การสร้างและทดสอบสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์ที่อุณหภูมิต่ำ

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นายปรีชา กอบเกื้อชัยพงษ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีปิโตรเคมี
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2533

ISBN 974-577-878-8

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

016803

FABRICATION AND PERFORMANCE TEST OF LOW-TEMPERATURE HEAT-PIPE HEAT EXCHANGER

MR. PREECHA KOBKHERCHAIPONG

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering
Program of Petrochemical Technology
Graduate School
Chulalongkorn University
1990

ISBN 974-577-878-8

Copyright of the Graduate School, Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสร้างและทดสอบสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์ที่อุณหภูมิต่ำ
โดย	นายปรีชา กอบเกื้อชัยพงษ์
ภาควิชา	สหสาขาวิชาปิโตรเคมี-โพลิเมอร์
สาขาวิชา	เทคโนโลยีปิโตรเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ พิชัย ตั้งสถาพรพาณิชย์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)

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

.... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์ พิชัย ตั้งสถาพรพาณิชย์)

.... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. เกริกชัย สุกาญจนัจที)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปรีชา กอบเกื้อชัยพงษ์ : การสร้างและทดสอบสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์ที่อุณหภูมิต่ำ (Fabrication and Performance Test of Low-Temperature Heat-pipe Heat Exchanger) อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร. วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล, นายนิธิย ตั้งสถานพรพาณิชย์, 169 หน้า. ISBN 974-577-878-8

โครงการวิจัยนี้ ศึกษาถึงการสร้างและทดสอบสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์แยกส่วนระเหยและส่วนควบแน่นชนิดไหลครบวงจร เพื่อใช้ถ่ายเทความร้อนจากอากาศร้อนสู่อากาศเย็น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่สร้างขึ้น ดัดแปลงจากหม้อน้ำรถยนต์ ขนาดกว้าง 60 เซนติเมตร สูง 40 เซนติเมตร มีท่อเป็นท่อแบบแบน จำนวน 118 แท่งวางเป็น 2 แถวในแนวเดียวกัน (in-line) ติดครีบแบบ multilouver fin จำนวน 2 แผง ต่อถึงกันโดยท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $1^{3}/_{8}$ นิ้ว ของไหลใช้งานเป็นน้ำบริสุทธิ์ สร้างเป็นฮีทไปป์โดยวิธีการต้มร่วมกับการดูดสุญญากาศ

ในการทดสอบสมรรถนะโดยเปลี่ยนแปลงปริมาณของของไหลใช้งาน 40, 55, 70, และ 90 เปอร์เซนต์ของช่วงการระเหย พบว่า ที่ปริมาณของไหลใช้งาน 55-90 เปอร์เซนต์ จะให้สมรรถนะการทำงานของเครื่องดี นอกจากนี้ได้ทำการทดลองเปลี่ยนอุณหภูมิของของไหลร้อนขาเข้าที่ 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 องศาเซลเซียส และเปลี่ยนอัตราไหลของอากาศทั้ง 2 สายในช่วง 2-6 เมตรต่อวินาที พบว่า ที่อัตราความเร็วสูง อัตราการถ่ายเทความร้อนจะสูงขึ้นด้วย อย่างไรก็ตามในการทดลองกับปริมาณของของไหลใช้งานต่ำๆ พบว่า เมื่อถึงจุดๆหนึ่ง อัตราการถ่ายเทความร้อนจะไม่เพิ่มขึ้นและมีแนวโน้มว่าจะลดลง อัตราการไหลของอากาศในสายร้อนมีผลในการเปลี่ยนแปลงอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าสายเย็น ค่าของ U ที่ปริมาณของไหลใช้งาน 90 เปอร์เซนต์ จะอยู่ในช่วง 27-63 วัตต์ต่อองศาเซลเซียส และอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่ความเร็วด้านร้อน 6 เมตรต่อวินาที ด้านเย็น 4 เมตรต่อวินาที จะได้เท่ากับ 27 กิโลวัตต์ที่อุณหภูมิขาเข้าของลมร้อน 100 องศาเซลเซียส

ได้นำผลการทดลองมาหาสหสัมพันธ์เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่สร้างขึ้นในรูปแบบ $UA = cRe^{*b}(\Delta T)_{ln}^{a}$ โดยค่าของ a, b และ c จะขึ้นกับปริมาณของของไหลใช้งานในแต่ละกรณี

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา สหสาขาวิชาปิโตรเคมี-โพลิเมอร์ ลายมือชื่อนิสิต ปรีชา กอบเกื้อชัยพงษ์

สาขาวิชา เทคโนโลยีปิโตรเคมี

ปีการศึกษา 2532 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม นิธิย ตั้งสถานพรพาณิชย์

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREECHA KOBKHERCHAIPONG : FABRICATION AND PERFORMANCE TEST OF LOW-TEMPERATURE HEAT-PIPE HEAT EXCHANGER. THESIS ADVISOR : ASSO. PROF. WIWUT TANTHAPANICHAKOON, Ph.D., MR.PICHAI TANGSATHAPORNPHANICH 169 PP. ISBN 974-577-878-8

The present research investigated the fabrication and performance test of a closed-loop heat pipe heat exchanger for gas-to-gas heat transfer. The heat pipe heat exchanger was fabricated from two car radiators which are 60 cm. in width and 40 cm. in length. Each car radiator contained 118 flat tubes arranged in 2 in-line rows with multilouver fins. To construct the heat pipe heat exchanger, both radiators are connected with $1^{3}/_{8}$-inch-in-diameter copper tubes and pure water is used as working fluid. The method of boiling the working fluid together with evacuation is used to make the heat pipe heat exchanger.

Performance tests are carried out at various fill ratios (40, 55, 70 and 90 percent of the evaporator heating area), various inlet temperatures of hot air (50, 60, 70, 80, 90 and 100 degrees Celcius) and various flow rates of both hot and cold streams (2-6 meter/sec). From the experiments, it was found that the fill ratio of 55-90 percent yielded very good heat transfer performance. Regarding the effect of flow rate, it was found that the higher the flow rate, the higher the heat transfer rate. The effect was stronger in the case of the flow rate of hot stream. But at low fill ratios, when the flow rate reached some point, the heat transfer rate did not increase but tended to decrease instead. Our experimental results for the case of 90 percent fill ratio, showed that the value of U ranged between 27-63 watt/m^2-degree Celcius, and a maximum heat transfer was found at hot air velocity 6 meter/sec, cold air velocity 4 meter/sec and inlet hot air temperature 100 degree Celcius, yielding 27 kilowatt. In this case the value of U is 62.6 watt/m^2-degree Celcius.

This work also determines the correlation for predicting the overall heat transfer coefficient of the fabricated heat exchanger in the form $UA = cRe^{*b}(\Delta T)_{ln}^{a}$ where the constants a, b and c all depend on the prevailing fill ratio.

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา สหสาขาวิชาปิโตรเคมี-โพลิเมอร์

สาขาวิชา เทคโนโลยีปิโตรเคมี

ปีการศึกษา 2532

ลายมือชื่อนิสิต ....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ....

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้เขียนได้รับความกรุณาอย่างยิ่งจากรองศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางการวิจัยและให้ข้อคิดเห็นในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ตลอดจนช่วยแก้ไข และเพิ่มเติมวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตั้งแต่ต้นจนสำเร็จเป็นรูปเล่ม ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย รอง-ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ ประธานกรรมการ, รองศาสตรา-จารย์ ดร.เกริกชัย สุกาญจนัจที และอาจารย์ พิชัย ตั้งสถาพรพาณิชย์ ซึ่งได้ให้ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

อนึ่ง งานวิจัยนี้ได้รับความสนับสนุนทางด้านการเงินจาก สำนักงานคณะ-กรรมการวิจัยแห่งชาติ และทุนอุดหนุนการวิจัยจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหา-วิทยาลัย ผู้เขียนจึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

สุดท้ายนี้ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดา ที่เป็นกำลังใจมาโดยตลอด และขอขอบพระคุณอาจารย์และเพื่อนอีกหลายท่านที่มิได้กล่าวนามไว้ ณ ที่นี้ ที่ได้ช่วยเหลือข้าพเจ้าโดยประการทั้งปวง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

		หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย		ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ		จ
กิตติกรรมประกาศ		ฉ
สารบัญ		ช
สารบัญตาราง		ญ
สารบัญรูป		ฎ
บทที่		
1	บทนำ	1
1.1	วัตถุประสงค์ของการทดลอง	2
1.2	ขอบเขตของการวิจัย	3
1.3	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.4	ขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย	3
1.5	ประวัติความเป็นมาของฮีทไปป์	4
1.6	ผลงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวกับฮีทไปป์ที่จุฬาลงกรณ์มหา-วิทยาลัย	7
2	ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการสร้างฮีทไปป์และการวิเคราะห์การทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์ไร้วิกค์	12
2.1	การเลือกของไหลใช้งาน	12
2.2	การเลือกวัสดุทำท่อฮีทไปป์ไร้วิกค์	18
2.3	การสร้างฮีทไปป์ไร้วิกค์	24
2.3.1	ส่วนประกอบของฮีทไปป์ไร้วิกค์	24
2.3.2	การทำความสะอาดส่วนประกอบต่างๆ	27
2.3.3	ขั้นตอนการประกอบฮีทไปป์	29
2.3.4	การเติมของไหลใช้งานและการทำสุญญากาศ	30
2.4	การประเมินสมรรถภาพการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์	36

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ หน้า

2.4.1 วิธีการวิเคราะห์โดยอาศัยรูปจำลองการนำความร้อน.......... 36

2.4.2 วิธีวิเคราะห์โดยอาศัย Effectiveness Number of Transfer Unit.......... 46

3 อุปกรณ์การทดลองและวิธีการ.......... 51

3.1 อุปกรณ์การทดลอง.......... 51

3.1.1 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์ไร้วิกค์แบบไหลครบวงจร.......... 51

3.1.2 ชุดทดสอบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์ที่สร้างขึ้น.......... 57

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดและการปรับเทียบ.......... 67

3.2.1 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ.......... 67

3.2.2 การวัดความเร็วลม.......... 74

3.3 ขั้นตอนการทำการทดลอง.......... 76

3.3.1 การเติมของไหลใช้งาน.......... 76

3.3.2 การทดสอบสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์ที่สร้างขึ้น.......... 78

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง.......... 78

4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดสอบสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่สร้างขึ้น.......... 79

4.1 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะ.......... 79

4.2 อัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่อง.......... 80

4.2.1 ผลของตัวเลขเรย์โนลด์ต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน.......... 81

4.2.2 ผลของปริมาณของของไหลใช้งานต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน.......... 82

4.3 ผลที่อัตราการไหลของของไหลภายนอกมีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม.......... 82

4.4 ผลที่ผลต่างอุณหภูมิเชิงลอการิทึมมีต่อสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน.......... 83

หน้า

4.4.1 ผลของผลต่างอุณหภูมิเชิงลอการิทึม $(\Delta T)_{lm}$ ต่อค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนรวม.......... 83
4.4.2 ผลที่ผลต่างอุณหภูมิเชิงลอการิทึมมีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม.......... 84
4.5 การเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์ที่สร้างขึ้น.................... 85
4.6 การหาสหสัมพันธ์เพื่อใช้ทำนายค่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน.................... 85
5 สรุปผลการวิจัย อุปสรรค และแนวทางวิจัยในอนาคต.......... 116
เอกสารอ้างอิง.................... 118
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก : ตัวอย่างการคำนวณ.................... 123
ภาคผนวก ข : ข้อมูลการทดลอง.................... 130
ภาคผนวก ค : โปรแกรมการคำนวณผลการทดลอง.......... 166
ประวัติผู้เขียน.................... 169

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	เอกสารวิจัยที่เกี่ยวกับฮีทไปป์ของต่างประเทศ................	6
2.1	ช่วงอุณหภูมิใช้งานที่เหมาะสมของของไหลใช้งานชนิดต่างๆ.....	13
2.2	ค่าตัวเลขเมอริท (M) ที่จุดเดือดของของไหลใช้งานในช่วงอุณหภูมิระหว่าง -200 ถึง 1500 องศาเซลเซียส...........	17
2.3ก,ข	ตารางแสดงความเข้ากันได้ของวัสดุท่อกับของไหลใช้งาน......	20
2.4	ค่าของสัมประสิทธิ์ C_s และ m ของสมการที่ 2.6 สำหรับคู่ของวัสดุและของไหล...........................	41
2.5	ค่าของสัมประสิทธิ์ C_{sf} สำหรับสมการที่ 2.8 ของคู่ระหว่างของเหลวกับพื้นผิววัสดุ.........................	44
4.1	เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์ชนิดครบวงจร..................	79
4.2	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมโดยประมาณสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดต่างๆในกรณีถ่ายเทความร้อนจากอากาศสู่อากาศที่ความดัน 1 บาร์..........................	86
4.3	สรุปค่าของความชันของความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างอุณหภูมิเชิงลอการิทึมกับอัตราการถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม..............................	87
4.4	ค่าความชันและจุดตัดแกนของความสัมพันธ์ log Re^* กับ $\log(UA/(\Delta T)_{ln}^{n})$ สำหรับกรณีปริมาณของไหลใช้งานต่างๆ...	87
4.5	ค่าของค่าคงที่ a, b และ c ของสมการที่ 4.5 สำหรับปริมาณของไหลใช้งานต่างๆ........................	110

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	ฮีทไปป์และฮีทไปป์ไร้วิกค์ (เทอร์โมไซฟอน)........	5
1.2	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์..................	6
2.1	ความดันไอที่อุณหภูมิต่างๆของของไหลใช้งาน..............	15
2.2	ค่าตัวเลขเมอริทของของไหลใช้งานที่อุณหภูมิจุดเดือด........	17
2.3	ความหนาแน่นของวัสดุที่ใช้ทำท่อชนิดต่างๆ................	21
2.4	ความสัมพันธ์ระหว่าง (ρ/f_u) กับอุณหภูมิ....................	22
2.5	ค่า (kf_u) ที่อุณหภูมิการใช้งานต่างๆของวัสดุ..................	23
2.6	ส่วนประกอบต่างๆของฮีทไปป์ทั่วไป.........................	24
2.7	วิธีเชื่อมต่อหมวกปิดท่อแบบต่างๆ..........................	25
2.8	แผนผังขั้นตอนการสร้างฮีทไปป์.............................	26
2.9	วิธีผลิตฮีทไปป์แบบให้ความร้อนโดยตรง.....................	31
2.10	วิธีผลิตฮีทไปป์แบบใช้ออยบาธ..............................	31
2.11	ขั้นตอนการสร้างฮีทไปป์โดยใช้ปั๊มสูญญากาศแบบที่ 1.........	32
2.12	ระบบการผลิตฮีทไปป์โดยใช้ปั๊มสูญญากาศแบบที่ 1............	33
2.13	ระบบการผลิตฮีทไปป์โดยใช้ปั๊มสูญญากาศแบบที่ 2............	34
2.14	แบบจำลองการส่งผ่านความร้อนโดยการนำ..................	37
2.15	Correction factor C_3 ของสมการที่ 2.7........................	41
2.16	แบบจำลองการส่งผ่านความร้อนแบบ Liquid-Coupled Indirect type..	48
3.1	ไดอะแกรมแสดงชุดทดสอบสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์..	52
3.2	ภาพแสดงลักษณะการประกอบท่อและครีบเข้าด้วยกันของหม้อน้ำรถยนต์ที่นำมาใช้..	53
3.3	ภาพของ Multilouver Fin..	53
3.4	ภาพของหม้อน้ำรถยนต์ก่อนการดัดแปลง........................	54
3.5	ภาพของหม้อน้ำรถยนต์หลังการดัดแปลง........................	55

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่		หน้า

3.6 ภาพติดตั้งแผงฮีทไปป์ด้านการระเหยเข้ากับแผงฮีทไปป์ด้านการควบแน่น.......... 56
3.7 พัดลมที่ใช้สำหรับลมร้อนด้านการระเหย.......... 57
3.8 พัดลมที่ใช้สำหรับลมเย็นด้านการควบแน่น.......... 58
3.9 ไดอะแกรมแสดงภาพของเตาเผา.......... 59
3.10 ภาพของเตาเผาอากาศ.......... 60
3.11 ไดอะแกรมแสดงระบบทำสุญญากาศ.......... 60
3.12 ภาพของระบบทำสุญญากาศ.......... 61
3.13 ภาพของวาล์วผีเสื้อที่ใช้ในระบบทดสอบสมรรถนะ.......... 62
3.14 ตัวควบคุมความดันชนิดปรับได้และวาล์วปิด-เปิดอัตโนมัติซึ่งควบคุมโดยตัวควบคุมอุณหภูมิ.......... 64
3.15 หัวเผาและ Pilot burner.......... 65
3.16 แผงควบคุมและแสดงผลของอุณหภูมิที่จุดต่างๆของระบบทดสอบ... 66
3.17 ไดอะแกรมแสดงการต่อเทอร์โมไพล์.......... 68
3.18 ไดอะแกรมแสดงการปรับเทียบ.......... 69
3.19 ภาพการปรับเทียบ.......... 69
3.20 กราฟแสดงผลของการปรับเทียบเทอร์โมไพล์ชุด A ซึ่งใช้กับทางด้านร้อน.......... 71
3.21 กราฟแสดงผลของการปรับเทียบเทอร์โมไพล์ชุด B ซึ่งใช้กับทางด้านเย็น.......... 72
3.22 ภาพแสดงชุดการติดตั้งชุดเทอร์โมไพล์ภายในท่อ.......... 73
3.23 ภาพแสดงชุดการติดตั้งชุดเทอร์โมไพล์ภายนอกท่อ.......... 73
3.24 ไดอะแกรมแสดงการปรับเทียบมาโนมิเตอร์เพื่อใช้ในการวัดความเร็วลม.......... 74
3.25 กราฟแสดงการปรับเทียบมาโนมิเตอร์ด้านการระเหย.......... 75
3.26 กราฟแสดงการปรับเทียบมาโนมิเตอร์ด้านการควบแน่น.......... 75
3.27 ภาพของมาโนมิเตอร์เพื่อใช้วัดความเร็วลม.......... 76
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยกับตัวเลขเรย์โนลด์ด้านร้อนที่ปริมาณของไหลใช้งาน 40 เปอร์เซนต์..... 88

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่		หน้า
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยกับตัวเลขเรย์โนลด์ด้านร้อนที่ปริมาณของไหลใช้งาน 55 เปอร์เซนต์.....	89
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยกับตัวเลขเรย์โนลด์ด้านร้อนที่ปริมาณของไหลใช้งาน 70 เปอร์เซนต์.....	90
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยกับตัวเลขเรย์โนลด์ด้านร้อนที่ปริมาณของไหลใช้งาน 90 เปอร์เซนต์.....	91
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยกับตัวเลขเรย์โนลด์ด้านเย็นที่ปริมาณของไหลใช้งาน 40 เปอร์เซนต์.....	92
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยกับตัวเลขเรย์โนลด์ด้านเย็นที่ปริมาณของไหลใช้งาน 55 เปอร์เซนต์.....	93
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยกับตัวเลขเรย์โนลด์ด้านเย็นที่ปริมาณของไหลใช้งาน 70 เปอร์เซนต์.....	94
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยกับตัวเลขเรย์โนลด์ด้านเย็นที่ปริมาณของไหลใช้งาน 90 เปอร์เซนต์.....	95
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมกับตัว-เลขเรย์โนลด์ด้านเย็นที่ปริมาณของไหลใช้งาน 90 เปอร์เซนต์..	96
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมกับตัว-เลขเรย์โนลด์ด้านร้อนที่ปริมาณของไหลใช้งาน 90 เปอร์เซนต์..	97
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยกับผลต่างอุณหภูมิเชิงลอการิทึมที่มีปริมาณของไหลใช้งาน 40 เปอร์เซนต์..	98
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยกับผลต่างอุณหภูมิเชิงลอการิทึมที่มีปริมาณของไหลใช้งาน 55 เปอร์เซนต์..	99
4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยกับผลต่างอุณหภูมิเชิงลอการิทึมที่มีปริมาณของไหลใช้งาน 70 เปอร์เซนต์..	100
4.14	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยกับผลต่างอุณหภูมิเชิงลอการิทึมที่มีปริมาณของไหลใช้งาน 90 เปอร์เซนต์..	101
4.15	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมกับผลต่างอุณหภูมิเชิงลอการิทึมที่มีปริมาณของไหลใช้งาน 40 เปอร์เซนต์..	102
4.16	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมกับผลต่างอุณหภูมิเชิงลอการิทึมที่มีปริมาณของไหลใช้งาน 55 เปอร์เซนต์..	103

รูปที่		หน้า
4.17	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมกับผลต่างอุณหภูมิเชิงลอการิทึมที่มีปริมาณของไหลใช้งาน 70 เปอร์เซนต์..	104
4.18	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมกับผลต่างอุณหภูมิเชิงลอการิทึมที่มีปริมาณของไหลใช้งาน 90 เปอร์เซนต์..	105
4.19	ความสัมพันธ์ระหว่าง $UA/(T)_h^{a}$ กับ Re^* ที่มีปริมาณของไหลใช้งาน 40 เปอร์เซนต์................................	106
4.20	ความสัมพันธ์ระหว่าง $UA/(T)_h^{a}$ กับ Re^* ที่มีปริมาณของไหลใช้งาน 55 เปอร์เซนต์................................	107
4.21	ความสัมพันธ์ระหว่าง $UA/(T)_h^{a}$ กับ Re^* ที่มีปริมาณของไหลใช้งาน 70 เปอร์เซนต์................................	108
4.22	ความสัมพันธ์ระหว่าง $UA/(T)_h^{a}$ กับ Re^* ที่มีปริมาณของไหลใช้งาน 90 เปอร์เซนต์................................	109
4.23	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ a, b และ c ของสมการที่ 4.5 กับปริมาณของของไหลใช้งาน..............................	110
4.24	เปรียบเทียบค่า UA_{exp} กับ UA ที่ได้จากการคำนวณที่มีปริมาณของไหลใช้งาน 40 เปอร์เซนต์.........................	112
4.25	เปรียบเทียบค่า UA_{exp} กับ UA ที่ได้จากการคำนวณที่มีปริมาณของไหลใช้งาน 55 เปอร์เซนต์.........................	113
4.26	เปรียบเทียบค่า UA_{exp} กับ UA ที่ได้จากการคำนวณที่มีปริมาณของไหลใช้งาน 70 เปอร์เซนต์.........................	114
4.27	เปรียบเทียบค่า UA_{exp} กับ UA ที่ได้จากการคำนวณที่มีปริมาณของไหลใช้งาน 90 เปอร์เซนต์.........................	115

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย