การทดสอบสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แบบคอยล์ ลูป เทอร์โมไซฟอน สำหรับนำพลังงานกลับคืนระหว่างอากาศกับอากาศ

นายวีรชาติ นามพรหม

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2535

ISBN 974-582-166-7

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

019285
11716263A

PERFORMANCE TEST OF A COIL-LOOP THERMOSIPHON HEAT EXCHANGER FOR AIR-TO-AIR ENERGY RECOVERY

MR. WERACHATI NAMPROHM

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Chemical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

1992

ISBN 974-582-166-7

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การทดสอบสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบคอยล์ ลูป เทอร์โมไซฟอน สำหรับนำพลังงานกลับคืนระหว่างอากาศกับอากาศ
โดย	นาย วีรชาติ นามพรหม
ภาควิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ พิชัย ตั้งสถาพรพาณิชย์

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร. ถาวร วัชราภัย)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศศิธร บุญ-หลง)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์ พิชัย ตั้งสถาพรพาณิชย์)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. มนตรี วงศ์ศรี)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

วีรชาติ นามพรหม : การทดสอบสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แบบคอยล์ ลูป เทอร์โมไซฟอน สำหรับนำพลังงานกลับคืนระหว่างอากาศกับอากาศ
(PERFORMACE TEST OF A COIL-LOOP THERMOSIPHON HEAT EXCHANGER FOR AIR-TO-AIR ENERGY RECOVERY)
อ.ที่ปรึกษา: รศ.ดร.วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล, นายพิชัย ตั้งสถาพรพาณิชย์
133 หน้า. ISBN 974-582-166-7

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การศึกษาทดลองสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แบบคอยล์ ลูป เทอร์โมไซฟอนระหว่างอากาศ กับอากาศ โดยใช้ฟรีออน 22 เป็นของไหลใช้งาน ในเทอมของอัตราการถ่ายเทความร้อนและประสิทธิผล เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนประกอบด้วยคอยล์ระเหยและคอยล์ควบแน่นที่มีขนาด 60x40 ตร.ซม. แต่ละคอยล์ ประกอบด้วยท่อทองแดงขนาด 3/8 นิ้ว (ผิวในเป็นเกลียว) จำนวน 4 แถว ติดครีบอลูมิเนียม 13 ครีบต่อนิ้ว พบว่าค่าตัวนิสมรรถนะทั้งสองนี้ขึ้นอยู่กับ ปริมาณบรรจุของของไหลใช้ งานเมื่อปริมาณยังมีน้อย แต่เมื่อเพิ่ม ปริมาณบรรจุของของไหลใช้งานถึงช่วงที่เหมาะสมแล้วจะค่อนข้างคงที่ นอกจากนี้ค่าทั้งสองจะเพิ่มขึ้นตามผลต่างอุณหภูมิระหว่างลมร้อนและลมเย็น อัตราการถ่ายเท ความร้อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของของไหลร้อนและเย็น แต่ประสิทธิผลจะลดลงเมื่ออัตรา การไหลเพิ่มขึ้น

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปสร้างสหสัมพันธ์โดยอาศัยลองวิธีคือวิธี least squares กับวิธีแบบจำลองการนำความร้อน พบว่าวิธีแรกให้สหสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเป็นฟังก์ชันของตัวเลขเรย์โนลด์ ด้านสายเย็น และอัตราส่วนระหว่างตัวเลขเรย์โนลด์ด้านสายร้อนต่อตัวเลขเรย์โนลด์ด้านสายเย็น ส่วนวิธีที่สองให้ค่า B = 0.025, m = 1.35 และ C_{sf} = 0.0054

นอกจากนี้ยังได้ศึกษาการเกิดปรากฏการณ์ฮีสเทอรีซีสของค่าประสิทธิผล เมื่อเพิ่มและลดผลต่างอุณหภูมิระหว่างลมร้อนและลมเย็นในช่วงศูนย์ถึง 20°C โดยทำการทดลองที่ความเร็วลมผิวหน้า 1.3 เมตร/วินาที จากความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิผล กับผลต่างอุณหภูมิดังกล่าว อาจสรุปได้ว่าการเดือดของฟรีออน 22 จะไม่เริ่มจนกว่าผลต่างอุณหภูมิเพิ่มค่าเท่ากับ 4°C อย่างไรก็ตามเมื่อเริ่มเดือดแล้วการเดือดจะไม่สามารถดับหายอย่างสมบูรณ์จนกระทั่งผลต่างอุณหภูมิลดค่าต่ำกว่า 1°C

สุดท้ายได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ สำหรับออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ คอยล์ ลูปเทอร์โมไซฟอน ระหว่างอากาศกับอากาศ โดยอาศัยสหสัมพันธ์ที่ได้ข้างต้น พบว่าถ้าใช้สหสัมพันธ์ จากวิธี least squares ในการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะต้องคูณด้วย safety factor 10 % แต่ถ้าใช้สหสัมพันธ์จากวิธีแบบจำลองการนำความร้อน จะต้องคูณด้วย safety factor 50%

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....
ปีการศึกษา 2535 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

C216208: MAJOR CHEMICAL ENGINEERING
KEY WORD: HEAT PIPE/HEAT EXCHANGER/THERMOSIPHON/WICKLESS/COIL-LOOP
WERACHATI NAMPROHM : PERFORMANCE TEST OF A COIL-LOOP THERMOSIPHON HEAT EXCHANGER FOR AIR-TO-AIR ENERGY RECOVERY. THESIS ADVISOR : ASSO. PROF. WIWUT TANTHAPANICHAKOON, Ph.D., MR.PICHAI TANGSATHAPORNPANICH, 133 pp. ISBN 974-582-166-7.

An experimental study of the performance of a coil-loop thermosiphon air-to-air heat exchanger, utilizing Freon 22 as the working fluid, has been carried out in terms of rate of heat transfer and the effectiveness.The heat exchanger consisted of an evaporator coil and a condenser coil.Each coil had cross-sectional area of 60x40 sq.cm., 3/8 inch (inner grooved) copper tubes with aluminium fins at 13 fins/inch set out as 4 separate loops.It was found that these two performance indices depended on the quantity of working fluid, when the fill ratio was still low, but when the fill ratio reached to the appropriate level these two indices were more or less constant.These two indices also increased with temperature difference between the hot and cold streams. The rate of heat transfer increased with the air flow rate as well. In contrast, the effectiveness decreased as the air flow rates increased. The data obtained were used to constructed two correlations based upon the least squares method and a heat conductance model. The first method revealed the overall heat transfer coefficient to be a function of the cold-stream Reynolds number and the ratio of the hot-stream to the cold-stream Reynolds number. In the second method, the parameters were found as follows: B=0.025, m=1.35 and C_{sf}= 0.0054.

Besides, the hysterisis phenomenon between the effectiveness and the temperature difference between the hot and cold streams in the rang of zero to 20 °C was studied experimentally at air face velocity 1.3 m/s . From the obtained relationship between the effectiveness and the temperature difference,it may be concluded that boiling of Freon 22 was not initiated until a temperature difference of 4 °C was reached. However, once initiated, boiling did not completely disappear until the temperature difference dropped below 1 °C .

Finally,a computer program for designing the air-to-air coil-loop thermosiphon heat exchanger has been developed using the correlations obtained above . It was found that a safety factor of 10 % should be used the correlation obtained by the least squares method was used to design the heat exchanger ,whereas a safety factor of 50 % should be used if the correlation obtained using the heat conductance model was used .

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2535 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้เขียนได้รับความกรุณาอย่างยิ่งจากรองศาสตราจารย์ ดร. วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางการวิจัยและให้ข้อคิดเห็นในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ตลอดจนช่วยแก้ไข และเพิ่มเติมวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตั้งแต่ตนจนสำเร็จเป็นรูปเล่ม ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณอาจารย์เป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย ผศ.ดร. ศศิธร บุญ-หลง ประธานกรรมการ, อาจารย์ ดร.มนตรี วงศ์ศรี และ อาจารย์ พิชัย ตั้งสถาพรพาณิชย์ ซึ่งให้ได้ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ คุณปรีชา กอบเกื้อชัยพงษ์ ที่ได้ให้ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัย และขอขอบคุณ บริษัท ยูนิแฟ็บ อิควิปเมนต์ จำกัด และบริษัท ไดกิ้นอินดัสทรีส์ (ประเทศไทย) จำกัด ที่ได้อนุญาตไปเยี่ยมชมกระบวนการผลิตหน่วยแฟนคอยล์ กับหน่วยคอนเดนซิ่งของโรงงาน

อนึ่ง งานวิจัยนี้ได้รับความสนับสนุนทางเครื่องมืออุปกรณ์จากโครงการวิจัย การพัฒนา สร้างและประยุกต์อุปกรณ์ฮีทไปป์ในระดับอุตสาหกรรม ของสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติและจากทุนอุดหนุนการวิจัยบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สุดท้ายนี้ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดา ที่เป็นกำลังใจมาโดยตลอด และขอขอบพระคุณอาจารย์และเพื่อนอีกหลายท่านที่ไม่ได้กล่าวนามในครั้งนี้ ที่ได้ช่วยเหลือและให้คำแนะนำในการทำวิจัยนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญตาราง..... ญ

สารบัญภาพ..... ฏ

คำอธิบายสัญญลักษณ์..... ฑ

บทที่

1. บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย..... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย. 1

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย..... 2

1.4 แนวทางนำพลังงานกลับคืนระหว่างอากาศกับอากาศ..... 3

2. ผลงานวิจัยในอดีต..... 5

3. ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน

3.1 หลักการทำงาน..... 17

3.2 เทอร์โมไซฟอนแบบปิดผนึกท่อ..... 19

3.3 เทอร์โมไซฟอน แบบ คอยล์ลูป..... 20

4. อุปกรณ์การทดลองและขั้นตอน

4.1 อุปกรณ์การทดลอง..... 23

4.2 ขั้นตอนการทดลอง..... 34

4.3 การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง..... 35

5. ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดสอบสมรรถนะ

5.1 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบ..... 44

5.2 อัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน. 45

5.2.1 อิทธิพลของความเร็ว..... 45

5.2.2 อิทธิพลของผลต่างอุณหภูมิของของไหล..... 46

5.2.3 อิทธิพลของปริมาณของไหลใช้งาน..... 46

5.3 ประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน..... 48

5.3.1 อิทธิพลของความเร็ว..... 55

5.3.2 อิทธิพลของความแตกต่างอุณหภูมิ..... 55

5.3.3 อิทธิพลของปริมาณของไหลใช้งาน..... 55

5.4 ฮีสเทอรีซีสในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบคอยล์ ลูป เทอร์โมไซฟอน..... 66

5.5 สหสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองละเอียดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบคอยล์ ลูป เทอร์โมไซฟอน..... 72

5.6 การเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบคอยล์ ลูป เทอร์โมไซฟอนกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดอื่น..... 81

6. การออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ คอยล์ ลูป เทอร์โมไซฟอน

6.1 ขั้นตอนการออกแบบ..... 84

6.2 ตัวอย่างการคำนวณ..... 85

7. การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ สำหรับการออกแบบและคำนวณ..... 92

8. สรุปและข้อเสนอแนะ

8.1 สรุป..... 100

8.2 ข้อเสนอแนะ..... 100

รายการอ้างอิง..... 101

ภาคผนวก

ก. ตัวอย่างการคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อน..... 106

ข. ตัวอย่างการคำนวณประสิทธิผล..... 110

ค. การคำนวณหาความต้านทานความร้อน..... 112

ง. กราฟเทียบความเร็ว..... 119

จ. คุณสมบัติของสาร

จ.1 คุณสมบัติของอากาศ..... 121

จ.2 คุณสมบัติของฟรีออน 22 122

ฉ. โปรแกรมคอมพิวเตอร์..... 123

ชีวประวัติ 133

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่

5.1 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบ..... 45

5.2 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมโดยประมาณสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน..... 82

6.1 ผลการคำนวณออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน..... 91

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่

3.1	เทอร์โมไซฟอน(ฮีทไปป์ไร้วิกค์).....	19
3.2	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนท่อปิดผนึก.....	19
3.3	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบคอยล์ ลูป เทอร์โมไซฟอน.....	21
3.4	คอยล์ ลูป เทอร์โมไซฟอน หลายๆอันที่ต่อเรียงกัน.....	22
4.1	ไดอะแกรมการไหลและเครื่องมือวัด.....	24
4.2	คอยล์ระเหยและคอยล์ควบแน่น.....	25
4.3	พัดลมด้านร้อน.....	26
4.4	พัดลมด้านเย็น.....	27
4.5	ระบบเครื่องปรับอากาศ.....	29
4.6	ฮีตเทอร์และกล่องฮีตเทอร์.....	30
4.7	ฮอ๊ตไวย์แอนีโมมิเตอร์.....	31
4.8	มาโนมิเตอร์.....	32
4.9	ชุดทดสอบสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบคอยล์ ลูป เทอร์โมไซฟอน.....	33
4.10	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบคอยล์ ลูป เทอร์โมไซฟอน หลังต่อท่อไอระเหยและท่อของเหลวควบแน่นไหลกลับ.....	33
4.11	ค่าประสิทธิผล.....	37
4.12	แบบจำลองทางทฤษฎี.....	38
5.1	การควบแน่นของไอฟรีออน 22 บนผิวเย็นในกรณีที่มีกาซที่ไม่ควบแน่นอยู่ในระบบ.....	48
5.2	อิทธิพลของตัวเลขเรย์โนลด์และ Re^* ต่อสมรรถนะ(U) ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน(กรณีปริมาณของไหลใช้งาน 89 %).....	49

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.3 อิทธิพลของผลต่างอุณหภูมิรวมต่อสมรรถนะ(UA) ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน(กรณีปริมาณของไหลใช้งาน 89 %)..... 50

5.4 อิทธิพลของปริมาณของไหลใช้งานต่อสมรรถนะ(UA) ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน(กรณีความเร็วผิวหน้า 0.5 m/s)..... 51

5.5 อิทธิพลของปริมาณของไหลใช้งานต่อสมรรถนะ(UA) ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน(กรณีความเร็วผิวหน้า 0.7 m/s)..... 52

5.6 อิทธิพลของปริมาณของไหลใช้งานต่อสมรรถนะ(UA) ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน(กรณีความเร็วผิวหน้า 1 m/s)..... 53

5.7 อิทธิพลของปริมาณของไหลใช้งานต่อสมรรถนะ(UA) ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน(กรณีความเร็วผิวหน้า 1.2 m/s)..... 54

5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิผลกับความเร็วผิวหน้า (กรณีปริมาณของไหลใช้งาน 89%)..... 56

5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิผลกับความเร็วผิวหน้า (กรณีปริมาณของไหลใช้งาน 113 %)..... 57

5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิผลกับผลต่างอุณหภูมิรวม (กรณีความเร็วผิวหน้า 0.5 m/s)..... 58

5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิผลกับผลต่างอุณหภูมิรวม (กรณีความเร็วผิวหน้า 0.7 m/s)..... 59

5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิผลกับผลต่างอุณหภูมิรวม (กรณีความเร็วผิวหน้า 1 m/s)..... 60

5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิผลกับผลต่างอุณหภูมิรวม (กรณีความเร็วผิวหน้า 1.2 m/s)..... 61

5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิผลกับปริมาณของไหลใช้งาน (กรณีความเร็วผิวหน้า 0.5 m/s)..... 62

5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิผลกับปริมาณของไหลใช้งาน (กรณีความเร็วผิวหน้า 0.7 m/s)..... 63

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิผลกับปริมาณของไหลใช้งาน (กรณีความเร็วผิวหน้า 1 m/s)..... 64

5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิผลกับปริมาณของไหลใช้งาน (กรณีความเร็วผิวหน้า 1.2 m/s)..... 65

5.18 ปรากฏการณ์ฮีสเทอรีสที่ปริมาณของไหลใช้งาน 89 % (ความเร็วผิวหน้า 1.3 m/s)..... 68

5.19 การเปรียบเทียบปรากฏการณ์ฮีสเทอรีสระหว่างของไหลใช้งานต่างชนิด [ฟรีออน 22 (ปริมาณของไหลใช้งาน 89 %)กับ ฟรีออน 11 (ปริมาณของไหลใช้งาน 89 %) ที่ความเร็วผิวหน้า 1.3 m/s]..... 69

5.20 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี least squares กับผลการทดลอง (ปริมาณของไหลใช้งาน 89 %)..... 76

5.21 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีแบบจำลองการนำความร้อนกับผลการทดลอง (ปริมาณของไหลใช้งาน 89 %).. 77

5.22 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ของนักวิจัยต่างกลุ่มกับผลการทดลองในที่นี้ (ปริมาณของไหลใช้งาน 89 %)..... 78

5.23 อิทธิพลของ Re^* เมื่อให้ Re_c คงที่ โดยเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการวิเคราะห์ (ปริมาณของไหลใช้งาน 89 %).... 79

5.24 อิทธิพลของ Re^* เมื่อให้ Re_h คงที่ โดยเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการวิเคราะห์ (ปริมาณของไหลใช้งาน 89 %).... 80

7.1 algorithm ของโปรแกรม 1..... 95

7.2 algorithm ของโปรแกรม 2..... 97

คำอธิบายสัญญลักษณ์

A	พื้นที่ถ่ายเทความร้อน
A_{min}	พื้นที่หน้าตัดที่น้อยที่สุดที่ของไหลไหลผ่าน
D	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ
C_p	ความร้อนจำเพาะ
C_{sf}	ค่าคงที่ในสมการ Rohsenow
g	ความเร่งภายใต้แรงโน้มถ่วง
g_c	ตัวแปรหน่วย
H	ความยาวท่อ
h	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน
h_{fg}	ความร้อนแฝงของการระเหย
k	ความนำความร้อน
l_f	ความยาวของครีบ
N_T	จำนวนท่อทั้งหมด
N_r	จำนวนแถว
N_p	จำนวนท่อในแถวแรก
Nu	ตัวเลขนัลเซลท์(Nusselt number)
Pr	ตัวเลขแพรนด์ตัล(Prandlt number)
ΔP	ความดันลด
S_L	Longitudinal pitch
S_D	Diagonal pitch
S_T	Transverse pitch
q	อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่
Q	อัตราการถ่ายเทความร้อนรวม
Re	ตัวเลขเรย์โนลด์(Reynold number)
Re^*	สัดส่วนตัวเลขเรย์โนลด์ (Re_h/Re_c)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

r_e	รัศมีของท่อประสิทธิผล
R	ความต้านทานความร้อน
St	ตัวเลขสแตนตัน(Stanton number)
T	อุณหภูมิ
$(\Delta T)lm$	ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงลอ๊กการิธัม
U	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม
W	อัตราการไหล
ε	ประสิทธิผล
μ	ความหนืด
ρ	ความหนาแน่น
σ	แรงตึงผิว
δ	ความหนา
η	ประสิทธิภาพ

สัญญลักษณ์ตัวห้อย

c	ด้านเย็น
h	ด้านร้อน
wci	ผนังภายในด้านเย็น
wco	ผนังภายนอกด้านเย็น
whi	ผนังภายในด้านร้อน
who	ผนังภายนอกด้านร้อน
hi	สายร้อนเข้า
ho	สายร้อนออก
ci	สายเย็นเข้า
co	สายเย็นออก
i	ด้านนอก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

o	ด้านใน
p	ฮีทไปป์แท่งเดียว
l	ของเหลว
f	ครีบ
b	ท่อที่ไม่ได้ติดครีบ
max	สูงสุด
min	ต่ำสุด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย