

การสร้างและทดลองสมรรถนะ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์  
และพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับคำนวณออกแบบ



นายพิชัย ตั้งสถาพรพาณิชย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2529

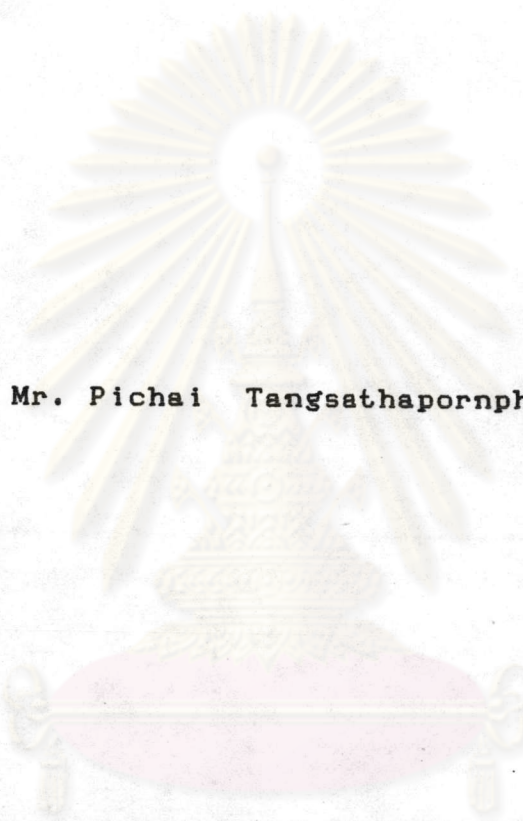
ISBN 974 - 567 - 316 - 1

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I16667153

012508

**Fabrication & Performance Test of Heat-Pipe Heat Exchanger and  
Development of Its Computer Design Program**



**Mr. Pichai Tangsathapornphanich**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering  
Department of Chemical Engineering**

**Graduate School**

**Chulalongkorn University**

**1986**

**ISBN 974 - 567 - 316 - 1**

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การสร้างและทดลองสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์  
 และพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับคำนวณออกแบบ  
 โดย นายฉิชัย ตั้งสถาพรพาณิชย์  
 ภาควิชา วิศวกรรมเคมี  
 อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ ตันทะพานิชกุล



บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็น  
 ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

*[Signature]*  
 .....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
 (ศาสตราจารย์ ดร. ถาวร วัชรากัญ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

*[Signature]* .....ประธานกรรมการ  
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศศิธร บุญหลง)

*[Signature]* .....กรรมการ  
 (รองศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ ตันทะพานิชกุล)

*[Signature]* .....กรรมการ  
 (รองศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม วาณิชเสนี)

*[Signature]* .....กรรมการ  
 (รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย สุภาบุญจันจิติ)

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การสร้างและทดลองสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์ และพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับคำนวณออกแบบ

ชื่อนิสิต

นายพิชัย ตั้งสถาพรพาณิชย์

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ ตันตะพานิชกุล

ภาควิชา

วิศวกรรมเคมี

ปีการศึกษา

2529



บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ศึกษากรรมวิธีสร้างท่อฮีทไปป์แบบไร้วิกค์ขึ้นเองในห้องทดลอง โดยมุ่งเน้นกรรมวิธีที่เอื้ออำนวยการสร้างฮีทไปป์ไร้วิกค์จำนวนมากในเวลาสั้น (mass production) กรรมวิธีที่พัฒนาขึ้นนี้ให้ความร้อนต่อท่อฮีทไปป์ไร้วิกค์โดยใช้ออยบาช (oil bath) ฮีทไปป์ไร้วิกค์ที่สร้างขึ้นเป็นท่อแก้วแข็ง เส้นผ่าศูนย์กลางภายในและภายนอกเป็น 8 และ 10 มม. ตามลำดับ และความยาว 37 ซม.  $\pm$  1 ซม. ของไหลใช้งานเป็นน้ำบริสุทธิ์ อุณหภูมิของออยบาชตั้งไว้คงที่ที่  $125^{\circ}\text{C}$  ได้ทดลองสร้างขึ้น 2 งวดทั้งหมดประมาณ 500 แห่ง จากผลการทดสอบปรากฏว่าใช้งานได้ร้อยละ 70 ส่วนเวลาที่ใช้ในการผลิตฮีทไปป์ไร้วิกค์เฉลี่ยแล้วประมาณ 3 คน-ชม./แห่ง นอกจากนี้ได้คิดหาพัฒนาทดสอบสมรรถนะขั้นต้นของแท่งฮีทไปป์โดยใช้ออยบาชที่อุณหภูมิคงที่  $90^{\circ}\text{C}$  และเทพวัดอุณหภูมิชนิด  $70^{\circ}\text{C}$  ในการจับเวลาตอบสนองของฮีทไปป์ที่ได้ ในการทดสอบสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่สภาวะคงที่ ได้เปลี่ยนมุมของแท่งฮีทไปป์ที่ 5, 25, 40, 70 และ 90 องศา พบว่าที่มุม 70 องศา ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์ที่ทดลองสร้างขึ้นมีทั้งหมด 2 เครื่อง เครื่องแรกมีจำนวนฮีทไปป์ 27 แห่ง จากนั้นได้ออกแบบปรับปรุงและสร้างเครื่องต้นแบบซึ่งมีฮีทไปป์ 240 แห่ง ในการทดสอบสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์ทั้ง 2 เครื่อง ได้ศึกษาการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลร้อนและเย็นซึ่งเป็นน้ำทั้งคู่ ในการทดลองสมรรถนะของเครื่องต้นแบบได้เปลี่ยนแปลงมุมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ 5, 25, 40, 70, และ 90 องศา และพบว่ามุม 90 องศาให้อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุด นอกจากนี้ได้ทดลองเปลี่ยนอัตราไหล

ของน้ำในเครื่องที่ 4, 7, 10, 13 และ 16 ลิตรต่อนาที และพบว่าที่อัตราความเร็วสูงอัตราการถ่ายเทความร้อนจะสูงขึ้นด้วย อนึ่ง อัตราไหลภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่ำ ทำให้เกิดการกระจายอุณหภูมิภายในเครื่องเป็นชั้น ๆ ในแนวตั้ง ซึ่งมีความซับซ้อนมาก และพบว่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของฟิล์มชั้นนอกมีค่าสูงสุด จึงเป็นตัวกำหนดอัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่อง ค่า UA เฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบมีค่าประมาณ 0.12 - 0.43 Watt/°C/ แท่งฮีทไปป์ และอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ 3 - 16 Watt/แท่งฮีทไปป์ ซึ่งยังต่ำกว่าขีดจำกัดสูงสุดในเชิงทฤษฎีมาก 270 - 570 Watt ที่อุณหภูมิ 30 - 80 °C การคำนวณสมรรถนะของฮีทไปป์ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้ใช้ทฤษฎีของการเดือดและทฤษฎีฟิล์มของนัสเซลท์มาคำนวณ และได้เขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับคำนวณออกแบบ



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Thesis Title            Fabrication & Performance Test of Heat-  
 Pipe Heat Exchanger and Development of  
 Its Computer Design Program

Name                     Mr. Pichai Tangsathapornphanich

Thesis Advisor        Associate Professor Wiwat Tanthapanichakoon,  
 Ph.D.

Department            Chemical Engineering

Academic Year        1986



### ABSTRACT

The present research investigated the fabrication method of wickless heat pipes in the laboratory with emphasis on one that would lend itself to mass production of wickless heat pipes. The developed method used an oil bath to provide heat to the wickless heat pipes. The wickless heat pipes were made of pyrex glass (inner and outer diameters 8 and 10 mm and length 37 cm  $\pm$  1 cm). The working fluid was pure water, and the temperature of the oil bath was kept constant at 125° C. Two batches of heat pipes, totaling about 500, were manufactured. From the test results it was found that 70% of the total number had acceptable performance. On the average it took about 3 man-hours to make one wickless heat pipe. In addition a preliminary performance test method was developed to classify the newly fabricated heat pipes. The method employed a constant-temperature oil bath at 90° C and 70° C temperature-sensitive tapes to measure the response time (heating time) of each heat pipe. From testing the steady-state heat transfer performance at various tilt angles (5, 25, 40, 70 and 90 degrees) it was found that the 70-degree tilt angle gave the highest heat transfer rate.

In all two heat-pipe heat exchangers were designed and constructed. The first one had 27 heat pipes. After some design improvement, an actual prototype containing 240 heat pipes was constructed. In testing the performance of both heat pipe heat exchangers, heat exchange between hot and cold fluids, both water, was carried out. In the performance test of the prototype the tilt angle of the exchanger was varied (5, 25, 40, 70 and 90 degrees) and it was found that the 90 degree tilt angle yielded the highest heat transfer rate. Furthermore, the flow rates of hot and cold water in the performance test were varied (4, 7, 10, 13 and 16 liters/min) and it was found that the higher the flow rates, the better the observed heat transfer rate. By the way, the flow rates in the exchanger were quite slow, and caused temperature distribution in the vertical direction (thermal stratification), thus resulting in high complexity. In addition it was found that the outside film resistance to heat transfer was highest and thus limited the heat transfer rate of the exchanger. The average values of UA obtained from the tests were approximately 0.12-0.43 Watt/°C/heat pipe and the average heat transfer rates were 3-16 Watt/heat pipe, which were considerably lower than the theoretical heat transfer limit of such wickless heat pipes (270-570 Watt at 30-80 °C). The heat transfer performance of heat pipes within the exchanger was calculated using the theory of pool boiling and of Nusselt film. A computer program for design calculation was also developed.



### กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้เขียนได้รับความกรุณาอย่างยิ่งจากรองศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำทางการวิจัย และให้ข้อคิดเห็นในการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ตลอดจนช่วยแก้ไข และเพิ่มเติมวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตั้งแต่ต้นจนสำเร็จเป็นรูปเล่ม ผู้เขียนขอกราบ ขอบพระคุณอาจารย์เป็นอย่างสูง

อนึ่ง งานวิจัยนี้ได้รับความสนับสนุนในบางส่วนหรือทั้งหมดจากแหล่ง เงินทุนต่อไปนี้คือ ทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทสาขาทั่วไป ประจำปี 2528 สำนักงาน คณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ทุนอุดหนุนโครงการนิทรรศการ จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ ในงานนิทรรศการวิชาการ จุฬาราชการ ' 27 ปี 2527 ทุนอุดหนุนการวิจัยจาก บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประจำปีภาคต้น ปีการศึกษา 2527 และ ทุนมูลนิธินิธิสิตเกล้าจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปี 2528

นอกจากนี้ ผู้เขียนขอขอบพระคุณท่านอาจารย์และเพื่อนอีกหลายท่านที่ ไม่ได้กล่าวนามไว้ในที่นี้ ที่ได้ช่วยเหลือและให้คำแนะนำในการทำวิจัยนี้.

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





## สารบัญ

|                          |   |
|--------------------------|---|
| บทคัดย่อภาษาไทย .....    | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... | ฉ |
| กิตติกรรมประกาศ .....    | ช |
| สารบัญตาราง .....        | ฆ |
| สารบัญภาพ .....          | ค |
| คำอธิบายสัญลักษณ์ .....  | ข |

### บทที่

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | บทนำ   |    |
| 1.1   | ความสำคัญและที่มาของการวิจัย .....                                       | 1  |
| 1.2   | วัตถุประสงค์ของโครงการ .....   | 8  |
| 1.3   | ขอบเขตของการวิจัย .....  | 8  |
| 1.4   | ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย .....                                       | 8  |
| 1.5   | ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยนี้ .....                            | 9  |
| 1.6   | เอกสารและผลงานวิจัยในอดีต .....  | 9  |
| 1.6.1 | เอกสารบทความที่กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการทั่วไป<br>ของอีทไปป์ไร้วิกค์ ..... | 9  |
| 1.6.2 | เอกสารบทความที่เกี่ยวกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน<br>แบบอีทไปป์ .....    | 14 |
| 2     | การสร้างอีทไปป์ไร้วิกค์  |    |
| 2.1   | การกำหนดเงื่อนไขในการสร้างอีทไปป์ไร้วิกค์ .....                          | 19 |
| 2.2   | การสร้างอีทไปป์ไร้วิกค์  |    |
| 2.2.1 | รายละเอียดของอีทไปป์ไร้วิกค์ที่สร้างขึ้น .....                           | 20 |
| 2.2.2 | ออยบารที่ใช้ในการสร้างอีทไปป์ .....                                      | 21 |
| 2.2.3 | ขั้นตอนในการสร้างอีทไปป์ไร้วิกค์ .....                                   | 23 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 2.3   | อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะ .....                                     | 24 |
| 2.4   | การทดสอบสมรรถนะฮีทไปป์ไร้วิกค์   |    |
| 2.4.1 | การทดสอบขั้นตอน .....  | 26 |
| 2.4.2 | การทดสอบสมรรถนะของฮีทไปป์ 1 แท่ง .....                                   | 30 |
| 2.4.3 | ผลการทดสอบสมรรถนะละเอียด .....   | 30 |
| 2.5   | การผลิตฮีทไปป์ในจำนวนมาก ๆ และการคัดเลือกฮีทไปป์ ...                     | 49 |
| 3     | การออกแบบและสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์                     |    |
| 3.1   | การออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน .....                                 | 50 |
| 3.2   | การสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์เครื่องแรก .                  | 52 |
| 3.3   | การทดลองสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์เครื่องแรก .....    | 54 |
| 3.4   | การออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเครื่องที่สอง (เครื่องต้นแบบ) .....    | 58 |
| 3.5   | การประกอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต้นแบบ .....                           | 60 |
| 3.6   | ระบบทดสอบสมรรถนะของเครื่องต้นแบบ .....                                   | 60 |
| 4     | การทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์                              |    |
| 4.1   | ขั้นตอนในการทดลอง .....  | 63 |
| 4.2   | เงื่อนไขที่ทำการทดลอง .....  | 63 |
| 4.3   | ผลการทดลอง .....   | 63 |
| 5     | การวิเคราะห์ผลการทดลองของฮีทไปป์ไร้วิกค์ 1 แท่ง                          |    |
| 5.1   | ทฤษฎีสำหรับวิเคราะห์สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของฮีทไปป์ไร้วิกค์ 1 แท่ง    |    |
| 5.1.1 | การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของฮีทไปป์ไร้วิกค์ 1 แท่ง ..... | 76 |
| 5.1.2 | ตัวอย่างการคำนวณหาค่า $UA_{2,e}$ .....                                   | 83 |

|     |  |     |
|-----|--|-----|
| 5.2 | การวิเคราะห์ผลการทดสอบสมรรถนะของฮีทปั๊มไวัวิกค์ 1 แห่ง   | 88  |
| 5.3 | ลักษณะการถ่ายเทความร้อนของฮีทปั๊มไวัวิกค์ 1 แห่ง กับ<br>มมเอียง .....                                    | 94  |
| 5.4 | การกระจายอุณหภูมิผิววนอกของฮีทปั๊มไวัวิกค์ 1 แห่ง .....  | 94  |
| 5.5 | การหาขีดจำกัดการถ่ายเทความร้อนจากทฤษฎี .....   | 94  |
| 6   | การวิเคราะห์ผลการทดลองและพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับ<br>คำนวณออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทปั๊ม |     |
| 6.1 | การคำนวณออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทปั๊ม ...  | 96  |
| 6.2 | วิธีวิเคราะห์คำนวณโดยอาศัยรูปจำลองการนำความร้อน .....  | 96  |
| 6.3 | วิธีวิเคราะห์โดยอาศัยความสัมพันธ์ของ E-NTU .....   | 100 |
| 6.4 | การวิเคราะห์ผลการทดลองสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยน<br>ความร้อนแบบฮีทปั๊ม .....                            | 106 |
| 6.5 | ตัวอย่างการคำนวณโจทย์แบบที่ 2 .....  | 110 |
| 6.6 | ตัวอย่างการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทปั๊ม<br>ไวัวิกค์ในอุตสาหกรรม .....                       | 116 |
| 6.7 | โปรแกรมคอมพิวเตอร์ .....   | 133 |
| 7   | สรุปผลการวิจัย อุปสรรค และแนวทางวิจัยในอนาคต   |     |
| 7.1 | สรุปผลการวิจัย .....   | 136 |
| 7.2 | อุปสรรค และปัญหาในการวิจัย .....   | 139 |
| 7.3 | ข้อเสนอแนะและแนวทางการวิจัยต่อไป .....   | 140 |
|     | บรรณานุกรม .....   | 141 |
|     | ภาคผนวก  |     |
|     | ก. การออกแบบฮีทปั๊มไวัวิกค์  |     |
|     | ก.1 การเลือกส่วนประกอบต่าง ๆ ของฮีทปั๊มไวัวิกค์ .....  | 145 |
|     | ก.1.1 การเลือกของไหลใช้งาน .....   | 146 |
|     | ก.1.1.1 คุณสมบัติของของไหลใช้งาน ...   | 146 |
|     | ก.1.1.2 ตัวเลขเมอริท .....   | 147 |

|            |  |     |
|------------|--|-----|
| ก.1.2      | การเลือกวัสดุท่อ .....                         | 148 |
| ก.1.2.1    | ความเข้ากันได้ .....                           | 148 |
| ก.1.2.2    | น้ำหนักและผลลตของอุณหภูมิของ<br>วัสดุ .....    | 149 |
| ก.1.2.2.1  | น้ำหนักของวัสดุท่อ                             | 149 |
| ก.1.2.2.2  | ผลลตของอุณหภูมิ                                | 150 |
| ก.1.3      | ขั้นตอนการเลือกส่วนประกอบทั้ง 2 ส่วน ...       | 151 |
| ก.2        | การออกแบบอีทไพบ์                               |     |
| ก.2.1      | การกำหนดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่ออีทไพบ์ ..       | 151 |
| ก.2.2      | การเลือกและคำนวณออกแบบท่ออีทไพบ์ ....          | 153 |
| ก.3        | การสร้างอีทไพบ์ไร้วิกค์ .....                  | 157 |
| ก.3.1      | ส่วนประกอบของอีทไพบ์ไร้วิกค์ .....             | 157 |
| ก.3.2      | การทำความสะอาดส่วนประกอบต่าง ๆ ....            | 159 |
| ก.3.2.1    | การทำความสะอาดส่วนประกอบ<br>ที่เป็นโลหะ .....  | 159 |
| ก.3.2.2    | การทำความสะอาดของไหลใช้งาน                     | 161 |
| ก.3.3      | ขั้นตอนประกอบอีทไพบ์ .....                     | 162 |
| ก.3.4      | การเติมของไหลใช้งานและการทำสุญญากาศ            |     |
| ก.3.4.1    | แบบให้ความร้อนโดยตรงต่ออีทไพบ์                 | 163 |
| ก.3.4.2    | แบบให้ความร้อนต่ออีทไพบ์โดยใช่<br>ออยขาจ ..... | 164 |
| ก.3.4.3    | การใช้ปั้มสุญญากาศแบบที่ 1 ...                 | 165 |
| ก.3.4.4    | การใช้ปั้มสุญญากาศแบบที่ 2 ...                 | 167 |
| ก.3.5      | การปิดผนึกท่ออีทไพบ์ .....                     | 169 |
| ข.         | ค่าคงที่ต่าง ๆ และหน่วยเปรียบเทียบ .....       | 170 |
| ค.         | คุณสมบัติของน้ำ และวัสดุของแข็ง .....          | 173 |
| ง.         | โปรแกรมคอมพิวเตอร์ .....                       | 181 |
| ชีวประวัติ | .....  | 187 |

ตารางที่

|     |   |     |
|-----|---|-----|
| 1.1 | การนำกลับของเหลวควบแน่นด้วยวิธีต่าง ๆ .....   | 3   |
| 1.2 | การเปรียบเทียบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในการเก็บ<br>ความร้อนคืนที่อุณหภูมิสูง ..... | 7   |
| 2.1 | ผลการทดสอบฮีทไปป์ไร้วิกซ์ขั้นต้นโดยใช้เทปวัดอุณหภูมิ 60 ° C<br>และ 70 ° C .....           | 27  |
| 2.2 | ผลการทดสอบฮีทไปป์ไร้วิกซ์ขั้นต้นโดยใช้เทปวัดอุณหภูมิ 70 ° C .....                         | 29  |
| 3.1 | ผลการทดสอบการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ<br>ฮีทไปป์เครื่องแรก .....              | 58  |
| ก.1 | ชนิดของไหลใช้งานที่ช่วงอุณหภูมิใช้งานต่าง ๆ .....   | 148 |
| ก.2 | ความเข้ากันได้ระหว่างของไหลใช้งานกับวัสดุท่อ .....  | 148 |
| ข.1 | ค่าคงที่ในสมการของ Zukausk .....  | 170 |
| ข.2 | หน่วยเปรียบเทียบต่าง ๆ .....  | 171 |
| ข.3 | ค่าคงที่ .....  | 172 |
| ค.1 | ความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ .....  | 173 |
| ค.2 | ความจุความร้อนของน้ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ .....   | 174 |
| ค.3 | ความนำความร้อนของน้ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ .....   | 175 |
| ค.4 | ความหนืดของน้ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ .....   | 176 |
| ค.5 | คุณสมบัติของน้ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ .....  | 176 |
| ค.6 | คุณสมบัติของไอน้ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ .....  | 177 |
| ค.7 | คุณสมบัติทางกายภาพของแก้ว Pyrex .....   | 180 |

## สารบัญภาพ

## รูปที่

|      |  |    |
|------|--|----|
| 1.1  | หลักการทํางานของฮีทไปป์ .....  | 1  |
| 1.2  | หลักการทํางานของเทอร์โมโซฟอน .....   | 2  |
| 1.3  | โครงสร้างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์ .....  | 4  |
| 2.1  | ไดอะแกรมของออยบาสที่ใช้ .....  | 21 |
| 2.2  | ขนาดของส่วนต่าง ๆ ของออยบาส .....  | 22 |
| 2.3  | ออยบาสและการหลอมแก้ว .....   | 23 |
| 2.4  | ฮีทไปป์ไวัวิก์ที่ผลิตขึ้นเอง .....   | 25 |
| 2.5  | ระบบทดสอบสมรรถนะของฮีทไปป์ไวัวิก์ .....  | 26 |
| 2.6  | อัตราการถ่ายเทความร้อน ( $Q_{out}$ ) และ UA กับเวลาเมื่อให้กำลังไฟฟ้า 13 Watt .....                              | 32 |
| 2.7  | อุณหภูมิเฉลี่ย ส่วนระเหย ส่วนกลั่นตัว และผลต่างส่วนระเหย กับส่วนกลั่นตัวกับเวลา เมื่อให้กำลังไฟฟ้า 13 Watt ..... | 33 |
| 2.8  | อัตราการถ่ายเทความร้อน ( $Q_{out}$ ) และ UA กับเวลาเมื่อให้กำลังไฟฟ้า 20 Watt .....                              | 34 |
| 2.9  | อุณหภูมิเฉลี่ยส่วนระเหย ส่วนกลั่นตัว และผลต่างส่วนระเหย กับส่วนกลั่นตัวกับเวลา เมื่อให้กำลังไฟฟ้า 20 Watt .....  | 35 |
| 2.10 | อัตราการถ่ายเทความร้อน ( $Q_{out}$ ) และ UA กับเวลาเมื่อให้กำลังไฟฟ้า 40 Watt .....                              | 36 |
| 2.11 | อุณหภูมิเฉลี่ยส่วนระเหย ส่วนกลั่นตัว และผลต่างส่วนระเหย กับส่วนกลั่นตัวกับเวลา เมื่อให้กำลังไฟฟ้า 40 Watt .....  | 37 |
| 2.12 | การกระจายอุณหภูมิผิวแท่งฮีทไปป์ที่มุมเอียง $90^{\circ}$ เมื่อให้กำลังไฟฟ้า 13 Watt .....                         | 38 |
| 2.13 | การกระจายอุณหภูมิผิวแท่งฮีทไปป์ที่มุมเอียง $90^{\circ}$ เมื่อให้กำลังไฟฟ้า 20 Watt .....                         | 39 |
| 2.14 | การกระจายอุณหภูมิผิวแท่งฮีทไปป์ที่มุมเอียง $90^{\circ}$ เมื่อให้กำลังไฟฟ้า 40 Watt .....                         | 40 |
| 2.15 | การกระจายอุณหภูมิผิวแท่งฮีทไปป์ที่มุมเอียง $90^{\circ}$ เมื่อให้กำลังไฟฟ้า 80 Watt .....                         | 41 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 2.16 | การกระจายอุณหภูมิผิวแท่งฮีทไปป์ที่มุมเอียง 90° เมื่อส่วน<br>ระเหยอยู่ในน้ำที่อุณหภูมิ 150° ส่วน adiabatic อยู่ใน<br>ไอน้ำมัน ..... | 42 |
| 2.17 | การกระจายอุณหภูมิผิวแท่งฮีทไปป์ที่มุมเอียง 5° เมื่อให้กำลัง<br>ไฟฟ้า 40 Watt .....   | 43 |
| 2.18 | การกระจายอุณหภูมิผิวแท่งฮีทไปป์ที่มุมเอียง 25° เมื่อให้กำลัง<br>ไฟฟ้า 40 Watt .....  | 44 |
| 2.19 | การกระจายอุณหภูมิผิวแท่งฮีทไปป์ที่มุมเอียง 40° เมื่อให้กำลัง<br>ไฟฟ้า 40 Watt .....  | 45 |
| 2.20 | การกระจายอุณหภูมิผิวแท่งฮีทไปป์ที่มุมเอียง 70° เมื่อให้กำลัง<br>ไฟฟ้า 40 Watt .....  | 46 |
| 2.21 | ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทออกมากับ<br>มุมเอียงของแท่งฮีทไปป์ (ชุดที่ 1) .....                                      | 47 |
| 2.22 | ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทออกมากับ<br>มุมเอียงของแท่งฮีทไปป์ (ชุดที่ 2) .....                                      | 48 |
| 3.1  | การจัดเรียงตัวของกลุ่มท่อที่วางในแนวเดียวกัน (in line)<br>และวางเรียงเหลื่อมแนวกัน (staggered) .....                               | 51 |
| 3.2  | เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์เครื่องแรกพร้อมระบบ<br>ติดตั้ง .....  | 54 |
| 3.3  | ไดอะแกรมของระบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์   | 55 |
| 3.4  | เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต้นแบบ .....  | 59 |
| 3.5  | เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์พร้อมระบบติดตั้งอื่น ๆ  | 61 |
| 3.6  | ไดอะแกรมของระบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์ .   | 62 |
| 4.1  | ช่วงการควบแน่นของฮีทไปป์ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ..   | 65 |
| 4.2  | ช่วงการระเหยของฮีทไปป์ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ...  | 65 |
| 4.3  | ความสัมพันธ์ระหว่าง $UA_{1,7}$ กับอัตราไหล .....   | 66 |
| 4.4  | ความสัมพันธ์ระหว่าง $UA_{1,7}$ กับ $Re$ .....  | 67 |
| 4.5  | ความสัมพันธ์ระหว่าง $UA_{1,7}$ กับมุม .....  | 68 |
| 4.6  | การกระจายอุณหภูมิผิวแท่งฮีทไปป์ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน<br>ที่มุม 90° อัตราไหล 4 ลิตร/นาที .....                                | 69 |
| 4.7  | ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทออกมา ( $Q_{out}$ )<br>กับอุณหภูมิ (°C) ที่มุมวาง 90° อัตราไหล 13 ลิตร/นาที ..           | 70 |

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 4.8  | การกระจายของอุณหภูมิผิวแท่งฮีทไปป์ในเครื่องแลกเปลี่ยน<br>ความร้อนที่มุม $5^{\circ}$ อัตราไหลต่าง ๆ กัน .....   | 71  |
| 4.9  | การกระจายของอุณหภูมิผิวแท่งฮีทไปป์ในเครื่องแลกเปลี่ยน<br>ความร้อนที่มุม $25^{\circ}$ อัตราไหลต่าง ๆ กัน .....  | 72  |
| 4.10 | การกระจายของอุณหภูมิผิวแท่งฮีทไปป์ในเครื่องแลกเปลี่ยน<br>ความร้อนที่มุม $40^{\circ}$ อัตราไหลต่าง ๆ กัน .....  | 73  |
| 4.11 | การกระจายของอุณหภูมิผิวแท่งฮีทไปป์ในเครื่องแลกเปลี่ยน<br>ความร้อนที่มุม $70^{\circ}$ อัตราไหลต่าง ๆ กัน .....  | 74  |
| 4.12 | การกระจายของอุณหภูมิผิวแท่งฮีทไปป์ในเครื่องแลกเปลี่ยน<br>ความร้อนที่มุม $90^{\circ}$ อัตราไหลต่าง ๆ กัน .....  | 75  |
| 5.1  | แบบจำลองการส่งผ่านความร้อน .....   | 77  |
| 5.2  | ความสัมพันธ์ของข้อมูลจากการทดลองระหว่างน้ำกับแก้วใน<br>แท่งฮีทไปป์ไร้วิกค์ .....   | 89  |
| 5.3  | $UA_{2,3}$ จากการทดลองและ $UA_{2,3}$ จากการคำนวณ .....   | 90  |
| 5.4  | ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อน ( $Q_{out}$ )<br>กับผลต่างอุณหภูมิที่ผิวช่วงการระเหยและช่วงการควบแน่น ...  | 91  |
| 5.5  | ความสัมพันธ์ของ Nu กับ Re ที่ได้จากการทดลอง .....  | 93  |
| 6.1  | แบบจำลองการส่งผ่านความร้อนเป็น liquid coupled<br>indirect type ของฮีทไปป์ 1 แท่ง .....   | 100 |
| 6.2  | ฮีทไปป์วางเรียงกัน n แถว .....   | 104 |
| 6.3  | เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน .....  | 108 |
| 6.4  | อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ที่ระดับเดียวกัน ภายในเครื่องแลกเปลี่ยน<br>ความร้อนที่อัตราไหล 4 ลิตร/นาที มุม $90$ องศา ...                                      | 108 |
| 6.5  | แสดงอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ที่ระดับต่างกัน (ตั้งฉากกับ<br>ทิศทางการไหล) ภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่อัตราไหล<br>4 ลิตร/นาที มุมเอียง $5$ องศา ..... | 108 |
| 6.6  | ความสัมพันธ์ระหว่าง Nu กับ Re .....  | 109 |
| 6.7  | การติดครีปและการจัดวางท่อ .....  | 118 |
| ก.1  | ขั้นตอนการออกแบบฮีทไปป์ไร้วิกค์ .....  | 145 |
| ก.2  | ค่าตัวเลขเมอริทของของไหลใช้งานที่อุณหภูมิจุดเดือด .....  | 147 |
| ก.3  | ความสัมพันธ์ระหว่าง ( $\rho / \rho_{in}$ ) กับอุณหภูมิ .....   | 149 |
| ก.4  | ค่า ( $K \rho_{in}$ ) ที่อุณหภูมิการใช้งานต่าง ๆ ของวัสดุ .....  | 150 |



|       |   |     |
|-------|---|-----|
| ก. 5  | การออกแบบเส้นผ่าศูนย์กลางของย่านผ่านไอ .....            | 152 |
| ก. 6  | ความดันไอที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของของไหลในใช้งาน .....      | 155 |
| ก. 7  | การออกแบบขนาดของท่อ .....                               | 158 |
| ก. 8  | การออกแบบขนาดของหมวกปิดท่อ .....                        | 158 |
| ก. 9  | ส่วนประกอบต่าง ๆ ของฮีทไพบ์ทั่วไป .....                 | 157 |
| ก. 10 | วิธีเชื่อมหมวกปิดท่อแบบต่าง ๆ .....                     | 158 |
| ก. 11 | แผนผังขั้นตอนการสร้างฮีทไพบ์ .....                      | 159 |
| ก. 12 | วิธีการผลิตฮีทไพบ์แบบให้ความร้อนโดยตรง .....            | 164 |
| ก. 13 | วิธีการผลิตฮีทไพบ์แบบใช้อออยบาธ .....                   | 164 |
| ก. 14 | ระบบการผลิตฮีทไพบ์โดยใช้ปั๊มสุญญากาศแบบที่ 1 .....      | 165 |
| ก. 15 | ลำดับขั้นตอนการสร้างฮีทไพบ์ .....                       | 167 |
| ก. 16 | ระบบการผลิตฮีทไพบ์โดยใช้ปั๊มสุญญากาศแบบที่ 2 .....      | 168 |
| ข. 1  | สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและความดันสูญเสียของครีป . | 170 |
| ข. 2  | ประสิทธิภาพของครีป .....                                | 172 |
| ค. 1  | ความดันใช้งานของแก้ว Pyrex ขนาดต่าง ๆ .....             | 180 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คำอธิบายสัญลักษณ์

|                  |   |
|------------------|---|
| A                | พื้นที่ (m <sup>2</sup> )   |
| A <sub>f</sub>   | พื้นที่ครีบ   |
| A <sub>b</sub>   | พื้นที่ท่อที่ไม่ติดครีบ   |
| A <sub>min</sub> | พื้นที่หน้าตัดที่น้อยที่สุดที่ของไหลไหลผ่านในเครื่องแลกเปลี่ยน<br>ความร้อน (minimum free flow area) |
| A <sub>1p</sub>  | พื้นที่ด้านในช่องมีของเหลวใช้งานบรรจุอยู่ในช่วงการระเหย   |
| A <sub>1f</sub>  | พื้นที่ด้านในช่องเป็นฟิล์มในช่วงการระเหย  |
| B                | ระยะห่างสุดระหว่างใจกลางของน็อต   |
| C                | อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยอุณหภูมิ (Kcal/sec °C, W/°C)  |
| C <sub>p</sub>   | ความจุความร้อน (Watt/Kg °C)   |
| C <sub>mf</sub>  | ค่าคงที่ ในสมการ Rohsenow   |
| d                | เส้นผ่าศูนย์กลาง (m)  |
| De               | Equivalent diameter (m, ft)   |
| E                | ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Effectiveness)   |
| F                | อัตราไหล (m <sup>3</sup> /sec, m <sup>3</sup> /hr)  |
| f <sub>max</sub> | ความเค้นสูงสุดที่ผนังท่อรับได้  |
| f <sub>u</sub>   | Ultimate tensile strength   |
| G <sub>max</sub> | อัตราไหลสูงสุดที่ไหลผ่าน A <sub>min</sub> (Kg/m <sup>2</sup> sec)                                   |
| g                | ความเร่งภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก (m/sec <sup>2</sup> )   |
| g <sub>c</sub>   | ตัวแปรหน่วย (980.7 gm-cm/gm <sub>f</sub> .sec <sup>2</sup> , 1 Kg.m/N.sec <sup>2</sup> )            |
| h                | สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (W/m <sup>2</sup> °C)   |
| H <sub>fg</sub>  | ความร้อนแฝงของการระเหย (J/Kg)   |
| J                | ตัวคูณแปลงหน่วย (69.67 ml x min x Watt)<br>1 cal  |
| J                | ตัวคูณประกอบการถ่ายเทความร้อน (heat transfer factor)  |
| k                | ความนำความร้อน (W/m °C)   |
| K                | ความนำความร้อน (W/ °C)  |
| L                | ความยาว (m)   |
| L <sub>hp</sub>  | ความสูงของของเหลวใช้งานในท่ออีกไปป์   |

|                   |  |
|-------------------|--|
| $L_p$             | the length of the path (ft)  |
| M                 | Merit number   |
| m                 | อัตราการไหล (Kg/sec)   |
| m                 | $C_{min} / C_{max}$  |
| $M_s$             | สัมประสิทธิ์ของปะเก็น  |
| $M_v$             | ตัวเลขแมคท์  |
| n                 | จำนวนแท่งฮีทไปป์   |
| Nu                | ตัวเลขนัสเซลท์ (Nusselt number)  |
| NTU               | จำนวนหน่วยแลกเปลี่ยนความร้อน (Number of transfer unit)                             |
| P                 | ความดัน  |
| Pr                | ตัวเลขแพรนด์ตัล (Prandlt number)   |
| Q                 | อัตราการถ่ายเทความร้อน (Kcal/sec)  |
| q                 | ฟลักซ์ความร้อนที่ส่งผ่าน (Watt)  |
| $Q_{sr}$          | อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด   |
| R                 | ค่าคงที่ของก๊าซ  |
| R                 | ความต้านทานการถ่ายเทความร้อน   |
| R                 | ตัวคูณประกอบของชั้นสกปรก (fouling factor)  |
| r                 | รัศมี (m)  |
| Re                | ตัวเลขเรย์โนลด์  |
| S                 | ความถ่วงจำเพาะ   |
| $S_d$             | ระยะทางระหว่างจุดศูนย์กลางท่อในแนวทแยงมุมกับทิศทางการไหล                           |
| $S_1$             | ระยะทางระหว่างจุดศูนย์กลางท่อในแนวเดียวกันกับทิศทางการไหล                          |
| $S_2$             | ระยะทางระหว่างจุดศูนย์กลางท่อในแนวตั้งฉากกันกับทิศทางการไหล                        |
| T                 | อุณหภูมิ   |
| t                 | ความหนา (m)  |
| $(\Delta T)_{lm}$ | ผลต่างอุณหภูมิเชิงลอการิทึม  |
| U                 | สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Watt/m <sup>2</sup> .°C)                         |
| $UA_{2.6}$        | สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมระหว่างผิวช่วงการระเหย และผิวช่วงการควบแน่น (W/°C) |
| v                 | ความเร็วของของไหล (m/sec)  |
| $\Delta$          | ผลต่าง   |

|          |             |                      |
|----------|-------------|----------------------|
| $\rho$   | ความหนาแน่น | (Kg/m <sup>3</sup> ) |
| $\sigma$ | แรงตึงผิว   | (N/m)                |
| $\mu$    | ความหนืด    | (Kg/m-sec)           |
| $\eta$   | ประสิทธิภาพ |                      |

Subscripts

|     |   |
|-----|---|
| B   | น้ำ   |
| c   | ของไหลเย็น  |
| ci  | ของไหลเย็นเข้า  |
| co  | ของไหลเย็นออก   |
| f   | ฟิล์ม   |
| g   | ก๊าซ  |
| h   | ของไหลร้อน  |
| hi  | ของไหลร้อนเข้า  |
| ho  | ของไหลร้อนออก   |
| i   | ด้านใน  |
| ic  | ผิวชั้นในระหว่างการควบแน่น                                  |
| ih  | ผิวชั้นในระหว่างการระเหย                                    |
| ihf | ฟิล์มด้านในของช่วงการระเหย                                  |
| ihp | ฟิล์มด้านในบริเวณที่มีของเหลวใช้งานบรรจุอยู่ของช่วงการระเหย |
| l   | ของเหลว   |
| o   | ด้านนอก   |
| oc  | ผิวชั้นนอกช่วงการควบแน่น                                    |
| oh  | ผิวชั้นนอกช่วงการระเหย                                      |
| p   | ฮีทไปป์ 1 แห่ง  |
| s   | ไออีมตัว  |
| t   | รวมทั้งหมด  |
| v   | ไอของเหลว   |
| wci | ผนังด้านในแห่งฮีทไปป์ในช่วงการควบแน่น                       |
| wco | ผนังด้านนอกแห่งฮีทไปป์ในช่วงการควบแน่น                      |
| whi | ผนังด้านนอกแห่งฮีทไปป์ในช่วงการระเหย                        |
| who | ผนังด้านนอกแห่งฮีทไปป์ในช่วงการระเหย                        |

Superscripts

|   |                      |          |
|---|----------------------|----------|
| r | ตัวเลขยกกำลังในสมการ | Rohsenow |
| s | ตัวเลขยกกำลังในสมการ | Rohsenow |



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย