

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ



E42193

PERFORMANCE ANALYSIS OF ADSORPTION AIR-CONDITIONING
SYSTEM USING ACTIVATED CARBON AND METHANOL AS
WORKING PAIR

WIROTE RITTHONG

DORTOR OF PHILOSOPHY
IN MECHANICAL ENGINEERING

THE GRADUATE SCHOOL
CHIANG MAI UNIVERSITY
SEPTEMBER 2011



E42193

**PERFORMANCE ANALYSIS OF ADSORPTION AIR-CONDITIONING
SYSTEM USING ACTIVATED CARBON AND METHANOL AS
WORKING PAIR**



WIROTE RITTHONG

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

**THE GRADUATE SCHOOL
CHIANG MAI UNIVERSITY**

SEPTEMBER 2011


PERFORMANCE ANALYSIS OF ADSORPTION AIR-CONDITIONING SYSTEM
USING ACTIVATED CARBON AND METHANOL AS WORKING PAIR

WIROTE RITTHONG

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

EXAMINING COMMITTEE


.....CHAIRPERSON
Dr. Atipoang Nuntaphan

.....MEMBER
Asst. Dr. Wipawadee Wongsuwan

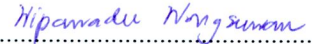
.....MEMBER
Prof. Dr. Tanongkiat Kiatsirirot

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


.....MEMBER
Asst. Prof. Dr. Sate Sampattagul


.....MEMBER
Dr. Natanee Vorayos

THESIS ADVISORY COMMITTEE

.....ADVISOR
Asst. Prof. Dr. Wipawadee Wongsuwan

.....CO-ADVISOR
Prof. Dr. Tanongkiat Kiatsirirot

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

.....CO-ADVISOR
Dr. Natanee Vorayos

13 September 2011

ACKNOWLEDGEMENTS

I wish to express my gratitude and appreciation to my adviser, Assistant Professor Dr. Wipawadee Wongsuwan for her valuable guidance and kind suggestions throughout the research work. A sincere thanks is extended to Professor Dr. Tanongkiat Kiatsiriroat, for his co-advisor, his help and giving useful comments through the entire period of this thesis.

I would like to gratefully acknowledge the members of the Ph.D. Program Committee, Professor Dr. Tanongkiat Kiatsiriroat, Assistant Professor Dr. Chatchawan Chaichana, Assistant Professor Dr. Sate Sampattagul, Dr. Atipoang Nuntaphan and Dr. Natanee Vorayos for their valuable comments.

Heartfelt thanks are also extended to the Rajamangala University of Technology Phra Nakhon (RMUTP) for giving the great opportunity to join the Ph.D. course.

I am grateful thank to Department of Mechanical Engineering, Chiang Mai University for all the facilities, accommodations and the help of all students in the Thermal System Research Unit, CMU, there are also appreciated.

Finally, I wishes to thank, my parent, my family and my friends for all their guidance and encouragement, which made this work possible and worthwhile.

Wirote Ritthong

Thesis Title Performance Analysis of Adsorption Air-Conditioning System
Using Activated Carbon and Methanol as Working Pair

Author Mr. Wirote Ritthong

Degree Doctor of Philosophy (Mechanical Engineering)

Thesis Advisory Committee

Asst. Prof. Dr. Wipavadee Wongsuwan	Advisor
Prof. Dr. Tanongkiat Kiatsiriroat	Co-advisor
Asst. Prof. Dr. Chatchawan Chaichana	Co-advisor
Dr. Natanee Vorayos	Co-advisor

ABSTRACT

E 42193

An adsorption cooling system is expected to compete with the vapor compression system in the near future. The system has been improved by many researchers and developers to increase the performance, to meet environmental issues and to reduce manufacturing cost.

In this dissertation, an adsorption cooling system was investigated for its usefulness for air-conditioning purposes. The vertical system was designed to operate in a pseudo-continuous process and was tested in two cases; (1) applying a sonic wave generator to the evaporator by using thermosyphon heat pipe to enhance the heat rejection process at the adsorber, and (2) applying sonic wave generators to the adsorber. Then the theoretical study was carried out by simulating the systems performance.

The experimental results showed that the sonic wave, ranged between 8-14 kHz, which could reduce evaporation time at the evaporator. The heat reject process at the adsorber was also enhanced by both the cooling water and the thermosyphon heat pipe. The maximum performance indicators; The coefficient of performance (COP),

the specific cooling power (SCP) and the volumetric cold production (VCP), were 0.718, 248.90 W/kg and 12.22 cm³/W, respectively.

From the second case, the sonic wave (8 – 14 kHz) helped to reduce the regeneration period of the adsorber. Therefore, the obtained performance values (COP, SCP and VCP) were 0.619, 229.15 W/kg and 17.61 cm³/W, respectively. The simulations were conducted based on the base cases from experiments (maximum COP) to predict the cold production capacity (Q_{evap}) of the adsorption cooling system.

The simulations were conducted based on the base cases from the experiments (maximum COP) to predict the cold production capacity (Q_{evap}) of the adsorption cooling system. The first case was performed with the operating conditions of $T_{\text{ac,ads}} = 90^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{ac,valve}} = 70^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{cw,evap}} = 20^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{cw,cond}} = 20^{\circ}\text{C}$ and a sonic wave frequency of 8 kHz. However, the second case was carried out with operating conditions of $T_{\text{ac,ads}} = 90^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{ac,valve}} = 70^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{cw,evap}} = 20^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{cw,cond}} = 20^{\circ}\text{C}$ and a sonic wave frequency of about 14 kHz. The predictions from both cases showed that the expected cooling capacities of this adsorption cooling system were 61.38 and 81.17 Watt per unit, respectively. The errors of Q_{evap} , in the case of applying a sonic wave at the evaporator and adsorber, were 11.07% and 6.03%, respectively. The simulated results agreed well with the experimental data.

In brief, the adsorption cooling system enhanced by sonic wave generator, at either the evaporator or the adsorber, has the potential to be implemented for air-conditioning purposes in this industry.

Keywords: sonic wave, adsorption cooling, thermosyphon heat pipe, performance evaluation, heat transfer enhancement

ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์

การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบปรับอากาศแบบดูดซับที่ใช้
ถ่านกัมมันต์และเมทานอลเป็นคู่สารทำงาน

ผู้เขียน

นาย วิโรจน์ ฤทธิทอง

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

คณะกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวดี วงษ์สุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
ศาสตราจารย์ ดร. ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัชวาลย์ ชัยชนะ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
อาจารย์ ดร. ณัฐนี วยศ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

บทคัดย่อ

E 42193

ระบบทำความเย็นแบบดูดซับ คาดว่าจะเป็นระบบหนึ่งที่สามารถเป็นคู่แข่งกับระบบทำความเย็นแบบอัดไอได้ในอนาคต ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีการพัฒนาระบบดังกล่าวอย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่มสมรรถนะของระบบและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม รวมถึงการลดต้นทุนด้านการผลิต

ดังนั้นในการศึกษานี้ จะทำการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบปรับอากาศแบบดูดซับที่ทำงานแบบไม่ต่อเนื่องระบบวางในแนวตั้ง โดยจะแบ่งการศึกษาเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ (1) ทำการติดตั้งชุดกลั่นโซนิคไว้ที่เครื่องระเหย เพื่อช่วยลดระยะเวลาในการระเหยตัวของสารทำความเย็นในช่วงกระบวนการดูดซับและติดตั้งท่อเทอร์โมไซฟอนไว้ที่เครื่องดูดซับ เพื่อช่วยดึงความร้อนออกจากถ่านกัมมันต์ในช่วงกระบวนการดูดซับเมทานอล และกรณีที่ (2) ทำการติดตั้งชุดกลั่นโซนิคที่เครื่องดูดซับเพื่อช่วยเพื่อช่วยการถ่ายเทความร้อนออกในช่วงกระบวนการคายสารดูดซับ

ในการทดลองโดยใช้กลั่นโซนิคในช่วง 8–14 kHz สามารถลดเวลาในการระเหยตัวที่เครื่องทำระเหย กระบวนการถ่ายเทความร้อนออกที่เครื่องดูดซับจะดีขึ้นโดยใช้น้ำเย็นกับชุดท่อเทอร์โมไซฟอนร่วมกันและจากการวิเคราะห์สมรรถนะในเทอมของ สัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบ

(COP), กำลังการทำความเย็นจำเพาะ (SCP) และ ปริมาตรในการทำความเย็นจำเพาะ (VCP) โดยได้ค่าสูงสุดที่ใช้คลื่นโซนิก 8 kHz ดังนี้ คือ 0.718, 248.90 W/kg และ $12.22 \text{ cm}^3/\text{W}$ ตามลำดับ

จากกรณี (2) โดยใช้คลื่นโซนิกในช่วง 8–14 kHz. จะช่วยลดช่วงเวลาในกระบวนการให้ความร้อนและคายสารดูดซับ ดังนั้นค่าของสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบ, กำลังการทำความเย็นจำเพาะ และปริมาตรในการทำความเย็นจำเพาะ โดยได้ค่าสูงสุดที่ใช้คลื่นโซนิก 14 kHz คือ 0.619, 229.15 W/kg และ $17.61 \text{ cm}^3/\text{W}$ ตามลำดับ

จากการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อเปรียบเทียบผลกับการทดลอง (ค่า COP สูงสุด) เพื่อหาขนาดการทำความเย็น (Q_{evap}) ของระบบการทำความเย็นแบบดูดซับ ในกรณี (1) มีเงื่อนไขการทำงานเริ่มต้นที่ $T_{\text{ac,ads}} = 90^\circ\text{C}$, $T_{\text{ac,valve}} = 70^\circ\text{C}$, $T_{\text{cw,evap}} = 20^\circ\text{C}$, $T_{\text{cw,cond}} = 20^\circ\text{C}$ และคลื่นโซนิก 8 kHz และกรณี (2) มีเงื่อนไขการทำงานเริ่มต้นที่ $T_{\text{ac,ads}} = 90^\circ\text{C}$, $T_{\text{ac,valve}} = 70^\circ\text{C}$, $T_{\text{cw,evap}} = 20^\circ\text{C}$, $T_{\text{cw,cond}} = 20^\circ\text{C}$ และคลื่นโซนิก 14 kHz ผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของขนาดการทำความเย็นทั้ง 2 กรณี คือ 61.38 และ 81.17 W และมีค่าความผิดพลาดเมื่อเทียบกับผลการทดลองเป็น 11.07% และ 6.03% ตามลำดับ ซึ่งผลจากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถยอมรับได้

สุดท้ายนี้ระบบทำความเย็นแบบดูดซับที่ใช้คลื่นโซนิกที่เครื่องทำระเหย หรือเครื่องดูดซับจะช่วยเพิ่มสมรรถนะในการทำความเย็นจากผลการทดลองได้จริง และเหมาะที่จะนำไปประยุกต์ใช้สำหรับระบบปรับอากาศในโรงงานอุตสาหกรรมต่อไป

คำสำคัญ: การวิเคราะห์สมรรถนะ, คลื่นโซนิก, การทำความเย็นของการดูดซับ, ท่อเทอร์โมไซฟอน, การเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อน

TABLE OF CONTENTS

	Page
Acknowledgement	iii
Abstract (English)	iv
Abstract (Thai)	vi
Table of contents	viii
List of tables	xii
List of figures	xiii
Abbreviations and Symbols	xv
 CHAPTER 1 INTRODUCTION	 1
1.1 Statement and significance of the problem	1
1.2 Literature review	2
1.2.1 Experimental work and prototype demonstration	3
1.2.2 Modeling and simulation works	5
1.2.3 Application of adsorption system	7
1.2.3.1) Air-conditioning	7
1.2.3.2) Adsorption chiller	8
1.3 Objective of the study	11
1.4 Scopes and methodology	12
1.4.1 Research scope	12
1.4.2 Research methodology	13
1.5 Expected benefits	14
 CHAPTER 2 THEORY AND METHODOLOGY	 15
2.1 Theory	15
2.1.1 Introduction	15
2.1.2 Adsorption refrigeration cycle	17
2.1.3 Inception of sonic wave	24
2.1.4 Working pairs	25
2.1.5 Heat source and heat sink	27

2.1.5.1) Waste heat	28
2.1.5.2) Renewable energy sources	28
2.2 Methodology	29
2.2.1 Compilation of all relevant information	29
2.2.2 Design, fabrication, assembly, installation, and preliminary testing, on	29
2.2.2.1) Adsorber	31
2.2.2.2) Evaporator and condenser	31
2.2.2.3) Thermosyphon heat pipe	31
2.2.2.4) Measurements	31
2.2.2.5) Experiment operation	32
CHAPTER 3 PERFORMANCE ANALYSIS OF A MODULAR ADSORPTION COOLING SYSTEM HAVING SONIC VIBRATION AT EVAPORATOR	33
3.1 Introduction	33
3.2 Experimental system design	33
3.2.1 Adsorber	34
3.2.2 Evaporator	35
3.2.3 Condenser	35
3.2.4 Instrumentation	35
3.2.4.1) Temperature	35
3.2.4.2) Pressure	35
3.2.4.3) Flow rate/Volume	36
3.3 Experimental procedure	36
3.3.1 Desorption process	36
3.3.2 Condensation process	36
3.3.3 Evaporation process	36
3.4 Experimental conditions	36
3.5 Results and discussion	37
3.5.1 Thermal behavior of the adsorber	37
3.5.2 Thermal behavior of the evaporator	40

3.5.3 Parameters affecting adsorption system performance	40
3.6 Performance comparison with previous works	44
3.7 Conclusion	46
 CHAPTER 4 PERFORMANCE ANALYSIS OF A MODULAR ADSORPTION COOLING SYSTEM WITH A SONIC VIBRATION IN THE ADSORBER	 48
4.1 Introduction	48
4.2 Sonic wave inception	49
4.3 Experimental set-up	50
4.3.1 Adsorber	51
4.3.2 Condenser	51
4.3.3 Evaporator	51
4.3.4 Instrumentation	51
4.3.4.1) Temperature	51
4.3.4.2) Pressure	52
4.3.4.3) Flow rate	52
4.3.4.4) Methanol level	52
4.3.5 Operation	52
4.4 Results and discussion	53
4.4.1 Thermal behaviour of adsorption system	54
4.4.2 Parameters affecting adsorber performance	55
4.4.3 Effect of valve opening temperature	59
4.4.4 Parameters affecting evaporator performance	59
4.4.5 Performance comparison with previous work	61
4.5 Conclusion	62
 CHAPTER 5 SYSTEM SIMULATION OF THE ADSORPTION COOLING SYSTEM WITH SONIC VIBRATION AT EVAPORATOR AND ADSORBER	 63
5.1 Operation conditions and constants for simulation	63
5.2 Flow chart of simulation program for adsorption cooling system	64

5.3 Verification of the simulation results	70
CHAPTER 6 CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS	72
6.1 Conclusions	72
6.1.1 A modular adsorption cooling system having a sonic vibration at the evaporator	72
6.1.2 A modular adsorption cooling system having a sonic vibration at the adsorber	73
6.1.3 System simulation analysis	73
6.2 Recommendations	74
References	75
Appendices	78
Appendix A Experimental data	79
Appendix B List of pictures	95
Appendix C List of publications	101
Curriculum Vitae	159

LIST OF TABLES

Table	Page
2.1 Example refrigerant and special properties	25
2.2 Example refrigerant pairs and their heat adsorption	26
2.3 Suitable application ranges for adsorbent-adsorbate pairs	27
3.1 Summary of the testing conditions in this study	37
3.2 Performance comparison with previous work	46
4.1 Summary of the testing conditions in this study	53
4.2 Effect of valve opening temperature	58
4.3 Parameters affecting evaporator performance	60
4.4 Performance comparisons with previous work	61
5.1 The operating conditions of the adsorber, evaporator, condenser and sonic wave generator (sonic wave generator at the evaporator)	63
5.2 Constants for calculation (sonic wave generation at the evaporator)	65
5.3 The operating conditions of the adsorber, evaporator, condenser and sonic wave generator (sonic wave generator at the adsorber)	66
5.4 Constants for calculation (sonic wave generation at the adsorber)	67

LIST OF FIGURES

Figure	Page
1.1 Schematic diagram of the air conditioner module	3
1.2 Schematic diagram of the adsorption air conditioner installed in the locomotive	4
1.3 Schematic diagram of the adsorption air conditioner	4
1.4 Schematic diagram of the compact adsorption room air conditioner	8
1.5 Schematic diagram of the heat-pipe type silica gel-water adsorption chiller	8
1.6 Schematic diagram of the heat-pipe combined evaporator	9
1.7 Schematic diagram of the air conditioner in the locomotive operator cabin	10
1.8 Schematic diagram of experimental set up	11
2.1 Basic operating principle of adsorption process	16
2.2 P-T-x diagram of an adsorption cycle	17
2.3 Solar cooling paths	29
2.4 Schematic sketches of the experiment apparatus	30
3.1 Schematic sketches of the experiment apparatus	34
3.2 Temperature profiles of the bed and the evaporator including the evaporator circulating water	38
3.3 Cooling down time of activated carbon using various cooling methods	39
3.4 Temperature profiles of the adsorption system over time	41
3.5 Relationship of COP, SCP and VCP with the heat source temperature without sonic wave	42
3.6 Effect of cooling water temperature on system performance without sonic wave	43
3.7 The effect of the sonic wave on the heat of vaporization and the volumetric methanol production	44

3.8 Effect of the sonic wave on system performance	45
4.1 A schematic diagraph of the modular solid adsorption cooling unit	50
4.2 Temperature profiles of the adsorption system	55
4.3 Effect of the hot water temperature at the inlet of the adsorber on the volume of methanol condensate	56
4.4 Effect of the hot water temperature at the inlet of the adsorber on system performance	57
4.5 Effect of the hot water temperature in the adsorber on specific cooling power	57
4.6 Effect of the hot water temperature at the inlet of the adsorber on volumetric cold production	58
5.1 Flow chart for input and output data of the computer program	68
5.2 Flow chart of the simulation program for the adsorption cooling cycle	69
5.3 Temperature profiles of adsorption cooling system in the case of the sonic wave vibration at evaporator	70
5.4 Temperature profiles of adsorption cooling system in the case of the sonic wave vibration at adsorber	71

ABBREVIATIONS AND SYMBOLS

Nomenclature

A	Adsorption constant (-)
A	Area (m^2)
c	Specific heat (J/kg K)
COP	Coefficient of performance (-)
dT	Temperature difference ($^{\circ}\text{C}$)
dt	Time difference (s)
D	Diameter of adsorber (m)
ΔH	Heat of desorption and adsorption (J/kg)
k	Constant for working pair (-)
L	Latent heat of vaporization (J/kg)
m	Mass (kg)
P	Pressure (Pa)
Q	Heat transfer (J)
R	Ideal gas constant of methanol (J/kg.K)
SCP	Specific cooling power (W/kg)
t	Time (s)
T	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)
U	Overall heat transfer coefficient ($\text{kW/m}^2 \text{ K}$)
x	Concentration ($\text{kg}_{\text{adsorbate}}/\text{kg}_{\text{adsorbent}}$)
V	Volume (cm^3)
VCP	Volumetric capacity power (cm^3/W)

Subscript

<i>a</i>	Adsorption
<i>ads</i>	Adsorber
<i>ac / b</i>	Activated carbon
<i>cond</i>	Condenser
<i>cw</i>	Cooling water
<i>d</i>	Desorption
<i>evap</i>	Evaporator
<i>hw</i>	Hot water
<i>in</i>	Inlet
<i>max</i>	Maximum
<i>met</i>	Methanol
<i>min</i>	Minimum
<i>out</i>	Outlet
<i>p</i>	Isobaric process
<i>s</i>	Saturated
<i>sonic</i>	Sonic wave
<i>v</i>	Isometric process
<i>w</i>	Water
<i>wi</i>	Inlet water

Superscript

<i>n</i>	Constant for working pair (-)
----------	---------------------------------

Greek symbol

ρ	Density (kg/m ³)
--------	------------------------------