สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับห้องปฏิบัติการ

ธีรพงศ์ พันธุ์ขนุน

วพ.
ธ 631 ท
2549

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....80868
วัน,เดือน,ปี.....23 พ.ค. 2551

b.....11841400
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Design of Heat Exchanger for a Laboratory

TEERAPONG PUNKANOON

A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับห้องปฏิบัติการ
จัดทำโดย	นายธีรพงศ์ พันธุ์ขนุน รหัสประจำตัว 47015534
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี	คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.นริศรา ทองบุญชู

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

_____ประธานกรรมการ
(ดร. นริศรา ทองบุญชู)

_____กรรมการ
(อ. บุญชัย โชติวิริยวาณิชย์)

_____กรรมการ
(ผศ.ดร. อภินันท์ นัมคณิสรณ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับห้องปฏิบัติการ
จัดทำโดย นายธีรพงศ์ พันธุ์ขนุน รหัสประจำตัว 47015534
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.นริศรา ทองบุญชู
ปริญญานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของโครงการนี้คือการออกแบบและสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับห้องปฏิบัติการ โดยระบบประกอบด้วยส่วนประกอบหลักที่สำคัญ 4 ส่วนคือ ส่วนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน อุปกรณ์ทำน้ำร้อน ระบบท่อ อุปกรณ์วัดการไหลและควบคุมอุณหภูมิ ในส่วนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนประกอบด้วยท่อสแตนเลสแบบมีครีบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 นิ้วยาว 3 เมตร และท่อสองชั้นที่ยาว 1 เมตรสองท่อที่ท่อภายในทำจากทองแดงและสเตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 นิ้ว ส่วนท่อด้านนอกทำจากท่อพีวีซีขนาด 1 นิ้ว ได้ทำการทดสอบสมรรถนะและตัวแปรที่มีผลกับสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยการทำให้น้ำร้อนที่ 65 องศาเซลเซียสเย็นตัวลง ในท่อแบบครีบ ได้มีการศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำร้อนในท่อในและอัตราการไหลของอากาศด้านนอกที่มีต่ออัตราการถ่ายเมความร้อน ในท่อสองชั้น ได้ทำการศึกษาการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำร้อนและน้ำเย็นโดยแปรเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำร้อนในท่อใน ทิศทางของการไหล โดยให้อัตราการไหลของน้ำเย็นคงที่ ผลจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งสองแบบแสดงให้เห็นว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนจะสูงขึ้นเมื่ออัตราการไหลของน้ำร้อนเพิ่มขึ้น ในท่อแแบบครีบ การเพิ่มอัตราการไหลของอากาศทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น ชนิดของท่อในไม่ค่อยมีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน อัตราการถ่ายเทความร้อนในท่อสองชั้นสำหรับการไหลสวนทางจะสูงกว่าการไหลแบบทางเดียว โดยทั่วไปอัตราการถ่ายเทความร้อนที่คำนวณได้ของท่อแบบครีบจะต่ำกว่าแบบท่อสองชั้น โดยมีค่า 276-475 และ 249-1104 วัตต์ สำหรับสำหรับท่อแบบครีบ และท่อสองชั้น ตามลำดับ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของท่อสองชั้นที่ประเมินได้อยู่ในช่วง 270-1230 วัตต์ต่อตารางเมตรต่อองศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title	Design of Heat Exchanger for a Laboratory
By	Mr.Teerapong Punkanoon ID.No. 47015534
Advisor	Dr.Narisara Thongboonchoo
Report for	Bachelor Degree of Chemical Engineering
	Department of Chemical Engineering
	Faculty of Engineering
	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Abstract

The objects of this project are to design and construct a heat exchanger for a laboratory. The system consists of four main parts, i.e., heat exchangers, electric water heater, piping system, and flow meter and temperature measurement and control. The heat exchangers consist of a 3 meter long of 0.5 inch diameter of stainless finned tube and 2 of 1 meter long double pipe heat exchanger which inner tube are 0.5 inch of copper and stainless tube and outer tube is 1 inch of PVC tube. The performance and parameters that affect the performance of heat exchangers were investigated by cooling the 65 °C hot water. In the finned tube heat exchanger, effect of hot water flow rate inside the tube and air flow rate outside the tube to heat transfer rate were studied. In the double pipe, the heat exchange between hot and cold water were performed by vary flow rate of hot water in the inner tube and flow direction at fixed flow rate of cold water. The results from two heat exchangers show the heat transfer rate increase when increase the flow rate of hot water.. In finned tube, the increase of air flow rate enhances the rate significantly. For the double pipe heat changer, the type of inner tube show less effect heat exchange rate. The heat exchange rate of the double pipe heat exchanger is higher in counter flow than parallel flow. In general, the calculated rates of heat transfer in finned tube are lower than those of double pipe. There are 276-475 and 249-1104 for finned tube and double pipe, respectively . The estimated of overall heat transfer coefficient of double pipe are 270-1230 watt /m² °C.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยความกรุณาและความอนุเคราะห์จากคณาจารย์และบุคคลหลายฝ่าย ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ

คณาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความรู้และความช่วยเหลือ

เพื่อนๆ นักศึกษาทุกคนที่ช่วยเหลือ ให้ข้อมูล และคำแนะนำต่างๆ ในการทำปริญญานิพนธ์เล่มนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ดร.นริศรา ทองบุญชู อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และความรู้ในการทำปริญญานิพนธ์นี้มาโดยตลอด ทางผู้จัดทำขอขอบพระคุณอาจารย์อย่างสุดซึ้ง

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ผู้เป็นที่รักและเคารพยิ่งที่ให้การสนับสนุน ให้กำลังใจและคำแนะนำตลอดมา หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้จัดทำขอน้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

ธีรพงศ์ พันธุ์ขนุน

19 สิงหาคม 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
คัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VII
สัญลักษณ์	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตของงานเมื่อเสร็จสมบูรณ์แล้ว	2
1.4 วิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ของงานที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ประเภทของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน	3
2.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดท่อสองชั้น (Double-pipe Heat Exchanger)	5
2.3 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	6
2.4 หลักการพื้นฐานของการถ่ายเทความร้อน	7
2.5 หลักการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	11
2.6 งานวิจัยและการออกแบบที่เกี่ยวข้อง	16
บทที่ 3 การออกแบบและการประกอบเครื่อง	19
3.1 การออกแบบ	19
3.2 การประกอบเครื่อง	24
บทที่ 4 วิธีดำเนินการทดลอง	28
4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	28
4.2 ขั้นตอนการทดลอง	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทที่ 5 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล 31

5.1 การทำงานและสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบ 31

5.2 การทำงานและสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น 35

บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 39

6.1 สรุปผลการทดลอง 39

6.2 ข้อเสนอแนะ 39

เอกสารอ้างอิง 41

ภาคผนวก 42

ภาคผนวก ก. การคำนวณของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบ 43

ภาคผนวก ข. ตัวอย่างการคำนวณของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
แบบท่อสองชั้นจากการทดลอง 45

ภาคผนวก ค. ตัวอย่างการคำนวณของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
แบบท่อสองชั้นจากทฤษฎี 47

ภาคผนวก ง. คู่มือที่ใช้ในการทำการทดลอง 50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	ตารางหาค่า Nu ของการไหลใน annular	10
5.1	อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบ	32
5.2	อัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบ	33
5.3	อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบ ของการทดลองที่อากาศนิ่งและใช้พัดลม	34
5.4	อัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบ ของการทดลองที่อากาศนิ่งและใช้พัดลม	34
5.5	สมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นที่สภาวะต่างๆ	37
5.6	การเปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ที่ได้จากทางทฤษฎีและปฏิบัติ	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น	5
2.2	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของการไหลแบบทางเดียว	6
2.3	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของการไหลแบบสวนทาง	7
2.4	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของการไหลแบบตัดขวาง	7
2.5	ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น	13
2.6	ท่อถ่ายเทความร้อนที่มีครีบตามยาว	13
2.7	ท่อถ่ายเทความร้อนที่มีครีบตามขวาง	14
2.8	ประสิทธิภาพของครีบวงกลมที่มีพื้นที่และความหนาของครีบคงที่	14
2.9	การหาพื้นที่ต่างๆของท่อที่มีการติดครีบวงกลม	16
2.10	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน Hampden Modal H-6878	17
2.11	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน Cole-parmer modal EW-36125-60	18
3.1	โครงสร้างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับห้องปฏิบัติการ	19
3.2	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น	20
3.3	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบ	21
3.4	ถังน้ำร้อน	21
3.5	ถังน้ำเย็น	22
3.6	ปั๊มน้ำที่ใช้ในการทดลอง ก) ปั๊มน้ำเย็น ข) ปั๊มน้ำร้อน	22
3.7	วาล์วที่ใช้ในการทดลอง ก) วาล์วควบคุมอัตราการไหล ข) วาล์วเปิด-ปิด	23
3.8	โรตามิเตอร์วัดอัตราการไหล	23
3.9	อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิน้ำร้อน	23
3.10	ข้อต่อทองเหลืองพร้อมรูเจาะและเทอร์โมคัปเปิ้ลแบบเค	24
3.11	ด้านหน้าของโครงสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	24
3.12	ท่อและวาล์วที่ใช้ในการปรับเปลี่ยนทิศทางการไหล	
	รูป ก) แสดงการเปิด-ปิดของวาล์วสำหรับการทดลองการไหลแบบไหลทางเดียวกัน	
	รูป ข) แสดงการเปิด-ปิดของวาล์วสำหรับการทดลองการไหลแบบไหลสวนทางกัน	25
3.13	ด้านหลังของโครงสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	25
3.14	แสดงตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิจำนวน 10 ชุด	26
3.15	ด้านหน้าและด้านหลังของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์

A : พื้นที่ที่ตั้งฉากกับการถ่ายเทความร้อน (m^2)

A : ตำแหน่งอ้างอิงที่ถ่ายเทความร้อน

A' : ตำแหน่งอ้างอิงที่ถ่ายเทความร้อน

A_b : พื้นที่ผิวของครีบที่ฐาน (m^2)

A_c : พื้นที่หน้าตัดของครีบ (m^2)

A_f : พื้นที่ผิวของครีบที่มีหนาตัดคงที่ (m^2)

A_s : พื้นที่ผิวที่ถ่ายเทความร้อน (m^2)

A_{fin} : พื้นที่ของครีบ (m^2)

A_{nofin} : พื้นที่ของท่อที่ไม่มีการติดครีบ (m^2)

A_{unfin} : พื้นที่ที่ไม่รวมครีบ (m^2)

B : ตำแหน่งอ้างอิงที่ถ่ายเทความร้อน

B' : ตำแหน่งอ้างอิงที่ถ่ายเทความร้อน

C_p : ความจุความร้อนจำเพาะ ($\frac{J}{kg \cdot °C}$)

D_i : เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อด้านใน (m)

D_h : เส้นผ่านศูนย์กลางของการไหล (m)

D_o : เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อด้านนอก (m)

Gr : ตัวเลขแกรชอฟ

h : สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($\frac{W}{m^2 \cdot °C}$)

k : สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ($\frac{W}{m \cdot °C}$)

L : ความยาวท่อ (m)

L_c : ลักษณะสมบัติทางความยาว (m)

$\dot{m}$: อัตราการไหลเชิงมวล ($\frac{kg}{s}$)

Nu : ตัวเลขนัสเซิล

p : เส้นรอบวงของครีบ (m)

Pr : ตัวเลขพรันด์เทิล

$\dot{Q}_{cond}$: การถ่ายเทความร้อนโดยวิธีการนำ (W)

$\dot{Q}_{1m}$: อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ช่วง 1 เมตร (W)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์

$\dot{Q}_{2m}$: อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ช่วง 2 เมตร (W)

$\dot{Q}_{3m}$: อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ช่วง 3 เมตร (W)

$\dot{Q}_{total}$: อัตราการถ่ายเทความร้อนรวมทั้งหมด (W)

$\dot{Q}_{f}$: อัตราการถ่ายเทความร้อนจากครีบ (W)

Re : ตัวเลขเรย์โนลด์

R_{conv} : ความต้านทานการพาความร้อน ($\frac{^{\circ}C}{W}$)

R_{cyl} : ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของท่อทรงกระบอก ($\frac{^{\circ}C}{W}$)

R_{total} : ความต้านทานรวมของอุณหภูมิ ($\frac{^{\circ}C}{W}$)

R_{wall} : ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนผ่านผนัง ($\frac{^{\circ}C}{W}$)

S : ระยะห่างระหว่างครีบ (m)

t_1 : อุณหภูมิขาเข้าของของไหลอุณหภูมิต่ำ ($^{\circ}C$)

t_2 : อุณหภูมิขาออกของของไหลอุณหภูมิต่ำ ($^{\circ}C$)

T_1 : อุณหภูมิขาเข้าของของไหลอุณหภูมิสูง ($^{\circ}C$)

T_2 : อุณหภูมิขาออกของของไหลอุณหภูมิสูง ($^{\circ}C$)

T_0 : อุณหภูมิเริ่มต้น ($^{\circ}C$)

T_{1m} : อุณหภูมิที่ตำแหน่ง 1 เมตร ($^{\circ}C$)

T_{2m} : อุณหภูมิที่ตำแหน่ง 2 เมตร ($^{\circ}C$)

T_{3m} : อุณหภูมิที่ตำแหน่ง 3 เมตร ($^{\circ}C$)

T_{avg} : อุณหภูมิเฉลี่ย ($^{\circ}C$)

T_b : อุณหภูมิที่ผิวของครีบ ($^{\circ}C$)

T_s : อุณหภูมิของพื้นผิว ($^{\circ}C$)

ΔT_{lm} : ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงล็อก ($^{\circ}C$)

T_{sur} : อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม ($^{\circ}C$)

T_{∞} : อุณหภูมิของไหลที่ไหลผ่านครีบ ($^{\circ}C$)

$\frac{dT}{dx}$: Temperature gradient ($\frac{^{\circ}C}{m}$)

u : ความเร็วของของไหล ($\frac{m}{s}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์

ρ : ความหนาแน่น ($\frac{kg}{m^3}$)

μ : ความหนืด ($\frac{kg}{m \cdot s}$)

β : สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตร ($\frac{1}{K}$)

ε : สภาพเปล่งรังสี

ε_f : ประสิทธิผลของครีบ

η_f : ประสิทธิภาพของครีบ

ν : ความหนืดจลศาสตร์ของของไหล ($\frac{m^2}{s}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการ

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญและใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม อาทิ อุตสาหกรรมน้ำมันต้องใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจำนวนมากในการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำมันดิบ ควบแน่นไอน้ำที่ออกมาจากหอกลั่นและระบายความร้อนออกจากน้ำมันหรือก๊าซเป็นต้น ในทำนองเดียวกันอุตสาหกรรมประเภทอื่นอย่างเช่นอุตสาหกรรมอาหารที่ใช้เครื่องอบแห้งในการอบผลลำไยและ อุตสาหกรรมอื่นๆ ก็ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อให้ความร้อน ระบายความร้อน หรือเก็บความร้อนที่เหลือทิ้งกลับมาใช้ด้วย

ดังนั้นความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจึงมีความสำคัญ เนื่องจากรูปแบบและโครงสร้างของอุปกรณ์ที่มีความหลากหลายวิธีการใช้งานและการเลือกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ไม่เหมาะสมส่งผลทำให้ต้องใช้พลังงานความร้อนเพิ่มเติมในการทำให้ระบบร้อนขึ้นหรือเย็นตัวลงอันส่งผลทำให้ต้นทุนของการผลิตสูงขึ้น ด้วยเหตุผลนี้เลยมีความสัมพันธ์กันกับหลักการทางเศรษฐกิจโดยตรงซึ่งส่งผลกระทบอย่างมากรวมไปถึงราคาของผลิตภัณฑ์อีกด้วย การเลือกอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพและราคาย่อมเยาจึงเป็นที่ต้องการการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต้องกำหนดรูปร่าง มาตรฐานและคุณสมบัติพื้นฐานเพื่อใช้เป็นเงื่อนไขกำหนดกรอบของราคาต้นทุนไว้เพื่อใช้เปรียบเทียบว่าอุปกรณ์คุ้มค่าและสมราคาหรือไม่ เพราะในบางครั้งอุปกรณ์ที่มีราคาถูกแต่เมื่อเทียบถึงประสิทธิภาพแล้วก็อาจจะต่ำกว่าอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพดีกว่าที่ราคาแพงกว่าอย่างมากก็เป็นได้

โครงงานพิเศษนี้จึงมีแนวคิดที่จะจัดสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนขนาดเล็กเพื่อใช้ในระดับห้องปฏิบัติการขึ้นมาเพื่อให้นักศึกษาวิศวกรรมเคมีได้มีโอกาสศึกษาและเรียนรู้หลักการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เนื่องจากอุปกรณ์ที่มีขายสำหรับใช้ในงานอุตสาหกรรมมีขนาดใหญ่ ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานและไม่เหมาะสมที่จะใช้ในการศึกษา อีกทั้งอุปกรณ์ที่ทางต่างประเทศสร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในห้องปฏิบัติการยังมีราคาสูงมาก การสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีโครงสร้างอย่างง่าย มีขนาดกะทัดรัดและสิ้นเปลืองพลังงานน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1.2.1 ออกแบบและสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการ

1.2.2 ศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมและตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

1.3 ขอบเขตของโครงงานเมื่อสมบูรณ์แล้ว

ออกแบบและสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนขนาดเล็กเพื่อใช้ในห้องปฏิบัติการ เพื่อใช้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลที่สามารถศึกษาได้ทั้งระบบที่มีการไหลแบบทางเดียว แบบไหลสวนทางและการไหลแบบตัดขวาง

1.4 วิธีการดำเนินงาน

1.4.1 ศึกษาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 ออกแบบโครงสร้างและอุปกรณ์ จัดซื้อวัสดุและอุปกรณ์ตามที่ได้ออกแบบไว้

1.4.3 ประกอบ ติดตั้งอุปกรณ์และทดสอบการทำงานของอุปกรณ์

1.4.4 จัดทำคู่มือสำหรับใช้ในการทดลอง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้รับความรู้และความเข้าใจในหลักการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในระดับห้องปฏิบัติการที่มีอยู่ในปัจจุบัน

1.5.2 ได้รับความรู้จากการออกแบบและสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนรวมถึงอุปกรณ์ต่างๆ ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

1.5.3 สามารถใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่สร้างขึ้นเพื่อศึกษาถึงตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

1.5.4 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่สร้างขึ้นจะได้ใช้ในการศึกษาต่อไปในวิชา Practice in Chemical Engineering พร้อมคู่มือการใช้งานและวิธีทำการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับห้องปฏิบัติการจำเป็นต้องมีความเข้าใจเกี่ยวกับโครงสร้างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและทฤษฎีเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน โดยในบทนี้จะกล่าวถึงโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 ประเภทของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนคืออุปกรณ์ที่ใช้ในการถ่ายเทพลังงานความร้อนระหว่างของไหลที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน เนื่องจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีการใช้งานอย่างแพร่หลายจึงมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอยู่มากมายหลากหลายรูปแบบตามลักษณะการใช้งาน สามารถแบ่งลักษณะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตามลักษณะต่างๆได้ดังนี้

2.1.1 การแบ่งตามสภาวะของของเหลวที่ใช้ [1]

เป็นการระบุชนิดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตามสถานะของของไหล ทั้ง 2 ประเภทที่แลกเปลี่ยนความร้อนว่ามีสถานะเป็นอะไรและมีการเปลี่ยนสถานะหลังจากการแลกเปลี่ยนความร้อนแล้วหรือไม่เช่น

1. ประเภทของเหลว-ของเหลว (ไม่มีการเปลี่ยนสถานะ)

ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้ ของไหลทั้งสองเป็นของเหลว โดยมีการทำให้ร้อนขึ้นหรือเย็นลงเท่านั้น

2. ประเภทของเหลว-ของเหลว (มีการเปลี่ยนสถานะ)

ของไหลทั้งสองเป็นของเหลว แต่ของเหลวในเครื่องจะมีการเปลี่ยนสถานะเป็นแก๊สหรือเปลี่ยนเป็นไอในขณะแลกเปลี่ยนความร้อน เช่น เครื่องต้มซ้ำ (Reboiler) ของหอกลั่นน้ำมันซึ่งใช้น้ำมันอุณหภูมิสูงเป็นแหล่งความร้อน

3. ประเภทแก๊ส-แก๊ส (ไม่มีการเปลี่ยนสถานะ)

ของไหลทั้ง 2 ชนิดในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นแก๊สโดยไม่เกิดการควบแน่นเป็นของเหลว เช่น เครื่องอุ่นอากาศ (Preheater) ซึ่งใช้แก๊สทิ้งเป็นแหล่งความร้อน

4. ประเภทแก๊ส-แก๊ส (มีการเปลี่ยนสถานะ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของไหลทั้ง 2 ชนิดเป็นแก๊ส โดยของไหลในเครื่องจะมีการเปลี่ยนสถานะระหว่างการแลกเปลี่ยนความร้อนเช่น เครื่องกระจายความร้อน (Radiator) สำหรับทำความอบอุ่นโดยการทำอากาศให้อุ่นด้วยไอน้ำ

5. ประเภทแก๊ส-ของเหลว (ไม่มีการเปลี่ยนสถานะ)

ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้ของไหลที่เป็นของเหลวจะไหลอยู่ด้านหนึ่งและอีกด้านก็จะเป็นของไหลที่เป็นแก๊สเช่น เครื่องอุ่นน้ำป้อน (Feed water preheater) ซึ่งใช้แก๊สทิ้งจากหม้อไอน้ำเป็นแหล่งความร้อน

6. ประเภทแก๊ส-ของเหลว (มีการเปลี่ยนสถานะ)

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะมีการระเหยน้ำให้เป็นไอด้วยแก๊สที่สันดาป เช่นหม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ (Water tube boiler) และเครื่องควบแน่น (Condenser) ซึ่งควบแน่นไอให้เป็นของเหลวด้วยน้ำระบายความร้อน

2.1.2 การแบ่งประเภทตามจุดประสงค์ของการใช้งาน [2]

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสามารถแบ่งตามจุดประสงค์ของการใช้งานลักษณะของการใช้งานตัวอย่างเช่น

1. เครื่องระเหย (Evaporator) หรือหม้อเคี่ยว (Concentrator) จุดประสงค์ของการใช้งานคือการทำให้ของเหลวให้กลายเป็นไอ เพื่อใช้ไอที่เกิดขึ้นให้เป็นประโยชน์หรือเพื่อให้ได้ของเหลวที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น

2. เครื่องอุ่นหรือทำให้ร้อนล่วงหน้า (Preheater) ใช้เพื่ออุ่นหรือทำให้ของไหลร้อนล่วงหน้าเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของกระบวนการ

3. เครื่องทำให้ร้อน (Heater) เครื่องมือประเภทนี้ใช้เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของไหลให้สูงขึ้นโดยการให้ความร้อน

4. เครื่องทำให้ร้อนยวดยิ่ง (Super-heater) เครื่องนี้ใช้เพื่อเพิ่มความร้อนแก่ของไหลที่ทำให้ร้อนมาแล้ว เพื่อให้อยู่ในสภาพร้อนยิ่งยวดอย่างเช่น เครื่องทำไอดง (Steam superheater)

5. เครื่องต้มซ้ำ (Reboiler) เครื่องนี้ใช้ในการให้ความร้อนแก่ของเหลวที่ควบแน่นแล้วให้กลายเป็นไออีกครั้งหนึ่ง

6. เครื่องควบแน่น (Condenser) จุดประสงค์การใช้งานเพื่อควบแน่นไอให้เป็นของเหลว ยกตัวอย่างเช่น เครื่องควบแน่นน้ำให้กลับกลายเป็นน้ำ เครื่องควบแน่นยังแบ่งเป็น

- เครื่องควบแน่นหมด (Total condenser) เครื่องควบแน่นประเภทหนึ่งที่ใช้กับหอกลั่น แต่ได้รับการออกแบบให้สามารถควบแน่นไอทั้งหมดที่ออกมาจากยอดหอกลั่น

- เครื่องควบแน่นบางส่วน (Partial condenser) จะคล้ายกับเครื่องควบแน่นหมดคือจะใช้กับหอกลั่นแต่มีจุดประสงค์เพื่อควบแน่นเพียงบางส่วนของไอที่ออกจากยอดหอกลั่นให้กลายเป็นของเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

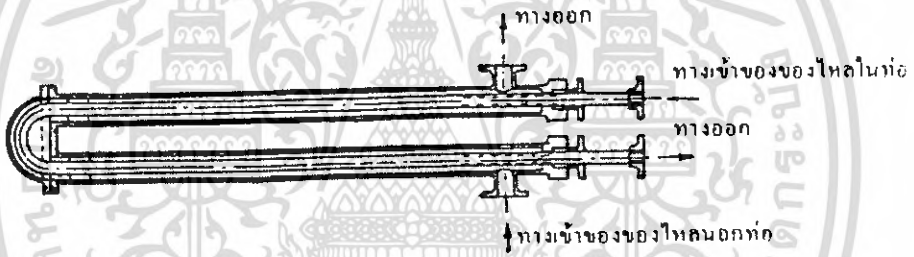
7. เครื่องระบายความร้อน (Cooler) เครื่องนี้ทำหน้าที่ระบายความร้อนออกจากของไหลเพื่อลดอุณหภูมิของของไหล

8. เครื่องทำให้เย็นจัด (Chiller) เครื่องนี้ทำหน้าที่ลดอุณหภูมิของของไหลให้ลดต่ำมากโดยการใช้สารทำความเย็น (refrigerant) จำพวกแอมโมเนียและฟรีออน เป็นต้น

9. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) จุดประสงค์เพื่อให้ความร้อนแก่ของไหลชนิดหนึ่งในขณะเดียวกันก็ระบายความร้อนออกจากของไหลอีกชนิดหนึ่ง

2.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดท่อสองชั้น (Double-Pipe Heat Exchanger) [3]

โครงสร้างของเครื่องแบบนี้ ประกอบด้วยท่อสองขนาดที่ซ้อนกันอยู่ โดยมีแกนกลางของท่อที่ใช้ร่วมกันอยู่ของไหลชนิดหนึ่งจะไหลอยู่ในท่อด้านในและของไหลอีกชนิดหนึ่งจะไหลอยู่ในช่องว่างรูปวงแหวนระหว่างท่อในและท่อนอกcดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 2.1 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้เหมาะสำหรับการเพิ่มอุณหภูมิของของไหลในท่อที่มีความดันสูงความหนืดสูงหรือมีฤทธิ์กัดกร่อนสูง



รูปที่ 2.1 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น [3]

ลักษณะเด่นของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นคือมีโครงสร้างที่ค่อนข้างง่ายราคาของเครื่องต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ถ่ายเทความความร้อนมีราคาถูกและเมื่อมีความจำเป็นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ง่าย โดยการนำเอาเครื่องที่มีสัดส่วนเหมือนๆกันหลายๆเครื่องมาต่อกันแบบอนุกรม (Series) หรือแบบขนาน (Parallel)

เมื่อให้ของไหลไหลสวนทางกันด้วยความเร็วที่เหมาะสม ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่ได้จะมีค่าสูงในขณะที่ความดันสูญเสียของความดันมีค่าต่ำแต่เมื่อมีการเพิ่มขนาดของเครื่องเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ปริมาตรของเครื่องต่อหน่วยพื้นที่ถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มตามขึ้น ทำให้ราคาของเครื่องค่อนข้างแพงเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบอื่นดังนั้นเครื่องแบบนี้จึงควรเลือกใช้ในกรณีที่ปริมาตรการถ่ายเทความร้อนน้อยหรือมีบริเวณในการติดตั้งพื้นที่ถ่ายเทความร้อนน้อยกว่า 20 ตารางเมตร

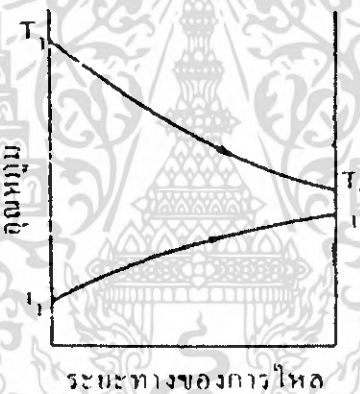
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน [3]

ลักษณะการถ่ายเทความร้อนตามทิศทางการไหลของของไหลแบ่งเป็น 3 แบบคือการไหลแบบทางเดียว (Co-current flow) การไหลแบบสวนทาง (Counter flow) และการไหลแบบตัดขวาง (Cross flow)

2.3.1 การไหลแบบทางเดียว

การไหลแบบนี้ของไหลทั้งสองชนิดจะไหลเข้ามาในทิศทางเดียวกัน การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของของไหลตามระยะทางของการไหล สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลแบบทางเดียวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2 โดยที่ของไหลร้อนไหลเข้าที่อุณหภูมิ T_1 หลังจากการถ่ายเทความร้อนให้กับของไหลเย็นแล้วจะไหลออกโดยมีอุณหภูมิที่ T_2 ในขณะเดียวกันของไหลที่เย็นไหลเข้าเครื่องที่อุณหภูมิ t_1 และไหลออกจากเครื่องที่อุณหภูมิ t_2 โดยเมื่อดูจากรูปที่ 2.2 แล้วจะพบว่าความแตกต่างของอุณหภูมิของของไหลทั้งสองชนิดที่ทางเข้าจะสูงและจะค่อยๆลดลงเมื่อระยะทางการไหลเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิที่ทางออกของของไหลเย็นจะไม่มีทางสูงกว่าอุณหภูมิของของไหลร้อน

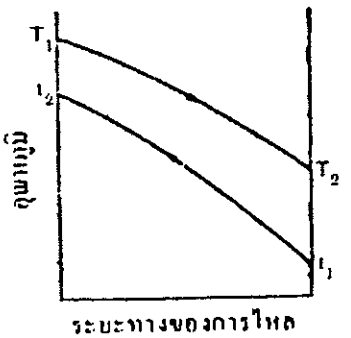


รูปที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของการไหลแบบทางเดียว [3]

2.3.2 การไหลแบบสวนทาง

การแบบนี้ของไหลทั้งสองชนิดจะไหลเข้ามาในทิศทางที่ตรงข้ามกัน การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของของไหลตามระยะทางของการไหล สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลสวนทางกันสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.3 โดยที่ของไหลร้อนไหลเข้าที่อุณหภูมิ T_1 หลังจากการถ่ายเทความร้อนให้กับของไหลเย็นแล้วจะไหลออกโดยมีอุณหภูมิที่ T_2 ในขณะเดียวกันของไหลที่เย็นไหลเข้าเครื่องที่อุณหภูมิ t_1 และไหลออกจากเครื่องที่อุณหภูมิ t_2 โดยเมื่อดูจากรูปที่ 2.3 แล้วจะพบว่าการไหลแบบสวนทางจะมีความแตกต่างจากการไหลแบบทางเดียวกัน คือความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิระหว่างของของไหลสองชนิดที่ทางเข้า-ออกจะไม่มีค่าสูงเหมือนทางเข้าของการไหลแบบทางเดียวกัน นอกจากนี้จะเห็นว่าอุณหภูมิที่ทางออกของของไหลเย็นอาจสูงกว่าอุณหภูมิทางออกของของไหลร้อนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

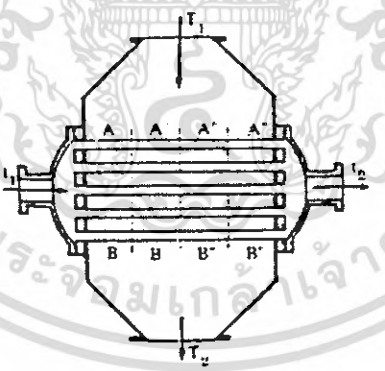


รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของการไหลแบบสวนทาง [3]

2.3.3 การไหลแบบตัดขวาง

ในการไหลแบบนี้ของไหลทั้งสองชนิดจะไหลเข้ามาในทิศทางที่ตั้งฉากกัน โดยที่การไหลแบบนี้จะพบอยู่ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีขนาดเล็กที่มีพื้นที่การถ่ายเทความร้อนสูงมากซึ่งทำได้ด้วยการใช้แผ่นโลหะบางๆหรือครีบมาติดกับท่อ โดยส่วนมากแล้วของไหลที่ไหลผ่านบริเวณที่เป็นแผ่นโลหะบางหรือครีบจะเป็นของของไหลเย็น ส่วนของไหลที่ไหลอยู่ภายในจะเป็นของไหลร้อน

ตัวอย่างของลักษณะการไหลแบบตัดขวางแสดงลักษณะดังรูปที่ 2.4 ซึ่งของไหลร้อนไหลเข้าที่อุณหภูมิ T_1 และเมื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับของไหลเย็นที่อุณหภูมิ t_1 ที่ไหลเข้ามาในทิศทางที่ตั้งฉากกันทำให้ของไหลร้อนที่อุณหภูมิลดลงไหลออกที่อุณหภูมิ T_2 และของไหลเย็นจะอุณหภูมิสูงขึ้นไหลออก t_2



รูปที่ 2.4 ลักษณะการไหลของการไหลแบบตัดขวาง [3]

2.4 หลักการพื้นฐานของการถ่ายเทความร้อน

กลไกการถ่ายเทความร้อนหลักมีอยู่ 3 แบบคือการนำความร้อน (Heat conduction) การพาความร้อน (Heat convection) และ การแผ่รังสีความร้อน (Heat radiation)

2.4.1 การนำความร้อน (Heat conduction) [4]

การถ่ายเทพลังงานในวัสดุจากอนุภาคที่มีพลังงานสูงกว่าไปยังอนุภาคที่อยู่ใกล้เคียงที่มีพลังงานต่ำกว่า โดยพบว่าอัตราการนำความร้อนนั้นจะขึ้นอยู่กับ รูปทรง ความหนา หรือชนิดของตัวกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับความแตกต่างของอุณหภูมิด้วยซึ่งสามารถอธิบายได้โดยกฎการนำความร้อนของฟูริเยร์ (Fourier Law of Heat conduction) สำหรับการนำความร้อนในทิศทางเดียว

$$\dot{Q}_{cond} = -kA\frac{dT}{dx} = -kA\frac{T_1 - T_2}{\Delta x} \tag{2.1}$$

เมื่อ $\dot{Q}_{cond}$ คือ การถ่ายเทความร้อนโดยวิธีการนำ

k คือ สภาพการนำความร้อน (Thermal Conductivity)

A คือ พื้นที่ที่ตั้งฉากกับการถ่ายเทความร้อน

$\frac{dT}{dx}$ คือ Temperature gradient

ในกรณีของการนำความร้อนผ่านผนังทรงกระบอกสามารถแสดงอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยสมการ

$$\dot{Q}_{cond,cyl} = \frac{T_1 - T_2}{R_{cyl}} \tag{2.2}$$

โดยที่ $R_{cyl} = \dfrac{\ln\left(r_2/r_1\right)}{2\pi Lk}$ คือ ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของท่อทรงกระบอก

และ L คือ ความยาวของท่อ

2.4.2 การพาความร้อน (Heat convection) [4]

การถ่ายเทพลังงานระหว่างพื้นผิวของของแข็งกับของไหลที่มีการเคลื่อนที่ การถ่ายเทความร้อนโดยการพาอธิบายได้โดยใช้สมการกฎการทำความเย็นของนิวตัน (Newton's law of cooling)

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s\left(T_s - T_\infty\right) \tag{2.3}$$

เมื่อ h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน

A_s คือ พื้นที่ผิวที่มีการพาความร้อนเกิดขึ้น

T_s คือ อุณหภูมิที่ผิวของวัตถุ

T_∞ คือ อุณหภูมิของของไหลที่ไหลผ่าน

การถ่ายเทความร้อนโดยวิธีการพา ยังสามารถแบ่งออกได้อีกเป็นหลายกรณีตัวอย่างเช่นการพาความร้อนโดยวิธีบังคับ (Forced convection) และการพาความร้อนโดยอิสระ (Free convection) ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะถูกหาได้จากสหสัมพันธ์ของตัวแปรไร้หน่วยต่างๆอาทิเช่น ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลขนัสเซิล (Nusselt number : Nu) ซึ่งเป็นตัวแปรไร้หน่วยของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในกรณีการพาความร้อนแบบบังคับจะพบว่า Nu จะแปรผันตามตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynold number : Re) และตัวเลขพรันด์เดิล (Prandtl number : Pr) ดังแสดงในสมการ

$$Nu = \frac{hL}{k} = C\,\mathrm{Re}^{m}\,\mathrm{Pr}^{n} \tag{2.4}$$

เมื่อ k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน

L คือ ความยาวของท่อหรือระนาบ

Pr คือ ตัวเลขพรันด์เดิล

ตัวเลขเรย์โนลด์สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho D u}{\nu} \tag{2.5}$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล

u คือ ความเร็วของของไหล

ν คือ ความหนืดจลศาสตร์ของของไหล

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อที่มีการไหลของของไหล

C, m และ n เป็นค่าที่สำหรับสภาวะการไหลแบบใดแบบหนึ่ง ซึ่งสามารถหาได้จากการทดลองหรือจากตาราง สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อ n จะเท่ากับ 0.4 เมื่อเป็นการให้ความร้อน เท่ากับ 0.3 เมื่อเป็นการรับความร้อน

สำหรับการไหลแบบราบเรียบภายในท่อสหสัมพันธ์ที่สามารถใช้ในการหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสามารถแสดงได้ดังสมการ

สำหรับการไหลแบบราบเรียบภายในท่อคำนวณได้จากสมการ

$$Nu = 3.66 + \frac{0.065(D/L)\mathrm{RePr}}{1 + 0.04\left[(D/L)\mathrm{RePr}\right]^{2/3}} \tag{2.6}$$

สำหรับการไหลระหว่างท่อที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกัน (Concentric annulus) จะใช้ $D = D_h$ โดยที่ D_h คือ Hydraulic diameter หาได้จากสมการ

$$D_h = (D_o - D_i) \tag{2.7}$$

เมื่อ D_0 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อด้านนอก

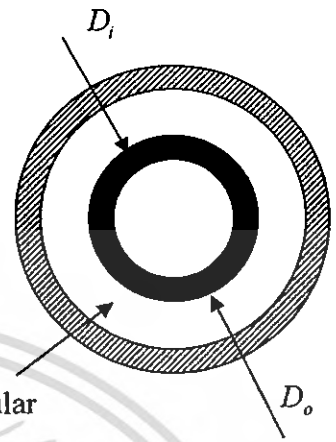
D_i คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อด้านใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสหสัมพันธ์สำหรับการหาตัวเลขนัสเซิลในกรณีที่ด้านหนึ่งเป็น Isothermal และอีกด้านหนึ่งเป็น adiabatic สามารถแสดงได้ดังตางรางที่ 3.1

D_i/D_o	Nu_i	Nu_o
0	-	3.66
0.05	17.46	4.06
0.1	11.56	4.11
0.25	7.37	4.23
0.5	5.74	4.43
1	4.86	4.86

ตาราง 3.1 ตารางหาค่า Nu ของการไหลในannular



และสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อสหสัมพันธ์ที่ใช้ในการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนคือ

$$Nu = 0.023\,\mathrm{Re}^{0.8}\,\mathrm{Pr}^{n} \tag{2.8}$$

สำหรับการพาความร้อนแบบอิสระ (Free convection) ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนไหวของของไหลอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นซึ่งเกิดจากกระบวนการทางความร้อน สหสัมพันธ์ที่ใช้ในการหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$Nu = CGr^{m}\,\mathrm{Pr}^{n} \tag{2.9}$$

โดยที่ Gr คือตัวเลขแกรชอฟ

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2} \tag{2.10}$$

เมื่อ β คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตร

T_s คือ อุณหภูมิพื้นผิว

T_∞ คือ อุณหภูมิของของไหลที่อยู่โดยรอบ

L_c คือ ลักษณะสมบัติทางความยาว

ν คือ ความหนืดจลศาสตร์ของของไหล

2.4.3 การแผ่รังสี (Heat radiation) [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแผ่รังสีความร้อนแตกต่างจากการถ่ายเทความร้อนชนิดอื่นคือการถ่ายเทความร้อนที่ไม่ต้องอาศัยตัวกลาง ดังนั้นแม้แต่ในที่สุญญากาศก็ยังสามารถถ่ายเทความร้อนได้

โดยอัตราการแผ่รังสีความร้อนที่มีค่าสูงสุดจากพื้นผิวในอุดมคติหรือของวัตถุดำ (BlackBody) เรียกว่า กระจายรังสีของวัตถุดำ เป็นไปตามกฎของสเตฟาน-โบสแมน (Stefan-Boltzmann law) ดังสมการ

$$\dot{Q}_{emit,max} = \sigma A_s T_s^4 \tag{2.11}$$

เมื่อ σ คือ ค่าคงที่ของสเตฟาน-โบสแมน (Stefan-Boltzmann Constant)

มีค่าเท่ากับ $5.67\times10^{-8}\ \frac{W}{m^2\cdot K^4}$

A_s คือ พื้นที่ที่ถ่ายเทความร้อน

T_s^4 คือ อุณหภูมิของพื้นผิว

แต่เมื่อเป็นการถ่ายเทความร้อนของวัตถุจริงใดๆก็ตามซึ่งมีการกระจายรังสีที่น้อยกว่าวัตถุดำ ในอุณหภูมิที่เท่ากันแล้ว สามารถแสดงดังสมการ

$$\dot{Q}_{emit} = \varepsilon\sigma A_s T_s^4 \tag{2.12}$$

เมื่อ ε คือ สภาพเปล่งรังสีมีค่าอยู่ระหว่าง $(0\le\varepsilon\le1)$

A_s คือ พื้นที่ผิว

T_s คือ อุณหภูมิที่พื้นผิว

ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนรวมของการแผ่ความร้อนระหว่างสองพื้นผิวคือ

$$\dot{Q}_{emit} = \varepsilon\sigma A_s\left(T_s^4 - T_{sur}^4\right) \tag{2.13}$$

เมื่อ T_{surr} คือ อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม

2.5 หลักการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ในการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นสามารถคำนวณได้โดยอาศัยสมมูลของความร้อนที่ว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนจากหรือสู่ของไหลจะเท่ากับอัตราการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจากสมการ

$$\dot{Q} = \dot{m}c_p\Delta T = UA_s\Delta T_{lm} \tag{2.14}$$

โดยที่ $\dot{m}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

c_p คือ ค่าความจุความร้อน

ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิ

U คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม

A_s คือ พื้นผิวที่ถ่ายเทความร้อน

ΔT_{lm} คือ ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงล็อก

ในการออกแบบจะทำโดยการเลือกของไหลที่จะใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อน กำหนดสภาวะเข้าและออกจากเครื่อง เพื่อนำไปหาขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งในการออกแบบจะทำการเลือกสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมาค่าหนึ่ง เพื่อใช้คำนวณหาพื้นที่การถ่ายเทความร้อน จากนั้นทำการเลือกชนิดและขนาดของท่อเพื่อให้ได้พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนตามที่ได้คำนวณไว้ จากนั้นทำการประเมินการถ่ายเทความร้อนรวมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ออกแบบไว้อีกครั้งหนึ่ง เพื่อตรวจสอบว่าค่าที่ได้ตรงกับค่าที่ได้สมมุติฐานไว้หรือไม่ โดยทั่วไปนั้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมในท่อนั้นสามารถประเมินได้โดยอาศัยสมการ

$$\frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{U_o A_o} = \frac{1}{h_i} + R_{wall} + \frac{1}{h_o} \tag{2.15}$$

โดยที่ U_i คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของด้านในของท่อ

U_o คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของด้านนอกของท่อ

A_i คือ พื้นที่ที่ถ่ายเทความร้อนด้านในของท่อ

A_o คือ พื้นที่ที่ถ่ายเทความร้อนด้านนอกของท่อ

h_i คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากของไหลสู่ผนังภายในของท่อ

h_o คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนผนังภายนอกสู่ของไหลภายนอกของท่อ

$R_{wall} = \dfrac{\ln\left(D_o / D_i\right)}{2\pi k L}$ คือ ความต้านทานการนำความร้อนผ่านผนังท่อ

k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของท่อ

L คือ ความยาวของท่อ

ถ้าพิจารณาว่าท่อมีผนังบางมากจน $(A_i \approx A_o \approx A_s)$ จะได้ว่า $(U \approx U_i \approx U_o)$ จะสามารถประเมินสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ได้ดังสมการ

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + R_{wall} + \frac{1}{h_o} \tag{2.16}$$

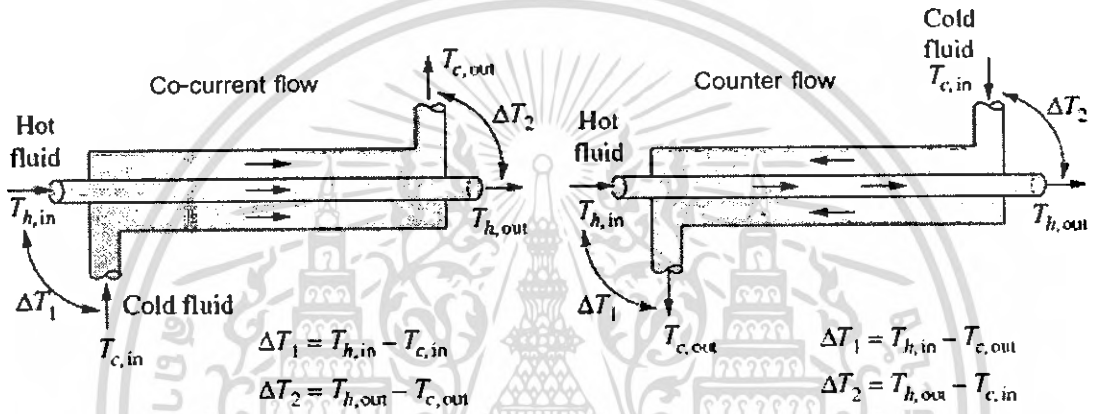
เนื่องจากการไหลในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นมีทั้งการไหลแบบทางเดียวกันและการไหลแบบสวนทางกันอุณหภูมิของของไหลร้อนกับของไหลเย็นที่ปากทางเข้าและปากทางออกของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งจึงแตกต่างกัน การใช้ความแตกต่างเชิงคณิตศาสตร์จึงมีความคลาดเคลื่อนสูง จึงได้มีการใช้ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงล็อกแทน โดยมีนิยามดังนี้

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\Delta T_1 / \Delta T_2\right)} \tag{2.17}$$

โดย ΔT_{lm} มีชื่อเรียกว่า ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงล็อก (*log mean temperature difference* : LMTD) โดยตัวอย่างการหาผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงล็อกแบบไหลทางเดียวกันและแบบไหลสวนทางกันแสดงดังรูปที่ 2.5

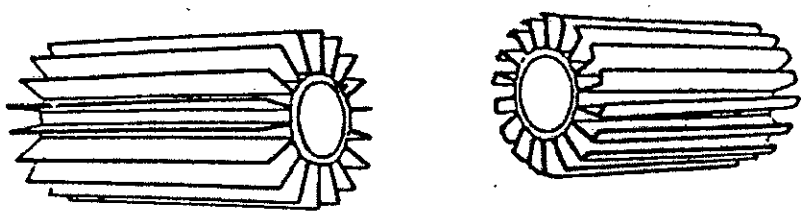


รูปที่ 2.5 ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น [4]

ในการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน สิ่งที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งที่จะต้องคำนึงถึงคือการเพิ่มประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อน การติดครีบ เป็นวิธีการอย่างหนึ่งในการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนออกจากพื้นผิว ลักษณะของท่อถ่ายเทความร้อนที่มีการติดครีบมีอยู่หลายแบบคือ

1. ท่อถ่ายเทความร้อนชนิดติดครีบตามยาว (Longitudinally finned tube)

ท่อชนิดนี้ติดครีบยาวขนานกับแกนกลางของท่อถ่ายเทความร้อน ของไหลทางด้านที่มีครีบจะไหลขนานกับแกนกลางของท่อถ่ายเทความร้อนของท่อไปตามความยาวของแผ่นครีบ โดยทั่วไปแล้วท่อชนิดนี้เหมาะที่จะใช้กับแก๊สหรือของเหลวที่มีความหนืดสูงหรือของไหลที่ไหลเป็นแบบราบเรียบ ลักษณะของการติดครีบชนิดนี้แสดงดังรูปที่ 2.6

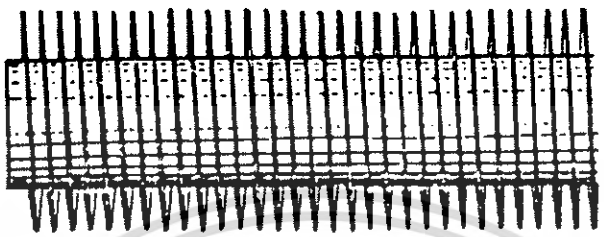


รูปที่ 2.6 ท่อถ่ายเทความร้อนที่มีครีบตามยาว [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ท่อถ่ายเทความร้อนชนิดติดครีบตามขวาง (Transversely finned tube)

ท่อชนิดนี้ติดครีบไว้ในทิศทางตั้งฉากกับแกนกลางของท่อถ่ายเทความร้อน ส่วนใหญ่ใช้สำหรับระบายความร้อนหรือเพิ่มความร้อนให้กับแก๊สที่ไหลตั้งฉากกับท่อถ่ายเทความร้อนลักษณะของการติดครีบชนิดนี้แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ท่อถ่ายเทความร้อนที่มีครีบตามขวาง [3]

ในการประเมินสมรรถนะของการติดครีบจะจะสามารถกระทำโดยประเมินโดยประสิทธิภาพของครีบ (Fin efficiency , η_{fin}) และประสิทธิผลของครีบ (Fin effectiveness , ε_{fin}) โดยที่ประสิทธิภาพของครีบหมายถึงอัตราส่วนโดยระหว่างการถ่ายเทความร้อนผ่านครีบจริง $(\dot{Q}_{fin})$ ต่อการถ่ายเทความร้อนสูงสุด $(\dot{Q}_{\max})$

$$\eta_{fin} = \frac{\dot{Q}_{fin}}{\dot{Q}_{fin,\max}} = \frac{\dot{Q}_{fin}}{A_{fin} h(T_b - T_\infty)} \tag{2.18}$$

เมื่อ T_b คือ อุณหภูมิที่ฐานของครีบ

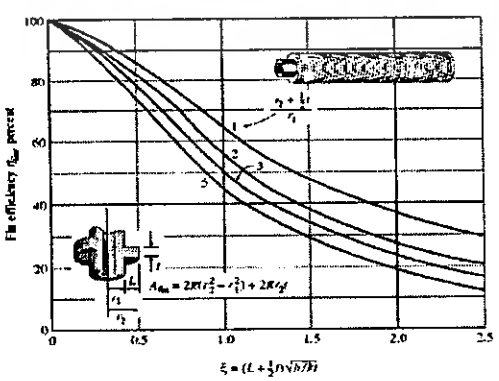
T_∞ คือ อุณหภูมิของไหลที่อยู่โดยรอบของครีบ

$A_{fin} = pL$ คือ พื้นที่ของครีบสี่เหลี่ยมที่มีหน้าตัดคงที่

p คือ ความยาวเส้นรอบวงของครีบ

L คือ ความยาวครีบ

ในกรณีครีบเป็นแบบวงกลมที่มีการพาความร้อนที่ปลาย สามารถประเมินประสิทธิภาพได้จากรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ประสิทธิภาพของครีบวงกลมที่มีพื้นที่และความหนาของครีบคงที่ [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนประสิทธิผลของครีบหมายถึงอัตราส่วนระหว่างการถ่ายเทความร้อนของครีบ $(\dot{Q}_{fin})$ต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของพื้นผิวก่อนที่การติดครีบซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\varepsilon_{fin} = \frac{\dot{Q}_{fin}}{A_b h(T_b - T_\infty)} = \frac{\eta_{fin} A_{fin} h(T_b - T_\infty)}{A_b h(T_b - T_\infty)} \tag{2.19}$$

เมื่อ A_b คือ พื้นที่ผิวของครีบที่ฐาน

ในความเป็นจริงแล้วเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะมีทั้งบริเวณที่มีการติดครีบและไม่มีการติดครีบ ดังนั้นการประเมินประสิทธิผลรวมของการติดครีบจะต้องพิจารณาทั้งสองบริเวณไปพร้อมๆกัน ซึ่งการหาประสิทธิผลโดยรวม สามารถกระทำได้โดยอาศัยสมการ

$$\varepsilon_{fin,overall} = \frac{\dot{Q}_{total,fin}}{\dot{Q}_{total,nofin}} = \frac{h(A_{unfin} + \eta_{fin} A_{fin})(T_b - T_\infty)}{A_{nofin} h(T_b - T_\infty)} \tag{2.20}$$

โดยที่การหาพื้นที่ของครีบ A_{fin} พื้นที่ที่ไม่รวมครีบ A_{unfin} และพื้นที่ของท่อที่ไม่มีการติดครีบ A_{nofin} สำหรับท่อทรงกลมที่มีครีบแบบแบนที่ติดเวียนรอบท่อ สามารถหาได้ดังสมการ

$$A_{fin} = 2\pi(r_2^2 - r_1^2) + 2\pi r^2 t \tag{2.21}$$

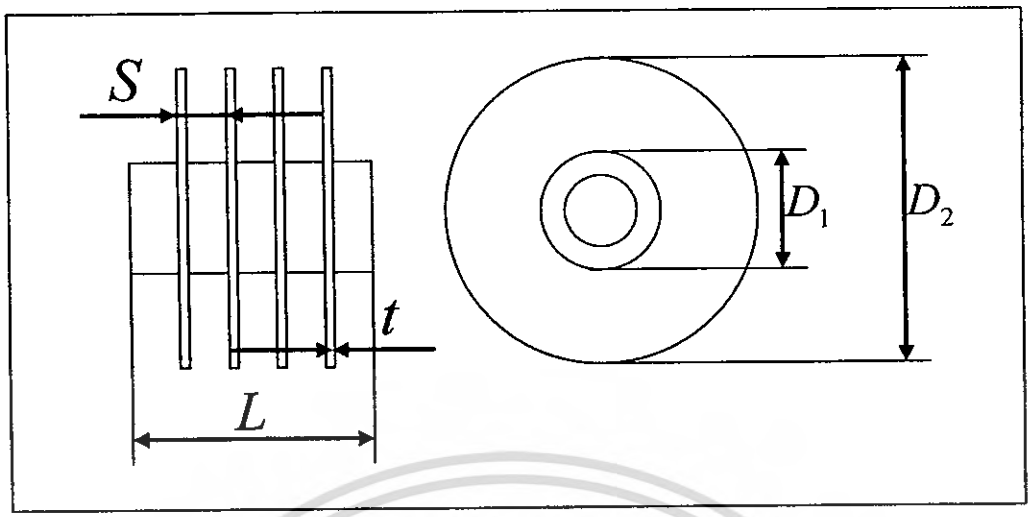
$$A_{unfin} = \pi D_1 S \tag{2.22}$$

$$A_{nofin} = \pi D_1 L \tag{2.23}$$

โดย
- D_1 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ
- D_2 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อรวมครีบ
- t คือ ความหนาของครีบ
- S คือ ระยะห่างระหว่างครีบ
- L คือ ความยาวท่อ

ดังแสดงในรูปที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 การหาพื้นที่ต่างๆของท่อที่มีการติดครีบวงกลม

2.6 งานวิจัยและการออกแบบที่เกี่ยวข้อง

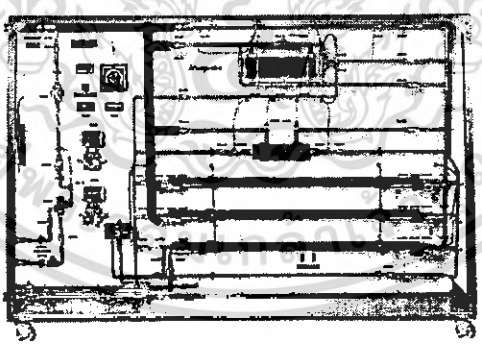
F.Javier Peñas, And Elíasand Astrid Barona [7] ได้ทำการสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อคู่ที่มีขนาดเล็กและราคาถูก สำหรับห้องปฏิบัติการ เพื่อใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเหลวสองชนิดที่สภาวะคงตัว โดยใช้ท่อขนาดเล็กมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกเท่ากับ 10 และ 16 มิลลิเมตร โดยความหนาของท่อทั้งสองเท่ากับ 1 มิลลิเมตรความยาวของท่อ 82 เซนติเมตร ทำน้ำร้อนโดยใช้ถังขนาด 75 ลิตร และฮีทเตอร์ขนาด 1.8 กิโลวัตต์ซึ่งสามารถผลิตน้ำร้อนได้อุณหภูมิสูงสุด 70 องศาเซลเซียส ทำการทดลองโดยให้น้ำร้อนไหลในท่อด้านในและน้ำเย็นไหลอยู่ที่ระหว่างช่องว่างของท่อทั้งสองที่ช่วงอัตราการไหล เท่ากับ 200 และ 2000 มิลลิลิตรต่อนาที โดยใช้และเปลี่ยนอุณหภูมิน้ำร้อนให้เป็น 45 และ 60 องศาเซลเซียส โดยจะทำการทดลองต่อครั้งอยู่ที่เวลาประมาณ 20 นาทีเพื่อรอให้ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว

Kapil Varshney , P.K. Panigrahi [8] ศึกษาผลจากการใช้การควบคุมอัตโนมัติแบบ PID ในการควบคุมเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบของเหลวและอากาศในแบบระบบปิด โดยใช้การระบายความร้อนจากน้ำโดยใช้อากาศ ระบบของน้ำประกอบด้วยถังน้ำร้อนขนาด 20 ลิตรเป็นถังสองชั้นที่รักษาอุณหภูมิในถังโดยการใช้ขี้เลื่อยเป็นฉนวนความร้อน ทำความร้อนโดยใช้ฮีทเตอร์ขนาด 3 กิโลวัตต์ในการทำน้ำร้อนใช้ปั๊มน้ำขนาด 1 แรงม้าและวัดอัตราการไหลด้วยโรดามิเตอร์ ส่วนของระบบของอากาศใช้เครื่องเป่าลมขนาด 1 แรงม้าโดยทำให้อากาศไหลเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เป็นแบบท่อที่มีครีบซึ่งประกอบด้วยท่อทองแดง33 ท่อโดยมีครีบทำจากอลูมิเนียมจำนวน 66 ครีบ อุปกรณ์มีพื้นที่หน้าตัดกว้าง 40 เซนติเมตรสูง 44 เซนติเมตร การทดลองได้เปลี่ยนอุณหภูมิของน้ำร้อนอยู่ในช่วงระหว่าง 30 ถึง 90 องศาเซลเซียส การวัดอุณหภูมิอากาศใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลแบบ เค จำนวน 80 ชิ้นว่างห่างกัน 2 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นายธีรยุทธ น้อยดา และ นายนาวิน ชีวพัฒนานุกูล [9] สร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ทั้งอัตราการไหลและทิศทางการไหล เพื่อศึกษาผลจากทั้งอัตราการไหลและทิศทางการไหลที่มีผลต่ออัตราการแลกเปลี่ยนความร้อน โดยนำไปเปรียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณที่สภาวะเดียวกัน ระบบประกอบด้วยท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.546 นิ้ว ท่อด้านนอกเป็นท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว โดยใช้ท่อขนาดความยาว 1.2 เมตร 10 ท่อนมาต่อให้ได้ความยาว 12 เมตร โดยมีท่อ 1 ท่อนที่เป็นท่ออะคริลิกใสเพื่อจะสามารถเห็นลักษณะการไหลของของไหลภายในท่อ ในส่วนของน้ำร้อนใช้ฮีทเตอร์ขนาด 4.5 กิโลวัตต์ผลิตน้ำร้อนให้ได้อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ควบคุมอุณหภูมิของน้ำร้อนด้วยเทอร์โมสตัทและคอนแทคเตอร์ขนาด 25 แอมแปร์ ควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วควบคุมการไหลสายละ 2 ตัว ทำการทดลองที่อัตราการไหลของด้านน้ำร้อนที่ 1,3 และ 5 ลิตรต่อนาที

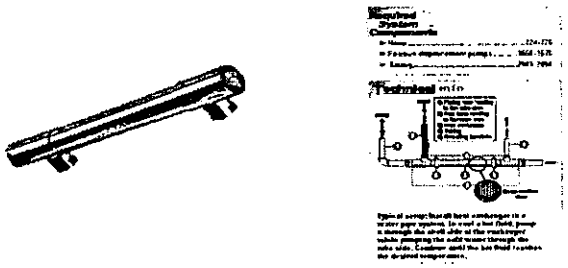
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของ Hampden Modal H-6878 [10] เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในห้องปฏิบัติการสำหรับการทดลอง โดยการทดลองทำได้ทั้งแบบการไหลทางเดียว ไหลสวนทาง และแบบไหลตัดขวาง เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ประกอบด้วยท่อสองชั้นยาว 48 นิ้ว เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 0.5 นิ้วที่ท่อในทำจากวัสดุแตกต่างกันจำนวน 4 ท่อที่ท่อแบบเชลล์และท่อและท่อแบบกะทัดรัดซึ่งสามารถทำการศึกษาการไหลแบบทางเดียวกัน สวนทางกันและการไหลแบบตัดขวางได้ ขนาดโดยรวมของเครื่องทดสอบการแลกเปลี่ยนความร้อนนี้ มีความยาว 94 นิ้วกว้าง 31 นิ้วและสูง 78 นิ้ว สามารถปรับเปลี่ยนอัตราการไหลให้เป็นแบบราบเรียบ หรือแบบปั่นป่วนได้ ลักษณะทั้งหมดของเครื่องแสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน Hampden Modal H-6878 [10]

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของ Coleparmer modal EW-36125-60 [11] อุปกรณ์นี้เป็นแบบเชลล์และท่อที่มีขนาดเล็ก ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเชลล์เท่ากับ 1 นิ้ว อุณหภูมิใช้งานอยู่ระหว่าง -60 ถึง 230 องศาเซลเซียส ด้านท่อมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.5 นิ้ว อุณหภูมิใช้งานอยู่ระหว่าง -25 ถึง250 องศาเซลเซียส มีพื้นที่ถ่ายเทความร้อน 1.43 ตารางฟุต ลักษณะของอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 2.11

80868
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของ Coleparmer modal EW-36125-60 [11]

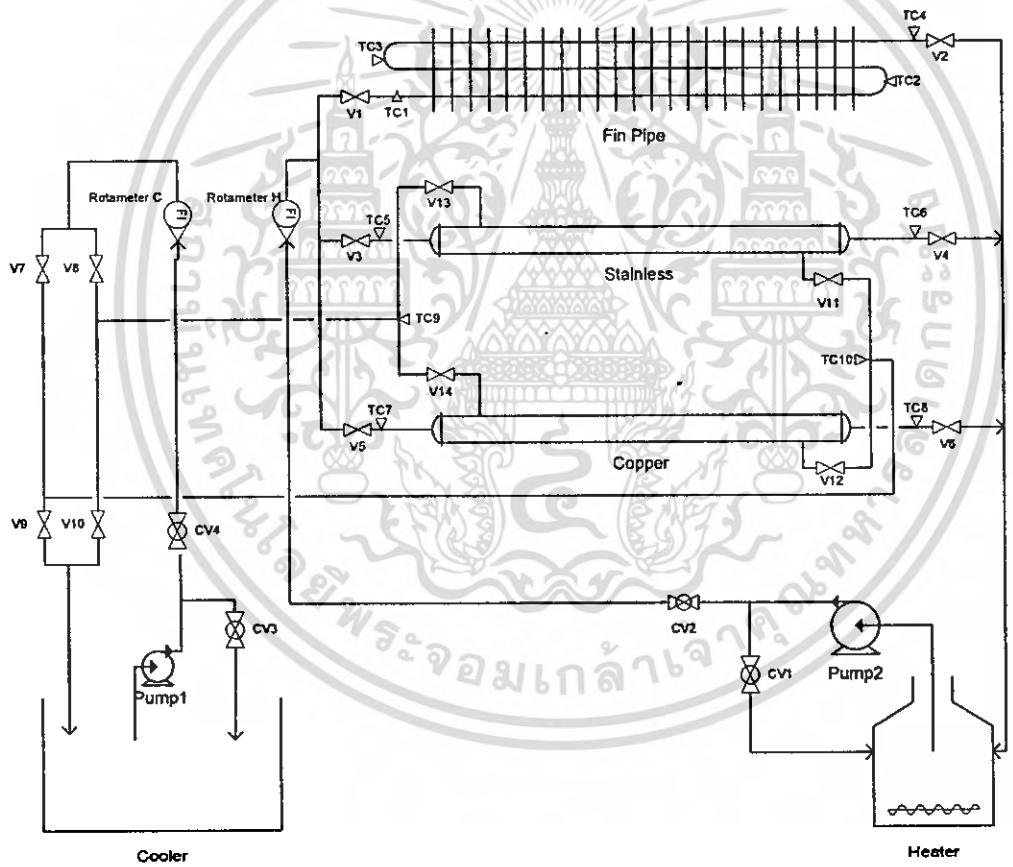
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การออกแบบและการประกอบเครื่อง

วิธีการดำเนินโครงการนี้ได้แบ่งงานออกเป็นสองส่วนคือการออกแบบและการประกอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยมีอุปกรณ์และรายละเอียดของขั้นตอนการดำเนินการดังนี้

3.1 การออกแบบ

การออกแบบของโครงการนี้ได้ออกโดยมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญ 4 ส่วนคือ ส่วนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน อุปกรณ์ทำน้ำร้อน ระบบท่อ อุปกรณ์วัดการไหลและควบคุมอุณหภูมิ โครงสร้างโดยรวมที่ได้ออกแบบไว้แสดงดังรูปที่ 3.1 โดยมีรายละเอียดของส่วนต่างๆดังนี้ คือ



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับห้องปฏิบัติการ

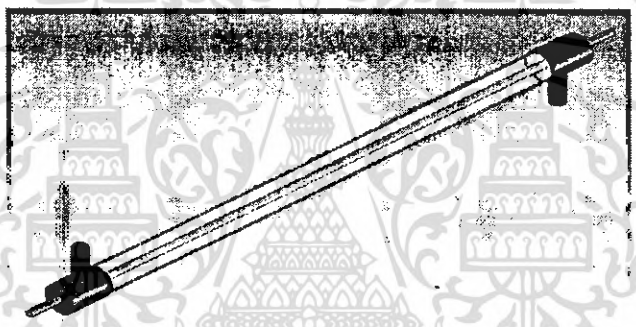
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ได้ทำการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นและเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบ เพื่อใช้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลสองชนิดที่มีการไหลทางเดียวกัน สวนทาง และตัดขวาง ซึ่งรายละเอียดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งสองแบบมีดังต่อไปนี้

1. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น

สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาการไหลของของไหลแบบไหลทางเดียวกันและสวนทางกัน โดยให้ของไหลที่มีอุณหภูมิสูงไหลอยู่ในท่อด้านในและของไหลที่อุณหภูมิต่ำกว่าไหลระหว่างท่อ โดยออกแบบให้ท่อมีสองชุดโดยมีความยาว 1 เมตร ใช้วัสดุที่แตกต่างกันคือสแตนเลสและทองแดง ท่อด้านนอกใช้ท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว ท่อด้านในมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 นิ้ว เพื่อใช้ศึกษาความแตกต่างของชนิดวัสดุที่มีผลต่อการแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 3.2 ซึ่งสามารถใช้ศึกษาการไหลในท่อตั้งแต่การไหลแบบราบเรียบไปจนถึงการไหลแบบปั่นป่วน

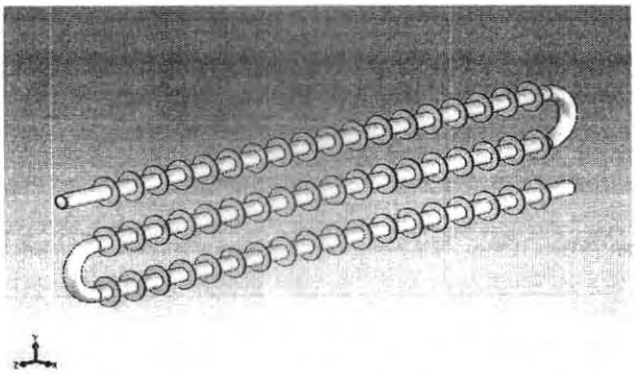


รูปที่ 3.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น

2. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบ

สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการทดลองลักษณะการไหลแบบตัดขวาง โดยให้ของเหลวไหลในท่อส่วนอากาศไหลอยู่ด้านนอก โดยใช้เป็นท่อสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 นิ้ว ที่ติดมีครีบสแตนเลสแบบบันไดวนตลอดความยาว จำนวน 250 ครีบต่อ 1 เมตร โดยมีระยะห่างระหว่างครีบ 0.39 เซนติเมตร จำนวน 3 ท่อนนำมาต่อกันขดโค้งเชื่อมต่อกันมีระยะห่างระหว่างท่อ 20 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ที่ตรงปลายทางออกของท่อแต่ละท่อนจะใช้เกลียวท่อทองเหลืองขนาด 2.5 เซนติเมตรเชื่อมติดที่ปลายทั้งสองด้านและติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลเพื่อการวัดอุณหภูมิที่ทางเข้าและทางออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบ

3.1.2 อุปกรณ์ทำน้ำร้อน

ประกอบด้วยส่วนหลักคือถังน้ำร้อน ถังน้ำเย็น ปั๊มน้ำ โดยรายละเอียดมีดังนี้

1. ถังน้ำร้อน

ถังทำจากสแตนเลสมีความจุ 80 ลิตร โดยติดตั้งเครื่องทำความร้อนแบบขดขนาด 3.5 กิโลวัตต์ไว้ดานในดังแสดงในรูปที่ 3.4

รูปที่ 3.4 ถังน้ำร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

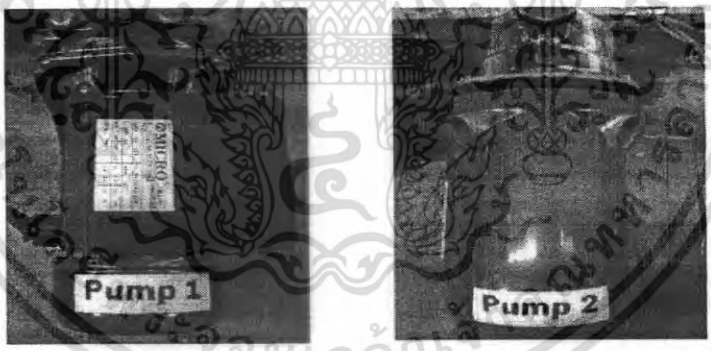
2. ถังน้ำเย็น

เป็นถังพลาสติกขนาด 50 ลิตรแสดงดังรูปที่ 3.5

รูปที่ 3.5 ถังน้ำเย็น

3. ปั๊มน้ำ

ปั๊มที่ใช้ในระบบทั้งน้ำเย็นและน้ำร้อนเป็นแบบหอยโข่งโดยที่ปั๊มสำหรับน้ำเย็นมีขนาด 0.5 แรงม้าและปั๊มน้ำร้อนมีขนาด 1.2 แรงม้าที่ใบพัดทำจากทองเหลืองและส่วนหัวทำจากสแตนเลสดังลักษณะในรูปที่ 3.6 ก และ ข



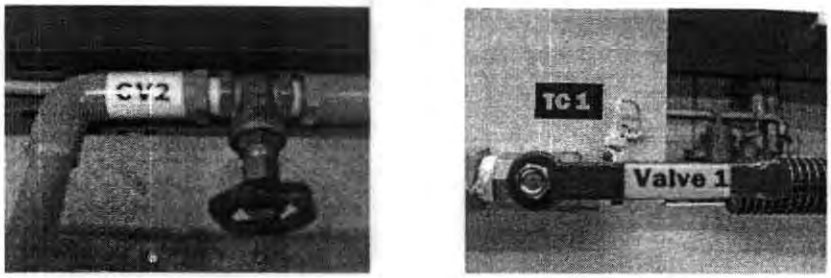
ก) ข)

รูปที่ 3.6 ปั๊มน้ำที่ใช้ในการทดลอง ก) ปั๊มน้ำเย็น ข) ปั๊มน้ำร้อน

3.1.3 ระบบท่อ

ท่อน้ำร้อน-เย็นในระบบทั้งหมดใช้เป็นท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 นิ้วและใช้วาล์วทองเหลืองขนาด 0.5 นิ้วในการควบคุมอัตราการไหล และใช้วาล์วเหล็กชุบกันสนิมขนาด 0.5 นิ้วสำหรับเปิด-ปิดซึ่งลักษณะของวาล์วทั้งสองแบบแสดงดังรูปที่ 3.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



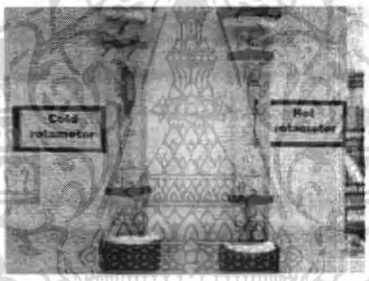
ก) ข)

รูปที่ 3.7 วาล์วที่ใช้ในการทดลอง ก) วาล์วควบคุมอัตราการไหล ข) วาล์วเปิด-ปิด

3.1.4 อุปกรณ์วัดการไหลและควบคุมอุณหภูมิ

1. อุปกรณ์วัดการไหล

อุปกรณ์วัดการไหลที่ใช้เป็นแบบโรตามิเตอร์ของ NAD ย่านวัดอัตราการไหล 25-250 ลิตรต่อชั่วโมงจำนวน 2 ตัว เพื่อใช้วัดอัตราการไหลทั้งของน้ำร้อนและน้ำเย็นดังแสดงอยู่ในรูปที่ 3.8



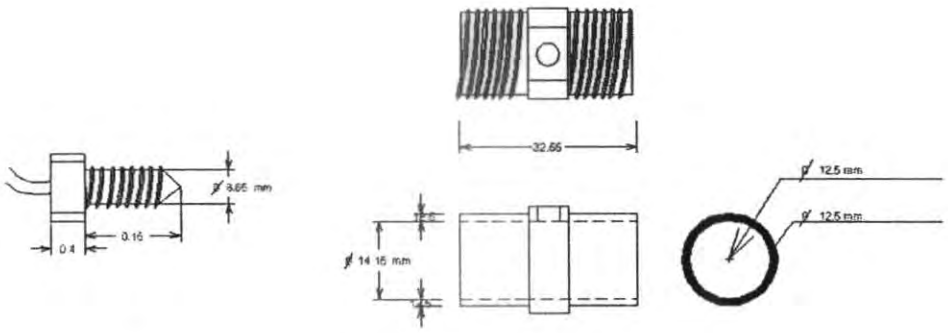
รูปที่ 3.8 โรตามิเตอร์วัดอัตราการไหล

2. อุปกรณ์วัดและควบคุมอุณหภูมิ

ถังน้ำร้อนจะมีการควบคุมอุณหภูมิของน้ำร้อนด้วยระบบควบคุมแบบ PID และเทอร์โมสตัทดังสดงในรูปที่ 3.9 ส่วนการวัดอุณหภูมิของของไหลจะใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลแบบ เค (Type k) ที่ติดตั้งในข้อต่อทองเหลืองที่เจาะรูดังลักษณะในรูปที่ 3.10

รูปที่ 3.9 อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิน้ำร้อน

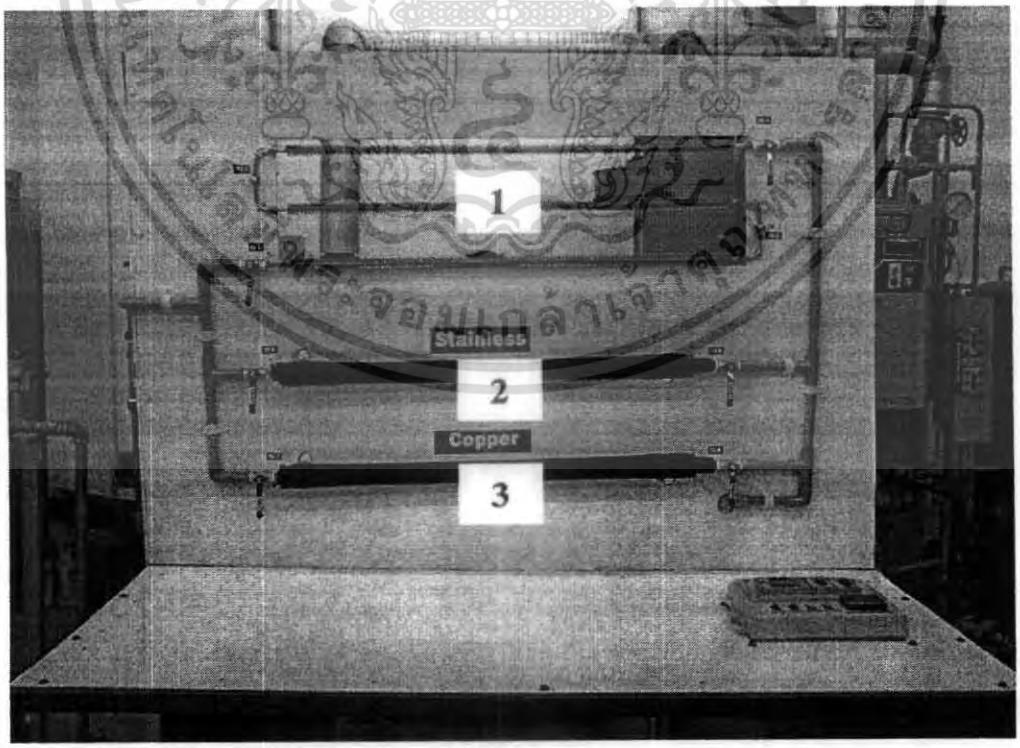
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 ข้อต่อทองเหลืองพร้อมรูเจาะและเทอร์โมคัปเปิ้ลแบบเค

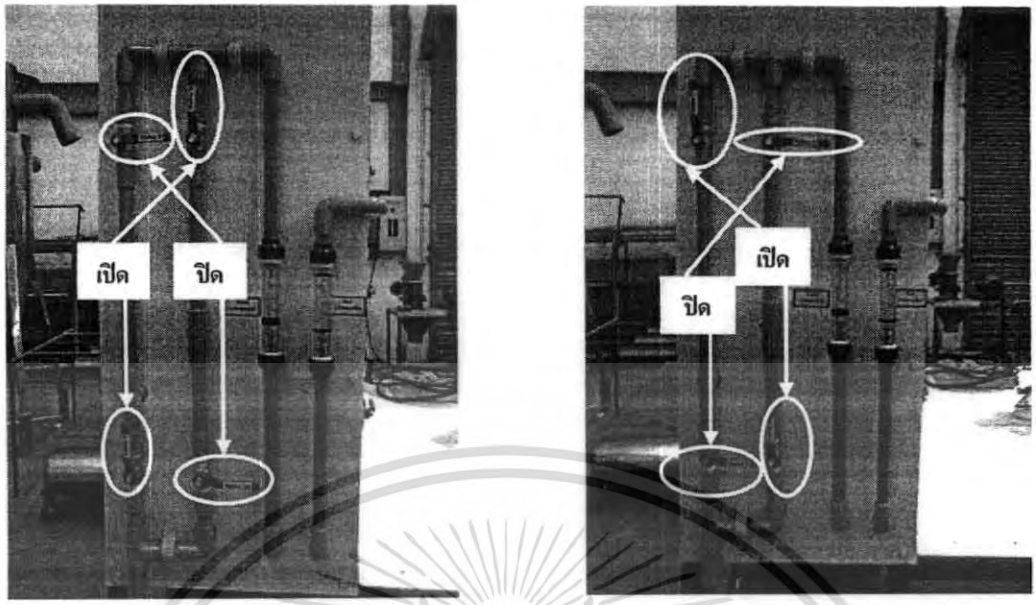
3.2 การประกอบเครื่อง

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ประกอบเรียบร้อยสามารถแสดงดังรูป 3.11 โดยในส่วนหมายเลข 1 คือ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบ หมายเลข 2 คือเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นที่ท่อภายในทำจากสแตนเลส หมายเลข 3 คือเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นที่ท่อภายในทำจากทองแดง ส่วนด้านข้างของโครงสร้างเป็นท่อและวาล์วที่ใช้ปรับเปลี่ยนทิศทางการไหลของน้ำเย็นในการทดลองการไหลให้เป็นแบบไหลทางเดียวกันหรือการไหลแบบสวนทางกัน และโรตามิเตอร์สำหรับวัดอัตราการไหลของน้ำร้อนและของน้ำเย็นดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.11 ด้านหน้าของโครงสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) ข)

รูปที่ 3.12 ท่อและวาล์วที่ใช้ในการปรับเปลี่ยนทิศทางการไหล รูป ก) แสดงการเปิด-ปิดของวาล์วสำหรับการทดลองการไหลแบบไหลทางเดียวกัน รูป ข) แสดงการเปิด-ปิดของวาล์วสำหรับการทดลองการไหลแบบไหล

ด้านหลังของเครื่องประกอบด้วยของถังน้ำร้อน ถังน้ำเย็นวาล์วที่ใช้ควบคุมอัตราการไหลของน้ำร้อนและน้ำเย็นรวมและปั๊มน้ำดังแสดงในรูปที่ 3.13

รูปที่ 3.13 ด้านหลังของโครงสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของการวัดอุณหภูมิ มีจุดวัดอุณหภูมิจำนวน 10 ชุด ติดตั้งอยู่ทั้งบริเวณด้านหน้าและด้านหลังของเครื่องดังแสดงในรูปที่ 3.14 โดยที่

จุดที่ 1 คือจุดวัดอุณหภูมิน้ำร้อนที่ทางเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบมีครีบ

จุดที่ 2 คือจุดวัดอุณหภูมิน้ำร้อนที่อยู่ที่ตำแหน่ง 1 เมตรจากทางเข้า

จุดที่ 3 คือจุดวัดอุณหภูมิน้ำร้อนที่อยู่ที่ตำแหน่ง 2 เมตรจากทางเข้า

จุดที่ 4 คือจุดวัดอุณหภูมิน้ำร้อนที่ทางออกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบมีครีบ

จุดที่ 5 คือจุดวัดอุณหภูมิน้ำร้อนที่ทางเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นชุดที่มีท่อภายในเป็นท่อสแตนเลส

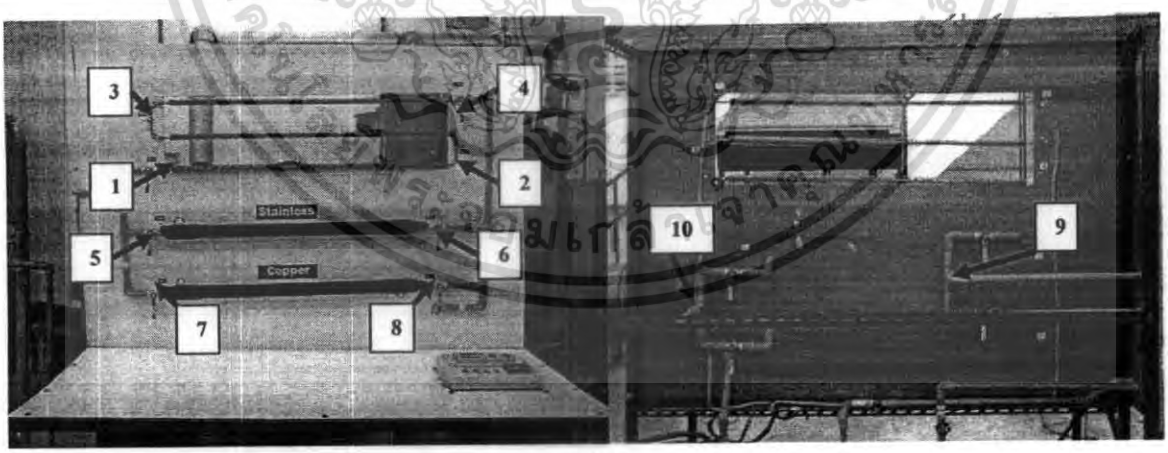
จุดที่ 6 คือจุดวัดอุณหภูมิน้ำร้อนที่ทางออกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นชุดที่มีท่อภายในเป็นท่อสแตนเลส

จุดที่ 7 คือจุดวัดอุณหภูมิน้ำร้อนที่ทางเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นชุดที่มีท่อภายในเป็นท่อทองแดง

จุดที่ 8 คือจุดวัดอุณหภูมิน้ำร้อนที่ทางออกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นชุดที่มีท่อภายในเป็นท่อทองแดง

จุดที่ 9 คือจุดวัดอุณหภูมิน้ำเย็นที่ทางออกเมื่อทำการทดลองการไหลแบบทางเดียวกัน
หรือเป็นอุณหภูมิน้ำเย็นที่ทางเข้าเมื่อทำการทดลองการไหลแบบสวนทางกัน

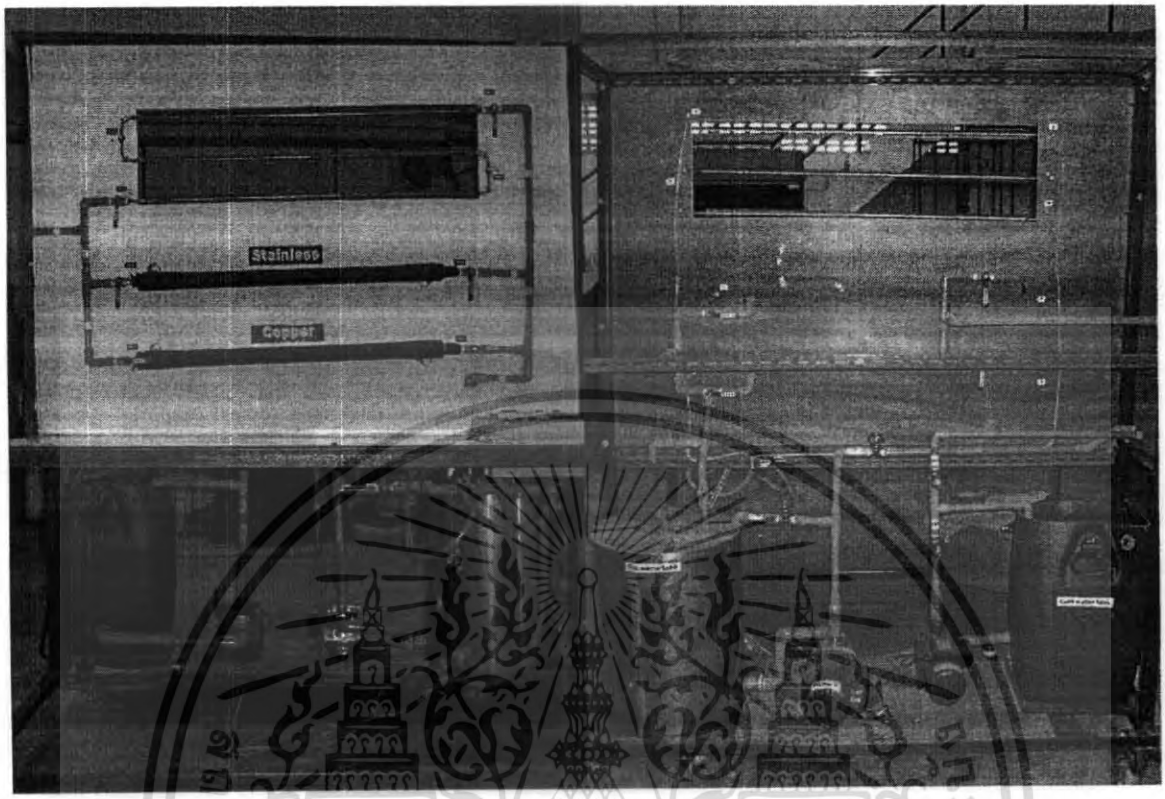
จุดที่ 10 คือจุดวัดอุณหภูมิน้ำเย็นที่ทางเข้าเมื่อทำการทดลองการไหลแบบทางเดียวกัน
หรือเป็นอุณหภูมิน้ำเย็นที่ทางออกเมื่อทำการทดลองการไหลแบบสวนทางกัน



รูปที่ 3.14 แสดงตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิจำนวน 10 ชุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งภาพด้านหน้าและด้านหลังของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ด้านหน้าและด้านหลังของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
วิธีดำเนินการทดลอง

เพื่อศึกษาการทำงานและสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ได้สร้างขึ้นนั้น ได้ทำการทดลองเพื่อหาอัตราการถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยมีรายละเอียดของวัสดุอุปกรณ์และขั้นตอนการทดลองดังต่อไปนี้

4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มี 3 แบบได้แก่ ท่อครีบ ท่อสองชั้นท่อภายในคือสแตนเลสและท่อสองชั้นท่อภายในคือทองแดง
2. กระบอกตวง
3. นาฬิกาจับเวลา
4. อุปกรณ์วัดความเร็วลม
5. พัดลมแบบตั้งพื้น

4.2 ขั้นตอนการทดลอง

การเตรียมน้ำร้อนโดยการเปิด สวิตซ์ควบคุมอุณหภูมิของน้ำร้อน เพื่อให้ได้น้ำร้อนถึงอุณหภูมิที่กำหนดก่อนเริ่มทำการทดลอง จากนั้นทำการทดลองเพื่อศึกษาการทำงานและสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสองชนิดคือเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบและแบบท่อสองชั้นโดยมีขั้นตอนการทำการทดลองดังนี้

4.2.1 การศึกษาการทำงานและสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบ

ขั้นตอนในการศึกษามีดังต่อไปนี้

1. เปิดปั๊มน้ำร้อนและปรับอัตราการไหลน้ำร้อนที่วาล์ว CV_1 และ CV_2 โดยดูจากโรตามิเตอร์และวัดอัตราการไหลโดยใช้กระบอกตวงและนาฬิกาจับเวลาโดยปรับอัตราการไหลให้ได้ประมาณ 0.5 ลิตรต่อนาที
2. เปิดให้น้ำร้อนไหลเข้าไปในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบ โดยเปิดวาล์ว V_1 และ V_2
3. บันทึกอุณหภูมิที่ TC_{in} ,TC_{1m} ,TC_{2m} และ TC_{out} ทุกๆ 1 นาทีจนกระทั่งอุณหภูมิคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ทำการทดลองซ้ำ โดยเปลี่ยนอัตราการไหลเป็น 1,2 และ 4 ลิตรต่อนาที
5. ทำการทดลองตามข้อ 1-4 ซ้ำโดยใช้พัดลมเป่าและวัดอัตราไหลของอากาศด้วยเครื่องวัดความเร็วลม

4.2.2 ศึกษาการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น

ขั้นตอนในการศึกษามีดังต่อไปนี้

<u>กรณีการไหลแบบไหลทางเดียวกัน (Co-current flow)</u>

1. เปิดปั๊มน้ำเย็นและปรับอัตราการไหลน้ำเย็นที่เปิดวาล์ว CV_3 และ CV_4 ปรับอัตราการไหลให้ได้ประมาณ 4 ลิตรต่อนาที
2. เปิดวาล์ว V_8 กับV_9 เพื่อให้การเป็นการไหลแบบไหลทางเดียวกัน
3. เปิดปั๊มน้ำร้อนและปรับอัตราการไหลน้ำร้อนให้ได้อัตราการไหลประมาณ 0.5 ลิตรต่อนาที
4. ทำการทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นที่มีวัสดุภายในท่อเป็นสแตนเลส โดยเปิดวาล์ว V_3 ,V_4 ,V_{11} และ V_{13}
5. บันทึกอุณหภูมิทางเข้าและออกของน้ำร้อนและเย็นทุกๆ 1 นาทีจนกระทั่งอุณหภูมิคงที่ โดยที่ TC_5 คือ อุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้า TC_6 คือ อุณหภูมิน้ำร้อนขาออก TC_9 คือ อุณหภูมิน้ำเย็นขาเข้า TC_{10} คือ อุณหภูมิน้ำเย็นขาออก
6. เปลี่ยนเป็นการทดลองชุดท่อที่มีวัสดุภายในท่อเป็นทองแดง โดยปิดวาล์ว V_3 ,V_4 ,V_{11} และ V_{13} และเปิดวาล์ว V_5 , V_6 , V_{12} และ V_{14}
7. บันทึกอุณหภูมิทางเข้าและทางออกของน้ำร้อนเย็นทุกๆ 1 นาทีจนกระทั่งอุณหภูมิคงที่ โดยที่ TC_7 คือ อุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้า TC_8 คือ อุณหภูมิน้ำร้อนขาออก TC_9 คือ อุณหภูมิน้ำเย็นขาเข้า TC_{10} คือ อุณหภูมิน้ำเย็นขาออก
8. ทำการทดลองตั้งแต่ข้อ 3-7 โดยเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำร้อนเป็น 1,2 และ4 ลิตรต่อนาที

<u>กรณีการไหลแบบไหลสวนทางกัน (Counter flow)</u>

1. เปิดปั๊มน้ำเย็นและปรับอัตราการไหลน้ำเย็นที่เปิดวาล์ว CV_3 และ CV_4 ปรับอัตราการไหลให้ได้ประมาณ 4 ลิตรต่อนาที
2. เปิดวาล์ว V_7 กับ V_{10} เพื่อให้การเป็นการไหลแบบไหลสวนทางกัน
3. เปิดปั๊มน้ำร้อนและปรับอัตราการไหลน้ำร้อนให้ได้อัตราการไหลประมาณ 0.5 ลิตรต่อนาที
4. ทำการทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นที่มีวัสดุภายในท่อเป็นสแตนเลส โดยเปิดวาล์ว V_3 ,V_4 ,V_{11} และ V_{13}
5. บันทึกอุณหภูมิทางเข้าและออกของน้ำร้อนและเย็นทุกๆ 1 นาทีจนกระทั่งอุณหภูมิคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ TC_5 คือ อุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้า TC_6 คือ อุณหภูมิน้ำร้อนขาออก
TC_{10} คือ อุณหภูมิน้ำเย็นขาเข้า TC_9 คือ อุณหภูมิน้ำเย็นขาออก

6. เปลี่ยนเป็นการทดลองชุดท่อที่มีวัสดุภายในท่อเป็นทองแดงโดยปิดวาล์ว V_3 ,V_4 ,V_{11} และ V_{13} และเปิดวาล์ว V_5 , V_6 , V_{12} และ V_{14}
7. บันทึกอุณหภูมิทางเข้าและทางออกของน้ำร้อนเย็นทุกๆ 1 นาทีจนกระทั่งอุณหภูมิคงที่

โดยที่ TC_7 คือ อุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้า TC_8 คือ อุณหภูมิน้ำร้อนขาออก
TC_{10} คือ อุณหภูมิน้ำเย็นขาเข้า TC_9 คือ อุณหภูมิน้ำเย็นขาออก

8. ทำการทดลองตั้งแต่ข้อ 3-7 โดยเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำร้อนเป็น 1,2 และ 4 ลิตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

5.1 การทำงานและสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบ

ได้ทดสอบการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบโดยให้น้ำร้อนไหลภายในท่อและอากาศไหลผ่านทางด้านนอกท่อแล้วศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำและอากาศ ที่มีผลต่ออุณหภูมิและอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อน

5.1.1 ผลของอัตราการไหลของน้ำร้อน

ได้ทำการทดลองโดยการเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำร้อนในช่วง 0.5-4 ลิตรต่อนาที โดยอุณหภูมิที่วัดจากตำแหน่งต่างๆของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แสดงดังตารางที่ 5.1 จากตารางจะพบว่าที่ทุกอัตราการไหลจะมีการลดลงของอุณหภูมิสูงสุดในช่วง 1 เมตรแรก และลดลงน้อยหรือแทบไม่ลดลงเลยที่ระยะ 2และ 3 เมตร อันอาจจะเกิดเนื่องจากอุณหภูมิของน้ำในท่อช่วงแรกมีอุณหภูมิสูงทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิเมื่อเทียบกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมสูงกว่า ดังนั้นสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของการพาแบบธรรมชาติจึงสูงกว่าทำให้อุณหภูมิลดลงได้มากที่สุด เมื่อพิจารณาอัตราการถ่ายเทความร้อนที่อัตราการไหลต่างๆที่แสดงในตารางที่ 5.2 พบว่าโดยรวม อัตราการถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราการไหลของน้ำร้อนเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีที่ว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนจะแปรตามอัตราการไหลและความแตกต่างของอุณหภูมิ ดังนั้นอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงขึ้น แต่ที่อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาทีมีอัตราการถ่ายเทความร้อนมากกว่าที่ 1 ลิตรต่อนาทีเนื่องจากมีการลดลงของอุณหภูมิที่สูงกว่าที่อัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที ทำให้ได้อัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบ

อัตราการไหล (ลิตรต่อนาที)	ตำแหน่งที่วัด	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
0.5	ทางเข้า	59
	ระยะ 1 เมตร	55
	ระยะ 2 เมตร	53
	ระยะ 3 เมตร	52
1	ทางเข้า	58
	ระยะ 1 เมตร	56
	ระยะ 2 เมตร	56
	ระยะ 3 เมตร	55
2	ทางเข้า	59
	ระยะ 1 เมตร	56
	ระยะ 2 เมตร	56
	ระยะ 3 เมตร	56
4	ทางเข้า	59
	ระยะ 1 เมตร	57
	ระยะ 2 เมตร	56
	ระยะ 3 เมตร	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 อัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบ

อัตราการไหล (ลิตรต่อนาที)	อัตราการถ่ายเทความร้อน (วัตต์)
0.5	255.78
1	216.23
2	418.90
4	556.34

5.1.2 ผลของอัตราการไหลของอากาศ

ได้ทำการทดลองเช่นเดียวกับหัวข้อข้างต้นแต่ได้เพิ่มการทดลองโดยใช้พัดลมเป่าอากาศ เพื่อศึกษาผลของอัตราการไหลของอากาศที่มีต่อสมรรถนะในการแลกเปลี่ยนความร้อน ผลของอุณหภูมิที่วัดจากตำแหน่งต่างๆ สำหรับกรณีอากาศนิ่งและใช้พัดลม โดยการเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำในช่วง 0.47-3.46 ลิตรต่อนาที สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.3 ซึ่งพบว่ากรณีใช้พัดลมจะสามารถลดอุณหภูมิของน้ำร้อนได้มากกว่ากรณีอากาศนิ่งในทุกๆ กรณี เนื่องจากการใช้พัดลมช่วยทำให้เกิดการพาความร้อนแบบบังคับซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงกว่าการพาความร้อนแบบธรรมชาติที่สภาวะอากาศนิ่ง ส่วนแนวโน้มของการลดของอุณหภูมิตามความยาวท่อจะเป็นเช่นเดียวกับหัวข้อ 5.1.1 และเมื่อมาพิจารณาอัตราการถ่ายเทความร้อนของทั้งกรณีอากาศนิ่งและการใช้พัดลมพบว่าเมื่อมีการใช้พัดลมจะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดดังแสดงในตารางที่ 5.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบของการทดลองที่อากาศนิ่งและใช้พัดลม

อัตราการไหล (ลิตรต่อนาที)	ตำแหน่งที่วัด	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	
		อากาศนิ่ง	ใช้พัดลม
0.47	ทางเข้า	54.5	53.5
	ระยะ 1 เมตร	52	48.5
	ระยะ 2 เมตร	50	44.5
	ระยะ 3 เมตร	46	41.5
1.2	ทางเข้า	58	57.5
	ระยะ 1 เมตร	56	55.0
	ระยะ 2 เมตร	55	53.5
	ระยะ 3 เมตร	54	51.0
3.46	ทางเข้า	57.5	57.0
	ระยะ 1 เมตร	56.5	55.0
	ระยะ 2 เมตร	56	54.0
	ระยะ 3 เมตร	55.5	53.5

ตารางที่ 5.4 อัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบของการทดลองที่อากาศนิ่งและใช้พัดลม

อัตราการไหล (ลิตรต่อนาที)	อัตราการถ่ายเทความร้อน (วัตต์)	
	อากาศนิ่ง	ใช้พัดลม
0.47	275.64	388.32
1.20	392.68	535.73
3.46	475.28	831.87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 การทำงานและสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น

ได้ทำการศึกษาการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำร้อนที่ไหลอยู่ในท่อด้านในและน้ำเย็นที่ไหลระหว่างท่อ ผลของอัตราการไหล ชนิดของวัสดุใช้เป็นท่อด้านใน และทิศทางการไหลที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน โดยการแปรเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำร้อนในท่อ 4 อัตราในช่วง 0.5-4 ลิตรต่อนาที ใช้วัสดุท่อด้านในสองชนิดคือสแตนเลสและทองแดง และเปลี่ยนทิศทางการไหลของน้ำเย็นให้เป็นแบบไหลในทิศทางเดียวและสวนทางกับน้ำร้อน โดยกำหนดให้อัตราการไหลของน้ำเย็นคงที่ที่ 4 ลิตรต่อนาทีในทุกการทดลอง ซึ่งอัตราการถ่ายเทความร้อนรวมของทุกการทดลองได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.5 และตัวอย่างการคำนวณแสดงอยู่ในภาคผนวก ข.

เมื่อศึกษาผลของอัตราการไหลที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน พบว่าที่อัตราการไหลต่ำสุดคือที่ 0.5 ลิตรต่อนาที จะมีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนน้อยที่สุด และอัตราการถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน ที่ว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนจะแปรตามมวลและความแตกต่างของอุณหภูมิเชิงล็อก ดังนั้นที่อัตราการไหลสูงขึ้นจึงมีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูงขึ้นด้วย เมื่อวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของทั้ง 4 อัตราการไหลพบว่ามีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราการไหลเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีเนื่องจากสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจึงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลของของไหลเพิ่มขึ้น

เมื่อศึกษาผลของชนิดของท่อด้านในที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการเปรียบเทียบระหว่างท่อสแตนเลสและทองแดงพบว่าส่วนใหญ่ท่อทองแดงจะมีอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนที่สูงกว่าท่อสแตนเลส เนื่องจากท่อทองแดงมีสภาพการนำความร้อนสูงกว่า เมื่อพิจารณาที่สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนพบว่าไม่สามารถสรุปได้ว่าการท่อทองแดงจะมีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าการไหลในท่อสแตนเลส อันอาจจะเนื่องจากมีการสูญเสียความร้อนเกิดขึ้นระหว่างการถ่ายเทความร้อน ทำให้ไม่สามารถเห็นสรุปได้ว่าการไหลถึงความแตกต่างของสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของท่อด้านในที่มีวัสดุที่แตกต่างกันได้

เมื่อศึกษาผลของทิศทางการไหลที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนพบว่า ลักษณะการไหลแบบสวนทางกันส่วนใหญ่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าลักษณะการไหลแบบทางเดียวกัน เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจะเห็นได้ว่าโดยส่วนใหญ่ลักษณะการไหลแบบสวนทางก็จะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจะมีค่าสูงกว่าที่ลักษณะการไหลแบบทางเดียวกัน

โดยสรุปแล้วจะเห็นได้ว่าปัจจัยที่มีผลมากที่สุดต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมคืออัตราการไหลส่วนลักษณะทิศทางการไหลก็มีผลเช่นกันแต่ไม่มากเท่า ในขณะที่ชนิดของวัสดุที่ใช้เป็นท่อภายในแทบจะไม่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการเปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่ได้จากทางทฤษฎีและปฏิบัติ ดังแสดงไว้ที่ตารางที่ 5.6 ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น โดยตัวอย่างการคำนวณได้แสดงไว้ในภาคผนวก ค. เมื่อพิจารณาผลที่ได้จากทางทฤษฎีพบว่าโดยส่วนใหญ่ผลที่ได้เป็นเช่นเดียวกับผลที่ได้จาการทดลอง

เมื่อศึกษาผลของอัตราการไหลจากทางทฤษฎีพบว่าที่อัตราการไหลเพิ่มสูงขึ้นอัตราการถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้นด้วยแต่ผลที่เพิ่มขึ้นมีเพียงเล็กน้อยซึ่งแตกต่างกับของผลที่ได้จากการทดลองที่มีการเพิ่มสูงขึ้นมากอย่างชัดเจน

เมื่อศึกษาผลของท่อด้านในที่แตกต่างกันจากทางทฤษฎีพบว่าโดยส่วนใหญ่แล้วท่อทองแดงมีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าสแตนเลส ซึ่งแตกต่างกับผลของการทดลองแต่มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยและ เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมแล้วพบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกันอย่างมากซึ่งแตกต่างจากผลของการทดลองซึ่งมีความแตกต่างกันที่เห็นได้ชัดเจนมากกว่า

เมื่อศึกษาผลของทิศทางการไหลที่จากทางทฤษฎีที่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนพบว่าส่วนใหญ่ลักษณะการไหลแบบสวนทางกันมีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่า ซึ่งมีผลเช่นเดียวกับผลที่ได้จากการทดลองแต่มีความแตกต่างของอัตราการถ่ายเทความร้อนที่น้อยกว่าผลที่ได้จากการทดลอง และเมื่อพิจารณาลักษณะการไหลที่แตกต่างกันพบว่าผลที่ได้จากทางทฤษฎีไม่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเพราะมีค่าที่เกือบเท่ากันซึ่งแตกต่างจากผลที่ได้จาการทดลองที่สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบสวนทางกันจะมีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่สูงกว่า

โดยสรุปแล้วจะเห็นได้ว่าผลที่ได้จากทางทฤษฎีจะมีความใกล้เคียงกันคือจะอยู่ในช่วงที่ไม่กว้างมากนักแต่ในส่วนของจากการทดลองที่จะมีช่วงที่กว้างมากกว่า โดยจากทางทฤษฎีอัตราการถ่ายเทความร้อนจะอยู่ในช่วง 112.2-284.วัตต์และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจะอยู่ในช่วง 154.6-269.5 วัตต์ต่อตารางเมตร-องศาเซลเซียสซึ่งค่าที่ได้จะต่ำกว่าผลที่ได้จากการทดลองที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนอยู่ในช่วง 248.57-1105.82 วัตต์และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมอยู่ในช่วง 272.24-1231.13 วัตต์ต่อตารางเมตร-องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.5 สมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นที่สภาวะต่างๆ

วัสดุของท่อภายใน	อัตราการไหลลิตรต่อนาที	ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงล็อก (องศาเซลเซียส)	อัตราการถ่ายเทความร้อน (วัตต์)	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม
ลักษณะของการไหลแบบไหลทางเดียวกัน				
ท่อสแตนเลส	0.5	20.16	253.03	321.73
	1	22.76	429.41	483.64
	2	21.61	969.76	1150.34
	4	26.80	1103.6	1055.85
ท่อทองแดง	0.5	18.55	277.06	382.92
	1	20.16	488.96	621.70
	2	22.86	556.34	623.78
	4	26.88	825.86	787.55
ลักษณะของการไหลแบบไหลสวนทางกัน				
ท่อสแตนเลส	0.5	23.41	248.57	272.24
	1	21.93	439.72	513.91
	2	21.46	843.51	996.87
	4	23.98	1105.82	1182.12
ท่อทองแดง	0.5	20.85	314.80	387.01
	1	20.85	570.90	701.88
	2	22.46	834.52	952.43
	4	22.98	1103.62	1231.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.6 การเปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ได้จากทางทฤษฎีและปฏิบัติ

วัสดุของท่อภายใน	อัตราการไหล (ลิตรต่อนาที)	อัตราการถ่ายเทความร้อน (วัตต์)		สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม	
		การทดลอง	ทฤษฎี	การทดลอง	ทฤษฎี
ลักษณะของการไหลแบบไหลทางเดียวกัน					
ท่อสแตนเลส	0.5	253.03	122.6	321.73	154.9
	1	429.41	208.6	483.64	233.4
	2	969.76	215.9	1150.34	254.4
	4	1103.6	283.2	1055.85	269.2
ท่อทองแดง	0.5	277.06	112.2	382.92	154.1
	1	488.96	184.2	621.70	232.7
	2	556.34	228.7	623.78	254.8
	4	825.86	284.4	787.55	269.5
ลักษณะของการไหลแบบไหลสวนทางกัน					
ท่อสแตนเลส	0.5	248.57	192.7	272.24	154.6
	1	439.72	201.8	513.91	234.3
	2	843.51	214.4	996.87	254.5
	4	1105.82	253.5	1182.12	269.2
ท่อทองแดง	0.5	314.80	126.3	387.01	154.3
	1	570.90	191.1	701.88	233.4
	2	834.52	224.7	952.43	254.8
	4	1103.62	243.2	1231.13	269.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง

6.1.1 โครงการนี้ได้สร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อใช้ในห้องปฏิบัติการโดยอุปกรณ์ประกอบด้วย ส่วนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อที่มีครีบและท่อสองชั้นที่ท่อในทำจากทองแดงและสแตนเลส ถังทำน้ำร้อนที่มีความจุ 80 ลิตรโดยใช้เครื่องทำความร้อนแบบขดขนาต 3.5 กิโลวัตต์ในการให้ความร้อน ปั๊มน้ำ ระบบท่อ อุปกรณ์วัดการไหลและควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งสามารถใช้ในการศึกษาในห้องปฏิบัติการเพื่อให้นักศึกษาได้ศึกษาเกี่ยวกับการไหลของของไหล อุปกรณ์การวัดและควบคุมการไหลและอุณหภูมิ รวมทั้งหลักการของการถ่ายเทความร้อนและสมรรถนะเครื่องได้เป็นอย่างดี

6.1.2 ได้ทำการศึกษาการทำงานและสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อครีบและท่อสองชั้น จากการทดลองพบว่าอัตราการไหลของของไหลมีผลต่อสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งสองแบบมากที่สุด ส่วนความเร็วลมของอากาศที่ไหลผ่านครีบจะมีผลต่อทำให้ให้สมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อครีบสูงขึ้นเมื่อเทียบกับอากาศนิ่ง ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อแบบท่อสองชั้นจะพบว่าถ้าให้ของไหลสองชนิดไหลสวนทางกันจะมีสมรรถนะดีกว่าการไหลแบบทางเดียวกันสามารถประเมินสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของท่อสองชั้นได้ในช่วง 270-1230 วัตต์ต่อตารางเมตรต่อองศาเซลเซียสซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ใช้กันอยู่ในอุตสาหกรรม แสดงว่าการประเมินสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากการทดลองมีค่าได้สามารถอ้างอิง และใช้ในการศึกษาได้จริง

6.2 ข้อเสนอแนะ

6.2.1 จากการทดลองในส่วนของพัดลมเป่าอากาศที่ใช้ในการทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบในการทดลองครั้งนี้จะใช้เป็นพัดลมแบบตั้งโต๊ะที่ตั้งอยู่ห่างจากเครื่องมากและไม่สามารถปรับและควบคุมความเร็วอากาศได้ นอกจากนี้ยังไม่สามารถหาอัตราการไหลและอุณหภูมิของอากาศได้ที่ไหลผ่านครีบได้อีกด้วย จึงแนะนำว่าถ้ามีการติดอุปกรณ์ครอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบเพื่อสามารถวัดอัตราการไหลของอากาศที่ไหลผ่านครีบและติดตั้งพัดลมเป่าอากาศที่สามารถปรับความเร็วของอากาศได้และบริเวณที่ติดตั้งให้อยู่ใกล้เครื่องรวมถึงติดตั้งจุดวัดอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเพื่อวัดอุณหภูมิของอากาศที่หลังจากไหลผ่านครีบแล้วจะสามารถทดลองหาผลที่มีต่อสมรรถนะของครีบได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.2. โดยในการทดสอบสมรรถนะของการแลกเปลี่ยนความร้อนของท่อครีบที่ไม่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนจากท่อที่ไม่มีการติดครีบที่จะมาเปรียบเทียบกับท่อที่มีการติดครีบแล้ว จึงแนะนำว่าถ้ามีการเพิ่มท่อสแตนเลสที่ขนาดเท่ากับท่อแบบครีบความยาว 1 เมตรจะทำให้สามารถเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนท่อในกรณีที่ไม่มีการติดครีบกับเมื่อติดครีบได้

6.2.3. จากการทดลองพบว่าการทำงานของปั๊มจะไม่สม่ำเสมออันเนื่องมาจากกระแสไฟที่ใช้ในห้องปฏิบัติการทำให้อัตราการไหลไม่คงที่ ดังนั้นจึงแนะนำว่าถ้ามีการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมกระแสไฟที่ก่อนเข้าสู่ปั๊มจะทำให้การทำงานของปั๊มมีความสม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] Ramesh K. Shah,Dusan P.Sekulic. (2003). Fundamentals of heat exchanger design. Hoboken, NJ, John Wiley & Sons.

[2] Saunders, E. A. D. (1988). HEAT EXCHANGER : Selection, design & construction New York, Longman Scientific & Technical

[3] วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล. (2536). **อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในอุตสาหกรรม**. กรุงเทพฯ, ส.เอเชียเพลส (1989) จำกัด.

[4] Cengel, Y. A. (2003). Heat transfer : a practical approach Boston McGraw-Hill.

[5] Holman, J. P. (2002). Heat Transfer. New York, McGraw-hill

[6] มนตรี พิรุณเกษตร (2545). **การถ่ายเทความร้อน**. กรุงเทพฯ, วิทยพัฒน์.

[7] Penas, F. J., A. Elias, et al. (2002). "Compact and Low-Cost Heat Exchangers for an Undergraduate." Chem. Educator 7(2): 4.

[8] Varshney, K. and P. K. Panigrahi (2005). "Artificial neural network control of a heat exchanger in a closed flow air circuit." Applied Soft Computing 5(4): 441-465.

[9] ธีรยุทธ น้อยดาและนาวิน ชีวพัฒนานุกุล. **เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น**. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมพระนครเหนือ, (2543)

[10] Hampden Modal H-6878 6-pass Heat Exchanger Demonstrator [online].Available : www.hampden.com/pdf/6878.pdf

[11] Sanitary Heat Exchangers EW-36125-60 [online].Available: http://www.coleparmer.com/catalog/Product_view.asp?sku=3612560&pfx=EW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก. การคำนวณของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อมีครีบ

ตัวอย่างการหาอัตราการถ่ายเทความร้อนจากของไหลในท่อแบบครีบสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p \Delta T$$

สำหรับการศึกษาที่อัตราการไหลของน้ำร้อน 0.532 ลิตรต่อนาที วัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆของท่อมีครีบได้ดังนี้

$$T_{in} = T_0 = 59\ ^\circ C \qquad T_{1m} = 55\ ^\circ C$$

$$T_{2m} = 53\ ^\circ C \qquad T_{3m} = 52\ ^\circ C$$

ในการประเมินคุณสมบัติของน้ำร้อนจะทำที่อุณหภูมิเฉลี่ย

สำหรับช่วง 1 เมตรแรก

$$T_{avg,1m} = \frac{T_{in} - T_{out}}{2} = \frac{59 + 52}{2} = 55.5^\circ C$$

คุณสมบัติของน้ำที่อุณหภูมิ $55\ ^\circ C$ เท่ากับ

$$\rho = 985.2 \frac{kg}{m^3}$$

$$C_p = 4183\ {}^{J}\!/_{kg \cdot ^\circ C}$$

ซึ่งจะหาอัตราการถ่ายเทความร้อนได้

โดยที่ อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ช่วง 1 เมตร

$$\dot{Q}_{1m} = \dot{m} C_p (T_{in} - T_{1m})$$

$$= \frac{0.532}{1000} \times \frac{985.2}{60} \times 4183 \times (59 - 55)$$

$$= 146.16 \quad W$$

สำหรับช่วง 2 เมตรและ 3 เมตรจะได้อุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ

$$T_{avg,2m} = \frac{T_{1m} - T_{2m}}{2} = \frac{55 + 53}{2} = 54^\circ C$$

และ $$T_{avg,3m} = \frac{T_{2m} - T_{3m}}{2} = \frac{53 + 52}{2} = 52.5^\circ C$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจึงใช้อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 55 $°C$

คุณสมบัติของน้ำที่อุณหภูมิ 55 $°C$ เท่ากับ

$$\rho = 985.2 \frac{kg}{m^3}$$

$$C_p = 4183 \ {}^{J}\!/_{kg \cdot °C}$$

อัตราการถ่ายเทอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ช่วง 2 เมตรและ 3 เมตร เท่ากับ

$$\dot{Q}_{2m} = 73.08 \ \ W$$

$$\dot{Q}_{3m} = 36.54 \ \ W$$

ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนรวมทั้งหมด $\dot{Q}_{total}$ เท่ากับ

$$\dot{Q}_{total} = \dot{Q}_{1m} + \dot{Q}_{2m} + \dot{Q}_{3m}$$

$$= 146.16 + 73.08 + 36.54$$

$$= 255.78 \ \ W$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข. ตัวอย่างการคำนวณของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นจากการทดลอง

การหาอัตราการถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นสามารถประเมินได้โดยอาศัยหลักการสมดุลความร้อนคือ อัตราการถ่ายเทความร้อนจากของไหลจะเท่ากับอัตราการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนดังสมการ

$$\dot{Q} = \dot{m}C_p\Delta T = UA_s\Delta T_{lm}$$

โดยหา $\dot{Q}$ สามารถหาได้จากสมการ

$$\dot{Q} = \dot{m}C_p\Delta T$$

สำหรับกรณีศึกษาการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นของท่อในที่เป็นสแตนเลสแบบไหลทางเดียวกันโดยที่มีอัตราการไหลของน้ำร้อนที่ 0.533 ลิตรต่อนาทีวัดอุณหภูมิที่ทางเข้าและทางออกน้ำร้อน-เย็นได้เท่ากับ

$T_{h,in} = 53\ ^\circ C$ $\quad T_{h,out} = 46\ ^\circ C$

$T_{c.in} = 30\ ^\circ C$ $\quad T_{c,out} = 31\ ^\circ C$

การหาอัตราการถ่ายเทความร้อนจากน้ำร้อนและน้ำเย็น ทำโดยการหาคุณสมบัติต่างๆของน้ำที่อุณหภูมิเฉลี่ยโดย

น้ำร้อน $T_{avg,h} = \dfrac{T_{h,in} + T_{h,out}}{2} = \dfrac{53+46}{2} = 49.5^\circ C$

น้ำเย็น $T_{ovg,c} = \dfrac{T_{c,in} + T_{c,out}}{2} = \dfrac{30+31}{2} = 31.5^\circ C$

ซึ่งสามารถหาคุณสมบัติของน้ำร้อนและน้ำเย็นได้ดังนี้

น้ำร้อน $\rho = 988.1\ \dfrac{kg}{m^3}$ $\quad C_p = 4181\ {}^{J}\!/_{kg\cdot^\circ C}$

น้ำเย็น $\rho = 996\ \dfrac{kg}{m^3}$ $\quad C_p = 4178\ {}^{J}\!/_{kg\cdot^\circ C}$

จะได้อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยของฝั่งน้ำร้อน

$$\dot{Q} = \frac{0.553}{1000} \times 988.1 \times \frac{4181}{60} \times (53-46)$$

$$= 256.9\ \ W$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และฝั่งน้ำเย็น

$$\dot{Q} = \frac{4.025}{1000} \times 996.1 \times \frac{4178}{60} \times (31-30)$$
$$= 279.18\ W$$

เลือกใช้อัตราการถ่ายเทความร้อนจากฝั่งน้ำร้อนเนื่องจากมีการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของฝั่งน้ำร้อน

จากสมการ $\dot{Q} = UA_s\Delta T_{lm}$

ดังนั้นสามารถหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม U ได้จากสมการที่ 2.11

โดยที่ $\dot{Q}$ ได้จากการประเมินข้างต้น

$$U = \frac{\dot{Q}}{A_s\Delta T_{lm}}$$

โดยที่ A_s มีค่าเท่ากับ

$$A_s = \pi DL = \pi(0.0127)(1) = 0.039\ m^2$$

และหาค่า ΔT_{lm} โดยใช้สมการที่ 2.14

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\Delta T_1 / \Delta T_2\right)}$$

โดย ΔT_1 และ ΔT_2 ของการไหลแบบทางเดียวกันกำหนดให้จากรูปที่ 2.4

$$\Delta T_1 = T_{h,in} - T_{c,in} = (53-30) = 23\ ^\circ C$$

และ $$\Delta T_2 = T_{h,out} - T_{c,out} = (46-31) = 15\ ^\circ C$$

แทนค่า ΔT_1 และ ΔT_2 ในสมการ ΔT_{lm} ได้เท่ากับ

$$\Delta T_{lm} = \frac{(23-15)}{\ln\left(23/15\right)} = 18.73\ ^\circ C$$

แทนค่าในสมการ U จะได้

$$U = \frac{\dot{Q}}{A_s\Delta T_{lm}} = \frac{256.9}{0.039 \times 18.73}$$
$$= 351.67\ W/m^2 \cdot ^\circ C$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค. ตัวอย่างการคำนวณของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นทางทฤษฎี

จากการทดลองที่เป็นการทดลองการแลกเปลี่ยนความร้อนทางเดียวกัน ภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีท่อสแตนเลสเป็นท่อด้านใน ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน $d_i = 0.0125$ เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก $D_i = 0.0127$ เมตรและที่ท่อด้านนอกเป็นท่อพีวีซีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน $D_o = 0.0250$ เมตรทำให้มีพื้นที่ถ่ายเทความร้อน $A_s = \pi D_i L = 0.039$ ตารางเมตร

โดยที่ อัตราการไหลของน้ำร้อน = 0.525 ลิตรต่อนาที

อัตราการไหลของน้ำเย็น = 4.067 ลิตรต่อนาที

อุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้า $(T_{h,in})$ = 55 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิน้ำร้อนขาออก $(T_{h,out})$ = 48 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิน้ำเย็นขาเข้า $(T_{c,in})$ = 30 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิน้ำเย็นขาออก $(T_{c,out})$ = 32 องศาเซลเซียส

หาคุณสมบัติของน้ำร้อนที่อุณหภูมิเฉลี่ยที่ $\overline{T_h} = \frac{T_{h,in} + T_{h,out}}{2} = \frac{55 + 48}{2} = 51.5\ ^\circ C$

หาคุณสมบัติของน้ำเย็นที่อุณหภูมิเฉลี่ยที่ $\overline{T_c} = \frac{T_{c,in} + T_{c,out}}{2} = \frac{30 + 32}{2} = 31\ ^\circ C$

คุณสมบัติของน้ำร้อนที่ 50 องศาเซลเซียส และ ของน้ำเย็นที่ 30 องศาเซลเซียส

	50 องศาเซลเซียส	30 องศาเซลเซียส
$\rho \left(kg/m^3\right)$	988.1	996.0
$C_p \left(J/kg \cdot ^\circ C\right)$	4182	4179
$\mu \left(kg/m \cdot s\right)$	$0.525\ E^{-3}$	$0.8445E^{-3}$
$k \left(W/m \cdot ^\circ C\right)$	0.644	0.615
Pr	3.55	5.42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม U ได้จากสมการ

$$U = \frac{1}{R_{total}} \; ; R_{total} = \frac{1}{h_i A_i} + R_{wall} + \frac{1}{h_o A_o}$$

กำหนดให้ h_i คือสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนโดยวิธีการพาของน้ำร้อนที่ไหลอยู่ภายในท่อด้านในคำนวณได้ จากสมการ

$$h_i = \frac{Nu_i \cdot k}{d_i}$$

โดยที่ การไหลแบบราบเรียบ Re(2300

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho D u}{\mu} = \frac{988.1 \times 0.0125 \times 0.071}{0.525E^{-3}} = 1627 = \text{การไหลแบบราบเรียบ}$$

ดังนั้น

$$Nu_i = 3.66 + \frac{0.065(\frac{d_i}{L})\mathrm{Re}\cdot\mathrm{Pr}}{1 + 0.04\left[(\frac{d_i}{L})\mathrm{Re}\cdot\mathrm{Pr}\right]^{2/3}} = 3.66 + \frac{0.065\left(\frac{0.0125}{1}\right)\cdot 1627 \cdot 3.55}{1 + 0.04\left[\left(\frac{0.0125}{1}\right)\cdot 1627 \cdot 3.55\right]^{2/3}}$$

$$Nu_i = 6.43$$

$$\therefore \quad h_i = \frac{k}{d_i}(Nu_i) = \frac{0.644}{0.0125}(6.43) = 331.33 \; \frac{W}{m^2 \cdot °C}$$

กำหนดให้ $h_{i,annular}$ คือสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนโดยวิธีการพาของน้ำเย็นที่ไหลอยู่ภายในช่องว่างระหว่างท่อพีวีซีด้านในและผนังท่อสแตนเลสที่อยู่ด้านนอก (Annular) สามารถคำนวณได้โดย

$$\frac{D_i}{D_o} = \left(\frac{0.0127}{0.0250}\right) = 0.508$$

จากตารางที่ 3.1 จะได้ $Nu_i = 5.74$

$$h_{i,annular} = \frac{k}{D_h}(Nu_i) = \frac{0.615}{0.0123}(5.74) = 287.0 \; \frac{W}{m^2 \cdot °C}$$

หา R_{wall} จากสมการ $R_{wall} = \dfrac{\ln(\frac{D_i}{d_i})}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot k} = \dfrac{\ln(\frac{0.0127}{0.0125})}{2 \times 3.14 \times 1 \times 15.2}$

$$R_{wall} = 1.66 \times 10^{-4} \; \frac{°C}{W}$$

จะได้ $R_{total} = \dfrac{1}{h_i A_i} + R_{wall} + \dfrac{1}{h_{i,annular} A_o} = \dfrac{1}{331.33 \times 0.0393} + 1.66 \times 10^{-4} + \dfrac{1}{287.0 \times 0.0399}$

$$R_{total} = 0.164 \; \frac{°C}{W}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หา ΔT_{lm} จากสมการ $$\Delta T_{lm} = \frac{(\Delta T_1 - \Delta T_2)}{\ln(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2})}$$

เมื่อ $\Delta T_1 = T_{h,in} - T_{c,in}$ และ $\Delta T_2 = T_{h,out} - T_{c,out}$ เมื่อเป็นการไหลแบบทางเดียวกัน

และ $\Delta T_1 = T_{h,in} - T_{c,out}$ และ $\Delta T_2 = T_{h,out} - T_{c,in}$ เมื่อเป็นการไหลแบบสวนทางกัน

ดังนั้น ΔT_{lm} จึงเท่ากับ

$$\Delta T_{lm} = \frac{(\Delta T_1 - \Delta T_2)}{\ln(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2})} = \frac{25-16}{\ln(\frac{25}{16})} = 20.17$$

ดังนั้นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเท่ากับ

$$U = \frac{1}{R_{total} \cdot A_s} = \frac{1}{0.164 \times 0.039} = 154.9 \frac{W}{m^2 \cdot °C}$$

และอัตราการถ่ายเทความร้อนเท่ากับ

$$\dot{Q} = UA_s\Delta T_{lm} = 133.9 \times 0.039 \times 20.17 = 122.6\ W$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง. คู่มือที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger)

1 วัตถุประสงค์

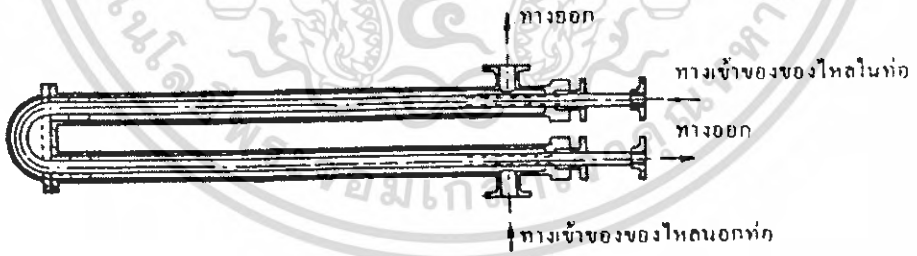
เพื่อศึกษาสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและปัจจัยที่มีผล

2 ทฤษฎี

การออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับห้องปฏิบัติการจำเป็นต้องมีความเข้าใจเกี่ยวกับโครงสร้างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและทฤษฎีเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน โดยในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดดังกล่าวดังต่อไปนี้

2.1 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดท่อสองชั้น (Double-Pipe Heat Exchanger)

โครงสร้างของเครื่องแบบนี้ ประกอบด้วยท่อสองขนาดที่ซ้อนกันอยู่ โดยมีแกนกลางของท่อที่ใช้ไหลร่วมกันอยู่ของไหลชนิดหนึ่งจะไหลอยู่ในท่อด้านในและของไหลอีกชนิดหนึ่งจะไหลอยู่ในช่องว่างรูปวงแหวนระหว่างท่อในและท่อนอก เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้เหมาะสำหรับการเพิ่มอุณหภูมิของของไหลในท่อที่มีความดันสูง ความหนืดสูงหรือมีฤทธิ์กัดกร่อนสูง



รูปที่ 1 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น

ลักษณะเด่นของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นคือโครงสร้างที่ค่อนข้างง่าย ราคาของเครื่องต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ถ่ายเทความความร้อนมีราคาถูก และเมื่อมีความจำเป็นสามารถเพิ่มความสามารถได้ง่ายโดยการนำเอาเครื่องที่มีสัดส่วนเหมือนๆกันหลายๆเครื่องมาต่อกันแบบอนุกรม (Series) หรือแบบขนาน (Parallel) เมื่อให้ของไหลไหลสวนทางกันด้วยความเร็วที่เหมาะสม ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่ได้จะมีค่าสูงในขณะที่ความดันสูญเสียของความดันมีค่าต่ำ แต่เมื่อมีการเพิ่มขนาดของเครื่องเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ปริมาตรของเครื่องต่อหน่วยพื้นที่ถ่ายเทความร้อนจะเพิ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามขึ้น ทำให้ราคาของเครื่องค่อนข้างแพงเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบอื่น ดังนั้นเครื่องแบบนี้จึงควรเลือกใช้ในกรณีที่ปริมาตรการถ่ายเทความร้อนมีค่าน้อยหรือในกรณีที่ตั้งการพื้นที่การถ่ายเทความร้อนน้อยกว่า 20 ตารางเมตร

2.2 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ลักษณะการถ่ายเทความร้อนสามารถแบ่งได้ตามลักษณะของทิศทางการไหลของของไหลได้เป็น 3 แบบคือเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้จะมีลักษณะการไหล การไหลแบบทางเดียว (Parallel flow) การไหลแบบสวนทาง (Counter flow) และการไหลแบบตัดขวาง (Cross flow)

2.2.1 การไหลแบบทางเดียว

ในการไหลทางเดียวกันนี้ของไหลทั้งสองชนิดจะไหลเข้ามาในทิศทางเดียวกัน เครื่องถ่ายเทความร้อนแบบนี้จะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ต่ำ

2.2.2 การไหลแบบสวนทาง

ในการแบบไหลสวนทางกันนี้ของไหลทั้งสองชนิดจะไหลเข้ามาในทิศทางที่ตรงข้ามกันโดยที่ส่วนใหญ่แล้วของไหลทั้งสองชนิดจะมีสถานะเดียวกัน เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้จะมีการใช้งานที่มากที่สุดเพราะจะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงที่

2.2.3 การไหลแบบตัดขวาง

โดยที่การไหลแบบนี้จะพบอยู่ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีขนาดเล็กที่มีพื้นที่การถ่ายเทความร้อนสูงมาก พื้นที่การถ่ายเทความร้อนที่มากมาจากการที่มีการเพิ่มพื้นที่ผิวด้วยแผ่นโลหะบางๆ หรือครีบ

2.3 หลักการพื้นฐานของการถ่ายเทความร้อน

กลไกการถ่ายเทความร้อนหลักมีอยู่ 3 แบบคือการนำความร้อน (Heat conduction) การพาความร้อน (Heat convection) และ การแผ่รังสีความร้อน (Heat radiation)

2.3.1 การนำความร้อน (Heat conduction) [4]

การถ่ายเทพลังงานในวัสดุจากอนุภาคที่มีพลังงานสูงกว่าไปยังอนุภาคที่อยู่ใกล้เคียงที่มีพลังงานต่ำกว่า โดยพบว่าอัตราการนำความร้อนนั้นจะขึ้นอยู่กับ รูปทรง ความหนา หรือชนิดของตัวกลาง นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับความแตกต่างของอุณหภูมิด้วยซึ่งสามารถอธิบายได้โดยกฎการนำความร้อนของฟูริเยร์ (Fourier Law of Heat conduction) สำหรับการนำความร้อนในทิศทางเดียว

$$\dot{Q}_{cond} = -kA\frac{dT}{dx} = -kA\frac{T_1 - T_2}{\Delta x} \qquad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $\dot{Q}_{cond}$ คือ การถ่ายเทความร้อนโดยวิธีการนำ

k คือ สภาพการนำความร้อน (Thermal Conductivity)

A คือ พื้นที่ที่ตั้งฉากกับการถ่ายเทความร้อน

$\frac{dT}{dx}$ คือ Temperature gradient

ในกรณีของการนำความร้อนผ่านผนังทรงกระบอกสามารถแสดงอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยสมการ

$$\dot{Q}_{cond,cyl} = \frac{T_1 - T_2}{R_{cyl}} \tag{2.2}$$

โดยที่ $R_{cyl} = \frac{\ln\left(r_2/r_1\right)}{2\pi Lk}$ คือ ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของท่อทรงกระบอก

และ L คือ ความยาวของท่อ

2.3.2 การพาความร้อน (Heat convection) [4]

การถ่ายเทพลังงานระหว่างพื้นผิวของของแข็งกับของไหลที่มีการเคลื่อนที่ การถ่ายเทความร้อนโดยการพาอธิบายได้โดยใช้สมการกฎการทำความเย็นของนิวตัน (Newton's law of cooling)

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s\left(T_s - T_\infty\right) \tag{2.3}$$

เมื่อ h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน

A_s คือ พื้นที่ผิวที่มีการพาความร้อนเกิดขึ้น

T_s คือ อุณหภูมิที่ผิวของวัตถุ

T_∞ คือ อุณหภูมิของของไหลที่ไหลผ่าน

การถ่ายเทความร้อนโดยวิธีการพา ยังสามารถแบ่งออกได้อีกเป็นหลายกรณีตัวอย่างเช่นการพาความร้อนโดยวิธีบังคับ (Forced convection) และการพาความร้อนโดยอิสระ (Freel convection) ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะถูกกำหนดด้วยสหสัมพันธ์ต่างๆเช่น ตัวเลขนัสเซิล (Nusselt number : Nu) โดยที่สัมประสิทธิ์การพาความร้อนโดยวิธีบังคับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะขึ้นอยู่กับตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynold number : Re) และตัวเลขพรันด์เดิล (Prandtl number : Pr) โดยกำหนดให้

$$Nu = \frac{hL}{k} = C\,\mathrm{Re}^m\,\mathrm{Pr}^n \tag{2.4}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน

L คือ ความยาวของท่อหรือระนาบ

Pr คือ ตัวเลขพรันด์เดิล

ตัวเลขเรย์โนลด์สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho D u}{\nu} \tag{2.5}$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล

u คือ ความเร็วของของไหล

ν คือ ความหนืดจลศาสตร์ของของไหล

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อที่มีการไหลของของไหล

สำหรับการไหลระหว่างท่อที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกัน (Concentric annulus)จะใช้ $D = D_h$ โดยที่ D_h คือ Hydraolic diameter หาได้จากสมการ

$$D_h = (D_o - D_i) \tag{2.6}$$

เมื่อ D_0 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อด้านนอก

D_i คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อด้านใน

C, m และ n เป็นค่าที่สำหรับสภาวะการไหลแบบใดแบบหนึ่ง ซึ่งสามารถหาได้จากการทดลองหรือจากตาราง สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อ n จะเท่ากับ 0.4 เมื่อเป็นการให้ความร้อน เท่ากับ 0.3 เมื่อเป็นการรับความร้อน และการไหลแบบราบเรียบภายในท่อสหสัมพันธ์ที่สามารถใช้ในการหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสามารถแสดงได้ดังสมการ

สำหรับการไหลแบบราบเรียบภายในท่อคำนวณได้จากสมการ

$$Nu = 3.66 + \frac{0.065(D/L)\mathrm{Re}\,\mathrm{Pr}}{1 + 0.04[(D/L)\mathrm{Re}\,\mathrm{Pr}]^{2/3}} \tag{2.7}$$

และการไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อคำนวณได้จากสมการ

$$Nu = 0.023\,\mathrm{Re}^{0.8}\,\mathrm{Pr}^{n} \tag{2.8}$$

เมื่อเป็นการพาความร้อนโดยอิสระ (Free convection) ที่เป็นผลมาจากความแตกต่างของความหนาแน่นในของไหลที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิอีกต่อหนึ่ง ในระบบที่มีการทำงานโดยการพา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความร้อนโดยอิสระจะไม่มีความเร็วของของไหลมาเกี่ยวข้องดังนั้นตัวเลขเรย์โนลด์จึงไม่ใช่สหสัมพันธ์ที่เหมาะสมอีกต่อไป สหสัมพันธ์ที่เหมาะสมในกรณีนี้คือ ตัวเลขแกรชอฟ (Grashof number : Gr) ที่แสดงดังสมการ

$$Nu = CGr^m \Pr^n \tag{2.9}$$

ซึ่งตัวเลขแกรชอฟสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2} \tag{2.10}$$

เมื่อ β คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตร

T_s คือ อุณหภูมิพื้นผิว

T_∞ คือ อุณหภูมิของของไหลที่อยู่โดยรอบ

L_c คือ ลักษณะสมบัติทางความยาว

ν คือ ความหนืดจลศาสตร์ของของไหล

2.3.3 การแผ่รังสี (Heat radiation) [4]

การแผ่รังสีความร้อนแตกต่างจากการถ่ายเทความร้อนชนิดอื่นคือการถ่ายเทความร้อนที่ไม่ต้องอาศัยตัวกลาง ดังนั้นแม้แต่ในที่สุญญากาศก็ยังสามารถถ่ายเทความร้อนได้

โดยอัตราการแผ่รังสีความร้อนที่มีค่าสูงสุดจากพื้นผิวในอุดมคติหรือของวัตถุดำ (BlackBody) เรียกว่า กระจายรังสีของวัดถุดำ เป็นไปตามกฎของสเตฟาน-โบสแมน (Stefan-Boltzmann law) ดังสมการ

$$\dot{Q}_{emit,\max} = \sigma A_s T_s^4 \tag{2.11}$$

เมื่อ σ คือ ค่าคงที่ของสเตฟาน-โบสแมน (Stefan-Boltzmann Constant)

มีค่าเท่ากับ $5.67\times10^{-8}\ \frac{W}{m^2\cdot K^4}$

A_s คือ พื้นที่ที่ถ่ายเทความร้อน

T_s^4 คือ อุณหภูมิของพื้นผิว

แต่เมื่อเป็นการถ่ายเทความร้อนของวัตถุจริงใดๆก็ตามซึ่งมีการกระจายรังสีที่น้อยกว่าวัตถุดำ ในอุณหภูมิที่เท่ากันแล้ว สามารถแสดงดังสมการ

$$\dot{Q}_{emit} = \varepsilon\sigma A_s T_s^4 \tag{2.12}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ ε คือ ค่าการเปล่งรังสีของวัตถุเทียบกับวัตถุดำ

มีค่าอยู่ระหว่าง $(0 \leq \varepsilon \leq 1)$

A_s คือ พื้นที่ผิว

T_s คือ อุณหภูมิที่พื้นผิว

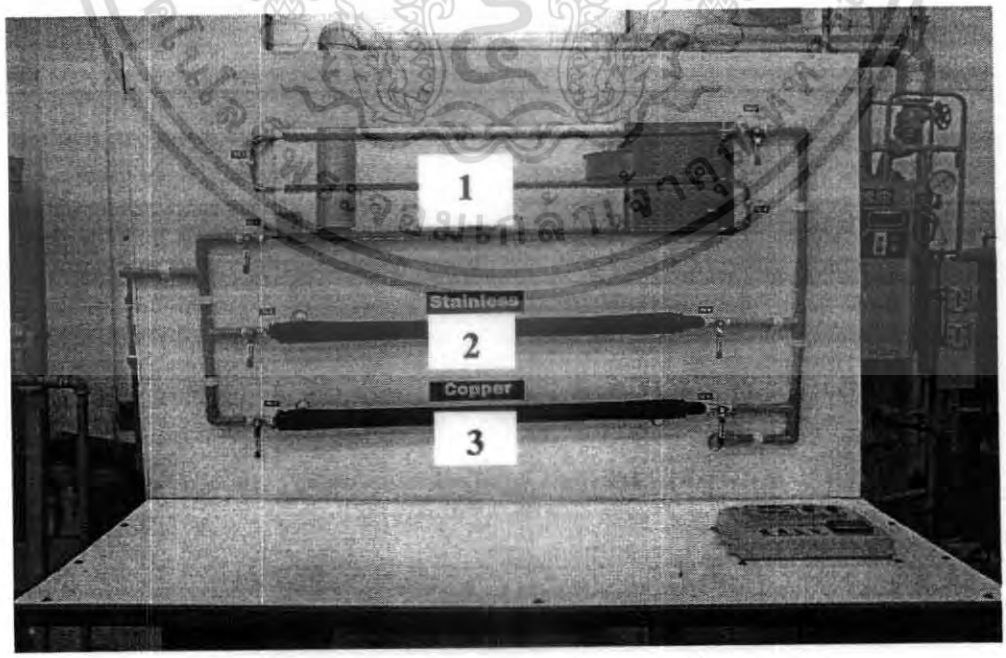
ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนรวมของการแผ่ความร้อนระหว่างสองพื้นผิวคือ

$$\dot{Q}_{emit} = \varepsilon \sigma A_s \left(T_s^4 - T_{sur}^4 \right) \tag{2.13}$$

เมื่อ T_{surr} คือ อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม

3. ส่วนประกอบเครื่อง

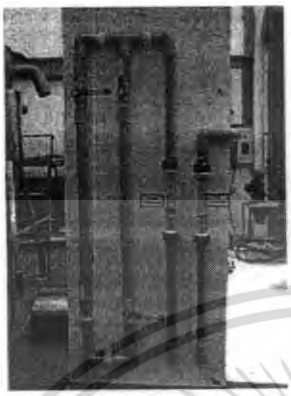
โครงสร้างของเครื่องด้านหน้าที่แสดงดังรูปที่ 2 มีส่วนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสองแบบ โดยที่อยู่ด้านบน (หมายเลข 1) คือเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบมีครีบรอบเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 1 เซนติเมตร และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นที่อยู่ด้านบนเป็นท่อที่มีวัสดุภายในเป็นท่อสแตนเลสเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตรเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 1.27 เซนติเมตร (หมายเลข 2) และท่อสองชั้นที่อยู่ด้านล่างสุดเป็นท่อที่มีวัสดุภายในเป็นท่อทองแดงเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 1.27 เซนติเมตร (หมายเลข 3) โดยท่อโลหะทั้งสองติดตั้งอยู่ด้านในท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.54 เซนติเมตร



รูปที่ 2 รูปด้านหน้าของโครงสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางด้านข้างของโครงสร้างเป็นท่อและวาล์วที่มีหน้าที่ไว้เปลี่ยนทิศทางการไหลของน้ำเย็นในการทดลองแบบไหลทางเดียวกัน และ การไหลแบบสวนทาง และมีโรตามิเตอร์วัดอัตราการไหลทั้งของระบบน้ำร้อนและของระบบน้ำเย็นอยู่ใกล้เคียงกัน ดังแสดงรูปที่ 3



รูปที่ 3 ด้านข้างของเครื่อง

รูปที่ 4 ด้านหลังของโครงสร้างเครื่อง

ด้านหลังของโครงสร้างเป็นที่ตั้งของถังน้ำร้อนและถังน้ำเย็น รวมทั้งวาล์วที่ใช้ควบคุมอัตราการไหลทั้งของน้ำร้อนและน้ำเย็น และ ปั๊มน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 4

โดยเครื่องมีจุดวัดอุณหภูมิ (TC) ติดตั้งอยู่ทั้งบริเวณด้านหน้าและด้านหลังจำนวน 10 จุดโดยมีรายละเอียดแสดงดังรูปที่ 5 โดย

จุดที่ 1 วัดอุณหภูมิน้ำร้อนที่ทางเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบมีครีบ

จุดที่ 2 วัดอุณหภูมิน้ำร้อนที่อยู่ที่ตำแหน่ง 1 เมตรจากทางเข้า

จุดที่ 3 วัดอุณหภูมิน้ำร้อนที่อยู่ที่ตำแหน่ง 2 เมตรจากทางเข้า

จุดที่ 4 วัดอุณหภูมิน้ำร้อนที่ทางออกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบมีครีบ

จุดที่ 5 วัดอุณหภูมิน้ำร้อนที่ทางเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นชุดที่มีท่อภายในเป็นท่อสแตนเลส

จุดที่ 6 วัดอุณหภูมิน้ำร้อนที่ทางออกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นชุดที่มีท่อภายในเป็นท่อสแตนเลส

จุดที่ 7 วัดอุณหภูมิน้ำร้อนที่ทางเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นชุดที่มีท่อภายในเป็นท่อทองแดง

จุดที่ 8 วัดอุณหภูมิน้ำร้อนที่ทางออกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นชุดที่มีท่อภายในเป็นท่อทองแดง

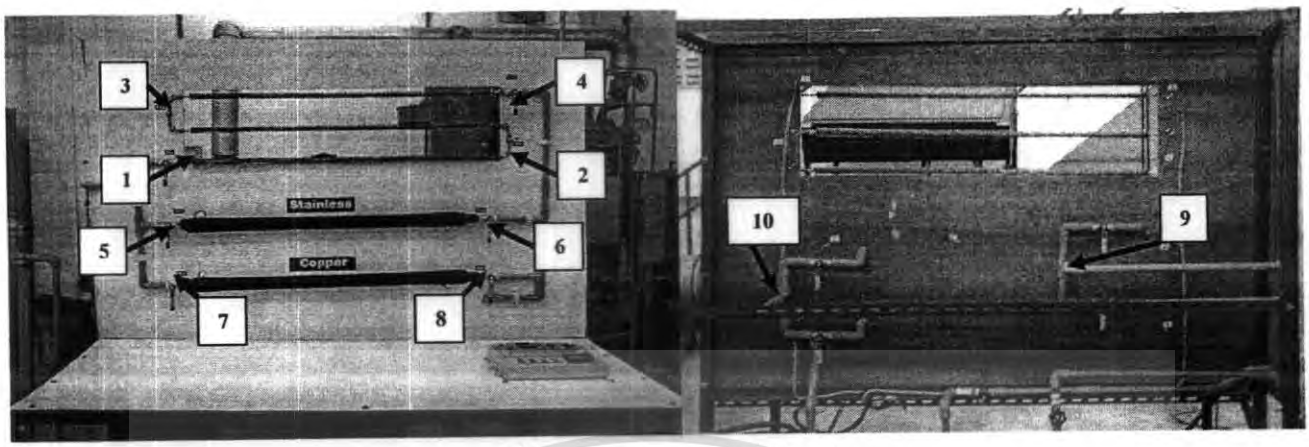
จุดที่ 9 วัดอุณหภูมิน้ำเย็นที่ทางออกเมื่อทำการทดลองการไหลแบบทางเดียวกัน

หรือ อุณหภูมิน้ำเย็นที่เข้าเมื่อทำการทดลองการไหลแบบสวนทางกัน

จุดที่ 10 วัดอุณหภูมิน้ำเย็นที่ทางเข้าเมื่อทำการทดลองการไหลแบบทางเดียวกัน

หรือ อุณหภูมิน้ำเย็นที่ออกเมื่อทำการทดลองการไหลแบบสวนทางกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5 แสดงตำแหน่งวัดอุณหภูมิ

3.1 ขั้นตอนการทดลอง

การเตรียมน้ำร้อน

เปิด สวิตซ์ควบคุมอุณหภูมิของน้ำร้อน เพื่อให้ได้น้ำร้อนถึงอุณหภูมิที่กำหนดก่อนเริ่มทำการทดลอง

การทดลอง

ทำการทดลองเพื่อศึกษาการทำงานและสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสองชนิดคือเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบและแบบท่อสองชั้น โดยมีขั้นตอนการทำการทดลองดังนี้

3.1.1 การศึกษาการทำงานและสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบ

ขั้นตอนในการศึกษามีดังต่อไปนี้

1. เปิดปั๊มน้ำร้อนและปรับอัตราการไหลน้ำร้อนที่วาล์ว CV_1 และ CV_2 โดยดูจากโรตามิเตอร์และวัดอัตราการไหลโดยใช้กระบอกตวงและนาฬิกาจับเวลาโดยปรับอัตราการไหลให้ได้ประมาณ 0.5 ลิตรต่อนาที
2. เปิดให้น้ำร้อนไหลเข้าไปในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบ โดยเปิดวาล์ว V_1 และ V_2
3. บันทึกอุณหภูมิที่ TC_{in} ,TC_{1m} ,TC_{2m} และ TC_{out} ทุกๆ 1 นาทีจนกระทั่งอุณหภูมิคงที่
4. ทำการทดลองซ้ำ โดยเปลี่ยนอัตราการไหลเป็น 1,2 และ 4 ลิตรต่อนาที
5. ทำการทดลองตามข้อ 1-4 ซ้ำโดยใช้พัดลมเป่าและวัดอัตราไหลของอากาศด้วยเครื่องวัดความเร็วลม

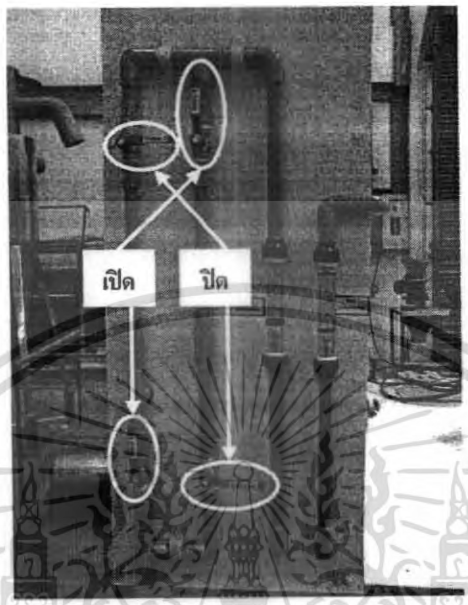
3.1.2 ศึกษาการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น

ขั้นตอนในการศึกษามีดังต่อไปนี้

กรณีการไหลแบบไหลทางเดียวกัน (Co-current flow)

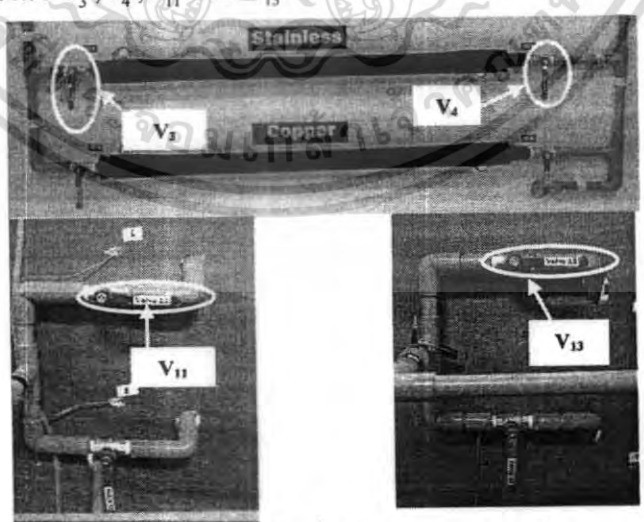
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. เปิดปั๊มน้ำเย็นและปรับอัตราการไหลน้ำเย็นที่เปิดวาล์ว CV_3 และ CV_4 ปรับอัตราการไหลให้ได้ประมาณ 4 ลิตรต่อนาที
2. เปิดวาล์ว V_8 กับV_9 เพื่อให้การเป็นการไหลแบบไหลทางเดียวกัน



รูป 6 แสดงการเปิด-ปิดของวาล์วของการทดลองการไหลแบบไหลทางเดียวกัน

3. เปิดปั๊มน้ำร้อนและปรับอัตราการไหลน้ำร้อนให้ได้อัตราการไหลประมาณ 0.5 ลิตรต่อนาที
4. ทำการทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นที่มีวัสดุภายในท่อเป็นสแตนเลส โดยเปิดวาล์ว V_3 ,V_4 ,V_{11} และ V_{13}



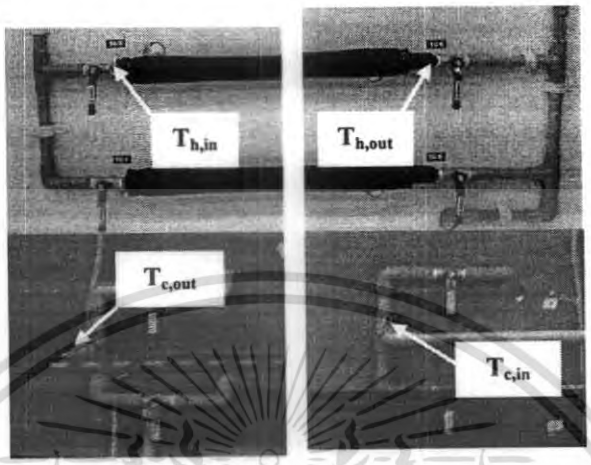
รูปที่ 7 ตำแหน่งวาล์วที่เปิดเมื่อทำการทดลองชุดท่อสแตนเลส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. บันทึกอุณหภูมิทางเข้าและออกของน้ำร้อนและเย็นทุกๆ 1 นาทีจนกระทั่งอุณหภูมิคงที่

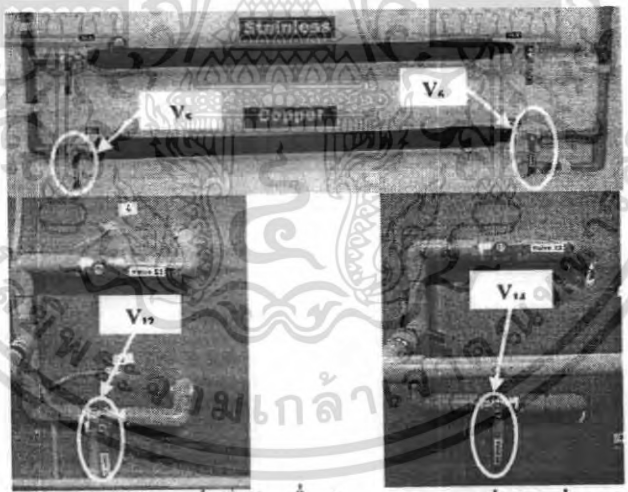
โดยที่ TC_5 คือ อุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้า TC_6 คือ อุณหภูมิน้ำร้อนขาออก

TC_9 คือ อุณหภูมิน้ำเย็นขาเข้า TC_{10} คือ อุณหภูมิน้ำเย็นขาออก



รูปที่ 8 ตำแหน่งของจุดวัดอุณหภูมิที่กำหนด

6. เปลี่ยนเป็นการทดลองชุดท่อที่มีวัสดุภายในท่อเป็นทองแดง โดยปิดวาล์ว V_3 ,V_4 ,V_{11} และ V_{13} และเปิดวาล์ว V_5 , V_6 , V_{12} และ V_{14}



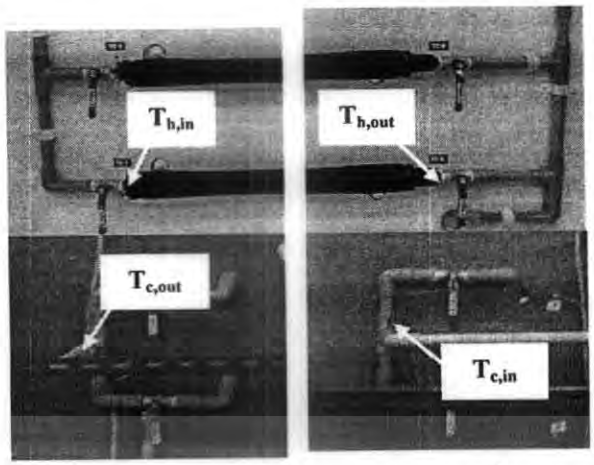
รูปที่ 9 ตำแหน่งวาล์วที่เปิดเมื่อทำการทดลองท่อชุดท่อทองแดง

7. บันทึกอุณหภูมิทางเข้าและทางออกของน้ำร้อนเย็นทุกๆ 1 นาทีจนกระทั่งอุณหภูมิคงที่

โดยที่ TC_7 คือ อุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้า TC_8 คือ อุณหภูมิน้ำร้อนขาออก

TC_9 คือ อุณหภูมิน้ำเย็นขาเข้า TC_{10} คือ อุณหภูมิน้ำเย็นขาออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 10 ตำแหน่งของจุดวัดอุณหภูมิที่กำหนด

8. ทำการทดลองตั้งแต่ข้อ 3-7 โดยเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำร้อนเป็น 1,2 และ4 ลิตรต่อนาที

<u>การทดลองในกรณีศึกษาการไหลแบบไหลสวนทางกัน (Counter flow)</u>

1. เปิดปั๊มน้ำเย็นและปรับอัตราการไหลน้ำเย็นที่เปิดวาล์ว CV_3 และ CV_4 ปรับอัตราการไหลให้ได้ประมาณ 4 ลิตรต่อนาที
2. เปิดวาล์ว V_7 กับ V_{10} เพื่อให้การเป็นการไหลแบบไหลสวนทางกัน
3. เปิดปั๊มน้ำร้อนและปรับอัตราการไหลน้ำร้อนให้ได้อัตราการไหลประมาณ 0.5 ลิตรต่อนาที
4. ทำการทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นที่มีวัสดุภายในท่อเป็นสแตนเลส โดยเปิดวาล์ว V_3 ,V_4 ,V_{11} และ V_{13}
5. บันทึกอุณหภูมิทางเข้าและออกของน้ำร้อนและเย็นทุกๆ 1 นาทีจนกระทั่งอุณหภูมิคงที่
   โดยที่ TC_5 คือ อุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้า TC_6 คือ อุณหภูมิน้ำร้อนขาออก
   TC_{10} คือ อุณหภูมิน้ำเย็นขาเข้า TC_9 คือ อุณหภูมิน้ำเย็นขาออก
6. เปลี่ยนเป็นการทดลองชุดท่อที่มีวัสดุภายในท่อเป็นทองแดงโดยปิดวาล์ว V_3 ,V_4 ,V_{11} และ V_{13} และเปิดวาล์ว V_5 , V_6 , V_{12} และ V_{14}
7. บันทึกอุณหภูมิทางเข้าและทางออกของน้ำร้อนเย็นทุกๆ 1 นาทีจนกระทั่งอุณหภูมิคงที่
   โดยที่ TC_7 คือ อุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้า TC_8 คือ อุณหภูมิน้ำร้อนขาออก
   TC_{10} คือ อุณหภูมิน้ำเย็นขาเข้า TC_9 คือ อุณหภูมิน้ำเย็นขาออก
8. ทำการทดลองตั้งแต่ข้อ 3-7 โดยเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำร้อนเป็น 1,2 และ 4 ลิตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้