

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC NÔNG LÂM TP. HCM

PHẠM VĂN TOẢN

NGHIÊN CỨU KỸ THUẬT SẤY MỰC ÓNG

Chuyên ngành: Kỹ thuật Cơ khí

Mã số: 9.52.01.03

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

Người hướng dẫn khoa học:

PGS.TS. LÊ ANH ĐỨC

GS.TS. NGUYỄN HAY

TP. HCM - Năm 2019

LỜI CAM ĐOAN

Tôi cam đoan đây là công trình nghiên cứu của tôi.

Các số liệu, kết quả nêu trong luận án là trung thực và chưa từng được ai công bố trong bất kỳ công trình nào khác.

Nếu sai tôi sẽ chịu mọi hình thức kỷ luật theo quy định.

Nghiên cứu sinh

Phạm Văn Toàn

TÓM TẮT

- Đề tài: Nghiên cứu kỹ thuật sấy mực ống
- Tác giả: Phạm Văn Toàn
- Chuyên ngành: Kỹ thuật cơ khí Mã số: 9.52.01.03

Mục tiêu của luận án là nghiên cứu ảnh hưởng của bức xạ hồng ngoại đến quá trình sấy cũng như chất lượng của mực ống khi sấy bằng phương pháp sấy bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại, thông qua việc xây dựng mô hình toán để mô phỏng truyền nhiệt truyền ẩm và thực nghiệm xác định chế độ sấy cho mực ống.

Để giải quyết mục tiêu nghiên cứu của luận án đã kế thừa các kết quả nghiên cứu lý thuyết của các tác giả trong lĩnh vực truyền nhiệt truyền ẩm về sấy mực và các vật liệu nhạy nhiệt khác; ứng dụng lý thuyết toán học, vật lý để xây dựng mô hình vật lý, toán học mô tả bản chất truyền nhiệt truyền ẩm trong vật liệu ẩm; ứng dụng phương pháp sai phân hữu hạn để giải và tìm nghiệm của mô hình toán truyền nhiệt truyền ẩm, sử dụng phương pháp thực nghiệm để xác định các thông số nhiệt vật lý của mực ống và kiểm chứng lý thuyết.

Kết quả nghiên cứu của luận án đã thực hiện được các nội dung cụ thể như sau:

Bằng thực nghiệm xác định được các thông số nhiệt vật lý của mực ống ở Việt Nam phụ thuộc theo độ ẩm của vật liệu sấy, các thông số này gồm:

- Nhiệt dung riêng của mực ống;

$$C_p = 3,113 + 0,006.\omega \quad (R^2 = 0,968)$$

- Khối lượng riêng của mực ống;

$$\rho_p = 2059 - 71\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right) - 736\exp\left(0,247\frac{\omega}{\omega_0}\right) \quad (R^2 = 0,976)$$

- Độ ẩm cân bằng của mực ống;

$$\omega_e = [\exp(-1,383 - 0,029.T)]^{1/1,267} (-\ln \varphi)^{-1/1,267}$$

- Hệ số khuếch tán ẩm;

$$D_m(T) = 2,521.10^{-3} \exp\left[-\frac{42810,909}{8,314.(T + 273,15)}\right]$$

- Thông số nhiệt ẩn hóa hơi của mực ống.

$$\frac{h_{fg}}{h_{fgo}} = 1 + 0,5549 \exp(-2,3115 \cdot \omega)$$

Lựa chọn được phương pháp sấy mực ống bằng thiết bị sấy bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại. Xây dựng được mô hình toán biểu diễn quá trình truyền nhiệt truyền ẩm trong quá trình sấy mực ống bằng phương pháp sấy bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại có xét đến ảnh hưởng của độ ẩm đến hiện tượng dẫn nhiệt.

Hệ phương trình truyền nhiệt truyền ẩm được giải đồng thời bằng phương pháp sai phân hữu hạn. Kết quả thực nghiệm cho thấy phân bố nhiệt độ, độ chứa ẩm, tốc độ sấy được tính từ mô hình toán xây dựng có biên dạng và xu hướng phù hợp với diễn biến thực tế khi tiến hành thực nghiệm, sai số về độ chứa ẩm trung bình lớn nhất khi sấy bằng phương pháp bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại là 12,3%.

Bằng phương pháp quy hoạch thực nghiệm đã xác định được mô hình hồi qui biểu diễn sự phụ thuộc giữa thời gian sấy, hàm lượng NH₃ và ứng suất cắt với nhiệt độ, vận tốc và công suất nguồn phát hồng ngoại.

Xác định được các thông số công nghệ phù hợp cho quá trình sấy nhằm đảm bảo chất lượng với các giá trị cụ thể như: Nhiệt độ T_a = 46,5°C, vận tốc v = 1,1 m/s và công suất hồng ngoại P = 528 W.

SUMMARY

- Doctoral dissertation title: Study on squid drying technique
- PhD Student: Pham Van Toan
- Major: Mechanical Engineering Code no.: 9.52.01.03

The aim of this dissertation is to study the effect of infrared radiation on the drying process as well as the quality of squid by heat pump drying method combined with infrared radiation; thereby developing a mathematical model to simulate moisture and heat transfer and determining experimentally the drying mode for squid.

By inheriting results from researches in the field of heat and mass transfer on drying squid and other heat sensitive materials and applying mathematical and physical theories, a mathematical model describing the heat and mass transfer in the squid during drying process has been developed. The finite difference method and the invertible matrix theorem were then employed to solve the heat and mass transfer equations of the model. Additionally, a set of experiments has been conducted to determine thermo-physical properties of the squid and to verify the numerical results.

The main results are as follows:

The thermo-physical properties of the squid in Vietnam has been determined and expressed as functions of moisture content of the squid and that of environment.

- Specific heat: $C_p = 3,113 + 0,006.\omega$ ($R^2 = 0,968$)

- Density: $\rho_p = 2059 - 71\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right) - 736 \exp\left(0,247 \frac{\omega}{\omega_0}\right)$ ($R^2 = 0,976$)

- Equilibrium moisture content: $\omega_e = [\exp(-1,383 - 0,029.T)]^{1/1,267} (-\ln \phi)^{-1/1,267}$

- Effective diffusivity: $D_m(T) = 2,521.10^{-3} \exp\left[-\frac{42810,909}{8,314.(T + 273,15)}\right]$

- Specific latent heat of vaporization: $\frac{h_{fg}}{h_{fgo}} = 1 + 0,5549 \exp(-2,3115.\omega)$

Infrared assisted heat pump drying has been found to be suitable for drying the squid and a mathematical model describing the heat and mass transfer in the material

during the drying process considering the influence of moisture transfer on heat transfer has been developed and numerically solved.

Experimental results of temperature distribution inside the squid, moisture content of the squid and drying rate has been consistent with those of the numerical results. The maximum error of average moisture content between the results was 12.3%.

Using the experimental design method, a regression model represented the dependence of output parameters such as drying time, NH_3 content, and shear stress on input parameters like drying temperature, air velocity, and infrared emission power has been built. Furthermore, a suitable drying mode ensuring the product quality and economic efficiency has been determined with a set of parameter values such as drying temperature $T_a = 46,5^\circ\text{C}$, air velocity $v = 1,1 \text{ m/s}$, and infrared emission power $P = 528 \text{ W}$.

MỤC LỤC

MỞ ĐẦU	1
Chương 1. TỔNG QUAN	4
1.1. Tổng quan về mực ống	4
1.1.1. Nguồn lợi và đặc điểm hình thái.....	4
1.1.2. Thành phần hóa học của mực	4
1.1.3. Xử lý và bảo quản mực ống.....	5
1.1.4. Tiêu chuẩn chất lượng mực ống	6
1.2. Cơ chế truyền nhiệt bức xạ hồng ngoại	7
1.3. Tình hình nghiên cứu trong, ngoài nước về sấy hải sản và hệ thống sấy hồng ngoại.....	9
1.3.1. Tình hình nghiên cứu ngoài nước	9
1.3.2. Tình hình nghiên cứu trong nước	14
1.4. Thực trạng sấy mực ống tại các cơ sở sản xuất	16
1.4.1. Phương pháp phơi nắng	16
1.4.2. Phương pháp sấy không khí nóng.....	17
1.4.3. Phương pháp sấy bơm nhiệt	17
1.4.4. Phương pháp sấy vi sóng	17
1.5. Thảo luận	18
1.6. Kết luận chương 1.....	19
Chương 2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU.....	20
2.1. Vật liệu nghiên cứu.....	20
2.2. Phương pháp nghiên cứu lý thuyết	20
2.3. Phương pháp xác định các thông số nhiệt vật lý của mực.....	21
2.3.1. Xác định khối lượng riêng	21
2.3.2. Xác định nhiệt dung riêng.....	22
2.3.3. Xác định hệ số dẫn nhiệt.....	22
2.4. Phương pháp xác định độ ẩm cân bằng của mực	22
2.5. Phương pháp xác định nhiệt ẩn hóa hơi của ẩm trong vật liệu mực ống.....	22

2.6. Phương pháp nghiên cứu thực nghiệm kiểm chứng lý thuyết và xây dựng chế độ sấy.....	23
2.6.1. Phương pháp quy hoạch thực nghiệm	23
2.6.1.1. Xác định các thông số nghiên cứu.....	23
2.6.1.2. Lập ma trận thí nghiệm.....	26
2.6.1.3. Xây dựng mô hình hồi quy thực nghiệm	27
2.6.1.4. Đánh giá độ chính xác của mô hình hồi quy	27
2.6.2. Phương pháp tối ưu hóa mô hình.....	28
2.6.3. Thiết bị thực nghiệm.....	28
2.6.4. Thiết bị đo.....	30
2.6.5. Phương pháp đo các thông số	31
2.6.6. Phương pháp xác định các thông số	33
2.7. Phương pháp đánh giá chất lượng của mực.....	34
2.8. Kết luận chương 2.....	35
Chương 336 KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU LÝ THUYẾT TRUYỀN NHIỆT TRUYỀN ẨM TRONG SẤY MỰC ỚNG	36
3.1. Kết quả xác định các thông số nhiệt vật lý của mực	36
3.1.1. Xác định khối lượng riêng của mực	36
3.1.2. Xác định nhiệt dung riêng của mực	38
3.2. Kết quả xác định độ ẩm cân bằng của mực	40
3.3. Kết quả xác định nhiệt ẩn hóa hơi của mực.....	47
3.4. Kết quả xác định hệ số khuếch tán ẩm	49
3.5. Kết quả xây dựng mô hình toán truyền nhiệt truyền ẩm	51
3.5.1. Xây dựng mô hình toán	51
3.5.2. Xác định năng lượng của bộ phát hồng ngoại (IFR)	57
3.5.2.1. Yếu tố vị trí.....	57
3.5.2.2. Sự phân bố năng lượng do bức xạ đến bề mặt vật liệu sấy	58
3.5.2.3. Năng lượng hấp thụ	59
3.5.3. Xác định hệ số trao đổi nhiệt đối lưu h_c và hệ số trao đổi chất đối lưu h_m	59

3.6. Kết quả giải hệ phương trình truyền nhiệt truyền ẩm.....	61
3.6.1. Thiết lập hệ phương trình sai phân và thuật toán giải	62
3.6.1.1. Phương trình sai phân truyền nhiệt.....	62
3.6.1.2. Hệ phương trình sai phân truyền ẩm	64
3.6.2. Kiểm chứng mô hình lý thuyết với các nghiên cứu về sấy mực đã công bố.....	71
3.6.3. Động lực học quá trình sấy	75
3.6.3.1. Đường cong sấy	75
3.6.3.2. Đường cong nhiệt độ sấy	76
3.6.3.3. Đường cong tốc độ sấy	77
3.7. Kết luận chương 3.....	79
Chương 4. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM KIỂM CHỨNG LÝ THUYẾT VÀ XÁC ĐỊNH CHẾ ĐỘ SẤY	80
4.1. Chuẩn bị nguyên liệu	80
4.2. Kiểm chứng mô hình lý thuyết với kết quả thực nghiệm tại các mức nhiệt độ khác nhau.....	81
4.2.1. Kiểm chứng mô hình lý thuyết với kết quả thực nghiệm theo nhiệt độ vật liệu sấy.....	82
4.2.2. Kiểm chứng mô hình lý thuyết với kết quả thực nghiệm theo quá trình giảm ẩm	83
4.2.2.1. Tại mức nhiệt độ 40°C.....	83
4.2.2.2. Tại mức nhiệt độ 45°C.....	85
4.2.2.3. Tại mức nhiệt độ 50°C.....	87
4.3. Kiểm chứng mô hình lý thuyết với kết quả thực nghiệm tại các mức công suất khác nhau.....	90
4.4. Nhận xét.....	93
4.5. Quy hoạch thực nghiệm.....	94
4.5.1. Phát biểu bài toán hộp đen.....	94
4.5.2. Xác định vùng nghiên cứu	94

4.5.3. Kế hoạch thực nghiệm bậc I	95
4.5.3.1. Lập ma trận thực nghiệm	95
4.5.3.2. Kết quả thực nghiệm và xử lý kết quả thực nghiệm	95
4.5.3.3. Phân tích kết quả thực nghiệm.....	98
4.5.4. Kế hoạch thực nghiệm bậc II.....	98
4.5.4.1. Lập ma trận thực nghiệm	98
4.5.4.2. Kết quả thực nghiệm và xử lý kết quả thực nghiệm	99
4.5.4.3. Phân tích kết quả thực nghiệm.....	103
4.5.5. Xác định các thông số và chỉ tiêu phù hợp cho thiết bị sấy mực ống bằng phương pháp bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại	106
4.5.5.1. Xác định các thông số chỉ tiêu phù hợp.....	106
4.5.5.2. Kết quả giải bài toán	107
4.6. Thực nghiệm so sánh đường cong chế độ sấy phù hợp.....	108
4.7. Kết luận chương 4.....	110
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ	112
KẾT LUẬN	112
KIẾN NGHỊ	113
TÀI LIỆU THAM KHẢO	114

KÝ HIỆU CHỮ VIẾT TẮT THEO MẪU TỰ LATIN

Ký hiệu	Ý Nghĩa	Đơn vị
A	Diện tích vật liệu sấy	m ²
a	Độ hấp thụ	
A _h	Diện tích buồng sấy	m ²
A _{sq}	Diện tích mực sấy	m ²
C _p	Nhiệt dung riêng của VLS	kJ/(kgK)
c ₀	Tốc độ ánh sáng	km/s
C _{pw}	Nhiệt dung riêng của mẫu nước	kJ/(kgK)
C _a	Nhiệt dung riêng của không khí ẩm	J/(kgK)
D	Khoảng cách từ VLS đến nguồn phát hồng ngoại	m
D _m	Hệ số khuếch tán ẩm	m ² /s
D _a	Hệ số khuếch tán ẩm của hơi nước vào không khí	m ² /s
F _t	Tiêu chuẩn Fisher	
F	Giá trị phương sai chuẩn F	
F _{ij}	Hệ số góc giữa các bề mặt i và j.	
F _{H-C}	Tỷ lệ năng lượng từ bề mặt nguồn đến bề mặt buồng sấy	
F _{H-SQ}	Tỷ lệ năng lượng từ bề mặt nguồn đến bề mặt VLS	
F _{SQ-C}	Tỷ lệ năng lượng từ bề mặt mực đến bề mặt buồng sấy	
h	Hằng số Planck	
h _c	Hệ số trao đổi nhiệt đối lưu	W/(m ² K)
h _m	Hệ số trao đổi chất đối lưu	m/s
h _{fg}	Hệ số nhiệt ẩn hóa hơi của nước trong vật liệu	kJ/kg
h _{fgo}	Hệ số nhiệt ẩn hóa hơi của nước tự do	kJ/kg
k _p	Hệ số dẫn nhiệt của mực	W/(m.K)
k _a	Hệ số dẫn nhiệt của không khí ẩm	W/(m.K)
k	Số yếu tố nghiên cứu đầu vào của bài toán	Không
k	Hệ số góc	Không
L	Chiều dài vật liệu sấy	m
M ₁	Khối lượng của bình định mức, toluene và mẫu mực	g

M_2	Khối lượng bình định mức	g
M_p	Khối lượng mẫu mực	g
M_0	Độ chứa ẩm ban đầu của mực	kg ẩm/kg VLK
M	Độ chứa ẩm của VLS	kg ẩm/kg VLK
M_e	Độ chứa ẩm cân bằng của VLS	kg ẩm/kg VLK
M_s	Độ chứa ẩm lớp bề mặt của VLS	kg ẩm/kg VLK
M_{tb}^m	Độ chứa ẩm trung bình thể tích mực sấy tại thời điểm “m”	kg ẩm/kg VLK
M_i'	Độ chứa ẩm của mực tại thời gian t và vị trí i	kg ẩm/kg VLK
m_s	Khối lượng của mẫu mực	g
m_w	Khối lượng của mẫu nước	g
m_c	Khối lượng của bình chứa ẩm	g
m_{eq}	Khối lượng của mẫu tại trạng thái đạt ẩm độ cân bằng	g
m_a	Khối lượng khô của mẫu	g
P	Công suất nguồn phát hồng ngoại	W
P_{tb}	Sai lệch về độ chứa ẩm trung bình	%
Pr	Tiêu chuẩn đồng dạng Prandtl	
P_s	Áp suất bay hơi bão hòa	kPa
P_v	Áp suất bay hơi	kPa
N	Số lượng thí nghiệm	
NH_3	Hàm lượng khí amoniac	% mg
Nu	Tiêu chuẩn đồng dạng Nusselt	
U_{sC}	Ứng suất cắt	N/m ²
n_0	Số lượng thí nghiệm lặp lại ở mức cơ sở	
Q_{IFR}	Năng lượng hấp thụ từ bức xạ hồng ngoại	W
$Q_{IFR,i}^a$	Năng lượng hấp thụ từ bức xạ hồng ngoại tại lớp thứ i của vật liệu sấy.	W
Q_r	Năng lượng bức xạ từ nguồn đến bề mặt VLS	W

Q	Nhiệt lượng do trao đổi nhiệt đối lưu giữa môi trường và VLS	W
Q_e	Nhiệt lượng cần thiết để nước trên bề mặt vật liệu biến thành hơi	W
Q_u	Độ biến thiên nội năng của phân tử thay đổi một lượng trong	W
Q_x	Nhiệt lượng vào phân tử tại vị trí x	W
Q_{x+dx}	Nhiệt lượng ra của phân tử tại vị trí x+dx	W
q_{IFR}^s	Năng lượng bức xạ hấp thụ qua bề mặt	W/m ²
q_{IFR}	Năng lượng bức xạ hấp thụ trên một đơn vị thể tích	W/m ³
R	Hằng số chất khí	kJ/(kmol.K)
Re _L	Hệ số Reynold	
R ²	Hệ số tương quan	%
RMSE	Sai số bình phương trung bình	
r	Độ phản xạ	
Sh	Tiêu chuẩn Shewood	
Sc	Tiêu chuẩn đồng dạng Schmidt	
T _a	Nhiệt độ của TNS	°C
T _s	Nhiệt độ bề mặt của VLS	°C
T_{tb}^m	Nhiệt độ trung bình theo thể tích mực sấy tại thời điểm “m”	°C
t	Thời gian sấy	s
t _e	Nhiệt độ cân bằng của hỗn hợp	°C
t ₀	Nhiệt độ của nước và bộ giữ ẩm	°C
t _{os}	Nhiệt độ ban đầu của mẫu mực	°C
V _p	Thể tích	m ³
V _f	Thể tích của bình định mức	ml
V _i '	Thể tích của mực tại thời gian t và vị trí i	m ³
V _{TN}	Giá trị thí nghiệm	

V_{LT}	Giá trị lý thuyết	
v	Vận tốc TNS	m/s
W_1	Chiều rộng bộ nguồn hồng ngoại	m
W_2	Chiều dài bộ nguồn hồng ngoại	m

KÝ HIỆU CHỮ VIẾT TẮT THEO MẪU TỰ HY LẠP

Ký hiệu	Ý Nghĩa	Đơn vị
ρ_{to}	Khối lượng riêng của toluene	kg/m ³
ρ_p	Khối lượng riêng của mực ống	kg/m ³
ρ_a	Khối lượng riêng không khí	kg/m ³
ρ_k	Khối lượng riêng của vật liệu khô	kg/m ³
ε	Hệ số phát xạ	
ε_H	Hệ số độ phát xạ của vật liệu buồng sấy	
ε_{sq}	Hệ số độ phát xạ của mực ống	
τ	Độ trong suốt	
φ_a	Độ ẩm tương đối của TNS	%
φ	Độ ẩm tương đối của môi trường	%
μ_a	Độ nhớt động lực học	kg/ms
σ	Hằng số Stefan-Boltzmann	W/m ² K ⁴
δ	Nửa chiều dày vật liệu sấy	
ω	Độ ẩm tương đối của VLS	%
ω_0	Độ ẩm tương đối ban đầu của VLS	%
ω_e	Độ ẩm cân bằng của mực ống	%
λ	Bước sóng	μm
χ^2	Phân bố chi bình phương	
α	Hệ số hấp thụ	m ⁻¹
ΔH	Năng lượng hoạt động	kJ/mol

DANH MỤC CHỮ VIẾT TẮT

CHỮ VIẾT TẮT	Ý Nghĩa
MSLf	Phương sai không tương thích
MSLp	Phương sai ngẫu nhiên
TBS	Thiết bị sấy
TNS	Tác nhân sấy
TNTA	Truyền nhiệt truyền ẩm
TGS	Thời gian sấy
QTS	Quá trình sấy
VL	Vật liệu
VLA	Vật liệu ẩm
VLK	Vật liệu khô
VLS	Vật liệu sấy
CBT	Cảm biến nhiệt độ
CBA	Cảm biến đo độ ẩm
BN	Bơm nhiệt
HN	Hồng ngoại

DANH MỤC HÌNH

Hình 1.1. Quy trình xử lý và bảo quản mực ống.....	6
Hình 1.2. Chiều dòng nhiệt và dòng ẩm khi sấy đối lưu.....	8
Hình 1.3. Chiều dòng nhiệt và dòng ẩm khi sấy đối lưu có sự hỗ trợ của sóng hồng ngoại	8
Hình 1.4. Phơi mực kiểu nằm trên lưới và treo.....	16
Hình 2.1. Mực ống Trung Hoa (<i>Loligo chinensis</i>)	20
Hình 2.2. Sơ đồ nguyên lý của thiết bị sấy mực ống	29
Hình 2.3. Thiết bị sấy mực ống.....	30
Hình 2.4. Sơ đồ bố trí thiết bị đo trên thiết bị sấy.....	32
Hình 2.5. Sơ đồ bố trí thiết bị đo nhiệt độ VLS	33
Hình 3.1. Sơ đồ bố trí thí nghiệm xác định khối lượng riêng của mực	36
Hình 3.2. Sơ đồ bố trí thí nghiệm xác định nhiệt dung riêng của mực	39
Hình 3.3 Nhiệt dung riêng của mực tại các độ ẩm khác nhau	40
Hình 3.4. Sơ đồ bố trí thí nghiệm xác định độ ẩm cân bằng.....	41
Hình 3.5. Độ ẩm cân bằng thực nghiệm tại mức nhiệt độ khác nhau	45
Hình 3.6. Độ ẩm cân bằng dự đoán và thực nghiệm tại mức nhiệt độ 30 °C	45
Hình 3.7. Độ ẩm cân bằng dự đoán và thực nghiệm tại mức nhiệt độ 40 °C.....	46
Hình 3.8. Độ ẩm cân bằng dự đoán và thực nghiệm tại mức nhiệt độ 50 °.....	46
Hình 3.9. Độ ẩm cân bằng dự đoán và thực nghiệm tại ba mức nhiệt độ 30 °C, 40 °C và 50 °C (phương trình Modified Halsey).....	47
Hình 3.10. Nhiệt ẩn hóa hơi của mực	49
Hình 3.11. Quan hệ $\ln(MR)$ và thời gian sấy giữa thực nghiệm và lý thuyết	50
Hình 3.12. Sơ đồ miêu tả mô hình vật lý quá trình sấy mực	51
Hình 3.13. Mô hình tấm phẳng của VLS	52
Hình 3.14. Sơ đồ truyền nhiệt khi sấy mực	53
Hình 3.15. Cân bằng nhiệt trong một phần tử vô cùng nhỏ.....	54
Hình 3.16. Bước chia sai phân của nửa bề dày VLS	62
Hình 3.17. Lưu đồ thuật toán giải hệ phương trình (3.70).....	70

Hình 3.18. So sánh kết quả của mô hình lý thuyết với kết quả thực nghiệm của Chen	73
Hình 3.19. So sánh kết quả của mô hình lý thuyết với kết quả thực nghiệm của Vega-Gálvez	74
Hình 3.20. Đường cong sấy ở chế độ $T_a = 45^\circ\text{C}$, $v = 1,4 \text{ m/s}$; $\varphi_a = 15\%$	75
Hình 3.21. Đường cong nhiệt độ sấy của mực ống	77
Hình 3.22. Đường cong tốc độ sấy ở chế độ $T_a = 45^\circ\text{C}$, $v = 1,4 \text{ m/s}$; $\varphi_a = 15\%$	78
Hình 4.1. Mực ống đã qua sơ chế	80
Hình 4.2. Bố trí mực ống và thanh đèn hồng ngoại	81
Hình 4.3. Thay đổi nhiệt độ VLS sấy giữa kết quả lý thuyết với thực nghiệm tại các mức nhiệt độ 40°C , 45°C và 50°C	83
Hình 4.4. Đường cong sấy giữa kết quả dự đoán với thực nghiệm tại mức nhiệt độ là 40°C	84
Hình 4.5. Đường cong tốc độ sấy của kết quả dự đoán và thực nghiệm tại mức nhiệt độ 40°C	85
Hình 4.6. Đường cong sấy giữa kết quả dự đoán với thực nghiệm tại mức nhiệt độ 45°C	86
Hình 4.7. Đường cong tốc độ sấy giữa kết quả dự đoán với thực nghiệm tại mức nhiệt độ 45°C	87
Hình 4.8. Đường cong sấy giữa kết quả dự đoán với thực nghiệm sấy bằng BN+HN và BN tại mức nhiệt độ 50°C	88
Hình 4.9. Đường cong tốc độ sấy của mô hình dự đoán và thực nghiệm sấy BN+HN và BN tại mức nhiệt độ 50°C	89
Hình 4.10. Thay đổi nhiệt độ VLS giữa kết quả dự đoán với thực nghiệm tại các chế độ sấy BN + HN 250 W, BN + HN 500 W, BN + HN 750 W và BN.....	91
Hình 4.11. Đường cong sấy giữa kết quả dự đoán với thực nghiệm tại các chế độ sấy BN + HN 250 W, BN + HN 500 W, BN + HN 750 W và BN	92
Hình 4.12. Đường cong tốc độ sấy của kết quả dự đoán và thực nghiệm tại các chế độ sấy BN + HN 250 W, BN + HN 500 W, BN + HN 750 W và BN.....	92

Hình 4.13. Bài toán hộp đen mô tả quá trình nghiên cứu	94
Hình 4.14. Đồ thị ảnh hưởng của các hệ số hồi quy đến thời gian sấy.....	103
Hình 4.15. Đồ thị ảnh hưởng của các hệ số hồi quy đến phần % NH ₃	104
Hình 4.16. Đồ thị ảnh hưởng của các hệ số hồi quy đến ứng suất cắt	105
Hình 4.17. Đường cong sấy giữa kết quả dự đoán với thực nghiệm tại chế độ sấy phù hợp.....	109
Hình 4.18. Đường cong tốc độ sấy của kết quả dự đoán với thực nghiệm chế độ sấy phù hợp.....	110

DANH MỤC BẢNG

Bảng 1.1. Thành phần hóa học của mực ống	5
Bảng 1.2. Thành phần các axit amin của mực ống Trung hoa.....	5
Bảng 1.3. Các chỉ tiêu chất lượng đối của mực khô xuất khẩu.....	7
Bảng 3.1 Số liệu thực nghiệm xác định khối lượng riêng của mực.....	37
Bảng 3.2 Nhiệt dung riêng của mực tại các mức độ ẩm	39
Bảng 3.3. Độ ẩm tương đối của muối bão hòa tại các mức nhiệt độ khác nhau.....	41
Bảng 3.4. Độ ẩm cân bằng thực nghiệm của mực tại các mức nhiệt độ khác nhau.	43
Bảng 3.5. Thông số hồi quy và giá trị tham số của các trình sử dụng để mô tả độ ẩm cân bằng.....	44
Bảng 4.1. Các thông số được xác định bằng dụng cụ đo trong quá trình thực nghiệm tại các mức nhiệt độ 40°C, 45°C và 50°C.....	81
Bảng 4.2. Kết quả thực nghiệm và lý thuyết về độ chứa ẩm trung bình của vật liệu tại mức nhiệt độ 40 °C	84
Bảng 4.3. Kết quả thực nghiệm và lý thuyết về độ chứa ẩm trung bình của vật liệu tại mức nhiệt độ 45°C	86
Bảng 4.4. Kết quả thực nghiệm và lý thuyết về độ chứa ẩm trung bình của vật liệu tại mức nhiệt độ 50°C	88
Bảng 4.5. Các thông số được xác định bằng dụng cụ đo trong quá trình thực nghiệm tại các chế độ sấy BN + HN 250 W, BN + HN 500 W, BN + HN 750 W và BN....	90
Bảng 4.6. Mức khoảng biến thiên các yếu tố đầu vào dạng bậc I.....	95
Bảng 4.7. Ma trận thực nghiệm và kết quả thực nghiệm ở dạng mã hóa	96
Bảng 4.8. Ma trận thực nghiệm và kết quả thực nghiệm ở dạng thực	96
Bảng 4.9. Mức khoảng biến thiên các yếu tố đầu vào dạng bậc II	98
Bảng 4.10. Ma trận thực nghiệm và kết quả thực nghiệm ở dạng mã hóa	99
Bảng 4.11. Ma trận thực nghiệm và kết quả thực nghiệm ở dạng thực	99
Bảng 4.12. Kết quả thực nghiệm và lý thuyết về độ chứa ẩm trung bình của vật liệu tại chế độ sấy phù hợp	109

MỞ ĐẦU

1. Đặt vấn đề

Với chiều dài bờ biển hơn 3200 km, Việt Nam là nước có nguồn thủy hải sản phong phú. Trong đó, mực ống là loại hải sản có sản lượng lớn và giá trị xuất khẩu cao. Theo số liệu điều tra của Viện nghiên cứu Hải sản (2014), Việt Nam có khoảng 25 loại mực ống khác nhau, với sản lượng đánh bắt hàng năm khoảng 24000 tấn. Mực khô là loại hải sản được ưa thích ở Việt Nam và một số nước Châu Á nhờ hương vị thơm ngon và giàu chất dinh dưỡng. Hiện nay, mực khô là một trong những mặt hàng xuất khẩu quan trọng sang Hàn Quốc, Nhật Bản, ASEAN của ngành thủy sản Việt Nam.

Để có sản phẩm mực khô, người ta làm giảm độ ẩm của mực từ độ ẩm ban đầu 80% xuống độ ẩm khoảng 25% (TCVN, 2014). Hiện nay, phơi nắng là phương pháp làm khô mực phổ biến nhất ở Việt Nam vì chi phí đầu tư thấp và không đòi hỏi trình độ kỹ thuật. Tuy nhiên, phương pháp này lại phụ thuộc vào thời tiết và không đảm bảo vệ sinh an toàn thực phẩm (Jain, 2007). Phương pháp sấy không khí nóng cũng đã được sử dụng rộng rãi để khắc phục nhược điểm của phương pháp phơi nắng, tuy nhiên nhược điểm của phương pháp này là do nhiệt độ tác nhân sấy cao nên không giữ được các chất dinh dưỡng trong mực dẫn đến làm giảm chất lượng sản phẩm. Theo các kết quả nghiên cứu về sấy mực (Deng và ctv, 2014; Wang, 2014; Chen, 2013), nhiệt độ để sấy mực thường không vượt quá 60°C. Khi nhiệt độ sấy cao hơn 60°C, các chất dinh dưỡng có trong mực sẽ bị phân hủy mạnh trong quá trình sấy. Cùng với sự phát triển của công nghệ, nhiều phương pháp sấy có ưu điểm tốt để sấy sản phẩm ở mức nhiệt độ thấp hơn 60°C như sấy bơm nhiệt, sấy chân không, sấy thăng hoa, hoặc sấy kết hợp một vài phương pháp với nhau,... Trong các phương pháp trên thì phương pháp sấy bơm nhiệt rất thích hợp để sấy sản phẩm mực ống do giá thành máy phù hợp, chi phí sấy thấp và đảm bảo được chất lượng của mực sau khi sấy như giữ được hàm lượng chất dinh dưỡng, màu sắc, mùi vị của sản phẩm (Mujumdar, 2014). Tuy nhiên cơ chế sấy bơm nhiệt là trao đổi nhiệt với VLS theo

phương thức truyền nhiệt đối lưu, do đó hiệu quả truyền nhiệt còn thấp, đặc biệt là đối với VLS có hệ số trao đổi nhiệt thấp. Vì vậy để khắc phục nhược điểm này, các máy sấy bơm nhiệt thường được trang bị thêm các thiết bị hỗ trợ gia nhiệt như dùng sóng hồng ngoại, sóng vi sóng.

Đã có một số tác giả tiến hành nghiên cứu về sấy mực sử dụng phương pháp sấy bơm nhiệt cũng như sấy bơm nhiệt kết hợp với sóng hồng ngoại (Chen và ctv, 2013; Deng và ctv, 2013; Nathakaranakule và ctv, 2010). Tuy nhiên cho đến nay các tác giả chỉ chủ yếu tập trung vào nghiên cứu thực nghiệm, chưa có công trình nào tiến hành nghiên cứu lý thuyết, xây dựng mô hình toán để mô phỏng truyền nhiệt và truyền ẩm trong quá trình sấy mực bằng phương pháp sấy bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại. Việc nghiên cứu xây dựng và giải thành công mô hình toán mô phỏng quá trình sấy mực bằng phương pháp sấy bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại sẽ góp phần làm rõ bản chất của hiện tượng trao đổi nhiệt - ẩm trong quá trình sấy. Kết quả đó sẽ giúp dự đoán được tốc độ sấy, phân bố nhiệt độ và độ ẩm của vật liệu trong suốt quá trình sấy. Với mục tiêu xây dựng mô hình lý thuyết nhằm mô phỏng QTS mực từ đó tìm ra chế độ sấy hợp lý để giảm thời gian, chi phí trong toàn bộ QTS và nâng cao chất lượng sản phẩm sau khi sấy chúng tôi tiến hành thực hiện đề tài “Nghiên cứu kỹ thuật sấy mực ống”.

2. Mục tiêu của đề tài

Nghiên cứu ảnh hưởng của bức xạ hồng ngoại đến quá trình sấy cũng như chất lượng của mực ống khi sấy bằng phương pháp sấy bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại, thông qua việc xây dựng mô hình toán để mô phỏng truyền nhiệt truyền ẩm và thực nghiệm xác định chế độ sấy cho mực ống.

3. Nội dung nghiên cứu

Để đạt được mục tiêu của đề tài luận án tập trung giải quyết các nội dung chính sau:

- Tìm hiểu tổng quan về kỹ thuật sấy mực ống trong và ngoài nước, các công trình nghiên cứu đã công bố, từ đó phân tích đánh giá đề xuất phương pháp sấy mực ống phù hợp với điều kiện tại Việt Nam.

- Nghiên cứu thực nghiệm xác định các tính chất nhiệt vật lý của mực ống tại Việt Nam.

- Xây dựng mô hình toán lý thuyết để mô tả quá trình truyền nhiệt truyền ẩm của QTS mực ống bằng bơm nhiệt có sự hỗ trợ của bức xạ hồng ngoại.

- Nghiên cứu thực nghiệm nhằm kiểm chứng mô hình toán lý thuyết.

- Sử dụng kết quả mô phỏng và phương pháp quy hoạch thực nghiệm để xác định các thông số công nghệ phù hợp cho QTS, nhằm đảm bảo chất lượng với thực tế sản xuất mực ống tại Việt Nam.

4. Điểm mới của đề tài

- Xác định các thông số nhiệt vật lý của mực ống Việt Nam phụ thuộc theo độ ẩm của vật liệu sấy, các thông số này gồm: nhiệt dung riêng, khối lượng riêng, độ ẩm cân bằng, hệ số khuếch tán ẩm và nhiệt ẩn hóa hơi.

- Xây dựng mô hình toán mô tả quá trình truyền nhiệt truyền ẩm của mực ống trong QTS bằng phương pháp bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại có xét đến ảnh hưởng của dòng dịch chuyển ẩm đến dòng nhiệt.

- Xác định chế độ sấy phù hợp cho mực ống nhằm đảm bảo chất lượng với điều kiện thực tế sản xuất tại Việt Nam.

Chương 1

TỔNG QUAN

1.1. Tổng quan về mực ống

1.1.1. Nguồn lợi và đặc điểm hình thái

Mực là loại động vật nhạy cảm với biến đổi của điều kiện thủy văn, thời tiết và ánh sáng nên sự di chuyển theo mùa, ngày và đêm. Vào ban ngày lớp nước bề mặt bị ánh sáng mặt trời nung nóng, làm nhiệt độ nước tăng lên, mực ống thường lặn xuống dưới đáy hoặc lớp nước tầng dưới. Ban đêm, khi nhiệt độ nước bề mặt giảm đi, các quần thể mực lại di chuyển từ lớp nước tầng đáy lên bề mặt.

Trong các tháng mùa đông (tháng 12 ÷ tháng 3 năm sau), mực di chuyển đến các vùng nước nông hơn, ở độ sâu < 30 m. Trong các tháng mùa hè (tháng 6 ÷ tháng 9), mực ống di chuyển đến các vùng nước sâu 30 ÷ 50 m.

Các nghề khai thác mực kết hợp với ánh sáng như nghề câu mực, nghề vó, chụp mực. Lợi dụng tính hướng quang của mực, ta đưa nguồn ánh sáng mạnh xuống dưới nước, dễ dàng nhận thấy quần thể mực tập trung rất đông trong quần ánh sáng đó. Do đó, ở Việt Nam cũng như các nước khác đều sử dụng các phương pháp khai thác kết hợp với ánh sáng.

Sản lượng mực ở Việt Nam cho đến nay chưa thống kê được đầy đủ vào khoảng 15 đến 24 ngàn tấn/năm. Mực có khắp trong vùng biển ở Việt Nam. Mực có nhiều thịt và tổ chức của cơ thịt rất chặt chẽ. Mực được chế biến xuất khẩu ở hai dạng là đông lạnh và làm khô.

1.1.2. Thành phần hóa học của mực

Thành phần hóa học của động vật thủy sản nói chung và mực nói riêng gồm: Nước, protein, lipid, glucit, vitamin, khoáng...Glucits của mực tồn tại chủ yếu là glycogen. Thành phần hóa học của mực được thể hiện ở bảng 1.1.

Protein là thành phần hóa học chủ yếu của mực khô, nó chiếm 70% ÷ 80% trọng lượng chất khô. Trong thịt mực protein thường liên kết với các hợp chất khác như:

lypit, glycogen, axit nucleic...Tạo nên các phức chất có cấu tạo phức tạp và có tính chất sinh học đặc trưng khác nhau.

Bảng 1.1: Thành phần hóa học của mực ống (Trần Thị Luyến, 1996)

Loại mực	Nước (%)	Lipit (%)	Protein (%)	Gluxit (%)	Khoáng (%)
Mực ống	78 ÷ 82,5	0,2 ÷ 1,4	14,8 ÷ 18,8	2,7	1,2 ÷ 1,7

Theo Trần Đại Tiến (2007) hàm lượng và thành phần axit amin của mực ống Trung Hoa (*Loligo chinensis*) tại Khánh Hòa -Việt Nam tại bảng 1.2 cho thấy thành phần các axit amin rất phong phú. Mực ống tại Việt Nam có đầy đủ các axit amin không thay thế và nhiều axit amin có giá trị dinh dưỡng cao với hàm lượng lớn như: Valin, loxin, izoloxin, methionin, prolin, lyzin, acginin. Kết quả phân tích cũng cho thấy các axit amin gây biến nâu mạnh trong quá trình làm khô như prolin, acginin, lyzin, alanin...

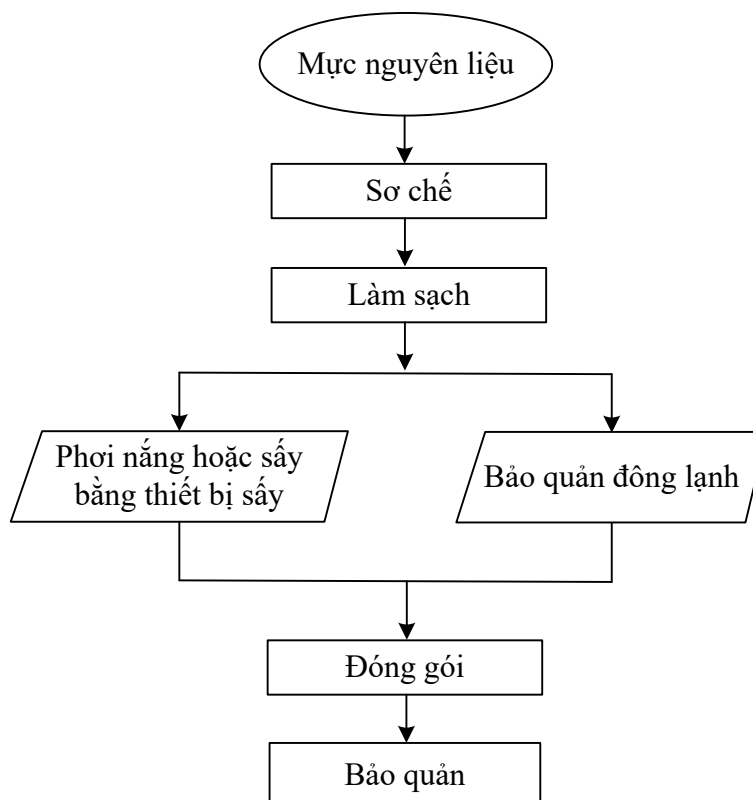
Bảng 1.2. Thành phần các axit amin của mực Trung hoa (Trần Đại Tiến, 2007)

STT	Axit amin	% chất khô	STT	Axit amin	% chất khô
1	Aspactic	3,65	10	Methionin	3,12
2	Treonin	1,99	11	Izoloxin	3,20
3	Serin	0,15	12	Loxin	6,22
4	Glutamin	1,39	13	Tyrozín	3,52
5	Prolin	6,10	14	Phenylalanin	2,72
6	Glyxin	0,90	15	Histidin	1,76
7	Alanin	6,21	16	Lyzin	3,43
8	Systin	0,00	17	Abumin	2,72
9	Valin	4,14	18	Acginin	9,2

1.1.3. Xử lý và bảo quản mực ống

Mực nguyên liệu có độ ẩm ban đầu khoảng 84% (cơ sở ướt) được sơ chế, rửa sạch mang đi làm khô đến độ ẩm cần thiết, sau đó mực ống được đưa vào bảo quản càng sớm càng tốt để tránh sự suy giảm giá trị dinh dưỡng, cảm quan và sự tăng trưởng của vi khuẩn.

Hiện nay, mực ống sau đánh bắt thường được xử lý theo quy trình được trình bày trong hình 1.1 (Huỳnh Thị Kim Cúc, 2012). Quy trình này bao gồm các bước: sơ chế, rửa sạch, phơi nắng hoặc làm khô bằng thiết bị sấy, đóng gói và bảo quản trong môi trường nhiệt độ bình thường hoặc nhiệt độ lạnh để kéo dài thời gian bảo quản.



Hình 1.1. Quy trình xử lý và bảo quản mực ống

1.1.4. Tiêu chuẩn chất lượng mực ống

Để đánh giá chất lượng của mực ống, người ta đi phân tích các thành phần axit amin chứa trong mực ống hoặc các chất có hoạt tính chống oxy hóa trong thành phần của mực ống.

Thành phần hóa học của mực ống sau khi sấy đã được nhiều nhà khoa học trên thế giới quan tâm và nghiên cứu. Kết quả nghiên cứu cho thấy có sự khác biệt rõ ràng trong thành phần hóa học của mực ống giữa các khu vực, quốc gia khác nhau. Thành phần hóa học của mực ống phụ thuộc vào thời tiết, vùng miền, độ tuổi và chu kỳ sinh sản. Do đó không có tiêu chuẩn chung để xác định chất lượng của sản phẩm mực ống.

Hơn nữa khí hậu và độ ẩm không khí của mỗi quốc gia khác nhau do đó yêu cầu của khách hàng về độ chứa ẩm của mực khô cũng có yêu cầu khác nhau.

Theo tiêu chuẩn Việt Nam năm 2014 về yêu cầu kỹ thuật thủy hải sản khô. Trong đó hải sản mực khô có tiêu chí đánh giá về cảm quan và các chỉ tiêu hóa lý như trong bảng 1.3.

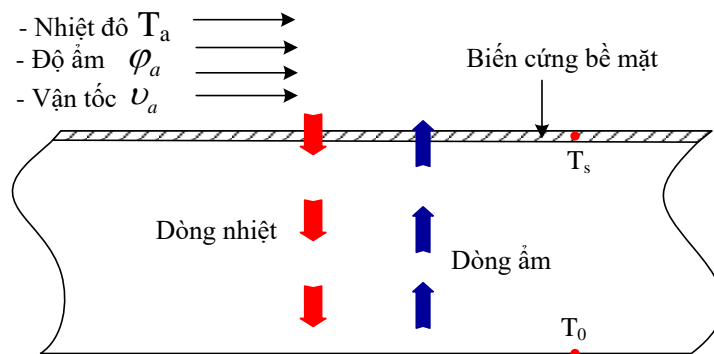
Bảng 1.3. Các chỉ tiêu chất lượng của mực khô xuất khẩu (TCVN 2014)

A. Cảm quan	
Chỉ tiêu	Đặc điểm
Màu sắc	Trắng, hồng nhạt.
Mùi, vị	Có mùi đặc trưng của mực khô, không tanh, vị hơi ngọt, đắng.
Trạng thái	Khô, bề mặt không dính ướt tay, thân mực thẳng và mình dày, dẻo, dai, không vụn.
Tạp chất khác	Không có độc tố, vi khuẩn gây bệnh, nấm mốc, sâu bọ, côn trùng, ...
B. Chỉ tiêu lý hóa	
Chỉ tiêu	Đặc điểm
Hàm lượng nước	Dưới 25%
Hàm lượng Tro không tan trong axit	Dưới 1,5%
Hoạt độ nước ở 25 ⁰ C	Dưới 0,75
Hàm lượng NaCl	Dưới 2,5%
Protein	Trên 15,6%
Hàm lượng nitơ bazơ bay hơi	Dưới 350mg/kg

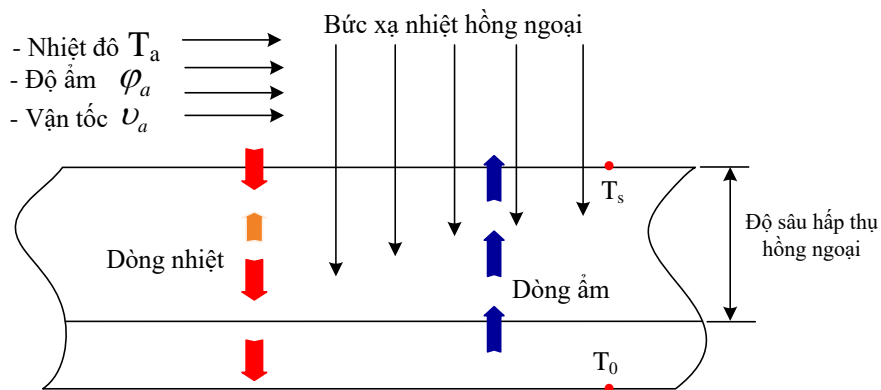
1.2. Cơ chế truyền nhiệt bức xạ hồng ngoại

Vật liệu sấy trong công nghiệp thực phẩm thường được cấu tạo chủ yếu bởi chất hữu cơ và nước, phổ hấp thụ năng lượng bức xạ của nước và các chất hữu cơ là khác nhau. Ở mỗi bước sóng, chất hữu cơ trở thành vật trong suốt - không hấp thụ năng

lượng bức xạ hồng ngoại; tuy nhiên nước trong vật liệu sẽ trở thành vật đen hấp thụ năng lượng bức xạ tối đa. Do đó, khi chiếu bức xạ hồng ngoại có bước sóng nằm trong khoảng $2,5 \div 3,5 \mu\text{m}$ lên vật liệu, các O - H của nước hấp thụ năng lượng bức xạ và bắt đầu rung động với tần số của bức xạ nhiệt chiếu tới. Việc chuyển đổi bức xạ nhiệt sang năng lượng quay sẽ làm cho vật liệu trong nước bốc hơi (Pan và ctv, 2010).



Hình 1.2. Chiều dòng nhiệt và dòng ẩm khi sấy đối lưu



Hình 1.3. Chiều dòng nhiệt và dòng ẩm khi sấy đối lưu có sự hỗ trợ của bức xạ hồng ngoại

Hình 1.2, hình 1.3 mô tả cơ chế truyền nhiệt và truyền ẩm của QTS đối lưu và sấy đối lưu có sự hỗ trợ của bức xạ hồng ngoại. Đối với QTS đối lưu, dòng nhiệt sẽ truyền từ ngoài bề mặt VLS vào tâm VLS. Khi các lớp bên trong VLS nhận nhiệt và nóng lên, sẽ hình thành dòng ẩm di chuyển từ tâm VLS ra ngoài bề mặt vật liệu. Do quá trình làm nóng vật liệu từ ngoài vào trong nên thường lớp vật liệu bên ngoài sẽ khô trước lớp vật liệu bên trong và cản trở quá trình truyền ẩm từ tâm ra bề mặt vật

liệu do gradient nhiệt độ và độ ẩm ngược chiều nhau. Khi sấy có sự hỗ trợ nhiệt từ dòng bức xạ nhiệt của hồng ngoại, cùng với dòng nhiệt từ bên ngoài như QTS đối lưu các phân tử nước trong vật liệu sẽ được gia nhiệt thêm bằng dòng nhiệt bức xạ hồng ngoại. Trong chiều dày chịu ảnh hưởng của bức xạ hồng ngoại vật liệu sẽ nóng lên. Do đó, gradient nhiệt độ trong trường hợp này sẽ nhỏ hơn so với trường hợp sấy đối lưu thông thường. Sự chênh lệch về độ khô giữa lớp vật liệu bên ngoài và lớp vật liệu bên trong là nhỏ; bề mặt vật liệu không bị biến cứng, do đó sẽ không cản trở nhiều quá trình truyền ẩm ra ngoài môi trường. Bên cạnh đó, ở giai đoạn tốc độ sấy giảm dần, nhiệt độ bên trong VLS có thể cao hơn nhiệt độ TNS. Khi đó nhiệt lượng sẽ truyền từ bên trong vật liệu ra ngoài. Trong trường hợp này, chiều dòng nhiệt cùng chiều với chiều dòng ẩm.

1.3. Tình hình nghiên cứu trong, ngoài nước về sấy hải sản và hệ thống sấy hồng ngoại.

1.3.1. Tình hình nghiên cứu ngoài nước

- **Sấy bơm nhiệt**

Theo Braun (2002), Dirk và ctv (2004), Wang và ctv (2001) sấy bơm nhiệt là một phương pháp tốt để cải thiện chất lượng sản phẩm thủy sản khô sau khi sấy bởi công nghệ sấy ở nhiệt độ thấp và không phụ thuộc vào điều kiện môi trường không khí bên ngoài, có hiệu quả kinh tế cao.

Arason (2003) đã so sánh giá thành về chi phí năng lượng để sấy cá bò khô bằng các phương pháp sấy khác nhau, kết quả được tác giả chỉ ra là phương pháp sấy bơm nhiệt cho chi phí giá thành thấp nhất.

Chua (2000a) báo cáo rằng khi sấy bằng bơm nhiệt tác giả có thể điều chỉnh được thời gian và nhiệt độ sấy để hạn chế sự biến màu của sản phẩm do tác dụng của các phản ứng tạo màu phi enzyme. Qua nghiên cứu thực nghiệm, cường độ biến màu giảm đi 87% khi sấy khoai tây, 75% khi sấy ổi và 67% khi sấy chuối so với sấy bằng không khí nóng. Do giảm được thời gian sấy nên hàm lượng axit ascorbic đã tăng lên 20% khi sấy ổi bằng bơm nhiệt so với sấy truyền thống bằng không khí nóng ở cùng nhiệt độ sấy (Chua, 2000b).

Deng và cộng sự (2013) nghiên cứu sự phân bố độ ẩm và khả năng hồi ẩm của mực cắt lát trên phương pháp sấy bơm nhiệt, thăng hoa và sấy không khí nóng. Kết quả cho thấy sấy khô dẫn đến biến tính và suy thoái protein trong cơ thịt theo thứ tự sấy không khí nóng, sấy bơm nhiệt, sấy thăng hoa. Nhìn chung các mẫu sấy thăng hoa cho chất lượng tốt nhất trong ba phương pháp sấy, mặc dù thời gian sấy của bơm nhiệt dài hơn các mẫu sấy bằng phương pháp không khí nóng, tuy nhiên cấu trúc và protein ít thiệt hại hơn so với phương pháp sấy không khí nóng. Khi so sánh về chi phí sản xuất và chất lượng sản phẩm, phương pháp sấy bơm nhiệt có khả năng ứng dụng với quy mô công nghiệp hơn các phương pháp sấy khác.

Nghiên cứu của Deng và cộng sự (2014) đã tiến hành nghiên cứu ảnh hưởng của các phương pháp sấy lên cấu trúc myosin, thành phần axit amin và khả năng phân giải protein của mực cắt lát. Nghiên cứu được tiến hành thực nghiệm trên 3 phương pháp là sấy thăng hoa, sấy không khí nóng và sấy bơm nhiệt. Kết quả cho thấy sấy thăng hoa có thành phần axit amin tương tự như các mẫu mực tươi và đạt khả năng tiêu hóa protein trong ống nghiệm cao nhất. Kết quả phân tích các mẫu cũng cho thấy cấu trúc myosin của mực sau khi sấy bằng phương pháp không khí nóng bị phá hủy nhiều hơn so với sấy bơm nhiệt, trong khi các mẫu sấy bằng phương pháp thăng hoa giữ lại gần như cấu trúc myosin ban đầu.

▪ **Sấy bức xạ**

Theo Jones (1992) thì phương pháp sấy bằng bức xạ sẽ giảm được thời gian sấy, năng lượng dùng cho sấy bằng bức xạ được truyền trực tiếp vào nguyên liệu mà không phải tổn hao để làm nóng không khí nên giảm được chi phí năng lượng cho QTS.

Navaii (1992) cho rằng phương pháp sấy bằng bức xạ có những ưu điểm như: lượng truyền nhiệt lớn, dễ điều chỉnh được nguồn nhiệt và nhiệt độ cho bề mặt VLS, thời gian sấy nhanh. Nếu kết hợp giữa phương pháp sấy bức xạ với bơm nhiệt thì giá thành sẽ được hạ xuống.

Yamada và Wada (1988) nghiên cứu sấy cá thu bằng bức xạ hồng ngoại có khoảng cách từ các tấm bức xạ gồm hồng ngoại đến bề mặt cá là 200 mm và kết quả

cho thấy chi phí nhiệt ít hơn, tránh được sự ô nhiễm của dầu chảy ra từ cá, nhiệt độ của cá trong QTS không quá 35°C cho chất lượng cá sau khi sấy là rất tốt.

Khi nghiên cứu ứng dụng của bức xạ hồng ngoại để sấy thảo mộc, Paakomen cùng các cộng sự (1999), đã cho thấy chất lượng của sản phẩm sấy được cải thiện hơn nhiều.

Theo Pan và các cộng sự (2008) nếu loại bớt nước trong chuỗi cắt lát bằng phương pháp sấy bức xạ hồng ngoại thì độ ẩm giảm đáng kể so với sấy bằng không khí nóng, tốc độ thoát ẩm này sẽ tăng theo sự gia tăng cường độ bức xạ.

Kết quả nghiên cứu của Swasdisevi cùng các cộng sự (2007) đã chỉ ra quá trình làm khô lát chuối sử dụng bức xạ hồng ngoại trong môi trường chân không có tốc độ làm khô sản phẩm tốt hơn các phương pháp khác.

Ježek và cộng sự (2008) đã nghiên cứu quá trình mất nước của cần tây khi sấy bằng bức xạ hồng ngoại ở nhiệt độ 50°C và 75°C. Kết quả đã chỉ ra rằng: thời gian mất nước phụ thuộc vào hàm lượng của các thành phần dễ bay hơi trong các mẫu cần tây, tức là hàm lượng các thành phần này càng cao thì thời gian loại bỏ chúng càng dài.

Kubota cùng các cộng sự (2003) đã so sánh hiệu quả của sấy bức xạ hồng ngoại so với sấy đối lưu bằng không khí nóng và phơi tự nhiên. Kết quả đã chứng minh: Sấy bằng bức xạ cho chất lượng tốt hơn nhiều so với hai phương pháp còn lại về màu sắc, giữ lại được hàm lượng nucleotide cao, làm giảm được hoạt động không có lợi của acid phosphatase.

Kang và các cộng sự (2011) đã nghiên cứu sấy mực bằng phương pháp sấy không khí nóng và sấy bức xạ hồng ngoại. Nhóm tác giả tiến hành thực nghiệm tại các mức nhiệt độ TNS 40°C, 50°C, 60°C ở các vận tốc TNS 0,6, 0,8, 1,2 m/s. Kết quả cho thấy khi sấy bức xạ hồng ngoại, tốc độ sấy nhanh và tiết kiệm năng lượng hơn. Tại nhiệt độ TNS 40°C và vận tốc TNS 0,8 m/s, phương pháp sấy bức xạ hồng ngoại tiết kiệm 37,4% năng lượng so với phương pháp sấy không khí nóng. Bên cạnh đó, khi sấy bức xạ hồng ngoại cho thấy số lượng vi khuẩn hiếu khí giảm, màu sắc ít thay đổi và độ cứng của mực thấp hơn so với các phương pháp sấy khác.

Meeso (2007) khi nghiên cứu lý thuyết bằng việc giải mô hình toán của QTS lúa có bức xạ hồng ngoại cho thấy mô hình có bức xạ hiệu quả hơn trong việc giảm ẩm và nhiệt độ bên trong hạt lúa.

Ning và các cộng sự (2015) nghiên cứu đặc tính sấy khô hồng sâm bằng phương pháp sấy bức xạ hồng ngoại - xa. Đặc tính sấy được phân tích và đánh giá trên các yếu tố như tốc độ sấy, thay đổi màu sắc và tiêu thụ năng lượng. Kết quả cho thấy sấy bức xạ hồng ngoại có tốc độ sấy nhanh hơn, chênh lệch màu sắc và năng lượng tiêu thụ giảm hơn so với phương pháp sấy bằng không khí nóng. Phương pháp làm khô dưới ánh nắng mặt trời cho chất lượng tốt, tuy nhiên hiệu quả sấy thấp và thời gian sấy kéo dài hơn so với phương pháp sấy bằng không khí nóng.

▪ **Sấy bức xạ hồng ngoại kết hợp với một số phương pháp sấy khác**

Theo Zbicinski cùng các cộng sự (1992), đã sử dụng sấy bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại vào việc sấy các vật liệu nhạy cảm với nhiệt độ. Qua nghiên cứu đã chứng minh sự kết hợp giữa sấy bơm nhiệt và bức xạ hồng ngoại một cách gián đoạn đã làm dịch chuyển nhanh ẩm bề mặt ở giai đoạn đầu của QTS, phương pháp sấy này giúp giảm thời gian sấy và hạn chế tối đa biến đổi xấu đến chất lượng sản phẩm. Kết quả nghiên cứu đã đưa ra mô hình sấy kết hợp bơm nhiệt có sự hỗ trợ của bức xạ hồng ngoại.

Hebbar và cộng sự (2004) đã nghiên cứu phát triển hệ thống sấy hồng ngoại kết hợp không khí nóng cho các sản phẩm thực phẩm nông nghiệp. Khoai tây và cà rốt được chọn làm mẫu thử và kiểm tra ở 3 phương pháp sấy khác nhau (sấy hồng ngoại, sấy không khí nóng, sấy không khí nóng kết hợp hồng ngoại). Từ kết quả thu được, nhóm tác giả đã đưa ra nhận xét nếu ở cùng chế độ sấy thì phương pháp sấy không khí nóng kết hợp hồng ngoại tiết kiệm thời gian 48%, năng lượng tiêu thụ ít hơn 63% so với phương pháp sấy nóng. Chất lượng cảm quan của sản phẩm của phương pháp sấy không khí nóng kết hợp sấy hồng ngoại tốt hơn phương pháp sấy không khí nóng.

Nathakaranakule và cộng sự (2010), đã nghiên cứu thực nghiệm sấy nhãn sử dụng bức xạ hồng ngoại kết hợp bơm nhiệt. Nhóm tác giả đã nhận xét bức xạ hồng ngoại giúp tăng tốc độ sấy, do đó thời gian sấy giảm, cấu trúc của lòng nhãn xốp hơn,

ít tổn hao về sản lượng khi sấy khô và tỷ lệ hồi ẩm cao hơn, giảm độ cứng và trở nên mềm dẻo, màu sắc nhãn khô đỏ và sẫm hơn các mẫu thử không sử dụng bức xạ hồng ngoại. Kết quả cũng cho thấy năng lượng khi sấy có sự hỗ trợ của hồng ngoại thấp hơn khi sấy bơm nhiệt thông thường.

Deng và các cộng sự (2011) đã nghiên cứu thực nghiệm sấy mực bằng thiết bị sấy bơm nhiệt và bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại tại các mức 500 W, 1000 W và 2000W. Kết quả nghiên cứu cho thấy tổng hàm lượng protein, màu sắc của VLS không thay đổi nhiều giữa các phương pháp sấy. Tuy nhiên, chỉ số vi khuẩn hiếu khí của phương pháp sấy bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại ít hơn so với sấy bơm nhiệt thông thường.

Theo nghiên cứu của Deng và cộng sự (2012) mực ống cắt lát sấy bằng phương pháp bơm nhiệt và sấy bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại ở công suất 500 W và 1000 W, tại nhiệt độ 50°C và vận tốc tác nhân sấy khi sấy 0,8 m/s. Kết quả cho thấy nồng độ acid amin trong tất cả các sản phẩm khô thấp hơn so với mực tươi. Các phương pháp làm khô đã làm giảm chỉ số axit amin cần thiết và cấu trúc protein đã bị phá hủy nhẹ. Nghiên cứu cũng cho thấy phương pháp sấy bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại có giá trị dinh dưỡng tốt hơn phương pháp sấy bơm nhiệt thông thường.

Chen và cộng sự (2013) nghiên cứu ảnh hưởng của các phương pháp sấy (không khí nóng, vi sóng, hồng ngoại - đối lưu) lên chất lượng của mực. Các thí nghiệm được thực hiện tại ba mức nhiệt độ 50°C, 60°C và 70°C, đối với phương pháp sấy vi sóng thực nghiệm tại mức nhiệt độ là 50°C. Kết quả cho thấy, phương pháp sấy bức xạ hồng ngoại – đối lưu và phương pháp sấy vi sóng cho ra sản phẩm có màu sắc và độ co rút tốt hơn phương pháp sấy không khí nóng. Tuy nhiên, mẫu sấy bằng vi sóng có độ cứng cao nhất.

Wang và các cộng sự (2014) nghiên cứu so sánh chất lượng mực khô tại mức nhiệt độ 50°C. Nghiên cứu được tiến hành bằng thực nghiệm sấy với ba phương pháp (không khí nóng, hồng ngoại – đối lưu và sấy vi sóng) để so sánh chất lượng của mực sau khi sấy. Kết quả cho thấy sản phẩm sau khi sấy bức xạ hồng ngoại – đối lưu có

độ co rút thấp, có màu trắng sáng, chất lượng cảm quan tốt hơn so với sấy không khí nóng và vi sóng.

Nghiên cứu của Deng và các cộng sự (2014) nghiên cứu ảnh hưởng của phương pháp sấy bơm nhiệt, bơm nhiệt kết hợp với bức xạ hồng ngoại xa tại các mức công suất 100 W, 500 W và 800 W đến cấu trúc và hàm lượng protein của mực cắt lát. Kết quả cho thấy những thay đổi của các thành phần axit amin không đồng nhất nhưng phụ thuộc vào loại axit amin và phương pháp sấy. Sấy bơm nhiệt hoặc bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại không ảnh hưởng mức độ axit amin thiết yếu và axit amin không thiết yếu, thông qua kết quả phân tích SDS-PAGE cho thấy protein trong mực khô bị hư hại nhẹ. Thông qua việc phân tích các chỉ tiêu về chất lượng và hiệu quả sấy cho thấy sấy bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại tại mức công suất 100W phù hợp để sấy mực.

Mesery và Mwithiga (2014) nghiên cứu đánh giá các thông số trong QTS sấy hành bằng các phương pháp sấy không khí nóng, sấy bức xạ hồng ngoại, sấy hồng ngoại kết hợp không khí nóng ở nhiều điều kiện khác nhau. Kết quả cho thấy sử dụng sấy bức xạ hồng ngoại kết hợp không khí nóng để sấy lát hành cho mức tiêu thụ năng lượng là thấp nhất.

Vega-Gálvez và cộng sự (2011) tiến hành nghiên cứu ảnh hưởng của nhiệt độ sấy đến động học QTS, màu sắc, khả năng hồi ẩm của mực khi sấy bằng phương pháp không khí nóng tại các mức 50°C, 60°C, 70°C, 80°C, 90°C. Kết quả cho thấy mô hình toán thực nghiệm Logarithmic và Two-term là phù hợp để dự đoán độ chứa ẩm của mực.

1.3.2. Tình hình nghiên cứu trong nước

Việt Nam là nước có nền nông nghiệp phát triển, sản lượng các loại sản phẩm nông nghiệp chiếm tỷ trọng xuất khẩu rất lớn. Vì vậy, nhu cầu nghiên cứu ứng dụng các kỹ thuật, công nghệ vào trong chế biến và bảo quản sản phẩm nông nghiệp là rất lớn. Trong các nghiên cứu và ứng dụng kỹ thuật sấy để bảo quản sản phẩm, ngoài các phương pháp truyền thống như phơi nắng, sấy đối lưu không khí nóng mà gần đây là sấy sử dụng bơm nhiệt thì phương pháp sấy dùng bơm nhiệt có kết hợp bức xạ hồng ngoại đang dần trở nên phổ biến nhờ tính ưu việt về chất lượng sản phẩm cũng như

chi phí cho QTS.

Nguyễn Thị Bích Thủy (2001) thực hiện nghiên cứu QTS khô một số nguyên liệu nông sản có độ ẩm cao bằng bức xạ hồng ngoại. Kết quả nghiên cứu đã tìm ra được chế độ sấy tối ưu bằng máy sấy băng chuyền dùng đèn hồng ngoại với vật liệu thóc, lạc như sau: Vận tốc băng tải: 7 mm/s, khoảng cách bức xạ là 45 cm, quá trình ủ ẩm: 3 phút.

Tại trường Đại học Thủy sản – Nha Trang, tác giả Đào Trọng Hiếu (2004) đã tiến hành nghiên cứu ứng dụng công nghệ gồm bức xạ hồng ngoại ở giải tần số hẹp chọn lọc kết hợp với không khí có nhiệt độ thấp để sấy cá cơm săng. Kết quả nghiên cứu xác định được chế độ tối ưu, đó là: Nhiệt độ không khí trong buồng sấy 45°C, vận tốc TNS 1,2 m/s, khoảng cách từ nguồn bức xạ tới nguyên liệu là 7 cm.

Trần Đại Tiên (2007) thực hiện nghiên cứu thực nghiệm về ảnh hưởng của một số chế độ sấy bức xạ hồng ngoại kết hợp với sấy bom nhiệt đến chất lượng mực ống khô lột da. Kết quả nghiên cứu cho thấy chất lượng mực ống khô được sấy bức xạ hồng ngoại kết hợp với bom nhiệt tốt hơn so với phương pháp sấy bức xạ - đối lưu. Chế độ sấy bức xạ hồng ngoại kết hợp với sấy lạnh thích hợp nhất: Nhiệt độ sấy 35°C \pm 1°C, vận tốc TNS 2 m/s \pm 0,1 m/s, khoảng cách từ đèn bức xạ tới bề mặt mực là 40 cm.

Ngô Đăng Nghĩa cùng các cộng sự (2007) đã nghiên cứu sấy mực ống lột da bằng thiết bị sấy gồm bức xạ hồng ngoại kết hợp không khí có nhiệt độ thấp cho kết quả cho thấy thời gian sấy 10 ÷ 12 giờ, màu sắc trắng trong, khô đều, phẳng, hầu như không có nấm mốc, hàm lượng NH₃ sau khi sấy tăng lên không đáng kể so với trước khi sấy.

Lê Thị Đoan Thủy (2012), nghiên cứu chế độ sấy hành lá bằng phương pháp bom nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại cho thấy phương pháp sấy này giúp giảm thời gian sấy nhờ việc tăng quá trình khuếch tán từ đó giữ được hàm lượng vitamin cao, màu sắc tự nhiên của nguyên liệu ít bị biến đổi, duy trì được mùi thơm đặc trưng khi ở cùng điều kiện sấy so với mẫu sấy lạnh. Sự kết hợp giữa sấy bức xạ hồng ngoại và

bơm nhiệt tạo ra một phương pháp sấy hiệu quả đối với nguyên liệu có bề dày nhỏ, giúp khai thác triệt để ưu điểm của cả hai phương pháp.

Bùi Ngọc Hùng và ctv (2017), nghiên cứu sấy rong nho bằng các phương pháp sấy: không khí nóng, không khí nóng kết hợp hồng ngoại, bơm nhiệt, bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại nhằm xác định phương pháp sấy và chế độ sấy phù hợp. Kết quả cho thấy thời gian khi sấy rong nho bằng phương pháp không khí nóng là dài nhất (80 phút); phương pháp bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại có thời gian sấy ngắn nhất (35 phút). Độ hồi nguyên của mẫu rong sấy bằng không khí nóng kết hợp bức xạ hồng ngoại và bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại thì đạt 85,20% và 89,46%. Mẫu rong sấy bằng phương pháp bơm nhiệt có độ lệch màu thấp nhất ($\Delta E^* = 4,9$), trong khi mẫu rong nho sấy bằng phương pháp sấy không khí nóng có độ lệch màu lớn nhất ($\Delta E^* = 6,5$).

1.4. Thực trạng sấy mực ống tại các cơ sở sản xuất

1.4.1. Phương pháp phơi nắng

Hiện nay, phơi nắng (hình 1.4) là phương pháp làm khô mực phổ biến tại Việt Nam và nhiều nước trên thế giới. Do sử dụng nguồn năng lượng trực tiếp từ bức xạ mặt trời nên phương pháp này có ưu điểm là đơn giản và chi phí đầu tư thấp. Tuy nhiên, phương pháp này làm giảm chất lượng của sản phẩm vì một số nguyên nhân như: phụ thuộc vào thời tiết nên không chủ động trong sản xuất; khó kiểm soát chế độ sấy, dễ nhiễm bụi bẩn do đó chất dinh dưỡng của mực sau khi phơi nắng không ổn định; tốn nhiều mặt bằng và nhân công, chất lượng khó đồng đều (Huỳnh Thị Kim Cúc, 2012).



Hình 1.4. Phơi mực kiểu nằm trên lưới và treo

1.4.2. Phương pháp sấy không khí nóng

Không khí nóng được gia nhiệt bằng than gỗ, khí đốt hoặc bằng hơi nước bão hòa. Phương pháp này có ưu điểm là mực được làm khô liên tục nên chất lượng sản phẩm được cải thiện đáng kể so với phương pháp phơi nắng; cấu tạo đơn giản, hoạt động, vận hành dễ dàng, tiết kiệm thời gian và lao động. Tuy nhiên, ở Việt Nam độ ẩm của không khí khá cao, trung bình khoảng trên dưới 80% nên thường phải sấy ở nhiệt độ cao và thời gian sấy thường kéo dài nên hao hụt nhiều dinh dưỡng; màu sắc biến đổi, mất hương vị tự nhiên, sản phẩm bị biến dạng (cong, vênh...).

1.4.3. Phương pháp sấy bơm nhiệt

Hiện nay máy sấy bơm nhiệt được sử dụng khá phổ biến phù hợp với các sản phẩm nhạy cảm về nhiệt và những sản phẩm sấy khô cần ở nhiệt độ thấp, như sản phẩm hải sản, nấm....

Phương pháp sấy bơm nhiệt là phương pháp sử dụng thiết bị bơm nhiệt để tách ẩm cho TNS. TNS là không khí trước hết được đưa qua dàn bay hơi để tách ẩm bằng cách làm lạnh dưới nhiệt độ đọng sương sau đó tiếp tục được đưa đến dàn ngưng tụ và gia nhiệt đến nhiệt độ yêu cầu sau đó TNS đi qua VLS.

Phương pháp sấy này có ưu điểm như: Đảm bảo vệ sinh, giữ được hàm lượng chất dinh dưỡng, màu sắc, mùi vị của sản phẩm hơn so với phương pháp sấy không khí nóng. Tuy nhiên nhược điểm của phương pháp này là do sấy ở nhiệt độ thấp nên thời gian sấy kéo dài do gradient nhiệt độ giữa TNS và VLS thấp.

1.4.4. Phương pháp sấy vi sóng

Thiết bị sấy vi sóng hoạt động theo nguyên tắc khi VLS được đặt trong trường điện từ thay đổi với tần số của vi sóng, làm cho các phân tử nước dao động. Sự dao động của các phân tử nước sẽ tạo ra va chạm và gây ra ma sát giữa các phân tử chuyển động, từ đó sinh ra nhiệt và làm nóng vật liệu.

Phương pháp sấy vi sóng có ưu điểm là thời gian làm nóng nhanh, giúp giảm thời gian sấy; thiết bị tiết kiệm năng lượng, bảo vệ môi trường. Tuy nhiên có các mặt hạn chế như: sản phẩm sau khi sấy có độ cứng cao hơn so với các phương pháp sấy khác; vật tư thiết bị đắt tiền và khó thay thế và sửa chữa; chi phí đầu tư cao.

1.5. Thảo luận

Qua kết quả nghiên cứu đã công bố của các công trình nghiên cứu trong và ngoài nước ở trên cho thấy phương pháp sấy bằng vi sóng có thời gian sấy ngắn, nhưng sản phẩm mực có độ cứng cao nên không phù hợp để sấy mực (Wang, 2014; Chen, 2013). Phương pháp sấy thăng hoa mặc dù cho chất lượng sản phẩm tốt nhưng chi phí đầu tư máy thiết bị và chi phí sấy quá cao nên không phù hợp để sấy mực. Phương pháp sấy bơm nhiệt có sự hỗ trợ của bức xạ hồng ngoại có ưu điểm là chi phí đầu tư hệ thống hồng ngoại thấp (Mujumda, 2014), an toàn trong sử dụng (Ning và ctv, 2015) và chi phí tiêu thụ năng lượng giảm (Nathakaranakule, 2010). Đặc biệt, chất lượng của sản phẩm được cải thiện rõ rệt do bức xạ sóng hồng ngoại có khả năng thẩm thấu vào bên trong VLS giúp gia nhiệt đều nên giảm được gradient nhiệt độ trên toàn bộ thể tích vật liệu. Bên cạnh đó bức xạ hồng ngoại có tính diệt khuẩn nên giữ cho sản phẩm đảm bảo chất lượng vệ sinh an toàn thực phẩm. Hiện nay, các nghiên cứu chỉ tập trung vào việc so sánh chất lượng giữa các phương pháp với nhau hoặc xác định chế độ sấy phù hợp mà chưa có nhiều nghiên cứu về bản chất truyền nhiệt truyền ẩm (TNTA) khi sấy có bổ sung năng lượng từ bức xạ hồng ngoại. Đã có một số tác giả (Meeso, 2007; Swasdisevi, 2007) tiến hành nghiên cứu lý thuyết về mô hình toán của quá trình TNTA khi sử dụng phương pháp sấy bơm nhiệt hoặc không khí nóng kết hợp hồng ngoại, tuy nhiên các mô hình toán này chưa xét đến ảnh hưởng của dòng dịch chuyển ẩm đến quá trình dẫn nhiệt.

Đã có nhiều mô hình toán thực nghiệm được xây dựng để mô tả sự biến thiên độ chứa ẩm theo thời gian. Tuy nhiên các mô hình này cũng chưa mô tả đầy đủ ảnh hưởng của bức xạ nhiệt từ sóng hồng ngoại lên trường nhiệt độ của VLS (Vega-Gálvez, 2011; Deng, 2011). Cho đến nay, theo tìm hiểu của tác giả hầu như chưa có mô hình toán lý thuyết nào được đưa ra nhằm mô tả quá trình TNTA khi sấy mực ống với đầy đủ các ảnh hưởng nêu trên.

Căn cứ vào các kết quả phân tích trên và từ thực trạng sấy mực ống tại các cơ sở ở Việt Nam. Chúng tôi lựa chọn phương pháp sấy bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại để làm cơ sở nghiên cứu quá trình sấy khô mực ống. Luận án tiến hành xây dựng mô

hình toán nhằm mô phỏng quá trình TNTA khi xét đến ảnh hưởng của dòng dịch chuyển ẩm lên dẫn nhiệt trong QTS. Sau khi nghiên cứu lý thuyết, tiến hành nghiên cứu thực nghiệm để kiểm chứng lý thuyết và xác định chế độ sấy thích hợp cho mục ống với mục tiêu nâng cao chất lượng sản phẩm.

1.6. Kết luận chương 1

Trong chương này chúng tôi đề xuất một số vấn đề cần giải quyết của luận án như sau:

1. Lựa chọn phương pháp sấy bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại để nghiên cứu lý thuyết quá trình sấy mục ống thông qua việc xây dựng và giải hệ phương trình TNTA khi có xét đến ảnh hưởng của dòng dịch chuyển ẩm đến dòng nhiệt và nguồn bức xạ nhiệt bổ sung.

2. Nghiên cứu thực nghiệm nhằm kiểm chứng lý thuyết và xác định chế độ sấy phù hợp đối với máy sấy bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại khi sấy mục ống.

Chương 2

VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu nghiên cứu

Vật liệu nghiên cứu là mực ống Trung Hoa có tên khoa học *Loligo chinensis* (hình 2.1), đây là loại thủy sản có sản lượng lớn và có giá trị xuất khẩu cao tại Việt Nam, với sản lượng đánh bắt hàng năm khoảng 24000 tấn, trong đó vùng biển Miền Nam có sản lượng cao nhất là khoảng trên 16000 tấn, vịnh Bắc Bộ chiếm sản lượng thứ nhì khoảng 5000 tấn, biển miền Trung thấp nhất khoảng 2500 tấn. Chính vì vậy luận án tập trung nghiên cứu vào loại mực ống, mực chọn làm thí nghiệm được đánh bắt từ vùng biển Vũng Tàu, có trọng lượng của mỗi con từ $300 \div 350$ g và có chiều dài 250 ± 10 mm, chiều rộng 140 ± 10 mm, chiều dày thân mực $6 \pm 0,5$ mm.



Hình 2.1. Mực ống Trung Hoa (*Loligo chinensis*)

2.2. Phương pháp nghiên cứu lý thuyết

Qua các kết quả nghiên cứu trong và ngoài nước khi sấy mực ống cho thấy các tác giả thường sử dụng mô hình toán thực nghiệm để xây dựng mối quan hệ biến thiên độ chứa ẩm với thời gian sấy. Một số công trình nghiên cứu mô hình toán lý thuyết,

tuy nhiên khi nghiên cứu các tác giả thường bỏ qua ảnh hưởng của dòng ẩm đến hiện tượng dẫn nhiệt đối với một số loại sản phẩm như thóc, khoai tây, cà rốt... (Meeso, 2007; Trương Minh Thắng, 2014). Vì vậy, hệ phương trình TNTA chúng tôi có xét đến hiện tượng khuếch tán ẩm ảnh hưởng đến truyền nhiệt thông qua nhiệt lượng cần thiết cấp cho ẩm biến đổi pha từ lỏng thành hơi trong VLS và dòng nhiệt do nguồn bức xạ hồng ngoại bổ sung trong quá trình sấy.

Các tính chất nhiệt vật lý của VLS là thông số quan trọng và ảnh hưởng đến kết quả trong việc giải hệ phương trình TNTA. Các đại lượng nhiệt vật lý của VLS phụ thuộc vào độ ẩm, vùng miền, độ sinh sản, quốc gia và đã được nhiều tác giả chứng minh trong nhiều tài liệu (Rahman và ctv, 2007; Choi và ctv, 1986). Vì vậy, trong luận án này chúng tôi sẽ tiến hành xác định các tính chất nhiệt vật lý của mực ống được dùng làm vật liệu nghiên cứu.

Hệ phương trình TNTA được giải bằng phương pháp sai phân hữu hạn. Đây là một công cụ được nhiều tác giả sử dụng để giải hệ phương trình vi phân bằng cách chuyển các hệ phương trình này về dạng sai phân như công trình (Meeso, 2007). Thuật toán giải hệ phương trình này được chúng tôi trình bày chi tiết trong chương 3.

Nghiệm của hệ phương trình TNTA là cơ sở để đánh giá, so sánh và phân tích các vấn đề liên quan đến động học QTS như ảnh hưởng của nhiệt độ TNS, vận tốc TNS, công suất phát hồng ngoại ... đến thay đổi độ ẩm trong VLS.

2.3. Phương pháp xác định các thông số nhiệt vật lý của mực

2.3.1. Xác định khối lượng riêng

Bằng thực nghiệm nhiều tác giả đã sử dụng phương pháp thể tích thể chỗ với dung môi toluene và n-hepane để xác định khối lượng riêng của nhiều loại thực phẩm nông nghiệp và các thực phẩm tươi sống. Trong đó toluene là dung môi không phản ứng hóa học với các hợp chất cấu thành vật liệu, hơn nữa có tỉ trọng thấp nên vật liệu có thể chìm hoàn toàn trong dung môi, do đó đã được nhiều tác giả sử dụng làm dung môi để xác định khối lượng riêng của vật liệu. Tác giả Levi và ctv (1995), Costa và ctv (2001) đã thực nghiệm xác định khối lượng riêng của cà rốt, chuối bằng phương pháp thể tích thể chỗ với dung môi là toluene và n-hepane; Yan và ctv (2008) đã xác

định khối lượng riêng của chuỗi bằng phương pháp thể tích thể chỗ với dung môi là Toluene. Trong luận án này, phương pháp thể tích thể chỗ với dung môi là toluene được sử dụng để xác định khối lượng riêng của mực.

2.3.2. Xác định nhiệt dung riêng

Nhiệt dung riêng của vật liệu được xác định bằng thực nghiệm trên cơ sở cân bằng nhiệt lượng trong điều kiện đoạn nhiệt. Phương pháp hỗn hợp, so sánh và phương pháp tấm chắn là những phương pháp thường được dùng để đo nhiệt dung riêng của các vật liệu (Rahman, 2007). Trong đó phương pháp hỗn hợp được sử dụng rộng rãi để xác định nhiệt dung riêng của nguyên liệu thực phẩm do đơn giản và chính xác. Nhiều nhà nghiên cứu đã sử dụng phương pháp hỗn hợp để đo nhiệt dung riêng của đậu nành, hạt mỡ, hạt kê và hải sản (Aviara và ctv, 2011; Subramanian và ctv, 2003; Rahman, 1993). Bên cạnh đó, phương pháp đồng thời xác định hệ số dẫn nhiệt, khuếch tán nhiệt và nhiệt dung riêng (Lê Quang Huy, 2017) đã được sử dụng, bước đầu cho thấy hiệu quả và độ chính xác trong quá trình xác định các thông số. Tuy nhiên trong luận án này, phương pháp hỗn hợp được sử dụng để xác định nhiệt dung riêng của mực do kinh nghiệm và khả năng thực hiện dễ dàng.

2.3.3. Xác định hệ số dẫn nhiệt

Rahman và Potluri (1991) đã sử dụng phương pháp que dò để xác định hệ số dẫn nhiệt của mực (k_p). Kết quả cho thấy, hệ số dẫn nhiệt của mực là $k_p = 0,49$ W/(m.K). Trong nghiên cứu này, $k_p = 0,49$ W/(m.K) được sử dụng trực tiếp trong các tính toán.

2.4. Phương pháp xác định độ ẩm cân bằng của mực

Độ ẩm cân bằng là tham số quan trọng để dự đoán những thay đổi độ ẩm của sản phẩm trong QTS và bảo quản. Mối quan hệ giữa độ ẩm cân bằng của mực và độ ẩm tương đối cân bằng là yếu tố cần thiết để kiểm soát QTS. Trong luận án này, độ ẩm cân bằng của mực được xác định thông qua việc xây dựng đường đẳng nhiệt của mực ống. Sử dụng dung dịch muối bão hòa (Rahman và ctv, 2007) đặt trong môi trường khép kín để tạo ra môi trường có độ ẩm ổn định theo nhiệt độ.

2.5. Phương pháp xác định nhiệt ẩn hóa hơi của ẩm trong vật liệu mực ống

Trong QTS năng lượng cần thiết làm ẩm lông từ trong lòng dịch chuyển ra bề mặt VLS và thoát ra môi trường TNS dưới dạng hơi ẩm sẽ phụ thuộc vào một vài thông số sấy trong đó có thông số nhiệt ẩn hóa hơi của nước trong VLS. Một số nghiên cứu về TNTA đã công bố, thông số này thường được các tác giả sử dụng nhiệt ẩn hóa hơi của nước tự do. Tuy nhiên, nhiệt ẩn hóa hơi của nước trong vật liệu (h_{fg}) khác so với nhiệt ẩn hóa hơi của nước tự do vì nó phụ thuộc vào một số các thông số nhiệt vật lý của VLS. Vì vậy nhiều nhà khoa học đã thực hiện nghiên cứu xác định công thức tính h_{fg} cho VLS trong QTS. Brooker và ctv (1992) đã thực nghiệm tìm ra công thức tính toán h_{fg} cho một vài sản phẩm trên cơ sở hiệu chỉnh công thức của Brook và Foster (1981). Trong đó, mối quan hệ h_{fg}/h_{fgo} chỉ phụ thuộc vào độ ẩm của vật liệu. Trong nghiên cứu này, nhiệt ẩn hóa hơi được xác định thông qua độ ẩm cân bằng của vật liệu và khi xác định bỏ qua ảnh hưởng của yếu tố nhiệt độ.

2.6. Phương pháp nghiên cứu thực nghiệm kiểm chứng lý thuyết và xây dựng chế độ sấy

2.6.1. Phương pháp quy hoạch thực nghiệm

Thực hiện phương pháp thực nghiệm đơn yếu tố để xác định mối quan hệ tương quan giữa các thông số công nghệ và xác định giá trị hợp lý của các thông số để làm cơ sở thực hiện giai đoạn thực nghiệm đa yếu tố tiếp theo.

Phương pháp nghiên cứu thực nghiệm đa yếu tố xây dựng bằng mô hình thống kê có dạng “hộp đen”. Mô hình thực nghiệm đa yếu tố có dạng phi tuyến (bậc II) và được kiểm tra tính đúng đắn bằng các tiêu chuẩn thống kê. Phương án thực nghiệm đa yếu tố được áp dụng là dạng bất biến quay.

2.6.1.1. Xác định các thông số nghiên cứu

a. Xác định các hàm mục tiêu (các thông số đầu ra)

Các thông số đầu ra là các chỉ tiêu chất lượng và kỹ thuật của đối tượng nghiên cứu. Các thông số đầu ra của thiết bị sấy nghiên cứu gồm có: thời gian sấy, phần trăm hàm lượng protein, phần trăm hàm lượng NH_3 , màu sắc, độ cứng, tổng số lượng vi sinh vật hiếu khí

Thời gian sấy là thời gian của quá trình giảm ẩm từ độ ẩm ban đầu đến khi đạt độ ẩm yêu cầu, đây là một trong các yếu tố ảnh hưởng đến chất lượng, nhân công, chi phí điện năng tiêu hao trên toàn bộ các thiết bị điện theo mô hình sấy thực nghiệm và được sử dụng làm tiêu chí để đánh giá.

Vi sinh vật hiếu khí là chỉ tiêu để đánh giá chất lượng thực phẩm về vi sinh vật, nguy cơ hư hỏng, thời hạn bảo quản của thực phẩm. Tuy nhiên chỉ tiêu này đã được nhiều công trình nghiên cứu và chứng minh khi sấy có hỗ trợ của hồng ngoại tổng số vi khuẩn hiếu khí giảm đáng kể so với các phương pháp sấy khác (Kang và ctv, 2011; Deng và ctv, 2011) do bức xạ hồng ngoại có khả năng diệt khuẩn.

Hàm lượng protein (TCVN, 2014) và axit amin là phần trăm hàm lượng còn lại sau khi sấy, đây là các chỉ tiêu để đánh giá chất lượng của mực ống. Tuy nhiên, theo nghiên cứu Deng và ctv (2011) khi nghiên cứu thực nghiệm bằng phương pháp sấy bơm nhiệt và bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại tại các mức công suất 500 W, 1000 W và 2000 W cho thấy rằng hàm lượng protein và axit amin thay đổi không đáng kể khi ở các phương pháp và công suất hồng ngoại khác nhau. Công trình nghiên cứu của tác giả Trần Đại Tiến (2007) đã đánh giá chất lượng của mực ống lột da thông qua hàm lượng NH_3 , đây là thông số đánh giá chất lượng sản phẩm gián tiếp thông qua hàm lượng NH_3 .

Màu sắc là một trong những tính chất quan trọng của thực phẩm, đối với mực khô xuất khẩu màu sắc được so sánh với các mẫu chuẩn để đánh giá và phân loại chất lượng. Tuy nhiên chỉ tiêu này thường được đánh giá bằng phương pháp cảm quan do đó chất lượng thực phẩm chủ yếu dựa vào kinh nghiệm của người đánh giá.

Độ cứng là thuộc tính cơ học của cấu trúc liên quan đến cường độ lực để làm cho sản phẩm biến dạng, xuyên thủng hoặc cắt đứt. Thuộc tính này ảnh hưởng lớn đến trạng thái về độ dai, dẻo của sản phẩm (TCVN, 2014), vì vậy chỉ tiêu này đã được nhiều công trình nghiên cứu lấy làm chỉ tiêu đánh giá chất lượng của mực, cụ thể như công trình nghiên cứu Wang (2014), Chen (2013) hay công trình nghiên cứu của tác giả Trần Đại Tiến (2007) đã xác định ứng suất cản cắt để đánh giá độ cứng của mực ống lột da sau khi sấy.

Như vậy để đánh giá chỉ tiêu chất lượng và kỹ thuật của sản phẩm phù hợp ở điều kiện Việt Nam. Chúng tôi lựa chọn các mục tiêu sau đây để đưa vào mô hình nghiên cứu.

- Thời gian sấy t (phút), được ký hiệu là Y_1
- Phần trăm hàm lượng NH_3 (%mg), ký hiệu hóa là Y_2
- Ứng suất cắt U_{sC} (N/cm^2), được ký hiệu là Y_3

b. Xác định các thông số vào

Thông số đầu vào là yếu tố ảnh hưởng đến các chỉ tiêu về chất lượng. Các thông số đầu vào và giá trị vùng nghiên cứu được xác định dựa trên cơ sở kế thừa từ công trình nghiên cứu đã được công bố hoặc từ thực nghiệm thăm dò.

Như đã phân tích thời gian sấy, hàm lượng NH_3 và độ cứng sản phẩm là các chỉ tiêu kỹ thuật để đánh giá thiết bị sấy mực. Trong đó các yếu tố ảnh hưởng đến chỉ tiêu này gồm: nhiệt độ TNS, vận tốc TNS, công suất phát nguồn hồng ngoại, độ ẩm TNS.

❖ Nhiệt độ TNS T_a ($^{\circ}\text{C}$)

Nhiệt độ TNS đóng vai trò gia nhiệt cho VLS và làm thay đổi độ ẩm tương đối của TNS để tạo ra động lực sấy. Trong đa số các trường hợp khi nhiệt độ sấy cao sẽ thúc đẩy QTS nhanh hơn, tuy nhiên khi nhiệt độ sấy cao dẫn đến chất lượng mực suy giảm (Vega-Galvez và ctv, 2011). Do đó nhiệt độ của TNS là thông số ảnh hưởng nhiều đến thời gian sấy.

❖ Vận tốc TNS v (m/s)

Vận tốc TNS là yếu tố có ảnh hưởng rất lớn đến khả năng trao đổi nhiệt, ẩm thông qua hệ số trao đổi nhiệt và trao đổi ẩm đối lưu giữa VLS và TNS.

❖ Độ ẩm tương đối của TNS φ_a (%)

Độ ẩm tương đối của TNS là thông số ảnh hưởng đến thời gian sấy. Khi độ ẩm tương đối của TNS thấp thì khả năng tiếp nhận ẩm lớn do động lực QTS lớn. Tuy nhiên, thông số này rất khó điều chỉnh, luôn thay đổi do phụ thuộc vào độ chứa ẩm của VLS và nhiệt độ TNS thực tế.

❖ Công suất phát nguồn hồng ngoại P (W)

Công suất nguồn phát hồng ngoại là thông số ảnh hưởng đến thời gian sấy và độ cứng của sản phẩm. Khi công suất hồng ngoại càng lớn khả năng hấp thụ bức xạ nhiệt càng lớn làm mất nước nhanh làm cho độ cứng của mực tăng.

Để xác định được các chỉ tiêu phù hợp, các thông số đầu vào phải thực sự ảnh hưởng đến quá trình nghiên cứu. Do có nhiều thông số ảnh hưởng đến các chỉ tiêu nghiên cứu, vì vậy trong quá trình nghiên cứu để giảm số lượng thí nghiệm mà vẫn đảm bảo độ chính xác của thí nghiệm, chúng tôi sẽ loại bỏ các thông số ít ảnh hưởng hoặc thông số đó không điều khiển được.

Qua phân tích ở trên và loại bỏ các thông số ít ảnh hưởng đến chỉ tiêu nghiên cứu. Các thông số đầu vào cần đưa vào mô hình nghiên cứu thực nghiệm bao gồm:

- Vận tốc của TNS v (m/s)
- Nhiệt độ của TNS T_a ($^{\circ}\text{C}$)
- Công suất hồng ngoại P (W)

Theo kết quả nghiên cứu tổng quan các công trình nghiên cứu trước đó, chúng tôi lựa chọn phạm vi nghiên cứu của các thông số đầu vào có giá trị như sau:

- Qua tham khảo, kế thừa một số công trình đã công bố như của Deng và ctv (2014), Chen và ctv (2013), Kang và ctv (2011), chọn phạm vi nghiên cứu nhiệt độ TNS nằm trong giới hạn từ $40 \div 50^{\circ}\text{C}$.

- Kế thừa công trình nghiên cứu của Xiaoyong và ctv (2016), Deng và ctv (2014), Nathakaranakul (2007), chọn phạm vi nghiên cứu công suất phát hồng ngoại nằm trong khoảng $250 \text{ W} \div 750 \text{ W}$.

- Theo nghiên cứu của wang và ctv (2014), Mesery và ctv (2014), Kang và ctv (2011), chọn phạm vi nghiên cứu vận tốc TNS nằm trong khoảng $0,6 \div 1,4 \text{ m/s}$.

2.6.1.2. Lập ma trận thí nghiệm

Phương pháp quy hoạch thực nghiệm được tiến hành theo dạng bậc hai nếu bậc một không phù hợp. Quá trình bố trí thí nghiệm theo kiểu ngẫu nhiên hoàn toàn, ma trận thực nghiệm được lập trên máy tính bằng chương trình Statgraphics centurion 17.

Phương án thực nghiệm bậc II được chọn dạng bất biến quay. Theo Nguyễn Cảnh (2016), số lượng thí nghiệm được xác định theo công thức như sau.

$$N = 2^k + 2k + n_0 \quad (2.1)$$

Trong đó: k – số yếu tố nghiên cứu đầu vào của bài toán.

2^k – số lượng thí nghiệm ở mức trên và mức dưới.

$2k$ – số lượng thí nghiệm ở mức điểm sao $\pm \alpha$.

n_0 – số lượng thí nghiệm lặp lại ở mức cơ sở.

2.6.1.3. Xây dựng mô hình hồi quy thực nghiệm

Sử dụng chương trình Statgraphics centurion 17 để lập ma trận thí nghiệm, xác định các hệ số hồi quy, phân tích phương sai mô hình thống kê thực nghiệm trong các bài toán quy hoạch thực nghiệm.

Nội dung bài toán qui hoạch thực nghiệm thực hiện theo các bước:

1. Lập ma trận thí nghiệm có tiến hành ngẫu nhiên hóa thí nghiệm.
2. Tiến hành phân tích phương sai để loại bỏ các hệ số hồi quy không đảm bảo độ tin cậy với mức ý nghĩa $\alpha = 0,05$.
3. Thực nghiệm phân tích phương sai trên bài toán mới.
4. Xác định giá trị các hệ số hồi quy theo hàm toán mới sau khi đã loại các hệ số hồi quy không đủ độ tin cậy.
5. Kiểm tra sự phù hợp của mô hình theo tiêu chuẩn Fisher với trình tự

$$F_t = \left(\frac{MSL_f}{MSE_p} \right) \leq F_b \quad (2.2)$$

MSL_f - phương sai tương thích, được xét từ nguồn biến không phù hợp ở bảng phân tích phương sai.

MSE_p - phương sai tái hiện, được xác định từ nguồn sai số thuần ở bảng phân tích phương sai;

F_b - giá trị bảng của tiêu chuẩn Fisher được tra với mức ý nghĩa $\alpha = 0,05$.

2.6.1.4. Đánh giá độ chính xác của mô hình hồi quy

Áp dụng phương pháp khử sai số thô, khi thực hiện thí nghiệm nhận thông tin để loại bỏ sai số thô.

Áp dụng phương pháp phân tích phương sai (ANOVA) để đánh giá mức độ ảnh hưởng của thông số nghiên cứu đến quá trình nghiên cứu chỉ là ngẫu nhiên hay có ảnh hưởng thực sự. Phương pháp này giúp loại bỏ các yếu tố ảnh hưởng kém đến quá trình nghiên cứu cũng như mức độ tương quan. Ngoài ra còn giúp kiểm tra các giả thiết đồng thời phương sai, độ tin cậy của các hệ số hồi quy và mức độ phù hợp của mô hình lựa chọn theo tiêu chuẩn Fisher khi thực nghiệm.

2.6.2. Phương pháp tối ưu hóa mô hình

Phương pháp tối ưu hóa được xây dựng trên cơ sở các hàm toán là các phương trình hồi quy, xác định được bằng phương pháp qui hoạch thực nghiệm. Các phương trình này xác định hàm mục tiêu với các chỉ tiêu tối ưu đặc trưng cho chất lượng và kỹ thuật của thiết bị sấy như: thời gian sấy, hàm lượng NH_3 , ứng suất cắt của sản phẩm sau khi sấy.

Hàm điều kiện là các ràng buộc kỹ thuật và ràng buộc về vùng thực nghiệm nghiên cứu.

Bài toán tối ưu hóa được giải bằng phần mềm Excel trên máy tính.

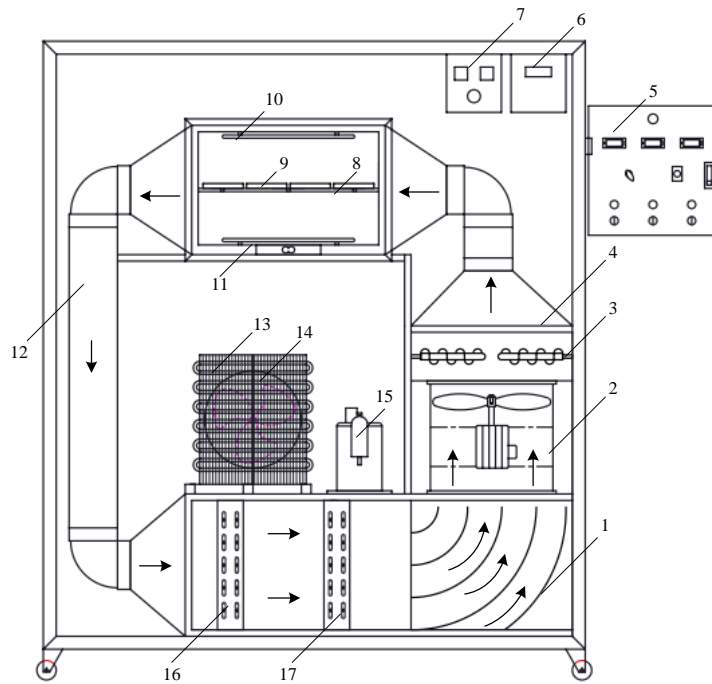
2.6.3. Thiết bị thực nghiệm

Thiết bị sấy mực ống dùng trong thực nghiệm là máy sấy bơm nhiệt của khoa Cơ khí công nghệ, trường Đại học Nông Lâm thành phố Hồ Chí Minh (Nguyễn Hay và ctv, 2014). Để phù hợp với các nội dung nghiên cứu lý thuyết thiết bị được sửa chữa và lắp đặt thêm hai thanh đèn hồng ngoại, 2 bộ điều khiển nhiệt độ để đo nhiệt độ VLS, bộ điều khiển công suất phát hồng ngoại, khay sấy và các thiết bị phụ trợ kèm theo (hình 2.3).

▪ Nguyên lý hoạt động

Mực ống được sơ chế sau đó đưa vào buồng sấy đặt lên khay lưới (8), đặt cảm biến nhiệt độ vào thân mực. Đóng cửa buồng sấy, cài đặt nhiệt độ sấy theo yêu cầu, sau đó khởi động quạt và bơm nhiệt tại tủ điều khiển (5). TNS đi qua dàn bay hơi (16) để tách ẩm và tiếp tục đi qua dàn ngưng tụ (17) để gia nhiệt, được quạt hút và thổi qua bộ phận gia nhiệt phụ (3) đạt đến nhiệt độ yêu cầu và qua ống gió (4), theo đường ống vào buồng sấy, bên cạnh đó mực ống được gia nhiệt bằng bức xạ hồng

ngoại thông qua bộ điều khiển công suất phát (7) gồm thanh đèn phía trên (10) và thanh đèn phía dưới (11). Hai nguồn nhiệt này sẽ làm nóng vật liệu, từ đó ẩm trong mực được dịch chuyển ra bề mặt ngoài và hóa hơi được TNS mang ra khỏi buồng sấy theo đường ống TNS (12), sau đó được hồi lưu về trước dàn bay hơi để tách ẩm và lặp lại chu trình như trên cho đến khi độ ẩm mực đạt yêu cầu. Sơ đồ nguyên lý của thiết bị thực nghiệm được trình bày trên hình 2.2.



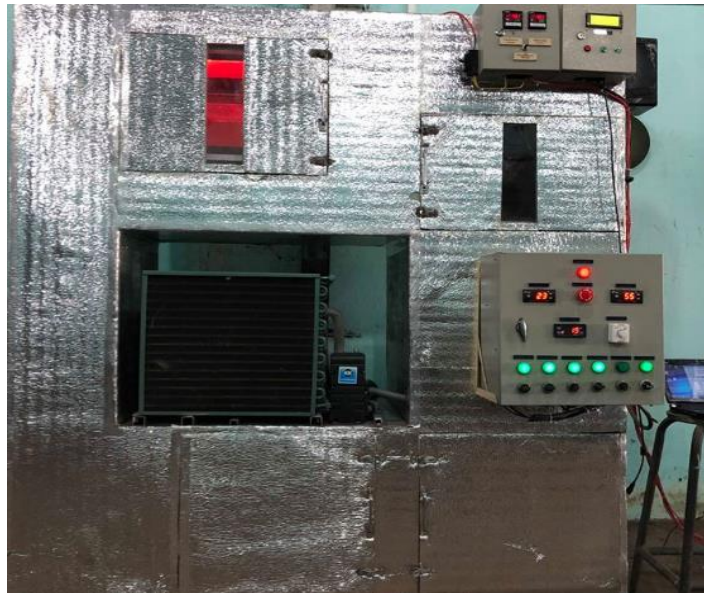
Hình 2.2. Sơ đồ nguyên lý của thiết bị sấy mực ống

1. Cánh hướng dòng; 2. Quạt dọc trục; 3. Điện trở phụ; 4. Ống gió; 5. Tủ điều khiển; 6. Bộ điều khiển và hiển thị trọng lượng; 7. Bộ điều khiển HN; 8. Khay chứa vật liệu; 9. Vật liệu sấy; 10. Thanh đèn hồng ngoại trên; 11. Thanh đèn hồng ngoại dưới; 12. Ống hồi TNS; 13. Dàn ngưng tụ phụ; 14. Quạt dàn ngưng tụ phụ; 15. Máy nén; 16. Dàn bay hơi; 17. Dàn ngưng tụ chính.

▪ **Thông số kỹ thuật cơ bản của thiết bị thực nghiệm**

- Kích thước máy sấy: 1650 x 700 x 1750 mm
- Kích thước buồng sấy: 600 x 400 x 400 mm
- Kích thước khay sấy: 580 x 300 x 3 mm
- Công suất máy nén: 1,5 HP

- Công suất động cơ quạt: 0,5 HP
- Công suất dàn bay hơi: 1,5 HP
- Công suất dàn ngưng chính: 1,5 HP
- Công suất dàn ngưng phụ: 1,0 HP
- Công suất bộ điện trở phụ: 2 kW
- Tốc độ TNS: 0,3 ÷ 2,0 m/s
- Nhiệt độ TNS: 30 ÷ 60°C
- Điện áp sử dụng: 3pha 220/380V/50Hz
- Công suất hồng ngoại 0 ÷ 2000 W (gồm hai thanh đèn)



Hình 2.3. Thiết bị sấy mực ống

2.6.4. Thiết bị đo

- Sử dụng thiết bị đo vận tốc TNS nhãn hiệu Anemometer and Humidity Meter AM – 4205, có khoảng đo 0,4 ÷ 2,5 m/s, sai số $\pm 3\%$.
- Cân điện tử HZ TP-A-300 g của Đài Loan có độ chính xác $\pm 0,01$ g, giới hạn đo 300 g.
- Sử dụng bộ điều khiển độ ẩm FOX – 1H của Hàn Quốc, phạm vi đo 20 ÷ 90% RH, sai số $\pm 1\%$, cảm biến đầu vào HS – 220, điện áp sử dụng 230VAC 50/60 Hz.
- Bộ điều khiển nhiệt độ mã hiệu EW -181 hãng Ewelly, thang đo là 1°C, độ chính xác $\pm 1^\circ\text{C}$. Cảm biến nhiệt độ dạng sợi loại Pt100, đường kính 4 mm, chiều dài

thân dò 50 mm, sử dụng khoảng đo từ $1 \div 80^{\circ}\text{C}$ để đo nhiệt độ TNS,

- Bộ điều khiển nhiệt độ mã hiệu E5CN hãng Omron của Nhật Bản, thang đo là $0,1^{\circ}\text{C}$. Cảm biến nhiệt Pt100 đường kính 1,5 mm, chiều dài thân cảm biến 20 mm, sử dụng khoảng đo từ $0 \div 100^{\circ}\text{C}$.

- Sử dụng cảm biến trọng lượng PW6CMR, khoảng đo $0 \div 5$ kg và bộ hiển thị K3HB – VLC, sai số 0,3%.

- Đồng hồ Ampe kìm của Kyoritsu của Nhật Bản để đo cường độ dòng điện, sử dụng khoảng đo $0 \div 200$ A, sai số $\pm 0,1$ A.

- Đồng hồ số mã hiệu CD 800a của hãng Sanwa, khoảng đo $0 \div 600$ V, dải tần số AC $40 \div 400$ Hz, sai số $\pm 0,1$ V.

- Thước kẹp điện tử của Mitutoyo của Nhật Bản để đo chiều dày VLS, khoảng đo từ $0 \div 150$ mm, sai số $\pm 0,01$ mm.

- Nhiệt kế hồng ngoại có nhãn hiệu Infrared Thermometer Center 350, khoảng đo $-20 \div 500^{\circ}\text{C}$, độ chính xác $\pm 2\%$.

2.6.5. Phương pháp đo các thông số

Để thực hiện đo và lấy số liệu trên thiết bị, các cảm biến nhiệt độ, độ ẩm và trọng lượng trên thiết bị sắp được bố trí như hình 2.4.

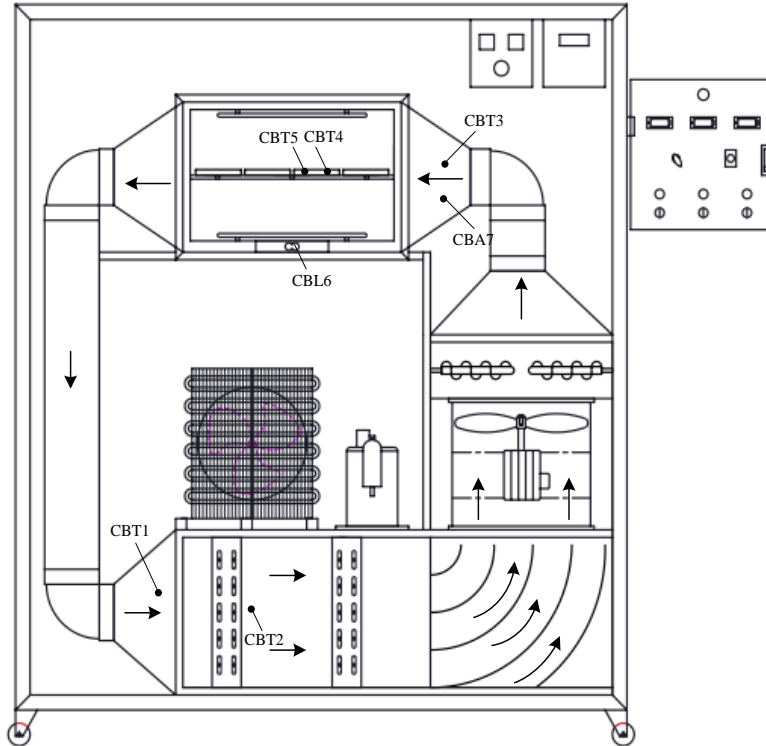
- Nhiệt độ TNS được đo bằng cảm biến nhiệt độ Pt100 và được lắp đặt tại vị trí CBT3 (hình 2.4). Nhiệt độ này được hiển thị và cài đặt thông qua bộ điều khiển Ewelly.

- Độ ẩm TNS được đo bằng cảm biến HS -220, lắp đặt tại vị trí CBA7 (hình 2.4) và thể hiện trên màn hình FOX -1H.

- Vận tốc TNS được đo bằng dụng cụ AM – 4205, thông số này được điều chỉnh và cài đặt cố định trong suốt QTS.

- Nhiệt độ VLS được đo bằng cách sử dụng hai cảm biến nhiệt độ Pt100 xuyên vào thân mực ở phần đầu và phần cuối thân mực (hình 2.4), thông qua bộ điều khiển và hiển thị E5CN. Số liệu được ghi nhận 15 phút một lần, giá trị trung bình của hai cảm biến CBT4 và CBT5 được sử dụng để so sánh với nhiệt độ VLS khi mô phỏng. CBT1, CBT2. Cảm biến đo nhiệt độ TNS trước và sau dàn bay hơi; CBT3. Cảm biến

đo nhiệt độ TNS; CBT4. Cảm biến đo nhiệt độ VLS 1; CBT5. Cảm biến nhiệt độ VLS 2; CBL6. Cảm biến trọng lượng; CBA7. Cảm biến đo độ ẩm.



Hình 2.4. Sơ đồ bố trí thiết bị đo trên thiết bị sấy

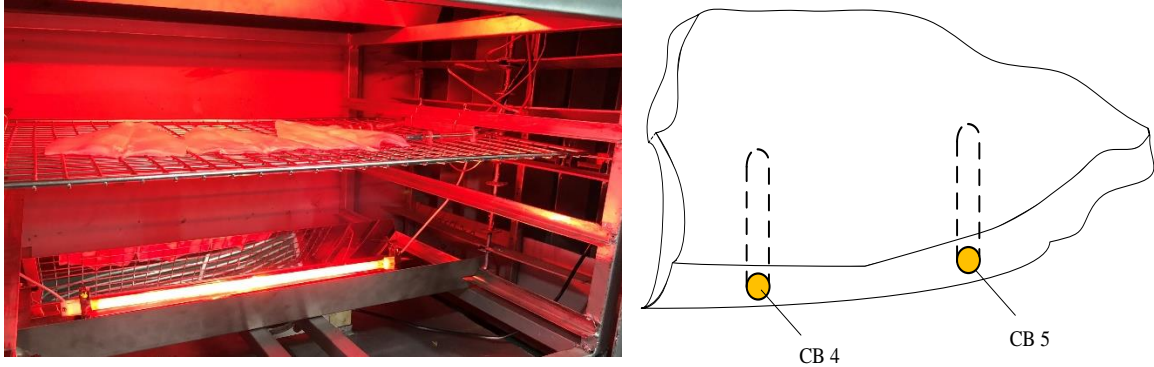
- Chiều dày của VLS được đo bằng thước kẹp điện tử Mitutoyo, giá trị trung bình được đo tại ba vị trí đầu, giữa và cuối của thân mực được sử dụng làm thông số tính toán khi giải mô hình toán lý thuyết.

- Nhiệt độ ban đầu của VLS được xác định bằng cách sử dụng hai cảm biến nhiệt độ Pt100 xuyên vào thân mực ở phần đầu và phần cuối thân mực (hình 2.5), thông qua bộ điều khiển và hiển thị E5CN, giá trị trung bình đo tại hai vị trí đầu và cuối của thân mực được sử dụng làm thông số tính toán khi giải mô hình toán lý thuyết.

- Quá trình giảm ẩm của VLS được xác định gián tiếp thông qua quá trình giảm khối lượng VLS, khối lượng này được cân tự động thông qua cảm biến trọng lượng CBL6 (hình 2.4), số liệu được hiển thị trên màn hình K3HB – VLC và ghi nhận 30 phút một lần.

- Công suất phát của hai thanh đèn hồng ngoại được cài đặt thông qua bộ điều

khuyến cường độ dòng điện, sử dụng Ampe kim Kyoritsu để đo dòng điện và đồng hồ số Sanwa để đo điện áp, từ đó xác định công suất phát trên hai thanh đèn hồng ngoại.



Hình 2.5. Sơ đồ bố trí thiết bị đo nhiệt độ VLS

2.6.6. Phương pháp xác định các thông số

❖ Xác định độ ẩm

Độ ẩm tương đối ban đầu (ω_0) của mực ống được xác định bằng phương pháp tủ sấy và được tính như sau:

$$\omega_0 = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \% \quad (2.3)$$

Độ ẩm tức thời (ω_i), của vật liệu sấy được xác như sau:

$$\omega_i = 100 - \frac{m_1(100 - \omega_0)}{m_i} \% \quad (2.4)$$

Trong đó m_1 , m_2 và m_i là khối lượng ban đầu, khối lượng cuối và khối lượng ở thời điểm i của vật liệu sấy (g).

Quan hệ giữa độ ẩm tương đối (ω) và độ ẩm tuyệt đối (ω_k):

$$\omega = \frac{\omega_k}{\omega_k + 100} \cdot 100\% \quad \text{hay} \quad \omega_k = \frac{\omega}{100 - \omega} \cdot 100\% \quad (2.5)$$

Quan hệ giữa độ ẩm tuyệt đối của vật liệu sấy và độ chứa ẩm được biểu diễn bởi biểu thức sau:

$$M = \frac{\omega_k}{100} \text{ và } M = \frac{100}{1 - \frac{\omega}{100}} \text{ (kg ẩm/kg VLK) hay } \omega = \frac{M}{M+1} 100\% \quad (2.6)$$

❖ Tốc độ sấy

Tốc độ sấy trong suốt quá trình sấy được tính theo công thức

$$dM/dt = \frac{M_t - M_{t+\Delta t}}{\Delta t} \quad (2.7)$$

Trong đó: dM/dt - tốc độ sấy (kg/kg.phút); $M_t, M_{t+\Delta t}$ - độ chứa ẩm tại thời điểm thời gian sấy $t; t + \Delta t$ (kg ẩm/kg VLK); Δt : khoảng thời gian sấy (phút).

❖ Đánh giá sự phù hợp của mô hình

Để đánh giá sự phù hợp của mô hình TNTA với số liệu thực nghiệm, luận án này sử dụng hai đại lượng sai số bình phương trung bình RMSE và sai số tuyệt đối trung bình P_{tb} để đánh giá.

- Sai số bình phương trung bình RMSE được xác định như sau:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (V_{TN} - V_{LT})^2}{N}} \quad (2.8)$$

Trong đó: V_{TN} - giá trị thí nghiệm, V_{LT} - giá trị lý thuyết, N - số lượng thí nghiệm

- Sai số tuyệt đối trung bình P_{tb} được xác định như sau:

$$P_{tb} = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{|V_{TN} - V_{LT}|}{V_{TN}} \right) \quad (2.9)$$

2.7. Phương pháp đánh giá chất lượng của mực

Sản phẩm mực sau khi sấy được đưa đi xét nghiệm xác định hàm lượng NH_3 và ứng suất cắt nhằm đánh giá chất lượng của mực ống sau khi sấy, các chỉ tiêu này được xác định tại Viện nghiên cứu Công nghệ Sinh học và Môi trường của trường Đại học Nông Lâm thành phố Hồ Chí Minh theo các phương pháp sau.

- ❖ Phân tích hàm lượng NH_3 theo phương pháp AOAC 2016.
- ❖ Xác định ứng suất cắt trên máy phân tích cấu trúc Brookfield - CT3

2.8. Kết luận chương 2

Các nội dung chính đã được trình bày trong chương 2 của luận án:

- Phân tích và lựa chọn được phương pháp thực nghiệm xác định thông số nhiệt vật lý của mực ống như: nhiệt dung riêng, khối lượng riêng, độ ẩm cân bằng, hệ số khuếch tán ẩm và nhiệt ẩn hóa hơi. Việc xác định được các thông số nhiệt vật lý của mực ống có ý nghĩa quan trọng, đây chính là cơ sở dữ liệu có thể sử dụng để phục vụ cho các nghiên cứu lý thuyết.

- Xác định được phương pháp nghiên cứu thực nghiệm tìm ra chế độ sấy phù hợp.

- Xác định được phương pháp đánh giá chất lượng của mực ống.

- Giới thiệu thiết bị thí nghiệm và các dụng cụ đo để phục vụ cho nghiên cứu thực nghiệm.

Chương 3

KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU LÝ THUYẾT TRUYỀN NHIỆT TRUYỀN ÂM TRONG SẤY MỰC ỚNG

Trong chương này, chúng tôi tiếp tục tiến hành xác định bằng thực nghiệm các thông số nhiệt vật lý của mực ống. Các giá trị này sẽ được sử dụng để làm thông số tính toán sau khi xây dựng và giải hệ phương trình TNTA mô tả quá trình sấy mực trong máy sấy bơm nhiệt có kết hợp bổ sung bức xạ hồng ngoại.

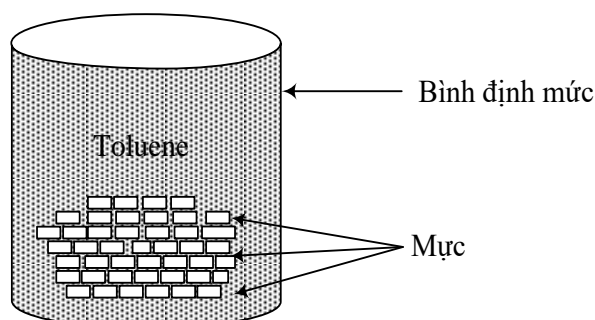
3.1. Kết quả xác định các thông số nhiệt vật lý của mực

Thông số nhiệt vật lý của VLS là một trong những yếu tố ảnh hưởng lớn đến kết quả tính toán lý thuyết cũng như thực nghiệm. Do đó, việc xác định chính xác giá trị của các thông số này là rất cần thiết cho quá trình giải hệ phương trình TNTA được đề cập trong mục xây dựng và giải mô hình lý thuyết hoặc nghiên cứu ứng dụng về các quá trình chế biến mực ống ở Việt Nam.

3.1.1. Xác định khối lượng riêng của mực

- Bố trí thí nghiệm

Khối lượng riêng của mực được xác định theo phương pháp thể tích thể chõ với dung môi là toluene. Mẫu mực có khối lượng 60 ± 2 g, độ ẩm nằm trong khoảng từ 30,18% ÷ 84% và kích thước 10 mm x 10 mm x 6 mm, sau khi xác định được độ ẩm ở mỗi lần thí nghiệm mẫu mực được cho vào bình định mức, sau đó đổ hóa chất toluene đến vạch định mức của bình. Dùng cân điện tử để xác định khối lượng bình chứa hỗn hợp mẫu mực và toluene. Theo nghiên cứu của Yan và ctv (2008) thể tích của mẫu được xác định bằng công thức (3.1).



Hình 3.1. Sơ đồ bố trí thí nghiệm xác định khối lượng riêng của mực

$$V_p = V_f - \frac{M_1 - M_2 - M_p}{\rho_{to}} \quad (3.1)$$

Trong đó:

V_p - thể tích của mực (m^3)

M_1 - khối lượng tổng của bình định mức, toluene và mẫu mực (g)

M_2 - khối lượng bình định mức (g)

M_p - khối lượng của mẫu mực (g)

ρ_{to} - khối lượng riêng của toluene (g/ml)

V_f - thể tích của bình định mức (ml)

Khối lượng riêng của mực ống được tính theo công thức sau:

$$\rho_p = \frac{M_p}{V_p} \quad (3.2)$$

- Kết quả thí nghiệm

Kết quả thí nghiệm cho thấy khối lượng riêng của mực tại các mức độ ẩm khác nhau có giá trị nằm trong khoảng từ 1037 đến 1221,7 kg/m^3 (bảng 3.1). Khối lượng riêng của mực giảm khi độ ẩm của mực tăng.

Bảng 3.1 Số liệu thực nghiệm xác định khối lượng riêng của mực

Số thí nghiệm	ω (%)	ρ_p (kg/m^3)
1	83,5	1037,0
2	79,95	1074,2
3	67,11	1098,5
4	61,79	1114,4
5	41,44	1205,4
6	30,18	1221,7

Để biểu diễn mối quan hệ giữa khối lượng riêng của vật liệu sậy với độ ẩm, nhiều tác giả (Lozano, 1983; Rahman, 2009) đã sử dụng phương trình (3.3) để biểu diễn mối quan hệ này. Do đó phương trình (3.3) được dùng để dự đoán khối lượng riêng của mực ống tại các mức độ ẩm khác nhau.

$$\rho = g + hy + q \exp(-ry) \quad (3.3)$$

Trong đó: g, h, q là các hằng số phụ thuộc vào vật liệu; $y = \frac{\omega}{\omega_0}$, ω là độ ẩm của mực (%) tại giá trị khảo sát; ω_0 là độ ẩm ban đầu của mực (%).

Dựa trên các số liệu thí nghiệm, thực hiện phân tích hồi quy luận án thu được phương trình hồi qui mô tả mối quan hệ giữa khối lượng riêng và độ ẩm của mực như sau:

$$\rho_p = 2059 - 71 \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right) - 736 \exp \left(0,247 \frac{\omega}{\omega_0} \right) \quad (R^2 = 0,976) \quad (3.4)$$

Biểu thức (3.4) được sử dụng để tính toán khối lượng riêng của mực ống.

3.1.2. Xác định nhiệt dung riêng của mực

Nhiệt dung riêng C_p (kJ/kgK) là lượng nhiệt cần thiết để làm nhiệt độ của một đơn vị vật chất tăng một độ. Theo Mohsenin (1980), nhiệt dung riêng trung bình của vật mẫu trong thực nghiệm được tính theo công thức (3.5). Nếu xem nhiệt lượng thất thoát trong quá trình thực nghiệm là không đáng kể và bỏ qua thì (3.5) trở thành (3.6). Trong luận án này, công thức (3.6) được dùng để tính nhiệt dung riêng của mực trong quá trình thí nghiệm.

$$C_p = \frac{m_c C_{pc}(t_0 - t_w) + m_w C_{pw}(t_0 - t_e)}{m_s(t_{os} - t_e)} \quad (3.5)$$

$$C_p = \frac{m_w C_{pw}(t_0 - t_e)}{m_s(t_{os} - t_e)} \quad (3.6)$$

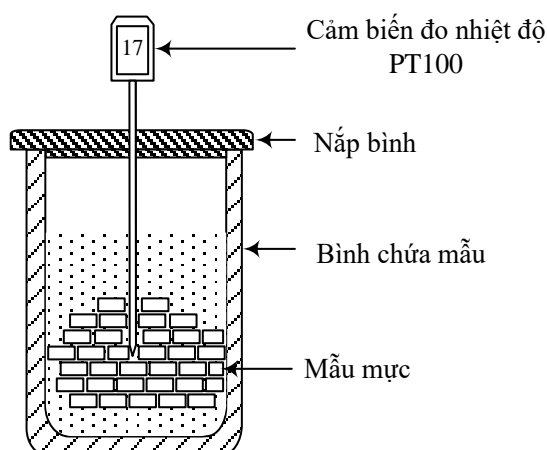
Trong phương trình (3.6) ta có C_p, C_{pw}, C_{pc} lần lượt là nhiệt dung riêng của mẫu mực cần đo, nước và bình chứa mẫu (kJ/kgK); m_s, m_w, m_c lần lượt là khối lượng của mẫu mực cần đo, nước và bình chứa ẩm (g); t_e là nhiệt độ cân bằng của hỗn hợp; t_0 là nhiệt độ của nước và bình chứa ẩm; t_{os} là nhiệt độ ban đầu của mẫu mực.

Hình 3.2 mô tả sơ đồ bố trí thí nghiệm để đo nhiệt dung riêng của mực ống. Dụng cụ dùng trong thí nghiệm gồm bình định mức, bình chứa mẫu có nắp được làm bằng vật liệu xốp và được gắn đầu cảm biến nhiệt kế điện tử có độ chính xác là $\pm 0,01^\circ\text{C}$ và dải đo nhiệt độ trong khoảng $-50^\circ\text{C} \div 300^\circ\text{C}$ (Digital thermometer PT

3001) đồng hồ bấm giây, cân điện tử có độ chính xác $\pm 0,01$ g (HZ TP-A-300 g), nhiệt kế hồng ngoại có khoảng đo $-20 \div 500^{\circ}\text{C}$, độ chính xác $\pm 2\%$ (Infrared Thermometer Center 350).

- **Bố trí thí nghiệm**

Nhiệt dung riêng của mực được xác định bằng phương pháp hỗn hợp. Đổ 150 ml nước tinh khiết có nhiệt độ $3 \div 4^{\circ}\text{C}$ vào trong bình chứa mẫu. Sử dụng cân điện tử, cân 40 g mực có độ ẩm từ $26,35\% \div 84\%$, đồng thời sử dụng nhiệt kế hồng ngoại để xác định nhiệt độ của các mẫu mực tương ứng sau đó được đưa vào bình chứa mẫu. Quan sát sự thay đổi nhiệt độ của hỗn hợp cho đến khi có sự cân bằng nhiệt độ. Mỗi thí nghiệm được tiến hành ba lần, kết quả là giá trị trung bình của ba lần thực nghiệm.



Hình 3.2. Sơ đồ bố trí thí nghiệm xác định nhiệt dung riêng của mực

- **Kết quả thí nghiệm**

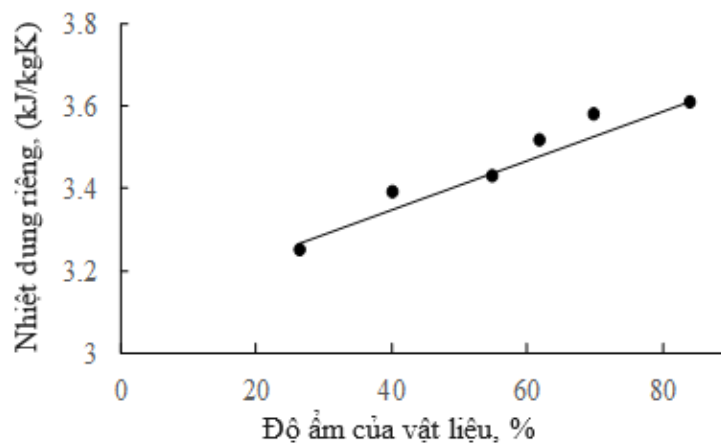
Bảng 3.2 Nhiệt dung riêng của mực tại các mức độ ẩm

Số thí nghiệm	ω (%)	C_p (kJ/kgK)
1	84	3,61
2	68,32	3,53
3	54,93	3,52
4	40,05	3,39
5	27,43	3,28
6	26,35	3,25

Kết quả xác định nhiệt dung riêng của mực tại các mức độ ẩm từ 26,35% đến 84% được trình bày tại bảng 3.2 và hình 3.3. Kết quả cho thấy nhiệt dung riêng của mực tăng khi độ ẩm trong vật liệu tăng. Giá trị nhiệt dung riêng của mực nằm trong phạm vi từ 3,25 ÷ 3,61 (kJ/kgK), kết quả nghiên cứu của Rahman (1993) cũng cho thấy nhiệt dung riêng của mực nằm trong khoảng 3,50 ÷ 3,58 (kJ/kgK) với độ ẩm của mực nằm trong phạm vi 79,61% đến 83,02%.

Thực hiện phân tích hồi quy trên phần mềm SPSS, sau đó kiểm tra giá trị tương quan, mức ý nghĩa, ta thu được phương trình hồi qui mô tả mối quan hệ giữa nhiệt dung riêng của mực và độ ẩm như (3.7), đây cũng chính là biểu thức được dùng để tính toán trong các phần tiếp theo của luận án.

$$C_p = 3,113 + 0,006.\omega \quad (R^2 = 0,976) \quad (3.7)$$



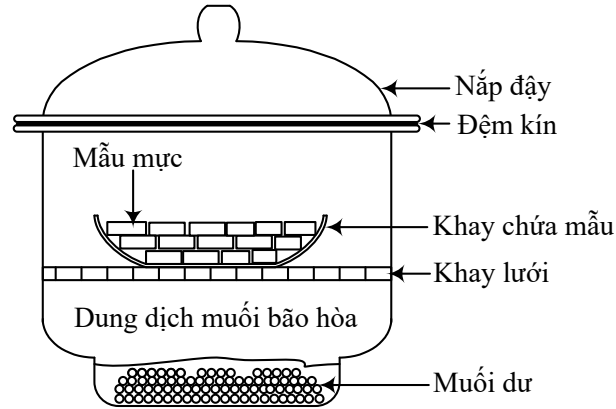
Hình 3.3 Nhiệt dung riêng của mực tại các độ ẩm khác nhau

3.2. Kết quả xác định độ ẩm cân bằng của mực

- Bố trí thí nghiệm

Bảy loại muối bão hòa được sử dụng để tạo môi trường có độ ẩm tương đối từ 11,10 ÷ 80,27% (AOAC, 1997) (bảng 3.3). Các mẫu thí nghiệm được đặt trên lưới trong các bình hút ẩm, phía dưới là dung dịch muối bão hòa (hình 3.4). Các bình hút ẩm được đậy nắp kín và đặt vào tủ điều khiển nhiệt độ. Tiến hành thí nghiệm tại ba mức nhiệt độ 30 °C, 40 °C và 50 °C. Để tránh hư cho các mẫu, chất bảo quản potassium sorbate đã được sử dụng cho các mẫu có độ ẩm tương đối lớn hơn hoặc bằng 50% (Magnesium Nitrate, Potassium Iodide, Sodium Chloride, Potassium Bromide).

Potassium sorbate được rải lên mỗi mẫu theo tỉ lệ 5 mg/1g mẫu. Với tỉ lệ này, chất bảo quản sẽ không làm ảnh hưởng đến độ ẩm cân bằng của sản phẩm (Singh, 2006).



Hình 3.4. Sơ đồ bố trí thí nghiệm xác định độ ẩm cân bằng

Trong quá trình thí nghiệm, khối lượng của các mẫu được cân sau hai ngày cho đến khi khối lượng giữa hai lần cân liên tiếp có sự sai khác ít hơn 0,01 g. Sau đó, các mẫu này được đem đi xác định độ ẩm. Độ ẩm của các mẫu được xác định bằng phương pháp tủ sấy. Độ ẩm cân bằng của mực được tính theo công thức (3.8).

$$\omega_e = \left(\frac{m_{ep} - m_a}{m_a} \right) \times 100 (\%) \quad (3.8)$$

Trong đó biểu thức (3.8) ω_e là độ ẩm cân bằng, m_{ep} là khối lượng của mẫu tại trạng thái đạt độ ẩm cân bằng; m_a là khối lượng khô của mẫu.

Bảng 3.3. Độ ẩm tương đối của môi trường ứng với các loại muối bão hòa tại các mức nhiệt độ khác nhau (AOAC, 1997).

Muối	30°C	40°C	50°C
Lithium chloride	11,28%	11,21%	11,10%
Potassium Fluoride	27,27%	22,68%	20,80%
Magnesium Chloride	32,44%	31,60%	30,54%
Magnesium Nitrate	51,40%	48,42%	45,44%
Potassium Iodide	67,89%	66,09%	64,49%
Sodium Chloride	75,09%	74,68%	74,43%
Potassium Bromide	80,27%	79,43%	79,02%

- Các phương trình toán học sử dụng để xác định độ ẩm cân bằng

Nhiều phương trình toán học đã được phát triển để mô tả độ ẩm cân bằng của các loại thực phẩm như: cá (Basu và ctv, 2006b), lúa mạch (Basunia và ctv, 2004),

chuối (Phoungchandang và ctv, 2000), gạo (Basunia và ctv, 2000). Các nghiên cứu này cho thấy sự phù hợp giữa các phương trình Smith, Caurie, Modified Chung-Pfost, Modified Halsey, Modified Henderson và phương trình Modified Oswin để mô tả độ ẩm cân bằng của sản phẩm. Mười hai phương trình toán học trình bày dưới đây được sử dụng để mô tả mối quan hệ giữa độ ẩm cân bằng ω_e của mực ống và độ ẩm tương đối của môi trường φ .

- Smith (Smith, 1947)

$$\varphi = 1 - \left(\frac{\exp(A)}{\exp(\omega_e)} \right)^{1/B} \quad (3.9)$$

$$\omega_e = A - B \ln(1 - \varphi) \quad (3.10)$$

- Caurie (Caurie, 1970)

$$\varphi = \frac{\ln(\omega_e) - A}{B} \quad (3.11)$$

$$\omega_e = \exp(A + B \cdot \varphi) \quad (3.12)$$

- Modified Halsey equation (MHAE) (Iglesias and Chirife, 1976):

$$\varphi = \exp[-\exp(A + BT)\omega_e^{-C}] \quad (3.13)$$

$$\omega_e = [\exp(A + BT)]^{1/C} (-\ln \varphi)^{-1/C} \quad (3.14)$$

- Modified Henderson equation (MHEE) (Thompson et al., 1968):

$$\varphi = 1 - \exp[-A(T + B)(\omega_e)^C] \quad (3.15)$$

$$\omega_e = \left[\frac{\ln(1 - \varphi)}{-A(T + B)} \right]^{1/C} \quad (3.16)$$

- Chung-Pfost equation (MCPE) (Pfost et al., 1976):

$$\varphi = \exp \left[-\frac{A}{T + B} \exp(-C \cdot \omega_e) \right] \quad (3.17)$$

$$\omega_e = A - C \cdot \ln[-(T + B) \cdot \ln(\varphi)] \quad (3.18)$$

- Modified Oswin equation (MOSE) (Oswin, 1946):

$$\varphi = \frac{1}{(A + BT / \omega_e)^{1/C} + 1} \quad (3.19)$$

$$\omega_e = (A + BT) \left(\frac{\varphi}{1 - \varphi} \right)^C \quad (3.20)$$

Các giá trị thực nghiệm và dự đoán được so sánh và phân tích thống kê để xác định phương trình phù hợp nhất, phương trình lựa chọn dựa trên việc phân tích đánh

giá theo 3 tiêu chí: hệ số tương quan (R^2), sai số bình phương trung bình (RMSE) và phân bố chi bình phương (χ^2). Chỉ số R^2 cao nhất, RMSE (Root mean square error) và χ^2 thấp nhất được sử dụng làm tiêu chí cho sự phù hợp của mô hình.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(V_{TN} - V_{LT})^2}{V_{LT}} \quad (3.21)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (V_{TN} - V_{LT})^2}{N}} \quad (3.22)$$

Trong đó: V_{TN} - giá trị thí nghiệm, V_{LT} - giá trị lý thuyết, N - số lượng thí nghiệm

▪ Kết quả

Sau 16 ÷ 18 ngày, khi sự thay đổi trọng lượng của tất cả các mẫu đều nhỏ hơn 0,01g thì dừng thí nghiệm. Giá trị độ ẩm cân bằng của các mẫu mực được trình bày trong bảng 3.4 và hình 3.5, các kết quả thực nghiệm cũng cho giá trị tương đồng với các kết quả nghiên cứu của tác giả Deng (2011) khi nghiên cứu về mực ống cắt lát.

Bảng 3.4. Độ ẩm cân bằng của mực ống tại các mức nhiệt độ khác nhau

Nhiệt độ °C	φ (%)	ω_e (% , cơ sở khô)
30	11,28	11,39
	27,27	15,01
	32,44	17,35
	51,40	22,88
	67,89	35,20
	75,09	45,64
	80,27	53,81
40	11,21	6,52
	22,68	8,707
	31,60	11,86
	48,42	16,77
	66,09	26,02
	74,68	37,98
	79,13	44,19
50	11,10	4,37
	20,80	5,50
	30,54	7,58
	45,44	11,98
	64,49	20,71
	74,43	28,53
	79,02	32,72

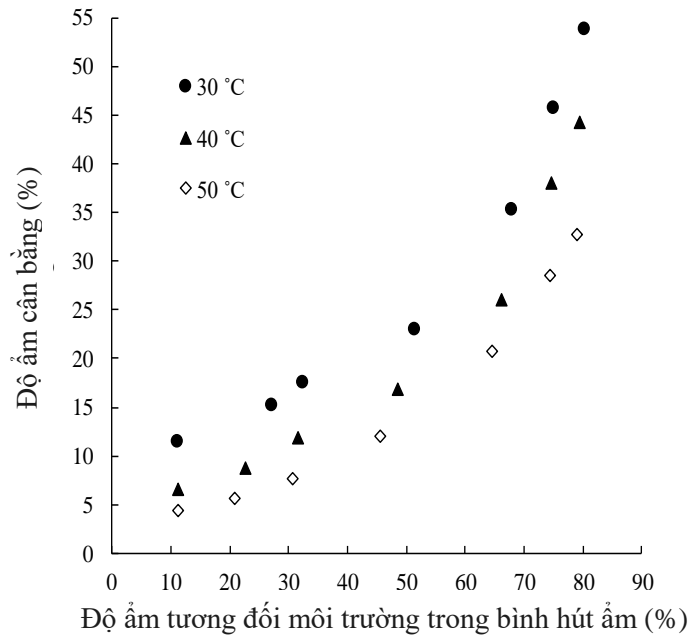
Giá trị của các tham số, sai số bình phương trung bình RMSE, phân bố chi bình phương χ^2 và hệ số tương quan R^2 của mười hai phương trình đề xuất được trình bày trong bảng 3.5. Kết quả phân tích hồi quy phi tuyến cho thấy các tiêu chí đánh giá cho hai trạng thái độ ẩm cân bằng và độ ẩm tương đối thu được với phương trình Modified Halsey, Modified Henderson, Modified Chung – Pfof và Modified Oswin là khá giống nhau. Các phương trình này có hệ số tương quan R^2 cao, sai số bình phương trung bình RMSE và phân bố chi bình phương χ^2 thấp. Cụ thể R^2 có giá trị từ $0,95 \div 0,991$, RMSE có giá trị nằm trong khoảng $0,05502 \div 0,13801$ và χ^2 có giá trị từ $0,024939 \div 0,128346$. Do đó, các phương trình này có thể dùng để dự đoán độ ẩm cân bằng của mực. Trong khi phương trình Smith, Caurie cho hệ số tương quan R^2 thấp và sai số cao, vì vậy không phù hợp để dự đoán độ ẩm cân bằng của mực.

Bảng 3.5. Thông số hồi quy và giá trị tham số của các phương trình sử dụng để mô tả độ ẩm cân bằng.

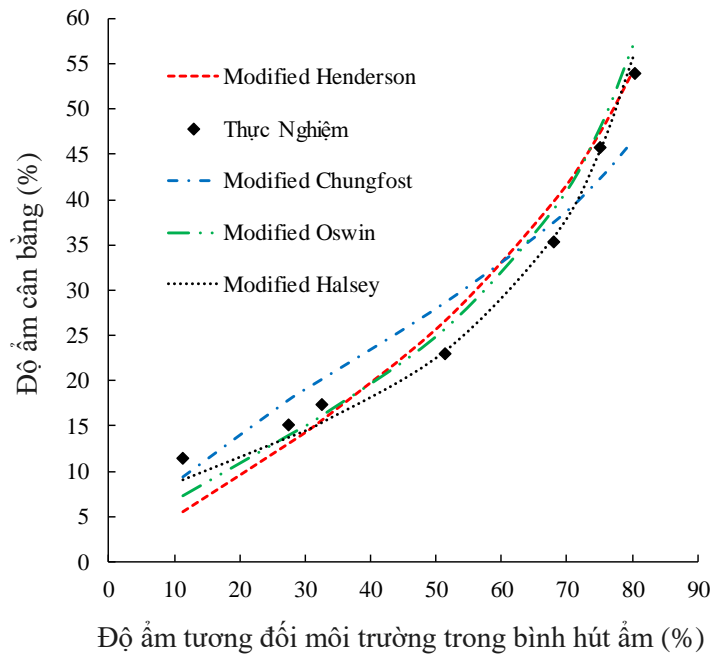
Phương trình	Tham số			R^2	χ^2	RMSE
	A	B	C			
Smith (Eq.(3.9))	0,015	0,265		0,876	0,442737	0,087014
Caurie (Eq.(3.11))	-3,256	3,156		0,856	0,506941	0,093859
Modified Halsey (Eq.(3.13))	-0,8700	-0,040	1,1920	0,985	0,063459	0,030079
Modified Henderson (Eq.(3.15))	0,1540	-7,628	1,1950	0,968	0,128346	0,044185
Modified Chung - Pfof (Eq.(3.17))	89,756	-5,291	6,4959	0,950	0,125402	0,055205
Modified Oswin (Eq.(3.19))	0,4100	-0,005	0,583	0,981	0,183736	0,049560
Smith (Eq.(3.10))	0,026	0,250		0,866	0,263550	0,051639
Caurie (Eq.(3.12))	-3,085	2,814		0,870	0,247851	0,052099
Modified Halsey (Eq.(3.14))	-1,383	-0,029	1,267	0,991	0,024939	0,013801
Modified Henderson (Eq.(3.16))	0,110	0,528	1,133	0,972	0,115150	0,025198
Modified Chung - Pfof (Eq.(3.18))	0,705	-10,045	0,162	0,938	0,136660	0,035857
Modified Oswin (Eq.(3.20))	0,369	-0,004	0,592	0,988	0,061600	0,022765

Kết quả so sánh các giá trị ω_e được dự đoán bằng các phương trình hồi qui (phương trình (3.14), (3.16), (3.18) và (3.20)) với giá trị thực nghiệm tại các mức nhiệt độ 30°C, 40°C và 50°C được biểu diễn trên các đồ thị hình 3.5, 3.6 và 3.7. Kết quả cho thấy, trong phạm vi độ ẩm tương đối từ $45,44 \div 80,27\%$, sai số của phương trình của Modified Halsey là thấp nhất, tiếp đến là phương trình Modified Oswin,

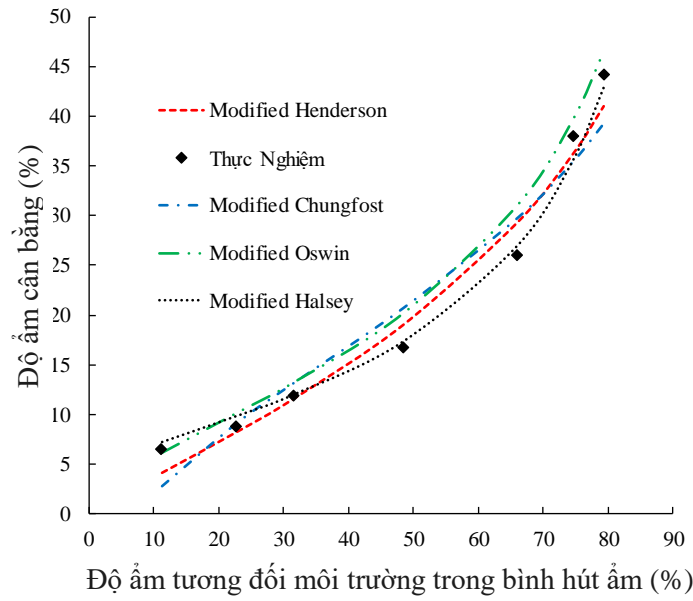
Modified Henderson và Modified Chung – Pfof. Bảng 3.5 cho thấy phương trình Modified Halsey có giá trị RMSE thấp nhất, cụ thể là 0,013801 cho ω_e và 0,030079 cho φ . Các giá trị R^2 là cao hơn so với các phương trình khác, 0,991 cho ω_e và 0,985 cho φ .



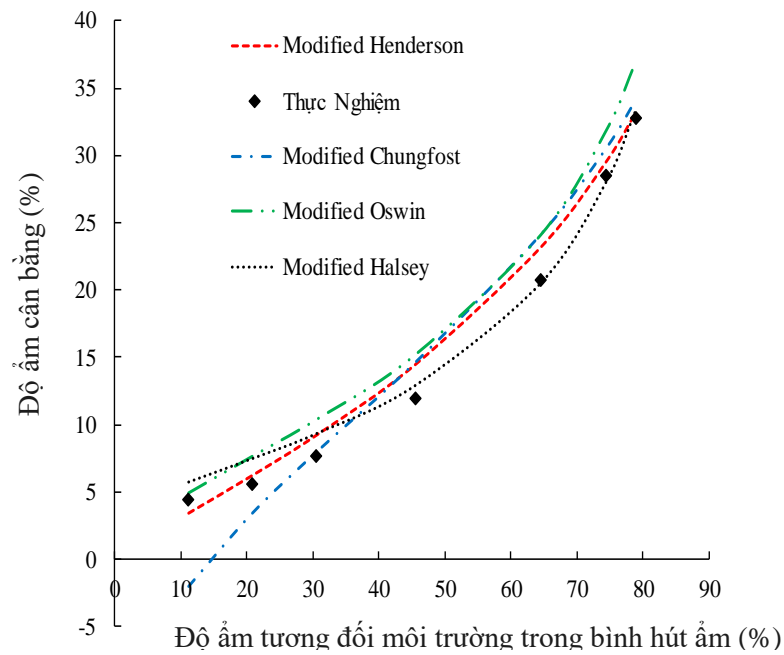
Hình 3.5. Độ ẩm cân bằng thực nghiệm tại mức nhiệt độ khác nhau



Hình 3.6. Độ ẩm cân bằng dự đoán và thực nghiệm tại mức nhiệt độ 30°C



Hình 3.7. Độ ẩm cân bằng dự đoán và thực nghiệm tại mức nhiệt độ 40°C

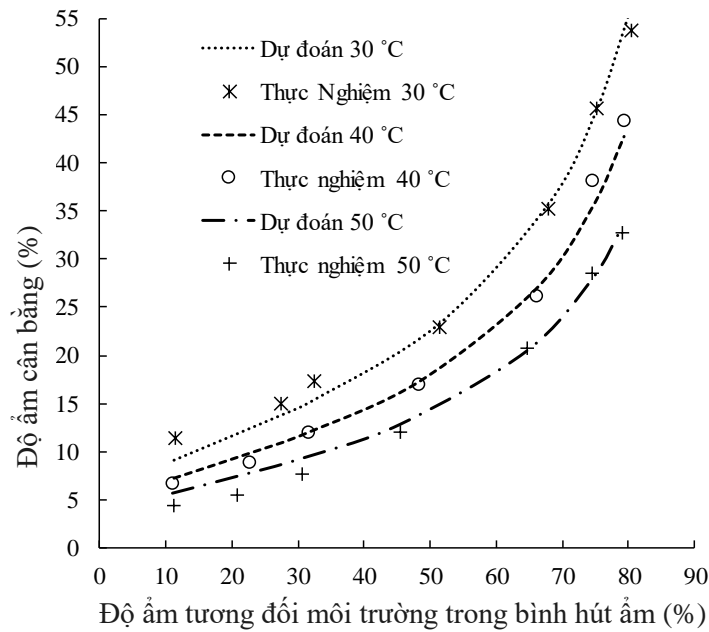


Hình 3.8. Độ ẩm cân bằng dự đoán và thực nghiệm tại mức nhiệt độ 50°C

Từ các kết quả phân tích cho thấy phương trình Modified Halsey là phù hợp nhất để dự đoán độ ẩm cân bằng của mực ống, biểu thức (3.14a) được chúng tôi sử dụng để xác định độ ẩm cân bằng của mực ống trong các phần tiếp theo của luận án.

$$\varphi = \exp[-\exp(-0,870 - 0,040.T)\omega_e^{-1,920}] \tag{3.13a}$$

$$\omega_e = [\exp(-1,383 - 0,029.T)]^{1/1,267} (-\ln \varphi)^{-1/1,267} . \tag{3.14a}$$



Hình 3.9. Độ ẩm cân bằng tại ba mức nhiệt độ 30°C, 40°C và 50°C

Hình 3.9 so sánh giữa giá trị ω_e được dự đoán bằng phương trình Modified Halsey và giá trị thực nghiệm. Kết quả cho thấy dữ liệu thực nghiệm được phân tán xung quanh các đường cong dự đoán. Trong phạm vi độ ẩm tương đối từ 35 ÷ 80,27% cho kết quả dự đoán ω_e tốt hơn trong phạm vi độ ẩm tương đối từ 10 ÷ 35%.

3.3. Kết quả xác định nhiệt ẩn hóa hơi của mực

Các nghiên cứu về nhiệt ẩn hóa hơi của vật liệu thường được xác định dựa vào giá trị độ ẩm cân bằng của vật liệu (Keum và ctv, 2005) và sử dụng công thức của Gallaher (1951) để xác định nhiệt ẩn hóa hơi của nước trong vật liệu là một hàm số phụ thuộc vào độ ẩm của vật liệu.

$$\frac{h_{fg}}{h_{fgo}} = 1 + A \cdot \exp(-B \cdot \omega) \quad (3.23)$$

Trong đó: h_{fg} , h_{fgo} lần lượt là nhiệt ẩn hóa hơi của nước trong vật liệu và nhiệt ẩn hóa hơi của nước tự do.

$$h_{fgo} = (2502,2 - 2,386 \cdot T)$$

Trong đó: T là nhiệt độ của vật liệu (°C), ω là độ ẩm vật liệu (%), A, B là các hệ số của mô hình.

Các hệ số A và B của mô hình được xác định trên cơ sở độ ẩm cân bằng của mực (Modified Halsey equation). Giá trị của áp suất bay hơi (P_v) tại các giá trị nhiệt độ khác nhau được xác định theo công thức của Stanislaw và ctv (1998).

$$P_v = P_s \cdot \varphi \quad (3.24)$$

Trong đó: P_s là áp suất bay hơi bão hòa (kPa), φ là độ ẩm tương đối của môi trường (%).

Quan hệ giữa độ ẩm cân bằng của mực ống và độ ẩm tương đối của không khí được xác định theo công thức (3.13a và 3.14a) đã được nêu trong mục 3.2.

Mối quan hệ giữa áp suất bay hơi P_v , nhiệt ẩn hóa hơi của nước trong vật liệu và nước tự do tại cùng nhiệt độ được xác định theo công thức (3.25) (Yong và ctv, 1996).

$$\ln P_v = \frac{h_{fg}}{h_{fgo}} \ln P_s + C \quad (3.25)$$

Trong đó, C là hằng số.

Tỷ lệ giữa nhiệt ẩn hóa hơi của nước trong vật liệu và nhiệt ẩn hóa hơi của nước tự do h_{fg}/h_{fgo} tại các giá trị độ ẩm khác nhau của vật liệu có dạng đường cong logarit và được xác định theo phương trình (3.23).

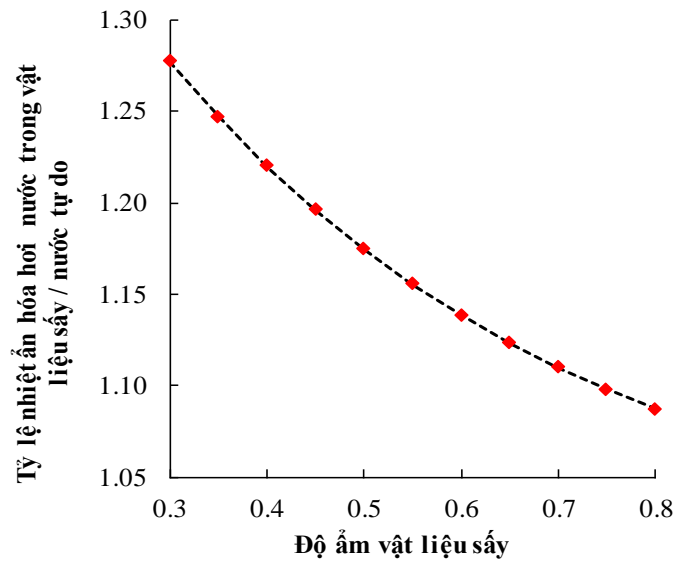
Sử dụng phần mềm Matlab để lập trình và giải bài toán, kết quả xác định được các hệ số A và B của phương trình (3.23) như sau: A = 0,5549 và B = 2,3115.

Như vậy, nhiệt ẩn hóa hơi của mực ống được xác định theo phương trình (3.26).

$$\frac{h_{fg}}{h_{fgo}} = 1 + 0,5549 \cdot \exp(-2,3115 \cdot \omega) \quad (3.26)$$

Quan hệ giữa tỷ số nhiệt ẩn hóa hơi của nước trong mực và nước tự do phụ thuộc vào độ ẩm của mực được trình bày trên hình 3.10.

Từ đồ thị trên hình 3.10 cho thấy khi độ ẩm của vật liệu càng thấp thì nhiệt ẩn hóa hơi của nước trong vật liệu càng cao. Kết quả này là tương đồng với các kết quả đã công bố của các tác giả khi nghiên cứu về nhiệt ẩn hóa hơi cho các loại nông sản thực phẩm.



Hình 3.10. Nhiệt ẩn hóa hơi của mộc

3.4. Kết quả xác định hệ số khuếch tán ẩm

Hệ số khuếch tán hiệu quả D_m (m²/s), là hệ số có ảnh hưởng rất lớn đến quá trình khuếch tán ẩm trong VLS, đây là hệ số thường được xác định từ thực nghiệm. Quá trình khuếch tán ẩm tuân theo định luật Fick. Trong trường hợp hệ số D_m là hằng số và khuếch tán ẩm 1 chiều, phương trình khuếch tán ẩm có dạng.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_m \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} \quad (3.27)$$

Nghiệm của phương trình (3.27) đã được Crank (1975) giải với điều kiện bỏ qua ẩm trở bên ngoài và trao đổi chất diễn ra ở cả 2 phía của tấm phẳng.

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(2i+1)^2} \exp\left[-\frac{(2i+1)D_m \pi^2 t}{4\delta^2}\right] \quad (3.28)$$

Khi QTS diễn ra đủ dài, tốc độ giảm ẩm có thể được tính như sau (Sacilik và ctv, 2006; Scala và ctv, 2008):

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left[-\frac{D_m \pi^2 t}{4\delta^2}\right] \quad (3.29)$$

Công thức (3.29) có thể biểu diễn thu gọn lại như sau:

$$MR = C.e^{-k.t} \quad (3.30)$$

Trong công thức (3.29), δ là nửa chiều dày vật liệu sấy.

Theo số liệu thực nghiệm, xây dựng đồ thị $\ln(MR)$ và thời gian sấy t sẽ tìm được hệ số k chính là hệ số góc của đường thẳng trên đồ thị $\ln(MR) - t$. Từ đây suy ra được giá trị của D_m .

$$D_m = -k \frac{4\delta^2}{\pi^2} \quad (3.31)$$

Để đánh giá sự ảnh hưởng của nhiệt độ đến hệ số D_m các nhà nghiên cứu đã dựa vào quan hệ Arrhenius.

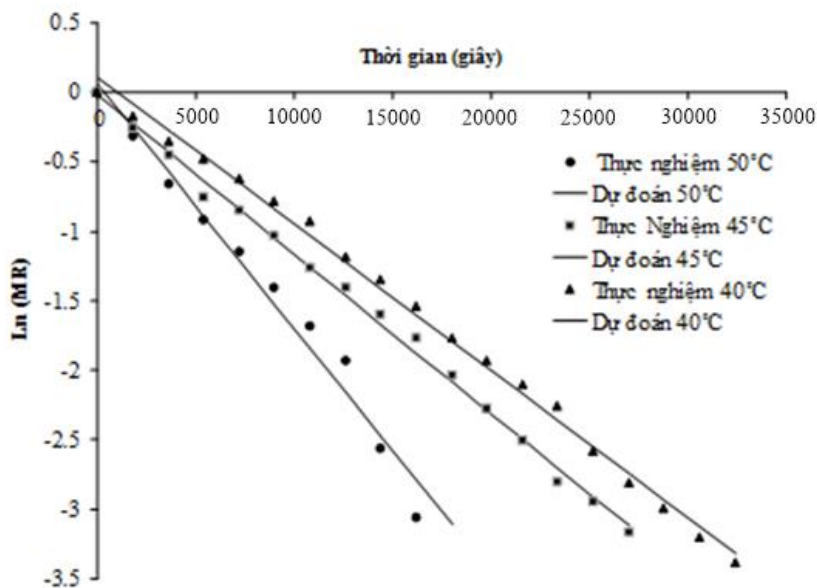
$$D_m(T) = A \exp\left(-\frac{\Delta H}{RT}\right) \quad (3.32)$$

Trong phương trình 3.32 có ΔH là năng lượng khuếch tán âm (kJ/mol), R là hằng số chất khí (kJ/kmol.K), T là nhiệt độ của VLS (K), A là hệ số thực nghiệm.

Tại các mức nhiệt độ thí nghiệm khác nhau, sẽ tính được các giá trị D_m theo công thức (3.31). Vẽ đồ thị ở dạng $\ln(D_m)$ và $1/T$ theo quan hệ (3.32), từ đó xác định được giá trị A và ΔH tương ứng.

- Kết quả

Từ kết quả thực nghiệm và áp dụng phương trình (3.31), giá trị của hệ số khuếch tán âm ở nhiệt độ 40°C, 45°C và 50°C được xác định lần lượt là $1,9 \cdot 10^{-10}$, $2,1 \cdot 10^{-10}$, $3,2 \cdot 10^{-10}$.



Hình 3.11. Quan hệ $\ln(MR)$ và thời gian sấy giữa thực nghiệm và lý thuyết

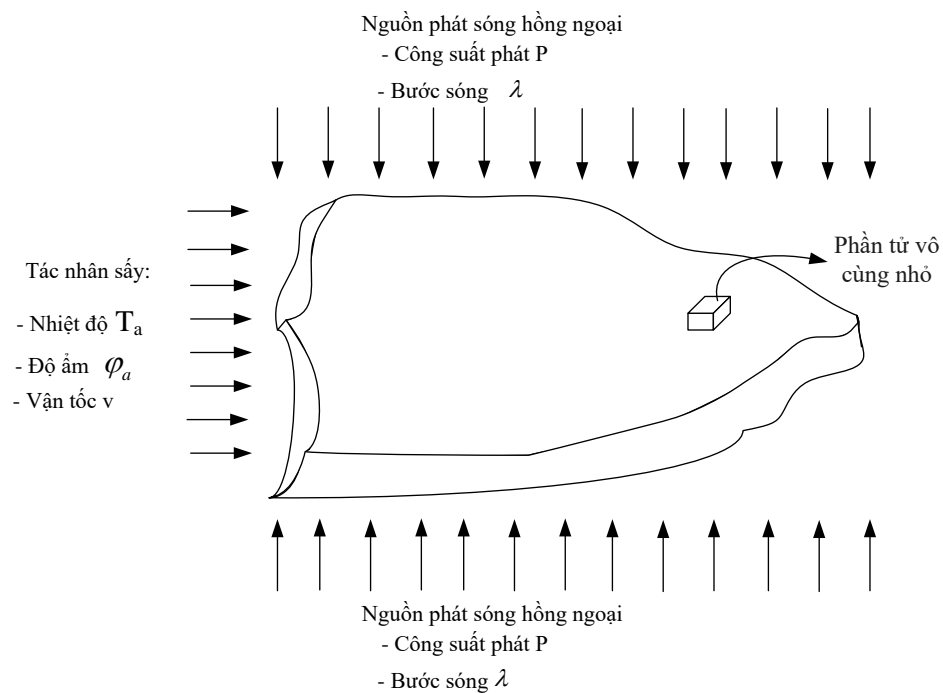
Từ các giá trị thực nghiệm tại các nhiệt độ khác nhau chúng tôi tìm được hệ số khuếch tán âm D_m phụ thuộc vào nhiệt độ có dạng (3.33).

$$D_m(T) = 2,521 \cdot 10^{-3} \exp \left[-\frac{42810,909}{8,314 \cdot (T + 273,15)} \right] \quad (3.33)$$

3.5. Kết quả xây dựng mô hình toán truyền nhiệt truyền âm

3.5.1. Xây dựng mô hình toán

Mô hình quá trình truyền nhiệt truyền âm bên trong buồng sấy bằng phương pháp sấy bơm nhiệt có sự hỗ trợ của bức xạ hồng ngoại được trình bày trong hình 3.12. Mực ống ở dạng tấm phẳng có bề dày 2δ , được đặt trên khay làm bằng lưới từ vật liệu thép không rỉ. TNS có nhiệt độ T_a , độ ẩm φ_a và vận tốc v . Bức xạ hồng ngoại có bước sóng là λ , nguồn phát hồng ngoại có công suất P được đặt ở phía trên và phía dưới của lớp VLS.



Hình 3.12. Sơ đồ mô tả mô hình vật lý quá trình sấy mực

Các giả thuyết khi xây dựng mô hình toán học

- Vật liệu sấy là đồng chất và đẳng hướng, không có phản ứng hóa học trong QTS, không có nguồn sinh nhiệt bên trong.

- Truyền nhiệt và truyền chất bên trong VLS được xem là một chiều theo phương x (hình 3.13).

- Sự phân bố nhiệt độ và độ ẩm ban đầu của VLS là đồng nhất.

- Mực ống được xem là những vật liệu xám

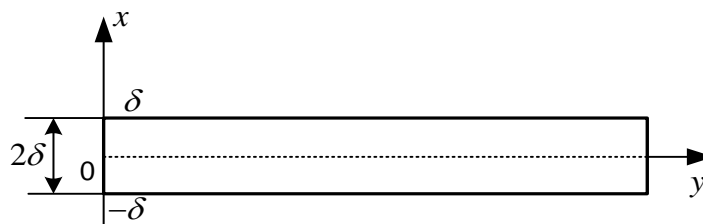
- Thất thoát nhiệt ra môi trường bên ngoài là không đáng kể.

- Theo nghiên cứu tác giả Deng và ctv (2011), khi sấy mực ở các phương pháp và chế độ sấy khác nhau thì độ co ngót của VLS đều nhỏ hơn 15%. Do đó trong luận án này, để đơn giản hơn cho quá trình nghiên cứu mô hình toán, thể tích và hình dáng của mực được coi là không thay đổi trong QTS.

- Dòng dịch chuyển ẩm bên trong VLS ở dạng hơi có ảnh hưởng đến dòng nhiệt.

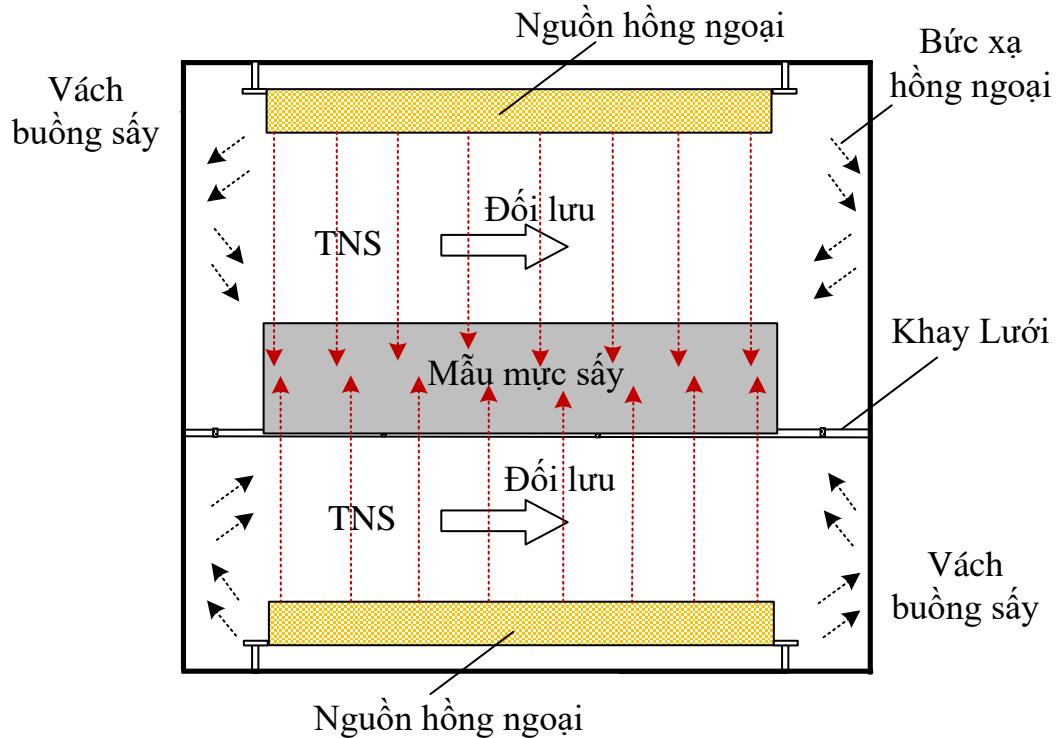
Quá trình sấy là quá trình VLS nhận năng lượng mà chủ yếu là nhiệt năng từ một nguồn nhiệt nào đó để ẩm từ trong lòng dịch chuyển ra bề mặt và đi vào TNS. Do đó, QTS là quá trình truyền nhiệt và truyền ẩm xảy ra đồng thời. Quá trình TNTA xảy ra cả ở bên trong lòng VLS và giữa bề mặt VLS với môi trường TNS. Bên trong lòng VLS, quá trình đó được gọi là quá trình dẫn nhiệt và khuếch tán ẩm hỗn hợp. Trao đổi nhiệt - ẩm giữa bề mặt VLS với môi trường TNS là quá trình trao đổi nhiệt - ẩm đối lưu liên hợp. Vì vậy khi phân tích bài toán TNTA trong QTS phải bao gồm bài toán TNTA bên trong và bên ngoài VLS (Trần Văn Phú, 2002; Hoàng Văn Chức, 1999).

Khi nghiên cứu quá trình TNTA cần phải xem xét đến các yếu tố ảnh hưởng của dẫn nhiệt đến khuếch tán ẩm và ngược lại. Trong QTS, mục tiêu là cấp nhiệt để tạo ra dòng dịch chuyển ẩm nên cần xét đến ảnh hưởng của dòng dịch chuyển ẩm đến dòng nhiệt.



Hình 3.13. Mô hình tấm phẳng của VLS

Sơ đồ truyền nhiệt khi sấy mực ống bằng phương pháp sấy bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại được trình bày như hình 3.14.

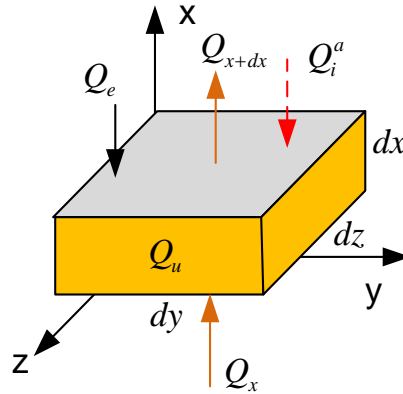


Hình 3.14. Sơ đồ truyền nhiệt khi sấy mực

Nguyên lý sấy bơm nhiệt kết hợp gia nhiệt bằng bức xạ hồng ngoại là sự kết hợp giữa sấy bằng TNS và gia nhiệt đồng thời bằng bức xạ hồng ngoại. Trong đó, TNS sau khi đi qua hệ thống bơm nhiệt sẽ có nhiệt độ, độ ẩm và tốc độ xác định được trao đổi nhiệt, trao đổi chất với VLS trong buồng sấy. Bên cạnh đó mực ống được gia nhiệt bằng bức xạ hồng ngoại trên toàn bộ thể tích của VLS. Sự kết hợp này sẽ giúp cho quá trình TNTA diễn ra nhanh hơn trong đó sự ảnh hưởng qua lại giữa truyền nhiệt và truyền ẩm cũng thể hiện rõ hơn.

a) Thành lập phương trình truyền nhiệt

Quá trình truyền nhiệt bao gồm dẫn nhiệt bên trong vật liệu và trao đổi nhiệt giữa bề mặt vật liệu và TNS bằng đối lưu, dòng nhiệt từ nguồn bức xạ hồng ngoại truyền đến VLS được VLS hấp thụ trong toàn bộ thể tích.



Hình 3.15. Cân bằng nhiệt trong một phần tử vô cùng nhỏ

Có thể xem rằng, vật liệu sấy được cấu tạo từ nhiều phần tử vô cùng nhỏ như (hình 3.15). Dựa trên định luật bảo toàn năng lượng ta có phương trình cân bằng nhiệt cho phân tử vô cùng nhỏ của vật liệu sấy được viết như sau:

$$\sum E_{gen} = \sum E_{in} - \sum E_{out} \quad (3.34)$$

$$Q_u = Q_x + Q_e + Q_{IFR} - Q_{x+dx} \quad (3.35)$$

Trong đó:

- Q_x và Q_{x+dx} là nhiệt lượng vào và ra của phân tử tại vị trí x và $x+dx$, được tính theo định luật Fourier như sau.

$$Q_x = -k_p \frac{\partial T}{\partial x} dydz \quad (3.36)$$

$$Q_{x+dx} = Q_x + dQ_x = \left[-k_p \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(-k_p \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \right] dydz \quad (3.37)$$

- Q_e là nhiệt lượng cần thiết cấp cho ẩm biến đổi pha từ lỏng thành hơi trong VLS.

Nhiều tác giả khi nghiên cứu hiện tượng TNTA trong QTS thường không xét đến ảnh hưởng của độ ẩm đến hiện tượng dẫn nhiệt (Meeso, 2007). Tuy nhiên, trong QTS, mục đích chính là cấp nhiệt để ẩm trong vật liệu biến đổi pha từ lỏng thành hơi và tạo ra dòng khuếch tán ẩm từ trong lòng VLS ra bề mặt biên và tại biên sẽ xảy ra quá trình trao đổi nhiệt - ẩm đối lưu giữa các phân tử thuộc biên và TNS. Vì vậy trong phương trình truyền nhiệt một số tác giả đã xét đến hiện tượng khuếch tán ẩm ảnh

hưởng đến trường nhiệt độ, kết quả cho thấy mô hình toán khi xét đến hiện tượng này có độ chính xác tốt hơn (Trương Minh Thắng, 2014). Trong luận án này, VLS là mực ống có độ ẩm ban đầu khoảng 84% nên ảnh hưởng của dòng ẩm đến hiện tượng dẫn nhiệt là lớn và cần được xem xét, do đó trong phương trình truyền nhiệt chúng tôi xét đến hiện tượng khuếch tán ẩm ảnh hưởng đến trường nhiệt độ thông qua nhiệt lượng cần thiết cấp cho ẩm biến đổi pha từ lỏng thành hơi trong VLS Q_e và được tính theo biểu thức (3.38).

$$Q_e = h_{fg} \rho_k \frac{\partial M}{\partial t} dx dy dz \quad (3.38)$$

Trong phương trình (3.38) có h_{fg} (kJ/kg), ρ_k (kg/m³), M (kg ẩm/kg VLK) lần lượt là nhiệt ẩn hóa hơi của nước, khối lượng riêng của vật liệu khô và ẩm độ của vật liệu.

- Q_{IFR} là năng lượng hấp thụ từ bức xạ hồng ngoại, W

$$Q_{IFR} = q_{IFR} dx dy dz \quad (3.39)$$

Theo lý thuyết của Sandu (1986), bức xạ hồng ngoại từ bộ phát sẽ tiếp xúc vào bề mặt và thẩm thấu vào VLS với chiều sâu từ 3 ÷ 4 mm (Ginzburg, 1969; Nindo, 1995) như thể hiện trong hình 3.14. Như vậy năng lượng bức xạ của sóng hồng ngoại truyền đến bề mặt VLS, trong vùng thẩm thấu của bức xạ sóng hồng ngoại VLS được hấp thụ bức xạ nhiệt từ sóng hồng ngoại. Trong nghiên cứu này, mực ống được lựa chọn có chiều dày từ $6 \pm 0,5$ mm, do đó có thể xem toàn bộ thể tích của mực ống được hấp thụ bức xạ từ sóng hồng ngoại. Nguồn năng lượng được tạo ra dưới dạng hấp thụ nhiệt lượng từ bức xạ hồng ngoại đã được các tác giả bổ sung vào trong phương trình truyền nhiệt như công trình nghiên cứu của Meeso và ctv (2007), nghiên cứu của Swadisev và ctv (2008).

- Q_u là độ biến thiên nội năng trong phân tử sau khoảng thời gian dt và được tính theo công thức.

$$Q_u = C_p \rho_p \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (3.40)$$

Thay thế các phương trình từ (3.36) ÷ (3.40) vào (3.35), ta có phương trình truyền nhiệt được viết như sau.

$$C_p \rho_p \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz = -k_p \frac{\partial T}{\partial x} dy dz + h_{fg} \rho_k \frac{\partial M}{\partial t} dx dy dz + q_{IFR} dx dy dz - \left\{ \left[-k_p \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(-k_p \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \right] dy dz \right\} \quad (3.41)$$

Rút gọn phương trình (3.41) ta được:

$$\rho_p C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k_p \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial M}{\partial t} h_{fg} \rho_k + q_{IFR} \quad (3.42)$$

b) Phương trình truyền ẩm

Theo A.V LuiKov thì gradient nhiệt độ sẽ gây nên sự khuếch tán ẩm trong vật thể. Tuy nhiên, với VLS là mực ống nhạy nhiệt do đó phải sấy ở nhiệt độ thấp để đảm bảo được thành phần chất dinh dưỡng và màu sắc của sản phẩm. Trong luận án chúng tôi lựa chọn ba mức nhiệt độ sấy thực nghiệm là 40°C, 45°C và 50°C để kiểm chứng, phân tích và chọn ra chế độ nhiệt độ sấy thích hợp nhất. Vì vậy ảnh hưởng của dòng nhiệt đến quá trình khuếch tán ẩm là không đáng kể, do đó trong phương trình truyền ẩm chúng tôi bỏ qua ảnh hưởng của dòng nhiệt đến khuếch tán ẩm. Phương trình này có dạng (Trần Văn Phú, 2002):

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_m \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} \quad (3.43)$$

Trong đó D_m là hệ số khuếch tán ẩm (m²/s)

c) Điều kiện đơn trị để giải bài toán TNTA

Để giải được hệ phương trình TNTA (3.42, 3.43) cần phải xác định được điều kiện ban đầu, điều kiện biên phù hợp với từng phương pháp sấy và từng điều kiện cụ thể của bài toán ứng dụng.

Điều kiện ban đầu

Nhiệt độ và độ chứa ẩm đồng nhất, tại thời điểm ban đầu ($t = 0$) nhiệt độ và độ chứa ẩm của VLS là đồng nhất.

$$T(x, 0) = T_0; \quad M(x, 0) = M_0 \quad (3.44)$$

Điều kiện đối xứng

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial M}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad (3.45)$$

Điều kiện biên về truyền nhiệt

Quá trình trao đổi nhiệt tại bề mặt của VLS theo phương x bao gồm các quá trình dẫn nhiệt, trao đổi nhiệt đối lưu giữa các phân tử bề mặt và TNS, trao đổi nhiệt do quá trình nước trong vật liệu bốc hơi ra môi trường. Áp dụng phương trình bảo toàn năng lượng tại mặt biên của VLS, ta có phương trình (3.46).

$$q_{IFR}^s + h_c (T_a - T_s) \Big|_{x=\delta} - h_{fg} \rho_k h_m (M_s - M_e) \Big|_{x=\delta} = -k_p \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\delta} \quad (3.46)$$

Trong đó:

q_{IFR}^s - năng lượng bức xạ hấp thụ qua bề mặt VLS (W/m²)

M_e - độ chứa ẩm cân bằng của VLS (kg ẩm/kg VLK)

M_s - độ chứa ẩm lớp bề mặt của VLS (kg ẩm/kg VLK))

h_c - hệ số trao đổi nhiệt đối lưu (W/m²K)

h_m - hệ số trao đổi chất đối lưu (m/s)

h_{fg} - hệ số nhiệt ẩn hóa hơi của nước trong vật liệu (kJ/kg)

T_a - nhiệt độ của TNS (°C)

T_s - nhiệt độ bề mặt của VLS (°C)

Điều kiện biên về truyền ẩm

Quá trình trao đổi chất tại bề mặt của VLS theo phương x bao gồm các quá trình trao đổi chất giữa VLS và môi trường. Áp dụng bảo toàn ẩm tại bề mặt của VLS ta có phương trình (3.47)

$$-D_m \frac{\partial M}{\partial x} \Big|_{x=\delta} = h_m (M_e - M_s) \Big|_{x=\delta} \quad (3.47)$$

Các phương trình (3.42, 3.43, 3.46, 3.47) mô tả quá trình truyền nhiệt - truyền ẩm trong QTS. Lời giải của hệ phương trình sẽ giúp xác định được nhiệt độ và độ ẩm của mực trong toàn bộ QTS.

3.5.2. Xác định năng lượng của bộ phát hồng ngoại (IFR)

3.5.2.1. Yếu tố vị trí

Trong trao đổi nhiệt bức xạ, năng lượng hấp thụ phụ thuộc vào hướng của các bề mặt cũng như các đặc tính vật liệu và nhiệt độ bức xạ. Theo Ozisik (1985), yếu tố

vị trí như hướng trao đổi nhiệt bức xạ và khoảng cách đặt giữa bề mặt nguồn hồng ngoại và bề mặt mục được xác định như sau:

$$F_{A_{sq}-A_{H1}} = \frac{1}{2\pi} \geq \left[\frac{X}{\sqrt{1+X^2}} \tan^{-1} \left(\frac{Y}{\sqrt{1+X^2}} \right) + \frac{Y}{\sqrt{1+Y^2}} \tan^{-1} \left(\frac{X}{\sqrt{1+Y^2}} \right) \right] \quad (3.48)$$

Trong đó:

$$X = \frac{W_1}{D}, Y = \frac{W_2}{D}$$

Với: W_1 - chiều rộng nguồn phát hồng ngoại (m)

W_2 - chiều dài nguồn phát hồng ngoại (m)

D - khoảng cách từ VLS đến nguồn phát hồng ngoại (m)

3.5.2.2. Sự phân bố năng lượng do bức xạ đến bề mặt vật liệu sấy

Thiết bị sấy có thể được xem là một hệ thống ba mặt gồm bề mặt từ nguồn phát hồng ngoại (H), bề mặt thành buồng sấy (C) và bề mặt VLS (SQ). Theo Holman (2009), việc truyền bức xạ trong buồng sấy có thể được coi là song song giữa hai bề mặt nguồn hồng ngoại và bề mặt VLS, từ đó năng lượng bức xạ từ nguồn hồng ngoại đến bề mặt VLS được xác định như sau:

$$Q_r = \frac{\sigma(T_{FIR}^4 - T_s^4)}{\frac{1-\varepsilon_H}{A_H \varepsilon_H} + \left[A_H F_{H-SQ} + \frac{1}{\left(\frac{1}{A_H F_{H-C}} \right) + \left(\frac{1}{A_{sq} F_{SQ-C}} \right)} \right]^{-1} + \frac{1-\varepsilon_{sq}}{A_{sq} \varepsilon_{sq}}} \quad (3.49)$$

Trong đó:

Q_r - năng lượng bức xạ từ nguồn hồng ngoại đến bề mặt VLS (W).

A_H - diện tích buồng sấy (m²)

A_{sq} - diện tích mục sấy (m²)

ε_H - hệ số độ phát xạ của vật liệu buồng sấy, $\varepsilon_H = 0,9$ (Meeso, 2007)

ε_{sq} - hệ số độ phát xạ của VLS, $\varepsilon_{sq} = 0,8$ (Hui, 2005)

F_{H-C} - tỷ lệ năng lượng từ bề mặt nguồn đến bề mặt buồng sấy

F_{H-SQ} - tỷ lệ năng lượng từ bề mặt nguồn đến bề mặt VLS

F_{SQ-C} - tỷ lệ năng lượng từ bề mặt mục đến bề mặt buồng sấy

3.5.2.3. Năng lượng hấp thụ

Một số tác giả đã xác định nhiệt năng tạo ra dưới dạng nhiệt hấp thụ từ VLS theo định luật Lambert-Beer (Pan và ctv, 2011) như công trình nghiên cứu của (Holman, 1990; Meeso và ctv, 2007; Kowalski và ctv, 2013). Trong luận án này, nhiệt năng hấp thụ từ bức xạ sóng hồng ngoại được tính theo công thức (3.50)

$$Q_{IFR,i}^a = Q_r e^{-\alpha x} \quad (3.50)$$

Trong đó:

α - hệ số hấp thụ

$Q_{IFR,i}^a$ - năng lượng hấp thụ từ bức xạ hồng ngoại tại lớp thứ i của vật liệu sấy.

Hệ số hấp thụ được tính thông qua mối quan hệ giữa hệ số độ phát xạ của vật liệu buồng sấy, hệ số độ phát xạ của VLS và hệ số hình dáng giữa bộ phát hồng ngoại và vật VLS (Jaturonglumlert và ctv, 2010). Trong nghiên cứu này, hệ số hấp thụ được tính theo công thức (3.51).

$$\alpha = \varepsilon_H \cdot \varepsilon_{sq} \cdot F_{H-SQ} \cdot F_{SQ-H} \quad (3.51)$$

Năng lượng hấp thụ trên một đơn vị thể tích (q_{IFR}) trong công thức (3.42) và năng lượng hấp thụ trên một đơn vị diện tích tại bề mặt VLS (q_{IFR}^s) trong công thức (3.46) được tính như sau:

$$q_{IFR} = \frac{Q_{IFR,i}^a}{V} \quad (3.52)$$

$$q_{IFR}^s = \frac{Q_{IFR,i}^a}{A} \quad (3.53)$$

3.5.3. Xác định hệ số trao đổi nhiệt đối lưu h_c và hệ số trao đổi chất đối lưu h_m .

❖ Hệ số trao đổi nhiệt đối lưu h_c

Hệ số trao đổi nhiệt đối lưu là đại lượng đặc trưng cho cường độ trao đổi nhiệt giữa TNS và VLS. Xác định hai đại lượng này có thể sử dụng lý thuyết đồng dạng (Hoàng Đình Tín, 2001; Holman, 2009) hoặc thực nghiệm, bán thực nghiệm. Trong luận án này, hệ số trao đổi nhiệt đối lưu được xác định bằng phương pháp đồng dạng đối với trường hợp truyền nhiệt đối lưu tấm phẳng (Jaturonglumlert, 2010). Hệ số đối

lưu thường được tính thông qua tiêu chuẩn đồng dạng Nusselt dựa vào giá trị của hệ số Reynold (Re_L). Đối với bài toán truyền nhiệt đối lưu dạng tấm phẳng thì hệ số Re_L được tính như sau:

$$Re_L = \frac{\rho_a \cdot v \cdot L}{\mu_a} \quad (3.54)$$

Đối với mực ống, L là chiều dài của mực và có giá trị nằm trong khoảng $240 \div 260$ mm, v là vận tốc tác nhân sấy và có giá trị nằm trong khoảng $0,3 \div 2$ m/s, TNS nằm trong khoảng $0 \div 70^\circ\text{C}$, ta có Re_L có giá trị nằm trong khoảng $4,2 \cdot 10^3 \div 3,1 \cdot 10^4$. Khi $Re_L < 5 \cdot 10^5$, tại vị trí bất kỳ theo phương chiều dài tấm phẳng theo chiều chuyển động của môi chất, giá trị tiêu chuẩn đồng dạng Nusselt được xác định như sau:

$$Nu_L = 0,332 Re_L^{1/2} Pr^{1/3} \quad \text{với } Pr \geq 0,6 \quad (3.55)$$

Giá trị Nu trung bình xét trên toàn bộ chiều dài tấm phẳng L :

$$Nu = 2Nu_L = 0,664 Re_L^{1/2} Pr^{1/3} \quad (3.56)$$

Với
$$Nu = \frac{h_c L}{k_a} \Rightarrow h_c = \frac{Nu k_a}{L} \quad (3.57)$$

Từ đó hệ số trao đổi nhiệt đối lưu được tính theo phương trình sau:

$$h_c = 0,664 Re_L^{1/2} Pr^{1/3} \frac{k_a}{L} \quad (3.58)$$

Trong đó:

$$\text{Tiêu chuẩn đồng dạng Prandtl: } Pr = \frac{\mu_a C_a}{k_a} \quad (3.59)$$

Trong điều kiện thời tiết ở Việt Nam và với nhiệt độ và độ ẩm tương đối của TNS nằm trong khoảng $0 \div 70^\circ\text{C}$ và $25 \div 40\%$, các thông số nhiệt - vật lý của không khí được xác định như sau (Białobrzewski, 2008).

✓ Khối lượng riêng (kg/m^3)

$$\rho_a = -3,510101 \cdot 10^{-8} \cdot T^3 + 1,583983 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 4,699520 \cdot 10^{-3} \cdot T + 1,292136 \quad (3.60)$$

✓ Độ nhớt động lực học (kg/m.s)

$$\mu_a = 1,767676 \cdot 10^{-3} \cdot T^3 - 5,5411255 \cdot T^2 + 4,983297 \cdot 10^{-8} \cdot T + 17,196428 \cdot 10^{-6} \quad (3.61)$$

✓ Hệ số dẫn nhiệt (W/(m.K)).

$$k_a = 6,818181 \cdot 10^{-10} \cdot T^3 - 1,474026 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 + 8,029113 \cdot 10^{-5} \cdot T + 0,024084 \quad (3.62)$$

✓ Nhiệt dung riêng của không khí (J/kgK)

$$C_a = 1,00926 \cdot 10^3 - 4,0403 \cdot 10^{-2} \cdot T + 6,1759 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - 4,097 \cdot 10^{-7} \cdot T^3 \quad (3.63)$$

✓ Hệ số khuếch tán của hơi ẩm vào không khí (m²/s).

$$D_a = 1,87 \cdot 10^{-10} \frac{(T + 273)^{2,072}}{p} \quad (3.64)$$

❖ Xác định hệ số trao đổi chất h_m

Trong luận án này, đối tượng sấy là mực ống đã sơ chế có chiều dày là 2δ được đặt trên khay lưới nằm trong buồng sấy, TNS sẽ đi song song trên hai bề mặt mực. Nếu tốc độ trao đổi chất thấp, khuếch tán bằng dòng ẩm đối lưu tại bề mặt và dòng ẩm này không ảnh hưởng đến tốc độ của TNS thì có thể xem trao đổi chất đối lưu tương tự như trao đổi nhiệt đối lưu. Trong trường hợp đó nhiều tác giả đã xác định hệ số trao đổi chất đối lưu thông qua lý thuyết đồng dạng của Chilton-Colburn hoặc có thay tiêu chuẩn Nusselt trong phương trình (3.55) bằng tiêu chuẩn Shewood

$Sh = \frac{h_m L}{D_a}$, thay tiêu chuẩn Pr bằng tiêu chuẩn Schmidt (Jaturonglumlert, 2010).

$$Sh = 2Sh_y = 0,664 Re_L^{1/2} Sc^{1/3} \text{ suy ra } h_m = 0,664 Re_L^{1/2} Sc^{1/3} \frac{D_a}{L} \quad (3.65)$$

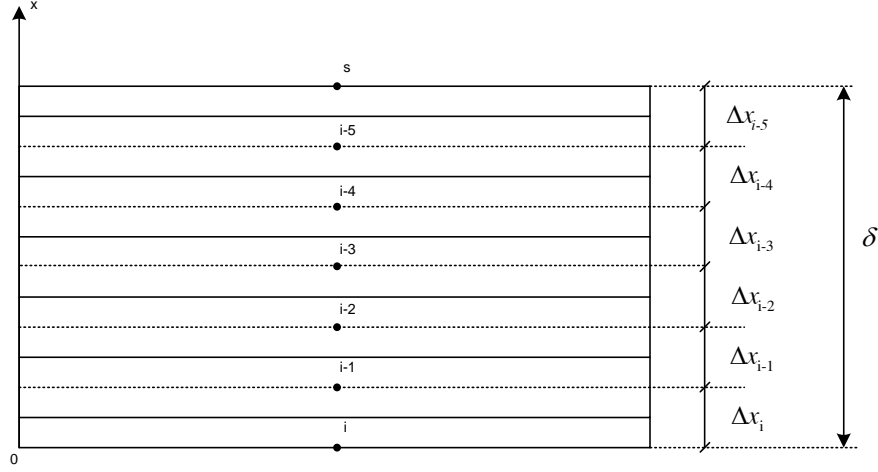
Trong đó:

$$\text{Tiêu chuẩn đồng dạng Schmidt: } Sc = \frac{\mu_a}{\rho_a D_a}$$

3.6. Kết quả giải hệ phương trình truyền nhiệt truyền ẩm

Hệ phương trình truyền nhiệt, truyền ẩm (3.42, 3.43) là phương trình đạo hàm riêng có các điều kiện đơn trị (3.44, 3.45, 3.46, 3.47). Khi giải các phương trình này bằng phương pháp giải tích gặp nhiều khó khăn, vì vậy nhiều tác giả đã chọn phương pháp số để giải phương trình TNTA (Trương Minh Thắng, 2014; Meeso, 2007). Trong luận án này chúng tôi sử dụng phương pháp sai phân hữu hạn để chuyển hệ phương trình TNTA sang dạng sai phân, sau đó phương pháp ma trận nghịch đảo

được dùng kết hợp với lập trình máy tính để tìm nghiệm, lưu đồ thuật giải được trình bày trên hình 3.17.



Hình 3.16. Bước chia sai phân cho nửa bề dày lớp VLS

Để giải các phương trình TNTA, tác giả chia nửa bề dày δ VLS dạng tấm phẳng ra thành N_i ($i = 6$) khoảng cách đều Δx , các phần tử tính toán bên trong VLS được lấy bằng Δx , các phần tử tại biên và tâm có chiều dày bằng $\frac{\Delta x}{2}$. Như vậy có $N_i + 1$ phần tử trong nửa bề dày mực sấy, do nguồn phát hồng ngoại được đặt đối xứng trên hai bề mặt của VLS. Vì vậy quá trình tính toán chỉ cần tính cho nửa chiều dày VLS tương ứng với $N_x + 1$ phần tử.

3.6.1. Thiết lập hệ phương trình sai phân và thuật toán giải

3.6.1.1. Phương trình sai phân truyền nhiệt

a) Phương trình sai phân cho các phần tử bên trong VLS: $in = 1 \div (c - 1)$

$$\rho_{p(M_{in})}^m C_{p(M_{in})} \frac{T_{in}^{m+1} - T_{in}^m}{\Delta t} = k_p^m \frac{(T_{in-1}^{m+1} - 2T_{in}^{m+1} + T_{in+1}^{m+1})}{(\Delta x^m)^2} + h_{fg}^m \rho_k \frac{M_{in}^{m+1} - M_{in}^m}{\Delta t} + q_{IFR} \quad (3.66)$$

Nhân hai vế của phương trình trên cho $\frac{1}{\rho_{p(M_{in})}^m C_{p(M_{in})}}$ ta được:

$$\begin{aligned} \frac{T_{in}^{m+1} - T_{in}^m}{\Delta t} &= \frac{k_p^m}{\rho_{p(M_{in})}^m C_{p(M_{in})}^m (\Delta x^m)^2} (T_{in-1}^{m+1} - 2T_{in}^{m+1} + T_{in+1}^{m+1}) \\ &+ \frac{h_{fg}^m \rho_k}{\rho_{p(M_{in})}^m C_{p(M_{in})}^m \Delta t} (M_{in}^{m+1} - M_{in}^m) + \frac{q_{IFR}}{\rho_{p(M_{in})}^m C_{p(M_{in})}^m} \end{aligned} \quad (3.67)$$

$$\text{Đặt: } F_r^m = \frac{1}{\rho_{p(M)}^m C_{p(M)}^m}, \quad a_t^m = \frac{k_p^m}{C_{p(M)}^m \rho_{p(M)}^m}, \quad a_e^m = \frac{h_{fg}^m \rho_k}{C_{p(M)}^m \rho_{p(M)}^m}$$

Phương trình (3.67) được viết lại như sau:

$$\begin{aligned} -T_{in-1}^{m+1} \left[\frac{a_t^m}{(\Delta x^m)^2} \right] + T_{in}^{m+1} \left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{2a_t^m}{(\Delta x^m)^2} \right] - T_{in+1}^{m+1} \left[\frac{a_t^m}{(\Delta x^m)^2} \right] - M_{in}^{m+1} \left[\frac{a_e^m}{\Delta t} \right] \\ = T_{in}^m \left[\frac{1}{\Delta t} \right] - M_{in}^m \left[\frac{a_e^m}{\Delta t} \right] + F_r^m q_{IFR} \end{aligned} \quad (3.68)$$

b) Phương trình sai phân cho phần tử tại bề mặt VLS: $in = s$

Tại bề mặt VLS, ta có $in = s$, phương trình (3.68) được viết lại như sau:

$$\begin{aligned} -T_{s-1}^{m+1} \left[\frac{a_t^m}{(\Delta x^m)^2} \right] + T_s^{m+1} \left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{2a_t^m}{(\Delta x^m)^2} \right] - T_{s+1}^{m+1} \left[\frac{a_t^m}{(\Delta x^m)^2} \right] - M_s^{m+1} \left[\frac{a_e^m}{\Delta t} \right] \\ = T_s^m \left[\frac{1}{\Delta t} \right] - M_s^m \left[\frac{a_e^m}{\Delta t} \right] + F_r^m q_{IFR} \end{aligned} \quad (3.69)$$

Trong phương trình (3.69), T_{s-1}^{m+1} được lấy từ phương trình điều kiện biên tại bề mặt VLS viết dưới dạng sai phân:

$$q_{IFR}^s + h_c^m (T_a^{m+1} - T_s^{m+1}) - h_{fg}^m h_m^m \rho_k (M_s^{m+1} - M_e^{m+1}) = -k_p \frac{(T_{s+1}^{m+1} - T_{s-1}^{m+1})}{2\Delta x^m} \quad (3.70)$$

Suy ra:

$$T_{s-1}^{m+1} = \frac{2\Delta x}{k_p} q_{IFR}^s + \frac{2\Delta x}{k_p} h_c^m (T_a^{m+1} - T_s^{m+1}) - \frac{2\Delta x}{k_p} h_{fg}^m h_m^m \rho_k (M_s^{m+1} - M_e^{m+1}) + T_{s+1}^{m+1} \quad (3.71)$$

Thay phương trình (3.71) vào phương trình (3.69), sau khi rút gọn ta được:

$$\begin{aligned} -T_s^{m+1} \left[\frac{h_c^m}{k_p} + \frac{1}{\Delta x^m} + \frac{1}{2F^m} \right] + T_1^{m+1} \left[\frac{1}{\Delta x^m} \right] + M_s^{m+1} [a_s^m - a_m^m] = -T_a^{m+1} \left[\frac{h_c^m}{k_p} \right] \\ - T_s^m \left[\frac{1}{2F^m} \right] - M_e^{m+1} [a_m^m] + M_s^m [a_s^m] - q_{IFR} \Delta x - q_{IFR}^s \left[\frac{1}{2k_p} \right] \end{aligned} \quad (3.72)$$

Trong đó: $a_m^m = \frac{h_{fg}^m h_m^m \rho_k}{k_p}$, $a_s^m = \frac{\Delta x^m h_{fg}^m \rho_k}{2k_p \Delta t}$, $F^m = \frac{k_p^m \Delta t}{C_{p(M)}^m \rho_{p(M)}^m \Delta x^m}$

c) Phương trình sai phân cho phần tử ở tâm: $in = c$

Tại bề tâm VLS, ta có $in = c$, phương trình (3.68) được viết lại như sau:

$$\begin{aligned} -T_{c-1}^{m+1} \left[\frac{a_t^m}{(\Delta x^m)^2} \right] + T_c^{m+1} \left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{2a_t^m}{(\Delta x^m)^2} \right] - T_{c+1}^{m+1} \left[\frac{a_t^m}{(\Delta x^m)^2} \right] - M_c^{m+1} \left[\frac{a_e^m}{\Delta t} \right] \\ = T_c^m \left[\frac{1}{\Delta t} \right] - M_c^m \left[\frac{a_e^m}{\Delta t} \right] + F_r^m q_{IFR} \end{aligned} \quad (3.73)$$

Trong phương trình (3.73), T_{c+1}^{m+1} được lấy từ phương trình điều kiện biên tại tâm VLS viết dưới dạng sai phân:

$$\frac{(T_{i+1}^{m+1} - T_{i-1}^{m+1})}{2\Delta x} = 0 \Rightarrow T_{c-1}^{m+1} = T_{c+1}^{m+1} \quad (3.74)$$

Thay phương trình (3.74) vào phương trình (3.73), sau khi rút gọn ta được:

$$\begin{aligned} -T_{c-1}^{m+1} \left[\frac{2}{\Delta x^m} \right] + T_c^{m+1} \left[\frac{2}{\Delta x^m} + \frac{1}{F^m} \right] - M_c^{m+1} \left[\frac{h_{fg}^m}{F_k^m C_{p(M_c)}^m} \right] = T_c^m \left[\frac{1}{F^m} \right] \\ - M_c^m \left[\frac{h_{fg}^m}{F_k^m C_{p(M_c)}^m} \right] + q_{IFR} \frac{\Delta x}{k_p^m} \end{aligned} \quad (3.75)$$

Trong đó: $F_k^m = \frac{k_p \Delta t}{C_{p(M)}^m \rho_k \Delta x^m}$

3.6.1.2. Hệ phương trình sai phân truyền âm

a) Phương trình sai phân cho các phần tử bên trong VLS: $in = 1 \div (c-1)$

Phương trình truyền âm (3.43) được viết dưới dạng sai phân như sau:

$$\frac{(M_{in}^{m+1} - M_{in}^m)}{\Delta t} = D_{m_{in}}^m \frac{M_{in-1}^{m+1} - 2M_{in}^{m+1} + M_{in+1}^{m+1}}{(\Delta x^m)^2} \quad (3.76)$$

Sau khi rút gọn ta được:

$$-M_{in-1}^{m+1} \left[\frac{D_{m_{in}}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] + M_{in}^{m+1} \left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{2D_{m_{in}}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] - M_{in+1}^{m+1} \left[\frac{D_{m_{in}}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] = M_{in}^m \left[\frac{1}{\Delta t} \right] \quad (3.77)$$

b) Phương trình sai phân cho phần tử tại bề mặt VLS: $in = s$

Tại bề mặt VLS, ta có $in = s$, phương trình (3.77) được viết lại như sau:

$$-M_{s-1}^{m+1} \left[\frac{D_{m_{in}}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] + M_s^{m+1} \left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{2D_{m_{in}}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] - M_{s+1}^{m+1} \left[\frac{D_{m_{in}}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] = M_s^m \left[\frac{1}{\Delta t} \right] \quad (3.78)$$

Trong phương trình (3.78), M_{s-1}^{m+1} được lấy từ phương trình điều kiện biên tại bề mặt VLS viết dưới dạng sai phân:

$$-D_m \frac{(M_{s+1}^{m+1} - M_{s-1}^{m+1})}{2\Delta x^m} = h_m^m (M_e^{m+1} - M_s^{m+1}) \quad (3.79)$$

$$\text{Suy ra: } M_{s-1}^{m+1} = \frac{2h_m^m \Delta x^m}{D_m} (M_e^{m+1} - M_s^{m+1}) + M_{s+1}^{m+1} \quad (3.80)$$

Thay phương trình (3.80) vào phương trình (3.79), sau khi rút gọn ta được:

$$-M_s^{m+1} \left[h_m^m + \frac{D_{m_s}^m}{\Delta x^m} + \frac{\Delta x^m}{2\Delta t} \right] + M_1^{m+1} \left(\frac{D_{m_s}^m}{\Delta x^m} \right) = -M_s^m \left[\frac{\Delta x^m}{2\Delta t} \right] - M_e^{m+1} (h_m^m) \quad (3.81)$$

c) Phương trình sai phân cho phần tử ở tâm: $in = c$

Tại bề tâm VLS, ta có $in = c$, phương trình (3.77) được viết lại như sau:

$$-M_{c-1}^{m+1} \left[\frac{D_{m_{in}}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] + M_c^{m+1} \left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{2D_{m_{in}}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] - M_{c+1}^{m+1} \left[\frac{D_{m_{in}}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] = M_c^m \left[\frac{1}{\Delta t} \right] \quad (3.82)$$

Trong phương trình (3.82), M_{c+1}^{m+1} được lấy từ phương trình điều kiện biên tại tâm VLS viết dưới dạng sai phân:

$$\frac{(M_{i+1}^{m+1} - M_{i-1}^{m+1})}{2\Delta x} = 0 \Rightarrow M_{c-1}^{m+1} = M_{c+1}^{m+1} \quad (3.83)$$

Thay phương trình (3.83) vào phương trình (3.82), sau khi rút gọn ta được:

$$-M_{c-1}^{m+1} \left[\frac{2D_{m_{in}}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] + M_c^{m+1} \left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{2D_{m_{in}}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] = M_c^m \left[\frac{1}{\Delta t} \right] \quad (3.84)$$

Như vậy, ta sẽ thiết lập được hệ phương trình sai phân gồm 14 phương trình, tương ứng với 7 phần tử cần xác định nhiệt độ và độ chứa ẩm tại một thời điểm bất kỳ. Từ đó viết lại hệ gồm 14 phương trình dưới dạng ma trận có dạng như sau:

$$\begin{bmatrix} a_{T(1,0)} & \dots & a_{T(1,n+1)} & a_{M(1,0)} & \dots & a_{M(1,n+1)} \\ a_{T(2,0)} & \dots & a_{T(2,n+1)} & a_{M(2,0)} & \dots & a_{M(2,n+1)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{T(n+1,0)} & \dots & a_{T(n+1,n+1)} & a_{M(n+1,0)} & \dots & a_{M(n+1,n+1)} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} T_1 \\ \dots \\ \dots \\ M_{(n+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 \\ \dots \\ \dots \\ c_{(n+1)} \end{bmatrix} \quad (3.85)$$

Với a_T là các giá trị hệ số có mặt trong phương trình tính nhiệt độ, a_M là các giá trị hệ số có mặt trong các phương trình độ ẩm và c_n là các hằng số.

Giải hệ phương trình 3.85 bằng phương pháp ma trận nghịch đảo (Trịnh Văn Quang, 2009) sẽ cho nghiệm là các giá trị nhiệt độ và độ ẩm tại từng thời điểm bất kỳ. Quá trình tính toán sẽ dừng lại khi độ chênh giá trị độ chứa ẩm trung bình M_{tb}^m giữa 2 bước thời gian liên tiếp nhau đủ nhỏ ($\Delta M_{tb}^m \leq 10^{-5}$). Trong đó độ chứa ẩm trung bình thể tích VLS tại thời điểm “m” được tính bằng:

$$M_{tb}^m = \frac{\sum_i^{N_x} V_i^m M_i^m}{\sum_i^{N_x} V_i^m} \quad (3.86)$$

Nhiệt độ trung bình theo thể tích VLS tại thời điểm “m” sẽ được tính tương tự theo:

$$T_{tb}^m = \frac{\sum_i^{N_x} V_i^m T_i^m}{\sum_i^{N_x} V_i^m} \quad (3.87)$$

Hệ phương trình TNTA với 7 phân tử cho nửa bề dày tấm mực có dạng như sau (3.88):

$$\begin{aligned} -T_s^{m+1} \left[\frac{h_c^m}{k_p} + \frac{1}{\Delta x^m} + \frac{1}{2F^m} \right] + T_1^{m+1} \left[\frac{1}{\Delta x^m} \right] + M_s^{m+1} [a_s^m - a_m^m] &= -T_a^{m+1} \left[\frac{h_c^m}{k_p} \right] - T_s^m \left[\frac{1}{2F^m} \right] \\ &\quad - M_e^{m+1} [a_m^m] + M_s^m a_s^m - q_{IFR} \Delta x - q_{IFR}^s \left[\frac{1}{2k_p} \right] \\ -T_s^{m+1} \left[\frac{a_{t_1}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] + T_1^{m+1} \left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{2a_{t_1}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] - T_2^{m+1} \left[\frac{a_{t_1}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] - M_1^{m+1} \left[\frac{a_{e_1}^m}{\Delta t} \right] &= T_1^m \left[\frac{1}{\Delta t} \right] - M_1^m \left[\frac{a_{e_1}^m}{\Delta t} \right] + F_{r_1}^m q_{IFR,1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -T_1^{m+1} \left[\frac{a_{t_2}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] + T_2^{m+1} \left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{2a_{t_2}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] - T_3^{m+1} \left[\frac{a_{t_2}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] - M_2^{m+1} \left[\frac{a_{e_2}^m}{\Delta t} \right] = T_2^m \left[\frac{1}{\Delta t} \right] - M_2^m \left[\frac{a_{e_2}^m}{\Delta t} \right] + F_{r_2}^m q_{IFR,2} \\
& -T_2^{m+1} \left[\frac{a_{t_3}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] + T_3^{m+1} \left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{2a_{t_3}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] - T_4^{m+1} \left[\frac{a_{t_3}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] - M_3^{m+1} \left[\frac{a_{e_3}^m}{\Delta t} \right] = T_3^m \left[\frac{1}{\Delta t} \right] - M_3^m \left[\frac{a_{e_3}^m}{\Delta t} \right] + F_{r_3}^m q_{IFR,3} \\
& -T_3^{m+1} \left[\frac{a_{t_4}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] + T_4^{m+1} \left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{2a_{t_4}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] - T_5^{m+1} \left[\frac{a_{t_4}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] - M_4^{m+1} \left[\frac{a_{e_4}^m}{\Delta t} \right] = T_4^m \left[\frac{1}{\Delta t} \right] - M_4^m \left[\frac{a_{e_4}^m}{\Delta t} \right] + F_{r_4}^m q_{IFR,4} \\
& -T_4^{m+1} \left[\frac{a_{t_5}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] + T_5^{m+1} \left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{2a_{t_5}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] - T_c^{m+1} \left[\frac{a_{t_5}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] - M_5^{m+1} \left[\frac{a_{e_5}^m}{\Delta t} \right] = T_5^m \left[\frac{1}{\Delta t} \right] - M_5^m \left[\frac{a_{e_5}^m}{\Delta t} \right] + F_{r_5}^m q_{IFR,5} \\
& -T_5^{m+1} \left[\frac{2}{\Delta x^m} \right] + T_c^{m+1} \left[\frac{2}{\Delta x^m} + \frac{1}{F^m} \right] - M_c^{m+1} \left[\frac{h_{fg}^m}{F_k C_{p(M_c)}} \right] = T_c^m \left[\frac{1}{F^m} \right] - M_c^m \left[\frac{h_{fg}^m}{F_k C_{p(M_c)}} \right] + q_{IFR,c} \frac{\Delta x}{k_p} \\
& -M_s^{m+1} \left[h_m^m + \frac{D_{m_s}^m}{\Delta x^m} + \frac{\Delta x^m}{2\Delta t} \right] + M_1^{m+1} \left(\frac{D_{m_s}^m}{\Delta x^m} \right) = -M_s^m \left(\frac{\Delta x^m}{2\Delta t} \right) - M_e^{m+1} (h_m^m) \tag{3.88} \\
& -M_s^{m+1} \left[\frac{D_{m_1}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] + M_1^{m+1} \left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{2D_{m_1}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] - M_2^{m+1} \left[\frac{D_{m_1}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] = M_1^m \left[\frac{1}{\Delta t} \right] \\
& -M_1^{m+1} \left[\frac{D_{m_2}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] + M_2^{m+1} \left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{2D_{m_2}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] - M_3^{m+1} \left[\frac{D_{m_2}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] = M_2^m \left[\frac{1}{\Delta t} \right] \\
& -M_2^{m+1} \left[\frac{D_{m_3}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] + M_3^{m+1} \left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{2D_{m_3}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] - M_4^{m+1} \left[\frac{D_{m_3}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] = M_3^m \left[\frac{1}{\Delta t} \right] \\
& -M_3^{m+1} \left[\frac{D_{m_4}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] + M_4^{m+1} \left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{2D_{m_4}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] - M_5^{m+1} \left[\frac{D_{m_4}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] = M_4^m \left[\frac{1}{\Delta t} \right] \\
& -M_4^{m+1} \left[\frac{D_{m_5}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] + M_5^{m+1} \left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{2D_{m_5}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] - M_c^{m+1} \left[\frac{D_{m_5}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] = M_5^m \left[\frac{1}{\Delta t} \right] \\
& -M_5^{m+1} \left[\frac{2D_{m_c}^m}{(\Delta x)^2} \right] + M_c^{m+1} \left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{2D_{m_c}^m}{(\Delta x)^2} \right] = M_c^m \left[\frac{1}{\Delta t} \right]
\end{aligned}$$

Từ hệ phương trình (3.88) và (3.85) được viết lại như sau:

$$[A_{T,M}]^m \times [X_{(T,M)}]^{m+1} = [C_{(T,M)}]^m \quad (3.89)$$

Trong đó các ma trận thành phần được xác định như sau:

$$[A_{T,M}]^m = \begin{bmatrix} a_{T(1,1)} & a_{T(1,2)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{M(1,8)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{T(2,1)} & a_{T(2,2)} & a_{T(2,3)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{M(2,9)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{T(3,2)} & a_{T(3,3)} & a_{T(3,4)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{M(3,10)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{T(4,3)} & a_{T(4,4)} & a_{T(4,5)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{M(4,11)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{T(5,4)} & a_{T(5,5)} & a_{T(5,6)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{M(5,12)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{T(6,5)} & a_{T(6,6)} & a_{T(6,7)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{M(6,13)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{M(7,6)} & a_{M(7,7)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{M(7,14)} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{M(8,8)} & a_{M(8,9)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{M(9,8)} & a_{M(9,9)} & a_{M(9,10)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{M(10,9)} & a_{M(10,10)} & a_{M(10,11)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{M(11,10)} & a_{M(11,11)} & a_{M(11,12)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{M(12,11)} & a_{M(12,12)} & a_{M(12,13)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{M(13,12)} & a_{M(13,13)} & a_{M(13,14)} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{M(14,13)} & a_{M(14,14)} \end{bmatrix}$$

(3.89a)

Ma trận biến: $[X_{(T,M)}]^{m+1} = \begin{bmatrix} T_s \\ T_1 \\ T_2 \\ T_{3c} \\ T_{2c} \\ T_{1c} \\ T_{sc} \\ M_b \\ M_1 \\ M_2 \\ M_{3c} \\ M_{2c} \\ M_{1c} \\ M_{sc} \end{bmatrix}$ (3.89b), ma trận hệ số vế phải: $[C_{(T,M)}]^m = \begin{bmatrix} C_{T1} \\ C_{T2} \\ C_{T3} \\ C_{T4} \\ C_{T5} \\ C_{T6} \\ C_{T7} \\ C_{M8} \\ C_{M9} \\ C_{M10} \\ C_{M11} \\ C_{M12} \\ C_{M13} \\ C_{M14} \end{bmatrix}$ (3.89c)

Các giá trị hệ số trong ma trận $[A_{T,M}]$.

$$a_{T(1,1)} = -\left[\frac{h_c^m}{k_p} + \frac{1}{\Delta x^m} + \frac{1}{2F^m} \right]; \quad a_{T(1,2)} = \left[\frac{1}{\Delta x^m} \right]; \quad a_{M(1,8)} = -[a_s^m - a_m^m], \quad a_{T(7,6)} = -\left[\frac{2}{\Delta x^m} \right]$$

$$a_{T(7,7)} = \left[\frac{2}{\Delta x^m} + \frac{1}{F^m} \right], a_{M(8,8)} = - \left[h_m^m + \frac{D_{m_s}^m}{\Delta x^m} + \frac{\Delta x}{2\Delta t} \right], a_{M(8,9)} = \left[\frac{D_{m_s}^m}{\Delta x^m} \right], a_{M(14,13)} = - \left[\frac{2D_{m_c}^m}{\Delta x^m} \right],$$

$$a_{M(7,14)} = - \left[\frac{h_{fg}^m}{F_k^m C_{p(M_c)}^m} \right], a_{M(14,14)} = \left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{2D_{m_c}^m}{\Delta x^m} \right] \text{ Đối với } in = 1 \div 5;$$

$$a_{T(in+1,1)} = - \left[\frac{a_{i_{in}}^m}{(\Delta x^m)^2} \right]; a_{T(in+1,in+1)} = \left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{2a_{i_{in}}^m}{(\Delta x^m)^2} \right], a_{T(in+1,in+2)} = - \left[\frac{a_{i_{in}}^m}{(\Delta x^m)^2} \right]$$

$$a_{M(in+8,in+7)} = - \left[\frac{D_{m_{in}}^m}{(\Delta x^m)^2} \right], a_{M(in+8,in+8)} = \left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{2D_{m_{in}}^m}{(\Delta x^m)^2} \right], a_{M(in+8,in+9)} = - \left[\frac{D_{m_{in}}^m}{(\Delta x^m)^2} \right]$$

Các giá trị hệ số trong ma trận $[C_{T,M}]$.

$$C_{T1} = - \left(T_a^{m+1} \left[\frac{h_c^m}{k_p} \right] + T_s^m \left[\frac{1}{2F^m} \right] + M_e^{m+1} \left[a_m^m \right] - M_s^m a_s^m + q_{IFR} \Delta x + q_{IFR}^s \left[\frac{1}{2k_p} \right] \right)$$

$$C_{Tin} = \left(T_{in}^m \left[\frac{1}{\Delta t} \right] - M_1^m \left[\frac{a_{e_{in}}^m}{\Delta t} \right] + F_{i_{in}}^m q_{IFR,in} \right), in = 2 \div 6, C_{T7} = T_c^m \left[\frac{1}{F^m} \right] - M_c^m \left[\frac{h_{fg}^m}{F_k^m C_{p(M_c)}^m} \right] + q_{IFR,c} \frac{\Delta x}{k_p^m},$$

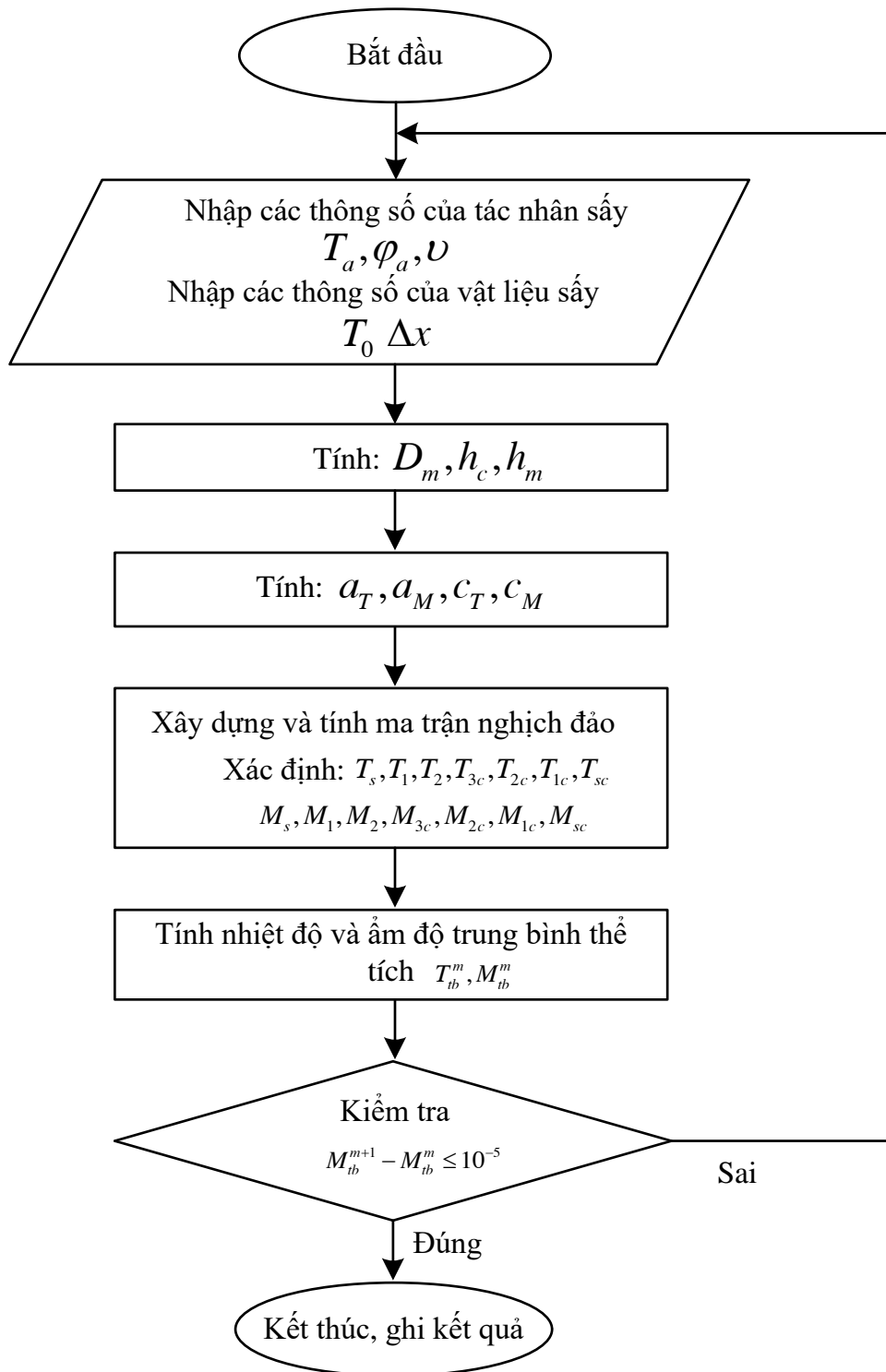
$$C_{M14} = M_c^m \left[\frac{1}{\Delta t} \right], C_{M8} = -M_s^m \left(\frac{\Delta x^m}{2\Delta t} \right) - M_e^{m+1} (h_m^m), C_{Min} = M_{in+7}^m \left[\frac{1}{\Delta t} \right], in = 2 \div 6$$

Nhiệt độ và độ chứa ẩm tại các điểm nút trong ma trận $[X_{(T,M)}]^{m+1}$ được xác định như sau:

$$[X_{(T,M)}]^{m+1} = \{ [A_{T,M}]^m \}^{-1} \times [C_{(T,M)}]^m \quad (3.90)$$

Để đơn giản trong quá trình xây dựng và tính toán nhiều tác giả như Trần Văn Phú (1988), Trịnh Văn Quang (2004), Yunus (2002), Holman (2009) đã viết hệ phương trình sai phân dưới dạng hàm ẩn, với cách viết này nghiệm của hệ phương trình sai phân luôn hội tụ với mọi bước thời gian Δt (Trần Văn Phú, 2002).

Trong luận án này tác giả cũng viết hệ phương trình sai phân dưới dạng hàm ẩn và được lập trình bằng chương trình Matlab 2014 để giải. Với lưu đồ thuật toán giải hệ phương trình được biểu diễn trên hình 3.17 và phụ lục 5.



Hình 3.17. Lưu đồ thuật toán giải hệ phương trình (3.85)

Hệ phương trình TNTA được giải với các thông số nhiệt vật lý của VLS và thông số đầu vào của hệ thống như sau:

Stt	Thông số	Giá trị	Đơn vị
1	Độ chứa ẩm ban đầu M_0	5,25	(kg ẩm/kg VLK)
2	Hệ số khuếch tán ẩm $D_m(T)$	$D_m(T) = 2,521.10^{-3} \exp\left[-\frac{42810.909}{8,314.(T + 273.15)}\right]$	m^2/s
3	Khối lượng riêng của mực ẩm ρ_p	$\rho_p = 2059 - 71\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right) - 736 \exp\left(0,247 \frac{\omega}{\omega_0}\right)$	kg/m^3
4	Độ chứa ẩm cân bằng của mực M_e	$\omega_e = [\exp(-1,383 - 0,029.T)]^{1/1,267} (-\ln \phi)^{-1/1,267}$	(kg ẩm/kg VLK)
5	Nhiệt dung riêng C_p	$C_p = 3,113 + 0,006.\omega$	kJ/kg
6	Hệ số trao đổi nhiệt đối lưu (h_c)	$h_c = 0,664 Re_L^{1/2} Pr^{1/3} \frac{k_a}{L}$	$W/(m^2K)$
7	Hệ số trao đổi chất đối lưu (h_m)	$h_m = 0,664 Re_L^{1/2} Sc^{1/3} \frac{D_a}{L}$	m/s
8	Hệ số dẫn nhiệt (k_p)	0,49	$W/(m.K)$

3.6.2. Kiểm chứng mô hình lý thuyết với các nghiên cứu về sấy mực đã công bố

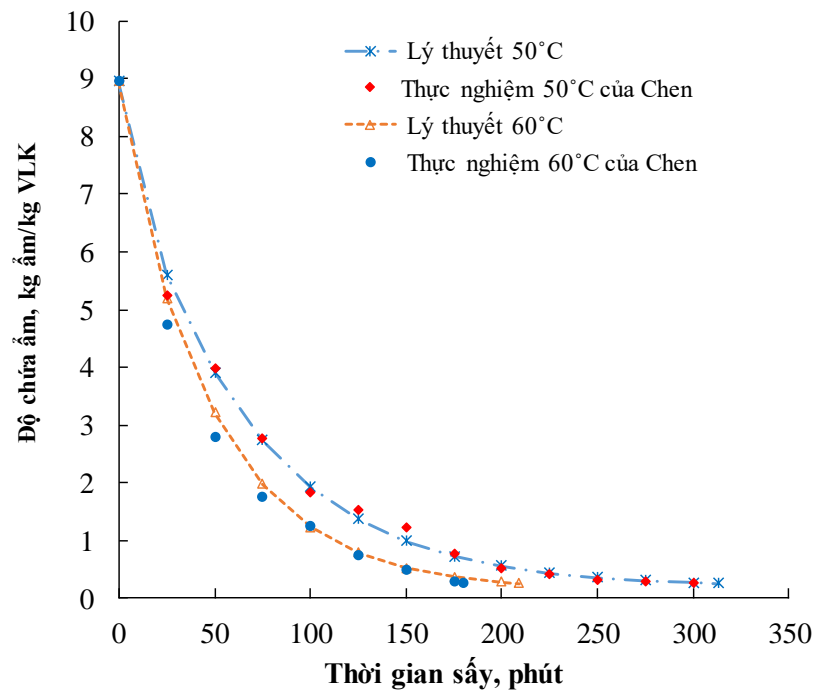
Để kiểm chứng sự phù hợp và tính chính xác của mô hình toán đã thiết lập cho hệ thống sấy mực bằng bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại, kết quả mô phỏng mô hình toán được so sánh với một số kết quả nghiên cứu về sấy mực ống đã được công bố. Hiện nay, các công bố chủ yếu là nghiên cứu thực nghiệm, chưa có công trình nào nghiên cứu lý thuyết về sấy mực ống. Các công trình này tập trung chủ yếu vào các phương pháp sấy bơm nhiệt, bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại, không khí nóng và

không khí nóng kết hợp hồng ngoại. Tuy nhiên với các công trình đã công bố về bơm nhiệt và bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại thì kết quả của các tác giả chỉ tập trung vào chất lượng sản phẩm sau khi sấy, không mô tả kỹ về các thông số của QTS cũng như không đưa ra được đường cong sấy của mực trong QTS. Do đó, không thể sử dụng kết quả của các công trình này để kiểm chứng với kết quả mô phỏng. Các nghiên cứu của Chen (2013) khi nghiên cứu thực nghiệm sấy mực bằng không khí nóng và nghiên cứu của Vega-Gálvez (2011) về sấy mực bằng bức xạ hồng ngoại – đối lưu đã mô tả cụ thể các thông số QTS cũng như đưa ra được quá trình giảm ẩm của mực trong QTS. Do đó các kết quả này sẽ được chúng tôi sử dụng để kiểm chứng mô hình toán đã thiết lập.

Mô hình toán của QTS mực bằng bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại do chúng tôi xây dựng khi sử dụng để mô phỏng các QTS mực bằng không khí nóng và hồng ngoại - đối lưu, được điều chỉnh như sau: giá trị của nguồn phát hồng ngoại sẽ được gán giá trị bằng không ($q_{IRR} = 0$) đối với phương pháp sấy không khí nóng và gán giá trị bằng giá trị thực nghiệm đối với phương pháp sấy hồng ngoại - đối lưu; nhiệt độ (T_a) được gán bằng nhiệt độ môi trường; vận tốc của TNS (v) sẽ được gán bằng chính giá trị thực nghiệm và giữ nguyên trong quá trình mô phỏng; Giá trị độ ẩm của TNS sẽ ảnh hưởng đến độ ẩm cân bằng của QTS (M_e), giá trị này sẽ làm thay đổi nhiệt lượng cần thiết để nước trên bề mặt vật liệu biến thành hơi và lượng ẩm tỏa ra môi trường bên ngoài, do đó giá trị độ ẩm ban đầu (φ_a) của TNS trong mô hình toán sẽ được gán bằng giá trị ẩm độ của không khí môi trường (tùy thuộc vào điều kiện thí nghiệm thực tế) và được giữ nguyên trong quá trình mô phỏng.

❖ So sánh với kết quả nghiên cứu thực nghiệm của Chen

Hình 3.18 so sánh các giá trị dự đoán độ chứa ẩm trung bình của mô hình lý thuyết với kết quả thực nghiệm của Chen. Tại mức nhiệt độ là 50°C, sai lệch lớn nhất là 6,6%, nếu tính cho toàn bộ QTS ta có $RMSE = 0,28$ và $P_{tb} = 8,9\%$, sai lệch về thời gian sấy 4,3%. Ở mức nhiệt độ 60°C sai lệch về độ chứa ẩm trung bình lớn nhất bằng 9,1% và trong toàn bộ QTS có giá trị là $RMSE = 0,24$ và $P_{tb} = 10,9\%$, sai lệch 13,8% so với kết quả thực nghiệm.

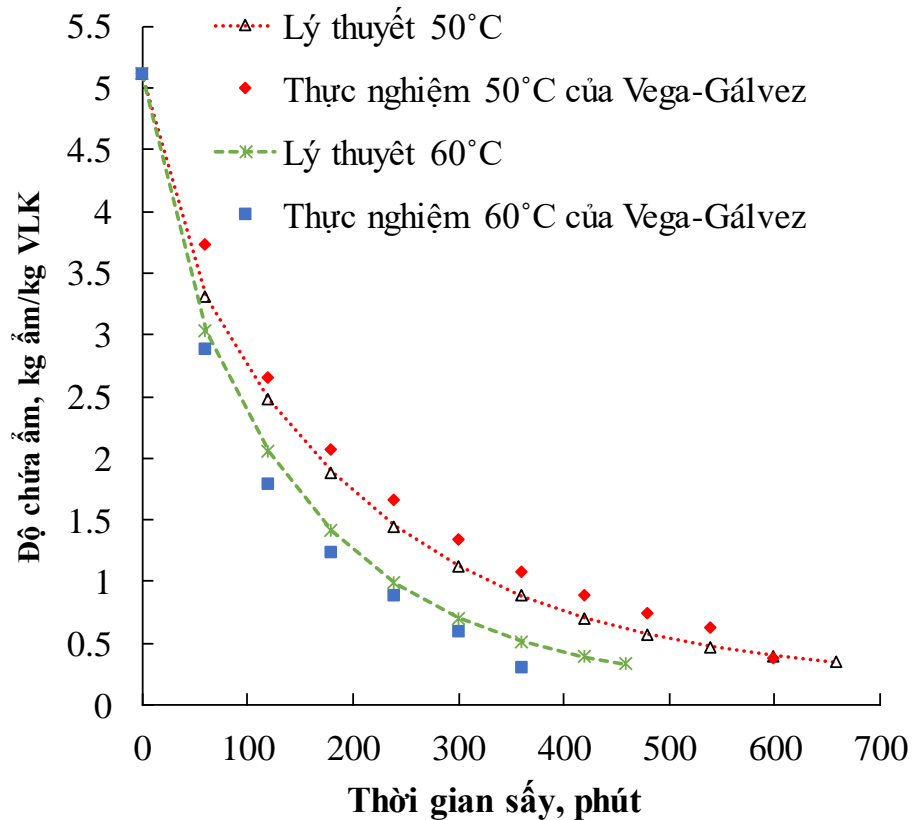


Hình 3.18. So sánh kết quả của mô hình lý thuyết với kết quả thực nghiệm của Chen

❖ So sánh với kết quả nghiên cứu thực nghiệm của Vega-Gálvez

Mô hình toán lý thuyết tiếp tục được kiểm chứng với kết quả thực nghiệm của Vega-Gálvez khi sấy mực bằng phương pháp sấy không khí nóng. Như vậy bên cạnh việc gán cùng giá trị đầu vào (chiều dày, độ ẩm ban đầu của vật liệu; nhiệt độ, độ ẩm, vận tốc TNS và hệ số khuếch tán ẩm) như nghiên cứu thực nghiệm thì trong phương trình (3.42) thành phần năng lượng từ bức xạ hồng ngoại vào VLS q_{IFR} được gán giá trị bằng không.

Đường cong sấy so sánh kết quả của mô hình lý thuyết với kết quả thực nghiệm của Vega-Gálvez được biểu diễn trên hình 3.19. Sai lệch độ chứa ẩm trung bình giữa kết quả dự đoán và thực nghiệm trong QTS tại các mức nhiệt độ 50°C và 60°C lần lượt là 17,9% và 15,6%. Thời gian sấy cho kết quả thực nghiệm tại các mức nhiệt độ 50°C và 60°C lần lượt là 600 và 370 phút, trong khi thời gian sấy dự đoán là 676 và 459 phút. Sai lệch về thời gian sấy và tốc độ sấy giữa kết quả thực nghiệm và dự đoán là 11,2%, 25% (kg ẩm/kgVLK.phút) ở mức nhiệt độ 50°C và 19,3%, 18,5% (kg ẩm/kgVLK.phút) ở mức nhiệt độ 60°C.



Hình 3.19. So sánh kết quả của mô hình lý thuyết với kết quả thực nghiệm của Vega-Gálvez

Qua nhận xét trên có thể thấy rằng các kết quả dự đoán từ mô hình toán mô tả phù hợp với diễn biến của quá trình biến đổi ẩm theo số liệu thực nghiệm đã được công bố. Sự sai lệch giữa kết quả dự đoán bằng mô hình toán lý thuyết và thực nghiệm có thể do thực tế khi tiến hành sấy, các giá trị về nhiệt, ẩm của vật liệu thay đổi, các giá trị hệ số khuếch tán ẩm bị ảnh hưởng thêm bởi các yếu tố khác như hiện tượng cong vênh mà trong phạm vi nghiên cứu lý thuyết bỏ qua do tính phức tạp của hiện tượng. Sự đối xứng hoàn toàn giữa hai mặt trên và dưới của VLS trên thực tế còn chưa hợp lý do sự che khuất của khay, lưới đỡ vật liệu phía dưới đáy.

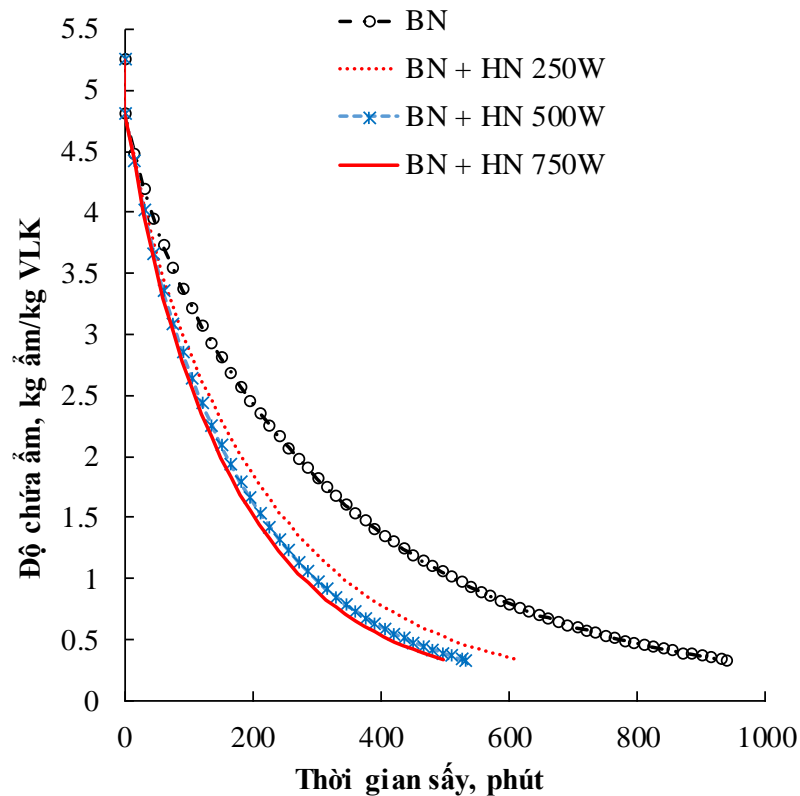
Tuy nhiên, với những kết quả so sánh nêu trên cho thấy các đường cong sấy được tính từ mô hình toán lý thuyết có biên dạng và xu hướng là khá tương đồng với các đường cong thực nghiệm. Do đó hoàn toàn có thể dùng mô hình toán do chúng tôi xây dựng ở trên để nghiên cứu quá trình truyền nhiệt, truyền ẩm khi sấy mực ống bằng bơm nhiệt có sự hỗ trợ của bức xạ hồng ngoại.

3.6.3. Động lực học quá trình sấy

Động học QTS là nói đến quan hệ về sự thay đổi độ chứa ẩm của VLS theo thời gian. Để nghiên cứu quá trình này bằng lý thuyết, chúng tôi thực hiện giải đồng thời hệ phương trình truyền nhiệt (3.42) và truyền ẩm (3.43) ứng với các thông số TNS và VLS đã lựa chọn trong mục 2.6.1.1.

3.6.3.1. Đường cong sấy

Đường cong sấy là đồ thị biểu diễn mối quan hệ giữa sự biến thiên độ chứa ẩm trung bình của VLS theo thời gian sấy. Dựa trên các kết quả mô phỏng, đường cong sấy ứng với thông số của TNS bao gồm: nhiệt độ 45°C , vận tốc $1,4\text{ m/s}$ và độ ẩm tương đối 15% , được biểu diễn trên đồ thị hình 3.20 ở các trường hợp chỉ sử dụng bơm nhiệt; bơm nhiệt kết hợp với bức xạ hồng ngoại tại 3 mức công suất là 250 W , 500 W và 750 W .



Hình 3.20. Đường cong sấy ở chế độ $T_a = 45^{\circ}\text{C}$, $v = 1,4\text{ m/s}$; $\varphi_a = 15\%$

Kết quả trên hình 3.20 cho thấy ở các chế độ sấy khác nhau, xu hướng giảm ẩm của mực tương đối giống nhau. Trong giai đoạn đầu ($0 \div 200$ phút) độ ẩm của mực

giảm nhanh sau đó giảm dần cho đến khi đạt ẩm độ yêu cầu. Kết quả cũng cho thấy khi có sự hỗ trợ của bức xạ hồng ngoại, thời gian sấy giảm đi rõ ràng: khi sấy bằng bơm nhiệt không có sự hỗ trợ của hồng ngoại, thời gian sấy cần thiết để vật liệu đạt độ ẩm cuối 25% là 938 phút. Khi có sự hỗ trợ của dòng bức xạ ở công suất 250 W thì thời gian sấy giảm còn 615 phút, giảm 34,4% so với sấy bơm nhiệt. Nếu tiếp tục tăng công suất bức xạ lên 500 W hay 750 W thì thời gian sấy giảm xuống còn 532 phút và 497 phút.

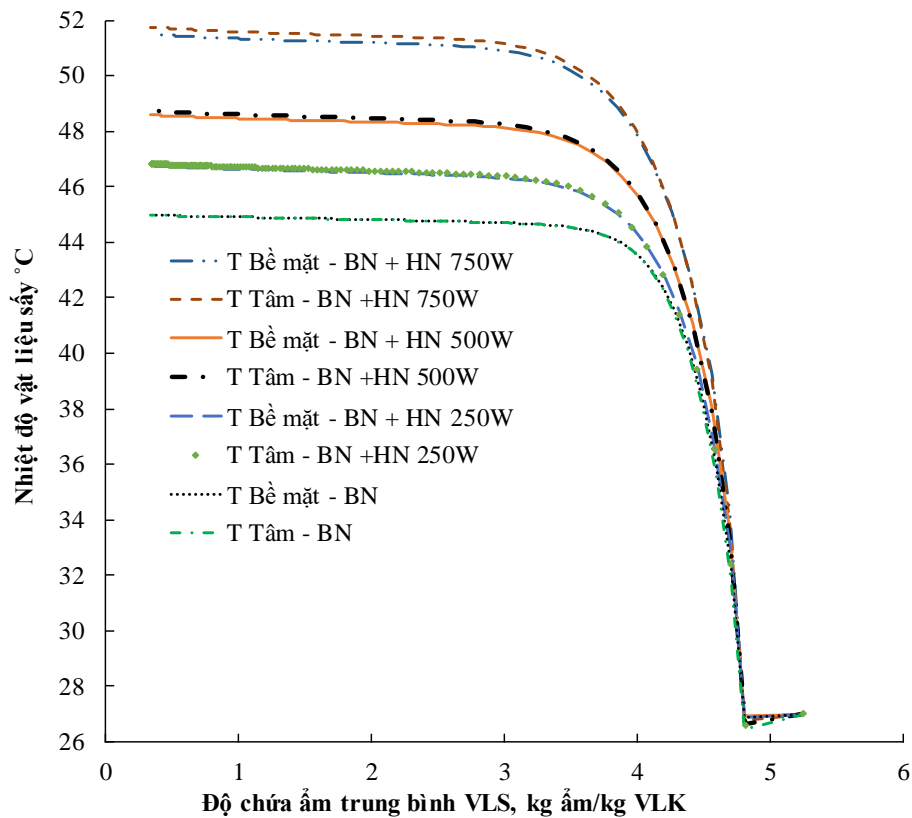
Kết quả trên hình 3.20 cũng cho thấy khi tăng công suất bức xạ hồng ngoại trong khoảng từ 250 W đến 750 W thì thời gian sấy giảm dần. Tuy nhiên, khả năng rút ngắn thời gian sấy không tỉ lệ thuận với mức tăng công suất. Điều này là do quá trình thoát ẩm của VLS ra bên ngoài cần có thời gian nhất định. Hơn nữa, nếu công suất tăng lên quá cao sẽ làm cho nhiệt độ của VLS tăng theo dẫn đến việc phá hủy các tính chất lý hóa của VLS và do đó làm giảm chất lượng VLS.

3.6.3.2. Đường cong nhiệt độ sấy

Đồ thị hình 3.21 biểu diễn sự thay đổi nhiệt độ tại tâm và nhiệt độ tại bề mặt của VLS theo độ chứa ẩm trung bình VLS.

Kết quả trên đồ thị hình 3.21 cho thấy trong giai đoạn đầu của QTS khi ẩm độ của mực còn cao và nhiệt độ của mực thấp xuất hiện sự giảm nhiệt độ cả ở tâm và bề mặt của VLS. Tuy nhiên, hiện tượng này chỉ xảy ra trong khoảng thời gian rất ngắn, sau đó nhiệt độ của cả bề mặt và tâm VLS đều tăng nhanh và ổn định ở mức nhiệt độ nhất định tương ứng với từng chế độ sấy. Theo phân tích sự thay đổi nhiệt độ trong QTS (Trần Văn Phú, 2002) việc tăng nhiệt độ cả tâm và bề mặt VLS chứng tỏ sự bắt đầu của giai đoạn tốc độ sấy giảm dần. Kết quả cũng cho thấy, khi đạt được mức nhiệt độ ổn định, nhiệt độ ở tâm có xu hướng cao hơn nhiệt độ tại bề mặt khi sấy có sự hỗ trợ của bức xạ hồng ngoại (Wang, 2014). Trong khi đó, đối với phương pháp sấy bơm nhiệt thì hầu như không có sự khác biệt giữa nhiệt độ tâm và nhiệt độ bề mặt của mực sấy. Khi công suất phát của hồng ngoại càng tăng thì mức độ chênh lệch giữa nhiệt độ tại tâm và tại bề mặt càng lớn. Sự chênh lệch này chính là một trong những ưu điểm của phương pháp sấy có sự hỗ trợ của bức xạ hồng ngoại, nó làm cho gradient

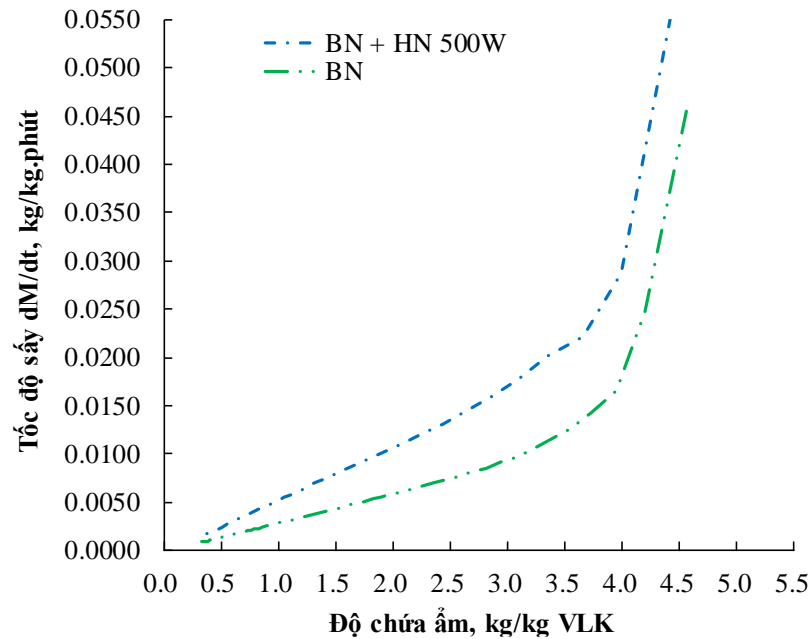
nhệt độ và ẩm độ trong VLS cùng chiều và kết quả làm tăng cường khả năng truyền ẩm bên trong vật liệu ra ngoài lớp biên nên rút ngắn được thời gian sấy. Nhiệt độ trung bình của VLS ở các mức 250 W, 500 W và 750 W lần lượt bằng 45,9°C, 47,6°C và 50,3°C. Như vậy, ở mức công suất hồng ngoại là 750 W thì nhiệt độ trung bình của VLS tăng cao làm ảnh hưởng đến chất lượng VLS. Đây cũng là cơ sở để chúng tôi lựa chọn mức công suất 500 W cho nghiên cứu thực nghiệm.



Hình 3.21. Đường cong nhiệt độ sấy của mực ống

3.6.3.3. Đường cong tốc độ sấy

Đường cong tốc độ sấy cho hai phương pháp sấy bơm nhiệt và bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại ở chế độ $T_a = 45^\circ\text{C}$, $v = 1,4 \text{ m/s}$; $\varphi_a = 15\%$ được biểu diễn trên hình 3.22. Kết quả thể hiện rõ rằng đường cong tốc độ sấy cũng chỉ xác định một chế độ tốc độ giảm dần và hầu như không tồn tại giai đoạn tốc độ sấy không đổi và giai đoạn đột nóng.



Hình 3.22. Đường cong tốc độ sấy ở chế độ $T_a = 45^\circ\text{C}$, $v = 1,4 \text{ m/s}$, $\varphi_a = 15\%$

Nhận xét

Kết quả nghiên cứu lý thuyết động học QTS dựa trên kết quả giải hệ phương trình truyền nhiệt truyền ẩm (3.42) và (3.43) cho thấy:

- Các QTS mục ứng với các thông số của TNS đã lựa chọn đều nằm trong giai đoạn tốc độ sấy giảm dần, giai đoạn đốt nóng và giai đoạn tốc độ sấy không đổi là rất ngắn.

- Việc bổ sung nguồn phát bức xạ hồng ngoại vào hệ thống sấy bơm nhiệt đã cho kết quả rõ ràng về khả năng rút ngắn thời gian sấy so với trường hợp chỉ có bơm nhiệt.

- Việc tăng công suất nguồn phát bức xạ hồng ngoại sẽ giảm thời gian sấy, nhưng sẽ đạt tới trạng thái mà ở đó nếu tiếp tục tăng công suất cũng không thể giảm nhanh thời gian sấy. Bên cạnh đó việc tăng công suất hồng ngoại sẽ làm tăng nhiệt độ VLS lên cao điều này có thể làm giảm chất lượng của sản phẩm sấy.

- Qua nghiên cứu lý thuyết động học QTS ở trên, chúng tôi rút ra được giá trị định hướng cho công suất hồng ngoại để tiếp tục nghiên cứu thực nghiệm là 500 W. Bên cạnh đó bản chất của quá trình dịch chuyển ẩm và truyền nhiệt của VLS trong QTS cũng đã được làm rõ thông qua các đồ thị biểu diễn ở trên.

3.7. Kết luận chương 3

Qua nội dung nghiên cứu trong chương này chúng tôi có 4 kết luận sau đây:

- Các thông số nhiệt vật lý của mực ống đã được xác định.
- Xây dựng được mô hình toán (hệ phương trình TNTA) biểu diễn QTS mực ống bằng phương pháp sấy bơm nhiệt khi có bổ sung dòng nhiệt bức xạ hồng ngoại.
- Thiết lập được phương trình sai phân và thuật toán để giải hệ phương trình TNTA khi có tính đến ảnh hưởng của dòng ẩm đến quá trình truyền nhiệt trong QTS.
- Kết quả giải được kiểm chứng sơ bộ độ phù hợp và chính xác của hệ phương trình TNTA do chúng tôi đề xuất.

Như vậy, trong chương này mô hình toán (hệ phương trình TNTA) của QTS mực khi sấy bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại đã được chúng tôi hoàn thiện và kiểm chứng sơ bộ với kết quả nghiên cứu của các tác giả khác. Trong chương tiếp theo, chúng tôi sẽ tiến hành thực nghiệm để kiểm chứng với điều kiện thực tế và xác định chế độ sấy phù hợp.

Chương 4

KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM KIỂM CHỨNG LÝ THUYẾT VÀ XÁC ĐỊNH CHẾ ĐỘ SẤY

4.1. Chuẩn bị nguyên liệu

Vật liệu sử dụng trong thí nghiệm là mực ống có trọng lượng của mỗi con $300 \div 350$ g, chiều dài 250 ± 10 mm, chiều rộng 140 ± 10 mm, chiều dày thân mực $6 \pm 0,5$ mm. Mực ống sau khi lựa chọn được xẻ dọc thân loại bỏ nội tạng, rửa sạch và để nơi thoáng mát trong khoảng 30 phút nhằm mục đích bề mặt của mực khô không đọng nước. Mỗi lần thí nghiệm được tiến hành trên 4 con mực (mẫu), trong đó ba mẫu dùng để tiến hành sấy khảo nghiệm, một mẫu sẽ được giữ cố định trong buồng sấy sau khi gắn cảm biến nhiệt độ vào thân mực (không xác định quá trình giảm ẩm của mẫu này). Sau khi cho mực vào buồng sấy tiến hành lắp đặt cảm biến, cài đặt nhiệt độ TNS, vận tốc TNS và công suất phát hồng ngoại theo chế độ sấy yêu cầu. Độ chứa ẩm ban đầu của mực ở mỗi mẻ sấy được xác định bằng phương pháp tủ sấy.



Hình 4.1. Mực ống đã qua sơ chế

Hai thanh đèn hồng ngoại có công suất mỗi thanh 1000W được gắn phía trên và dưới VLS, các thanh đèn hồng ngoại được điều chỉnh công suất phát và được lắp đầu chụp nhằm tập trung bức xạ theo hướng định sẵn, khoảng cách từ thanh đèn hồng ngoại đến VLS mỗi bên là 150 mm (Wang và ctv, 2014).

Hiệu quả QTS được thể hiện qua thời gian sấy, hàm lượng phần trăm NH_3 và ứng suất cắt của phương pháp sấy BN+HN. Đối với hàm lượng NH_3 và ứng suất cắt các mẫu sau khi sấy xong được gửi đi xét nghiệm tại trung tâm.



Hình 4.2. Bố trí mực ống và thanh đèn hồng ngoại

Các thí nghiệm được thực hiện tại Trung tâm Công nghệ và Thiết bị nhiệt lạnh, Trường Đại học Nông Lâm TP. Hồ Chí Minh.

4.2. Kiểm chứng mô hình lý thuyết với kết quả thực nghiệm tại các mức nhiệt độ khác nhau

Hệ phương trình TNTA được giải với các thông số nhiệt vật lý đã được xác định như trong mục 3.1 ÷ 3.4. Mặt khác các thông số như: chiều dày, nhiệt độ ban đầu, công suất nguồn phát hồng ngoại, vận tốc, nhiệt độ và độ ẩm TNS được xác định bằng dụng cụ đo trong quá trình thực nghiệm sẽ được sử dụng làm các giá trị đầu vào của quá trình tính toán lý thuyết, các thông số này được trình bày cụ thể trong bảng 4.1.

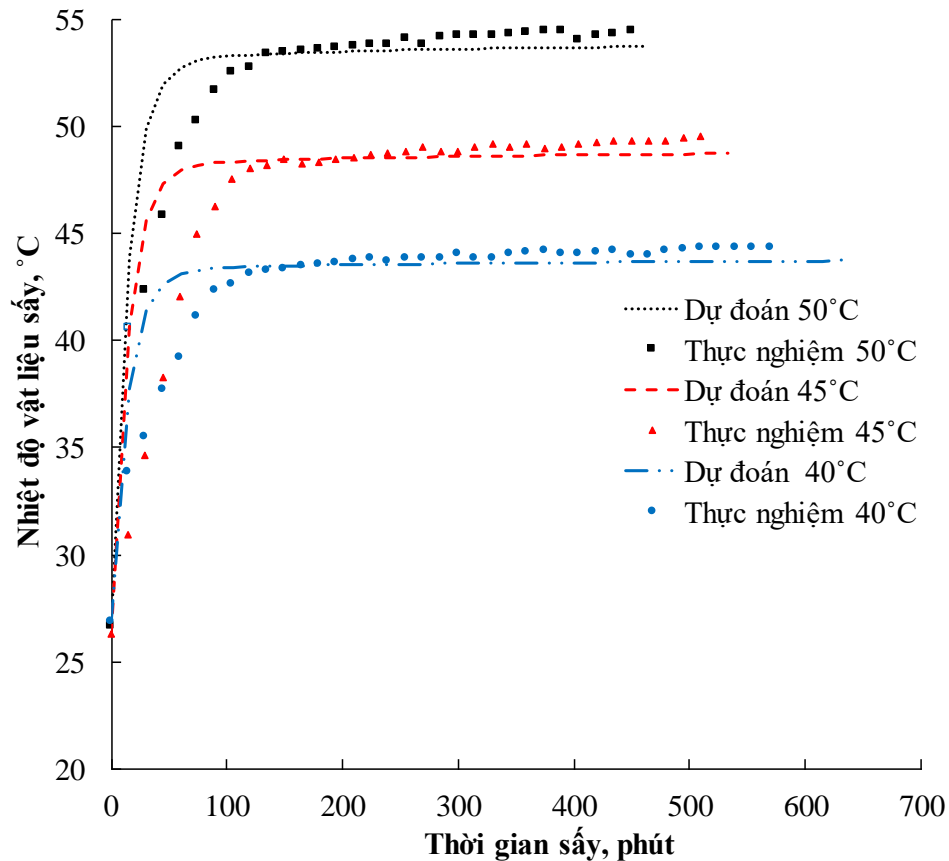
Bảng 4.1. Các thông số được xác định bằng dụng cụ đo trong quá trình thực nghiệm tại các mức nhiệt độ 40°C, 45°C và 50°C.

Stt	Thông số	Nhiệt độ TNS, T_a			Đơn vị
		40°C	45°C	50°C	
1	Chiều dày trung bình	0,0059	0,006	0,006	m
2	Nhiệt độ ban đầu của VLS, T_0	26,9	26,3	26,7	°C
3	Công suất hồng ngoại, P	500	500	500	W
4	Vận tốc TNS, v	1,4	1,4	1,4	m/s
5	Độ ẩm TNS, φ_a	15	15	15	%

4.2.1. Kiểm chứng mô hình lý thuyết với kết quả thực nghiệm theo nhiệt độ vật liệu sấy

Kết quả tính toán và thực nghiệm cho thấy thay đổi nhiệt độ VLS tại các mức nhiệt độ 40°C, 45°C và 50°C được biểu diễn trên hình 4.3. Đường cong biểu diễn nhiệt độ của VLS được chia thành hai giai đoạn, giai đoạn đầu mô tả sự tăng nhiệt độ với tốc độ rất nhanh và đạt tới nhiệt độ trung bình của TNS 40°C, 45°C và 50°C tương ứng với khoảng thời gian lần lượt là 20, 23 và 28 phút khi tính toán, trong khi kết quả thực nghiệm cho thấy để đạt được nhiệt độ này cần thời gian là 50, 60 và 65 phút chậm hơn so với kết quả dự đoán, nguyên nhân là do trong quá trình thực nghiệm nhiệt bị thất thoát qua các vách, tuy nhiên trong quá trình tính toán đã bỏ qua các thông số này, quá trình tính toán không tốn thời gian gia nhiệt để làm nóng buồng sấy, các tính chất hóa học như cấu trúc protein và hàm lượng chất dinh dưỡng cũng ảnh hưởng đến quá trình gia nhiệt của vật liệu sấy. Giai đoạn sau, do có sự hỗ trợ của bức xạ hồng ngoại, nhiệt độ VLS tiếp tục tăng lên và lớn hơn nhiệt độ của TNS, kết quả tính toán cho thấy giá trị nhiệt độ cao nhất trong suốt QTS lần lượt bằng 43,7°C, 48,7°C và 54,4°C, trong khi giá trị thực nghiệm cho nhiệt độ cao hơn giá trị tính toán 0,6°C, 0,75°C và 0,73°C khi cùng nhiệt độ sấy. Qua các đường cong phân bố nhiệt độ cho thấy sự tương đồng giữa kết quả dự đoán và thực nghiệm, với hệ số tương quan R^2 tại ba chế độ sấy ở các mức nhiệt độ 40°C, 45°C và 50°C lần lượt là 0,92, 0,91 và 0,936.

Như vậy nhiệt độ VLS cao hơn nhiệt độ TNS là do ngoài lượng nhiệt được truyền bằng đối lưu từ TNS đến VLS còn có sự hỗ trợ của bức xạ hồng ngoại. Các phân tử nước trong vật liệu sẽ được gia nhiệt từ bức xạ hồng ngoại, do đó trong vùng chịu ảnh hưởng của bức xạ hồng ngoại vật liệu sẽ nóng lên trên toàn bộ thể tích, điều này khác hơn nhiều với QTS bơm nhiệt thông thường là nhiệt độ của VLS chỉ đạt tối đa bằng nhiệt độ TNS. Vì vậy, khi kết hợp với bức xạ hồng ngoại việc tăng thể sấy giúp QTS nhanh hơn, giảm thời gian sấy là rất rõ ràng. Kết quả này tương đồng về xu hướng thay đổi nhiệt độ khi so sánh với kết quả nghiên cứu thực nghiệm của Wang (2014).



Hình 4.3. Thay đổi nhiệt độ VLS giữa kết quả dự đoán với thực nghiệm tại các mức nhiệt độ 40°C, 45°C và 50°C

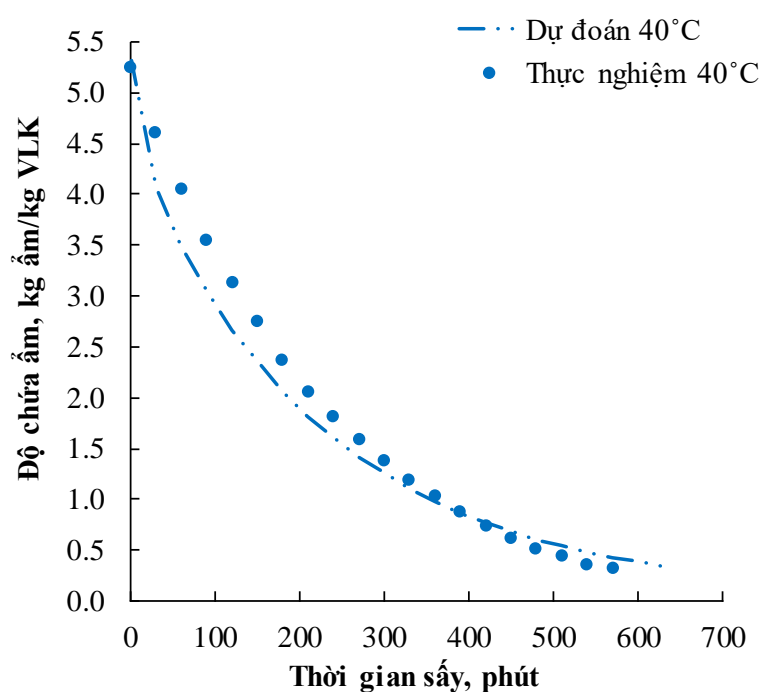
4.2.2. Kiểm chứng mô hình lý thuyết với kết quả thực nghiệm theo quá trình giảm ẩm

4.2.2.1. Tại mức nhiệt độ 40°C

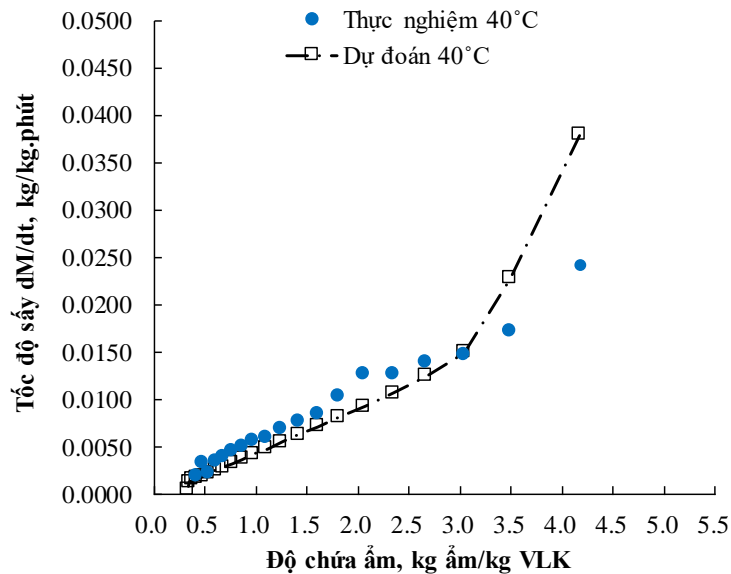
Từ bảng 4.2 và hình 4.4 cho thấy sự biến đổi độ chứa ẩm theo thời gian từ mô hình lý thuyết và thực nghiệm là khá tương đồng nhau. Tại mức nhiệt độ là 40°C, sai lệch về độ chứa ẩm trung bình P_{tb} là 11,35%, sai số bình phương trung bình (RMSE) là 0,29. Khi so sánh về thời gian sấy, kết quả dự đoán để đạt được độ chứa ẩm trung bình 0,333 kg ẩm/kgVLK (25% độ ẩm tương đối) cần 639 phút, trong khi kết quả thực nghiệm giá trị này 570 phút, sai lệch về thời gian sấy giữa kết quả lý thuyết với thực nghiệm là 10,7%.

Bảng 4.2. Kết quả thực nghiệm và lý thuyết về độ chứa ẩm trung bình của vật liệu tại mức nhiệt độ 40°C.

TGS t, phút	Lý thuyết, kg ẩm/kg VLK	Thực nghiệm, kg ẩm/kg VLK	TGS t, phút	Lý thuyết, kg ẩm/kg VLK	Thực nghiệm, kg ẩm/kg VLK
0	5,31	5,31	360	0,979	1,035
30	4,172	4,523	390	0,867	0,885
60	3,489	4,056	420	0,768	0,749
90	3,039	3,564	450	0,682	0,629
120	2,665	3,146	480	0,606	0,526
150	2,345	2,763	510	0,539	0,428
180	2,066	2,385	540	0,481	0,349
210	1,821	2,074	570	0,430	0,334
240	1,607	1,820	600	0,385	
270	1,418	1,591	630	0,345	
300	1,252	1,385	639	0,332	
330	1,107	1,205			



Hình 4.4. Đường cong sấy giữa kết quả dự đoán với thực nghiệm tại mức nhiệt độ 40°C



Hình 4.5. Đường cong tốc độ sấy của kết quả dự đoán và thực nghiệm tại mức nhiệt độ 40°C

Sự phù hợp của mô hình lý thuyết với kết quả thực nghiệm cũng được đánh giá thông qua đường cong tốc độ sấy. Đường cong tốc độ sấy dự đoán và thực nghiệm tại mức nhiệt độ 40°C được thể hiện trên hình 4.5, tốc độ sấy lớn nhất từ kết quả dự đoán là 0,0393 (kg ẩm/kgVLK.phút), trong khi thực nghiệm 0,0209 (kg ẩm/kgVLK.phút), các giá trị này cùng xuất hiện ở khoảng thời gian 30 phút đầu, điều này chứng tỏ sự phù hợp của mô hình lý thuyết so với thực nghiệm. Đồ thị hình 4.5 cũng cho thấy ở giai đoạn đầu của quá trình sấy, kết quả dự đoán và thực nghiệm có sự sai lệch lớn, nguyên nhân là do trong quá trình tính toán nhiệt độ TNS được gán là 40°C, tuy nhiên trong quá trình thực nghiệm thì tiến hành từ nhiệt độ môi trường do đó sau một khoảng thời gian nhiệt độ TNS trong buồng sấy mới đạt đến nhiệt độ 40°C (hình 4.3), điều này dẫn đến động lực của quá trình sấy ở giai đoạn đầu (từ 0 ÷ 30 phút) chậm hơn so với kết quả tính toán. Giá trị tốc độ sấy trung bình dự đoán trong toàn bộ QTS là 0,0075 (kg ẩm/kgVLK.phút), trong khi thực nghiệm là 0,0086 (kg ẩm/kgVLK.phút). Sai lệch về tốc độ sấy giữa lý thuyết và thực nghiệm là 15,7%.

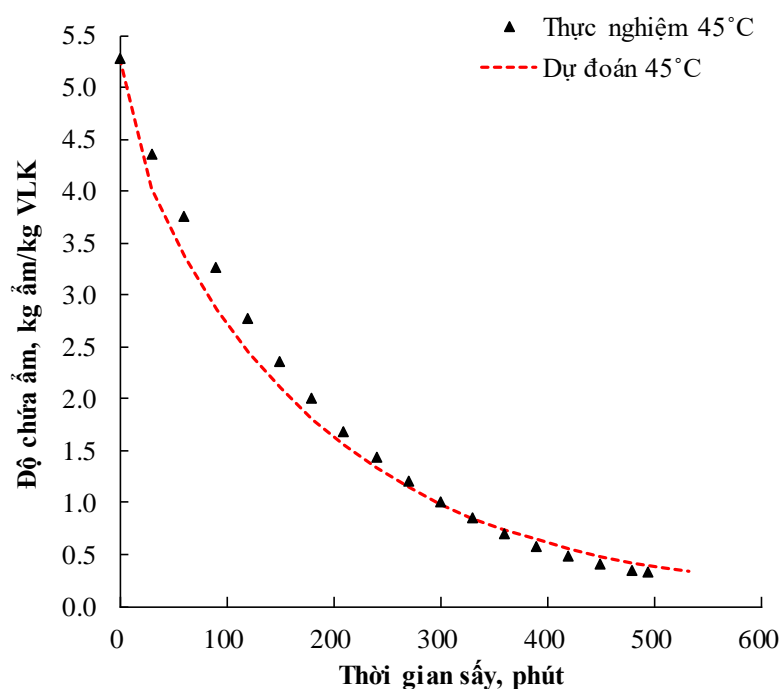
4.2.2.2. Tại mức nhiệt độ 45°C

Kết quả dự đoán và thực nghiệm tại mức nhiệt độ 45°C được trình bày trong bảng 4.3 và hình 4.6. Sai lệch về độ chứa ẩm trung bình giữa kết quả dự đoán và thực

thực nghiệm P_{tb} là 9,7%, sai số RMSE là 0,21. Thời gian sấy cần thiết để đạt độ chứa ẩm yêu cầu của kết quả lý thuyết và thực nghiệm là 533 phút và 495 phút, sai lệch là 7,1%.

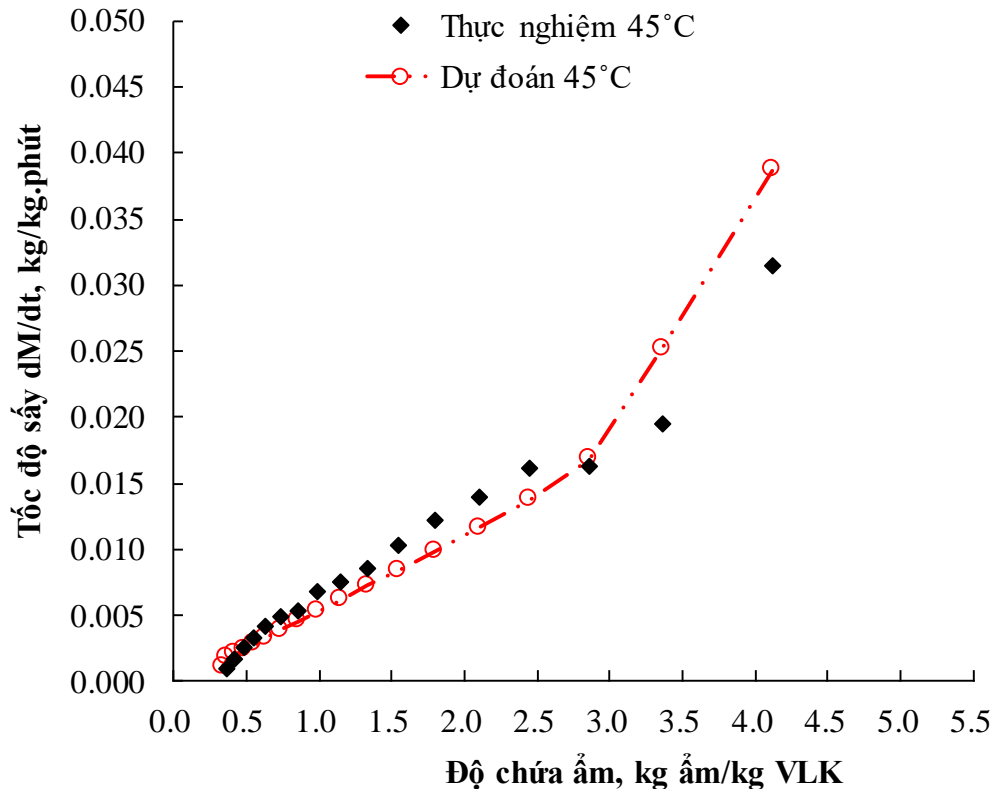
Bảng 4.3. Kết quả thực nghiệm và lý thuyết về độ chứa ẩm trung bình của vật liệu tại mức nhiệt độ 45°C

TGS t, phút	Lý thuyết, kg ẩm/kg VLK	Thực nghiệm, kg ẩm/kg VLK	TGS t, phút	Lý thuyết, kg ẩm/kg VLK	Thực nghiệm, kg ẩm/kg VLK
0	5,280	5,280	300	0,988	1,007
30	4,120	4,338	330	0,853	0,850
60	3,363	3,755	360	0,737	0,704
90	2,860	3,266	390	0,639	0,580
120	2,447	2,781	420	0,554	0,482
150	2,099	2,363	450	0,482	0,405
180	1,802	2,000	480	0,421	0,354
210	1,549	1,690	495	0,399	0,326
240	1,332	1,436	510	0,368	
270	1,147	1,212	533	0,332	



Hình 4.6. Đường cong sấy giữa kết quả dự đoán với thực nghiệm tại mức nhiệt độ 45°C

Qua kết quả tính toán và thực nghiệm cho thấy giá trị tốc độ sấy ở giai đoạn 30 phút đầu của quá trình tính toán luôn cao hơn so với thực nghiệm (hình 4.7), nguyên nhân là do thiết bị sấy bị tổn thất nhiệt qua các vách, trong khi tính toán giả thiết là không có tổn thất. Sai lệch về tốc độ sấy trung bình giữa kết quả lý thuyết và thực nghiệm là 6,1%.



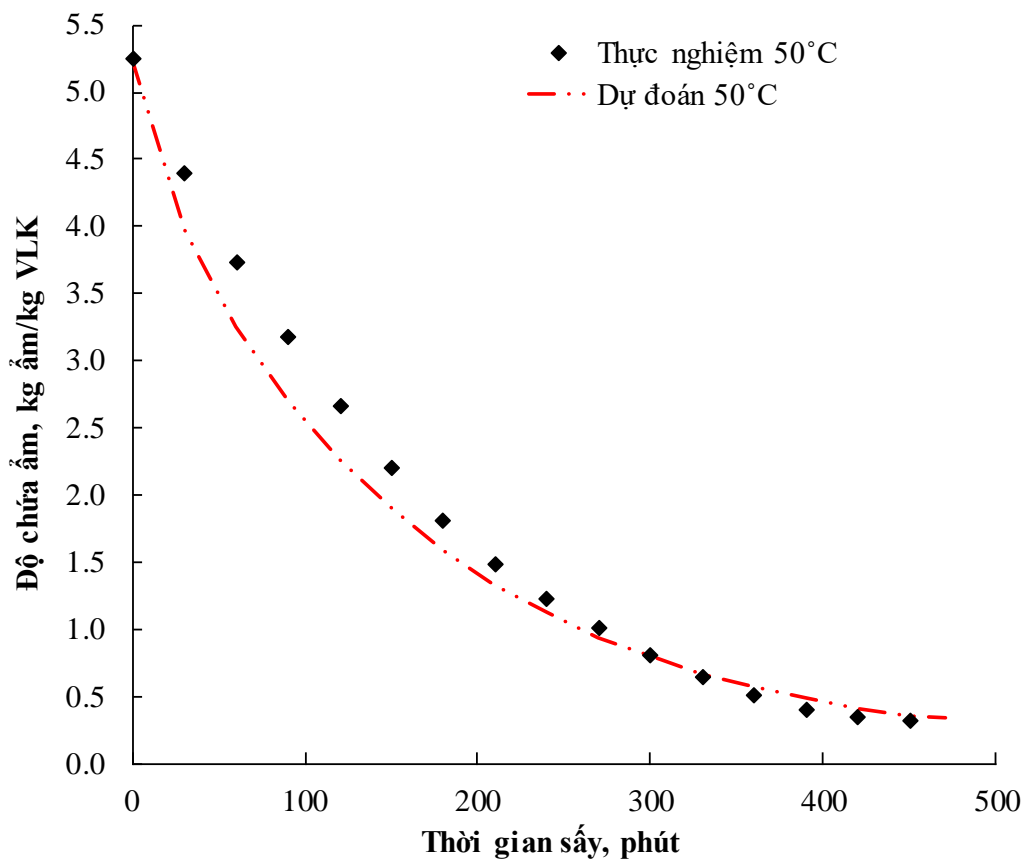
Hình 4.7. Đường cong tốc độ sấy giữa kết quả dự đoán với thực nghiệm tại mức nhiệt độ 45°C

4.2.2.3. Tại mức nhiệt độ 50°C

Đường cong sấy dự đoán và thực nghiệm tại mức nhiệt độ 50°C được biểu diễn trên hình 4.8. Xét trong toàn bộ QTS ta có sai lệch về độ chứa ẩm trung bình P_{tb} là 11,1% và sai số RMSE là 0,24. Thời gian sấy cần thiết để đạt độ chứa ẩm yêu cầu của kết quả dự đoán và thực nghiệm là 471 phút và 450 phút, sai lệch về thời gian sấy giữa kết quả dự đoán và thực nghiệm là 4,5%.

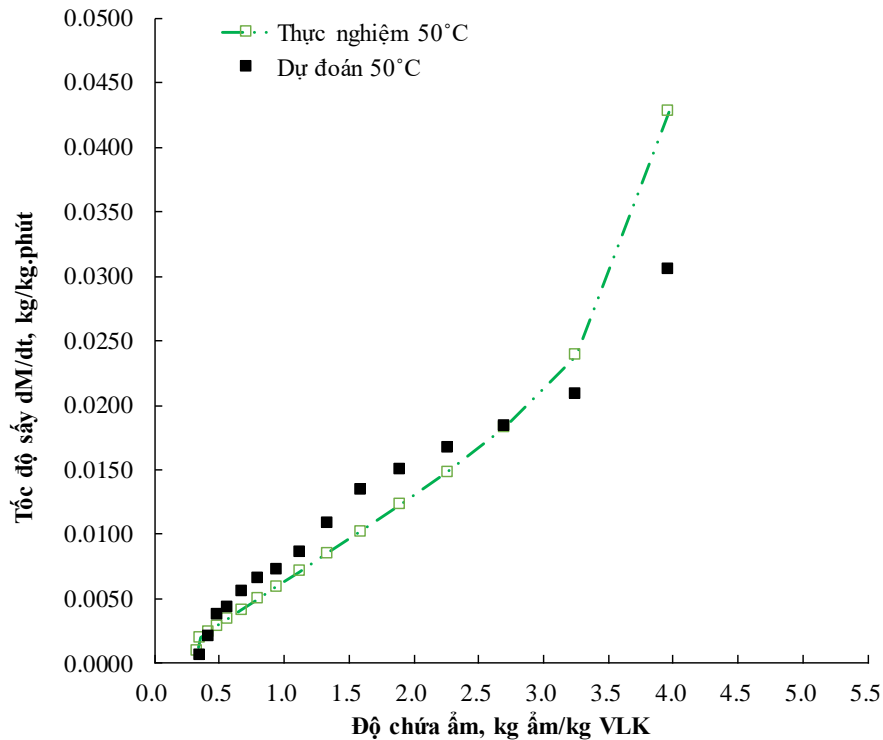
Bảng 4.4. Kết quả thực nghiệm và lý thuyết về độ chứa ẩm trung bình của VLS tại mức nhiệt độ 50°C

TGS t, phút	Lý thuyết, kg ẩm/kg VLK	Thực nghiệm, kg ẩm/kg VLK	TGS t, phút	Lý thuyết, kg ẩm/kg VLK	Thực nghiệm, kg ẩm/kg VLK
0	5,14	5,14	270	0,941	1,00
30	3,967	4,34	300	0,793	0,81
60	3,251	3,71	330	0,670	0,64
90	2,703	3,16	360	0,568	0,51
120	2,259	2,66	390	0,483	0,40
150	1,892	2,21	420	0,412	0,34
180	1,586	1,80	450	0,353	0,32
210	1,331	1,48	471	0,333	
240	1,118	1,22			



Hình 4.8. Đường cong sấy giữa kết quả dự đoán với thực nghiệm tại mức nhiệt độ 50°C

Các giá trị tốc độ sấy giữa kết quả dự đoán và thực nghiệm đã tiệm cận nhau khi VLS đạt đến độ chứa ẩm từ 1,6 kg ẩm/kgVLK, tốc độ sấy trung bình trong toàn bộ QTS dự đoán và thực nghiệm là 0,0102 (kg ẩm/kgVLK.phút) và 0,0110 (kg ẩm/kgVLK.phút). Kết quả này một lần nữa chứng minh sự phù hợp của mô hình lý thuyết.



Hình 4.9. Đường cong tốc độ sấy của kết quả dự đoán với thực nghiệm tại mức nhiệt độ 50°C

Từ các đường cong sấy (hình 4.4, hình 4.6 và hình 4.8) cho thấy tại ba mức nhiệt độ 40°C, 45°C và 50°C quá trình giảm ẩm khi thực nghiệm ở giai đoạn từ lúc bắt đầu sấy đến khi VLS đạt đến độ chứa ẩm khoảng 0,6 kg ẩm/kgVLK diễn ra chậm hơn so với kết quả tính toán, tuy nhiên ở giai đoạn sấy sau đó quá trình giảm ẩm ở kết quả thực nghiệm diễn ra nhanh hơn. Nguyên nhân là do chiều dày lớp vật liệu khi thực nghiệm giảm cùng với độ chứa ẩm, trong khi quá trình tính toán chiều dày này được giả định là không thay đổi. Vì vậy quá trình thoát ẩm từ tâm VLS ra bề mặt khi thực nghiệm diễn ra nhanh hơn so với quá trình tính toán.

Qua các phân tích và so sánh trên có thể thấy rằng các kết quả dự đoán từ mô hình toán đã phản ánh phù hợp với xu hướng khi so sánh với quá trình biến đổi âm theo số liệu thực nghiệm, mức sai lệch lớn nhất tại ba mức nhiệt độ là 11,35%.

4.3. Kiểm chứng mô hình lý thuyết với kết quả thực nghiệm tại các mức công suất khác nhau

Các thông số như chiều dày, nhiệt độ ban đầu, công suất nguồn phát hồng ngoại, vận tốc, nhiệt độ và độ ẩm TNS được xác định bằng dụng cụ đo trong quá trình thực nghiệm sẽ được sử dụng làm các giá trị đầu vào của quá trình tính toán, các thông số này được trình bày cụ thể trong bảng 4.5. Bên cạnh đó, các thông số nhiệt vật lý khi giải mô hình toán lý thuyết sẽ được tính toán thông qua các biểu thức trong mục 2.1.

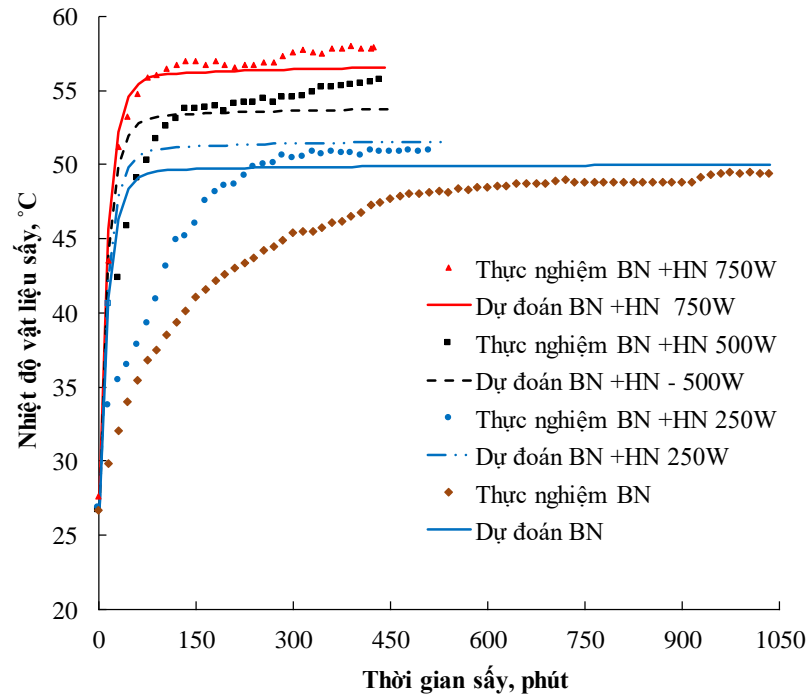
Bảng 4.5. Các thông số được xác định bằng dụng cụ đo trong quá trình thực nghiệm tại các chế độ sấy BN + HN 250 W, BN + HN 500 W, BN + HN 750 W và BN

Stt	Thông số	Công suất phát hồng ngoại, W				Đơn vị
		0W	250 W	500 W	750 W	
1	Chiều dày trung bình	0,00615	0,0059	0,006	0,0061	m
2	Nhiệt độ ban đầu của VLS, T_0	26,6	26,7	26,7	27,7	°C
3	Nhiệt độ TNS, T_a	50	50	50	50	°C
4	Vận tốc TNS, v	1,4	1,4	1,4	1,4	m/s
5	Độ ẩm TNS, φ_a	15	15	15	15	%

Thay đổi nhiệt độ VLS khi sấy bằng phương pháp sấy BN và sấy bằng phương pháp BN +HN tại ba mức công suất 250 W, 500 W và 750 W của quá trình tính toán và thực nghiệm được thể hiện trên hình 4.10. Khi sấy bằng phương pháp BN + HN 250 W, giá trị nhiệt độ tại tâm VLS khi thực nghiệm luôn nhỏ hơn với kết quả dự đoán, nguyên nhân là do khi sấy với công suất bức xạ thấp làm khả năng thẩm thấu của bức xạ nhỏ dẫn đến quá trình gia nhiệt của VLS nhỏ do đó tác động đến động lực QTS thấp.

Khi tăng công suất nguồn phát hồng ngoại từ 500 W lên 750 W, kết cho thấy thời gian tăng nhiệt độ tại tâm của VLS từ giá trị ban đầu đến nhiệt độ TNS không có sự khác biệt nhiều so với mức công suất 500 W. Nguyên nhân là do quá trình biến

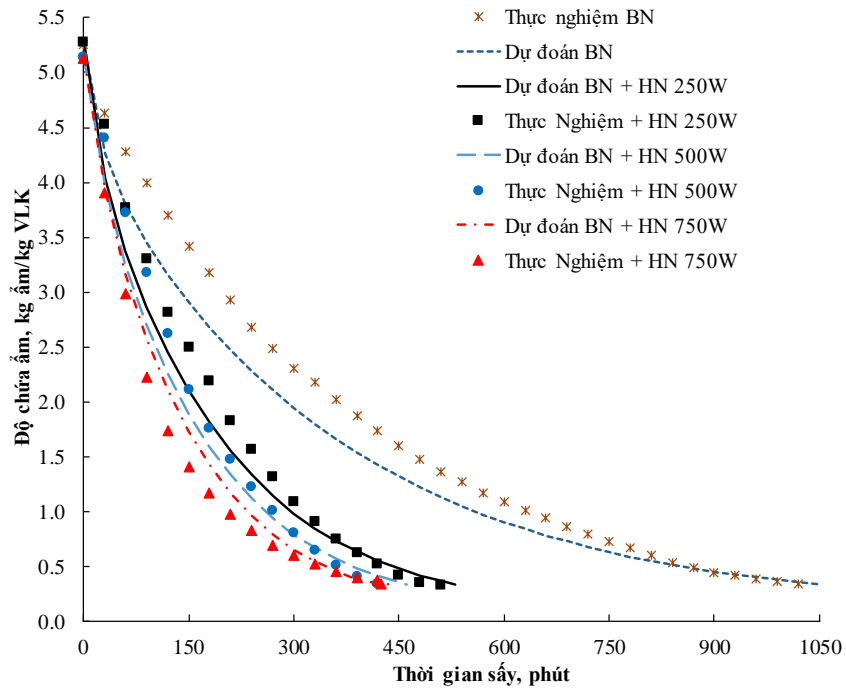
đổi pha từ ẩm lỏng thành hơi và dịch chuyển từ trong ra ngoài của VLS cần một lượng nhiệt nhất định.



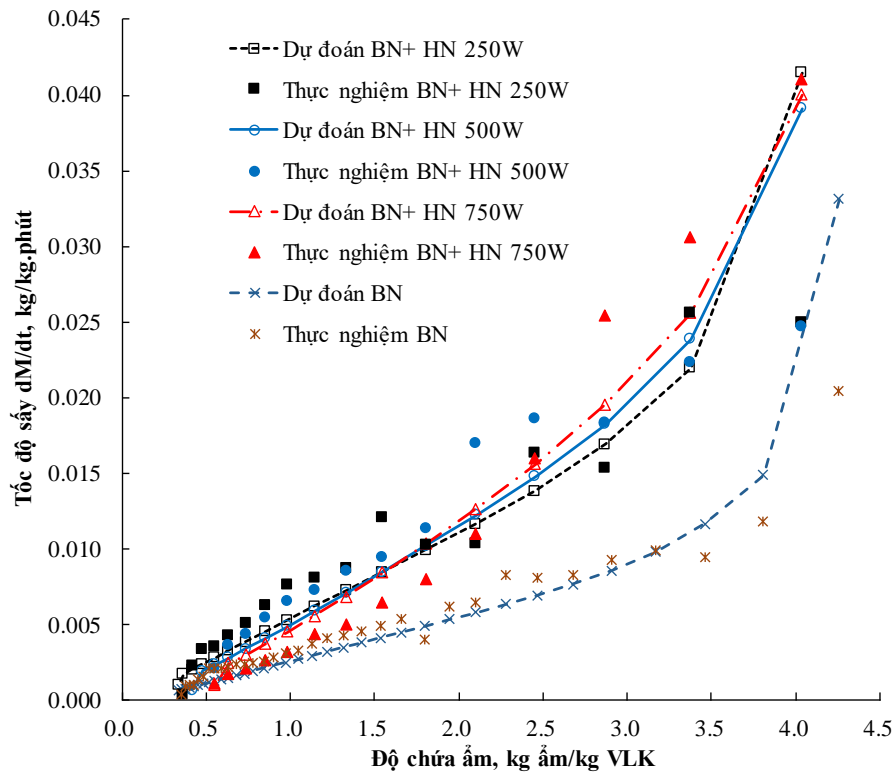
Hình 4.10. Thay đổi nhiệt độ VLS giữa kết quả dự đoán với thực nghiệm tại các chế độ sấy BN + HN 250 W, BN + HN 500 W, BN + HN 750 W và BN

Qua phân tích các kết quả cho thấy sai lệch về độ chứa ẩm giữa kết quả dự đoán và thực nghiệm ở các chế độ sấy BN + HN 250 W, BN + HN 500 W, BN + HN 750 W và BN lần lượt là 12,3%, 11,1%, 10,2% và 15,1%; sai số RMSE tại các chế độ sấy lần lượt là 0,26, 0,24, 0,20 và 0,29. Kết quả này một lần nữa chứng minh mô hình toán lý thuyết có thể mô tả bản chất quá trình TNTA trong cả hai trường hợp sấy BN + HN và BN thông thường.

Thời gian sấy thực nghiệm để đạt độ chứa ẩm 0,333 kg ẩm/kg VLK tại các chế độ sấy BN + HN 250 W, BN + HN 500 W, BN + HN 750 W và BN lần lượt là 510, 420, 425 và 1020 phút, trong khi kết quả lý thuyết cho thấy thời gian sấy chậm hơn so với thực nghiệm lần lượt là 20, 41, 17 và 33 phút khi cùng chế độ sấy. Thời gian sấy của phương pháp sấy BN + HN 500 W nhanh hơn so với phương pháp sấy BN là 592 phút khi dự đoán và 450 phút khi thực nghiệm.



Hình 4.11. Đường cong sấy giữa kết quả dự đoán với thực nghiệm tại các chế độ sấy BN + HN 250 W, BN + HN 500 W, BN + HN 750 W và BN



Hình 4.12. Đường cong tốc độ sấy của kết quả dự đoán với thực nghiệm tại các chế độ sấy BN + HN 250 W, BN + HN 500 W, BN + HN 750 W và BN

Thời gian sấy giảm khi tăng công suất hồng ngoại, tại mức công suất 500 W và 750 W thời gian sấy giảm nhưng không nhanh như giai đoạn 250 W và 500 W do công suất hồng ngoại tác động không đáng kể khi độ ẩm vật liệu giảm. Tuy nhiên đánh giá cảm quan cho thấy giai đoạn 500 W và 750 W cho bề mặt mực bị co rút mạnh và cứng làm mất độ dẻo, dai tự nhiên của mực khô.

Đường cong tốc độ sấy tại các chế độ sấy BN + HN 250 W, BN + HN 500 W, BN + HN 750 W và BN của quá trình tính toán và thực nghiệm được thể hiện trên hình 4.12. Kết quả cho thấy các đường cong tốc độ sấy giữa kết quả tính toán và thực nghiệm là khá tương đồng. Sai lệch về tốc độ sấy giữa kết quả tính toán và thực nghiệm tại các chế độ sấy lần lượt là 5,8%, 14%, 6,3% và 6,4%.

4.4. Nhận xét

Qua các kết quả thực nghiệm và dự đoán cho thấy nếu trong QTS, nhiệt độ trung bình của VLS lớn hơn nhiệt độ trung bình của TNS có nghĩa là đã khắc phục được hiện tượng cản trở dịch chuyển của dòng nhiệt đến dòng ẩm như ở trường hợp sấy BN thông thường. Do nhiệt độ của vật VLS lớn hơn nhiệt độ TNS nên dòng nhiệt và dòng ẩm cùng chiều do đó tốc độ sấy được cải thiện đáng kể. Đây là lý do chính về việc giảm thời gian sấy khi sấy BN+HN khi so sánh với phương pháp sấy BN.

Qua kết quả so sánh cho thấy sự sai lệch giữa kết quả dự đoán bằng mô hình lý thuyết và thực nghiệm có thể do một số nguyên nhân sau:

- Trong QTS thực nghiệm các giá trị về nhiệt, ẩm của vật liệu thay đổi, các giá trị hệ số khuếch tán ẩm bị ảnh hưởng thêm bởi các yếu tố khác như hiện tượng cong vênh mà trong phạm vi nghiên cứu lý thuyết bỏ qua do tính phức tạp của hiện tượng.
- Các yếu tố như hệ số phát xạ, khoảng cách đặt nguồn phát hồng ngoại cũng ảnh hưởng đến QTS.
- Sự đối xứng hoàn toàn giữa hai mặt trên và dưới của VLS trên thực tế còn chưa hợp lý do sự che khuất của khay, lưới đỡ vật liệu phía dưới đáy.

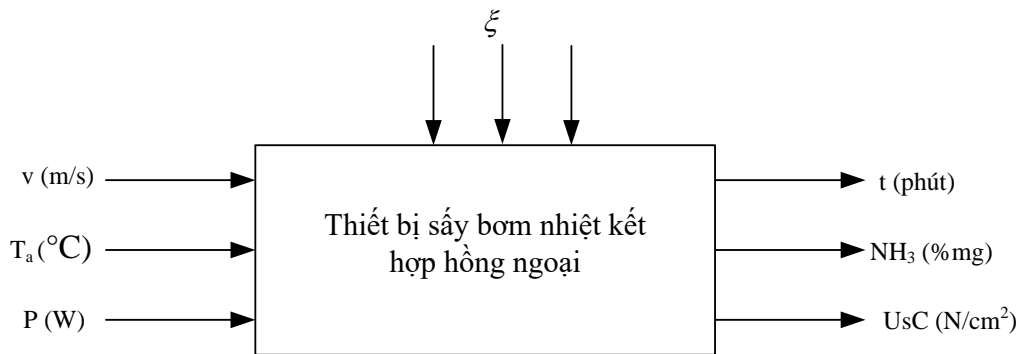
Tuy nhiên, với những kết quả như đã trình bày ở trên cho thấy mô hình lý thuyết cho kết quả dự đoán QTS phù hợp với diễn biến trên thực tế khi tiến hành thực nghiệm. Do đó có thể dùng mô hình toán để dự đoán tốc độ sấy, thay đổi nhiệt độ và

độ chứa ẩm của VLS trong QTS.

4.5. Quy hoạch thực nghiệm

4.5.1. Phát biểu bài toán hộp đen

Thông qua các kết quả phân tích như đã nêu tại mục 2.6.1.1, cho thấy các thông số như vận tốc, nhiệt độ TNS và công suất phát hồng ngoại khi sấy sẽ ảnh hưởng đồng thời lên các chỉ tiêu chất lượng và kỹ thuật của sản phẩm sau khi sấy. Mô hình thống kê cho thiết bị sấy BN+HN khi sấy mực ống được thực hiện.



Hình 4.13. Bài toán hộp đen mô tả quá trình nghiên cứu

Trong đó:

- v: Vận tốc TNS (m/s)
- T_a : Nhiệt độ TNS ($^{\circ}\text{C}$)
- P: Công suất của bộ nguồn hồng ngoại (W)
- t: Thời gian sấy (phút)
- NH_3 : Hàm lượng NH_3 (%mg)
- U_{sC} : Ứng suất cắt (N/cm^2)

4.5.2. Xác định vùng nghiên cứu

Phương án thực hiện được thiết kế có 2 mức đối xứng ở tâm với miền thực nghiệm giới hạn trong khoảng giữa điểm trên (giá trị mã hóa là +1), điểm dưới (giá trị mã hóa là -1).

- Nhiệt độ TNS: $T_a = 40 \div 50^{\circ}\text{C}$
 - + Khoảng biến thiên: $\Delta T = 5^{\circ}\text{C}$
 - + Mức cơ sở: $T^{\circ} = 45^{\circ}\text{C}$
 - + Mức trên: $T^+ = 50^{\circ}\text{C}$

- + Mức dưới: $T^- = 40^\circ\text{C}$
- Vận tốc TNS: $v = 0,6 \div 1,4 \text{ m/s}$
 - + Khoảng biến thiên: $\Delta v = 0,4 \text{ m/s}$
 - + Mức cơ sở: $v^0 = 1,0 \text{ m/s}$
 - + Mức trên: $v^+ = 1,4 \text{ m/s}$
 - + Mức dưới: $v^- = 0,6 \text{ m/s}$
- Công suất nguồn phát hồng ngoại: $P = 250 \div 750 \text{ W}$
 - + Khoảng biến thiên: $\Delta P = 250 \text{ W}$
 - + Mức cơ sở: $P^0 = 500 \text{ W}$
 - + Mức trên: $P^+ = 750 \text{ W}$
 - + Mức dưới: $P^- = 250 \text{ W}$

4.5.3. Kế hoạch thực nghiệm bậc I

4.5.3.1. Lập ma trận thực nghiệm

Ma trận thực nghiệm theo phương án bậc I có tính trực giao. Số thực nghiệm được tính theo công thức.

$$N = 2^k + n_0 = 2^3 + 6 = 14 \quad (4.1)$$

Trong đó: k – số yếu tố nghiên cứu đầu vào của bài toán, $k = 3$

n_0 – số lượng thí nghiệm lặp ở mức cơ sở, chọn $n_0 = 6$

Bảng 4.6. Mức khoảng biến thiên các yếu tố đầu vào dạng bậc I

Yếu tố Mức	X_1 ($^\circ\text{C}$) Nhiệt độ TNS	X_2 (m/s) Vận tốc TNS	X_3 (W) Công suất HN
+1	50	1,4	750
0	45	1,0	500
-1	40	0,6	250

4.5.3.2. Kết quả thực nghiệm và xử lý kết quả thực nghiệm

Tiến hành thực nghiệm theo ma trận đã lập, kết quả thu được trình bày trong bảng 4.7 và 4.8

Bảng 4.7. Ma trận thực nghiệm và kết quả thực nghiệm ở dạng mã hóa

ST T	Thông số đầu vào			Thông số đầu ra		
	X ₁ (°C)	X ₂ (m/s)	X ₃ (W)	Y ₁ (phút)	Y ₂ (%)	Y ₃ (N/cm ²)
1	+1	+1	-1	505	5,01	8,65
2	-1	-1	-1	760	13,6	4,9
3	0	0	0	498	8,0	7,85
4	0	0	0	522	7,2	7,3
5	+1	-1	+1	437	4,58	9,6
6	0	0	0	525	7,3	7,68
7	0	0	0	531	7,3	7,7
8	0	0	0	535	7,4	7,8
9	-1	-1	+1	582	11,3	5,8
10	0	0	0	538	7,7	7,7
11	+1	-1	-1	505	5,56	8,1
12	-1	+1	-1	719	13,6	4,6
13	+1	+1	+1	421	4,58	10,7
14	-1	+1	+1	566	12,2	5,7

Bảng 4.8. Ma trận thực nghiệm và kết quả thực nghiệm ở dạng thực

ST T	Thông số đầu vào			Thông số đầu ra		
	T (°C)	v (m/s)	P (W)	Y ₁ (phút)	Y ₂ (%)	Y ₃ (N/cm ²)
1	50	1,4	250	505	5,01	8,65
2	40	0,6	250	760	13,6	4,9
3	45	1,0	500	498	8,0	7,85
4	45	1,0	500	522	7,2	7,3
5	50	0,6	750	437	4,58	9,6
6	45	1,0	500	525	7,3	7,68
7	45	1,0	500	531	7,3	7,7
8	45	1,0	500	535	7,4	7,8
9	40	0,6	750	582	11,3	5,8
10	45	1,0	500	538	7,7	7,7
11	50	0,6	250	505	5,56	8,1

12	40	1,4	250	719	13,6	4,6
13	50	1,4	750	421	4,58	10,7
14	40	1,4	750	566	12,2	5,7

❖ **Kết quả xử lý với mô hình không có số hạng chéo**

Thời gian sấy t: Dựa vào kết quả thực nghiệm tiến hành phân tích phương sai được trình bày ở phụ lục (3.1). Kết quả phân tích phương sai cho thấy các hệ số hồi quy đều đảm bảo đủ độ tin cậy, nhưng mô hình không phù hợp, vì giá trị Lack-of-fit = $0,0014 < 0,05$ và hệ số R- squared = $0,91$. Nên mô hình hàm Y_1 dạng bậc I là không phù hợp.

Như vậy, thời gian sấy t không thể biểu diễn ở mô hình bậc I không có hạng chéo vì sai số lớn.

Phần trăm hàm lượng NH_3 : Từ các kết quả thực nghiệm tiến hành phân tích phương sai được trình bày như ở phụ lục (3.3). Kết quả phân tích phương sai cho thấy các hệ số hồi quy đều đảm bảo đủ độ tin cậy tuy nhiên mô hình không phù hợp, vì giá trị Lack-of-fit = $0,0005 < 0,05$ và hệ số R- squared = $0,60$. Nên mô hình hàm Y_2 ở dạng bậc I không phù hợp.

Như vậy, hàm phần trăm hàm lượng NH_3 không thể biểu diễn ở mô hình bậc I không có số hạng chéo vì có sai số lớn.

Ứng suất cắt UsC : Từ các kết quả thực nghiệm tiến hành phân tích phương sai được trình bày như ở phụ lục (3.5). Kết quả phân tích phương sai cho thấy các hệ số hồi quy đều đảm bảo đủ độ tin cậy tuy nhiên mô hình không phù hợp, vì giá trị Lack-of-fit = $0,0272 < 0,05$ và hệ số R- squared = $0,60$. Nên mô hình hàm Y_3 ở dạng bậc I không phù hợp.

Như vậy, hàm ứng suất cắt cũng không thể biểu diễn ở mô hình bậc I không có số hạng chéo vì có sai số lớn.

❖ **Kết quả xử lý với mô hình có số hạng chéo**

Tương tự, dựa vào kết quả thực nghiệm, tiến hành phân tích phương sai nhưng ở các hệ số hồi quy tác dụng tương hỗ. Kết quả phân tích phương sai trình bày như ở phụ lục (3.2, 3.4 và 3.6) cho thấy giá trị lack-of-fit $< 0,05$. Vì vậy, mô hình cải tiến

cũng không phù hợp.

4.5.3.3. Phân tích kết quả thực nghiệm

Qua kết quả trên ta thấy mô hình đa thức bậc I không phù hợp cho việc biểu diễn mối quan hệ hàm số giữa thời gian sấy, phần trăm hàm lượng NH_3 và ứng suất cắt với nhiệt độ, vận tốc và công suất nguồn phát hồng ngoại. Điều này có nghĩa mô hình tuyến tính không thể dùng để phản ánh sự phụ thuộc giữa các thông số vào và thông số ra. Để giải quyết cần phải tiến hành cải tiến mô hình, vì vậy ta nâng bậc của phương án thực nghiệm lên bậc II, mô hình dạng phi tuyến và miền thực nghiệm được mở rộng ra với cánh tay đòn $\pm \alpha$.

4.5.4. Kế hoạch thực nghiệm bậc II

4.5.4.1. Lập ma trận thực nghiệm

Ma trận thực nghiệm bậc II được thực hiện theo phương án bất biến quay không có tính trục giao. Số lượng thí nghiệm được xác định theo công thức sau (Nguyễn Cảnh, 2016):

$$N = 2^k + 2k + n_0 = 2^3 + 2.3 + 6 = 20 \quad (4.2)$$

Trong đó: k – số yếu tố nghiên cứu đầu vào của bài toán, $k = 3$

2^k – số lượng thí nghiệm ở mức trên và mức dưới, $2^3 = 8$

$2k$ – số lượng thí nghiệm ở mức điểm sao $\pm \alpha$, $2k = 6$

n_0 – số lượng thí nghiệm lặp lại ở mức cơ sở, chọn $n_0 = 6$

Cánh tay đòn được xác định theo công thức $\alpha = 2^{k/4} = 2^{3/4} = 1,682$

Bảng 4.9. Mức khoảng biến thiên các yếu tố đầu vào dạng bậc II

Yếu tố Mức	X_1 (°C) Nhiệt độ TNS	X_2 (m/s) Vận tốc TNS	X_3 (W) Công suất HN
+1,682	53,5	1,67	920,5
+1	50	1,4	750
0	45	1,0	500
-1	40	0,6	250
-1,682	36,5	0,33	79,5

4.5.4.2. Kết quả thực nghiệm và xử lý kết quả thực nghiệm

Bảng 4.10. Ma trận thực nghiệm và kết quả thực nghiệm ở dạng mã hóa

STT	Thông số đầu vào			Thông số đầu ra		
	X ₁	X ₂	X ₃	Y ₁ (phút)	Y ₂ (%)	Y ₃ (N/cm ²)
1	0	0	0	498	8,01	7,85
2	-1,682	0	0	723	15,8	3,5
3	+1	+1	+1	421	4,58	10,7
4	0	-1,682	0	543	7,45	7,5
5	-1	+1	-1	719	13,6	4,6
6	0	0	+1,682	448	6,4	8,6
7	0	0	0	522	7,21	7,3
8	-1	-1	+1	582	11,3	5,8
9	+1	-1	-1	505	5,56	8,1
10	+1	-1	+1	437	4,58	9,6
11	0	0	-1,682	648	9,1	7,6
12	0	0	0	525	7,3	7,68
13	+1	+1	-1	505	5,01	8,65
14	0	0	0	531	7,3	7,7
15	-1	+1	+1	556	12,2	5,7
16	0	0	0	535	7,4	7,8
17	-1	-1	-1	760	13,6	4,9
18	0	0	0	538	7,7	7,7
19	+1,682	0	0	435	4,1	10,9
20	0	+1,682	0	497	7,1	7,9

Bảng 4.11. Ma trận thực nghiệm và kết quả thực nghiệm ở dạng thực

STT	Thông số đầu vào			Thông số đầu ra		
	T (°C)	v (m/s)	P (W)	t (phút)	NH ₃ (% mg)	UsC (N/cm ²)
1	45	1,0	500	498	8,01	7,85
2	36,5	1,0	500	723	15,8	3,5
3	50	1,4	750	421	4,58	10,7
4	45	0,33	500	543	7,45	7,5
5	40	1,4	250	719	13,6	4,6

6	45	1,0	920,4	448	6,4	8,6
7	45	1,0	500	522	7,21	7,3
8	40	0,6	750	582	11,3	5,8
9	50	0,6	250	505	5,56	8,1
10	50	0,6	750	437	4,58	9,6
11	45	1,0	79,6	648	9,1	7,6
12	45	1,0	500	525	7,3	7,68
13	50	1,4	250	505	5,01	8,65
14	45	1,0	500	531	7,3	7,7
15	40	1,4	750	556	12,2	5,7
16	45	1,0	500	535	7,4	7,8
17	40	0,6	250	760	13,6	4,9
18	45	1,0	500	538	7,7	7,7
19	53,5	1,0	500	435	4,1	10,9
20	45	1,67	500	497	7,1	7,9

❖ **Thời gian sấy Y_1 (phút)**

Các số liệu thực nghiệm được tiến hành phân tích phương sai dạng đa thức bậc II đầy đủ. Trong quá trình phân tích phương sai, những hệ số hồi quy không đảm bảo độ tin cậy sẽ bị loại bỏ khỏi mô hình. Tiến hành phân tích phương sai để loại bỏ các hệ hồi quy không đảm bảo độ tin cậy với mức ý nghĩa 0,05. Độ tin cậy của các hệ số hồi quy kiểm tra theo tiêu chuẩn Student, tính phù hợp của mô hình được kiểm tra theo tiêu chuẩn Fisher.

Từ bảng phân tích (Phụ lục 4.1) cho thấy hệ số hồi quy AB, BB và BC không đảm bảo độ tin cậy ($P - \text{value} > 0,05$), do đó tiến hành loại bỏ các hệ số này ra khỏi mô hình.

Sau khi loại bỏ các hệ số hồi quy không đảm bảo độ tin cậy ra khỏi mô hình và tiến hành phân tích phương sai lần 2 cho mô hình, kết quả được trình bày trong phụ lục 4.2. Từ các kết quả phân tích cho thấy các hệ số hồi quy đều có ý nghĩa ($P - \text{Value} < 0,05$).

Kiểm tra theo tiêu chuẩn Student. Kết quả tính toán có $t = 2,5709$ (phụ lục 4.3) lớn hơn giá trị tra trong bảng phân bố Student. Như vậy các hệ số hồi quy đảm bảo độ tin cậy.

Kiểm tra tính thích ứng của mô hình Fisher: dựa vào bảng phân tích phương sai được thực hiện trên phần mềm (phụ lục 4.2), ta thấy giá trị Lack – of – fit có P – value = 0,7361 > 0,05. Do đó, mô hình hồi quy Y_1 là phù hợp.

Như vậy từ kết quả kiểm tra các hệ số hồi quy theo tiêu chuẩn Student và kiểm tra tính thích ứng của mô hình theo tiêu chuẩn Fisher cho thấy các hệ số hồi quy đảm bảo độ tin cậy và mô hình hồi quy là phù hợp.

Phương trình hồi quy dạng mã hóa hàm Y_1 phụ thuộc vào X_1 , X_2 và X_3 được biểu diễn như sau.

$$Y_1 = 524,863 - 90,3056.X_1 - 11,7418.X_2 - 60,7252.X_3 + 21,247.X_1^2 + 23,625.X_1.X_3 + 10,2896.X_3^2$$

Chuyển hàm Y_1 về dạng thực, theo kết quả tính toán như phụ lục 4.16, phương trình hồi quy cho hàm t ở dạng thực có dạng như sau.

$$t = 3633,95 - 102,19.T_a - 29,3557.v - 1,25957.P + 0,83059.T_a^2 + 0,0189.T_a.P + 0,000166155.P^2$$

❖ **Phẩm trăm hàm lượng NH_3 Y_2 (%mg)**

Từ các số liệu thực nghiệm tương tự như hàm Y_1 tiến hành phân tích phương sai ở dạng đa thức bậc II đầy đủ, qua kết quả phân tích (Phụ lục 4.5) cho thấy các hệ số hồi quy AC và BC không đảm bảo độ tin cậy (P – value > 0,05), do đó tiến hành loại bỏ các hệ số này ra khỏi mô hình.

Sau khi loại bỏ các hệ số hồi quy không đảm bảo độ tin cậy ra khỏi mô hình và tiến hành phân tích phương sai lần 2 cho mô hình, kết quả được trình bày trong phụ lục 4.6. Từ các kết quả phân tích cho thấy các hệ số hồi quy đều có ý nghĩa (P- Value < 0,05).

Kiểm tra theo tiêu chuẩn Student. Kết quả tính toán có $t = 2,5709$ (phụ lục 4.7) lớn hơn giá trị tra trong bảng phân bố Student. Như vậy các hệ số hồi quy đảm bảo độ tin cậy.

Kiểm tra tính thích ứng của mô hình Fisher: dựa vào bảng phân tích phương sai được thực hiện trên máy vi tính (phụ lục 4.6), ta thấy giá trị Lack – of – fit có P – value = 0,079 > 0,05. Do đó, mô hình hồi quy Y_2 là phù hợp.

Qua kết quả kiểm tra các hệ số hồi quy theo tiêu chuẩn Student và kiểm tra tính thích ứng của mô hình theo tiêu chuẩn Fisher cho thấy các hệ số hồi quy đảm bảo độ tin cậy và mô hình hồi quy là phù hợp.

Phương trình hồi quy dạng mã hóa hàm Y_2 phụ thuộc vào X_1 , X_2 và X_3 được biểu diễn như sau.

$$Y_2 = 7,48092 - 3,66148.X_1 - 0,306804.X_2 - 0,842026.X_3 + 0,887687.X_1^2 - 0,28625.X_1.X_2 + 0,269121.X_2^2 + 0,216101.X_3^2$$

Chuyển hàm Y_2 về dạng thực, theo kết quả tính toán như phụ lục 4.20, phương trình hồi quy cho hàm NH_3 ở dạng thực có dạng như sau.

$$NH_3 = 109,302 - 3,71507.T_a + 2,25535.v - 0,00689514.P + 0,0347654.T_a^2 - 0,143125.T_a.v + 1,70914.v^2 + 0,00000352689.P^2$$

❖ Ứng suất cắt UsC Y_3 (N/cm²)

Từ các số liệu thực nghiệm tương tự như hàm Y_1 và Y_2 tiến hành phân tích phương sai ở dạng đa thức bậc II đầy đủ, qua kết quả phân tích phụ lục 4.9 cho thấy các hệ số hồi quy BB, BC và CC không đảm bảo độ tin cậy ($P - \text{value} > 0,05$), do đó tiến hành loại bỏ các hệ số này ra khỏi mô hình.

Tiến hành loại bỏ các hệ số hồi quy không đảm bảo độ tin cậy ra khỏi mô hình và tiến hành phân tích phương sai lần 2 cho mô hình, kết quả được trình bày trong phụ lục 4.10. Từ các kết quả phân tích cho thấy các hệ số hồi quy đều có ý nghĩa ($P - \text{Value} < 0,05$).

Kiểm tra theo tiêu chuẩn Student. Kết quả tính toán có $t = 2,5709$ (phụ lục 4.11) lớn hơn giá trị tra trong bảng phân bố Student. Như vậy các hệ số hồi quy đảm bảo độ tin cậy.

Kiểm tra tính thích ứng của mô hình Fisher: dựa vào bảng phân tích phương sai được thực hiện trên máy vi tính (phụ lục 4.10), ta thấy giá trị Lack – of – fit có $P - \text{value} = 0,2003 > 0,05$. Do đó, mô hình hồi quy Y_3 là phù hợp.

Qua kết quả kiểm tra các hệ số hồi quy theo tiêu chuẩn Student và kiểm tra tính thích ứng của mô hình theo tiêu chuẩn Fisher cho thấy các hệ số hồi quy đảm bảo độ tin cậy và mô hình hồi quy là phù hợp.

Phương trình hồi quy dạng mã hóa hàm Y_3 phụ thuộc vào X_1 , X_2 và X_3 được biểu diễn như sau.

$$Y_3 = 7,67622 + 2,08642.X_1 + 0,140779.X_2 + 0,529497.X_3 - 0,252179.X_1^2 + 0,25625.X_1.X_2 + 0,19375.X_1.X_3$$

Chuyển hàm Y_3 về dạng thực, theo kết quả tính toán như phụ lục 4.24, phương trình hồi quy cho hàm UsC ở dạng thực có dạng như sau.

$$UsC = -22,9757 + 1,08907.T_a - 5,41366.v - 0,00485686.P - 0,00976297.T_a^2 + 0,128125.T_a.v + 0,000155.T_a.P$$

4.5.4.3. Phân tích kết quả thực nghiệm

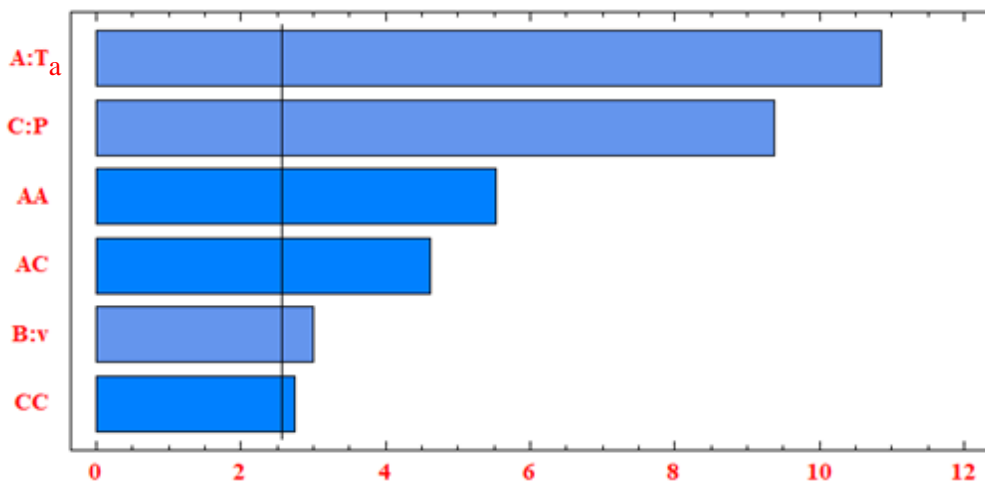
❖ Hàm thời gian sấy Y_1 (phút)

Thông qua hàm Y_1 ở dạng mã hóa để tiến hành phân tích mức độ ảnh hưởng của các yếu tố nghiên cứu đến thời gian sấy.

$$Y_1 = 524,863 - 90,3056.X_1 - 11,7418.X_2 - 60,7252.X_3 + 21,247.X_1^2 + 23,625.X_1.X_3 + 10,2896.X_3^2$$

Ta thấy:

- Dấu (-) đứng trước X_1 chứng tỏ nhiệt độ TNS càng lớn thời gian sấy giảm. Đây là mối quan hệ tỷ lệ nghịch, phù hợp với lý thuyết.
- Dấu (-) đứng trước X_2 chứng tỏ khi tăng vận tốc TNS thời gian sấy giảm. Đây là mối quan hệ tỷ lệ nghịch, phù hợp với lý thuyết.



Hình 4.14. Đồ thị ảnh hưởng của các hệ số hồi quy đến thời gian sấy t

- Dấu (-) đứng trước X_3 chứng tỏ khi công suất hồng ngoại tăng khả năng thẩm thấu của bức xạ hồng ngoại tốt hơn và đồng đều trên toàn bộ thể tích của VLS, do đó làm giảm thời gian sấy. Đây là mối quan hệ tỷ lệ nghịch, phù hợp với lý thuyết.

Bên cạnh đó từ hình 4.14 cũng cho thấy ảnh hưởng của nhiệt độ TNS đến thời gian sấy t là nhiều nhất.

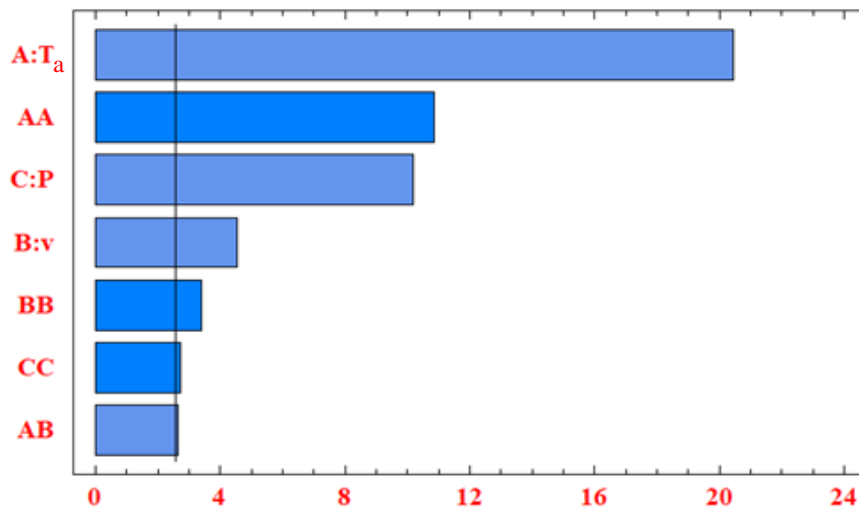
❖ Hàm phần trăm hàm lượng NH_3 Y_2 (%mg)

Thông qua hàm Y_2 ở dạng mã hóa để tiến hành phân tích mức độ ảnh hưởng của các yếu tố nghiên cứu đến hàm lượng NH_3 trong QTS.

$$Y_2 = 7,48092 - 3,66148.X_1 - 0,306804.X_2 - 0,842026.X_3 + 0,887687.X_1^2 - 0,28625.X_1.X_2 + 0,269121.X_2^2 + 0,216101.X_3^2$$

Ta thấy:

- Dấu (-) đứng trước X_1 chứng tỏ nhiệt độ TNS lớn thời gian sấy được rút ngắn làm chậm sự phân giải các protein và các axit amin nên hàm lượng NH_3 trong các mẫu mực sau khi sấy giảm. Đây là mối quan hệ tỷ lệ nghịch, phù hợp với lý thuyết.



Hình 4.15. Đồ thị ảnh hưởng của các hệ số hồi quy đến phần % NH_3

- Dấu (-) đứng trước X_2 chứng tỏ khi tăng vận tốc TNS hàm lượng NH_3 giảm do thời gian sấy giảm. Đây là mối quan hệ tỷ lệ nghịch, phù hợp với lý thuyết.

- Dấu (-) đứng trước X_3 chứng tỏ công suất hồng ngoại tăng hàm lượng NH_3 giảm do thời gian sấy giảm nên hàm lượng NH_3 cũng giảm. Đây là mối quan hệ tỷ lệ nghịch, phù hợp với lý thuyết.

Bên cạnh đó từ hình 4.15 cũng cho thấy ảnh hưởng của nhiệt độ TNS lên phần trăm hàm lượng NH_3 là nhiều nhất.

❖ Hàm ứng suất cắt Y_3 (N/cm^2)

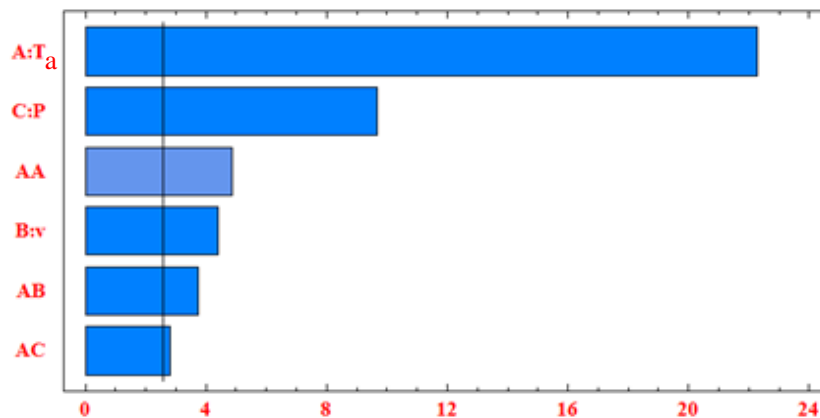
Thông qua hàm Y_3 ở dạng mã hóa để tiến hành phân tích mức độ ảnh hưởng của các yếu tố nghiên cứu đến ứng suất cắt của mực ống trong QTS.

$$Y_3 = 7,67622 + 2,08642.X_1 + 0,140779.X_2 + 0,529497.X_3 - 0,252179.X_1^2 + 0,25625.X_1.X_2 + 0,19375.X_1.X_3$$

Ta thấy:

- Dấu (+) đứng trước X_1 chứng tỏ nhiệt độ TNS lớn ứng suất cắt tăng, do khi nhiệt độ tăng đã làm giảm các liên kết hydrô do đó khả năng hồi ẩm giảm xuống, các protein của cơ thịt càng trở nên săn chắc, dai và cứng hơn do đó ứng suất cắt tăng dẫn đến chất lượng mực khô giảm. Đây là mối quan hệ tỷ lệ thuận, phù hợp với lý thuyết.

- Dấu (+) đứng trước X_2 chứng tỏ khi tăng vận tốc TNS sẽ làm cho bề mặt của vật liệu chai cứng hơn do vậy ứng suất cắt cũng bị ảnh hưởng ít nhiều, phù hợp với lý thuyết.



Hình 4.16. Đồ thị ảnh hưởng của các hệ số hồi quy đến ứng suất cắt

- Dấu (+) đứng trước X_3 chứng tỏ công suất phát hồng ngoại tăng ứng suất cắt tăng do cường độ mạnh mức độ thẩm thấu nhanh làm giảm nước nhanh nên độ cứng cũng tăng theo. Đây là mối quan hệ tỷ lệ thuận, phù hợp với lý thuyết.

Bên cạnh đó từ hình 4.16 cũng cho thấy ảnh hưởng của nhiệt độ TNS lên ứng suất cắt của mực ống sau khi sấy là nhiều nhất.

4.5.5. Xác định các thông số và chỉ tiêu phù hợp cho thiết bị sấy mực ống bằng phương pháp bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại

4.5.5.1. Xác định các thông số chỉ tiêu phù hợp

Xuất phát từ các mục tiêu nghiên cứu, bài toán tối ưu được thiết lập trên cơ sở ba hàm chỉ tiêu t , NH_3 , UsC đặc trưng cho các chỉ tiêu nghiên cứu là chất lượng và kỹ thuật.

- Chỉ tiêu tối ưu về hàm thời gian sấy t là đại lượng đặc trưng cho chỉ tiêu kỹ thuật của thiết bị sấy, trong đó thời gian sấy ngắn thì mức tiêu thụ điện năng riêng càng thấp.

- Chỉ tiêu tối ưu về phần trăm hàm NH_3 trong mực ống là đại lượng đặc trưng cho chỉ tiêu kỹ thuật và chất lượng của thiết bị sấy, phần trăm hàm lượng NH_3 do sự phân giải của protein và axit amin trong các mẫu sau khi sấy là thấp nhất.

- Chỉ tiêu tối ưu về độ cứng của mực ống là đại lượng đặc trưng cho chỉ tiêu kỹ thuật và chất lượng của thiết bị sấy được đánh giá thông qua ứng suất cắt của vật liệu sau khi sấy là thấp nhất.

- Chỉ tiêu tối ưu chung hay còn gọi là đa mục tiêu là bài toán thương lượng giữa chỉ tiêu chất lượng và kỹ thuật của thiết bị sấy mực ống để sao cho đồng thời thời gian sấy là ngắn nhất, phần trăm hàm lượng NH_3 và UsC của các mẫu sau khi sấy là thấp nhất.

- Thông số tối ưu là giá trị các thông số đảm bảo trị số chỉ tiêu tối ưu.

Các bài toán tối ưu được giải trên máy tính bằng phần mềm excel.

Như vậy từ mục đích nghiên cứu, chúng tôi xét 4 bài toán tối ưu như sau:

❖ Bài toán 1. Hàm mục tiêu: $t \rightarrow \min$

$$t = 3633,95 - 102,19.T_a - 29,3557.v - 1,25957.P + 0,83059.T_a^2 + 0,0189.T_a.P + 0,000166155.P^2 \rightarrow \min$$

$$\text{Hàm điều kiện: } 53,5 \geq T_a \geq 36,5$$

$$1,67 \geq v \geq 0,33$$

$$920,5 \geq P \geq 79,5$$

❖ Bài toán 2. Hàm mục tiêu: $\text{NH}_3 \rightarrow \min$

$$\text{NH}_3 = 109,302 - 3,71507.T_a + 2,25535.v - 0,00689514.P + 0,0347654.T_a^2 - 0,143125.T_a.v + 1,70914.v^2 + 0,00000352689.P^2 \rightarrow \min$$

$$\text{Hàm điều kiện: } 53,5 \geq T_a \geq 36,5$$

$$1,67 \geq v \geq 0,33$$

$$920,5 \geq P \geq 79,5$$

❖ **Bài toán 3. Hàm mục tiêu: UsC → min**

$$\text{UsC} = -22,9757 + 1,08907.T_a - 5,41366.v - 0,00485686.P - 0,00976297.T_a^2 + 0,128125.T_a.v + 0,000155.T_a.P \rightarrow \min$$

$$\text{Hàm điều kiện: } 53,5 \geq T_a \geq 36,5$$

$$1,67 \geq v \geq 0,33$$

$$920,5 \geq P \geq 79,5$$

❖ **Bài toán 4. Hàm đa mục tiêu: t → NH₃ → min và UsC → min**

$$t = 3633,95 - 102,19.T_a - 29,3557.v - 1,25957.P + 0,83059.T_a^2 + 0,0189.T_a.P + 0,000166155.P^2 \rightarrow \min$$

$$\text{NH}_3 = 109,302 - 3,71507.T_a + 2,25535.v - 0,00689514.P + 0,0347654.T_a^2 - 0,143125.T_a.v + 1,70914.v^2 + 0,00000352689.P^2 \rightarrow \min$$

$$\text{UsC} = -22,9757 + 1,08907.T_a - 5,41366.v - 0,00485686.P - 0,00976297.T_a^2 + 0,128125.T_a.v + 0,000155.T_a.P \rightarrow \min$$

$$\text{Hàm mục tiêu: } t \rightarrow \min$$

$$\text{Hàm điều kiện: } \text{NH}_3 \geq \text{NH}_{3(s)}$$

$$\text{UsC} \geq \text{UsC}_{(s)}$$

$$53,5 \geq T_a \geq 36,5$$

$$1,67 \geq v \geq 0,33$$

$$920,5 \geq P \geq 79,5$$

4.5.5.2. Kết quả giải bài toán

Sử dụng hàm Solver trong excel tiến hành giải các bài toán tối ưu ta có.

❖ **Kết quả giải bài toán 1**

Thông số tối ưu:

- Nhiệt độ TNS: $T_a = 53,3^\circ\text{C}$

- Vận tốc TNS: $v = 1,67 \text{ m/s}$
- Công suất hồng ngoại: $P = 774,5 \text{ W}$
- Chỉ tiêu thời gian sấy: $t = 379 \text{ phút}$

❖ Kết quả giải bài toán 2

Thông số tối ưu:

- Nhiệt độ TNS: $T_a = 52,7^\circ\text{C}$
- Vận tốc TNS: $v = 0,33 \text{ m/s}$
- Công suất hồng ngoại: $P = 920,5 \text{ W}$
- Chỉ tiêu phần trăm hàm lượng NH_3 : $\text{NH}_3 = 3,2\% \text{ mg}$

❖ Kết quả giải bài toán 3

Thông số tối ưu:

- Nhiệt độ TNS: $T_a = 36,5^\circ\text{C}$
- Vận tốc TNS: $v = 1,67 \text{ m/s}$
- Công suất hồng ngoại: $P = 79,5 \text{ W}$
- Chỉ tiêu ứng suất cắt: $U_{sC} = 3,32 \text{ N/cm}^2$

❖ Kết quả giải bài toán đa mục tiêu

Thông số tối ưu:

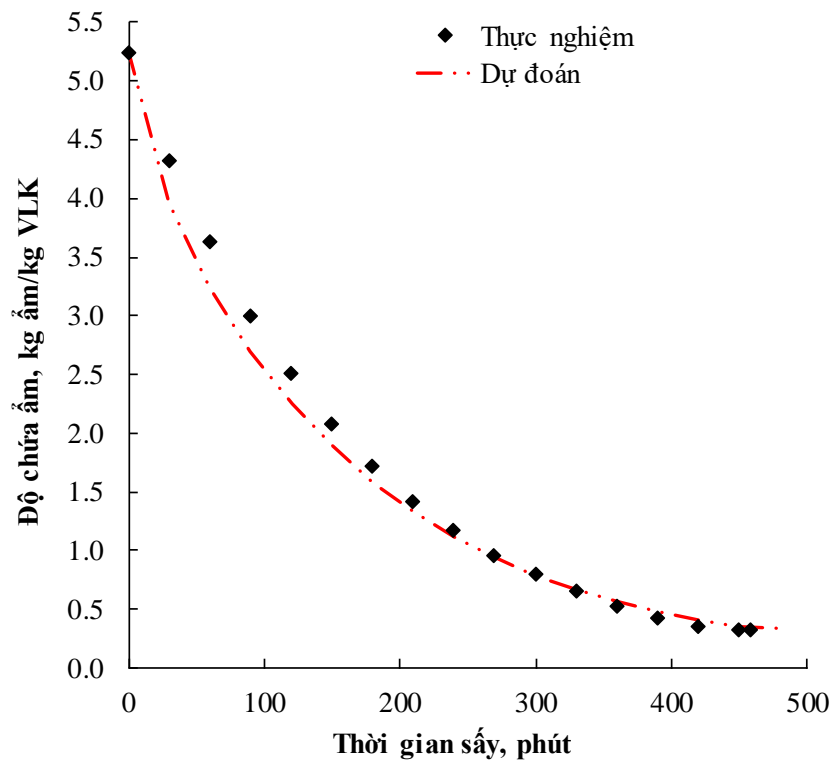
- Nhiệt độ TNS phù hợp: $T_a = 46,5^\circ\text{C}$
- Vận tốc TNS phù hợp: $v = 1,1 \text{ m/s}$
- Công suất hồng ngoại phù hợp: $P = 528 \text{ W}$
- Chỉ tiêu thời gian sấy: $t = 489 \text{ phút}$

4.6. Thực nghiệm so sánh đường cong chế độ sấy phù hợp

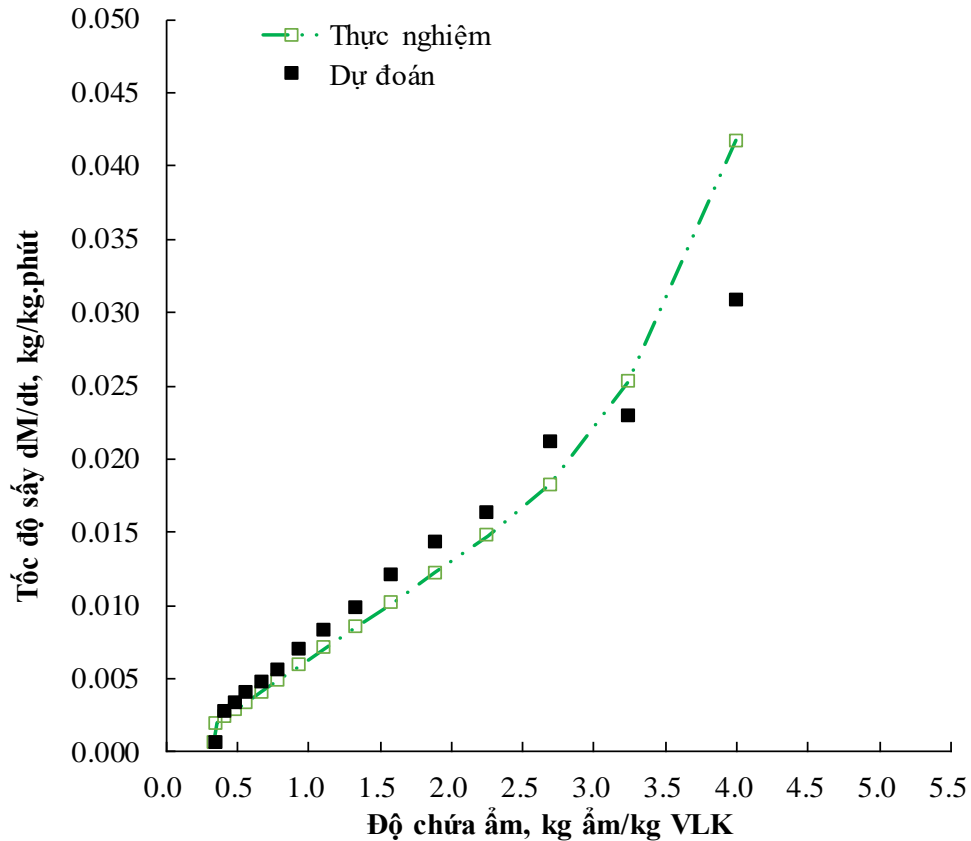
Thông qua phương pháp quy hoạch đa yếu tố xác định được các thông số tối ưu (phù hợp) của thiết bị sấy với các giá trị cụ thể như sau: Nhiệt độ TNS $T_a = 46,5^\circ\text{C}$, vận tốc TNS $v = 1,1 \text{ m/s}$ và công suất hồng ngoại $P = 528 \text{ W}$. Để tiến hành so sánh đường cong sấy và đường cong tốc độ sấy ở chế độ sấy phù hợp, chúng tôi tiến hành sấy thực nghiệm và tính toán lý thuyết tại chế độ sấy của bài toán phù hợp.

Bảng 4.12. Kết quả thực nghiệm và lý thuyết về độ chứa ẩm trung bình của vật liệu tại chế độ sấy phù hợp

TGS t, phút	Lý thuyết, kg ẩm/kg VLK	Thực nghiệm, kg ẩm/kg VLK	TGS t, phút	Lý thuyết, kg ẩm/kg VLK	Thực nghiệm, kg ẩm/kg VLK
0	5,250	5,250	270	0,936	0,969
30	3,998	4,324	300	0,789	0,800
60	3,241	3,637	330	0,666	0,659
90	2,693	3,002	360	0,565	0,538
120	2,250	2,512	390	0,480	0,437
150	1,884	2,084	420	0,409	0,355
180	1,579	1,721	450	0,351	0,336
210	1,324	1,425	459	0,333	0,333
240	1,112	1,177	480		



Hình 4.17. Đường cong sấy giữa kết quả dự đoán với thực nghiệm tại chế độ sấy phù hợp



Hình 4.18. Đường cong tốc độ sấy của kết quả dự đoán với thực nghiệm chế độ sấy phù hợp

Kết quả dự đoán và thực nghiệm tại chế độ sấy phù hợp được trình bày trong bảng 4.12 và hình 4.17. Sai lệch về độ chứa ẩm giữa kết quả dự đoán và thực nghiệm P_{tb} là 7,3%, sai số RMSE là 0,19. Thời gian sấy cần thiết để đạt độ chứa ẩm yêu cầu của kết quả lý thuyết và thực nghiệm là 480 phút và 459 phút, sai lệch là 4,3%.

4.7. Kết luận chương 4

1. Thực nghiệm đã chứng minh được sự phù hợp của mô hình toán thiết lập về mặt quá trình sấy cũng như động lực QTS. Kết quả phân tích và so sánh cho thấy phân bố nhiệt độ, độ chứa ẩm, tốc độ sấy được tính từ mô hình toán thiết lập có biên dạng và xu hướng phù hợp với diễn biến thực tế khi tiến hành thực nghiệm, sai số về độ chứa ẩm trung bình lớn nhất khi sấy bằng phương pháp bơm nhiệt có sự hỗ trợ của bức xạ hồng ngoại là 12,3%.

2. Xác định được ảnh hưởng của các chế độ sấy lên chất lượng mực ống sau khi sấy.

3. Sử dụng phương pháp quy hoạch thực nghiệm xác định được chế độ sấy phù hợp trên cơ sở mô hình hóa về thời gian sấy, phân trăm hàm lượng NH_3 và ứng suất cắt với các giá trị cụ thể như sau: Nhiệt độ TNS $T_a = 46,5^\circ\text{C}$, vận tốc TNS $v = 1,1$ m/s và công suất hồng ngoại $P = 528$ W.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

KẾT LUẬN

Các kết quả nghiên cứu của luận án đã đạt được mục tiêu và các nội dung cần nghiên cứu của luận án. Từ những kết quả nghiên cứu trong luận án, chúng tôi rút ra một số kết luận chính sau đây:

1. Bảng thực nghiệm đã xây dựng được các phương trình xác định tính chất nhiệt vật lý của mực ống tại Việt Nam như sau:

- Nhiệt dung riêng của mực ống;

$$C_p = 3,113 + 0,006 \cdot \omega \quad (R^2 = 0,968)$$

- Khối lượng riêng của mực ống;

$$\rho_p = 2059 - 71 \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right) - 736 \exp \left(0,247 \frac{\omega}{\omega_0} \right) \quad (R^2 = 0,976)$$

- Độ ẩm cân bằng của mực ống;

$$\omega_e = [\exp(-1,383 - 0,029 \cdot T)]^{1/1,267} (-\ln \varphi)^{-1/1,267}$$

- Hệ số khuếch tán ẩm;

$$D_m(T) = 2,521 \cdot 10^{-3} \exp \left[-\frac{42810,909}{8,314 \cdot (T + 273,15)} \right]$$

- Thông số nhiệt ẩn hóa hơi của mực ống.

$$\frac{h_{fg}}{h_{fgo}} = 1 + 0,5549 \exp(-2,3115 \cdot \omega)$$

2. Xác định được phương pháp sấy mực ống bằng thiết bị sấy bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại. Xây dựng được mô hình toán biểu diễn quá trình TNTA trong QTS mực ống bằng phương pháp sấy bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại khi xét đến ảnh hưởng độ ẩm đến hiện tượng dẫn nhiệt.

3. Hệ phương trình TNTA được giải đồng thời bằng phương pháp sai phân hữu hạn, kết quả đã được kiểm chứng với kết quả đã được công bố của các tác giả khác khi nghiên cứu về sấy mực. Mặt khác kết quả này cũng được kiểm chứng sự phù hợp thông qua thực nghiệm.

4. Bằng phương pháp quy hoạch thực nghiệm luận án đã xác định được mô hình hồi qui biểu diễn sự phụ thuộc giữa thời gian sấy, hàm lượng NH_3 và ứng suất cắt với nhiệt độ TNS, vận tốc TNS và công suất nguồn phát hồng ngoại như sau:

$$t = 3633,95 - 102,19.T_a - 29,3557.v - 1,25957.P + 0,83059.T_a^2 + 0,0189.T_a.P + 0,000166155.P^2$$

$$\text{NH}_3 = 109,302 - 3,71507.T_a + 2,25535.v - 0,00689514.P + 0,0347654.T_a^2 - 0,143125.T_a.v + 1,70914.v^2 + 0,00000352689.P^2$$

$$U_{sC} = -22,9757 + 1,08907.T_a - 5,41366.v - 0,00485686.P - 0,00976297.T_a^2 + 0,128125.T_a.v + 0,000155.T_a.P$$

5. Trên cơ sở các phương trình hồi qui, sử dụng phương pháp tối ưu hóa đã xác định được chế độ sấy phù hợp cho mực ống.

- Nhiệt độ TNS phù hợp: $T_a = 46,5^\circ\text{C}$
- Vận tốc TNS phù hợp: $v = 1,1 \text{ m/s}$
- Công suất hồng ngoại phù hợp: $P = 528 \text{ W}$

Các kết quả đóng góp của đề tài làm phong phú thêm nguồn tài liệu tham khảo liên quan đến nghiên cứu chuyên sâu về truyền nhiệt truyền ẩm, về thực nghiệm quá trình sấy lý thuyết.

KIẾN NGHỊ

Với kết quả nghiên cứu của luận án, chúng tôi thấy cần tiếp tục nghiên cứu sâu hơn một số nội dung sau:

Mặc dù nội dung nghiên cứu của luận án đã đạt được một số kết quả lý thuyết và thực nghiệm, tuy nhiên cần triển khai thí nghiệm ở quy mô lớn hơn để đánh giá hiệu quả kinh tế của kỹ thuật sấy mà luận án đề xuất.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. AOAC, 1997. Official method of analysis of the Association of Official Analytical Chemists International. Washington, DC: *Association of Official Analytical Chemists*.
2. Aviara, N. A., Ehiabhi, S. E., Ajibola, O. O., Oni, S. A., Power, P. P., Abbas, T., & Onuh, O. A. (2011). Effects of moisture content and temperature on the specific heat of soya bean, Moringa oleifera seed and Mucuna flagellipes nut. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 4(1), 87-92.
3. Arason S. (2003), The drying of fish and utilization of geothermal energy; *the icelandic experience, International geothermal Conference, reykiavik*. Paper No: 076.
4. Brooker, D.B., Bakker-Arkema, F.W. and Hall, C.W. 1992, *Drying and storage of grains and oilseeds. The AVI Publishing Company, Westport*.
5. Basunia, M.A., Abe, T., 2000. Moisture desorption isotherms of medium-grain rough rice.
6. Braun J.E., Bansal P.K. and Groll E.A. (2002), Energy efficiency analysis of air cycle heat pump dryers, *International Journal of Refrigeration*., 25: 954-965.
7. Basunia, M.A., Abe, T., 2004. Adsorption isotherms of barley at low and high temperatures.
8. Basu, S., Shivhare, U.S., Mujumdar, A.S., 2006b. Models for sorption isotherms for foods: a review. *Drying Technol.* 24,1705.
9. Białobrzewski, I., Zielińska, M., Mujumdar, A. S., & Markowski, M. (2008). Heat and mass transfer during drying of a bed of shrinking particles—Simulation for carrot cubes dried in a spout-fluidized-bed drier. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(19-20), 4704-4716.
10. Bùi Ngọc Hùng, Lê Anh Đức, Trương Hoà Hiệp, Nguyễn Đức Khuyến (2017). Nghiên cứu xác định phương pháp sấy rong nho (caulerpa lentillifera), *tạp chí Công nghiệp nông thôn*, số 25/2017 ISSN 1859 – 4026.

11. Caurie, M. (1970) *J. Fd Technol.* 5,301.
12. Crank, J. (1975). *The mathematic of diffusion* (2nd ed.). Oxford, UK: Oxford University Press.
13. Chen H., Zhang M., Fang Z. và Wang Y., 2013. Effects of different drying methods on the quality of squid cubes. *Drying Technology*, 31: 1911–1918.
14. Chua K.J., Mujumdar A.S., Chou S.K., Hawlader M.N.A. and Ho J.C. (2000a), Convective drying of banana, guava and potato pieces: Effects of cyclical variation of air temperature on convective drying kinetic and colour change, *Drying Technology -An International Journal*, 18. pp. 907-936.
15. Chua K.J., Chou S.K., Ho J.C., Mujumdar A.S. and Hawlader M.N.A. (2000b), Cyclical air temperature drying of guava pieces Effects on moisture and ascorbic acid contents *Transactions of the Institution of Chemical Engineer*, Vol.78, PartC, pp. 72-28.
16. Choi, Y. H. (1986). Effects of temperature and composition on the thermal conductivity and thermal diffusivity of some food components. *Korean Journal of Food Science and Technology*, 18(5), 357-363.
17. Costa, R.M., Oliveira, F.A.R., Bouthcheva, G., 2001. Structural changes and shrinkage of potato during frying. *International Journal of Food Science and Technology*, 36, 11–23.
18. Dirk., Butz., Markus. and Sckwarz. (2004), Heat pump drying (HPD) – How refrigeration technology provides and alternative for common drying challenges, *Ki-luft-und kalttechnik.*, 40: 140-144.
19. Deng Y., Liu Y., Qian B., Su S., Wu J., Song X., Yang H., 2011. Impact of far-infrared radiation-assisted heat pump drying on chemical compositions and physical properties of squid (*Illex illecebrosus*) fillets. *Eur Food Res Technol*, 232:761–768.

20. Deng, Y., Qian, B., Wu, J., Su, S., & Feng, X. (2011). Characteristics of squid (*Illex illecebrosus* LeSueur) fillets dried using a combination of heat pump drying and far infrared radiation. *Philippine Agricultural Scientist*, 94(3), 270-277.
21. Deng, Y., Wu, J., Su, S., Liu, Z., Ren, L., & Zhang, Y. (2011). Effect of far-infrared assisted heat pump drying on water status and moisture sorption isotherm of squid (*Illex illecebrosus*) fillets. *Drying Technology*, 29(13), 1580-1586.
22. Deng Y., Zhang Y.D., Wang Y., Song X., Huang H., Qian B. and Han., 2012. Changes in soluble protein and antioxidant property of squid (*Illex illecebrosus* LeSueur) fillets dried in a heat pump dryer using far-infrared radiation, *Philipp Agric scientist*, Vol. 95 No. 4, 386–393.
23. Deng, Y., Luo, Y., Wang, Y., Yue, J., Liu, Z., Zhong, Y., ... & Yang, H. (2014). Drying-induced protein and microstructure damages of squid fillets affected moisture distribution and rehydration ability during rehydration. *Journal of Food Engineering*, 123, 23-31.
24. Deng Y., Luo Y., Wang Y, Zhao Y., 2014. Effect of different drying methods on the myosin structure, amino acid composition, protein digestibility and volatile profile of squid fillets, *Journal of Food Chemistry* 171: 168–176.
25. Deng, Y., Wang, Y., Yue, J., Liu, Z., Zheng, Y., Qian, B., ... & Zhao, Y. (2014). Thermal behavior, microstructure and protein quality of squid fillets dried by far-infrared assisted heat pump drying. *Food control*, 36(1), 102-110.
26. Đào Trọng Hiếu (2004), Ứng dụng công nghệ gồm bức xạ hồng ngoại giải tỏa nhiệt chọn lọc kết hợp với không khí có nhiệt độ thấp để sấy cá cơm sấy xuất khẩu, *Luận văn thạc sỹ kỹ thuật*, Trường Đại học Thủy sản Nha Trang.
27. EL-Mesery H.S. and Mwithiga G., 2014. Specific energy consumption of onion slices during hot-air convection, infrared radiation and combined infrared-convection drying, *Journal of Applied Science and Agriculture*, 9(20) Special, Pages: 13-22.

28. Gallaher, G.L., 1951. A method of determining the latent heat of agricultural crops. 1. Gallaher, G.L. 1951. A method of determining the latent heat of agricultural crops. *Agricultural Engineering* 32(1) 34–38.
29. Ginzburg, A.S., 1969. Application of Infrared Radiation in Food Processing. Chemical
30. Hoàng Văn Chúc (1999), *Kỹ thuật sấy*, NXB Khoa học và kỹ thuật Hà Nội.
31. Hoàng Đình Tín (2001), *Truyền nhiệt và tính toán thiết bị trao đổi nhiệt*. NXB Khoa học kỹ thuật.
32. Hebbar, H. U., Vishwanathan, K. H., & Ramesh, M. N. (2004). Development of combined infrared and hot air dryer for vegetables. *Journal of food engineering*, 65(4), 557-563.
33. Holman, J.P., 2009. *Heat Transfer - McGraw-Hill*, Science Engineering Math (2009).
34. Hui, Y.H. and F. SHERKAT, Handbook of food science, *technology, and engineering-4* volume Set. 2005: CRC press.
35. Hiệp Hội Chế Biến Thủy Sản xuất Khẩu Việt Nam, Thông tin công bố trên mạng Internet - <http://www.Vasep.com.vn>
36. Huỳnh Thị Kim Cúc, 2012. Giáo trình mô đun chế biến mực khô. *Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn*.
37. Iglesias, H. A., & Chirife, J., 1976. “Prediction of effect of temperature on water sorption isotherms of food materials”. *Journal of Food Technology*, 11, 109–116.
38. Jain, D., Pathare, P.B., 2007. Study the drying kinetics of open sun drying of fish. *Journal of Food Engineering*, 78: 1315–1319.
39. Jaturonglumlert, S., & Kiatsiriroat, T. (2010). Heat and mass transfer in combined convective and far-infrared drying of fruit leather. *Journal of Food Engineering*, 100(2), 254-260.

40. Ježek D., Tripalo B., Brnčić M., Karlović D., Brnčić S.R., Viki-Topić D. and Karlović S., 2008. *Dehydration of celery by infrared drying*, *Croat. Chem. Acta* 81 (2): 325-331.
41. Jones P. (1992), Electromagnetic wave energy in drying processes, *In drying 92*, edited Mujumdar A.S., Elsevier Science publisher B.V., pp. 114-136.
42. Kang T.H., Hong H.K., Jeon H.Y., Han C.S., 2011. Drying characteristics of squids according to far infrared and heated air drying conditions. *Journal of Biosystems Eng*, Vol. 36, No.2, 109–115.
43. Keum, D.H., Han J.G., Kang S.R., Kim O.W., Kim H., Han J.W., Hong S.J., 2005. Development of a rice circulating concurrent-flow dryer (I) - Performance test of pilot scale dryer. *Journal of Biosystems Engineering* 10(2):97–106.
44. Kowalski, S.J., Mierzwa, D., 2013. Numerical analysis of drying kinetics for shrinkable products such as fruits and vegetables. *J. Food Eng.* 114, 522e529.
45. Lê Trung Đức, (2002), Nghiên cứu ứng dụng phương pháp sấy tầng sôi trong sản xuất thức ăn thủy sản ở Việt Nam, *luận án tiến sĩ Trường Đại học Bách Khoa Thành Phố Hồ Chí Minh*.
46. Lê Thị Đoàn Thủy (2012), Nghiên cứu chế độ sấy hành lá bằng phương pháp bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại, báo cáo tốt nghiệp, *trường đại học Nha Trang*.
47. Lozano, J. E., Rotstein, E., & Urbicain, M. J. (1983). Shrinkage, porosity and bulk density of foodstuffs at changing moisture contents. *Journal of food Science*, 48(5), 1497-1502.
48. Luikov, A 1980, Heat and mass transfer / A. Luikov; T. Kortneva (translator), Mir Publishers, Moscow 1980.
49. Levi, G., Karel, M, 1995. Volumetric shrinkage (collapse) in freeze-dried carbohydrates above their glass transition temperature. *Food Research International*, 28(2), 145–15.

50. Lê Quang Huy (2017), Nghiên cứu kỹ thuật sấy phân hoa, luận án tiến sĩ, trường Đại học Nông Lâm Thành Phố Hồ Chí Minh.
51. Meeso, N., Nathakaranakule, A., Madhiyanon, T., & Soponronnarit, S. (2007). Modelling of far-infrared irradiation in paddy drying process. *Journal of food engineering*, 78 (4), 1248-1258.
52. Mohsenin N N (1980). Physical Properties of Plant and Animal Materials. *Gordon and Breach Science Publishers*, New York.
53. Mujumdar, A. S. (2014). Handbook of industrial drying. CRC press.
54. Ning, X., Lee, J., & Han, C. (2015). Drying characteristics and quality of red ginseng using far-infrared rays. *Journal of ginseng research*, 39(4), 371-375.
55. Nindo, C. I., Kudo, Y., & Bekki, E. (1995). Test model for studying sun drying of rough rice using far-infrared radiation. *Drying Technology—An International Journal*, 13(1–2), 225–238.
56. Navaii P., Andrieu J. and Gevaudan A., 1992. Studies on infrared and convective drying of non hygroscopic solids, *Drying 92*, edited by Mujumdar A.S., Elsevier Science publisher B.V., pp. 685-694.
57. Nathakaranakule A., Jaiboon P., Soponronnarit S., 2010. Far-infrared radiation assisted drying of longan fruit, *Journal of food engineering* 100: 662–668.
58. Nguyễn Hay, Lê Anh Đức, Phạm Côn (2014), Nghiên cứu thiết kế chế tạo và thực nghiệm xác định chế độ sấy bông Atisô, *Tạp chí Công nghiệp nông thôn số 2*.
59. Nguyễn Cảnh (2016), Quy hoạch thực nghiệm. Đại học quốc gia Hồ Chí Minh.
60. Oswin, C. R., 1946. “The kinetics of package life. III. Isotherm. *Journal of Chemical Industry*”, London, 65, 419–421.
61. Ozisik, M., 1985. Heat Transfer: a Basic Approach. McGraw-Hill, New York.
62. Pan Z., Shih C., McHugh T.H., Hirschberg E., 2008. Study of banana dehydration using sequential infrared radiation heating and freeze-drying, *LWT - Food Science and Technology* 41: 1944e1951.
63. Pan, Z., & Atungulu, G. G. (Eds.). (2010). Infrared heating for food and agricultural processing. *CRC Press*, 3-5 pages.

64. Pfof, H.B., Maurer, S.G., Chung, D.S., Milliken, G.A., 1976. "Summarizing and reporting equilibrium moisture data for grains" *American Society of Agricultural Engineers*, 76-3520, St. Joseph, MI, USA.
65. Phoungchandang, S., Woods, J.L., 2000. Moisture diffusion and desorption isotherms for banana. *J. Food Sci.* 64, 651– 657.
66. Paakomen K., Havento J., Galambosi B. and Paakomen M. (1999), Infrared drying of herb, *Argicultural and Food Science Finland*, Vol. 8, pp. 19-27.
67. Rahman, M. S. (1993). Specific heat of selected fresh seafood. *Journal of food science*, 58(3), 522-524.
68. Rahman, M.S. 1991. Thermophysical properties of seafoods. Ph. D. thesis. University of New South Wales, *Australia*.
69. Rahman, M.S. and DRISCOLL, R.H. 1991. Thermal conductivity of seafoods: calamari, octopus and prawn. *Food Aust.* 43 (8), 356.
70. Rahman, M. S., & Potluri, P. L. (1991). Thermal conductivity of fresh and dried squid meat by line source thermal conductivity probe. *Journal of food science*, 56(2), 582-583.
71. Rahman, M. S., Perera, C. O., Chen, X. D., Driscoll, R. H., & Potluri, P. L. (1996). Density, shrinkage and porosity of calamari mantle meat during air drying in a cabinet dryer as a function of water content. *Journal of Food Engineering*, 30(1-2), 135-145.
72. Rahman, M. S. (Ed.). (2007). Handbook of food preservation. *CRC press*.
73. Ren, A.Q., 2009. Study on heat pump hot-air combined drying of squids and quality change of dried squids during storage, Master's thesis, Jiangnan University, Wuxi, *China*, 2009 (in Chinese).
74. Swasdisevi T., Devahastin S., Ngamchum R. and Soponronnarit S., 2007. Optimization of a drying process using infrared-vacuum drying of Cavendish banana slices, *Songklanakar J. Sci. Technol* 29 (3): 809-816.
75. Sacilik, K., & Elicin, A. K. (2006). The thin layer drying characteristics of organic apple slices. *Journal of food engineering*, 73(3), 281-289.

76. Scala, K., & Crapiste, G. (2008). Drying kinetics and quality changes during drying of red pepper. *LWT-Food Science and Technology*, 41(5), 789-795.
77. Sandu, C., 1986. Infrared radiative drying in food engineering: a process analysis. *Biotechnology Progress* 2, 109–119
78. Stanislaw P., Digvir S.J., Stefan C., 1998. Grain Drying: Theory and Practice. *Published by John Wiley and Sons*, ISBN 0471573876, 9780471573876, 303 pages.
79. Singh, R. R. B., Rao, K. H., Anjaneyulu, A. S. R., & Patil, G. R. (2006). Water desorption characteristics of raw goat meat: Effect of temperature. *Journal of food engineering*, 75(2), 228-236.
80. Smith, S.E. (1947) J. Am. Chem. SOC.69,646.
81. Subramanian, S., & Viswanathan, R. (2003). Thermal properties of minor millet grains and flours. *Biosystems Engineering*, 84(3), 289-296.
82. TCVN 2014, *Tiêu chuẩn Việt Nam về thủy hải sản xuất khẩu. Tổng cục Tiêu chuẩn Đo lường chất lượng thẩm định*, Bộ Khoa học và Công nghệ công bố.
83. Trần Thị Lý (1996), *Cơ sở sản xuất một số sản phẩm có giá trị gia tăng từ nhuyễn thể và cá*, Trường Đại học Thủy sản Nha Trang.
84. Thompson, T.L., Peart, R.M., Foster, G.H., 1968. “Mathematical simulation of corn drying a new model”. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 24, 582–586.
85. Tirawanichakul S., Phatthalung W.N. and Tirawanichakul Y., 2008. Drying Strategy of shrimp using hot air convection and hybrid infrared radiation/hot air convection, *Walailak J Sci & Tech* 5 (1): 77-100.
86. Trần Văn Phú, *Tính toán và thiết kế hệ thống sấy*, Nhà xuất bản giáo dục Hà Nội, 2002.
87. Trần Văn Phú, 1988, *Dịch chuyển nhiều cấu tử trong các quá trình công nghệ và phương pháp xác định các đặc trưng nhiệt-chất của một số thực phẩm và vật liệu*. LA TSKH, Đại học Bách Khoa Hà Nội Riga (tiếng Nga) 1988

88. Trần Đại Tiến (2007), *Luận án tiến sĩ. Nghiên cứu phương pháp sấy và bảo quản mực ống khô lột da*. Đại học Nha Trang.
89. Trịnh Văn Quang, 2009, *Phương pháp sai phân hữu hạn & phần tử hữu hạn trong truyền nhiệt*. Trường Đại Học Giao Thông Vận Tải Hà Nội.
90. Trịnh Văn Quang, 2004. *Nhiệt Kỹ Thuật*. Nhà xuất bản khoa học kỹ thuật.
91. Trương Minh Thắng, 2014, *Nghiên cứu quá trình truyền nhiệt truyền chất trong quá trình sấy bơm nhiệt kiểu bậc thang*, Luận án tiến sĩ trường Đại học Bách Khoa Hà Nội.
92. Vega-Gálvez A., Miranda M., Clavería R., Quispe I., Vergara J., Uribe E., Paez H., Scala D.S., 2011. Effect of air temperature on drying kinetics and quality characteristics of osmo-treated jumbo squid (*Dosidicus gigas*), *LWT - Food Science and Technology* 44: 16e23.
93. Viện nghiên cứu Hải sản, Tổng cục Thủy sản, Bộ Nông nghiệp và Phát triển Nông thôn, “*Điều tra tổng thể hiện trạng và biến động nguồn lợi hải sản biển Việt Nam*”, Báo cáo kết quả dự án, 2012.
94. Xu, M., Tian, G., Zhao, C., Ahmad, A., Zhang, H., Bi, J., ... & Zheng, J. (2017). Infrared Drying as a Quick Preparation Method for Dried Tangerine Peel. *International journal of analytical chemistry*, 2017.
95. Wang D. and Chang C.S. (2001), Energy efficiency of a new heat pump system for drying grain, *Transaction of the ASAE.*, 44(6): 1745-1750.
96. Wang, Y.Q., Zhang, M., Mujumdar, A.S., 2011. Trends in processing technologies for dried aquatic products. *Drying Technology*, 29: 382–394.
97. Wang Y., Zhang M., Mujumdar A.S. and Chen H., 2014. Drying and Quality Characteristics of Shredded Squid in an Infrared-Assisted Convective Dryer. *Drying Technology*, 32: 1828–1839.
98. Yamada N. and Wada S., 1988. Production of dried marine products using far infrared, *Res. Fisheries* 7(2): 85-89.

99. Yan, Z., Sousa-Gallagher, M. J., Oliveira, F.A, 2008. Shrinkage and porosity of banana, pineapple and mango slices during air-drying. *Journal of food engineering*, 84(3), 430-440.
100. Yong-Jin Cho, Seung-Je Park, Chong-Ho Lee, 1996. Latent Heat of Korean Ginseng. *Jourrd of Ebotl Eqyinwrin~* 30 (1 YY6) 425- 131).
101. Yunus A (2002). Cengel, Yunus Cengel-Heat transfer_ a practical approach- *McGraw-Hill Science_Engineering_Math*.
102. Xiaoyong, S., Hao, H., & Baoling, Z. (2016). Drying characteristics of Chinese yam (*dioscorea opposita thunb.*) by far-infrared radiation and heat pump. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sci-ences*, 32(6), 18-20.
103. Zbinciski I., Jakobsen A. and Driscoll J.L., 1992. Application of infrared radiration for drying of particulate material, *Drying 92, Edited by Mujumdar A.S., Elsevier Science publisher B.V.*, pp. 704-711.