

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้แผงรับแบบ
ฮีตไปป์

นายวรเดช มโนสร้อย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2551
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**FORMULATION OF A MATHEMATICAL MODEL FOR SOLAR HOT
WATER SYSTEM USING HEAT PIPE COLLECTOR**

Mr. Woradej Manosroi

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

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

511920

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำน้ำร้อนพลังงาน
แสงอาทิตย์โดยใช้แผงรับแบบฮีตไปป์

โดย

นายวรเดช มโนสร้อย

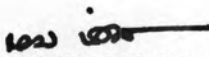
สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

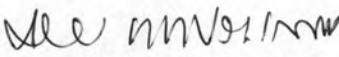
อาจารย์ที่ปรึกษา

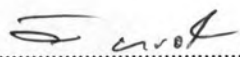
รองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา ขงเจริญ

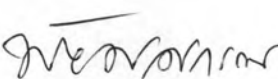
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

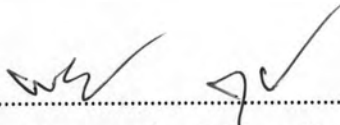

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. มานิจ ทองประเสริฐ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา ขงเจริญ)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. พงษ์ธร จริญญากรณ์)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชัย กฤษไคร์)

วรเดช มโนสร้อย : การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์
โดยใช้ แผงรับแบบฮีตไปป์ (FORMULATION OF A MATHEMATICAL MODEL
FOR SOLAR HOT WATER SYSTEM USING HEAT PIPE COLLECTOR)

อาจารย์ที่ปรึกษา : รศ. ดร. วิทยา ขงเจริญ , 144 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้แผงรับแบบฮีตไปป์ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งสามารถใช้ได้ง่ายและสะดวกด้วยโปรแกรม Microsoft excel ซึ่งประกอบด้วย 3 สมการหลักได้แก่ สมการการถ่ายเทความร้อนผ่านกระจกทั้งสองชั้นจนถึงพื้นผิวฮีตไปป์ สมการการถ่ายเทความร้อนผ่านฮีตไปป์ไปยังน้ำระบายความร้อนและสมการส่วนระบบถังน้ำ ตัวแปรต้นในสมการได้แก่อุณหภูมิกระจกชั้นนอกสุด อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ค่าความเข้มแสง ค่าการส่งผ่าน ค่าการดูดซับ และค่าการสะท้อนแสง ผลลัพธ์ที่ได้คือ อุณหภูมิกระจกชั้นใน อุณหภูมิพื้นผิวฮีตไปป์ อุณหภูมิส่วนต่าง ๆ ของฮีตไปป์เช่นฮีวาเพอเรเตอร์และคอนเดนเซอร์ อุณหภูมิของน้ำในถังสูงสุด ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน พลังงานที่ถ่ายเทสู่น้ำต่อวัน ต่อเดือน และต่อปี โดยได้นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่กรุงเทพมหานคร ในช่วงเวลา 8.00 น. ถึง 16.00 น. ณ วันที่ 20 พฤศจิกายน 2550 (ฟ้าครึ้ม) และ 22 พฤศจิกายน 2550 (ฟ้าโปร่ง) มาใส่ในแบบจำลองแล้วคำนวณ วิเคราะห์ และหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองที่พัฒนาได้พบว่าประสิทธิภาพเฉลี่ยของระบบในวันฟ้าครึ้มเท่ากับ 43 % และวันฟ้าโปร่งเท่ากับ 39 % อุณหภูมิสูงสุดของน้ำ 87 ลิตรในถังเก็บในวันฟ้าครึ้มมีค่าเท่ากับ 36.98 °C ส่วนวันฟ้าโปร่งมีค่าเท่ากับ 41.15 °C ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงทั้งในวันฟ้าครึ้มและวันฟ้าโปร่ง อุณหภูมิน้ำต่างกัน 1-4% ส่วนค่าประสิทธิภาพนั้นต่างกัน 4-11% การคำนวณประสิทธิภาพของระบบและอุณหภูมิของน้ำเป็นรายเดือนนั้น พบว่าเมื่อปริมาณน้ำลดลงอุณหภูมิของน้ำจะสูงขึ้น และเมื่อปริมาณของน้ำเพิ่มมากขึ้นประสิทธิภาพของแผงรับแสงจะเพิ่มขึ้น ทั้งอุณหภูมิที่แผงรับแสงทำได้สูงสุดและพลังงานความร้อนในถังน้ำร้อนสูงสุดพบในเดือนมีนาคมส่วนอุณหภูมิที่แผงรับแสงทำได้ต่ำสุดและพลังงานความร้อนในถังน้ำร้อนต่ำสุดพบในเดือนพฤษภาคม นอกจากนี้ยังพบว่าในเดือนพฤษภาคมระบบมีประสิทธิภาพสูงสุดและในเดือนกุมภาพันธ์ระบบมีประสิทธิภาพต่ำสุด เมื่อปรับแผงรับแสงในมุมเอียงที่ต่างกันพบว่าในเดือนมกราคม มิถุนายน และตุลาคม แผงให้ค่าอุณหภูมิ น้ำ และพลังงานในถังน้ำร้อนสูงสุดที่มุมเอียงของแผง 45 องศา 0 องศาและ 30 องศาตามลำดับ เมื่อปริมาณน้ำมากจะประหยัดค่าไฟได้มาก ในการคำนวณที่มุมเอียงของแผง 15 องศาเดือนที่ประหยัดไฟได้สูงสุดคือเดือนมีนาคม และประหยัดไฟได้น้อยที่สุดอยู่ในเดือนพฤษภาคม ผลงานวิจัยนี้จะสามารถนำไปใช้ได้โดยง่ายเพื่อการประหยัดพลังงานและการประยุกต์ในการออกแบบระบบน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ แผงรับแบบฮีตไปป์ในเชิงพาณิชย์ได้ต่อไป

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อนิสิต วรเดช มโนสร้อย

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา วิทยา ขงเจริญ

ปีการศึกษา 2551

##4970547421; MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS : MATHEMATICAL MODEL,SOLAR HOT WATER SYSTEM,HEAT PIPE COLLECTOR

WORADEJ MANSROI : FORMULATION OF A MATHEMATICAL MODEL FOR SOLAR HOT WATER SYSTEM USING HEAT PIPE COLLECTOR ,THESIS ADVISOR:
ASSOC.PROF. WITTHAYA YONGCHAREON,144 pp

The objective of this study is to formulate a simple and convenient mathematical model by using Microsoft excel program for solar hot water system using heat pipe collector. The formulated mathematical model was composed of 3 principle equations. It consists of the equations for the heat transfer through two glass layers to the heat pipe surface, heat transfer from heat pipe and heat transfer from condenser water to the storage tank. The input variables are outer glass temperature, solar intensity, transmissivity, absorptivity and diffuse reflectivity of glass tube. The output variable were the temperature of the inner glass layer, heat pipe surface temperature , individual temperature of part of heat pipe such as evaporator and condenser, temperature of water in the storage tank, efficiency, energy gained per day, per month and per year. The experiment was performed in Bangkok ,Thailand. The data were taken during the period of 8.00 a.m. to 4.00 p.m. on 20 November 2007 (cloudy sky) and on 22 November 2007(clear sky) .All data were put in the model, calculated, analyzed and determined the relationship between the variables. From the calculation by the model ,the mean efficiency of the system for the cloudy sky day was 39% while in the clear sky day was 43 %.

Both clear and the cloudy sky days showing the maximum efficiency value were occurred in the afternoon while the minimum efficiency value of the collector were in the morning and evening. The maximum temperature in the storage tank containing water of 87 liters in the cloudy sky day was 36.98 °C and in the clear sky day was 41.15 °C. In comparing the experimental and calculation values, mean efficiency was less than the experimental value of about 1-4%. The temperature of the reservoir from calculation was less than the experimental value of about 4-11%. For the calculation of solar system efficiency and water temperature per month , the lesser the volume of the water, the higher the temperature, while the higher the volume of water, the higher the efficiency of the solar system was obtained. Both of the maximum water temperature that the solar collector produced and the maximum heat energy transferred to water were in March , whereas the minimum water temperature that the solar collector produced and minimum heat energy transferred to water were in May. The highest efficiency of the solar collector was found in May, while the lowest was in February. When the collector was adjusted to different angles, the highest water temperature were found at 45 degree in January 0 degree in June and 30 degree in October. The higher the volume of water ,the higher the electricity cost saving was indicated. In calculation at inclination angles of 15 degree the highest electricity cost saving was in March the lowest was in May. The result from this study can be easily applied for the energy saving and further design for the development of commercial solar hot water system using heat pipe collector.

Department of Mechanical Engineering

Student's signature

Woradej Mansroi

Field of study Mechanical Engineering

Advisor's signature

Witthaya Yongchareon

Academic year 2008

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.วิทยา บงเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ให้ความรู้ ให้ความรู้ ให้ความรู้ ให้คำแนะนำและให้ข้อคิดเห็นที่มีค่าและเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัยของผู้เขียนจนวิทยานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณ รศ.ดร.มานิจ ทองประเสริฐ รศ.ดร.พงษ์ธร จริญญากรณ์ และ ผศ.ดร.พิชัย กฤษไมตรี ที่ได้ให้ความกรุณาเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำรวมทั้งข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและบริษัทบีเอ็นบีกรุ๊ปจำกัด ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษา

ขอขอบคุณพี่ ๆ ปริญญาโทในสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ซึ่งได้แก่ คุณชววรรณ มาลาหอม ที่ได้ให้ข้อมูลบางส่วนของการทำงาน คุณพรชัย กรศรี และคุณปราโมทย์ ลิมคำงธรรม ที่ช่วยเหลือ ให้คำแนะนำและเป็นกำลังใจตลอดมา ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่หน่วยทะเบียนคณะวิศวกรรมศาสตร์และเจ้าหน้าที่ธุรการภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่านที่ช่วยติดต่อ ประสานงานและให้คำแนะนำเกี่ยวกับเอกสารต่าง ๆ

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ (ภก.ศ.ดร.จිරเดช มโนสร้อย) และคุณแม่ (ภญ.รศ.ดร. อรุณญา มโนสร้อย) เป็นอย่างสูงที่ท่านได้ให้กำลังใจและคำแนะนำในการแก้ไขปัญหาและอุปสรรคต่าง ๆ ตลอดจนสนับสนุนค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ตลอดการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญกราฟ.....	ท
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.2 ดวงอาทิตย์และพลังงานแสงอาทิตย์.....	16
2.3 ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทย.....	19
2.4 ข้อมูลพลังงานแสงอาทิตย์และภูมิอากาศ.....	20
2.5 มุมระหว่างดวงอาทิตย์กับโลก.....	23
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
3.1 ประวัติและความเป็นมา.....	28
3.2 การทำงานของฮีต ไปป์.....	28
3.3 คาพิลลารี (Capillary Effect).....	31
3.4 คุณสมบัติของฮีต ไปป์.....	32
3.5 ขีดจำกัดคาพิลลารี.....	33
3.6 ความดันสูงสุดคาพิลลารี.....	34

	หน้า
3.7 Liquid pressure drop.....	36
3.8 Vapor pressure drop.....	37
3.9 Capillary limitation on heat transport capability.....	42
3.10 Entrainment limitation.....	44
3.11 Sonic limitation.....	45
3.12 ขีดจำกัดการเดือด.....	47
3.13 ลักษณะอุณหภูมิจนของฮีต ีปไป.....	49
3.14 ระบบผลิตน้ำร้อนจากแสงอาทิตย์.....	53
3.15 ส่วนประกอบที่สำคัญของระบบผลิตน้ำร้อนแบบแสงอาทิตย์.....	54
3.16 หลักการทำงานของระบบทำน้ำร้อนของแสงอาทิตย์แบบฮีต ีปไป.....	55
3.17 การส่งผ่าน การดูดซับและการสะท้อนของแสงผ่านแผงรับแสงอาทิตย์.....	57
3.18 สมการความร้อนของแผงรับแสงอาทิตย์.....	58
3.19 สมการความร้อนของฮีต ีปไป.....	60
3.20 แผนภาพจำลองการทำงานของฮีต ีปไปของแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์แบบฮีต ีปไป.....	62
บทที่ 4 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	
4.1 สมมุติฐาน.....	65
4.2 ค่าคงที่.....	65
4.3 ตัวแปร (Independent variable).....	65
4.4 ตัวแปร(dependent variable).....	66
4.5 แผนภาพการถ่ายเทความร้อน.....	66
4.6 เส้นทางการไหลของความร้อน.....	67
4.7 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม.....	69
4.8 สรุปการคำนวณ.....	75
4.9 โปรแกรม Microsoft excel.....	76
4.10 โปรแกรมการคำนวณ.....	76
4.11 การตรวจสอบโปรแกรม.....	86
บทที่ 5 ผลการทดลอง	
5.1 ผลการคำนวณรายวัน.....	88
5.2 ผลการคำนวณรายเดือนในหนึ่งปี.....	112

5.3 ผลการคำนวณแบ่งต่ออนุกรม.....	121
บทที่ 6 การอภิปรายและสรุปผลการทดลอง	
6.1 การอภิปรายผล.....	127
6.2 สรุปผลการทดลอง.....	128
6.3 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต.....	130
รายการอ้างอิง.....	131
ภาคผนวก ก กราฟที่ใช้ในงานวิจัย.....	134
ภาคผนวก ข ข้อมูลแพร่รับแสงอาทิตย์.....	135
ภาคผนวก ค ตารางคุณสมบัติสารที่ใช้ในงานวิจัย.....	138
ภาคผนวก ง ข้อมูลความเข้มแสงและอุณหภูมิ.....	140
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	144

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ชนิดของ solar collector ทั้ง 4 แบบ (K.S.Ong).....	4
2.2 solar air heater กับ slats (H.D ammari).....	6
2.3 evacuated tubular collector (L.Shah).....	7
2.4 Thin membrane heat pipe solar collector (S.B.Riffat).....	9
2.5 หน่วยท่อของตัวรับแบบฮีตไปป์ (Haiting Cui).....	11
2.6 หน้าตัดของ wickless heat pipe flat plate solar collectors ตัวคั่นแบบ (H.M.S.Hussein).....	12
2.7 UTC (unglazed transpired solar collector) (M.Agustus).....	13
2.8 หน้าตัดของตัว wickless heat pipe absorber plate และ crossflow heat exchanger.....	14
ของ wickless heat pipe flat plate solar collectors (H.M.S.Hussein)	
2.9 วงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์และตำแหน่งของโลกที่สำคัญ.....	17
2.10 เรขาคณิตที่แสงอาทิตย์ส่องบนเส้นรุ้ง 23.5 องศาเหนือได้ และ 66.5 องศาเหนือได้.....	18
2.11 สัดส่วนของรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกลงบน โลก.....	19
2.12 แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย (พ.ศ.2542).....	20
2.13 รูปที่มุมมองของมุมต่าง ๆ.....	25
2.14 มุมมองของมุมต่าง ๆ ระหว่างดวงอาทิตย์กับ โลก.....	26
3.1 การทำงานของฮีตไปป์.....	29
3.2 ขอบเขตความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของฮีตไปป์.....	30
3.3 โครงสร้างของ Heat Pipe แบบมีวิก.....	30
3.4 ปรากฏการณ์คาพิลารี (Capillary Effect).....	32
3.5 การไหลเวียนของ ของไหลใช้งาน ภายในฮีตไปป์.....	33
3.6 การกระจายความดันของ ไอและของเหลวภายในฮีตไปป์.....	34
3.7 รูปร่างของรอยต่อผิวระหว่างส่วนที่เป็นของเหลวกับเป็นไอ.....	35
3.8 control volume ของการไหลของก๊าซ.....	37
3.9 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสำหรับการไหลแบบลามิน่าในท่อสี่เหลี่ยม.....	40
3.10 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสำหรับการไหลแบบลามิน่าในทอกกลม.....	41
3.11 การกระจายค่า Q (ความร้อน).....	43
3.12 Static pressure ที่ตำแหน่งต่างๆบนฮีตไปป์.....	45
3.13 ภาพแสดงการกระจายของอุณหภูมิบนฮีตไปป์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ.....	46
3.14 เส้นทางการไหลของความร้อนผ่านไปยังฮีตไปป์.....	50
3.15 ระบบผลิตน้ำร้อนจากแสงอาทิตย์แบบไหลเวียนตามธรรมชาติ	53

รูปที่	หน้า
3.16 ระบบผลิตน้ำร้อนจากแสงอาทิตย์แบบไหลเวียนตามแรงดัน.....	54
3.17 แผงรับแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นราบ.....	55
3.18 ระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบ ฮีตไปป์ที่ใช้ในการวิจัย.....	55
3.19 การทำงานของ ฮีตไปป์ และ เทอร์โมไซฟอน.....	56
3.20 การดูดซับ (Absorption) ของ solar radiation โดย absorber plate.....	57
3.21 ความร้อนที่สูญเสียไปของแผงรับแสงอาทิตย์.....	58
3.22 วงจรการถ่ายเทความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนที่ผ่านออกไปจากแผงรับแสงอาทิตย์.....	59
3.23 แผนภาพการไหลของน้ำผ่านแผงความร้อน.....	61
3.24 แผนภาพแสดงการถ่ายเทความร้อนของแผงรับแสงอาทิตย์แบบฮีตไปป์.....	64
4.1 แผนภาพการถ่ายเทความร้อน.....	66
4.2 เส้นทางการไหลของความร้อน.....	70
4.3 ส่วนขยายฮีตไปป์.....	71
4.4 แสดงแผงขณะเริ่มการทดลอง.....	74
4.5 แผงขณะที่การทดลองผ่านไปได้ 1 ชั่วโมง.....	74
4.6 สรุปแผนผังการคำนวณทั้งหมด.....	75
4.7 แผ่นงาน incidence angle.....	76
4.8 แผ่นงาน input.....	77
4.9 แผ่นงาน Efficiency.....	78
4.10 แผ่นงาน Reservoir.....	79
4.11 ตารางบันทึกค่ามุมในแผ่นงาน incidence angle.....	79
4.12 ตารางป้อนค่าคุณลักษณะของฮีตไปป์และขนาดของถังเก็บน้ำ.....	80
4.13 ตารางป้อนค่าอุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือน.....	80
4.14 ตารางป้อนค่าความเข้มแสงเฉลี่ยรายเดือน (beam radiation).....	81
4.15 ตารางป้อนค่าความเข้มแสงเฉลี่ยรายเดือน (diffuse radiation).....	81
4.16 ตารางป้อนค่าความเร็วลม.....	81
4.17 ตารางป้อนค่าอุณหภูมิน้ำเริ่มต้น.....	82
4.18 ตารางป้อนค่าคุณลักษณะของแผง.....	82
4.19 การเรียกใช้แมโคร.....	83
4.20 แมโคร.....	83
4.21 การแสดงผลอุณหภูมิในถังในแผ่นงาน Reservoir.....	84

รูปที่	หน้า
4.22 การแสดงผลประสิทธิภาพของแผงแผ่นงาน efficiency.....	84
4.23 การแสดงผลพลังงานที่ถ่ายเทสู่น้ำแผ่นงาน efficiency.....	85
4.24 การแสดงผลประหยัดค่าไฟฟ้า.....	85

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ความเข้มแสงอาทิตย์เฉลี่ยรายชั่วโมง ตลอดปี พ.ศ.2548.....	22
2.2 อุณหภูมิอากาศภายนอกเฉลี่ยรายชั่วโมง ตลอดปี พ.ศ.2548.....	23
2.3 ความเร็วลมสูงสุดเฉลี่ยรายเดือน 2549-2550.....	24
2.4 ค่า hour angle ที่เวลาต่าง ๆ.....	27
2.5 มุม Surface azimuth ที่ตำแหน่งต่าง ๆ สำหรับซีกโลกเหนือ.....	27
3.1 ค่า Effective capillary radius ของวิกแบบต่าง ๆ.....	36
3.2 ค่า Permeability ของวิกแบบต่าง ๆ.....	39
3.3 ค่า Vapor Frictional Coefficient F_v และ Dynamic Coefficient D_v	42
3.4 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวิกที่มีของเหลวอยู่.....	49
4.1 การทดสอบ โปรแกรมในส่วนของสมการ heat pipe.....	86
4.2 การเปรียบเทียบการคำนวณสมการ flat plate.....	87
5.1 ข้อมูลจากการทดลองจริง.....	88
5.2 ผลการคำนวณวันฟ้าครึ้ม.....	91
5.3 ผลการคำนวณวันฟ้าโปร่ง.....	92
5.4 การเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลการทดลองจริงกับการคำนวณ.....	108
โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวันฟ้าโปร่ง	
5.5 การเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลการทดลองจริงกับการคำนวณ.....	108
โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวันฟ้าครึ้ม	
5.6 ผลการคำนวณรายวันที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ	109
5.7 ผลการคำนวณในเดือนมกราคมของค่าต่าง ๆ ที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ อุณหภูมิน้ำเริ่มต้น.....	112
28 °C	
5.8 ผลการคำนวณรายปีของค่าต่าง ๆ ที่ปริมาณน้ำ 200 ลิตร อุณหภูมิน้ำเริ่มต้น 28 °C	116
5.9 ผลการคำนวณเมื่อเปลี่ยนมุมเอียงของแผงปริมาณน้ำ 100 ลิตรในเดือนมกราคม.....	120
อุณหภูมิน้ำเริ่มต้น 28 °C	
5.10 ผลการคำนวณเมื่อเปลี่ยนมุมเอียงของแผงปริมาณน้ำ 100 ลิตรในเดือนมิถุนายน.....	120
อุณหภูมิน้ำเริ่มต้น 28 °C	
5.11 ผลการคำนวณเมื่อเปลี่ยนมุมเอียงของแผงปริมาณน้ำ 100 ลิตรในเดือนตุลาคม.....	121
อุณหภูมิน้ำเริ่มต้น 28 °C	

สารบัญญคราฟ

กราฟที่	หน้า
2.1 ความเข้มแสงอาทิตย์เฉลี่ยรายชั่วโมง ตลอดปี 2005.....	21
2.2 อุณหภูมิอากาศภายนอกเฉลี่ยรายชั่วโมง ตลอดปี 2005.....	22
5.1 อุณหภูมิ glass 1,glass 2 และอุณหภูมิพื้นผิวฮีต ไปถึงของวันฟ้าครึ้ม.....	93
5.2 อุณหภูมิส่วนต่าง ๆ ของฮีตไปถึงวันฟ้าครึ้ม.....	94
5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับความร้อนที่ถ่ายเทสู่น้ำของวันฟ้าครึ้ม.....	95
5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนส่วนต่าง ๆ ของฮีตไปถึงฟ้าครึ้ม.....	96
5.5 อุณหภูมิจุดต่าง ๆ ของแผงในวันฟ้าครึ้ม.....	97
5.6 อุณหภูมิจุดต่าง ๆ ของแผงในวันฟ้าครึ้ม.....	98
5.7 อุณหภูมิ glass 1,glass 2 และอุณหภูมิพื้นผิวฮีต ไปถึงของวันฟ้าครึ้ม.....	99
5.8 อุณหภูมิส่วนต่าง ๆ ของฮีตไปถึงวันฟ้าโปร่ง.....	100
5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนส่วนต่าง ๆ ของฮีตไปถึงฟ้าโปร่ง.....	101
5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับความร้อนที่ถ่ายเทสู่น้ำของวันฟ้าโปร่ง.....	102
5.11 อุณหภูมิส่วนต่าง ๆ ของฮีตไปถึงวันฟ้าโปร่ง.....	103
5.12 อุณหภูมิส่วนต่าง ๆ ของฮีตไปถึงวันฟ้าโปร่ง.....	104
5.13 อุณหภูมิ น้ำในถังที่เวลาต่าง ๆ ของวันฟ้าครึ้มและวันฟ้าโปร่ง.....	105
5.14 ความร้อนที่ถ่ายเทที่เวลาต่าง ๆ ในวันฟ้าครึ้มและวันฟ้าโปร่ง.....	106
5.15 ประสิทธิภาพของแผงในวันฟ้าครึ้มและวันฟ้าโปร่ง.....	107
5.16 ประสิทธิภาพของแผงที่ปริมาตรน้ำต่าง ๆ ของวันฟ้าโปร่ง.....	110
5.17 อุณหภูมิ น้ำในถังที่ปริมาตรน้ำต่าง ๆ ของวันฟ้าโปร่ง.....	111
5.18 อุณหภูมิ น้ำสูงสุดที่แผงทำได้ในเดือนมกราคมที่ปริมาตรน้ำต่าง ๆ	113
5.19 พลังงานความร้อนในถังน้ำร้อนในเดือนมกราคมที่ปริมาตรน้ำต่าง ๆ.....	114
5.20 ประสิทธิภาพของระบบเฉลี่ยในเดือนมกราคมที่ปริมาตรน้ำต่าง ๆ	115
5.21 อุณหภูมิ น้ำสูงสุดที่แผงทำได้ในเดือนต่าง ๆ ที่ปริมาตรน้ำ 200 ลิตร.....	117
5.22 พลังงานความร้อนในถังน้ำร้อนในเดือนต่าง ๆ ที่ปริมาตรน้ำ 200 ลิตร.....	118
5.23 ประสิทธิภาพของระบบเฉลี่ยในเดือนต่าง ๆ ที่ปริมาตร 200 ลิตร.....	119
5.24 อุณหภูมิสูงสุดที่แผงทำได้เฉลี่ยในเดือนต่าง ๆ ที่มุมเอียงต่าง ๆ ของแผง.....	122
ในปริมาตร น้ำ 100 ลิตร	
5.25 พลังงานในถังน้ำร้อนเฉลี่ยในเดือนต่าง ๆ ที่มุมเอียงต่าง ๆ ของแผง.....	123
ในปริมาตรน้ำ 100 ลิตร	

กราฟที่	หน้า
5.26 ประสิทธิภาพของระบบเฉลี่ยในเดือนต่าง ๆ ที่มุมเอียงต่าง ๆ ของแผง.....	124
ในปริมาตรน้ำ 100 ลิตร	
5.27 อุณหภูมิน้ำในถังที่แผงทำได้ในเวลาต่างๆ ของวันฟ้าครึ้ม(20 พฤศจิกายน 2550).....	125
(20 พฤศจิกายน 2550) ในปริมาตรน้ำ 30 ลิตร (แผงอนุกรม)	
5.28 ประสิทธิภาพของระบบที่เวลาต่างๆ ของวันฟ้าครึ้ม (20 พฤศจิกายน 2550)	126
ในปริมาตรน้ำ 30 ลิตร (แผงต่ออนุกรม)	

คำอธิบายสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
A	พื้นที่หน้าตัด.....	m ²
A _{cond}	พื้นที่ผิว condenser.....	m ²
A _{hp}	พื้นที่ผิวของตัวฮีตไปป์.....	m ²
A _{h,m}	พื้นที่ condenser ของฮีตไปป์.....	m ²
A _p	พื้นที่รับแสงหรือพื้นที่หน้าตัดฮีตไปป์.....	m ²
A _w	พื้นที่หน้าตัดวิก.....	m ²
A _s	ขนาดรูที่ผิวของ Wick.....	m ²
A _v	พื้นที่หน้าตัดของ vapor core.....	m ²
C	ค่าคงที่.....	-
C _f	ความจุความร้อนจำเพาะของ working fluid ใน evaporator.....	J/Kg K
C _p	ความจุความร้อนจำเพาะ.....	J/Kg K
C _{sf}	ค่าคงที่ของการทดลองขึ้นอยู่กับ surface liquid combination.....	-
d _v	เส้นผ่านศูนย์กลาง vapor core	m
D _v	Dynamic pressure coefficient.....	-
f _l	Drag coefficient สำหรับการไหลของของไหล.....	-
F _l	Frictional coefficient สำหรับการไหลของของไหล.....	-
F _v	Frictional coefficient สำหรับการไหลของก๊าซ.....	-
F _s	Shear force ที่ liquid interface.....	-
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก.....	m/s ²
h _c	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน.....	W/m ² K
h _{1c}	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากฮีตไปป์ไป glass 1.....	W/m ² K
h _{2c}	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจาก glass 1 ไป glass 2.....	W/m ² K
h _{3c}	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจาก glass 2 ไป ambient.....	W/m ² K
h _r	ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน.....	W/m ² K
h _{1r}	ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนจากฮีตไปป์ไป glass 1.....	W/m ² K
h _{2r}	ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนจาก glass 1 ไป glass 2.....	W/m ² K
h _{3r}	ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนจาก glass 2 ไป ambient.....	W/m ² K

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
h_{hp}	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของฮีตไปป์.....	W/m^2K
h_{hm}	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของ manifold.....	W/m^2K
h_{fg}	enthalpy of vaporization.....	J/Kg
$h_{r,c}$	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่าง condenser และของไหลรอบ condenser..	W/m^2K
$I(t)$	ความเข้มของแสงอาทิตย์ที่บริเวณใด ๆ.....	W/m^2
k_e	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวิกที่มีของเหลวอยู่.....	$W/m K$
$k_{e,e}$	Effective thermal conductivity ของ liquid saturated wick.....	$W/m K$
k_l	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของเหลว.....	$W/m K$
k_p	Thermal conductivity ของวัสดุที่ใช้ทำท่อ	$W/m K$
K	permeability ของวิก	-
K	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ.....	$W/m K$
K_1, K_2	ค่าคงที่.....	-
L	ระยะห่างระหว่าง glass กับ heat pipe หรือ glass กับ glass.....	m
L_a	ความยาวส่วน Adiabatic	m
L_c	ความยาวส่วน Condenser	m
L_e	ความยาวส่วน Evaporator	m
\dot{m}_f	อัตราการไหลของของไหลใช้งานใน manifold.....	kg/s
\dot{m}_v	อัตราการไหลของก๊าซ	kg/s
M_v	ตัวเลขมัคของการไหลของก๊าซ.....	kg/s
Nu	Nusselt number	-
n	ค่าคงที่ของการทดลองซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของ working fluid ที่ใช้.....	-
Pr_l	Prandtl number ของ working fluid.....	-
P_c	ความดัน Capillary.....	Pa
P_{cm}	ความดัน Capillary สูงสุด.....	Pa
P_l	ความดันของเหลว.....	Pa
P_0	ความดัน Stagnation	Pa
P_v	ความดันก๊าซ.....	Pa
$P_{v,e}$	ความดันก๊าซที่ Evaporator	Pa

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
$P_{v,c}$	ความดันก๊าซที่ Condenser	Pa
P_{pw}	ความดันก่อกำให้อุณหภูมิผิวของวิกกับผนังท่อเป็นจุดเดือด.....	Pa
P_{\perp}	ความดัน Hydrostatic ในทิศตั้งฉากกับแกนท่อ.....	Pa
q_{ab}	ความร้อนที่ดูดซับได้.....	W/m^2
q_u	ความร้อนที่ได้รับ.....	W/m^2
q_L	ความร้อนที่สูญเสียไป.....	W/m^2
q_{lv}, λ	Latent heat of vaporization.....	J/kg
$q_{hp,wf}$	ความร้อนที่ถ่ายเทจาก heat pipe สู่ working fluid	W/m^2
q_{conv}	ความร้อนที่ถ่ายเทโดยการพาจาก heat pipe สู่ working fluid.....	W/m^2
$q_{conv'co}$	ความร้อนที่ได้จากการถ่ายเทโดยการพาจาก fluid ใน condenser สู่ fluid ใน manifold.....	W/m^2
$q_{nucleate}$	nucleate boiling heat flux.....	W/m^2
$Q_{b,max}$	Boiling limit บนอัตราการถ่ายเทความร้อน.....	W
$(QL)_{c,max}$	Capillary heat transport factor.....	W
$Q_{s,max}$	Sonic limit บนการถ่ายเทความร้อน.....	W
r_b	รัศมีของฟอง.....	m
r_c	Effective capillary radius.....	m
$r_{h,l}$	รัศมี Hydraulic.....	m
$r_{h,v}$	รัศมี Hydraulic สำหรับการไหลของก๊าซ.....	m
$r_{h,s}$	รัศมี Hydraulic สำหรับวิกที่ Vapor-wick interface.....	m
r_i	รัศมีภายในของท่อ.....	m
r_n	Nucleation radius ของฟองไอ.....	m
r_o	รัศมีภายในของท่อ.....	m
r_v	รัศมีของ Vapor core.....	m
R_1, R_2	รัศมี Curvature.....	m
$R_{p,c}$	ความต้านทานความร้อนที่ผนังท่อที่ส่วน Condenser	-
$R_{p,e}$	ความต้านทานความร้อนที่ผนังท่อที่ส่วน Evaporator	-
R_v	ค่าคงที่ของก๊าซ.....	J/Kg K
R_v	ความต้านทานความร้อนสำหรับการไหลของก๊าซจาก Evaporator ไปยัง condenser..-	-

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
$R_{w,e}$	ความต้านทานความร้อนที่ผนังท่อที่ส่วน Evaporator	-
Ra	Rayleigh number.....	-
Re_l	Reynolds number ของการไหลของของไหล.....	-
Re_v	Reynolds number ของการไหลของก๊าซ.....	-
t_p	ความหนาของผนังท่อ.....	m
t_w	ความหนาของวิก.....	m
T_{g1}	อุณหภูมิของ glass 1.....	K
T_{g2}	อุณหภูมิของ glass 2.....	K
$T_{wv,e}$	T_{wv} ที่ส่วน evaporator	K
T_{hp}	อุณหภูมิพื้นผิวของ heat pipe.....	K
T_a	อุณหภูมิโดยรอบ (ambient).....	K
T_c	อุณหภูมิตัว condenser.....	K
T_f	อุณหภูมิ fluid ใน evaporator.....	K
$T_{f,i}$	อุณหภูมิ fluid ขาเข้าที่ manifold.....	K
$T_{f,c}$	อุณหภูมิ fluid รอบ ๆ Condenser.....	K
T_0	อุณหภูมิที่ Stagnation.....	K
$T_{p,c}$	อุณหภูมิผนังส่วน condenser	K
$T_{p,e}$	อุณหภูมิผนังส่วน evaporator	K
T_{pw}	อุณหภูมิผนังท่อที่ติดกับวิก(หรือติดกับท่อของไหลใช้งานในกรณีไม่มีวิก).....	K
$T_{pw,c}$	$T_{p,w}$ ที่ Condenser	K
$T_{pw,e}$	$T_{p,w}$ ที่ Evaporator	K
$T_{f,o}$	อุณหภูมิ fluid ขาออกที่ manifold.....	K
T_{sat}	saturation temperature ของ working fluid.....	K
T_{sky}	อุณหภูมิต้องฟ้า.....	K
T_v	อุณหภูมิก๊าซ.....	K
$T_{v,c}$	อุณหภูมิก๊าซที่ Condenser.....	K
$T_{v,e}$	อุณหภูมิก๊าซที่ Evaporator.....	K
T_{wv}	อุณหภูมิตำแหน่งที่ไอติดกับวิก (หรือติดกับท่อของไหลใช้งานกรณีไม่มีวิก)	K

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
$T_{wv,c}$	T_{wv} ที่ส่วน Condenser	K
$T_{wv,e}$	T_{wv} ที่ส่วน Evaporator	K
U_t	top loss coefficient.....	$W/m^2 K$
U_{HP}	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของฮีตไปป์.....	$W/m^2 K$
$U_{HP,p}$	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นฐานของพื้นที่หน้าตัดท่อ.....	$W/m^2 K$
U_L	Overall loss coefficient.....	$W/m^2 K$
U_b	Back loss coefficient.....	$W/m^2 K$
V	ความเร็วลม.....	m/s
V_l	ความเร็วของของไหล.....	m/s
V_v	ความเร็วก๊าซ.....	m/s
τ	Transmissivity ของ cover system.....	-
τ_l	Frictional stress ที่ตำแหน่งระหว่างผิวของแข็งกับของเหลว.....	N/m^2
α	Absorptivity ของ cover system.....	-
α	zenith angle.....	องศา
α_s	Solar altitude angle.....	องศา
β	Profile coefficient สำหรับ momentum flux.....	-
β	Angle of inclination.....	องศา
γ	Surface azimuth	องศา
γ_s	Solar azimuth	องศา
γ_v	Vapor specific heat ratio.....	-
ρ_d	Diffuse reflectance.....	-
ρ_l	ความหนาแน่นของของไหลใช้งาน.....	kg/m^3
ρ_0	ความหนาแน่นของก๊าซที่ stagnation.....	kg/m^3
ρ_v	ความหนาแน่นของก๊าซ.....	kg/m^3
$(\tau\alpha)$	Transmissivity-absorptivity product.....	-
ε	ค่าความพรุนของวิก.....	-
ε_{eff}	Effective emissivity.....	-
ε_{hp}	Emissivity ของ heat pipe.....	-

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
ε_{g1}	Emissivity ของ glass 1.....	-
ε_{g2}	Emissivity ของ glass 2.....	-
σ	ค่าคงที่ของ Stefan Boltzmann.....	W/m^2K^4
σ	Surface tension ของ liquid-vapor.....	N/m
μ	Viscosity ของ working fluid	kg/m s
ψ	มุมของฮีตไปป์ที่วัดจากแนวนอน.....	องศา
ϕ	ละติจูด.....	องศา
δ	Declination.....	องศา
ω	Hour angle.....	องศา
θ_z	Zenith.....	องศา
θ_i	incidence angle.....	องศา
α_w	Solar wall azimuth.....	องศา