การออกแบบและการศึกษาเครื่องระเหยน้ำแบบแผ่นฟิล์มในแนวดิ่ง

นางสาว สดศรี ชัยเจริญสวัสดิ์

005106

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
แผนกวิชาเคมีเทคนิค
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2522

117575825

THE DESIGN AND STUDY OF A VERTICAL FILM EVAPORATOR

Miss Sodsri Chaijareonswad

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science

Department of Chemical Technology

Graduate School

Chulalongkorn University

1979

Thesis Title	The Design and Study of a Vertical Film Evaporator
By	Miss Sodsri Chaijareonswad
Department	Chemical Technology
Thesis Advisor	Pienpak Tasakorn, Ph.D.

Accepted by the Graduate School, Chulalongkorn University in partial fulfillment of the requirements for the Master's degree.

S. Bunnag ..... Dean of Graduate School
(Associate Professor Supradit Bunnag, Ph.D.)

Thesis Committee

P. Sthapitanonda ..... Chairman
(Professor Prasom Sthapitanonda, Ph.D.)

..... Member
(Assistant Professor Kiartchai Santiyanont, Ph.D.)

Shooshat Barame ..... Member
(Assistant Professor Shooshat Barame, Ph.D.)

Phol Sagetong ..... Member
(Associate Professor Phol Sagetong, Ph.D.)

P. Tasakorn ..... Advisor
(Pienpak Tasakorn, Ph.D.)

Copyright of the Graduate School, Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบและการศึกษาเครื่องระเหยน้ำแบบแผ่นฟิล์มในแนวดิ่ง
ชื่อนิสิต	นางสาว สดศรี ชัยเจริญสวัสดิ์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.เพียรพรรค ทัศคร
แผนกวิชา	เคมีเทคนิค
ปีการศึกษา	2521

หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

เครื่องระเหยน้ำแบบแผ่นฟิล์มในแนวดิ่ง เป็นเครื่องระเหยน้ำที่เหมาะสมสำหรับสารละลายที่คุณสมบัติถูกทำลายโดยง่ายด้วยความร้อน เนื่องจากเครื่องระเหยน้ำแบบนี้มีค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนสูงถึงแม้จะมีความแตกต่างของอุณหภูมิน้อย เครื่องระเหยน้ำที่ออกแบบในการศึกษานี้มีสารละลายไหลเป็นแผ่นฟิล์มบาง ๆ บนผิวท่อด้านใน และไอน้ำเป็นตัวให้ความร้อนอยู่ภายนอก ตัวปล่อยสารละลายให้เป็นแผ่นฟิล์มถูกออกแบบเฉพาะเพื่อที่จะให้ไอซึ่งเกิดจากการระเหยผ่านออกไปด้านบนได้ นอกจากนี้ยังมีเครื่องให้ความร้อนติดอยู่เหนือส่วนที่เกิดการระเหยเพื่อควบคุมอุณหภูมิของสารละลายที่เข้าไปในเครื่องระเหยนี้

ในการศึกษาเรื่องการระเหยบนแผ่นฟิล์ม ได้พิจารณาค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเป็นหลัก ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองได้แก่อัตราการไหลเข้าของสารละลาย อุณหภูมิของสารละลาย อุณหภูมิของไอน้ำที่ใช้ ความยาวของท่อในส่วนที่เกิดการระเหย และความหนืดของสารละลายที่จะระเหย นอกจากนี้ได้ทำการวัดค่าอุณหภูมิของผิวท่อ อุณหภูมิของไอที่เกิดจากการระเหย และความหนืดของสารละลายน้ำตาลที่ใช้ในการทดลอง เพื่อประกอบการคำนวณหาค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนดังกล่าว

ผลจากการศึกษาได้สรุปออกมาในรูปของกราฟที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนอาจคำนวณออกมาได้เมื่อรู้ค่าตัวแปรต่าง ๆ

สำหรับเครื่องระเหยน้ำแบบนี้ถ้าใช้กับสารละลายที่มีน้ำตาลที่ความเข้มข้น 15 องศาบริกซ์ ทำงานได้ดีที่สุดเมื่อมีอัตราการระเหยเป็น 7 ปอนด์/ชั่วโมง/ตารางฟุต และอัตราการถ่ายเทความร้อนเป็น 6×10^4 บีทียู/ชั่วโมง/ตารางฟุต ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าเท่ากับ 900 บีทียู/ชั่วโมง/องศาฟาเรนไฮต์/ตารางฟุต

Thesis Title	The Design and Study of a Vertical Film Evaporator
Name	Miss Sodsri Chaijareonswad
Thesis Advisor	Pienpak Tasakorn, Ph.D.
Department	Chemical Technology
Academic Year	1978

ABSTRACT

Vertical film evaporators are most suitable for the evaporation of heat sensitive products, because these evaporators have high heat transfer coefficients at a low temperature difference. A vertical film evaporator was designed for the study of heat transfer in an evaporating film. Liquid flowed as a thin film over the interior surface of the heated tube, and steam, as a heating medium, flowed outside. A distributor was specially designed to let the vapor pass through. There was also a preheater connected to the top of the evaporating tube for the controlling of the feed temperature.

In the study of film evaporator, the mean heat transfer coefficient was the main interest. The variable parameters studied were feed rate, feed temperature, steam inlet temperature, length of heated tube and viscosity of feed. In addition, the heated wall temperatures, vapor phase temperatures and viscosities of sucrose solutions

using as feed were measured for the calculation of mean film heat transfer coefficients.

The results were summarized in the graph showing relationship between $h_m\left(\frac{k^2}{\rho^2 gk^3}\right)^{1/3}$ and Re. The mean heat transfer coefficient can be predicted when the operating conditions are known.

When this type of evaporator is used for sucrose solution, of 15 Brix, it is best operated at the mass flux of 7 lb/hr ft^2 and the heat flux of 6×10^4 Btu/hr ft^2. The mean heat transfer coefficient is 900 Btu/hr $ft^2.{}^oF$.

หอสมุดกลาง
จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

ACKNOWLEDGEMENT

The author wishes to express sincere thanks to her advisor, Dr. Pienpak Tasakorn for his kind encouragement, helpful advices, patience especially his very active and kind co-operation during the experimental process. The other important person which the author is much impressed by his kind introduction and guideline is Assistant Professor Dr. Kiartchai Santiyanont who is the first advisor. She is much grateful to the approval committee for their useful comments and suggestions.

At the same time she would like to thank the official staff of the Department of Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, for their co-operation in laboratory work.

Above all, she would like to thank the Committee of the Graduate School of Chulalongkorn University for granting her an assistantship which made some part of this study possible.

CONTENTS

	Page
Abstract (Thai)	iv
Abstract (English)	vi
Acknowledgement	viii
List of Tables	xiii
List of Figures	xiv
Nomenclature	xvi
Chapter	
I INTRODUCTION	
1.1 Evaporator	1
1.2 Vertical Film Evaporator	2
1.3 Objective and Scope of Work	4
II LITERATURE REVIEWS AND THEORETICAL CONSIDERATION	
2.1 Evaporators	6
2.2 Film Evaporators	9
2.3 Vertical Falling Film Evaporators	17
2.3.1 Principle of Vertical Falling Film Evaporator	17
2.3.2 Design Consideration	18
2.3.3 Theoretical Consideration	19
2.3.4 Heat Transfer in Vertical Film Evaporator	26
2.3.5 Special Features of Vertical Film Evaporator	33

Chapter Page

III APPARATUS AND EXPERIMENTAL METHODS

3.1 The Design and Operation of a Vertical Film Test Rig 35

3.2 Temperature Measurements 43

3.3 Preparation of Calibration Curves and Charts 44

3.4 Experimental Variables 45

3.5 Experimental Methods 46

3.6 Experimental Procedures 49

IV EXPERIMENTAL RESULTS

4.1 Experimental Results Using Water as an Evaporating Liquid 51

4.1.1 The Heated Wall Temperature of the Evaporating Body 51

4.1.2 The Vapor Phase Temperature Along the Heated Tube 51

4.1.3 The Film Heat Transfer Coefficients 54

4.1.3.1 Effect of Feed Rate on h_m 54

4.1.3.2 Effect of Feed Temperature on h_m 57

4.1.3.3 Effect of Steam Temperature on h_m 57

Chapter Page

4.2 Experimental Results Using Sucrose Solution as an Evaporating Liquid ... 61

4.2.1 Viscosity of Sucrose Solutions 61

4.2.2 Effect of Viscosity on h_m 61

V DISCUSSION

5.1 Some Considerations on the Design of Experimental Apparatus 64

5.2 Variations of h_m with Operating Parameters 65

5.2.1 Effect of Feed Rate on h_m 65

5.2.2 Effect of the Wall Temperature on h_m 66

5.2.3 Effect of Viscosity on h_m ... 70

5.2.4 Effect of Feed Temperature on h_m 73

5.2.5 Effect of Length of Heated Tube on h_m 73

5.3 Performance of the Experimental Evaporator 74

5.3.1 Comparison with Theoretical Expression 74

5.3.2 Selection of Operating Condition 74

5.4 Viscosities of Sucrose Solutions 76

Chapter Page

VI CONCLUSION 79

References 81

Appendix

A CALIBRATION DATA 84

B SOME PROPERTIES OF SUCROSE SOLUTION 89

C MEASUREMENT OF HEATED WALL TEMPERATURE AND VAPOR PHASE TEMPERATURE 91

D NUMERICAL RESULTS 94

Vita 108

LIST OF TABLES

Table		Page
2.1	Comparison between the process carried out in various types of evaporator	12
A1	Calibration of rotameter	86
B1-B2	Measurement of viscosity of sucrose solution	91
C1	Measurement of heated wall temperature	92
C2-C3	Measurement of vapor phase temperature	93-94
D1-D9	Numerical Results	95-103

LIST OF FIGURES

Figure		Page
2.1	Evaporator types	10
2.2	Static film evaporator	14
2.3	Mechanic film evaporator	16
2.4	Evaporation on a vertical heated tube	21
2.5	Local heat transfer coefficient as function of Reynolds number	29
3.1	A vertical film test rig	36
3.2	Schematic diagram of the vertical film test rig	37
3.3	Evaporating body and preheater assembly	40
3.4	Cross-section of evaporating body	41
4.1	Variation of wall temperature with feed rate	52
4.2	Variation of wall temperature with steam temperature	53
4.3	Variation of vapor temperature along 1-ft tube	55
4.4	Variation of vapor temperature along 2-ft tube	56
4.5	Variation of $h_m\left(\frac{\mu^2}{\rho^2 g k^3}\right)^{1/3}$ with Re	58
4.6	Variation of h_m with feed temperature	59
4.7	Variation of h_m with steam temperature	60
4.8	Variation of viscosity of sucrose solution with concentration	62

Figure		Page
4.9	Variation of h_m with feed rate and viscosity	63
5.1	Local heat transfer coefficient as function of Reynolds number	67
5.2	Variations of evaporated fraction and total heat transfer with steam temperature	70
5.3	Variation of h_m with viscosity	71
5.4	Variation of $h_m\left(\frac{\mu^2}{\rho^2 g k^3}\right)^{1/3}$ with Re for sucrose solution 0-15 Brix	73
5.5	Comparison between $\Gamma_{L_{exp}}$ and $\Gamma_{L_{theo}}$	76
5.6	Comparison between η_{exp} and η_{eq}	79
A1-A4	Calibration curve of rotameter	86-87
A5	Calibration curve of chromel-alumel thermocouple	88
A6	Calibration curve of Brix refractometer	89

NOMENCLATURE

c = concentration (Brix)

C_p = specific heat (Btu/lb ^{o}F)

D = diameter (ft)

g = gravitational acceleration (ft/hr^2)

h = local heat transfer coefficient (Btu/hr ft^2 ^{o}F)

$\bar{h}$ = average heat transfer coefficient (Btu/hr ft^2 ^{o}F)

h_m = mean heat transfer coefficient (Btu/hr ft^2 ^{o}F)

k = thermal conductivity (Btu/hr ^{o}F ft)

Ka = Kapitza number, $\frac{\mu^4 g}{\rho \sigma^3}$ (dimensionless)

L = wall length (ft)

p = pressure (lbf/ft^2)

Pr = Prandtl number, $\frac{C_p \mu}{k}$

t = time (hr)

T = temperature (^{o}F)

v = velocity (ft/sec)

α = thermal diffusivity (ft^2/hr)

Γ = mass flow rate per unit width of the wall (lb/ft-hr)

δ = film thickness (ft)

λ = latent heat of vaporization (Btu/lb)

μ = absolute viscosity (lb/ft-hr)

ν = kinematic viscosity (ft^2/hr)

ρ = density (lb/ft^3)

σ = surface tension (lbf/ft)

Subscripts

H = liquid heating without evaporation

l = liquid

L = at $y = L$

s = saturation condition

t_r = transition

v = vapor

w = at the wall

x = coordinate along the radius

y = coordinate down the wall