



## Mô phỏng quá trình làm việc của thiết bị làm giàu khí oxy bằng chu trình hấp phụ thay đổi áp suất

## Simulation of working process of oxygen concentrator equipment by pressure swing adsorption

Vũ Đình Tiến<sup>1\*</sup>, Lê Văn Dương<sup>1</sup>, Mai Đức Minh<sup>2</sup>, Vũ Duy Hưng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Viện Kỹ thuật Hóa học, Đại học Bách Khoa Hà Nội*

<sup>2</sup>*Trung tâm Chiếu xạ Hà Nội*

\*Email: [tien.vudinh@hust.edu.vn](mailto:tien.vudinh@hust.edu.vn)

### ARTICLE INFO

Received: 19/01/2023

Accepted: 20/3/2023

Published: 25/3/2023

### Keywords:

Oxygen, Adsorption, Zeolite Molecular Sieves – ZMS, Pressure swing adsorption cycle, Aspen Adsorption.

### ABSTRACT

Oxygen is essential for human respiration and the existence of all living organisms. Medically it is used to treat diseases related to impaired respiratory function. In industrial scale, gaseous oxygen is separated from the air by liquefaction and fractional distillation techniques, while on a small and medium scale oxygen is usually separated by using zeolite molecular sieves and pressure swing adsorption (PSA) technology. During the Covid-19 pandemic, the demand for oxygen concentrators (PSA type) for personal and family use is very high. However, there isn't any Vietnamese factory for production oxygen concentrator, so it is imported from abroad. In this paper, a pilot-scale oxygen concentrator was built at the Department of chemical process equipment, Hanoi University of Science and Technology. The operation of the device has been simulated and optimized on Aspen Adsorption software. The optimization parameters obtained will be used to design the equipment in industrial scale.

### Giới thiệu chung

Oxy là một loại khí không màu, không mùi, không vị và tồn tại dưới dạng phân tử O<sub>2</sub>. Oxy chiếm khoảng 21% khí quyển và là thành phần của mọi cơ thể sống, là dưỡng khí để duy trì sự sống cho hầu hết sinh vật trên trái đất. Khí Oxy được ứng dụng rộng rãi trong y tế và các ngành công nghiệp với nhiều mục đích khác nhau. Ở qui mô lớn, khí oxy thường được phân tách từ không khí bằng kỹ thuật hóa lỏng và chưng phân đoạn trong một nhà máy lớn với chi phí đầu tư cao. Sản phẩm này phải tồn chứa và vận chuyển ở dạng lỏng hoặc áp suất cao (đến 150 bar) đến nơi tiêu thụ nên dễ

xây ra các rủi ro. Khi cần chủ động tạo ra nguồn khí oxy ở qui mô nhỏ và vừa, vận hành ở áp suất thấp để sử dụng trong bệnh viện tuyến huyện, trạm y tế tại các vùng nông thôn, biên giới, hải đảo xa xôi..., người ta thường sử dụng thiết bị làm giàu khí oxy sử dụng chu trình hấp phụ thay đổi áp suất (Pressure Swing Adsorption - PSA). Theo tổ chức Y tế thế giới WHO, Oxy là một loại thuốc thiết yếu cần thiết ở tất cả các cấp độ của hệ thống chăm sóc sức khỏe; độ tinh khiết Oxy tối thiểu cung cấp cho bệnh nhân phải đạt trên 90% [5]. Hiện nay, thiết bị làm giàu Oxy sử dụng vật liệu sàng phân tử zeolite 5A để tách Oxy ra khỏi không khí. Oxy và Argon trong không khí đều không phân

cực và có đường kính động học gần giống nhau do đó nồng độ oxy tối đa từ thiết bị làm giàu oxy bị hạn chế ở 96% trong điều kiện lý tưởng nhất, thông thường độ tinh khiết Oxy thu được ở mức 93%.

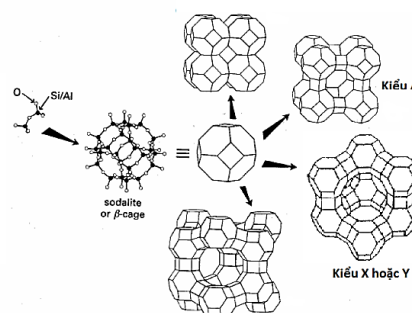
Khởi nguồn vào tháng 12/2019 tại Vũ Hán – Trung Quốc, cho đến nay đại dịch COVID-19 đã lan rộng ra tất cả các quốc gia và vùng lãnh thổ. Tính đến tháng hết tháng 8/2022, thế giới đã ghi nhận hơn 600 triệu ca nhiễm Virus SARS-CoV2 làm tử vong gần 6,5 triệu người, riêng ở Việt Nam đã có gần 11,5 triệu ca nhiễm bệnh và làm tử vong 43137 người [6]. Virus tấn công hai lá phổi khiến bệnh nhân càng lúc càng khó thở, nếu không được cung cấp đủ lượng oxy cần thiết, họ có thể chết ngay tức khắc. Do nhu cầu oxy quá lớn, nên chuỗi cung ứng oxy lỏng và oxy áp suất cao từ các nhà máy khí công nghiệp đến các bệnh viện, trạm y tế bị thiếu hụt và gián đoạn, nên số lượng bệnh nhân bị tử vong rất cao, đặc biệt ở các vùng sâu vùng xa không tiếp cận được nguồn cung cấp khí công nghiệp. Chính phủ các nước đã phải cứu trợ khẩn cấp các máy tạo khí oxy với số lượng lớn cho Ấn Độ. Sự bùng phát dịch COVID-19 đã cho thấy sự cần thiết phải quan tâm đến việc trang bị máy làm giàu khí oxy cho các cơ sở y tế. Hiện nay ở Việt Nam mới nghiên cứu về công nghệ hấp phụ thay đổi áp suất (PSA) trong phân tách khí Nitơ từ không khí mà vẫn chưa có đơn vị nào nghiên cứu và ứng dụng kỹ thuật này trong phân tách khí oxy [1],[2],[3]. Trong bối cảnh nhu cầu sử dụng máy làm giàu oxy để điều trị cho bệnh nhân Covid-19 tăng cao, việc nghiên cứu, mô phỏng quá trình làm giàu Oxy theo chu trình PSA để làm chủ kỹ thuật công nghệ có tính ứng dụng và thực tiễn rõ rệt.

## Thực nghiệm và phương pháp nghiên cứu

### Sàng phân tử Zeolite

Sàng phân tử (hay rây phân tử) cũng là một dạng vật liệu xốp có khả năng hấp phụ nhưng có cấu trúc mao quản đồng đều nên chúng có tính chất chọn lọc hình dạng của phân tử khuếch tán vào và ra khỏi hệ thống mao quản. Zeolite là hợp chất vô cơ dạng aluminosilicat tinh thể có cấu trúc không gian ba chiều, lỗ xốp đặc biệt và trật tự cho phép chúng phân chia phân tử theo hình dạng và kích thước. Vì vậy, Zeolite còn được gọi là hợp chất sàng phân tử. Thành phần chủ yếu của Zeolite là Si, Al, Oxi và một số kim loại kiềm, kiềm thổ khác. Cấu trúc không gian ba chiều của Zeolite được hình thành từ các đơn vị sơ cấp là các tứ diện  $TO_4$  (T: Al, Si). Trong mỗi tứ diện  $TO_4$ , cation T được bao quanh bởi bốn ion  $O^{2-}$  và mỗi tứ diện liên kết với bốn tứ diện xung quanh nó bằng cách ghép

chung các nguyên tử oxy ở đỉnh. Khác với tứ diện  $SiO_4$  trung hòa về điện, mỗi một nguyên tử Al phối trí tứ diện trong  $AlO_4^-$  còn thừa một điện tích âm, vì vậy khung mạng zeolite tạo ra mạng điện tích âm và cần được bù trừ bởi các cation kim loại  $M^{n+}$  ( $K^+, Na^+, Ca^{2+} \dots$ ). Sự liên kết các tứ diện  $TO_4$  theo một trật tự nhất định sẽ tạo ra các đơn vị cấu trúc thứ cấp (SBU) trong zeolite. Các SBU lại kết hợp với nhau tạo nên các họ zeolit với 85 loại cấu trúc thuộc bảy nhóm và các hệ thống mao quản khác nhau. Hình 1 mô tả sự ghép nối các đơn vị cấu trúc sơ cấp và thứ cấp khác nhau tạo ra các zeolit A và zeolit X (Y) [4].



Hình 1: Cách xây dựng cấu trúc của zeolite

Zeolite có cấu trúc tinh thể với hệ thống lỗ xốp có kích thước cỡ phân tử và rất đồng đều, nên hấp phụ chọn lọc với dung lượng hấp phụ lớn là đặc trưng quan trọng của zeolite. Các zeolite có bề mặt ngoài nhỏ hơn nhiều so với diện tích bề mặt bên trong các mao quản, vì vậy để thực hiện các quá trình hấp phụ, các chất bị hấp phụ phải khuếch tán vào trong các mao quản zeolite. Do đó, khả năng hấp phụ của zeolite không những phụ thuộc vào bản chất phân tử chất bị hấp phụ và kích thước của hệ mao quản trong zeolite, mà còn phụ thuộc vào nhiều yếu tố khác như áp suất, nhiệt độ, bản chất của mỗi loại zeolite.

Cân bằng hấp phụ được xác định bởi lực tĩnh điện và lực phân tán. Đối với các zeolite giàu Al như zeolite A và X, khi điện tích âm của mạng lưới đã được cân bằng bởi các cation thích hợp, thì lực tĩnh điện chiếm ưu thế, dẫn đến sự hấp phụ tốt các chất có momen lưỡng cực lớn như  $H_2O$ ,  $NH_3 \dots$  hoặc momen tứ cực (như  $N_2$ ). Ngược lại, đối với các zeolite giàu silic, thì sự hấp phụ chỉ do lực Van der Waals. Khi ấy ái lực liên kết của các chất bị hấp phụ phụ thuộc vào khả năng phân cực và khối lượng phân tử của chúng. Đó chính là nguyên nhân của sự kỵ nước đối với các zeolite giàu silic. Với dung lượng hấp phụ lớn và độ chọn lọc cao, các sàng phân tử zeolite A và X được sử dụng phổ biến trong các quá trình tách và làm sạch chất như dùng để tách  $CO_2$  từ không khí, tách  $CO_2$  và các hợp chất sunfua hữu cơ từ khí thiên nhiên.... Trong các loại zeolite A

(3A, 4A, và 5A) thì loại 5A được đặc biệt ưa chuộng khi sử dụng để tách O<sub>2</sub> khỏi N<sub>2</sub> trong quá trình sản xuất O<sub>2</sub> đi từ không khí với độ sạch O<sub>2</sub> có thể đạt tới 96%.

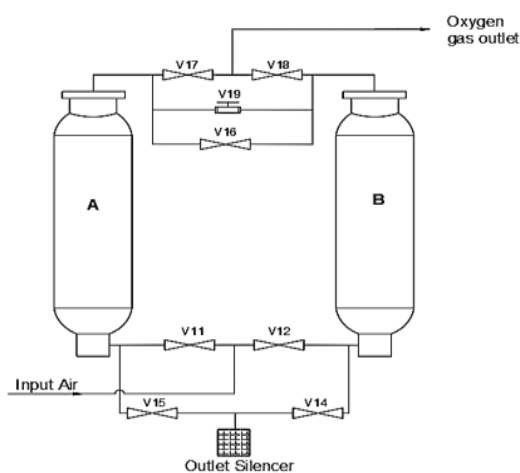
Trong bài báo này sử dụng loại zeolite 5A. Một số thông số vật lý zeolite 5A được đưa ra trong Bảng 1

Bảng 1: Thông số vật lý của Zeolite 5A

Zeolite 5A	
Độ xốp [-]	0.43
Đường kính hạt [mm]	4-5
Khối lượng riêng [Kg/m <sup>3</sup> ]	1488-1568
Độ cứng [N/hạt]	100
Áp suất hấp phụ [MPa]	0,6

### Nguyên lý làm việc của thiết bị làm giàu oxy

Thiết bị làm giàu khí oxy thường sử dụng tối thiểu 02 cột hấp phụ làm việc luân phiên theo một chu trình gồm 6 bước được thể hiện trên Hình 2 và sự thay đổi áp suất trong 1 chu kỳ theo các bước mô tả ở trên được biểu diễn trong đồ thị Hình 3.



Hình 2: Chu trình làm việc 6 bước của thiết bị làm giàu Oxy

Bước 1: Khí nén được đưa vào đáy cột A thông qua van V<sub>11</sub> đồng thời van V<sub>14</sub> cột B mở thông với áp suất bên ngoài.

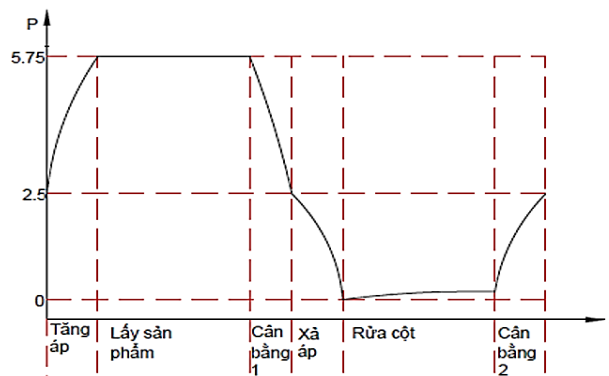
Bước 2: Van V<sub>11</sub>, van V<sub>14</sub>, tiếp tục mở và đồng thời mở van V<sub>17</sub> để lấy sản phẩm. Một phần sản phẩm được lấy ra đi qua van V<sub>19</sub> sang cột B để rửa cột.

Bước 3: Sau bước lấy sản phẩm các van khác đóng, mở van V<sub>16</sub> tiến hành bước cân bằng áp suất giữa 2 cột.

Bước 4: Cột A được xả ra bên ngoài thông qua van V<sub>15</sub> mở và dòng khí nén được cấp vào cột B qua van V<sub>12</sub> mở.

Bước 5: Lấy sản phẩm cột B, xả và rửa cột B. Tương tự như bước 2 nhưng lấy sản phẩm tinh khiết ở cột B qua van V<sub>18</sub> mở.

Bước 6: Van V<sub>16</sub> mở tiến hành cân bằng áp suất giữa 2 cột.



Hình 3: Sự thay đổi áp suất trong một chu kỳ của 1 cột hấp phụ trong hệ thống PSA

### Mô phỏng chế độ làm việc sử dụng aspen adsorption

#### Mục đích của mô phỏng

Mô phỏng - Simulation - là phương pháp mô hình hoá dựa trên việc thiết lập mô hình số, vì vậy còn được gọi là Digital Simulation. Đây là một công cụ rất mạnh để giải các biểu thức toán học mô tả các quá trình công nghệ hoá học. Để mô phỏng một quá trình trong thực tế đòi hỏi trước hết phải thiết lập mô hình nguyên lý của quá trình và mối liên hệ giữa các thông số liên quan. Tiếp đó là sử dụng các công cụ toán học để mô tả mô hình nguyên lý, lựa chọn các thuật toán cần thiết. Cuối cùng là tiến hành xử lý các biểu thức với các điều kiện ràng buộc.

Trong thực tế việc tính toán gặp hai khó khăn. Thứ nhất đó là giải hệ các phương trình đại số phi tuyến (thường phải sử dụng phương pháp tính lặp). Thứ hai là phép tính tích phân của các biểu thức vi phân (sử dụng các biểu thức vi phân hữu hạn rời rạc để xấp xỉ các biểu thức vi phân liên tục). Các mô hình toán học rất hữu ích trong tất cả các giai đoạn, từ nghiên cứu triển khai đến cải tiến phát triển nhà máy, và ngay cả trong nghiên cứu các khía cạnh thương mại và kinh tế của quá trình công nghệ.

Một quá trình công nghệ hoá học trong thực tế là một tập hợp gồm rất nhiều yếu tố hết sức phức tạp có ảnh hưởng lẫn nhau (các thông số công nghệ như nhiệt độ, áp suất, lưu lượng dòng, thành phần hỗn hợp

phản ứng, xúc tác, các quá trình phản ứng song song và nối tiếp, hiệu ứng nhiệt của phản ứng, cân bằng pha trong hệ thống,...). Độ phức tạp của quá trình tăng lên, đồng nghĩa với số lượng các thông số liên quan, các biến số, các phương trình, các biểu thức toán học, các điều kiện ràng buộc tăng lên. Giải quyết đồng thời các vấn đề trên đòi hỏi một khối lượng tính toán cực kỳ lớn, việc tính toán bằng tay đòi hỏi như là không thể thực hiện được một cách chính xác và tin cậy mất rất nhiều thời gian.

Ngày nay với sự phát triển của công nghệ phần mềm tin học, sự ra đời của các phần mềm mô phỏng, việc nghiên cứu tính toán thiết kế công nghệ bằng phương pháp mô phỏng đang ngày càng phát triển, đã trở nên phổ biến và chiếm ưu thế. Mô phỏng công nghệ bằng các phần mềm mô phỏng với sự trợ giúp của máy vi tính là giải pháp hiệu quả, toàn diện và cho kết quả tin cậy.

#### *Giới thiệu về Aspen Adsorption*

Aspen One là một gói phần mềm mô phỏng các quá trình công nghệ hóa học do hãng AspenTech của Mỹ phát triển, được sử dụng rộng rãi trong nghiên cứu và ứng dụng để tối ưu quá trình sản xuất trong công nghiệp. Aspen sử dụng các mô hình toán học để mô phỏng quá trình quá trình. Với nguồn cơ sở dữ liệu khổng lồ, Aspen có thể xử lý các quá trình rất phức tạp, bao gồm cả hệ thống phân tách nhiều cột, thiết bị phản ứng, chưng cất các hợp chất phản ứng hóa học v... Aspen Adsorption là một modul trong gói phần mềm mô phỏng Aspen One.

Modul Aspen Adsorption có thể ứng dụng để thiết kế, mô phỏng và tối ưu hóa các quá trình hấp phụ để phân tách khí, chẳng hạn như chu trình hấp phụ thay đổi áp suất (PSA), chu trình hấp phụ thay đổi nhiệt độ (TSA), chu trình hấp phụ thay đổi độ chân không (VSA) v... Aspen Adsorption có một công cụ mạnh là Cyclic Steady State (CSS) cho phép một quá trình hấp phụ có chu kỳ ở trạng thái ổn định. Mô hình Aspen hấp phụ CSS cung cấp một công cụ thiết kế rất hiệu quả có thể dễ dàng sử dụng như là một gói phần mềm tối ưu hóa để xác định thiết kế và điều hành các điều kiện tối ưu cho quá trình tính toán và thiết kế các hệ thống hấp phụ. Trong nghiên cứu này, Aspen Adsorption được sử dụng để thiết lập mô hình và mô phỏng hệ thống thiết bị làm giàu Oxy bằng chu trình hấp phụ thay đổi áp suất (PSA).

#### *Xây dựng hệ thống thực nghiệm*

Để có thể xác lập các thông số công nghệ và thông số vận hành cho thiết bị làm giàu khí Oxy, một hệ thống

thí nghiệm ở qui mô pilot đã được thiết lập. Hệ thống gồm có: 01 máy nén khí có lưu lượng  $V=600\text{lit}/\text{phút}$  với áp suất làm việc  $P_{\max}=7,5\text{bar}$ ; 01 hệ thống làm sạch không khí trong đó tích hợp máy sấy khô không khí lưu lượng  $V=1600\text{lit}/\text{phút}$  nhiệt độ điểm sương đầu ra từ  $2\sim 10^{\circ}\text{C}$ , cột than hoạt tính hấp phụ VOCs và một bộ lọc không khí  $<0,01\mu\text{m}$ ; 02 cột hấp phụ bằng thép có đường kính  $D=200\text{mm}$  và chiều cao  $H=1200\text{mm}$ . Mỗi cột được nhồi 20kg vật liệu hấp phụ zeolite 5A. Để điều khiển chu trình làm việc thiết bị sử dụng các van điện từ ODE-G1/2 của Italia, van góc điều khiển khí nén G1/2 và van điện từ 5/2 điện áp 24V của hãng STNC. Thời gian đóng mở các van được điều khiển thông qua bộ điều khiển khả lập trình PLC của hãng Delta. Hình ảnh hệ thống thực nghiệm được thể hiện trên Hình 4.



Hình 4: Hệ thống thực nghiệm thiết bị làm giàu Oxy bằng chu trình hấp phụ thay đổi áp suất

#### *Mô phỏng chế độ làm việc trên Aspen Adsorption*

Trên cơ sở phần mềm Aspen Adsorption, chúng tôi đã tiến hành mô phỏng chế độ làm việc từ đó xác định thời gian cho các bước trong chu trình làm việc của thiết bị làm giàu khí Oxy. Về cơ bản các bước thiết lập mô hình trong Aspen Adsorption bao gồm:

Bước 1: Nhập các thông số vật lý của các cấu tử trong hệ (trong trường hợp này là không khí,  $\text{N}_2$  và  $\text{O}_2$ ) từ ngân hàng dữ liệu của Aspen Properties;

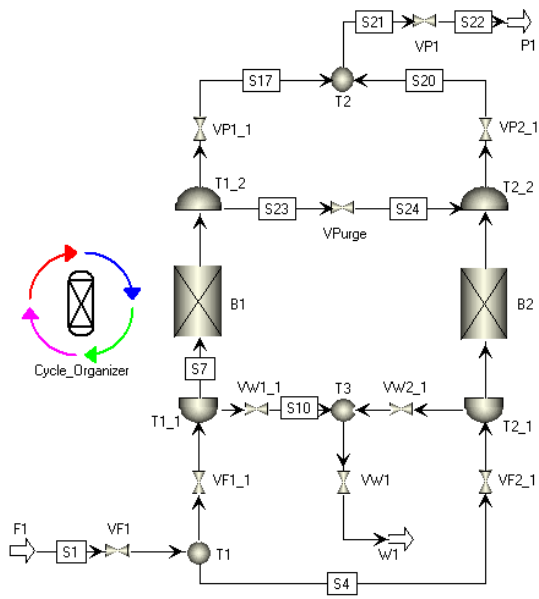
Bước 2: Trong phần "Gas Dynamic" của thư viện "Libraries" của Aspen Adsorption, chọn các biểu tượng đầu vào (gas feed), van các loại (valves), cột hấp phụ (gas bed), đầu ra (gas product) và các đường nối (connections) để xây dựng sơ hệ thống thiết bị phù hợp với thiết bị thí nghiệm đã chế tạo như Hình 5;

Bước 3: Click đúp chuột và từng thành phần trong sơ đồ đã xây dựng để nhập thông số hoặc chọn các thông số sẵn có trong cơ sở dữ liệu.

Bước 4: Trong phần công cụ "Tool", chọn "Cycle Organizer" để thiết lập chu trình làm việc 6 bước như đã mô tả ở phần trên;

Bước 5: Tiến hành chạy mô phỏng bằng công cụ "Run". Sau mỗi lần chạy, tiến hành điều chỉnh thời gian

trong “Cycle Organizer” để tìm điều kiện làm việc phù hợp và trích xuất kết quả để xử lý ra Excel.



Hình 5: Sơ đồ hệ thống thiết bị làm giàu Oxy PSA trong phần mềm Aspen Adsorption

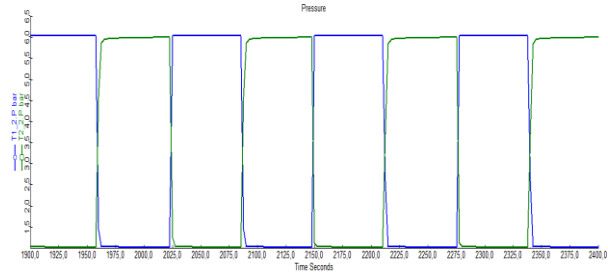
### Kết quả và thảo luận

Để có thể mô phỏng sử dụng mô hình toán có sẵn trong Aspen Adsorption, cần chấp nhận các giả thiết cơ bản sau:

1. Các khí ở trạng thái khí lý tưởng
2. Phân bố chất hấp phụ trong cột đồng đều
3. Biến thiên nồng độ và nhiệt độ theo phương hướng kính là không đáng kể
4. Lưu lượng dòng đi trong cột là hằng số ổn định
5. Không tồn tại hiệu ứng nhiệt của quá trình hấp phụ và nhả hấp phụ vì vậy hệ thống làm việc ở chế độ đẳng nhiệt
6. Khi pha khí và pha rắn tiếp xúc với nhau ngay lập tức đạt đến trạng thái cân bằng, vì vậy hệ số chuyển khối là vô cùng lớn
7. Tổn thất áp suất dọc theo chiều dài cột có thể bỏ qua.
8. Vận tốc dòng khí trong lớp vật liệu hấp phụ được xác định theo cân bằng vật chất và phương trình khí lý tưởng  $PV = nRT$ ;

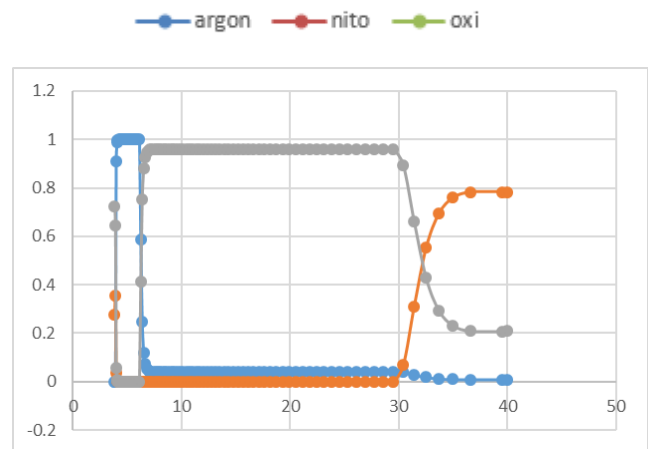
Tiến hành chạy mô phỏng hệ thống làm giàu Oxy bằng phần mềm Aspen Adsorption ở chế độ Dynamic. Biến thiên áp suất trong cột 1 và cột 2 được biểu diễn

trong Hình 6. Sau khoảng chừng 5 chu kỳ làm việc, áp suất làm việc trong từng cột là tương đối ổn định.



Hình 6: Sự thay đổi áp suất trong từng cột theo thời gian

Đường cong thoát của mỗi cấu tử tại đầu ra của thiết bị được xác định trong Hình 7. Argon bị hấp phụ và sẽ ra đầu tiên ở  $t=3s$ , tiếp đến là oxy ở  $t=5s$  và cuối cùng là nitơ sẽ thoát ra khỏi cột ở  $t=30s$ . Thiết bị làm việc ổn định sau 10 chu trình thì nồng độ Oxy đạt 93,6%. Trên cơ sở kết quả mô phỏng đã cài đặt bộ điều khiển PLC để chạy hệ thống thực nghiệm theo đúng chế độ công nghệ đã mô phỏng. Sau 10 chu trình làm việc, độ tinh khiết Oxy đạt 94,1% trên thiết bị phân tích nồng độ  $O_2$  trong Hình 8. Kết quả này là khả quan và phù hợp với kết quả đã mô phỏng. Trong thời gian tới, nếu trang bị thiết bị kiểm soát lưu lượng ở đầu ra của hệ thống thiết bị thì hoàn toàn có thể tối ưu chế độ công nghệ và đưa sản phẩm khí  $O_2$  đạt mức 96%.



Hình 7: Đường cong thoát của mỗi cấu tử tại đầu ra



Hình 8: Kết quả đo độ tinh khiết Oxy trên thiết bị phân tích Oxy sau 10 chu trình làm việc

## Kết luận

Đã xây dựng thành công một hệ thống thiết bị làm giàu khí O<sub>2</sub> ở qui mô pilot làm việc theo chu trình hấp phụ thay đổi áp suất có mức độ tự động hóa cao và sản phẩm khí O<sub>2</sub> thu được đạt đến 94,1%. Chế độ làm việc của thiết bị được thiết lập dựa trên các kết quả mô phỏng bằng phần mềm Aspen Adsorption. Kết quả mô phỏng là hoàn toàn phù hợp với thực tế hoạt động của thiết bị, điều này cho thấy Aspen Adsorption là công cụ tin cậy để mô phỏng và tối ưu các quá trình và thiết bị hấp phụ. Trong thời gian tới để nâng cao độ tinh khiết O<sub>2</sub> sản phẩm đạt mức lên đến 96%, nhóm tác giả sẽ tiếp tục hoàn thiện thiết bị và trang bị thêm các thiết kiểm soát lưu lượng. Đồng thời tiến hành chạy thêm nhiều mô phỏng để đánh giá ảnh hưởng của các thông số và điều kiện làm việc đến chế độ làm việc của thiết bị, từ đó xác lập bộ thông số công nghệ tối ưu để chuyển sang thiết kế thiết bị ở qui mô công nghiệp.

## Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo trong đề tài mã số CT 2022.04.BKA.07 thuộc Chương trình CT 2022.04.

## Tài liệu tham khảo

1. Phạm Văn Chính, Vũ Đình Tiến, Lê Quang Tuấn, Tạp chí Công Thương 5 (2018) 604-610.
2. Phạm Văn Chính, Nguyễn Tuấn Hiếu, Lê Quang Tuấn, Vũ Đình Tiến, Tạp chí Nghiên cứu Khoa học và Công nghệ Quân Sự 56 (2018) 157-165.
3. Pham Van Chinh, Nguyen Tuan Hieu, Vu Dinh Tien, Tan-Y Nguyen, Hoang Nam Nguyen, Ngo Thi Anh, Do Van Thom, Processes MDPE 7 (2019) 1-21. <https://doi.org/10.3390/pr7100654>
4. PGS. TS. Tạ Ngọc Đôn, Rây phân tử và vật liệu hấp phụ, Nhà xuất bản Bách Khoa Hà Nội, 2012
5. W.H.O. Technical specifications for Pressure Swing Adsorption (PSA) Oxygen Plants, Interim guidance. (2020)
6. QuanliZhang and Et. al, Separation and Purification Technology 274 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118918>
7. <https://covid19.gov.vn/>