

## Thermodynamic Analysis of a Kalina Cycle Powered by Low-temperature Heat Source

Nguyen Van Dung<sup>1</sup>, Doan Thi Hong Hai<sup>1</sup>, Tran Van Hung<sup>2</sup>, Nguyen Van Hap<sup>2</sup>, Nguyen Minh Phu<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Faculty of heat and refrigeration engineering, Industrial university of Ho Chi Minh city, Vietnam

<sup>2</sup>Faculty of mechanical engineering, Ho Chi Minh city university of technology, Viet Nam national university - Ho Chi Minh city, Vietnam

\* Corresponding author. Email: [nguyenminhphu@iuh.edu.vn](mailto:nguyenminhphu@iuh.edu.vn)

### ARTICLE INFO

Received: 23/08/2022  
Revised: 14/09/2022  
Accepted: 17/10/2022  
Published: 28/10/2022

### KEYWORDS

Thermodynamic laws;  
Organic cycle;  
Heat engine;  
Low-grade energy;  
Binary working fluid.

### ABSTRACT

The Kalina cycle is a heat engine using an ammonia-water fluid pair. Therefore, the cycle can use a low-temperature heat source to generate mechanical energy. In this paper, a mathematical model for the Kalina cycle is formed and solved in EES software to evaluate the power and exergy destruction of each component in the cycle. From there the thermal efficiency and the exergy performance are appraised. The thermodynamic and flow parameters in each state are compared with published data to determine the accuracy of the mathematical model and the solution method. The analysis results show that a low temperature source of 110°C can provide heat for the Kalina cycle and achieve a thermal efficiency of nearly 13%. The exergy efficiency reaches up to 60% in the range considered. Exergy destruction of the condenser is the greatest. Therefore, further research is needed to improve the irreversibility of the condenser.

## Phân Tích Nhiệt Động Chu Trình Kalina Sử Dụng Nguồn Nhiệt Nhiệt Độ Thấp

Nguyễn Văn Dũng<sup>1</sup>, Đoàn Thị Hồng Hải<sup>1</sup>, Trần Văn Hưng<sup>2,3</sup>, Nguyễn Văn Hạp<sup>2,3</sup>, Nguyễn Minh Phú<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Khoa công nghệ nhiệt lạnh, Trường Đại học Công nghiệp Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

<sup>2</sup>Khoa cơ khí, Trường Đại học Bách Khoa Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

<sup>3</sup>Đại học quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

\* Tác giả liên hệ. Email: [nguyenminhphu@iuh.edu.vn](mailto:nguyenminhphu@iuh.edu.vn)

### THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận bài: 23/08/2022  
Ngày hoàn thiện: 14/09/2022  
Ngày chấp nhận đăng: 17/10/2022  
Ngày đăng: 28/10/2022

### TỪ KHÓA

Định luật nhiệt động;  
Chu trình hữu cơ;  
Động cơ nhiệt;  
Năng lượng cấp thấp;  
Cấp lưu chất làm việc.

### TÓM TẮT

Chu trình Kalina là chu trình thuận chiều dùng cặp môi chất ammonia-nước do đó có thể sử dụng nguồn nhiệt nhiệt độ thấp để sinh ra cơ năng. Trong bài báo này, mô hình toán học cho chu trình Kalina được xây dựng và giải trong phần mềm EES để đánh giá công suất và phá hủy exergy của từng thiết bị trong chu trình. Từ đó hiệu suất nhiệt và hiệu suất exergy được đánh giá. Thông số nhiệt động và lưu lượng ở mỗi trạng thái được so sánh với dữ liệu đã công bố để xác định độ chính xác của mô hình toán và phương pháp giải. Kết quả phân tích cho thấy nguồn nhiệt nhiệt độ thấp cỡ 110°C có thể cấp nhiệt cho chu trình Kalina và đạt được hiệu suất nhiệt gần 13%. Hiệu suất exergy đạt đến 60% trong phạm vi khảo sát. Phá hủy exergy của bình ngưng là lớn nhất. Do đó cần nghiên cứu tiếp theo để cải thiện tính không thuận nghịch của bình ngưng.

Doi: <https://doi.org/10.54644/jte.72B.2022.1262>

Copyright © JTE. This is an open access article distributed under the terms and conditions of the [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium for non-commercial purpose, provided the original work is properly cited.

## 1. Giới thiệu

Trong những thập niên gần đây, vấn đề cạn kiệt nhiên liệu và ô nhiễm môi trường dẫn đến gia tăng sự quan tâm sử dụng các nguồn nhiệt cấp thấp như năng lượng tái tạo và thu hồi nhiệt thải. Hỗn hợp ammonia-nước là cặp lưu chất có nhiệt độ sôi thấp rất thích hợp với các nguồn nhiệt độ thấp. Ammonia-nước là hỗn hợp không đồng sôi nên ngưng tụ hoặc bay hơi không đẳng nhiệt. Đặc tính trượt nhiệt độ này cho phép hỗn hợp đạt được tương tác nhiệt độ tốt hơn giữa chất làm việc và nguồn nhiệt [1]. Chu trình Kalina được phát minh bởi tiến sĩ Alexander I. Kalina vào năm 1983 [2]. Đây là chu trình sinh công sử dụng cặp môi chất ammonia-nước có khả năng sử dụng nguồn nhiệt cấp thấp. Về mặt nhiệt động, chu trình Kalina tương tự như chu trình máy lạnh hấp thụ [3]. Do đó chu trình Kalina được xem như chu trình máy lạnh hấp thụ nghịch (*reversed absorption cooling system*) [4]. Gần đây các nghiên cứu cải tiến hiệu suất chu trình Kalina hoặc tích hợp với các chu trình khác để sản xuất đồng thời cơ năng và năng lượng nhiệt lạnh. Akimoto và cộng sự (cs) [5] tích hợp chu trình Kalina và bơm nhiệt hấp thụ. Họ đã báo cáo rằng công suất phát điện tăng trên 29% so với chu trình Kalina truyền thống. Roefinard và Moosavi [6] thu hồi nhiệt thải từ động cơ đốt trong để cấp nhiệt cho chu trình Kalina. Nhóm nghiên cứu đã kết luận rằng chu trình Kalina có hiệu suất cao hơn chu trình Rankine hữu cơ và sự tận dụng nhiệt thải làm giảm đáng kể tiêu thụ nhiên liệu. Yang và cs [7] dùng ejector để hút hơi ra khỏi turbine bởi lỏng cao áp từ bình tách. Họ đã tìm thấy hiệu suất tăng 2.4% so với chu trình cơ bản. Li và cs [8] cũng rút ra rằng hiệu suất của chu trình Kalina với một ejector thay van tiết lưu cũng cao hơn hiệu suất chu trình truyền thống.

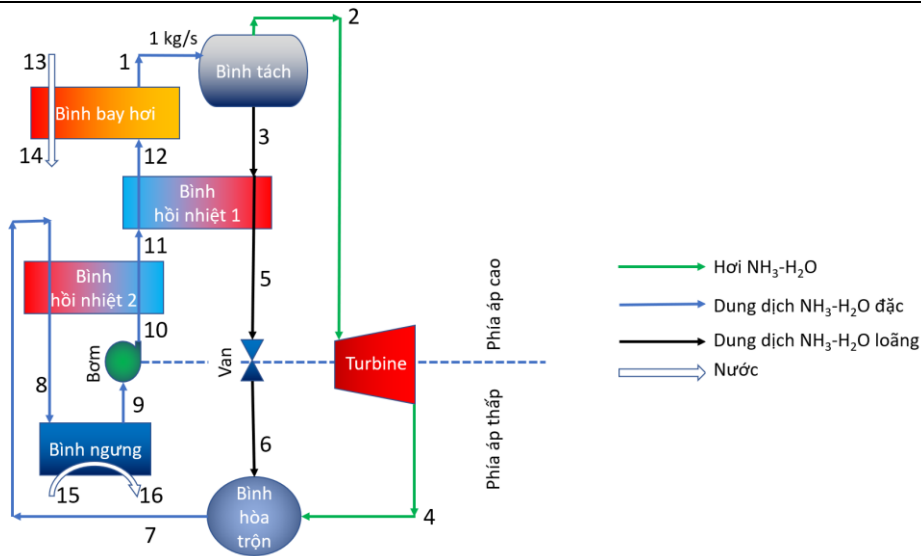
Trong bài báo này, phân tích nhiệt động và exergy của chu trình Kalina được trình bày. Nguồn nhiệt nhiệt độ thấp được nhân mạnh trong nghiên cứu để xác định các thông số vận hành và các hiệu suất. Nồng độ, lưu lượng dung dịch và phá hủy exergy của từng thành phần trong chu trình được đánh giá với các thông số liên quan đến nguồn nhiệt như nhiệt độ, áp suất và nồng độ dung dịch ra khỏi bình bay hơi. Ngoài ra trao đổi nhiệt trong bình bay hơi của chu trình Kalina cũng được phân tích để xác định nguồn nhiệt tiềm năng.

## 2. Mô tả mô hình và phương pháp nghiên cứu

Hình 1 trình bày sơ đồ nguyên lý của chu trình Kalina. Dung dịch đặc nhận nhiệt trong bình bay hơi và rời khỏi bình ở trạng thái 1. Dung dịch đặc đi vào bình tách để thành hơi bão hòa trạng thái 2 và lỏng bão hòa trạng thái 3. Hơi đi vào turbine để sinh công và giãn nở thành trạng thái 4. Dung dịch loãng 3 nhả nhiệt trong bình hồi nhiệt 1 và qua van để giảm áp thành trạng thái 6. Dòng 4 và 6 hòa trộn trong bình hòa trộn thành trạng thái 7 rồi nhả một phần nhiệt trong bình hồi nhiệt 2 trước khi ngưng tụ thành lỏng trạng thái 9. Dung dịch đặc được tăng áp qua bơm và nhận nhiệt sơ bộ trong các bình hồi nhiệt trước khi vào bình bay hơi. Một số thông số cho trước để tính chu trình như sau:

- Hiệu suất đẳng entropy của bơm và turbine là 85%,
- Tổn thất áp suất qua các bình hồi nhiệt, bình bay hơi và bình ngưng lần lượt là 1 bar, 1 bar và 0.8 bar,
- Áp suất hơi ra khỏi turbine là 6.6 bar, nhiệt độ dung dịch đặc ra khỏi bình ngưng là 8°C,
- Nhiệt độ nước giải nhiệt vào và ra khỏi bình ngưng lần lượt là 5°C và 13°C,
- Nhiệt độ nước ra khỏi bình bay hơi và 80°C, nhiệt độ điểm pinch trong bình bay hơi là 6.5 K,
- Chênh lệch nhiệt độ đầu cuối của các bình hồi nhiệt:  $T_5 - T_{11} = 5 \text{ K}$ ,  $T_7 - T_{11} = 5 \text{ K}$ .

Các thông số trên được sử dụng dựa trên nhà máy điện Kalina được vận hành đầu tiên ở Iceland dùng nguồn nước nóng từ địa nhiệt [9-11]. Bảng 1 trình bày các phương trình cân bằng năng lượng cho 6 thiết bị trong chu trình trong đó:  $\dot{Q}$  là nhiệt lượng,  $\dot{m}$  là lưu lượng khối lượng,  $\dot{W}$  công suất,  $h$  là enthalpy,  $T$  là nhiệt độ và  $C_{p,w}$  là nhiệt dung riêng của nước.



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý chu trình Kalina

Bảng 1. Cân bằng năng lượng của các thành phần trong chu trình

STT	Thành phần	Phương trình cân bằng năng lượng
1	Bình hồi nhiệt 1	$\dot{Q}_{HTR} = \dot{m}_1 (h_{12} - h_{11}) = \dot{m}_3 (h_3 - h_5)$
2	Bơm	$\dot{W}_{pump} = \dot{m}_1 (h_{10} - h_9)$
3	Bình ngưng	$\dot{Q}_{Cond} = \dot{m}_1 (h_8 - h_9) = \dot{m}_{cw} c_{p,w} (T_{16} - T_{15})$
4	Bình bay hơi	$\dot{Q}_{Evap} = \dot{m}_1 (h_1 - h_{12}) = \dot{m}_{lw} c_{p,w} (T_{13} - T_{14})$
5	Turbine	$\dot{W}_{Turbine} = \dot{m}_2 (h_2 - h_4)$
6	Bình hồi nhiệt 2	$\dot{Q}_{LTR} = \dot{m}_1 (h_{11} - h_{10}) = \dot{m}_1 (h_7 - h_8)$

Từ năng lượng trao đổi của các thiết bị, ta tính được hiệu suất nhiệt của chu trình như sau:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{Turbine} - \dot{W}_{pump}}{\dot{Q}_{Evap}} \quad (1)$$

Exergy của từng trạng thái được tính từ phương trình dưới trong đó chỉ số 0 thể hiện trạng thái chết [12]. Nhiệt độ trạng thái chết được lấy là  $T_0=298.15$  K trong nghiên cứu này.

$$Ex = \dot{m} [(h - h_0) - T_0 (s - s_0)] \quad (2)$$

Từ exergy của các trạng thái trong chu trình, phá hủy exergy của chín thiết bị trong chu trình được tính như bảng 2. Hiệu suất exergy được tính từ tỷ số exergy sinh ra và exergy cấp vào như phương trình bên dưới.

$$\eta_{ex} = \frac{W_{Turbine} - W_{Pump}}{Ex_{13} - Ex_{14} + Ex_{15} - Ex_{16}} \quad (3)$$

Chương trình tính toán nhiệt động chu trình Kalina được viết trong phần mềm EES nhằm mục đích tra các thông số nhiệt động của dung dịch ammoniac-nước một cách dễ dàng và chính xác [13]. EES (phát âm là 'ease') viết tắt của cụm từ Engineering Equation Solver. Chức năng cơ bản của phần mềm là giải hệ phương trình đại số. EES cũng có thể giải các phương trình vi phân, phương trình có biến phức, tối ưu hóa, hồi quy tuyến tính và phi tuyến, tạo các đồ thị chất lượng cao, phân tích sai số và diễn họa. EES cung cấp nhiều hàm toán học và hàm các thông số nhiệt vật lý nên EES rất hữu dụng trong

tính toán kỹ thuật. EES cung cấp thư viện đa dạng các hàm truyền nhiệt để tính hệ số góc bức xạ nhiệt, hệ số hình dạng dẫn nhiệt, hệ số truyền nhiệt đối lưu, hiệu suất cánh và các hàm truyền nhiệt khác. EES được phát triển bởi GS. Sanford Klein và GS. Gregory Nellis ở đại học Wisconsin, Hoa Kỳ. Trước khi tiến hành phân tích tham số, kết quả tính toán được so sánh với dữ liệu đã được công bố để kiểm chứng độ chính xác. Bảng 3 trình bày so sánh thông số tại 12 điểm trạng thái giữa kết quả tính toán trong nghiên cứu này và dữ liệu từ công bố của Cao và cộng sự [14]. Các thông số đầu vào được ghi chú trong bảng. Các thông số đầu ra là thông số trạng thái và lưu lượng môi chất. Từ sự so sánh ta thấy độ lệch là không đáng kể. Độ lệch này có thể là do công cụ sử dụng khác nhau hoặc phương trình trạng thái khác nhau. Từ sự tương đồng kết quả, phần 3 trình bày ảnh hưởng của các thông số đến đặc tính hoạt động của chu trình Kalina.

**Bảng 2.** Phá hủy exergy của các thành phần trong chu trình

STT	Thành phần	Phương trình phá hủy exergy
1	Bình hồi nhiệt 1	$Ex_{HTR} = Ex_3 - Ex_5 + Ex_{11} - Ex_{12}$
2	Bơm	$Ex_{Pump} = W_{pump} + Ex_9 - Ex_{10}$
3	Bình ngưng	$Ex_{Cond} = Ex_{15} - Ex_{16} + Ex_8 - Ex_9$
4	Bình bay hơi	$Ex_{Evap} = Ex_{13} - Ex_{14} + Ex_{12} - Ex_1$
5	Bình tách	$Ex_{Sep} = Ex_1 - Ex_2 - Ex_3$
6	Turbine	$Ex_{Turbine} = Ex_2 - Ex_4 - \dot{W}_{Turbine}$
7	Bình hồi nhiệt 2	$Ex_{LTR} = Ex_7 - Ex_8 + Ex_{10} - Ex_{11}$
8	Van	$Ex_{Van} = Ex_5 - Ex_6$
9	Bình hòa trộn	$Ex_{Mixer} = Ex_4 + Ex_6 - Ex_7$

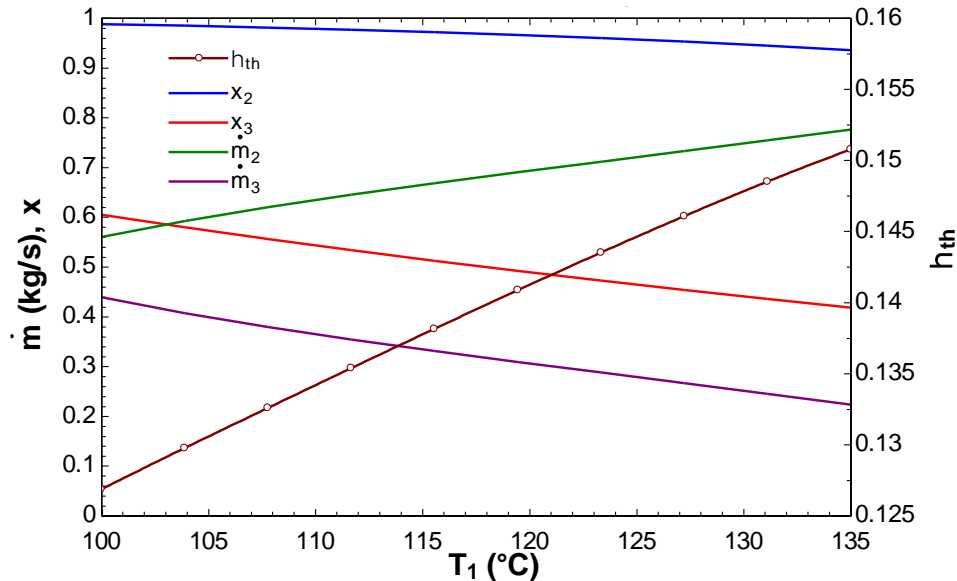
**Bảng 3.** So sánh kết quả tính các thông số trạng thái (a) tính toán hiện tại, (b) Cao và cộng sự [14]

Trạng thái	Nhiệt độ (°C)		Áp suất (bar)		Nồng độ (%)		Lưu lượng (kg/s)	
	(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)
1	116 <sup>a</sup>	116	32.3 <sup>a</sup>	32.3	82 <sup>a</sup>	82	16.6 <sup>a</sup>	16.6
2	116	116	32.3	32.3	97.18	96.61	11.14	11.47
3	116	116	32.3	32.3	51.04	49.36	5.461	5.13
4	42.24	44.1	6.6 <sup>a</sup>	6.6	97.18	96.61	11.14	11.47
5	45.29 <sup>a</sup>	45.07	31.3	31.3	51.04	49.36	5.461	5.13
6	45.71	45.42	6.6	6.6	51.04	49.36	5.461	5.13
7	45.56	45.42	6.6	6.6	82	82	16.6	16.6
8	30 <sup>a</sup>	29.32	5.6	5.59	82	82	16.6	16.6
9	8 <sup>a</sup>	8	4.8	4.6	82	82	16.6	16.6
10	8.576	8.42	35.3	35.3	82	82	16.6	16.6
11	40.74	40.07	33.3	33.3	82	82	16.6	16.6
12	63.31	61.95	33.3	33.3	82	82	16.6	16.6

<sup>a</sup> nhập vào

### 3. Kết quả và bàn luận

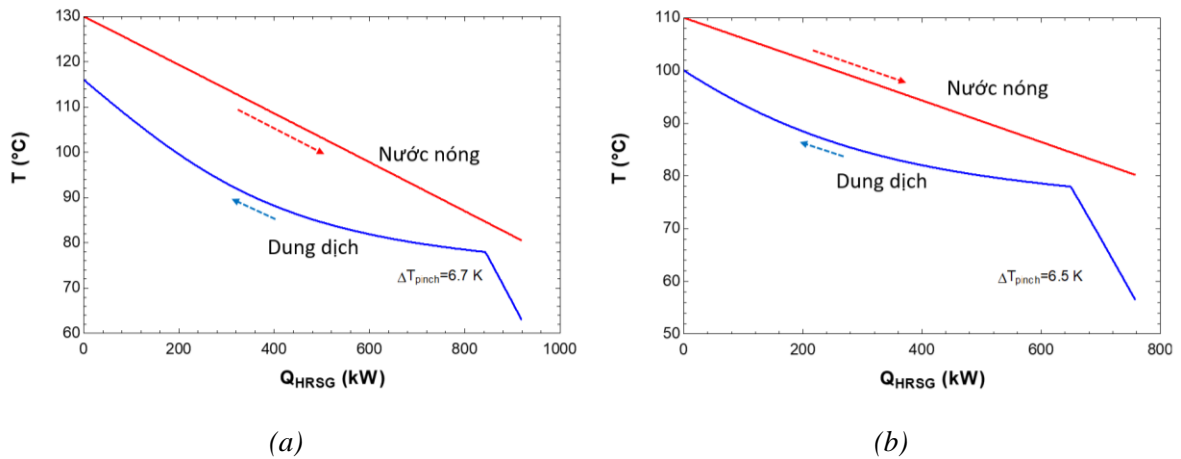
Các hình 2 đến 9 trình bày ảnh hưởng của các thông số áp suất, nhiệt độ và nồng độ dung dịch đặc đến các thông số nhiệt động và hiệu suất của chu trình Kalina. Khi một thông số thay đổi, các thông số còn lại được cố định như bảng 3 ngoại trừ lưu lượng dung dịch đặc được lấy là 1 kg/s như trong hình 1. Hình 2 trình bày ảnh hưởng của nhiệt độ dung dịch ra khỏi bình bay hơi từ 100 đến 135°C đến các nồng độ và lưu lượng các dòng. Khi tăng nhiệt độ thì lượng hơi thu được nhiều hơn nên công suất turbine cao hơn. Do đó hiệu suất nhiệt tăng từ 12.5% đến 15%. Lưu lượng hơi tăng dần tới lưu lượng dung dịch loãng giảm khi tăng nhiệt độ. Các nồng độ hơi và dung dịch đặc đều giảm với nhiệt độ là do đối với dung dịch ammoniac-nước ở một áp suất thì khi nhiệt độ tăng thì nồng độ giảm.



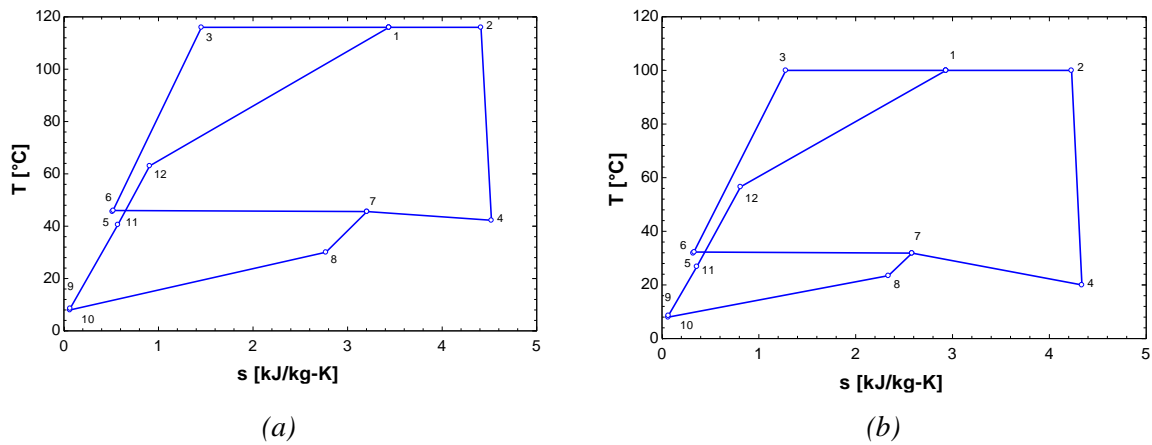
**Hình 2.** Ảnh hưởng của nhiệt độ hơi ra khỏi bình bay hơi đến lưu lượng, nồng độ và hiệu suất nhiệt

Có thể thấy chu trình Kalina có thể hoạt động với nhiệt độ thấp nên có thể hoạt động với nguồn nhiệt từ năng lượng tái tạo hoặc thu hồi nhiệt thải. Hình 3 biểu diễn quá trình trao đổi nhiệt giữa nguồn nước nóng và dung dịch trong bình bay hơi ở hai nhiệt độ  $T_1 = 115^\circ\text{C}$  và  $T_1 = 100^\circ\text{C}$ . Nhiệt độ nước nóng vào có thể giảm từ  $T_{13}=130^\circ\text{C}$  đến  $T_{13}=110^\circ\text{C}$  để đạt được nhiệt độ điểm Pinch gần như nhau. Nhiệt độ nguồn nhiệt này hoàn toàn có thể tạo ra từ các collector tập trung hoặc từ bộ khử quá nhiệt của máy lạnh ammoniac. Nhiệt độ nước nóng giảm tuyến tính từ đầu vào đến đầu ra thiết bị. Nhiệt độ điểm Pinch đạt được tại vị trí dung dịch trạng thái bão hòa và nhiệt độ bay hơi của dung dịch tăng làm giảm chênh lệch giữa hai dòng. Hình 4 trình bày chu trình Kalina trên đồ thị T-s ở các nhiệt độ bay hơi khác nhau. Phân bố nhiệt độ trong quá trình bay hơi (12-1) và ngưng tụ (8-9) được quan sát trong đồ thị này. Những quá trình này không diễn ra ở điều kiện đẳng nhiệt. Điều này là ưu điểm chính của chu trình Kalina.

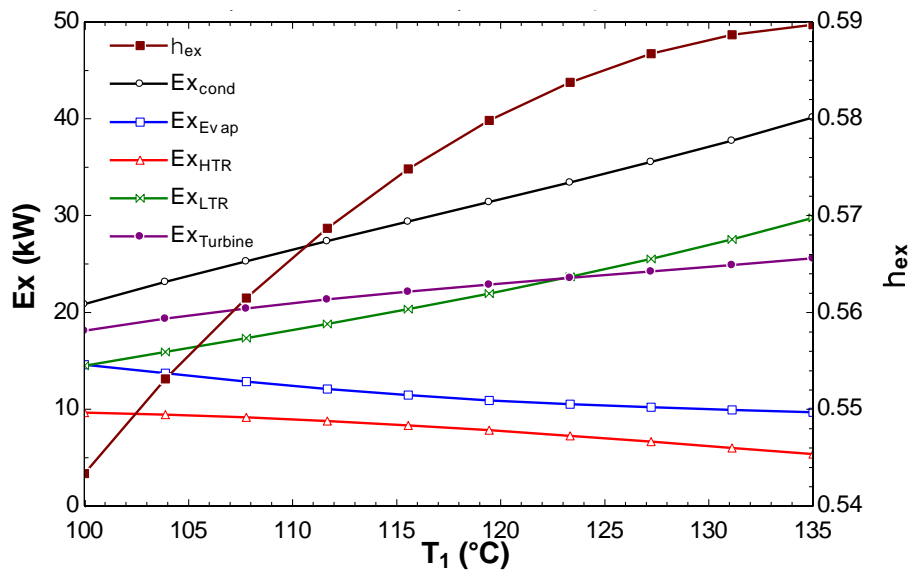
Sự giảm chênh lệch nhiệt độ trong bình bay hơi làm giảm phá hủy exergy của bình bay hơi như có thể thấy trong hình 5. Quan sát hình 5 ta thấy phá hủy exergy của bình ngưng là lớn nhất. Phá hủy exergy của van, bình tách, bình hòa trộn và bơm rất bé do đó không được vẽ trong hình 5. Tương tự như bình bay hơi, phá hủy exergy của bình hồi nhiệt 1 ( $EX_{HTR}$ ) giảm với nhiệt độ  $T_1$ . Phá hủy exergy của bình ngưng ( $EX_{Cond}$ ), turbine ( $EX_{Turbine}$ ) và bình hồi nhiệt 2 ( $EX_{LTR}$ ) tăng với nhiệt độ là do chênh lệch nhiệt độ lưu chất trong thiết bị tăng hoặc chênh lệch nhiệt độ dung dịch và môi trường tăng. Hiệu suất exergy tăng với  $T_1$  do đầu ra exergy tăng ( $W_{turbine}$ ) như đã phân tích ở trên.



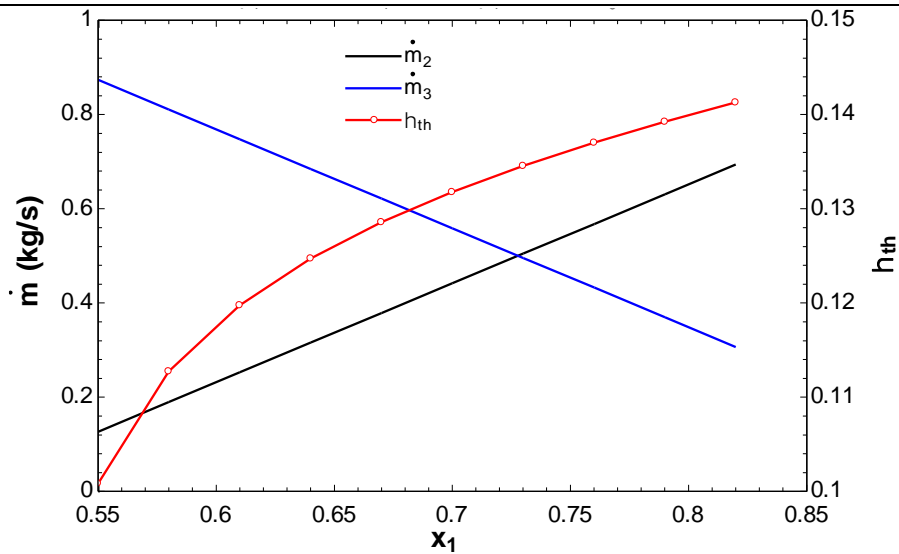
Hình 3. Quá trình trao đổi nhiệt trong bình bay hơi (a):  $T_1=115^\circ\text{C}$ ; (b):  $T_1=100^\circ\text{C}$



Hình 4. Giảm đồ T-s của chu trình Kalina ở các nhiệt độ bay hơi khác nhau (a):  $T_1=115^\circ\text{C}$ ; (b):  $T_1=100^\circ\text{C}$

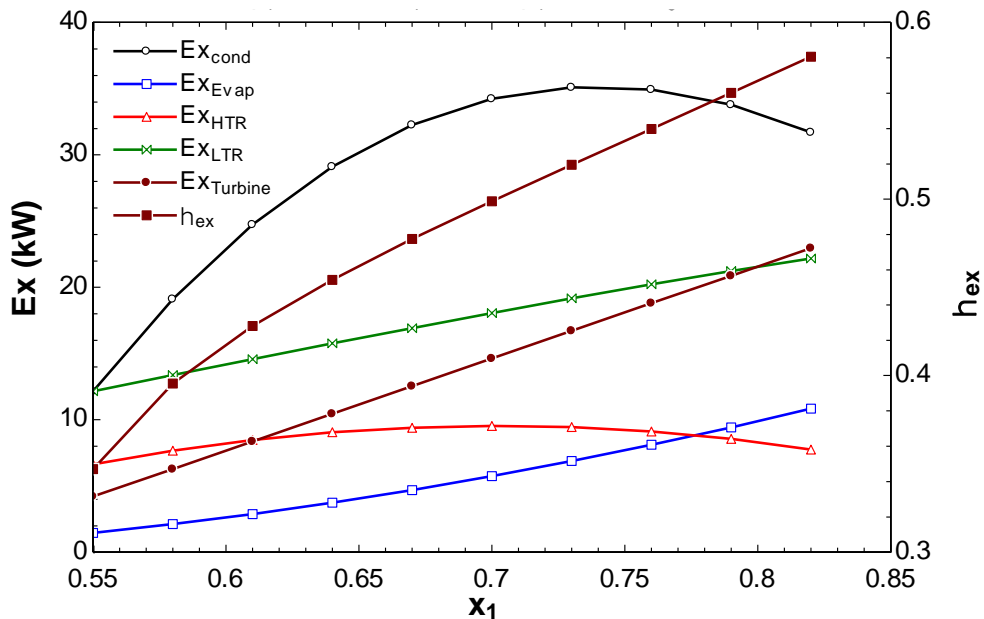


Hình 5. Ảnh hưởng của nhiệt độ hơi ra khỏi bình bay hơi đến phá hủy exergy và hiệu suất exergy

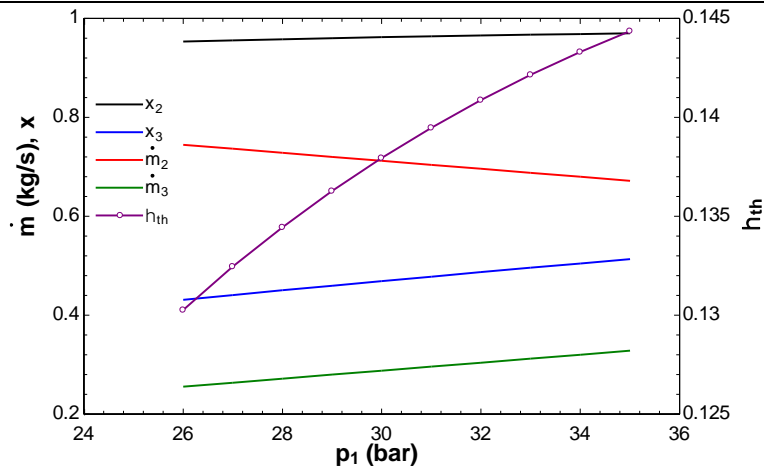


**Hình 6.** Ảnh hưởng của nồng độ dung dịch đặc đến lưu lượng và hiệu suất nhiệt

Hình 6 trình bày ảnh hưởng của nồng độ dung dịch đặc từ 0.55 đến 0.82 đến lưu lượng các dòng và hiệu suất nhiệt. Nồng độ dung dịch loãng và hơi không thay đổi với  $x_1$  do đó không được vẽ trong hình này. Khi nồng độ khối lượng ammoniac tăng thì lượng hơi vào turbine tăng do đó hiệu suất nhiệt tăng. Từ hình 6 ta thấy ảnh hưởng của nồng độ đến hiệu suất nhiệt chu trình Kalina là rõ rệt. Hiệu suất tăng gấp rưỡi khi nồng độ tăng từ 0.55 đến 0.82. Tuy nhiên khi nồng độ tăng thì công suất nhiệt cấp cho bình bay hơi cũng tăng do phải hóa hơi dung dịch. Do đó hiệu suất tăng với số mũ nhỏ hơn một với nồng độ. Hình 7 trình bày ảnh hưởng của  $x_1$  đến các thông số liên quan định luật nhiệt động thứ hai. Phá hủy exergy của bình bay hơi và bình hồi nhiệt 2 tăng là do entropy của các trạng thái 1, 7 và 8 tăng với nồng độ  $x_1$ . Phá hủy exergy của turbine tăng là do exergy của dòng vào turbine (trạng thái 2) tăng mạnh với nồng độ và lưu lượng tăng trong khi công suất turbine tăng không tương xứng. Phá hủy exergy của bình ngưng đạt cực đại một nồng độ  $x_1$  nào đó. Điều này là do ở nồng độ thấp exergy của dòng 8 lớn hơn dòng 9. Ở nồng độ cao thì exergy của dòng 9 lớn hơn dòng 8. Phá hủy exergy bình hồi nhiệt 1 đạt cực đại một nồng độ  $x_1$  nào đó. Điều này là do các entropy tăng nhưng lưu lượng của dung dịch loãng giảm với nồng độ.

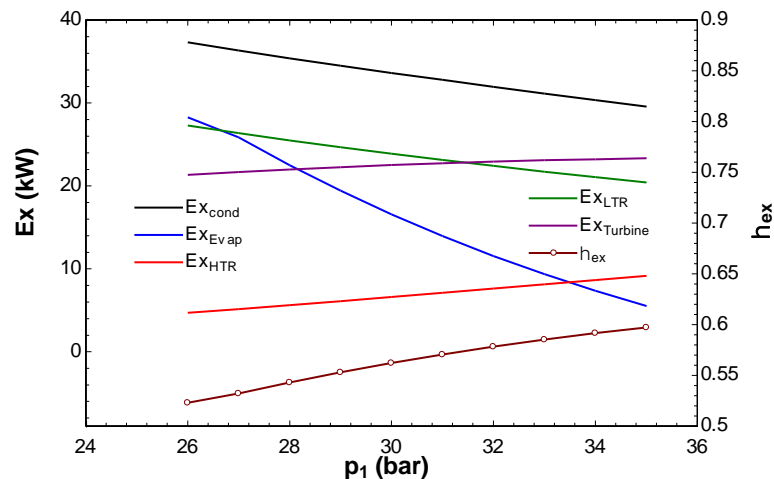


**Hình 7.** Ảnh hưởng của nồng độ dung dịch đặc phá hủy exergy và hiệu suất exergy



**Hình 8.** Ảnh hưởng của áp suất bình bay hơi đến lưu lượng, nồng độ và hiệu suất nhiệt

Ảnh hưởng của áp suất bình bay hơi đến các thông số được khảo sát được trình bày trong hình 8 và 9. Khi áp suất tăng thì các nồng độ hơi và dung dịch đặc đều tăng vì nhiệt độ  $T_1$  được cố định. Cùng nhiệt độ và nồng độ dung dịch bão hòa ra khỏi bình bay hơi thì khi áp suất tăng lượng dung dịch lỏng bão hòa tăng và dung dịch hơi bão hòa giảm như có thể thấy trong hình 8. Lượng hơi giảm do đó công suất bình bay hơi nhỏ làm tăng hiệu suất nhiệt với áp suất. Điều này cũng làm cho phá hủy exergy của bình bay hơi giảm mạnh với áp suất  $p_1$  như có thể thấy trong hình 9. Áp suất tăng làm giảm nhiệt độ các trạng thái 7, 8, 10 và 12 do đó phá hủy exergy của bình ngưng và bình hồi nhiệt 2 giảm. Lưu lượng dung dịch đặc qua bình hồi nhiệt 1 tăng do đó làm tăng phá hủy exergy của bình này với  $p_1$ . Nhiệt độ  $T_4$  giảm nhẹ với áp suất do đó phá hủy exergy của turbine tăng với áp suất  $p_1$ . Sự giảm mạnh các phá hủy exergy làm tăng hiệu suất exergy khi tăng áp suất bình bay hơi.



**Hình 9.** Ảnh hưởng áp suất bình bay hơi đến phá hủy exergy và hiệu suất exergy

#### 4. Kết luận

Phân tích nhiệt động và exergy chu trình Kalina được trình bày trong bài báo này. Các thông số gồm nhiệt độ, áp suất và nồng độ hơi rời bình bay hơi là các biến độc lập để khảo sát ảnh hưởng của chúng đến các hiệu suất nhiệt động. Kết quả nghiên cứu cho thấy nguồn nhiệt nhiệt độ thấp cỡ  $110^\circ\text{C}$  có thể cấp nhiệt cho chu trình Kalina ứng với nhiệt độ điểm pinch là 6.5 K. Hiệu suất nhiệt tăng gấp rưỡi khi nồng độ dung dịch đặc tăng từ 0.55 đến 0.82. Khi tăng các thông số độc lập làm tăng các hiệu suất nhiệt và hiệu suất exergy. Phá hủy exergy của bình ngưng là lớn nhất do lưu lượng lớn của môi chất có nồng độ cao và chênh lệch nhiệt độ trong bình. Khi tăng áp suất bình bay hơi thì phá hủy exergy của bình bay hơi giảm đáng kể. Phá hủy exergy của van, bình tách, bơm và bình hòa trộn là rất bé do đó có thể bỏ qua khi nghiên cứu chu trình Kalina.

**TÀI LIỆU THAM KHẢO**

- [1] M. Aksar, H. Yağlı, Y. Koç, A. Koç, A. Sohani, and R. Yumrutaş, "Why Kalina (Ammonia-Water) cycle rather than steam Rankine cycle and pure ammonia cycle: A comparative and comprehensive case study for a cogeneration system," *Energy Conversion and Management*, vol. 265, p. 115739, 2022.
- [2] A. I. Kalina, "Combined cycle and waste heat recovery power systems based on a novel thermodynamic energy cycle utilizing low-temperature heat for power generation," in *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, 1983, vol. 79368, p. V001T02A003; American Society of Mechanical Engineers.
- [3] P. M. Nguyen, "Energy and exergy estimation for a combined cycle of solid CO<sub>2</sub> production and NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O single effect absorption chiller," *Science and Technology Development Journal*, vol. 19, no. 1, pp. 61-69, 2016.
- [4] A. Elsayed, M. Embaye, R. Al-Dadah, S. Mahmoud, and A. Rezk, "Thermodynamic performance of Kalina cycle system 11 (KCS11): feasibility of using alternative zeotropic mixtures," *International Journal of Low-Carbon Technologies*, vol. 8, no. suppl\_1, pp. i69-i78, 2013.
- [5] R. Akimoto, T. Yamaki, M. Nakaiwa, and K. Matsuda, "Evaluation of a power generation system that integrates multiple Kalina cycles and absorption heat pumps," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 28, p. 101363, 2021.
- [6] N. Roeinfard and A. Moosavi, "Thermodynamic analysis and optimization of the organic Rankine and high-temperature Kalina cycles for recovering the waste heat of a bi-fuel engine," *Fuel*, vol. 322, p. 124174, 2022.
- [7] X. Yang, S. Yang, H. Wang, Z. Yu, Z. Liu, and W. Zhang, "Parametric assessment, multi-objective optimization and advanced exergy analysis of a combined thermal-compressed air energy storage with an ejector-assisted Kalina cycle," *Energy*, vol. 239, p. 122148, 2022.
- [8] X. Li, Q. Zhang, and X. Li, "A Kalina cycle with ejector," *Energy*, vol. 54, pp. 212-219, 2013.
- [9] S. Ogriseck, "Integration of Kalina cycle in a combined heat and power plant, a case study," *Applied Thermal Engineering*, vol. 29, no. 14-15, pp. 2843-2848, 2009.
- [10] H. Hjartarson, "Multiple-use of geothermal energy in Húsavík," *Nordvarme, Concil in Nyköping, Sverige*, 2002.
- [11] [H. Hjartarson, R. Maack, and S. Johannesson, "Húsavík energy multiple use of geothermal energy," *GHC Bull*, vol. 26, no. 2, pp. 7-13, 2005.
- [12] A. Ebrahimi-Moghadam, A. J. Moghadam, M. Farzaneh-Gord, and K. Aliakbari, "Proposal and assessment of a novel combined heat and power system: energy, exergy, environmental and economic analysis," *Energy Conversion and Management*, vol. 204, p. 112307, 2020.
- [13] P. N. Minh, "A Compact EES Program to Predict Axial Temperature Distribution in Triple-fluid Heat Exchanger," *Science & Technology Development Journal-Engineering and Technology*, vol. 3, no. 3, pp. 452-460, 2020.
- [14] L. Cao, J. Wang, H. Wang, P. Zhao, and Y. Dai, "Thermodynamic analysis of a Kalina-based combined cooling and power cycle driven by low-grade heat source," *Applied Thermal Engineering*, vol. 111, pp. 8-19, 2017.



**Nguyen Van Dung** obtained his B.E. in 2010 from Ha Noi University of Industry, Vietnam and his M.E. in 2014 from Ha Noi University of Science and Technology, Vietnam. He is a lecturer at the Industrial University of Ho Chi Minh City, Vietnam. His research interests include agricultural drying, applied informatics, and computational fluid dynamics.



**Doan Thi Hong Hai** obtained her B.E. in 2002 from Nha Trang Fisheries University and her M.E. in 2017 from Ho Chi Minh City University of Technology and Education, Vietnam. She is a lecturer at the Industrial University of Ho Chi Minh City, Vietnam. Her research interests include agricultural drying, design of thermal systems, applied renewable energy, and computational fluid dynamics.



**Tran Van Hung** is a lecturer at the Mechanical Engineering Faculty of Ho Chi Minh City University of Technology. He obtained his B.E, M.E in 1992 and his Ph.D in 2010 from Technical University of Sofia, Bulgaria. His research interests included industrial thermal systems, modeling and simulation of thermal systems, energy efficiency.



**Nguyen Van Hap** obtained his B.E. in 2002 from Nha Trang Fisheries University, his M.E. in 2007 from Ho Chi Minh City University of Technology (HCMUT), Vietnam, and his Ph.D. in 2015 from the University of Ulsan, Korea. He is currently a lecturer at the Mechanical Engineering Faculty of HCMUT. His research interests include computational fluid dynamics for thermal processes and the optimal design of heat exchangers.



**Nguyen Minh Phu** is an Associate Professor at the Industrial University of Ho Chi Minh City, Vietnam. He obtained his B.E. in 2006 and M.E. in 2009 from Ho Chi Minh City University of Technology, VNU-HCM, Vietnam, and his Ph.D. in 2012 from the University of Ulsan, Korea. He was an exchange visitor in the Arizona State University at Tempe during the summer of 2014. His research interests include the design of thermal systems, applied renewable energy, and computational fluid dynamics.