

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ



E41003

PERFORMANCE ANALYSIS OF AN ABSORPTION HEAT TRANSFORMER
WITH ASSISTED VAPOR COMPRESSION HEAT PUMP

NATTAPORN CHAIYAT

DOCTOR OF PHILOSOPHY
IN ENERGY ENGINEERING

THE GRADUATE SCHOOL
CHIANG MAI UNIVERSITY

SEPTEMBER 2011

600255367

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ



E41003

**PERFORMANCE ANALYSIS OF AN ABSORPTION HEAT TRANSFORMER
WITH ASSISTED VAPOR COMPRESSION HEAT PUMP**

NATTAPORN CHAIYAT



**A THESIS SUBMITTED TO THE GRADUATE SCHOOL IN
PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF PHILOSOPHY
IN ENERGY ENGINEERING**

**THE GRADUATE SCHOOL
CHIANG MAI UNIVERSITY
SEPTEMBER 2011**

**PERFORMANCE ANALYSIS OF AN ABSORPTION HEAT TRANSFORMER
WITH ASSISTED VAPOR COMPRESSION HEAT PUMP**

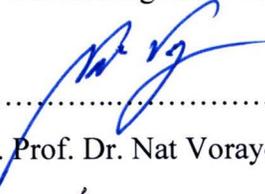
NATTAPORN CHAIYAT

THE THESIS HAS BEEN APPROVED
TO BE A PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY
IN ENERGY ENGINEERING

EXAMINING COMMITTEE


.....CHIRPERSON
Asst. Prof. Dr. Aree Acharyaviriya


.....MEMBER
Prof. Dr. Tanongkiat Kiatsirirot

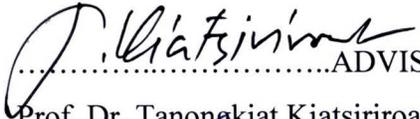

.....MEMBER
Asst. Prof. Dr. Nat Vorayos

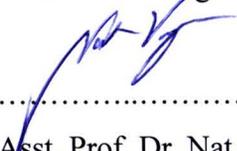

.....MEMBER
Asst. Prof. Dr. Chatchawan Chaichana


.....MEMBER
Asst. Prof. Dr. Det Damrongsak


.....MEMBER
Dr. Atipoang Nuntaphun

THESIS ADVISORY COMMITTEE


.....ADVISOR
Prof. Dr. Tanongkiat Kiatsirirot


.....CO-ADVISOR
Asst. Prof. Dr. Nat Vorayos


.....CO-ADVISOR
Asst. Prof. Dr. Chatchawan Chaichana

8 SEPTEMBER 2011

© Copyright by Chiang Mai University

ACKNOWLEDGMENTS

There are numerous organizations and individuals to whom I owe a great deal of gratitude for their helps and assistances throughout the work of my research study and in the process of this thesis.

Firstly and foremost, I would like to thank my principle advisor, Prof. Dr. Tanongkiat Kiatsiriroat for the technique and principle teaching in research technique. Also, direct me the theory in depth and the understanding on my successful research work.

I would like to thank Asst. Prof. Dr. Aree Achariyaviriya, Asst. Prof. Dr. Nat Vorayos, Asst. Prof. Dr. Chatchawan Chaichana, Asst. Prof. Dr. Det Damrongsak and Dr. Atipong Nuntaphan for their valuable suggestions and kindly served as the thesis examining committee members.

Thanks to the Graduate School and the Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University for supporting testing facilities. Highly acknowledge to the Office of the Higher Education Commission, Ministry of Education, Thailand under the Project “Development and Upgrading of Renewable Energy and Its Applications”, Energy Policy and Planning Office, Ministry of Energy and Daikin Industries (Thailand) Ltd for the budget support.

Finally, I would like to thank my beloved parents and my family for their support in every thing for me.

Thesis Title Performance Analysis of an Absorption Heat Transformer with Assisted Vapor Compression Heat Pump

Author Mr. Nattaporn Chaiyat

Degree Doctor of Philosophy (Energy Engineering)

Thesis Advisory Committee

Prof. Dr. Tanongkat Kiatsiroat	Advisor
Asst. Prof. Dr. Nat Vorayos	Co-advisor
Asst. Prof. Dr. Chatchawan Chaichana	Co-advisor

ABSTRACT

E 41003

In this study, a concept to improve thermal performance of an absorption heat transformer (AHT) by combining with a vapor compression heat pump (VCHP) to recover heat at the AHT condenser and supply back to the AHT evaporator is presented. The whole unit is called compression/absorption heat transformer (CAHT). Energy analysis and exergy costing of a 10 kW_{th} CAHT were carried out when the system was supplied heat by a set of flat-plate solar collectors each in parallel connection and the number of solar collectors and the auxiliary electrical power for supplying heat were considered. A solar-CAHT prototype was constructed and tested. The experimental results were used to verify the simulation results. After that, a set of simplified models were developed from the experimental data to predict the thermal performance of the VCHP and the CAHT. A set of performance curves that could be used to estimate heating capacity of the CAHT and the upgraded temperature of the working fluid at the CAHT were also described.

For the simulated results, the suitable working fluid of the single-stage vapor compression heat pump system was R-123 and the CAHT could generate hot water at

a temperature of around 70-80 °C. For two-stage cascade vapor compression heat pump with R-134A and R-123 as refrigerants, the hot water temperature could be up to 80-90 °C. The latter is more appropriate to combine with the AHT due to its higher COP, especially at a higher temperature. Moreover, the overall COP of the CAHT cycle was around 0.8 compared with that of the normal AHT which was less than 0.5.

For the 10 kW_{th} solar-CAHT with the absorber temperature over 80 °C, it could be found that the number of the solar collectors units could be decreased about 50 % which was 18 units instead of 35 units of the normal solar-AHT. Under the climate of Chiang Mai, the annual exergy costing of the solar-CAHT unit was also cheaper than that of the solar-AHT unit at around 50,000 Baht/kW·y.

Compare with the experimental results of the tested unit, the developed models could be used to predict the system performances and the simulated results agreed well with those from the experiments.

A set of simplified models for the CAHT were developed. The calculated results could perform a set of performance curves that could be used to predict the heating capacity of the CAHT and the upgraded temperature of the working fluid at the CAHT absorber.

ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของตัวแปลงความร้อนแบบดูดกลืนร่วมกับระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอ	
ผู้เขียน	นาย นัฐพร ไชยญาติ	
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมพลังงาน)	
คณะกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ศ. ดร. ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์	อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
	ผศ. ดร. ธีร วรรษศ	อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
	ผศ. ดร. ชัชวาลย์ ชัยชนะ	อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

บทคัดย่อ

E 41003

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อนของตัวแปลงความร้อนแบบดูดกลืน (Absorption heat transformer, AHT) โดยการนำความร้อนทิ้งที่คอนเดนเซอร์ของตัวแปลงความร้อนแบบดูดกลืนมาเพิ่มคุณภาพโดยระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอ (Vapor compression heat pump, VCHP) และป้อนกลับไปยังอีแวปเปอเรเตอร์ของตัวแปลงความร้อนแบบดูดกลืน โดยระบบร่วมดังกล่าวเรียกว่า ตัวแปลงความร้อนร่วมแบบอัดไอและดูดกลืน (Compression/absorption heat transformer, CAHT) โดยการศึกษาตัวแปลงความร้อนร่วมขนาด 10 กิโลวัตต์ ทำการวิเคราะห์การถ่ายเทด้านพลังงาน และการถ่ายเทงานที่ใช้ประโยชน์สูงสุดร่วมกับความคุ้มค่าด้านเศรษฐศาสตร์ (Exergy costing) โดยมีตัวเก็บรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบที่ต่อขนานกันให้ความร้อนแก่ระบบ ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาตัวแปลงความร้อนร่วมแบบอัดไอและดูดกลืนดังกล่าว เพื่อใช้ในการทดลองแล้วนำผลที่ได้มาจากการทดสอบมาสร้างแบบจำลองอย่างง่ายของสมการสมรรถนะของระบบ เพื่อทำนายสมรรถนะทางความร้อนของตัวแปลงความร้อนแบบดูดกลืนและปั๊มความร้อนแบบอัดไอ โดยชุดสมการสมรรถนะดังกล่าวถูกนำมาใช้ในการหาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของตัวแปลงความร้อนร่วมแบบอัดไอและดูดกลืน รวมถึงอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของของไหลที่นำมาเพิ่มคุณภาพทางความร้อนอีกด้วย

E 41003

จากผลการศึกษาโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่า สารทำงานที่เหมาะสมสำหรับระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอแบบขั้นเดียว (Single-stage VCHP) คือ R-123 ที่สามารถผลิตน้ำร้อนอุณหภูมิสูงสุดได้ประมาณ 70-80 องศาเซลเซียส และสำหรับระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอแบบสองขั้น (Two-stage VCHP) พบว่า R-134A/R-123 เหมาะสมต่อการใช้เป็นสารทำงานในระบบเพื่อผลิตน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 80-90 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังพบอีกว่าระบบแบบสองขั้นเหมาะสมต่อการทำงานร่วมกับตัวแปลงความร้อนแบบคูคกลิน เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Coefficient of performance, COP) สูงกว่าระบบแบบขั้นเดียวสำหรับการผลิตน้ำร้อนอุณหภูมิสูง โดยระบบร่วมสามารถเพิ่ม COP ได้ประมาณ 0.8 จากระบบเดิมก่อนการปรับปรุงมีค่า COP ไม่เกิน 0.5

สำหรับตัวแปลงความร้อนร่วมแบบอัดไอและคูคกลินขนาดความสามารถทำความร้อน 10 กิโลวัตต์และสามารถเพิ่มอุณหภูมิที่แอบซอร์พเบอร์ได้สูงกว่า 80 องศาเซลเซียส ที่มีแหล่งความร้อนจากตัวเก็บรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ สามารถลดจำนวนแผงของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ได้ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ จากระบบเดิมก่อนการปรับปรุงใช้จำนวน 35 แผงและระบบหลังการปรับปรุงที่จำนวน 18 แผงภายใต้สภาวะอากาศของจังหวัดเชียงใหม่ นอกจากนี้การถ่ายเทงานที่ใช้ประโยชน์สูงสุดร่วมกับความคุ้มค่าด้านเศรษฐศาสตร์ ของระบบหลังการปรับปรุงมีค่าน้อยกว่าระบบก่อนการปรับปรุงประมาณ 50,000 บาทต่อกิโลวัตต์ต่อปีอีกด้วย

การเปรียบเทียบผลการทำนายพฤติกรรมการทำงานของตัวแปลงความร้อนร่วมแบบอัดไอและคูคกลินโดยใช้สมการสมรรถนะของระบบ พบว่า สามารถทำนายผลได้ใกล้เคียงเทียบเท่ากับผลจากการทดสอบ

ชุดสมการสมรรถนะของตัวแปลงความร้อนร่วมแบบอัดไอและคูคกลินได้นำมาพัฒนาต่อยอดเพื่อใช้ในการอธิบายพฤติกรรมของระบบ เช่น อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ปล่อยออกจากระบบที่สามารถผลิตได้ รวมถึงอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของของไหลที่นำมาเพิ่มคุณภาพที่แอบซอร์พเบอร์

TABLE OF CONTENTS

ACKNOWLEDGMENTS	ii
ABSTRACT	iii
บทคัดย่อ	v
TABLE OF CONTENTS	vii
LIST OF TABLES	x
LIST OF FIGURES	xi
ABBREVIATIONS AND SYMBOLS	xv
CHAPTER 1 Introduction	1
1.1 Background	1
1.2 Objectives	4
1.3 Scope of the Thesis	4
1.4 Expected Benefits	5
1.5 Outline of the Thesis	5
1.6 Keyword	6
CHAPTER 2 Improvement of an Absorption Heat Transformer Performance by Coupling a Vapor Compression Heat Pump	7
2.1 Introduction	7
2.2 System Descriptions and Equations	10
2.3 Working Fluid Selection of the VCHP	15
2.4 Working Conditions for the CAHT Analysis	19
2.5 Results and Discussions	22
2.5.1 Effect of the AHT condenser temperature on the CAHT performance	22
2.5.2 Effect of the AHT evaporator temperature on the CAHT performance	22
2.6 Conclusions	25
CHAPTER 3 Energy Analysis of a Solar-Absorption Heat Transformer Combining with a Vapor Compression Heat Pump	26
3.1 Introduction	26
3.2 System Description	27
3.3 System Simulation	29

3.3.1 Solar Water Heating System	29
3.3.2 Absorption Heat Transformer	34
3.3.3 Vapor Compression Heat Pump Cycle	35
3.4 Operating Conditions and Assumptions	41
3.5 Results and Discussions	42
3.5.1 Thermal performance of the AHT	42
3.5.2 Comparison of the Thermal Performance of the Solar-AHT and the Solar-CAHT with Single-Stage VCHP	43
3.5.3 Comparison of the Thermal Performance of the Solar-AHT and the Solar-CAHT with Two-Stage VCHP	46
3.5.4 Consumption of Total Electrical Power	47
3.6 Conclusions	48
CHAPTER 4 Model Verification and Simplified Model of the 10 kW_{th} Solar-Absorption Heat Transformer Combining with a Vapor Compression Heat Pump	49
4.1 Introduction	49
4.2 System Descriptions and Thermodynamic Performance	50
4.3 Verification of the Simulation Results with the Experimental Data	50
4.4 Simplified Models	53
4.5 Results and Discussion	61
4.6 Conclusions	63
CHAPTER 5 Exergy Costing of an Absorption Heat Transformer Coupling with a Vapor Compression Heat Pump	64
5.1 Introduction	64
5.2 Exergy Costing	65
5.3 Operating Conditions and Assumptions	68
5.4 Results and Discussions	68
5.4.1 Annual Cost	68
5.4.2 Exergy Costing	69
5.5 Conclusions	71
CHAPTER 6 Projection on Conceptual Design of an Absorption Heat Transformer Coupling with a Vapor Compression Heat Pump	72

6.1 Introduction	72
6.2 Projection of the CAHT System by Using Performance Curve of the 10 kWth CAHT	72
6.3 Results	74
6.4 Conclusions	81
CHAPTER 7 Conclusion	84
REFERENCES	86
APPENDICES	89
APPENDIX A Temperature Profiles of Main Components in the AHT Cycle	90
APPENDIX B Temperature Profiles of Main Components in the VCHP Cycle	93
APPENDIX C Properties of Lithium Bromide-Water Solutions	95
APPENDIX D Data of the Solar Radiation and the Ambient Temperature of Chiang Mai, Thailand	101
APPENDIX E Experimental Procedures and Results	103
Experimental Procedures and the Data Records of solar-AHT	104
Experimental Procedures and the Data Records of solar-CAHT	117
APPENDIX F The Calculation Results of the Data Records	134
The calculation results of the solar-AHT	135
The calculation results of the solar-CAHT	149
APPENDIX G The Calculation of the Exergy Costing	170
The calculation results of the solar-AHT on April day	171
The calculation results of the solar-CAHT on April day	173
APPENDIX H Publications	175
CURRICULUM VITAE	185

LISTS OF THE TABLES

Table	Page
2.1 Physical properties of working fluids.	16
3.1 Julian date of each month (Duffie and Beckman, 1980).	30
3.2 The constant of a1, a2, b1 and b2 for some main provinces in Thailand (Wongratanaphisan et al., 2003).	30
4.1 Descriptions of each component of the single-stage VCHP.	53
4.2 Descriptions of each component of the two-stage VCHP.	54
4.3 Descriptions of each component in the constructed solar-CAHT.	56
5.1 Descriptions of the Solar-AHT and the Solar-CAHT components and costs.	69
6.1 The prediction of the electrical power consumption of the AHT system.	75
6.2 The prediction of the electrical power consumption of the VCHP system.	76
6.3 The prediction of heating capacity at the AHT absorber.	78
6.4 The prediction of the upgraded temperature leaving the CAHT system at $m_{A,i} = 11/s$.	79

LISTS OF THE FIGURES

Figure	Page
1.1 A concept of heat pump system.	1
1.2 A schematic diagram of heat pump system.	2
1.3 Heat driven of the absorption heat transformer (Keith et al., 1996).	3
2.1 A concept of a vapor compression heat pump (VCHP) for upgrading low temperature heat.	8
2.2 A schematic diagram of an absorption heat transformer (AHT).	9
2.3 Diagram of the compression/absorption heat transformer (CAHT) cycle.	14
2.4 Flow chart of the simulation program for evaluating the selection working fluid of the VCHP system.	17
2.5 Comparison results of calculation the selection working fluid of the vapor compression heat pump (VCHP) cycle.	18
2.6 Flow chart of the simulation program for evaluating the CAHT performance.	21
2.7 Effect of the supplied hot water temperature on the absorber temperature for the normal AHT and the CAHT.	23
2.8 Effect of the supplied hot water temperature and T_C on the overall COPs of the normal AHT and the CAHT.	23
2.9 Effect of the supplied hot water temperature and T_E on T_A of the CAHT.	24
2.10 Effect of the supplied hot water temperature and T_E on the overall COPs of the normal AHT and the CAHT.	24
3.1 Schematic diagram of a solar-absorption heat transformer.	28
3.2 Schematic diagram of a solar-AHT coupling with a single-stage VCHP.	28
3.3 Calculation steps for evaluating performance of the solar water heating system.	33
3.4 Schematic diagram of a solar-AHT coupling with a single-stage VCHP	37
3.5 Flow chart of the simulation program for evaluating the CAHT performance when a single-stage VCHP is coupled with.	39

3.6 Flow chart of the simulation program for evaluating the CAHT combining with the two-stage VCHP performance.	40
3.7 Temperatures, LiBr concentrations and COP of the AHT components at various supplied hot water temperatures.	43
3.8 Temperatures of the solar-AHT components for 35 units (area 2 m ² /unit) of flat-plate solar collectors during time of the average day of April.	44
3.9 Heat rates at the solar-AHT components for 35 units (area 2 m ² /unit) of flat-plate solar collectors during time of the average day of April.	44
3.10 Temperatures of the solar-CAHT components for 18 units (area 2 m ² /unit) of flat-plate solar collectors during time of the average day of April.	45
3.11 Heat rates of the solar-CAHT components for 18 units (area 2 m ² /unit) of flat-plate solar collectors during time of the average day of April.	45
3.12 Comparison of the overall COP of the solar-AHT and the solar-CAHT on I _T during time of the average day of April.	46
3.13 Comparison of the thermal performance of the R-123 VCHP and R-134A/R-123 VCHP at TE 40 °C and TC 90 °C.	46
3.14 Comparison of the overall COP of the solar-AHT and the solar-CAHT of single-stage VCHP and two-stage VCHP on I _T during time of the average day of April.	47
3.15 Comparison of total electrical power of solar-AHT and solar-CAHT at various number of flat-plate solar collectors at 9.00-15.00 of day for generating heat at absorber 10 kW _{th} .	48
4.1 Schematic diagram of a solar absorption heat transformer.	49
4.2 Comparisons of the working fluid temperature of each component between the solar-AHT and the solar-CAHT for the testing results on 15/10/2010 at time 13:30-15:30.	51
4.3 Comparisons of the H ₂ O-LiBr concentration and absorption performance between the solar-AHT and the solar-CAHT for the testing results on 15/10/2010 at time 13:30-15:30.	52

4.4 Performance curves of the R-123 single-stage VCHP at hot water temperature leaving the VCHP around 80 °C from the experimental results.	54
4.5 Performance curves of the R-134a/R-123 two-stage VCHP at hot water temperature leaving the VCHP around 80 °C from the experimental results.	55
4.6 Schematic diagram of a solar absorption heat transformer coupling with a cascade VCHP.	56
4.7 A Prototype of the AHT system, the R-134A/R-123 VCHP and the R-123 VCHP.	57
4.8 Effect of $(T_{A,i} - T_E)/(T_{G,i} - T_C)$ on COP_{AHT} of the AHT at hot water temperature leaving the AHT around 100 °C from the experimental results.	58
4.9 Effect of $(T_{A,i} - T_E)/(T_{G,i} - T_C)$ on COP_{CAHT} of the CAHT at hot water temperature leaving the AHT around 100 °C from the experimental results.	59
4.10 Flow chart for simulation of the vapor compression heat pump upgrading hot water temperature around 70-90 °C.	60
4.11 Flow chart for simulation of the absorption heat transformer upgrading hot water temperature around 90-110 °C.	61
4.12 Comparison results of the measured data and the simulation results of hot water temperature from the two-stage VCHP (hot water is used).	62
4.13 Comparison results of the measured data and the simulation results of hot water temperature from the solar-CAHT (hot water is not used of tank 200 liter).	62
4.14 Comparison results of the measured data and the simulation results comparison of hot water temperature from the CAHT at flow rate 0.024 l/s (hot water is used at tank 200 liter).	63
5.1 Flow chart of the simulation program for evaluating exergy costings of the solar-AHT and the solar-CAHT.	67

5.2 Comparison of the overall ECOP of the solar-AHT and the solar-CAHT on I_T during time of the average day of April at hot water temperature leaving the absorber around 90°C .	70
5.3 Comparison of the overall ECOP of the solar-AHT and the solar-CAHT on I_T during time of the average day of September at hot water temperature leaving the absorber around 90°C .	70
5.4 Comparison of the exergy costing of the solar-AHT and the solar-CAHT on I_T during time of each month at hot water temperature leaving the absorber around 90°C .	71
6.1 The schematic diagram of the compression/absorption heat transformer (CAHT) system.	73
6.2 The steps for calculating the projection of the CAHT system by using performance curve of the 10 kW_{th} CAHT at upgrading hot water temperature around $90\text{-}110^\circ\text{C}$.	74
6.3 The prediction of effect of the $T_{G,i}$, T_C and T_E on the EER_{AHT} .	77
6.4 The prediction of the EER_{AHT} and W_{AHT} .	77
6.5 The prediction of the energy efficiency of the AHT system in term of W_{AHT} and Q_A at $m_{A,i} = 11/\text{s}$.	80
6.6 The prediction of the upgraded temperature leaving the CAHT ($T_{A,o}$) on Q_A at $m_{A,i} = 11/\text{s}$.	80
6.7 The prediction of the thermal performance of the CAHT system.	82
6.8 Comparison of thermal performance between the experimental data and the results form the CAHT chart performance.	83
7.1 Combining of the main components in the AHT system and the VCHP system.	85

ABBREVIATIONS AND SYMBOLS

Nomenclature

A	Area, (m ²)
AC	Annual cost, (Baht)
AFC	Annual fuel cost of the system, (Baht)
AMC	Annual maintenance cost of the system, (Baht)
C _s	Initial cost of the system, (Baht)
C _p	Heat capacity, (kJ/kg·K)
COP	Coefficient of performance
CRF	Capital recovery factor
DT	Different temperature, (°C)
DV	Displacement volume, (m ³ /h)
EC	Exergy costing, (Baht/kW·y)
GTL	Gross temperature lift, (°C)
LMTD	Log mean temperature difference
i	Annual discount rate on loans
I _T	Solar radiation, (W/m ²)
m	Mass flow rate, (kg/s)
MPH	Mass of refrigerant per unit heat output, (g/kJ)
N	Operation life of the system in consideration, (y)
P	Pressure, (bar)
PR	Pressure ratio
Q	Heat rate, (kW)
R	Refrigerant
s	Entropy, (kJ/kg·K)
SC	Subcooling, (°C)
SH	Superheating, (°C)
SFF	Sinking fund factor
SV	Salvage value at the end of the assumed operation life of the system, (Baht)

t	Time, (s)
T	Temperature, ($^{\circ}\text{C}$)
U	Overall heat transfer coefficient, ($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$)
v	Specific volume, (m^3/kg)
W	Work, (kW)
X	Concentrate, (%LiBr)

Greek symbol

η	Efficiency, (%)
ε	Effectiveness, (%)
ρ	Density, (kg/m^3)

Subscript

A	Absorber
Aux	Auxiliary heat
act	Actual
amb	Ambient
bulk	Bulk temperature
C	Condenser
Coll	Solar collector
Comp	Compressor
CW	Cooling water
e	Super heat
E	Evaporator
EC	Economizer
H	High
HS	Heat source
HW	Hot water
HX	Heat exchanger
i	Inlet
L	Low
max	Maximum
min	Minimum

o	Outlet
P	Pump
r	Compression cycle
ref	Refrigerant
S	Start
SC	Solar collector
SP	Solution pump
ST	Storage tank
Sup	Supply
U	Stop using time
UF	Useful
UG	Upgraded