

**XÂY DỰNG MÔ HÌNH HÓA QUÁ TRÌNH TRAO ĐỔI  
NHIỆT- ẨM TRONG THIẾT BỊ CÔ ĐẶC MẬT ONG  
KIỂU CHÂN KHÔNG DẠNG ỐNG PHỐI HỢP PHÁ  
KẾT TINH BẰNG CÔNG NGHỆ SIÊU ÂM CD-1  
ESTABLISHMENT MODELING OF THE HEAT - MOISTURE  
EXCHANGE PROCESS IN VACUUM-TUBULAR HONEY  
CONCENTRATOR DECRYSTALLIZATION USING CD-1  
ULTRASONIC TECHNOLOGY**

ĐẶNG THANH SƠN<sup>1a</sup>, TRỊNH TRUNG DUY<sup>2</sup>, LƯU THỊ KIỀU HƯƠNG<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Sư phạm kỹ thuật Vĩnh Long;

<sup>2</sup>Trường Cao đẳng nghề Vĩnh Long;

<sup>3</sup>Trường Cao đẳng Vĩnh Long

<sup>a</sup>Tác giả liên hệ: [sondt@vlute.edu.vn](mailto:sondt@vlute.edu.vn)

Nhận bài(Received): 25/6/2023; Phản biện (Reviewed): 21/7/2023; Chấp nhận (Accepted): 31/7/2023

### TÓM TẮT

Thiết bị cô đặc mật ong CD-1 được kết cấu theo nguyên lý mới với bộ phận cô đặc dạng ống, bên trong có vành dẫn chất lỏng, phối hợp hút chân không và phá kết tinh mật ong bằng sóng siêu âm. Để giảm thời gian và kinh phí cho việc thiết kế chế tạo thiết bị cô đặc, chúng tôi đã áp dụng phương pháp mô hình hóa và mô phỏng quá trình trao đổi nhiệt ẩm trong buồng cô đặc bằng các hàm toán học dựa trên các định lý về trao đổi nhiệt ẩm giữa dung dịch cô đặc với môi trường mang nhiệt và thu nhiệt, qua đó đã xác định một số thông số về cấu tạo và chế độ cô đặc nhằm định hướng cho việc thiết kế thiết bị cô đặc.

**Từ khóa:** Thiết bị cô đặc mật ong, mô hình toán, mô phỏng, công nghệ siêu âm, trao đổi nhiệt ẩm.

### ABSTRACT

*The CD-1 honey concentrator was structured according to a new principle that includes tubular units and a liquid guide ring, which combines vacuum suction and ultrasonic decrystallization of honey. To reduce the time and cost for the design and manufacture of the concentrator, we have applied the modeling and simulation method of the moisture heat exchange process in the condensing chamber with mathematical functions based on the theory of moisture-heat exchange between the concentrated solution and the heat-carrying and endothermic medium. The model determined several parameters on the structure and mode of concentration to orient the design of the concentrator.*

**Keywords:** Honey concentrator, mathematical model, CD-1 ultrasonic technology, decrystallization, heat - moisture exchange.

## I. ĐẶT VẤN ĐỀ

Quá trình trao đổi nhiệt ẩm trong bộ phận cô đặc mật ong là quá trình trao đổi nhiệt đối lưu có biến đổi pha, trong đó pha lỏng (nước trong dịch mật) biến đổi thành hơi khi sôi. Đây là quá trình trao đổi nhiệt phức tạp giữa môi trường mang nhiệt, môi trường thu nhiệt và vách ngăn giữa chúng. Tuy nhiên, có thể mô phỏng quy luật biến đổi các thông số trong quá trình cô đặc bằng các hàm toán học dựa trên các định luật về trao đổi nhiệt giữa môi trường mang nhiệt và thu nhiệt.

Bài báo trình bày kết quả xây mô hình toán và mô phỏng quá trình trao đổi nhiệt-ẩm trong bộ phận cô đặc của thiết bị cô đặc mật ong CD-1, đưa ra mô hình toán học làm cơ sở cho việc khảo sát các tham số ảnh hưởng đến quá trình cô đặc và lựa chọn được các thông số cơ bản của thiết bị cô đặc nhằm định hướng cho việc tính toán thiết kế.

## II. NỘI DUNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

### 2.1. Nội dung nghiên cứu

- Xây dựng mô hình kết cấu bộ phận cô đặc
- Xây dựng mô hình toán quá trình trao đổi nhiệt-ẩm trong buồng cô đặc
- Mô phỏng quá trình trao đổi nhiệt ẩm trong buồng cô đặc
- Tính toán và lựa chọn các thông số cơ bản của thiết bị cô đặc.

### 2.2. Phương pháp nghiên cứu

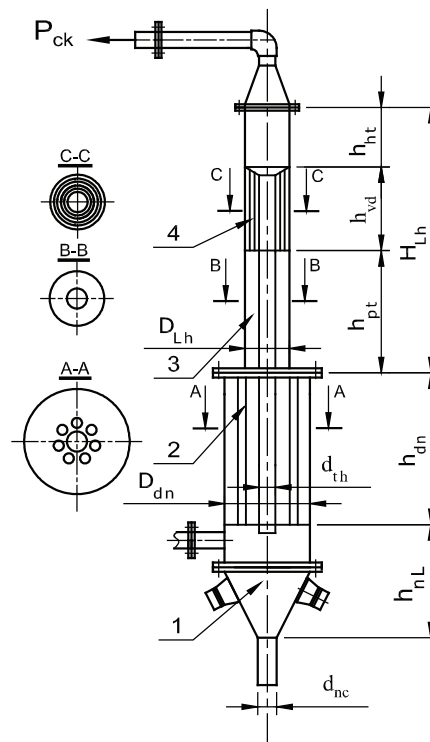
- Áp dụng định luật về trao đổi nhiệt giữa môi trường mang nhiệt và thu nhiệt để xây dựng mô hình toán quá trình trao đổi nhiệt ẩm trong buồng cô đặc bằng hệ phương trình vi phân.
- Mô phỏng quá trình trao đổi nhiệt ẩm bằng phương pháp số theo phương

pháp tích phân hình thang với ngôn ngữ lập trình MathLab.

## III. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

### 3.1. Xây dựng mô hình kết cấu thiết bị cô đặc

Mô hình kết cấu bộ phận cô đặc mật ong trên hình 1. Theo sơ đồ nguyên lý cấu tạo của thiết bị cô đặc đã được thiết kế, để đơn giản trong tính toán thiết kế, bộ phận cô đặc được chia thành 3 buồng chính: buồng nạp liệu, buồng cấp nhiệt và buồng hỗn hợp lỏng-hơi.



Hình 1. Mô hình kết cấu bộ phận cô đặc mật ong CD-1

Buồng nạp liệu có chiều cao  $h_{nL}$ , có nhiệm vụ cấp, tháo liệu và cũng là nơi trung chuyển tuần hoàn dung dịch mật. Buồng nạp liệu được chia thành 2 phần: phần đáy có dạng hình nón cụt, đáy nhỏ  $d_{nc}$ , đáy lớn  $D_{dn}$ , phía ngoài có lắp 9 đầu phát sóng siêu âm để phá kết tinh dung dịch mật. Phần trên có dạng hình trụ có cùng đường kính với đáy lớn nón cụt  $D_{dn}$ .

Buồng cấp nhiệt dạng ống hình trụ có chiều cao  $h_{dn}$ , có đường kính  $D_{dn}$ . Bên trong buồng có 6 ống đun sôi dung dịch mật có đường kính  $d_s$  và một ống tuần hoàn dung dịch mật ở tâm có đường kính  $d_{th}$ . Buồng đun sôi được ngăn cách bởi hai mặt bích. Bao quanh các ống này là nước nóng được gia nhiệt bằng điện trở.

Buồng hỗn hợp lỏng-hơi có dạng hình trụ, chiều cao  $H_{Lh}$ , đường kính  $D_{Lh}$  (nhỏ hơn đường kính buồng gia nhiệt) là nơi phát triển kích thước hạt bột nhờ nhận thêm hơi nước trong dung dịch mật. Phần trên buồng sôi có lắp vành dẫn chất lỏng có chiều cao  $h_{vd}$ , đó là tổ hợp của các ống hình trụ đồng tâm có đường kính  $d_{vd}$  nhỏ dần nhằm tạo ra các khe hẹp hình vành khăn, phá vỡ hạt bột để giải phóng hơi nước và khí trong các hạt bột đồng thời cũng tạo ra nhiều lớp màng mỏng để tăng diện tích bề mặt bốc hơi và tăng tốc độ chuyển động của dung dịch mật trong các khe hẹp theo hướng từ dưới lên trên nhằm tăng động lực của quá trình thoát hơi nước trong dung dịch mật. Bên trong buồng chứa bột có ống tuần hoàn dung dịch mật kéo dài từ buồng gia nhiệt đến hết chiều cao vành dẫn chất lỏng. Theo chiều cao, buồng hỗn hợp lỏng-hơi được chia thành 3 buồng:  $h_{pt}$  là chiều cao buồng phát triển kích thước hạt bột,  $h_{vd}$  là chiều cao buồng phá vỡ bột là nơi có lắp vành dẫn chất lỏng và  $h_{ht}$  là chiều cao buồng phân ly hơi thứ ở trên vành dẫn chất lỏng là nơi tiếp nhận hơi thứ và phân ly dung dịch mật.

Dòng dung dịch mật trong ống đun sôi chuyển động từ dưới lên trên nhờ áp lực hút của bơm chân không. Khi đó nhiệt độ dung dịch mật ở vùng tâm ống nhiệt độ giảm xuống còn lớp dung dịch mật tiếp xúc với vách ống được nung nóng tăng lên rất nhanh tạo nên sự quá nhiệt. Kết quả là tạo ra lớp bột hơi có độ dày nhất định bám xung quanh thành ống. Kích thước hạt bột

tăng dần do nhận thêm hơi nước. Entanpi trung bình của lớp bột tăng lên dọc theo vách ngăn theo hướng dòng chảy từ dưới lên do nhận thêm nhiệt. Khi kích thước hạt bột đủ lớn sẽ tách ly khỏi bề mặt trong của ống đun sôi và đi lên trên ống đun sôi vào buồng phát triển kích thước hạt bột, tiếp tục đi vào khe hẹp của vành dẫn chất lỏng. Tại đây, các hạt bột bị vỡ do kích thước hạt bột lớn hơn nhiều kích thước của khe hẹp, do đó hỗn hợp lỏng-hơi theo khe hẹp của vành dẫn chất lỏng đi vào buồng phân ly hơi thứ (hình 1).

Đồng thời do sức hút của chân không, dung dịch mật bám theo vành trong của các khe hẹp vành khăn đi vào buồng phân ly. Lượng dung dịch mật này có khối lượng riêng lớn hơn nhiều so với hỗn hợp lỏng - hơi nên dưới tác dụng của trọng lượng bản thân sẽ được thu vào ống tuần hoàn, dung dịch mật chuyển động xuống dưới về buồng cấp liệu và lại được đẩy vào ống đun sôi thành vòng tuần hoàn. Hơi thứ tiếp tục đi vào bộ phận phân ly hơi thứ, để thu hồi phần dung dịch mật nhỏ kéo theo hơi thứ, sau đó qua dàn lạnh được ngưng tụ thành dạng lỏng và được định kỳ tháo ra, còn không khí và các khí không ngưng được thải ra môi trường.

### 3.2. Mô hình hoá quá trình trao đổi nhiệt-ẩm trong buồng cô đặc

Mô hình toán được xây dựng dựa trên giả thuyết: Nhiệt độ nước đun nóng trong bộ phận gia nhiệt không đổi theo chiều cao bề mặt ống đun sôi và dòng chảy của chất lỏng trong quá trình chuyển động xem như lý tưởng, Bỏ qua nhiệt phát sinh của bộ phát sóng siêu âm vì lượng nhiệt này quá nhỏ so với nhiệt cung cấp cho quá trình cô đặc.

Trên cơ sở thiết lập phương trình cân bằng vật liệu, phương trình cân bằng nhiệt

và phương trình truyền nhiệt cho một mẻ mật ong đưa vào cô đặc, ta được hệ phương trình vi phân mô tả quá trình trao đổi nhiệt ẩm trong bộ phận cô đặc như sau:

$$W_{ht} = G_{f1} - \frac{b_1 G_{f1}}{b_2} \quad (1a)$$

$$Q_{dn} = G_{f1} c_{f1} (t_{fs} - t_o) \quad (1b)$$

$$\tau_{dn} = \frac{G_{f1} c_{f1}}{k_{dn} F} \ln \frac{t_n - t_o}{t_n - t_{fs}} \quad (1c)$$

$$Q_{bh} = \frac{G_{f1} (i_{ht} - c_n t_{fs}) (b_2 - b_1)}{b_2} \quad (1d)$$

$$dQ = k_{bh} F (t_w - t_{fs}) dt \quad (1e)$$

Trong đó:

$W_{ht}$  - lượng hơi thứ (kg);  $G_{f1}$  - lượng dung dịch ban đầu (kg);  $b_1, b, b_2$  - nồng độ dung dịch đầu, giữa và cuối;  $Q_{dn}$  - nhiệt lượng cần thiết cho quá trình đun nóng (kJ);  $Q_{bh}$  - nhiệt lượng cần thiết cho quá trình bay hơi (kJ);  $Q$  - nhiệt lượng cần thiết cho quá trình cô đặc  $Q = Q_{dn} + Q_{bh}$ ;  $t$  - thời gian cô đặc (s);  $t_{dn}$  - thời gian đun nóng (s);  $c_{f1}$  - nhiệt dung riêng của dung dịch ban đầu, kJ/kg.°C;  $t_{fs}, t_o$  và  $t_n$  - nhiệt độ sôi của dung dịch, nhiệt độ môi trường và nhiệt độ nước nóng, °C;  $k_{dn}$  - hệ số truyền nhiệt ở giai đoạn đun nóng, W/m<sup>2</sup>.°C;  $F$  - diện tích bề mặt trao đổi nhiệt giữa nước nóng và dung dịch, m<sup>2</sup>;  $c_p$  - nhiệt dung riêng của dung dịch kJ/kg.°C;  $k_{bh}$  - hệ số truyền nhiệt ở giai đoạn bay hơi, W/m<sup>2</sup>.°C;  $t_w$  - nhiệt độ của vách ống, °C. Các hệ số trên có thể là

hằng số hoặc có thể là hàm của các thông số trạng thái  $W_{ht}, Q_{dn}, \tau_{dn}, Q_{bh}, Q$  và được xác định (Đặng Thanh Sơn, 2022).

Hệ phương trình (1) mô tả trạng thái quá trình trao đổi nhiệt ẩm trong buồng cô đặc gồm 5 phương trình, trong đó: phương trình (1a) biểu diễn mối qua hệ giữa lượng ẩm bốc hơi theo nồng độ dung dịch  $W_{ht} = f(b)$ , phương trình (1b) biểu diễn mối quan hệ giữa nhiệt lượng tiêu hao cho quá trình đun nóng dung dịch từ nhiệt độ môi trường đến nhiệt độ sôi  $Q_{dn} = f(b_1)$ ; phương trình (1c) biểu diễn mối quan hệ giữa thời gian đun nóng và nhiệt độ sôi  $\tau = f(t_{fs})$ ; phương trình (1d) biểu diễn mối quan hệ giữa nhiệt lượng tiêu thụ để bay hơi nước trong quá trình cô đặc  $Q_{bh} = f(b)$  và phương trình (1e) biểu diễn mối quan hệ giữa nhiệt lượng nguồn nhiệt cấp theo thời gian  $Q = f(\tau)$ .

### 3.3. Thuật toán giải phương trình vi phân

#### a. Lựa chọn chế độ mô phỏng

Hàm dưới dấu tích phân của phương trình vi phân (1e) là một hàm quan hệ rất phức tạp với biến  $k_{bh}, t_{fs}$  và không thể xây dựng được dạng hàm liên tục. Để tìm các mối quan hệ này, có thể tính toán theo nhiều phương án (Лебедев, 1972), sau đó giải gần đúng tích phân (1e) theo phương pháp số với sự hỗ trợ của máy tính. Ở đây, chúng tôi sử dụng phương pháp tích phân hình thang với thông số đầu vào cho trong bảng 1.

Bảng 1. Thông số vào của chế độ tính toán

Chế độ mô phỏng	Giai đoạn đun nóng dung dịch mật	Giai đoạn bay hơi nước trong dung dịch mật
Nồng độ dung dịch mật đầu $b_1$ (kg/kg.dd)	0,74	0,74
Nồng độ dung dịch mật cuối $b_2$ (kg/kg.dd)	0,74	0,82
Nhiệt độ sôi của nước trong dung dịch mật $t_{sn}$ (°C)	20 ÷ 40	40
Áp suất chân không $p_{ck}$ (bar)	1,0	0,073
Nhiệt độ của nước nóng $t_n$ (°C)	90	20
Nhiệt độ của môi trường $t_o$ (°C)	90	20

Trong bảng 1, giai đoạn đầu đun nóng dung dịch mật từ nhiệt độ môi trường đến nhiệt độ sôi ứng với nồng độ dung dịch 74% và giai đoạn thứ hai bay hơi nước trong dung dịch mật ứng với nồng độ dung dịch mật tăng 74% đến 82%.

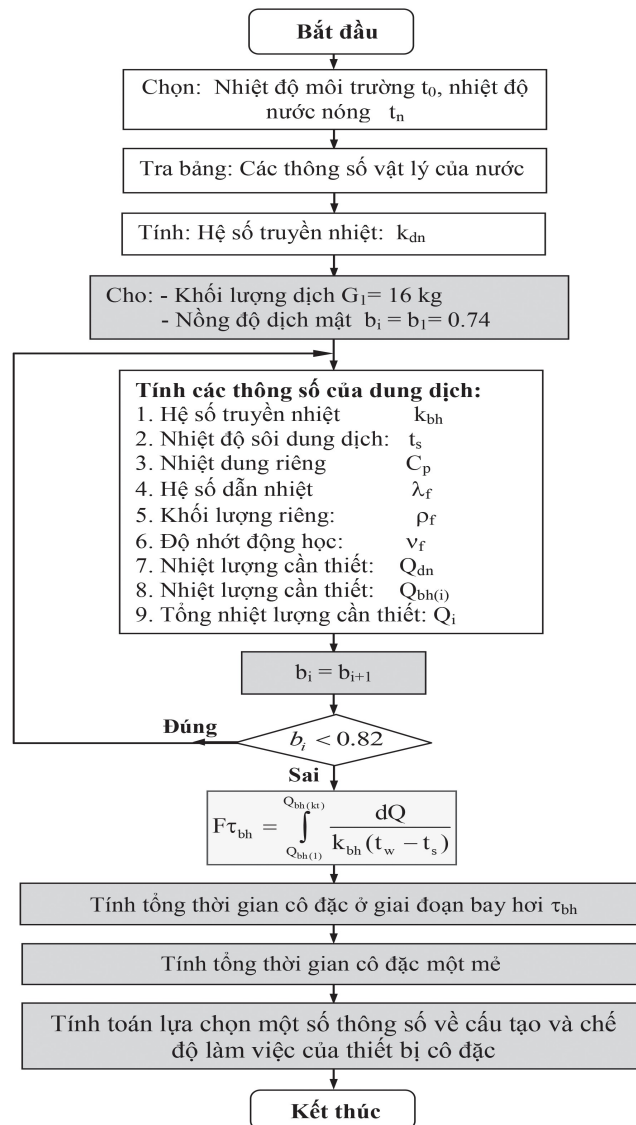
Do nhiệt lượng bay hơi theo hệ phương trình phụ thuộc vào nồng độ dung dịch nên được chia khoảng biến thiên nồng độ dung dịch từ nồng độ đầu  $b_1=74\%$  và cuối  $b_2=82\%$  theo các giai đoạn như trong bảng 2.

Bảng 2. Phân phối nồng độ dung dịch theo giai đoạn

Nồng độ dung dịch b (%)	74	76	78	80	82
Lượng ẩm bốc hơi $W_{ht}$ (kg)	0	0,42	0,83	1,2	1,56
Khối lượng dung dịch cuối $G_2$ (kg)	16	15,58	15,17	14,8	14,44

Như vậy, mối quan hệ giữa  $Q=f(b)$  ứng với giá trị b trong bảng 2 là hàm rời rạc. Thuật toán giải phương trình vi phân

hàm rời rạc Lưu đồ thuật giải quá trình tính toán các thông số trên hình 2.



Hình 2. Lưu đồ thuật giải tính toán các thông số

### c. Kết quả giải hệ phương trình vi phân

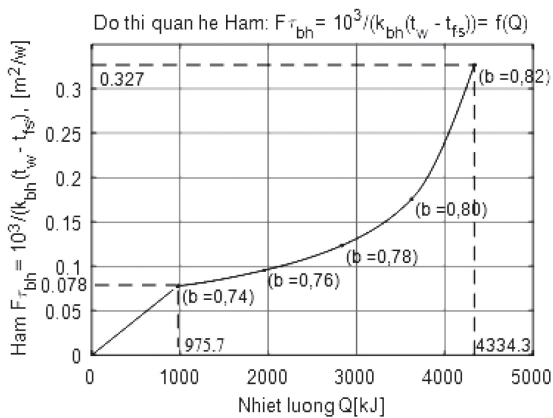
Kết quả tính toán các thông số chính theo lưu đồ thuật giải (hình 2) được ghi trong bảng 3 và phụ lục 1.

Bảng 3. Xác định giá trị các thông số theo nồng độ dung dịch

Ký hiệu	Đơn vị	Nhiệt độ khảo sát	Các giá trị				
b	%	20	74	76	78	80	82
$t_n$	$^{\circ}\text{C}$	90	90	90	90	90	90
$t_{fs}$	$^{\circ}\text{C}$	46,64	46,64	47,25	47,91	48,62	49,40
$k_{bh}$	$\text{W}/\text{m}^2.\text{C}$	-	253,37	249,9	241,32	221,531	182,56
$Q_{dn}$	$\text{kJ}$	-	975,66	975,66	975,66	975,66	975,66
$Q_{bh}$	$\text{kJ}$	-	0	979,56	1857,43	2648,35	3358,62
Q	$\text{kJ}$	-	975,66	1955,22	2833,1	3624,01	4334,28

Theo số liệu ở bảng 3 và phụ lục 1 (Đặng Thanh Sơn, 2022), đã xác định được giá trị tích phân cho giai đoạn bay hơi theo công thức:

$$F\tau_{bh} = \int_{975,66}^{4334,28} \frac{dQ}{k_{bh}(t_w - t_{fs})} \quad (2)$$



Hình 3. Đồ thị hàm  $F\tau_{bh} = f(Q)$

Đồ thị hình 3 biểu diễn mối quan hệ giữa hàm  $F(\tau)$  và nhiệt lượng  $Q$  gồm 2 giai đoạn:

Giai đoạn đun nóng dung dịch mật từ nhiệt độ môi trường đến nhiệt độ sôi. Ở giai

đoạn này nồng độ dung dịch không thay đổi và bằng nồng độ dung dịch đầu  $b=0,74$  do lượng nước trong dung dịch mật bay hơi không đáng kể. Nhiệt lượng tiêu hao để đun nóng tăng từ 0 đến 975,66 kJ theo quan hệ tuyến tính.

Giai đoạn bay hơi dung dịch mật từ nồng độ đầu  $b=0,74\%$  đến nồng độ cuối theo yêu cầu  $b=0,82\%$ . Nhiệt lượng tiêu hao để bay hơi dung dịch tăng từ 975,66 kJ đến 4334,28 kJ theo quan hệ phi tuyến. Giá trị lớn nhất của tích phân tính được  $(\tau F)_{\max}$  ứng với nồng độ  $b=0,82\%$  là 0,327 ( $\text{m}^2/\text{W}$ ).

Từ đó, ta xác định được thời gian cần thiết cho giai đoạn bay hơi:

$$\tau_{bh} = \frac{(\tau F)_{\max}}{F} = 66,5 \text{ phút} \quad (3)$$

Trên cơ sở kết quả tính toán nhiệt lượng và thời gian bay hơi cần thiết đã tính ở trên, chúng tôi đã xác định được giá trị của một số thông số chính về cấu tạo và chế độ làm việc của thiết bị cô đặc trong bảng 4.

Bảng 4. Các thông số chính về cấu tạo và chế độ làm việc của thiết bị cô đặc

Các thông số tính toán	Ký hiệu	Đơn vị	Giá trị
Hệ số tuần hoàn tự nhiên của dung dịch mật	K	vòng	26
Thời gian chuyển động của dung dịch mật trong một vòng tuần hoàn	$\tau_{th}$	phút	2,56
Lượng hơi thứ cần bay hơi trung bình trong một vòng tuần hoàn	$W_{th}$	kg/vòng	0,06
Chiều cao buồng tách hơi thứ	$H_{lh}$	m	1,7
Lượng nước nóng cần thiết để đun sôi dung dịch mật	$G_n$	kg	28

### KẾT LUẬN

1. Mô hình toán học và chương trình tính toán mô phỏng đã xác định được mối quan hệ nhiệt lượng cần thiết của quá trình cô đặc với nhiệt độ, nồng độ dịch mật và thời gian cô đặc làm cơ sở khoa học để tính toán các thông số về cấu tạo và chế độ làm việc của thiết bị cô đặc.

2. Kết quả tính toán mô phỏng đã xác định được các thông số chính ảnh hưởng đến quá trình cô đặc như: thời gian bay hơi nước trong dung dịch mật từ nồng độ ban

đầu  $b=74\%$  đến  $b=82\%$  là  $\tau_{bh}=66,5$  phút, nhiệt lượng tiêu hao trong quá trình bay hơi là  $Q=4434,28$  kJ, hệ số tuần hoàn tự nhiên của dịch mật trong bộ phận cô đặc là  $K=26$ , lượng hơi thứ bay hơi trung bình trong một vòng tuần hoàn là  $W_{th}=0,06$  kg/vòng, chiều cao buồng lỏng hơi là  $H_{lh}=1,7$ m và lượng nước cần thiết để đun nóng dịch mật trong quá trình cô đặc là  $G_n=28$ kg. Đây là các thông số quan trọng làm cơ sở để định hướng ban đầu cho việc thiết kế và chế tạo thiết bị cô đặc.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Đặng Thanh Sơn, Trần Như Khuyên & Nguyễn Thanh Hải (2020). Nghiên cứu một số thông số của thiết bị cô đặc mật ong kiểu chân không có vành dẫn chất lỏng phối hợp phá kết tinh bằng sóng siêu âm. Tạp chí Khoa học Nông nghiệp Việt Nam. 18(12): 1182-1191.
- [2]. Đặng Thanh Sơn, Trần Như Khuyên & Nguyễn Thanh Hải (2022). Ứng dụng qui hoạch thực nghiệm trong nghiên cứu Thiết bị cô đặc mật ong kiểu chân không dạng ống có vành dẫn chất lỏng phối hợp phá kết tinh bằng sóng siêu âm CĐ-1. Tạp chí Nông nghiệp và Phát triển Nông thôn. (1): 44-53.
- [3]. Đặng Thanh Sơn (2022). Nghiên cứu một số thông số kỹ thuật của thiết bị cô đặc mật ong kiểu chân không dạng ống phối hợp công nghệ siêu âm. Luận án Tiến sĩ. Nhà xuất bản Học viện Nông nghiệp Việt Nam.
- [4]. Nguyễn Công Hiền & Nguyễn Phạm Thục Anh (2006). Mô hình hóa hệ thống và mô phỏng. Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật Hà Nội.
- [5]. Лебедев П.Д. (1972). Теплообменные, сушильные и холодильные установки. Москва: Издательство Энергия.