

การทดสอบสมรรถนะของซีดีไปป์ไว้วิก์แมททองแดงและฟร็อน  
เพื่อการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



นางสาว ชุติมา จารุศิริพงษ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี  
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2533


ISBN 974-577-047-7

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

016162

1A7448508

PERFORMANCE TEST OF COPPER-FREON WICKLESS HEAT PIPE  
FOR HEAT EXCHANGER DESIGN



Miss Chutima Jarusiripot

ศูนย์วิทยทรัพยากร

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering

Department of Chemical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

1990

ISBN 974-577-047-7



พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว



ชุตินา จารุศิริพจน์ : การทดสอบสมรรถนะของฮีตไปป์ไร้วิก์แบบทองแดงและฟร็อนเพื่อการ  
ออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Performance Test of Copper-Freon  
Wickless Heat Pipe for Heat Exchanger Design) อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร.วิวัฒน์  
ตัณฑพานิชกุล, นายพิชัย ตั้งสถาพรพาณิชย์, 230 หน้า. ISBN 974-577-047-7

งานวิจัยนี้รายงานผลการทดสอบสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของแท่งฮีตไปป์เดี่ยว ที่สร้าง  
ขึ้นที่ บริษัทยูนิแพบ อีคิวเมนต์ จำกัด และที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ฮีตไปป์ไร้  
วิก์ทำจากท่อทองแดง ซึ่งมีผนังด้านในเป็นร่องแบบเกลียว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 9.5  
มิลลิเมตร และยาว 900 มิลลิเมตร ฟร็อน 22 (จุดเดือด  $-40.75^{\circ}\text{C}$ ) และฟร็อน 113 (จุดเดือด  
 $48^{\circ}\text{C}$ ) เป็นของไหลใช้งานที่ศึกษา ช่วงการระเหยและช่วงควบแน่นของฮีตไปป์ยาวช่วงละ 400  
มิลลิเมตร ส่วนช่วงคั่นกลาง (อะไดอะแบติก) ยาว 100 มิลลิเมตร

การทดสอบสมรรถนะของแท่งฮีตไปป์ ทำโดยการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำร้อนและน้ำ  
เย็น อุณหภูมิของน้ำร้อนและน้ำเย็น ตั้งไว้ที่  $35$  หรือ  $40^{\circ}\text{C}$  และ  $20$ ,  $25$  หรือ  $30^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ ปริ  
มาณของไหลใช้งาน มุมเอียงของฮีตไปป์ และอัตราการไหลของน้ำร้อนและน้ำเย็น เป็นตัวแปรที่ศึกษาใน  
การทดลอง ผลของการทดลองแสดงอยู่ในรูปของค่าความนำความร้อนเชิงประสิทธิผลรวมกับตัวแปรข้างต้น  
จากการทดลองพบว่าอัตราการไหลของน้ำร้อนและน้ำเย็น มีผลไม่มากต่อสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน  
ของแท่งฮีตไปป์ ค่ามุมเอียงที่ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนสูงสุดมีค่าประมาณ 50 องศา สำหรับฟร็อน  
ทั้งสองชนิด ปริมาณของไหลใช้งานที่เหมาะสมสำหรับฟร็อน 113 อยู่ในช่วง 9.3-18.5 % และประมาณ  
30 % สำหรับฟร็อน 22 ผลการทดลองที่ได้ถูกนำมาหาสัมพันธเพื่อใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การ  
ถ่ายเทความร้อนภายในช่วงการระเหย และ ช่วงควบแน่น และที่นิวตันนอกของท่อฮีตไปป์ ความต้าน  
ทานการถ่ายเทความร้อนรวม และความต้านทานภายในของแท่งฮีตไปป์ที่คำนวณได้มีค่าสอดคล้องกับผลการ  
ทดลอง แต่สัมพันธของความต้านทานของฟิล์มด้านนอกของท่อให้ผลไม่ตึก อุณหภูมิน้ำร้อนและน้ำเย็นที่ทำให้  
ผลการทดลองดีที่สุดในงานวิจัยนี้คือ  $35^{\circ}\text{C}$  และ  $30^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ ค่าความนำความร้อนเชิงประสิทธิผล  
ของแท่งฮีตไปป์ที่ได้จะอยู่ในช่วง  $60,000 - 1.2 \times 10^7$  วัตต์/(ม.°ซ) ได้เขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำ  
หรับช่วยในการออกแบบ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้สัมพันธที่ได้จากการทดลองนี้ และสาธิตการ  
ใช้โปรแกรมไว้ด้วย

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ปีการศึกษา 2532

ลายมือชื่อนิสิต ชุตินา จารุศิริพจน์

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. วิวัฒน์ ตัณฑพานิชกุล







## ACKNOWLEDGEMENTS

The author wishes to sincerely thank Associate Professor Wiwut Tanthapanichakoon for his invaluable advice, encouragement and many helpful suggestions throughout the course of this study. Thanks are also due to Associate Professor Piyasarn Prasertdham, Assistant Professor Sasithorn Boon-Long and Mr. Pichai Tangsathapornpanich for serving as chairman and members of the thesis committee. Their criticisms and comments have been very helpful.

The author next wishes to gratefully acknowledge the financial support provided by The National Research Council of Thailand and The Graduate School of Chulalongkorn University, and to express her deepest gratitude to her parents, brothers and sisters for their patience and moral support throughout the course of this work.

Finally many thanks are also due to her freinds and those whose names are not mentioned here for their general assistance and encouragement.

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## CONTENTS

Abstract in Thai... ..	i
Abstract in English ... ..	ii
Acknowledgement ... ..	iii
List of Figures... ..	iv
List of Tables. ... ..	xi
Nomenclature... ..	xii
Chapter	
1 Introduction... ..	1
1.1 The Objectives of the Thesis.. ..	4
1.2 The Scope of Work. ... ..	4
2 Review of Literatures.. ..	6
3 Heat Transfer Mechanism of a Single Heat Pipe.. ..	23
3.1 The Thermal Resistance in Heat Pipe... ..	23
3.2 Heat Transfer Processes in the Evaporator. ... ..	27
3.2.1 The Boiling Heat Transfer from Plane Surfaces... ..	28
3.2.1.1 Nucleate Boiling and Bubble Formation. ... ..	29
3.2.1.2 Correlation of Nucleate Boiling Data... ..	33
3.2.1.3 Nucleate Boiling in Water and Organic Liquids ... ..	34
3.2.2 Correlations of Evaporator Heat Transfer Coefficients ... ..	36



Chapter

4	Experimental Apparatus and Procedure ... ..	43
4.1	Experimental Apparatus. ... ..	43
4.1.1	The Wickless Heat Pipe.. ... ..	43
4.1.2	The Experimental Set Up. ... ..	44
4.2	Experimental Procedure. ... ..	49
4.3	Analysis of Experimental Data.. ... ..	50
5	Experimental Results for a Single Heat Pipe and Discussions. ... ..	51
5.1	Experimental Conditions ... ..	51
5.2	Effect of Fill Ratio on a Wickless Heat Pipe... ..	52
5.3	Effect of the Inclination Angle of the Heat Pipe.. ... ..	58
5.4	Effect of Flow Rates of External Fluids ... ..	65
5.5	Effect of Temperature Difference Across the Heat Pipe.. ... ..	77
5.6	Surface Temperature Distribution along the Heat Pipe.. ... ..	84
5.7	Comparison with Published Results.. ... ..	84
5.8	Heat Transfer Correlations for the Present Single Heat Pipe... ..	96
5.9	Comparison with the Experimental Results... ..	101
6	Heat Pipe Heat Exchanger Design. ... ..	118
6.1	Theory of Heat Exchanger Design from Performance of Single Heat Pipe ... ..	118
6.1.1	Analysis Based on the Conductance Model... ..	119



Chapter

6.1.2	Analysis Based on the Effective-Number of Transfer Unit . . . . .	121
6.2	Design Procedure and Example of Calculations... . . .	127
6.2.1	Conditions Used in Heat Exchanger Design.. . . .	127
6.2.2	Design Procedure . . . . .	127
6.2.3	Example of Heat-Pipe Heat Exchanger Design.. . . .	128
6.3	Results of Calculations . . . . .	142
7	Conclusions and Recommendations. . . . .	146
7.1	Conclusions . . . . .	146
7.2	Recommendation. . . . .	147
References	. . . . .	148
Appendices		
Appendix A	Sample of Calculations.. . . .	154
Appendix B	Physical Properties . . . . .	167
Appendix C	Program Listing. . . . .	180
Appendix D	Heat Transfer Correlations.. . . .	198
Appendix E	Calculated Thermal Resistances.. . . .	210
Biography..	. . . . .	230

ศูนย์วิทยพัชกร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## LIST OF FIGURES

Figure		
1.1	Basic operation of the heat pipe... ..	2
1.2	Basic operation of the closed two-phase thermosyphon... ..	2
3.2	Pooling boiling regimes ... ..	28
3.3	Bubble formation on a heated surface... ..	31
3.4	Variation of temperature with distance from a surface under nucleate boiling considerations.. ..	32
4.1	Configuration of copper grooved tube... ..	44
4.2	Schematic diagram of the experimental set up... ..	45
4.3	The tested heat pipe... ..	47
4.4	Photograph of the experimental set up.. ..	47
4.5	Photograph of temperature indicators and selector switchboxes... ..	48
4.6	Photograph of the heat pipes... ..	48
5.1	The effect of the heat rate versus temperature difference between the evaporator and condenser surface at various fill ratios. ....	54
5.2	Ratio of effective thermal conductivity versus Reynolds number of hot water at various fill ratios. ....	55
5.3	Ratio of effective thermal conductivity versus Reynolds number of cold water at various fill ratios. ....	56

## Figure

5.4	Ratio of effective thermal conductivity versus Reynolds number of hot water at various fill ratios. . . . .	57
5.5	Heat rate versus temperature difference between the evaporator and condenser surface at various tilt angle. . . . .	59
5.6	Ratio of effective thermal conductivity versus Reynolds number of hot water at various tilt angles. . . . .	60
5.7	Ratio of effective thermal conductivity versus tilt angle at various hot Reynolds numbers. . . . .	61
5.8	Ratio of effective thermal conductivity versus Reynolds number of cold water at various tilt angles. . . . .	63
5.9	Ratio of effective thermal conductivity versus tilt angle at various cold Reynolds numbers . . . . .	64
5.10	Ratio of effective thermal conductivity versus Reynolds number of hot water at various cold Reynolds numbers... . . . .	66
5.11	Ratio of effective thermal conductivity versus Reynolds number of cold water at various hot Reynolds numbers... . . . .	67
5.12	Ratio of heat pipe resistance and outside film resistance versus Reynolds number of hot water at various cold Reynolds numbers... . . . .	68



## Figure

5.13	Ratio of heat pipe resistance and outside film resistance versus Reynolds number of cold water at various hot Reynolds numbers ... ..	69
5.14	Total thermal resistance and heat pipe resistance versus Reynolds number of hot water ... ..	70
5.15	Total thermal resistance and heat pipe resistance versus Reynolds number of hot water ... ..	71
5.16	Total thermal resistance and heat pipe resistance versus Reynolds number of hot water ... ..	72
5.17	Total thermal resistance and heat pipe resistance versus Reynolds number of hot water ... ..	73
5.18	Total thermal resistance and heat pipe resistance versus Reynolds number of hot water ... ..	74
5.19	Ratio of effective thermal conductivity versus Reynolds number of hot water... ..	75
5.20	Ratio of effective thermal conductivity versus Reynolds number of cold water... ..	76
5.21	Heat transfer rate versus temperature difference between hot and cold surfaces for the case of Freon-113.. ... ..	78
5.22	Ratio of effective thermal conductivity versus Reynolds number of hot water at various temperature differences between hot and cold sections.. ... ..	79
5.23	Ratio of effective thermal conductivity versus Reynolds number of cold water at various temperature differences between hot and cold sections... ..	80

## Figure

5.24	Heat transfer rate versus temperature difference between hot and cold surfaces in the case of Freon-22 ... ..	81
5.25	Ratio of effective thermal conductivity versus Reynolds number of hot water at various temperature differences between hot and cold sections... ..	82
5.26	Ratio of effective thermal conductivity versus Reynolds number of cold water at various temperature differences between hot and cold sections... ..	83
5.27	Temperature distribution along the heat pipe surface at various hot Reynolds numbers for the case of Freon-113... ..	85
5.28	Temperature distribution along the heat pipe surface at various hot Reynolds numbers for the case of Freon-113... ..	86
5.29	Temperature distribution along the heat pipe surface at various hot Reynolds numbers for the case of Freon-113... ..	87
5.30	Temperature distribution along the heat pipe surface at various hot Reynolds numbers for the case of Freon-113... ..	88
5.31	Temperature distribution along the heat pipe surface at various hot Reynolds numbers for the case of Freon-113... ..	89

## Figure

5.32	Temperature distribution along the heat pipe surface at various hot Reynolds numbers for the case of Freon-113... ..	90
5.33	Temperature distribution along the heat pipe surface at various hot Reynolds numbers for the case of Freon-22 ... ..	91
5.34	Temperature distribution along the heat pipe surface at various hot Reynolds numbers for the case of Freon-22 ... ..	92
5.35	Temperature distribution along the heat pipe surface at various hot Reynolds numbers for the case of Freon-22 ... ..	93
5.36	Heat transfer correlation of evaporator section for the case of Freon-113... ..	98
5.37	Heat transfer correlation of evaporator section for the case of Freon-22 ... ..	99
5.38	Heat transfer correlation of condenser section for the case of Freon-113... ..	100
5.39	Heat transfer correlation of condenser section for the case of Freon-22 ... ..	102
5.40	Heat transfer correlation of outside film at the evaporator section.. ..	103
5.41	Heat transfer correlation of outside film at the condenser section... ..	104



## Figure

- 5.42 Comparison of the calculated total thermal resistance with the experimental value for the case of Freon-113 ... ..106
- 5.43 Comparison of the calculated internal thermal resistance with the experimental value for the case of Freon-113 ... ..107
- 5.44 Comparison of the calculated outside film resistance at the evaporator section with the experimental value for the case of Freon-113. ... ..108
- 5.45 Comparison of the calculated outside film resistance at the condenser section with the experimental value for the case of Freon-113... ..109
- 5.46 Comparison of the calculated bulk temperature of hot water with the experimental value for the case of Freon-113 ... ..110
- 5.47 Comparison of the calculated bulk temperature of cold water with the experimental value for the case of Freon-113 ... ..111
- 5.48 Comparison of the calculated total thermal resistance with the experimental value for the case of Freon-22. ... ..112
- 5.49 Comparison of the calculated internal thermal resistance with the experimental value for the case of Freon-22. ... ..113

## Figure

5.50	Comparison of the calculated outside film resistance at the evaporator section with the experimental value for the case of Freon-22 ... ..	114
5.51	Comparison of the calculated outside film resistance at the condenser section with the experimental value for the case of Freon-22 ... ..	115
5.52	Comparison of the calculated bulk temperature of hot water with the experimental value for the case of Freon-22 ... ..	116
5.53	Comparison of the calculated bulk temperature of cold water with the experimental value for the case of Freon-22. ... ..	117
6.2	Schematic diagram of heat pipe heat exchanger with 'N' rows of pipes.. ... ..	126
6.3	Pipe alignment.. ... ..	135
6.4	Heat transfer and friction factor for flow across plate-finned circular tube matrix... ..	137
6.5	Dimensions of designed heat exchanger... ..	143
6.6	Flow chart of program for calculating heat resistances and the required number of heat pipes... ..	145



## LIST OF TABLES

### Table

1.1	Methods of condensate return... ..	3
3.1	Superheat $\Delta T$ calculated for some liquids, at their boiling points at atmospheric pressure, using Hsu,s formular... ..	33
3.2	Correlation of Equation (3.23) with $r = 0.33$ ... ..	36
5.1	The experimental conditions investigated... ..	52
5.2	Comparison of the present results with published results ... ..	94
B-1	Properties of Freon-113 ... ..	167
B-2	Properties of Freon-22... ..	168
B-3	Properties of saturated vapor, Freon-113... ..	169
B-4	Properties of saturated vapor, Freon-22 ... ..	171
B-5	Density of water... ..	172
B-6	Specific heat of water. ... ..	173
B-7	Thermal Conductivity of water... ..	174
B-8	Viscosity of water. ... ..	175
B-9	Properties of air... ..	176
B-10	Physical properties of metals.. ..	179



## NOMENCLATURE

A	area ( $m^2$ )
$A_v$	vapor core cross-section area ( $m^2$ )
C	capacity rate
$C_p$	specific heat ( $kJ/kg \cdot ^\circ C$ )
$C_{sf}$	constant in pool boiling correlation
D	diameter (m)
d	dimensionless number defined in equation (3.41)
E	effectiveness
F	volumetric flow rate ( $m^3/s$ )
$F_v$	frictional coefficient for vapor flow
$f_h$	coefficient defined in equation (3.25)
$f_l$	coefficient defined in equation (3.34)
$f_s$	foamability
$f_v$	drag coefficient
G	mass flow velocity ( $kg/m^2 \cdot s$ )
Gr	Grashof number
Gz	Graetz number
g	gravitational acceleration ( $m/s^2$ )
$g_c$	conversion factor
h	heat transfer coefficient ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )
$h_p$	boiling heat transfer coefficient ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )
J	mechanical equivalent of heat, equation (3.18)
k	thermal conductivity ( $W/m \cdot ^\circ C$ )
$k_{eff}$	effective thermal conductivity ( $W/m \cdot ^\circ C$ )
L	length (m)

M	capacity rate ratio, $C_{\min}/C_{\max}$
m	mass flow rate, (kg/sec)
N	number of heat pipe rows
NTU	number of transfer unit
Nu	Nusselt number
n	number of heat pipes
P	pressure
$P_a$	atmospheric pressure
$P_r$	reduced pressure, $P/P_{cr}$
Q	heat rate (W)
q	heat flux ( $W/m^2$ )
R	thermal resistance
Re	Reynolds number
r	radius (m)
$r_{h,v}$	hydraulic radius for vapor flow
St	Stanton number = $\frac{h}{GC_p}$
T	temperature ( $^{\circ}C$ )
t	fin thickness (m)
U	overall heat transfer coefficient ( $W/m^2 \cdot ^{\circ}C$ )
V	volume ( $m^3$ )
x	linear distance (m)
$\Delta T_m$	log-mean temperature difference
$\rho$	density ( $kg/m^3$ )
$\mu$	viscosity (kg/m.s)
$\sigma$	surface tension (N/m)
$\delta$	thermal layer thickness

$\nu$	kinematic viscosity ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
$\lambda$	latent heat (kJ/kg)
$\gamma$	exponent in pool boiling equation

## Subscript

a	adiabatic section
av	average
b	bulk
c	condenser section
f	film
h	evaporator section
i	inside
l	liquid
max	maximum
min	minimum
o	outside
p	single heat pipe
r	reduced
s	saturation
t	total
v	vapor
w	wall

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย