sản xuất nito sẽ là giải pháp tối ưu. Do đó, hệ thống lạnh cryo tách khí heli từ khí thiên nhiên đồng thời kết hợp sản xuất nito lỏng được nghiên cứu và phát triển [1, 2, 3].

2. Các phương pháp tách khí heli

2.1. Phương pháp thu hồi heli tích hợp với hệ thống loại bỏ nito bằng kỹ thuật cryo

Phương pháp này do Công ty BCKK (Mỹ) nghiên cứu và triển khai. Theo đó, ta kết hợp một hệ thống thu hồi heli với hệ thống loại nito bằng kỹ thuật cryo để nâng cao hiệu

suất. Heli sẽ được chiết tách ra khỏi dòng khí có độ gia nhiệt thấp (low BTU gas), sau đó khí heli thô này sẽ được đưa qua thiết bị tinh chế để đạt độ tinh khiết (lên đến 99%).

Quá trình thu hồi heli và tách loại nito theo các bước như sau:

(A) Làm mát, tiết lưu và hóa lỏng một phần lượng khí thiên nhiên cấp vào thành phần bao gồm metan, nito và heli;

(B) Đưa hỗn hợp lỏng và khí thiên nhiên vào tháp chưng cất hoạt động ở áp suất dao động trong khoảng từ 250 đến 450 PSI;

(C) Trong tháp chưng cất, tách metan lỏng và hỗn hợp nito-heli hơi ra khỏi nhau;

(D) Thu hồi nito-heli hơi từ tháp chưng cất;

(E) Ngưng tụ từng phần hỗn hợp hơi heli-nito để sản xuất khí heli thô và nito lỏng;

(F) Gia nhiệt khí heli thô bằng cách trao đổi nhiệt gián tiếp với khí làm mát;

(G) Thanh lọc khí heli thô để sản xuất sản phẩm khí heli tinh khiết và khí thải có chứa heli.

2.2. Phương pháp khuếch tán heli qua ống thủy tinh Pyrex

Phương pháp này ứng dụng đặc tính của thủy tinh Pyrex là gần như không thấm đối với tất cả các loại khí, trừ khí heli. Heli khuếch tán thông qua Pyrex lớn hơn khoảng 25 lần so với độ khuếch tán của H₂ thông qua Pyrex. Người ta cho khí thiên nhiên qua ống thủy tinh Pyrex để tách khí heli. Tuy nhiên, phương pháp này hiện chưa thể áp dụng trong công nghiệp do hạn chế về sản lượng heli thu được.

2.3. Phương pháp tách khí heli từ khí thiên nhiên bằng hệ thống lạnh cryo

Phương pháp này dựa vào nhiệt độ điểm sôi rất khác nhau giữa các khí trong hỗn hợp khí thiên nhiên so với khí heli mà ta tách ra khỏi hỗn hợp qua hệ thống lạnh cryo.

Trong phần tiếp theo, tác giả giới thiệu và tính toán hệ thống lạnh cryo để sản xuất khí heli từ khí thiên nhiên.

đến áp suất $p_2 = 42$ atm, nhiệt độ tăng lên T_2 , thành phần thể tích như trạng thái 1.

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 710 \text{ K} \quad (1) [8]$$

Ta sử dụng máy nén nhiều cấp có làm mát trung gian nên nhiệt độ hỗn hợp khí đầu ra giảm xuống $T_2 = 320$ K.

- Trạng thái điểm 3: Là trạng thái sau khi ra khỏi bộ trao đổi nhiệt 1. Sau khi ra khỏi bộ trao đổi nhiệt này, hầu hết khí metan được ngưng tụ nên nhiệt độ tại trạng thái này của hỗn hợp có thể lấy nhỏ hơn so với nhiệt độ ngưng tụ của metan ứng với áp suất $p_3 = p_2 = 42$ atm, vậy có thể lấy $T_3 = 184$ K.

- Trạng thái điểm 4: Là trạng thái sau khi tiết lưu qua van tiết lưu 1. Áp suất sau khi tiết lưu của hỗn hợp là 18 atm. Đây là hỗn hợp của 3 chất khác nhau nên sự thay đổi nhiệt độ của mỗi chất sau quá trình tiết lưu là khác nhau, nên ta sẽ tính nhiệt độ của hỗn hợp sau quá trình tiết lưu từ 42 atm xuống 18 atm:

+ Lồng metan sau quá trình tiết lưu từ áp suất 42 atm xuống 18 atm, nhiệt độ sẽ giảm từ 184 K xuống đến 162 K.

+ Khí nitơ sau quá trình tiết lưu từ áp suất 42 atm xuống 18 atm, nhiệt độ sẽ giảm từ 184 K xuống đến 174 K.

+ Khí heli sau quá trình tiết lưu từ áp suất 42 atm xuống 18 atm, nhiệt độ lại tăng từ 184 K lên 187 K.

Thành phần khối lượng của mỗi chất có trong hỗn hợp được tính theo công thức:

$$g_i = \frac{\mu_i r_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i r_i} \quad [2]$$

Trong đó:

g_i là thành phần khối lượng của một chất khí thành phần;

r_i là thành phần thể tích của một chất khí thành phần;

μ_i là lượng chất tính bằng kg của một chất khí thành phần, trị số bằng phân tử lượng (kmol).

Nhiệt độ của hỗn hợp được tính theo công thức:

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n g_i C_{pi} T_i}{\sum_{i=1}^n g_i C_{pi}} \quad [2]$$

Trong đó:

C_{pi} là nhiệt dung riêng đẳng áp của một chất khí thành phần (tra bảng);

T_i là nhiệt độ của một chất khí thành phần.

Thay các đại lượng vào ta được bảng tính toán sau:

- Trạng thái điểm 5: Là trạng thái hỗn hợp trong bình ngưng tụ 1, có áp suất 18 atm. Trong thiết bị này, khí nitơ sẽ được ngưng tụ nên nhiệt độ của hỗn hợp sẽ có nhiệt độ bằng nhiệt độ ngưng tụ của nitơ ở áp suất 18 atm, vậy $T_5 = 114$ K, thành phần thể tích của từng chất lỏng trong hỗn hợp như sau: khí metan ngưng tụ gần như hoàn toàn trong thiết bị này nên có thành phần thể tích là 52% trong hỗn hợp khí ban đầu, khí nitơ ngưng tụ phần lớn còn một phần nhỏ theo hỗn hợp khí heli thô, có thành phần gồm 40% khí nitơ và 60% khí heli (chính là toàn bộ 8% thể tích trong hỗn hợp ban đầu) về thể tích đi ra khỏi bình ngưng tụ 1.

- Trạng thái điểm 6: Là trạng thái của hỗn hợp lỏng gồm metan và nitơ sau khi tiết lưu qua van tiết lưu 2, áp suất giảm từ 18 atm xuống 1 atm, thành phần thể tích của hỗn hợp là 60% CH_4 , 40% N_2 . Vì đây là hỗn hợp của hai chất khác nhau,

sự thay đổi nhiệt độ của mỗi chất sau quá trình tiết lưu là khác nhau nên tương tự như trạng thái điểm 4 ta sẽ tính nhiệt độ của hỗn hợp sau quá trình tiết lưu từ 18 atm xuống 1 atm:

+ Lồng metan sau quá trình tiết lưu từ áp suất 18 atm xuống 1 atm, nhiệt độ sẽ giảm từ 114 K xuống đến 110 K.

+ Lồng nitơ sau quá trình tiết lưu từ áp suất 18 atm xuống 1 atm, nhiệt độ sẽ giảm từ 114 K xuống đến 77 K.

- Trạng thái điểm 7: Là trạng thái của hỗn hợp lỏng 40% nitơ và 60% metan ra khỏi bộ trao đổi nhiệt 1, áp suất $p_7 = 1$ atm.

- Trạng thái điểm 8: Là trạng thái ra khỏi thiết bị ngưng tụ 1 đi vào bộ trao đổi nhiệt 2. Là trạng thái hỗn hợp của 40% khí nitơ và 60% khí heli về thể tích; nhiệt độ của hỗn hợp $T_8 = 120$ K; áp suất $p_8 = 18$ atm.

- Trạng thái điểm 9: Là trạng thái sau khi ra khỏi bộ trao đổi nhiệt 2. Đây là quá trình trao đổi nhiệt đẳng áp nên thành phần và áp suất của hỗn hợp vẫn không đổi $p_9 = 18$ atm. Nhiệt độ của hỗn hợp sau khi qua bộ trao đổi nhiệt tăng lên đến nhiệt độ môi trường $T_9 = 300$ K.

- Trạng thái điểm 10: Là trạng thái sau khi được nén trong máy nén 2. Áp suất của hỗn hợp sau quá trình nén $p_{10} = 185$ atm; thành phần của hỗn hợp không đổi.

$$T_{10} = T_9 \left(\frac{p_{10}}{p_9} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 584 \text{ K} \quad [8]$$

Trong đó: $k = 1,4$ hỗn hợp khí có 3 nguyên tử trở lên.

- Trạng thái điểm 11: Là trạng thái sau khi được nén trong máy nén 2 sẽ qua trao đổi trong bộ trao đổi nhiệt 2 rồi ra ngoài. Áp suất của hỗn hợp vẫn là $p_{11} = 185$ atm; nhiệt độ giảm xuống $T_{11} = 110$ K; thành phần của hỗn hợp không đổi.

- Trạng thái điểm 12: Là trạng thái khí heli được tách ra từ thiết bị ngưng tụ 1 đi đến bẫy than hoạt tính. Heli tách ra có độ tinh khiết 98,5%, còn 1,5% là khí nitơ; nhiệt độ $T_{12} = 90$ K; áp suất 185 atm.

- Trạng thái điểm 13: Là trạng thái nitơ lỏng được ngưng tụ hầu hết từ hỗn hợp heli thô, với áp suất rất cao $p_{13} = 185$ atm và được ngưng tụ bởi nitơ lỏng có nhiệt độ 77 K nên nitơ trong hỗn hợp trên chuyển trực tiếp từ trạng thái khí sang trạng thái lỏng mà không qua trạng thái hơi bão hòa, nhằm tăng hiệu quả tách khí nitơ ra khỏi khí heli. Nhiệt độ $T_{13} = 90$ K; thành phần lỏng nitơ này có một lượng rất nhỏ khí heli bị hấp thụ vào, khoảng 5% tổng lượng heli vào bình ngưng tụ 2.

Ta sẽ tính thành phần heli và nitơ trong hỗn hợp ở trạng thái 13 bằng cách quy về thành phần phần trăm của hỗn hợp khí mới đi vào bình ngưng tụ 2, thành phần lúc này là: 60% heli, 40% nitơ, lượng heli hấp thụ vào lỏng nitơ là 5% nên sẽ chiếm: $0,05 \times 60\% = 3\%$ trong 60% heli trong hỗn hợp ban đầu, còn lại 57% chính là 98,5% ở trạng thái điểm 13, khi đó nitơ 1,5% sẽ chiếm: $\frac{1,5\% \times 57\%}{98,5\%} = 0,87\%$. Nên lượng nitơ ngưng tụ ở trạng thái điểm 13 sẽ chiếm: $40\% - 0,87\% = 39,13\%$ so với hỗn hợp ban đầu.

Vậy thành phần heli và nitơ trong hỗn hợp ở trạng thái 13 là:

$$+ \text{Heli: } 3\% \times \frac{100\%}{3\% + 39,13\%} = 7,12\%$$

$$+ \text{Nitơ: } 39,13\% \times \frac{100\%}{3\% + 39,13\%} = 92,88\%$$

- Trạng thái điểm 14: Là trạng thái khí ra khỏi bể than hoạt tính, heli có độ tinh khiết khoảng 99,995%; nhiệt độ $T_{14} = 90\text{ K}$; áp suất $p_{14} = 185\text{ atm}$.

- Trạng thái điểm 15: Là trạng thái khí heli có độ tinh khiết 99,995% ra khỏi bộ trao đổi nhiệt 2, áp suất ở trạng thái này $p_{15} = 185\text{ atm}$.

- Trạng thái điểm 16: Là trạng thái sau khi ra khỏi van tiết lưu 3, nhiệt độ $T_{16} = 95\text{ K}$, áp suất giảm đến $p_{18} = 18\text{ atm}$ vào bình tách khí để tách khí heli bị hấp thụ ra, sau đó lượng khí này cùng với một lượng nhỏ hơi nitơ bốc ra được đưa vào bình ngưng tụ 1 để tiếp tục tách khí heli.

- Trạng thái điểm 17: Là trạng thái nitơ lỏng trong bình tách khí, áp suất $p_{17} = 18\text{ atm}$, nhiệt độ $T_{17} = 95\text{ K}$.

- Trạng thái điểm 18: Là trạng thái lỏng nitơ sau van tiết lưu 4, nhiệt độ $T_{18} = 77\text{ K}$, áp suất $p_{18} = 1\text{ atm}$.

Từ những phân tích và tính toán ở trên ta có bảng kết quả trạng thái các điểm nút như Bảng 1.

Bảng 1. Bảng kết quả trạng thái các điểm nút hệ thống chính tách khí heli

Điểm	Áp suất (atm)	Nhiệt độ (K)	Thành phần (%)		
			Mêtan	Nitơ	Heli
1	1	300	52	40	8
2	42	320	52	40	8
3	42	184	52	40	8
4	18	166	52	40	8
5	18	114	60	40	-
6	1	96	60	40	-
7	1	210	60	40	-
8	18	120	-	40	60
9	18	300	-	40	60
10	185	320	-	40	60
11	185	110	-	40	60
12	185	90	-	1,5	98,5
13	185	90	-	92,88	7,12
14	185	90	-	-	99,995
15	185	151	-	-	99,995
16	18	85	-	92,88	7,12
17	18	95	-	100	-
18	1	77	-	100	-

3.4. Tính toán hệ thống hoá lỏng Claude sử dụng môi chất nitơ

Sơ đồ hệ thống lạnh cryo theo chu trình Claude sử dụng môi chất nitơ (tách ra từ Hình 1) như Hình 3.

Ta có trạng thái của các điểm nút như sau:

- Trạng thái điểm 1': Là trạng thái điểm vào máy nén 3 có áp suất $p_{1'} = 1\text{ atm}$, nhiệt độ bằng nhiệt độ môi trường $T_{1'} = 300\text{ K}$.

- Trạng thái điểm 2': Là trạng thái sau khi ra khỏi máy nén 3, được nén tăng đến áp suất $p_{2'} = 42\text{ atm}$, thành phần thể tích như trạng thái 1'.

$$T_{2'} = T_{1'} \left(\frac{p_{2'}}{p_{1'}} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 873\text{ K} \quad [8]$$

Trong đó: $k = 1,4$ hỗn hợp khí có 3 nguyên tử trở lên.

Tương tự, máy nén cũng được làm mát nên nhiệt độ ra khỏi máy nén gần như bằng với nhiệt độ đầu vào $T_{2'} = 320\text{ K}$.

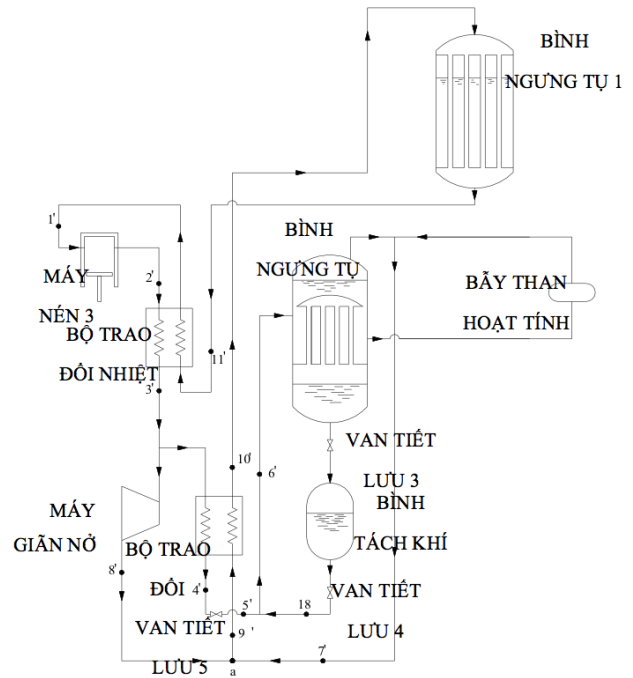
- Trạng thái điểm 3': Là trạng thái sau khi trao đổi nhiệt trong bộ trao đổi nhiệt 4, nhiệt độ giảm xuống còn $T_{3'} = 250\text{ K}$, vì đây là quá trình trao đổi nhiệt đẳng áp nên $p_{3'} = 42\text{ atm}$.

- Trạng thái điểm 4': Là trạng thái sau khi trao đổi nhiệt trong bộ trao đổi nhiệt 3 để vào van tiết lưu 5, nhiệt độ giảm xuống đến $T_{4'} = 130\text{ K}$, áp suất không đổi $p_{4'} = 42\text{ atm}$, nhưng khối lượng ở trạng thái này chỉ có 20% của khối lượng ban đầu.

- Trạng thái điểm 5': Là trạng thái sau khi tiết lưu trong van tiết lưu 5, nhiệt độ giảm xuống đến $T_{5'} = 77\text{ K}$, áp suất sau quá trình tiết lưu là $p_{5'} = 1\text{ atm}$.

- Trạng thái điểm 7': Là trạng thái sau khi làm lạnh hóa lỏng nitơ trong hỗn hợp khí heli - nitơ, nhiệt độ $T_{7'} = 77\text{ K}$, áp suất $p_{7'} = 1\text{ atm}$.

- Trạng thái điểm 8': Là trạng thái sau khi ra khỏi máy giãn nở, nhiệt độ giảm xuống đến $T_{8'} = 87\text{ K}$, áp suất sau khi giãn nở $p_{8'} = 1\text{ atm}$.



Hình 3. Sơ đồ nguyên lý hệ thống lạnh cryo sử dụng môi chất nitơ

Dựa vào các phương trình cân bằng nhiệt tại các thiết bị trao đổi nhiệt và các điểm hoà trộn, ta có bảng trạng thái tại các điểm nút như Bảng 2.

Bảng 2. Trạng thái các điểm nút của chu trình lạnh Claude sử dụng môi chất nitơ

Điểm	Nhiệt độ (K)	Áp suất (atm)	Trạng thái
1'	300	1	hơi thấp áp
2'	320	42	hơi cao áp
3'	250	42	hơi cao áp
4'	130	42	hơi cao áp
5'	77	1	hơi hạ áp

6'	77	1	lông thấp áp
7'	77	1	hơi thấp áp
8'	87	1	hơi thấp áp
9'	85	1	hơi thấp áp
10'	109	1	hơi thấp áp
11'	228	1	hơi thấp áp
12'	297	1	hơi thấp áp

3.5. COP của toàn hệ thống sản xuất khí heli

COP của hệ thống được tính theo công thức:

$$COP = \frac{\sum Q_i}{\sum l_i}$$

Do chu trình có sử dụng máy giãn nở, công máy giãn nở sinh ra sử dụng để truyền động máy nén nên công nén của chu trình được tính như sau:

$$\sum l_i = l_1 + l_2 + l_3 - l_4$$

Nhiệt lượng hữu ích thu được trong toàn chu trình được tính:

$$\sum Q_i = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$$

Tính toán các giá trị công và nhiệt đồng thời thay vào các công thức trên ta có COP = 39%.

4. Kết luận

Hiện nay, nhu cầu sử dụng khí heli trên thế giới ngày một tăng do nhiều ứng dụng hữu ích của heli, vì vậy, việc nghiên cứu một chu trình sản xuất khí heli có hiệu suất cao là rất cần thiết.

Trữ lượng mỏ khí thiên nhiên giàu heli ngày càng giảm. Vì vậy, việc khai thác khí thiên nhiên có nồng độ heli thấp là điều tất yếu. Do đó chu trình sản xuất khí heli từ khí thiên nhiên được trình bày trong bài báo là giải pháp cho vấn đề này.

Qua tính toán chu trình ta có COP = 39%. Ngoài ra, chu trình còn có những ưu điểm sau:

+ Do kết hợp thu nito lỏng nên hiệu quả của chu trình được nâng lên đáng kể;

+ Chu trình sử dụng cả van tiết lưu và máy giãn nở, trong đó quá trình giãn nở làm lạnh khí tốt hơn và công sinh ra có thể tham gia truyền động máy nén tiết kiệm năng lượng cung cấp từ bên ngoài. Đây cũng là yếu tố nâng cao hệ số làm lạnh chu trình.

Nhược điểm:

+ Sử dụng máy giãn nở và nhiều thiết bị hồi nhiệt nên hệ thống phức tạp, khó khăn trong điều khiển tự động;

+ Các thiết bị trong hệ thống phải làm việc trong điều kiện áp suất cao;

+ Vận hành và quản lý hệ thống phức tạp.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] A.J. Reyzevski, *Refrigerantion, cryogenics, optics and miscellaneous*, Engineering department, I.I. du pont de Nemours & Co. Inc., McGraw-Hill, 1996.
- [2] Arthur J. Kidnay, William R. Parrish, *Fundamentals of Natural Gas Processing*, Taylor and Francis Group, LLC. New York, 2006.
- [3] E.W. Lemon, *Thermophysical properties of fluids and materials*, NIST Chemistry WebBook, 2009.
- [4] Frank G. Kerry, *Industrial Gas Handbook Gas Separation and Purification*, Taylor & Francis Group, LLC. New York, 2006.
- [5] Isidoro Martinez, *Heat exchangers*, Academic website 1995-2017 by Isidoro Martinez, pp. 9-12.
- [6] J.-M. Reneaume, N. Niclout, "MINLP Optimization of Plate fin Heat Exchangers", *Chem. Biochem. Eng.*, Q. 17 (1), 2003, pp. 65-76.
- [7] Randall Barron, *Cryogenic Systems*, McGraw-Hill Inc., 1996.
- [8] Phạm Lê Dân, Bùi Hải, *Nhiệt động kỹ thuật*, NXB Khoa học và Kỹ thuật Hà Nội, 2000, pp. 24-50.
- [9] Nguyễn Thị Minh Hiền, *Công nghệ chế biến khí tự nhiên và khí đồng hành*, Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật Hà Nội, 2002.

(BBT nhận bài: 05/10/2017, hoàn tất thủ tục phản biện: 24/10/2017)