

การเพิ่มการถ่ายโอนความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น โดยผลกระทบรวม
ของการเคลื่อนที่แบบสลับและการกระตุ้นให้เกิดการปั่นป่วน



นาย ประกิจ ชูหว่าง

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

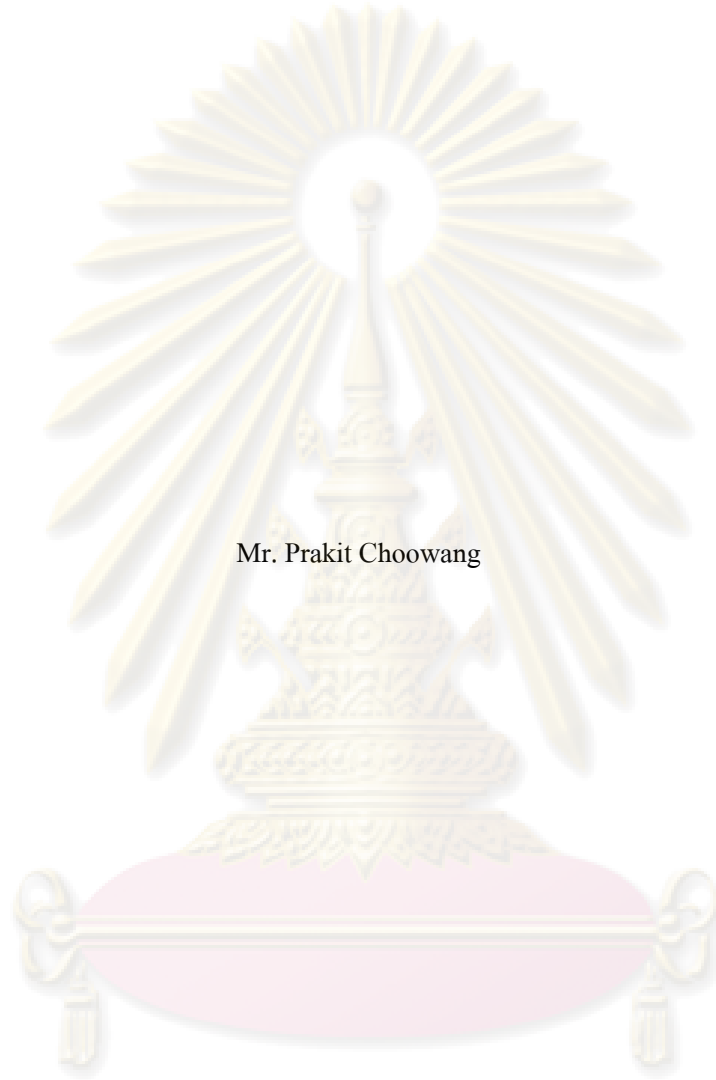
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

HEAT TRANSFER ENHANCEMENT IN DOUBLE PIPE HEAT EXCHANGER BY
THE COMBINED EFFECT OF OSCILLATORY MOTION AND
TURBULENCE PROMOTION



Mr. Prakrit Choowang

คุณย์วิทยธรพยากร
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเพิ่มการถ่ายโอนความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น โดยผลกระทบร่วมของการเคลื่อนที่แบบสลับและการกระตุ้นให้เกิดการปั่นป่วน

โดย

นาย ประกิจ ชูหว่าง


สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

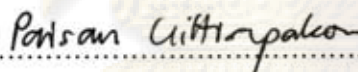
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

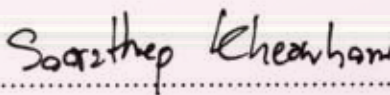
อาจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวหอม


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศสิทธิ์วงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล กิตติสุภกร)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวหอม)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.อภินันท์ สุทธิธารชัช)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีวัฒน์ ปัตทวิทงศา)

ประจักษ์ ชูหว่าง : การเพิ่มการถ่ายโอนความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นโดยผลกระทบร่วมของการเคลื่อนที่แบบสลับและการกระตุ้นให้เกิดการปั่นป่วน.
(HEAT TRANSFER ENHANCEMENT IN DOUBLE PIPE HEAT EXCHANGER BY THE COMBINED EFFECT OF OSCILLATORY MOTION AND TURBULENCE PROMOTION) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : อาจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวหอม, 167 หน้า.

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น ซึ่งมีอัตราการไหลในสภาวะการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) โดยผลกระทบร่วมของการเคลื่อนที่แบบสลับและการกระตุ้นให้เกิดการปั่นป่วน โดยการติดตั้งแผ่นบัพเฟิลแบบรูกลวงภายในท่อเป็นช่วงๆ และให้มีการขยับแผ่นบัพเฟิลขึ้นลงสลับไปมา ซึ่งตัวแปรที่พิจารณา ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูภายในของแผ่นบัพเฟิล ระยะห่างระหว่างแผ่นบัพเฟิล อัตราการไหลของไหลสายร้อน อัตราการไหลของไหลสายเย็น ความถี่ และแอมพลิจูดของการสั่น โดยจากผลการทดลองจะสร้างสมการความสัมพันธ์ของนัทเชลล์นัมเบอร์ (Nusselt number) ของการถ่ายเทความร้อนผิวด้านในท่อและผิวด้านนอกท่อ ในรูปฟังก์ชันของตัวแปรไร้หน่วย ในช่วงดังต่อไปนี้ เรย์โนลด์นัมเบอร์ของการสั่น 0 ถึง 2,000 เรย์โนลด์นัมเบอร์ของของไหลสายร้อน 100 ถึง 1,000 เรย์โนลด์นัมเบอร์ของของไหลสายเย็น 500 ถึง 2,500 สัดส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูภายในแผ่นบัพเฟิลเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 0.4 ถึง 0.7 และสัดส่วนของระยะห่างระหว่างบัพเฟิลเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 1 ถึง 2.5 เป็นไปดังสมการ

$$Nu_i = 0.3775 Re_n^{0.3876} Pr_i \left(1 + \frac{0.02 + (0.6919 - \alpha^{0.5})^2}{0.284 + (1.0 - \beta^5)^2} \right) + 0.4588 Re_n^{0.02} Re_c^{0.0505} Pr_i^{0.9944} \left(\frac{0.586 - \alpha^{1.5}}{2.079 - \beta^{3.832}} \right)^2 - 100.0$$

และ $Nu_o = 0.5 Re_c^{1.4310}$ ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อนิสิต ประจักษ์ ชูหว่าง
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก สุรเทพ เขียวหอม
ปีการศึกษา 2551

5070332221 : CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS : OSCILLATORY BAFFLED / HEAT TRANSFER ENHANCEMENT /
HEAT EXCHANGER

PRAKIT CHOOWANG: HEAT TRANSFER ENHANCEMENT IN DOUBLE PIPE
HEAT EXCHANGER BY THE COMBINED EFFECT OF OSCILLATORY
MOTION AND TURBULENCE PROMOTION. THESIS ADVISOR:
SOORATHEP KHEAWHROM, D.Eng., 167 pp.

In this work, we study the method to enhance the heat transfer efficiency of double pipe heat exchanger at laminar flow regime by using the combined effect of oscillatory motion and turbulence promotion. The oscillatory motion is achieved by installing a set of orifice baffles, and moving them up and down periodically. The parameters considered here are diameter of inner hole of baffle plates, space between baffle plates, hot and cold stream flow rates, frequency and vibration amplitude. The relationships between Nusselt number of inner and outer heat transfer surfaces can be shown as functions of oscillatory flow Reynolds number in rang of 0-2,000, hot flow Reynolds number in range of 100-1,000, cold flow Reynolds number in range of 500-2,500, the ratio of inner hole diameter to tube diameter in range of 0.4-0.7 and the ratio of the space between each baffles and tube diameter in range of 1-2.5 are

$$Nu_i = 0.3775 Re_h^{0.3876} Pr_i \left(1 + \frac{0.02 + (0.6919 - \alpha^{0.5})^2}{0.284 + (1.0 - \beta^5)^2} \right) + 0.4588 Re_h^{0.02} Re_c^{0.0503} Pr_i^{0.9944} \left(\frac{0.586 - \alpha^{1.5}}{2.079 - \beta^{1.3832}} \right)^2 - 100.0$$

and $Nu_o = 0.5 Re_c^{1.4310}$, respectively.

Department : Chemical engineering

Student's Signature

Field of Study : Chemical engineering

Advisor's Signature

Academic Year : 2008

Prakit Chooawang
Soorathep Kheawhrom

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างยิ่งจาก อาจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวหอม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งกรุณาสละเวลาตรวจแก้ไขข้อบกพร่องตลอดจนให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่ตลอดการวิจัย ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล กิตติศุภกร ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำ คำปรึกษา และข้อคิดเห็นต่างๆ รวมทั้งขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.อภิรักษ์ สุทธิธรรมาธิ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรวัฒน์ ปัททวิคคา กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการทำงานวิจัยนี้มีความ สมบูรณ์และถูกต้องเที่ยงตรงมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ ขอขอบคุณพี่ๆและเพื่อนๆในห้องวิจัย Control And System Laboratory ที่เป็นกำลังใจมาโดยตลอด



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ฐ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฌ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.5 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย.....	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.7 ตารางการดำเนินงานวิจัย.....	5
2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	12
3.1 กลไกการถ่ายโอนความร้อน.....	12
3.1.1 การถ่ายเทความร้อนด้วยการนำ.....	14
3.1.2 การถ่ายเทความร้อนด้วยการพา.....	17
3.1.3 การถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสี.....	20
3.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น.....	21
3.3 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม.....	23
3.4 การคำนวณหาประสิทธิภาพและการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	25
3.5 วัสดุสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	28
3.6 การไหลแบบสลับไปมา.....	30
3.6.1 การนำประยุกต์ใช้งาน.....	32

3.6.2 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง.....	32
3.7 สมการถ่ายเทความร้อน.....	33
4. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์.....	37
4.1 ความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้หน่วย.....	37
4.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน.....	39
4.3 การตรวจสอบความเหมาะสมของฟังก์ชัน.....	43
5. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	44
5.1 อุปกรณ์.....	44
5.1.1 วัสดุคืบ.....	44
5.1.2 อุปกรณ์การทดลอง.....	44
5.2 วิธีการทดลอง.....	49
6. ผลและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	50
6.1 ผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม.....	50
6.2 ผลจากการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในรูป ของนัมเบอร์เชลล์นัมเบอร์ (Nusselt number).....	61
7. สรุปผลการทดลอง.....	64
รายงานอ้างอิง.....	65
ภาคผนวก.....	67
ภาคผนวก ก เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต้นแบบ.....	69
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ.....	77
ภาคผนวก ค ลักษณะเฉพาะของสารและค่าตัวแปรต่างๆ.....	88
ภาคผนวก ง ตารางการทดลอง, ตารางผลการทดลอง, ตารางผลการทดลอง.....	96
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	165

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
ตารางที่ 1.1	ค่าสภาวะที่ดำเนินการทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบสลับไปมา.....	3
ตารางที่ 3.1	กระบวนการถ่ายโอนความร้อนแบบต่างๆ.....	12
ตารางที่ 3.2	แสดงความสัมพันธ์ตัวแปรไว้หน่วย.....	19
ตารางที่ 3.3	แสดงค่าประมาณสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวมของวัสดุชนิดต่างๆ.....	24
ตารางที่ ค-1	ตารางแสดงลักษณะเฉพาะของน้ำมันขาว (น้ำมันพาราฟิน) เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ.....	91
ตารางที่ ค-2	ตารางแสดงลักษณะเฉพาะของน้ำเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ.....	94
ตารางที่ ง-1	ผลของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ค่า เรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ ที่ค่า อัตราส่วนระยะห่างระหว่างแผ่นบัฟเฟิลเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ $(S/D) = 1, d_o = 0.5D, x_o = 0.75 \text{ cm}, f = 1 \text{ Hz}, \text{Cool Flow} = 20 \text{ l/min}$	96
ตารางที่ ง-2	ผลของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ค่า เรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ ที่ค่า อัตราส่วนระยะห่างระหว่างแผ่นบัฟเฟิลเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ $(S/D) = 1.5, d_o = 0.5D, x_o = 0.75 \text{ cm}, f = 1 \text{ Hz}, \text{Cool Flow} = 20 \text{ l/min}$	97
ตารางที่ ง-3	ผลของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ค่า เรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ ที่ค่า อัตราส่วนระยะห่างระหว่างแผ่นบัฟเฟิลเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ $(S/D) = 2, d_o = 0.5D, x_o = 0.75 \text{ cm}, f = 1 \text{ Hz}, \text{Cool Flow} = 20 \text{ l/min}$	97
ตารางที่ ง-4	ผลของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ค่า เรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ ที่ค่า อัตราส่วนระยะห่างระหว่างแผ่นบัฟเฟิลเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ $(S/D) = 2.5, d_o = 0.5D, x_o = 0.75 \text{ cm}, f = 1 \text{ Hz}, \text{Cool Flow} = 20 \text{ l/min}$	98
ตารางที่ ง-5	ผลของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ค่า เรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ ที่ค่า อัตราส่วนระหว่างรูภายในแผ่นบัฟเฟิลเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ $(d_o/D) = 0.4, S = 1.5D, x_o = 0.75 \text{ cm}, f = 1 \text{ Hz}, \text{Cool Flow} = 20 \text{ l/min}$	99

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ ง-6	99
ผลของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ค่า เรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ ที่ค่า อัตราส่วนระหว่างรูภายในแผ่นบัฟเฟิลเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ $(d_0/D) = 0.5, S = 1.5D, x_0 = 0.75 \text{ cm}, f = 1 \text{ Hz}, \text{Cool Flow} = 20 \text{ l/min}$	
ตารางที่ ง-7	100
ผลของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ค่า เรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ ที่ค่า อัตราส่วนระหว่างรูภายในแผ่นบัฟเฟิลเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ $(d_0/D) = 0.6, S = 1.5D, x_0 = 0.75 \text{ cm}, f = 1 \text{ Hz}, \text{Cool Flow} = 20 \text{ l/min}$	
ตารางที่ ง-8	101
ผลของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ค่า เรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ ที่ค่า อัตราส่วนระหว่างรูภายในแผ่นบัฟเฟิลเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ $(d_0/D) = 0.7, S = 1.5D, x_0 = 0.75 \text{ cm}, f = 1 \text{ Hz}, \text{Cool Flow} = 20 \text{ l/min}$	
ตารางที่ ง-9	101
ผลของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ค่า เรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ ที่ค่าแอมปริจูดเท่ากับ $(x_0) = 0 \text{ cm}, d_0/D = 0.5, S = 1.5D, f = 1 \text{ Hz}, \text{Cool Flow} = 20 \text{ l/min}$	
ตารางที่ ง-10	102
ผลของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ค่า เรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ ที่ค่าแอมปริจูดเท่ากับ $(x_0) = 0.25 \text{ cm}, d_0/D = 0.5, S = 1.5D, f = 1 \text{ Hz}, \text{Cool Flow} = 20 \text{ l/min}$	
ตารางที่ ง-11	103
ผลของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ค่า เรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ ที่ค่าแอมปริจูดเท่ากับ $(x_0) = 0.5 \text{ cm}, d_0/D = 0.5, S = 1.5D, f = 1 \text{ Hz}, \text{Cool Flow} = 20 \text{ l/min}$	
ตารางที่ ง-12	103
ผลของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ค่า เรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ ที่ค่าแอมปริจูดเท่ากับ $(x_0) = 0.75 \text{ cm}, d_0/D = 0.5, S = 1.5D, f = 1 \text{ Hz}, \text{Cool Flow} = 20 \text{ l/min}$	
ตารางที่ ง-13	1104
ผลของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมทั้งค่า เรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ ที่ค่าแอมปริจูดเท่ากับ $(x_0) = 1 \text{ cm}, d_0/D = 0.5, S = 1.5D, f = 1 \text{ Hz}, \text{Cool Flow} = 20 \text{ l/min}$	
ตารางที่ ง-14	105
ผลของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ค่า เรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ $(x_0) = 0.75 \text{ cm}, d_0/D = 0.5, S = 1.5D, f = 0 \text{ Hz}, \text{Cool Flow} = 20 \text{ l/min}$	
ตารางที่ ง-15	105
ผลของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ค่า เรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ $(x_0) = 0.75 \text{ cm}, d_0/D = 0.5, S = 1.5D, f = 0.5 \text{ Hz}, \text{Cool Flow} = 20 \text{ l/min}$	

ตารางที่	หน้า
	ผ่านกลางของท่อ (d_0/D) เท่ากับ 0.6 จำนวน 100 การทดลอง..... 141
ตารางที่ ง-32	ผลการทดลองอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางภายในแผ่นบัฟเฟิลเทียบกับเส้นผ่านกลางของท่อ (d_0/D) เท่ากับ 0.7 จำนวน 100 การทดลอง..... 145
ตารางที่ ง-33	ผลจากการคำนวณแสดงค่า สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนและค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds Number) ที่สภาวะการทดลอง อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางภายในแผ่นบัฟเฟิลเทียบกับเส้นผ่านกลางของท่อ (d_0/D) เท่ากับ 0.4 จำนวน 100 การทดลอง..... 149
ตารางที่ ง-34	ผลจากการคำนวณแสดงค่า สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนและค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds Number) ที่สภาวะการทดลอง อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางภายในแผ่นบัฟเฟิลเทียบกับเส้นผ่านกลางของท่อ (d_0/D) เท่ากับ 0.5 จำนวน 100 การทดลอง..... 153
ตารางที่ ง-35	ผลจากการคำนวณแสดงค่า สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนและค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds Number) ที่สภาวะการทดลอง อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางภายในแผ่นบัฟเฟิลเทียบกับเส้นผ่านกลางของท่อ (d_0/D) เท่ากับ 0.6 จำนวน 100 การทดลอง..... 157
ตารางที่ ง-36	ผลจากการคำนวณแสดงค่า สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนและค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds Number) ที่สภาวะการทดลอง อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางภายในแผ่นบัฟเฟิลเทียบกับเส้นผ่านกลางของท่อ (d_0/D) เท่ากับ 0.7 จำนวน 100 การทดลอง..... 161

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
รูปที่ 3.1	แสดงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น.....	21
รูปที่ 3.2	แสดงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นแบบไหลทางเดียวและสวน ทางกัน.....	22
รูปที่ 3.3	แสดงการถ่ายโอนความร้อนผ่านแผ่นตัวนำความร้อน.....	23
รูปที่ 3.4	รูปแบบการไหลใน Double Pipe เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	26
รูปที่ 3.5-ก	แสดงประเภทของการไหลแบบสลับของของไหลและแผ่นบัฟเฟิล.....	30
รูปที่ 3.5-ข	แสดงประเภทของการไหลแบบสลับของของไหลและแผ่นบัฟเฟิล.....	31
รูปที่ 3.6	แสดงการไหลแบบสั้นของของไหลถ่ายต่อชนิดมีบัฟเฟิล.....	31
รูปที่ 4.1	แสดงลักษณะของแผ่นบัฟเฟิล.....	37
รูปที่ 4.2	แสดงการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น.....	40
รูปที่ 5.1	แสดงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	45
รูปที่ 5.2	ระบบควบคุมอุณหภูมิและระบบปรับสัญญาณ.....	46
รูปที่ 5.3	เครื่องทำความร้อน.....	46
รูปที่ 5.4	เครื่องทำความเย็น (Chiller).....	47
รูปที่ 5.5	แสดงชนิดของแผ่นบัฟเฟิล.....	48
รูปที่ 5.5	แสดงชนิดการจัดเรียงของแผ่นบัฟเฟิล.....	48
รูปที่ 6.1.1	ผลของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่เรย์โนลด์นัมเบอร์สายร้อน เพิ่มขึ้น.....	50
รูปที่ 6.1.2	แสดงผลของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนชนิดมีบัฟเฟิลสั้นกับไม่สั้น...	51
รูปที่ 6.1.3	ผลของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเมื่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์สายร้อน เพิ่มขึ้นที่ระยะห่างระหว่างแผ่นบัฟเฟิลต่างกัน.....	53
รูปที่ 6.1.4ก	แสดงผลการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall heat transfer coefficient, U_o) ที่ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของแผ่นบัฟเฟิล ต่างกัน.....	54
รูปที่ 6.1.4ข	แสดงผลการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall heat transfer coefficient, U_o) ที่ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของแผ่นบัฟเฟิล ต่างกัน.....	55
รูปที่ 6.1.5	แสดงผลการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall	

ภาพที่	หน้า
heat transfer coefficient, U_o) ที่ค่าแอมปริจูดเท่ากับ 0.25, 0.5, 0.75, 1 เซนติเมตร.....	56
รูปที่ 6.1.6 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall heat transfer coefficient, U_o) ที่ค่าความถี่เท่ากับ 0.5, 1, 1.5, 2 รอบต่อวินาที...	57
รูปที่ 6.1.7 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall heat transfer coefficient, U_o) ที่ค่าอัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 10, 15, 20, 25, 30 ลิตรต่อนาที.....	58
รูปที่ 6.1.8 แสดงผลของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall heat transfer coefficient, U_o) ที่ค่าที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของการสั่น (Oscillatory Reynolds number) และเรย์โนลด์นัมเบอร์ของของไหลสายร้อน (Hot flow Reynolds number)	59
รูปที่ 6.1.9 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากสมการทำนายและจากการทดลอง.....	62
รูปที่ 6.1.10 แสดงการเปรียบเทียบค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์จากสมการที่ 6.1 และสมการของ Key and Nedderman.....	63
รูปที่ ก-1 แสดงชุดของแผ่นบัพเฟิล.....	69
รูปที่ ก-2 แสดงลักษณะของแผ่นบัพเฟิล.....	69
รูปที่ ก-3 แสดงลักษณะของแผ่นบัพเฟิลที่ขนาดรูภายในต่างกัน.....	70
รูปที่ ก-4 เครื่องทำความเย็น (Cooling Tower).....	70
รูปที่ ก-5 เครื่องทำความเย็น (Chiller).....	71
รูปที่ ก-6 ตัววัดอัตราการไหล (Rotary meter).....	71
รูปที่ ก-7 ตัววัดอุณหภูมิ (Thermo couple).....	72
รูปที่ ก-8 ตู้ควบคุมและระบบบันทึกข้อมูล (Data Logger).....	72
รูปที่ ก-9 ตัวให้ความร้อน (Heater).....	73
รูปที่ ก-10 ถังทำความร้อน (Heater).....	73
รูปที่ ก-11 ปั๊มของไหล (Pump).....	74
รูปที่ ก-12 ตัววัดความดัน (Pressure transducer).....	74
รูปที่ ก-13 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต้นแบบ.....	75
รูปที่ ก-14 ตัวมอเตอร์ทำหน้าที่ขยับขึ้นลง	75

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	พื้นที่ผิวของการถ่ายเทความร้อน (Area of heat transfer)
A^i	พื้นที่หน้าตัดของท่อด้านในของไหลสายร้อนไหลผ่าน
A^o	พื้นที่หน้าตัดของท่อด้านนอกของไหลสายเย็นไหลผ่าน
A_i	พื้นที่ผิวการถ่ายเทความร้อนด้านในท่อ
A_o	พื้นที่ผิวการถ่ายเทความร้อนด้านนอกท่อ
C_p	ความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ (Heat capacity)
C_{p_i}	ความจุความร้อนจำเพาะของของไหลด้านในท่อ(สายร้อน)
C_{p_o}	ความจุความร้อนจำเพาะของของไหลด้านในเซลล์(สายเย็น)
D	เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ
D_i	เส้นผ่านศูนย์กลางของด้านในท่อ
D_o	เส้นผ่านศูนย์กลางของด้านนอกท่อ
D_s	เส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์
D_h	เส้นผ่านศูนย์กลางของด้านในท่อ
r	รัศมีของท่อ
r_i	รัศมีของท่อภายใน
r_o	รัศมีของท่อภายนอก
d_o	เส้นผ่านศูนย์กลางของรูภายในแผ่นบัฟเฟิล
S	ระยะห่างระหว่างแผ่นบัฟเฟิล

L	ความยาวของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
f	ความถี่ในการสั่นของแผ่นบัพเฟิล
x_o	แอมพลิจูดในการสั่นของแผ่นบัพเฟิล
F_h	อัตราการไหลของของไหลสายร้อน
F_c	อัตราการไหลของของไหลสายเย็น
V_i	ปริมาตรของท่อด้านในที่ของไหลสายร้อนไหลผ่าน
V_o	ปริมาตรของท่อด้านนอกที่ของไหลสายเย็นไหลผ่าน
T	อุณหภูมิของของไหล
$T_{h,i}$	อุณหภูมิของของไหลสายร้อนขาเข้า
$T_{h,i}$	อุณหภูมิของของไหลสายร้อนขาเข้า
$T_{h,o}$	อุณหภูมิของของไหลสายร้อนขาออก
$T_{c,i}$	อุณหภูมิของของไหลสายเย็นขาเข้า
$T_{c,o}$	อุณหภูมิของของไหลสายเย็นขาออก
$T_{h,av}$	อุณหภูมิของของไหลสายร้อนเฉลี่ย
$T_{c,av}$	อุณหภูมิของของไหลสายเย็นเฉลี่ย
ΔT_{lm}	อุณหภูมิของของไหลเฉลี่ยแบบล็อกการริทิม
T_s	อุณหภูมิสัมบูรณ์ (Absolute temperature)
T_{sur}	อุณหภูมิสัมบูรณ์ของสิ่งแวดล้อม
v_i	ความเร็วของของไหลด้านในท่อ (สายร้อน)
v_o	ความเร็วของของไหลด้านเซลล์ (สายเย็น)
\dot{m}_h	อัตราการไหลเชิงมวลของของไหลสายร้อน

\dot{m}_c	อัตราการไหลเชิงมวลของของไหลสายเย็น
q	อัตราการถ่ายเทความร้อน
Q_h	อัตราการถ่ายเทความร้อนของของไหลสายร้อน
Q_c	อัตราการถ่ายเทความร้อนของของไหลสายเย็น
Q_{av}	อัตราการถ่ายเทความร้อนของของไหลเฉลี่ย
h_i	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้านในท่อ
h_o	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้านนอกท่อ
k	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conduction)
k_i	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนด้านในท่อ
k_o	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนด้านนอกท่อ
k_{ss}	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของท่อสแตนเลสสตีล
ρ	ความหนาแน่นของของไหล (Density of fluid)
ρ_i	ความหนาแน่นของของไหลด้านในท่อ (สายร้อน)
ρ_o	ความหนาแน่นของของไหลด้านนอกท่อ (สายเย็น)
μ	สัมประสิทธิ์ความหนืดของของไหล (Viscosity)
μ_i	สัมประสิทธิ์ความหนืดของของไหลด้านในท่อ (สายร้อน)
μ_o	สัมประสิทธิ์ความหนืดของของไหลด้านนอกท่อ (สายเย็น)
ν	จลศาสตร์ความหนืดของของไหล (Kinematics viscosity)
ν_i	จลศาสตร์ความหนืดของของไหลด้านในท่อ (สายร้อน)
ν_o	จลศาสตร์ความหนืดของของไหลด้านนอกท่อ (สายเย็น)
Re	เรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds Number)

Re_{osc}	เรย์โนลด์นัมเบอร์ของการสั่น (Oscillatory Flow Reynolds Number)
Re_h	เรย์โนลด์นัมเบอร์ของของไหลสายร้อน (Hot Flow Reynolds Number)
Re_c	เรย์โนลด์นัมเบอร์ของของไหลสายเย็น (Cool Flow Reynolds Number)
Pr	พรันเทิลด์นัมเบอร์ (Prantld Number)
Pr_i	พรันเทิลด์นัมเบอร์ด้านในท่อ (สายร้อน)
Pr_o	พรันเทิลด์นัมเบอร์ด้านในเชลล์ (สายเย็น)
Nu	นัทเชลล์นัมเบอร์ (Nusselt Number)
Nu_i	นัทเชลล์นัมเบอร์ภายในท่อ (สายร้อน)
Nu_o	นัทเชลล์นัมเบอร์ในเชลล์ (สายเย็น)
α	อัตราส่วนระหว่างรูภายในแผ่นบัพเฟิลเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ
β	อัตราส่วนระหว่างระยะห่างระหว่างแผ่นบัพเฟิลเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ
ε	ค่า Emissivity ของพื้นผิว
U	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall heat transfer coefficient)
U_i	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมภายในท่อ (U_i)
U_o	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมภายนอกท่อ (U_o)

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในโรงงานอุตสาหกรรมกระบวนการผลิตทางวิศวกรรมเคมีต่างๆ มีการใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมากมายในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสายร้อนและสายเย็น ระบบการถ่ายเทความร้อนจึงเป็นสิ่งจำเป็น ในการดำเนินงานนำพลังงานความร้อนกลับมาใช้ใหม่ให้ได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้นสามารถลดต้นทุนในกระบวนการผลิตไปได้อย่างมาก โดยทั่วไปเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะถูกออกแบบให้การไหลของของไหลในทั้งกระแสนร้อนและกระแสนเย็นมีความเร็วสูงเพื่อสภาวะการไหลที่เป็น การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) จึงจะส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนมีประสิทธิภาพสูง

แต่ในบางกระบวนการผลิตซึ่งมีกำลังการผลิตต่ำ ลักษณะการไหลของของไหลจะเป็นแบบลามินา (Laminar flow) ซึ่งสภาวะการไหลนี้จะทำให้การถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีประสิทธิภาพต่ำ นอกจากนี้การไหลแบบลามินา จะก่อให้เกิดปัญหาในเรื่องของการตกตะกอน ทำให้เกิดการอุดตันภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้ง่าย

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาถึงประสิทธิภาพในกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลสองชนิดระหว่างสายร้อนและสายเย็นที่มีบัฟเฟิลสลับแบบสลับไปมา ของท่อสองชั้น (Double pipe) ซึ่งเป็นการพัฒนาระบบการถ่ายเทความร้อนและหน่วยปฏิบัติการ โดยประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของของไหลขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของการไหลและสมบัติเฉพาะของการถ่ายเทความร้อนในแต่ละระบบ วิธีการในการปรับปรุงประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น (Ni et al. 2003) สามารถทำได้โดยปรับปรุงการกระจายตัวของของไหลให้มากขึ้น ซึ่งทางเลือกหนึ่งในการทำให้ของไหลมีการกระจายตัวที่ดีขึ้นนั้น ทำได้โดยใช้การไหลแบบสลับไปมาในท่อซึ่งมีการติดตั้งบัฟเฟิลไว้เป็นช่วงๆ ซึ่งตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน ได้แก่ ความถี่ (Frequency) แอมพลิจูด (Amplitude) ในการไหลสลับไปมาของแผ่นบัฟเฟิล รวมทั้งอัตราการไหลของสายร้อนและสายเย็น ระยะห่างระหว่างแผ่นบัฟเฟิล และขนาดของรูกลวงภายในแผ่นบัฟเฟิล เป็นต้น ซึ่งการไหลแบบสลับไปมานั้นนอกจากจะสามารถเพิ่ม

ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนแล้วยังสามารถลดการเกิดตะกรันที่ผิวการถ่ายเทความร้อนได้อีกด้วย

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อน รวมถึงการหาสภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นชนิดมีบัพเฟิล (Baffled plate) ที่มีการไหลแบบสลับไปมา องค์ความรู้ที่ได้สามารถนำไปเป็นพื้นฐานในการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งมีประสิทธิภาพสูง นอกจากนี้ยังใช้เป็นพื้นฐานความรู้ในการเพิ่มประสิทธิภาพหน่วยปฏิบัติการต่างๆ เช่น เครื่องปฏิกรณ์เคมี ถังกวนผสม เป็นต้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในช่วงสภาวะการไหลแบบราบเรียบ
2. ศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน
3. ประสิทธิภาพสูงสุดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

1.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีและกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นชนิดมีบัพเฟิลที่มีการไหลแบบสลับไปมา (Oscillatory baffled Column, OBC)
2. ออกแบบตัวเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นชนิดมีบัพเฟิลที่มีการไหลแบบสลับ
3. สร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นชนิดมีบัพเฟิลที่มีการไหลแบบสลับ
4. ศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน
5. หาสภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นชนิดมีบัพเฟิลที่มีการไหลแบบสลับ

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. เพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ช่วงสภาวะการไหลแบบราบเรียบ
2. ศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน ซึ่งมีตัวแปรดังต่อไปนี้ อัตราการไหลของของไหลสายร้อนและเย็น, ความถี่และแอมพลิจูดของการสั่น, ระยะห่างระหว่างแผ่นบัพเฟิลและรูภายในของแผ่นบัพเฟิล
3. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน ในช่วงค่าต่อไปนี้ เรย์โนลด์นัมเบอร์ของการสั่น 0 ถึง 2,000 เรย์โนลด์นัมเบอร์ของของไหลสายร้อน 100 ถึง 1,000 เรย์โนลด์นัมเบอร์ของของไหลสายเย็น 500 ถึง 2,500 รูภายในแผ่นบัพเฟิลเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 0.4 ถึง 0.7 และอัตราส่วนของระยะห่างระหว่างบัพเฟิลเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 1 ถึง 2.5

ตารางที่ 1.1 ค่าสภาวะที่ดำเนินการทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ตัวแปร		หน่วย	ค่า
ต่อต้านใน	อัตราการไหลของของไหลสายร้อน (Hot Flow rate)	ลิตรต่อนาที (l/min)	4-15
	แอมพลิจูด (Amplitude)	เซนติเมตร (cm)	0-2
	ความถี่ในการสั่น (Frequency)	รอบต่อวินาที (Hz)	0-2
	อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางรูภายในของแผ่นบัพเฟิลเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (Diameter inner/Diameter outer ; D_i/D_o)	ไม่มีหน่วย	0.4-0.7
	อัตราส่วนระยะห่างระหว่างแผ่นบัพเฟิลเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (Spacing/Diameter ; S/D)	ไม่มีหน่วย	1-2.5

ตัวแปร	หน่วย	ค่า	ตัวแปร
ท่อด้านนอก	อัตราการไหลของไหลสายเย็น (Cool Flow rate)	ลิตรต่อนาที (l/min)	5-25

1.5 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน, การถ่ายเทความร้อน, ท่อสองชั้นแบบมีบีฟเฟิล, การสั่นสลับไปมาของของไหล, การสั่นแบบสลับไปมาของแผ่นบีฟเฟิล

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. กระบวนการที่มีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อน
2. สภาวะที่ดีที่สุดในการดำเนินดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นชนิดมีบีฟเฟิลที่มีการไหลแบบสลับ
3. สมการแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน
4. พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่มีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.7 ตารางวิธีดำเนินการวิจัย

แผนการทำงาน (12 เดือน เริ่มตั้งแต่ 1 เมษายน 2551 – 31 มีนาคม 2552)

ขั้นตอนการทำงาน	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
	2551	2551	2551	2551	2551	2551	2551	2551	2551	2552	2552	2552
1. ศึกษากระบวนการถ่ายเทความร้อนแบบ Oscillatory Baffled Column (OBC)	←→											
2. ทำการออกแบบตัวเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Oscillatory Baffled Column (OBC)		←→										
3. ดำเนินการสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Oscillatory Baffled Column (OBC)				←→								
4. ดำเนินการทดลองโดยเปลี่ยนค่าตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการแลกเปลี่ยนความร้อน					←→							
5. วิเคราะห์ผลจากการทดลอง							←→					
6. ประเมินสภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินงาน									←→			
7. สรุป รายงาน และนำเสนอผลงาน											←→	

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

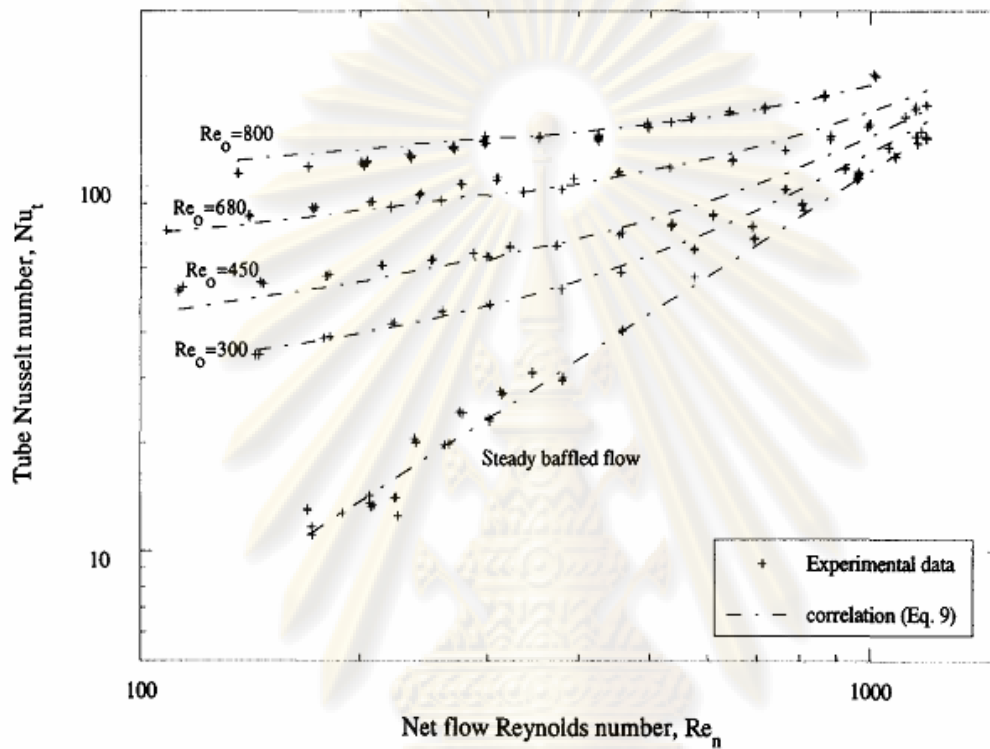
Mackley and Stonestresst (1995) ศึกษาเรื่องการเพิ่มประสิทธิภาพถ่ายเทความร้อนและการลดพลังสำหรับการไหลแบบสลับไปมาในท่อที่มีบัพเฟิล โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองภายในท่อสองชั้นซึ่งมีการไหลแบบสลับไปมาแบบของของไหล (Pulsation) เกิดจากระบบสูบเป็นตัวผลักดันภายในท่อได้มีการติดตั้งบัพเฟิล (baffled plate) เป็นช่วงๆ ที่ระยะห่างระหว่างแผ่นกับบัพเฟิลเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ 1.5 ทดลองในช่วงค่าเนทโฟลเรโนลด์นัมเบอร์ (Net flow Reynolds number ; Re_n) และเรโนลด์ของการสั่น (Oscillatory flow Reynolds number ; Re_{os}) ในช่วงสภาวะการไหลแบบลามินา (Laminar Flow) 0 - 1,400 และ 0 - 1,000 ตามลำดับ ซึ่งนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลในรูปของตัวแปรสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Nusselt Number) เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับสมการการไหลแบบสภาวะราบเรียบ (Laminar flow equations) ซึ่งเป็นสมการของ Key and Nedderman ในปี 1985 ภายในท่อชนิดไม่มีบัพเฟิลและไม่มีการไหลแบบสลับของแผ่นบัพเฟิล อีกทั้งยังนำค่าความดันลดที่ได้ซึ่งเกิดจากการสั่นของบัพเฟิลภายในนั้นนำไปประมาณค่าหาประสิทธิภาพของพลังงานหรือความหนาแน่นของพลังงานเทียบกับปริมาตร

โดยในการทดลองนี้ Mackley และ Stonestresst ได้ทำการทดลองโดยใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น โดยของไหลสายร้อนและของไหลสายเย็นไหลแบบสวนทางกัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อภายใน 12 มิลลิเมตร หนา 1 มิลลิเมตร ใช้ท่อสแตนเลสสตีล ยาว 1 เมตร และขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนอกหรือเชลล์ 80 มิลลิเมตร อัตราการไหลของของไหลสายเย็นคงที่ 10 ลิตรต่อนาที

โดยท่อในใช้ของไหลสายร้อนคือน้ำมัน อัตราการไหลอยู่ในช่วง 0-10 ลิตรต่อนาที ป้อนเข้าที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส สำหรับภายในท่อเชลล์ใช้ของไหลสายเย็นคือน้ำ ที่อัตราการไหลคงที่ 10 ลิตรต่อนาที ป้อนที่อุณหภูมิเข้า 20 องศาเซลเซียส ทำการทดลองความถี่อยู่ในช่วง 0-10 รอบต่อวินาที (Hz) และแอมพลิจูดอยู่ในช่วง 0-7 มิลลิเมตร (mm)

ผลการทดลองปรากฏว่าเมื่อเปรียบเทียบค่าระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Nusselt Number) มีค่าเพิ่มขึ้น ที่ค่าเนทโฟลเรโนลด์นัมเบอร์ (Net flow Reynolds number) และเรโนลด์ของการสั่น (Oscillatory flow Reynolds number) มากขึ้น อีกทั้งเมื่อมาเปรียบเทียบกับการไหลชนิดไม่มีบัพเฟิลก็มีค่าสูงกว่าเช่นกัน แต่เมื่อค่าเนทโฟลเรโนลด์นัมเบอร์สูงขึ้นจะเห็นได้ว่าค่า

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะมีค่าใกล้เคียงกันดังรูปที่ 2.1 แลยังหาสมการแสดงความสัมพันธ์ของนัทเชลล์นัมเบอร์เพื่อทำนายสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนดังสมการที่ 2.1 สำหรับค่าของความถี่และแอมปริจูดพบว่าเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความดันลคมมีค่าสูง แต่สำหรับค่าของแอมปริจูดที่มากขึ้นนั้นจะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของพลังงานมีค่าน้อยลง



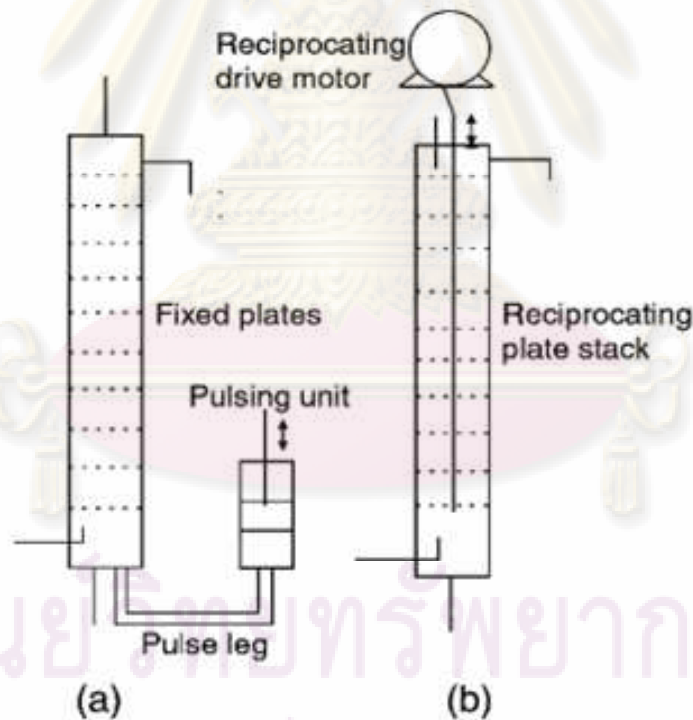
รูปที่ 2.1 แสดงผลของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Nusselt Number) ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของการไหล และเรย์โนลด์นัมเบอร์ของการสั่นต่างกัน

สมการแสดงความสัมพันธ์ในรูปของเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds Number) และพรันเทิลนัมเบอร์ (Prantle Number) ที่ใช้ทำนายสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Nusselt Number) ซึ่งมีสมการดังนี้

$$Nu_t = 0.0035 Re_n^{1.3} Pr^{1/3} + 0.3 \left[\frac{Re_o^{2.2}}{(Re_n + 800)^{1.25}} \right] \dots(2.1)$$

Ni, Mackley and Stonestresst (2003) งานวิจัยนี้เป็นการพูดถึงงานวิจัยที่ผ่านมา (Review paper) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้เพิ่มประสิทธิภาพในการผสมสารให้เข้ากันได้ดียิ่งขึ้น โดยมีจุดเริ่มต้นในราวๆ ปี ค.ศ. 1940-1950 ในอุตสาหกรรมที่มีความต้องการสกัดสารตัวหนึ่งออกจาก Plate or Packed column เป็นจำนวนมาก ดังนั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัด จึงมีการคิดค้นหาวิธีใหม่ๆ มาช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพ นั่นก็คือ การทำให้ของไหลสั่น (Oscillation Flow) โดยมี 2 วิธีดังนี้คือแบบ

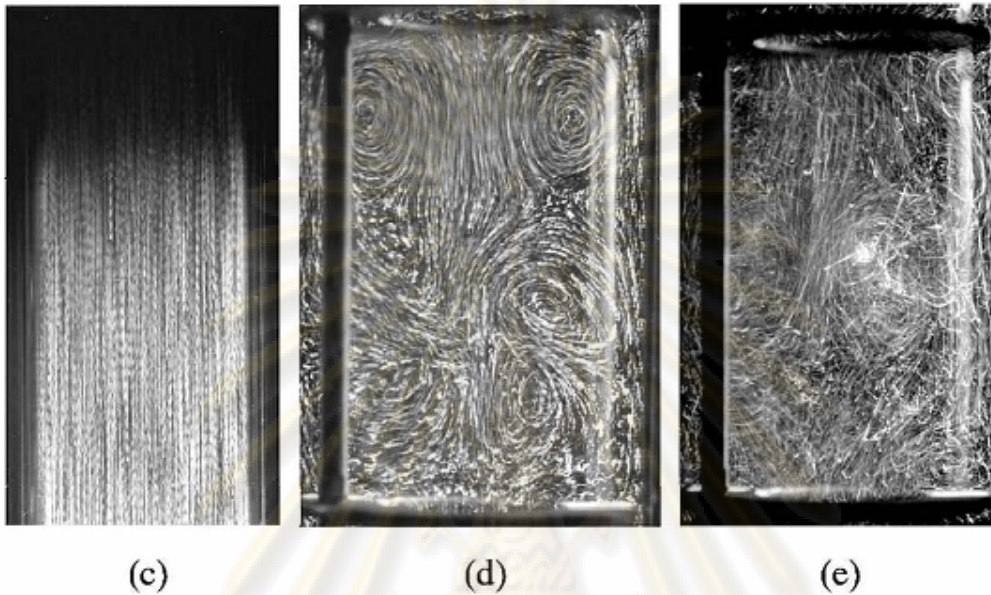
1. Pulsing the contents of the column คือ การทำให้ของเหลวในคอลัมน์สั่น โดยการอาจมีการใช้ปั๊มสูบเข้า - ออก ขณะมีการไหลผ่านของสารในคอลัมน์ ดังรูปที่ 3a
2. Reciprocating plate column (RPC) คือ การทำให้ baffled plate ที่ติดอยู่ในคอลัมน์สั่นขึ้น - ลง โดยผลของมันก็จะไปส่งผลทำให้ของเหลวระหว่าง baffled plate สั่นด้วย ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 รูปแบบประเภทของการไหลแบบสั่น (Oscillation flow)

(a) Pulsing the contents of the column (b) Reciprocating plate column (RPC)

โดยงานวิจัยนี้ได้สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวกับการไหลแบบสลับไปมาชนิดมีบีฟเฟิลทั้งสองรูปแบบซึ่งอาศัยหลักการคือทำให้ของเหลวมีการผสมกันมากยิ่งขึ้นซึ่งทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทระหว่างความร้อนและมวลได้เป็นอย่างดี ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงการไหลแบบสลับของของไหลภายในท่อ

(c) การไหลแบบไม่มีบีฟเฟิล (d) และ (e) การไหลแบบสลับภายในท่อชนิดมีบีฟเฟิล

สรุปข้อมูลเกี่ยวกับการพัฒนาและนำไปประยุกต์ใช้ของการไหลแบบสลับไปมาตามระยะเวลาที่ผ่านมาตั้งแต่ปี 1980 เป็นต้นมา

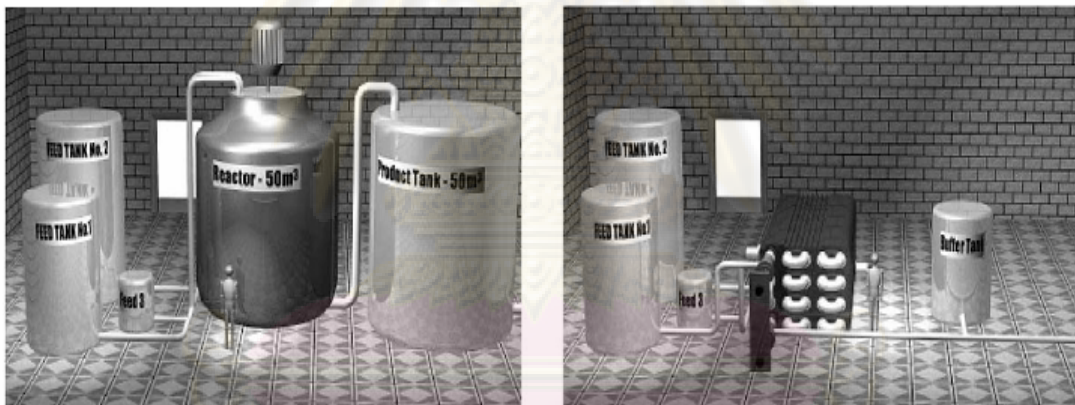
1. การเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน
2. การนำไปใช้เป็นถึงปฏิกรณ์ แบบการไหลแบบท่อไหล
3. การเพิ่มประสิทธิภาพการโอนมวลระหว่างก๊าซกับของเหลว
4. เพิ่มประสิทธิภาพการกระจายตัวของของแข็ง
5. ความคุมขนาดของหยดในการกระจายตัวของของเหลว-ของเหลว
6. กระบวนการตกผลึก

7.กระบวนการโพลีเมอร์ไรเซชัน

8.เพิ่มประสิทธิภาพในการผสมในกระบวนการที่เกิดตะกอน

9.กระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์แบบแบด

โดยสรุปแล้วงานวิจัยนี้ได้อธิบายถึงกระบวนการไหลของของเหลวแบบสลับไปมาและแบบบัพเฟิลสลับไปมา ทั้งสองแบบคือแผ่นบัพเฟิลสลับ (Reciprocating plate column, RPC) และของไหลสลับ (Pulsing the contents of the column, PPC) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผสมเข้ากันได้ดีทำให้เกิดการถ่ายโอนระหว่างมวลและความร้อนมากขึ้น และรวมการนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายอีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเพื่อให้กระบวนการนั้นมีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น (Process Intensify) พัฒนาไปเป็นถังปฏิกรณ์ดังรูปที่ 2.3 เป็นต้น



รูปที่ 2.4 กระบวนการที่มีประสิทธิภาพสูงของถังปฏิกรณ์แบบสั่นของของไหลภายในท่อ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Ru Yang and Fan Pin Chiang (2001) ศึกษาถึงการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นโดยใช้ท่อภายในเป็นแบบลูกคลื่น ซึ่งทำการหาค่าการถ่ายเทความร้อนและความดันลของการไหลที่เป็นลักษณะการไหลเป็นแบบลูกคลื่นตามรูปแบบของท่อภายใน โดยหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยใช้วิธีของ วิลสัน พล็อต (Wilson plot) เพื่อศึกษาถึงตัวแปรที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน ดังนี้ Dean Number (Da), Prandtl Number (Pr), Reynolds number (Re) and friction factor (f) เพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน โดยพบว่าที่ ค่า Dean number สูงๆ จะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่สูงเช่นกัน และยังพบอีกว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้นถึง 100 % เมื่อเปรียบเทียบกับกรไหลแบบท่อตรง สำหรับค่า friction factor ลดลงถึง 40 % และยังให้ค่า Reynolds number ต่ำด้วย ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 600 รวมถึงยังสามารถพัฒนาเป็นรูปแบบอื่นๆ ได้ต่อไป

NI, Brogan, Struthers, Bennet and Wilson (1998) ทำการทดลองเพื่อหาค่าสภาวะของตัวแปรต่างที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล (Mass transfer) ในรูปของเวลาในการผสม (Mixing time) และหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของการถ่ายโอนมวลในท่อสององชั้นแบบสลับไปมาของแผ่นบัพเฟิล ซึ่งได้ศึกษาที่ค่า อัตราส่วนระหว่างรูภายในแผ่นบัพเฟิลเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (d_o/D) คิดเป็นร้อยละ ค่าอยู่ในช่วง 11–51% อัตราส่วนระยะห่างระหว่างแผ่นบัพเฟิลเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ค่าอยู่ในช่วง 1-2 และ ความหนาของแผ่นบัพเฟิลค่าอยู่ในช่วง 1-48 มิลลิเมตร โดยทำการวัดค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) เพื่อหาค่าเวลาที่น้อยที่สุดของการผสม (Mixing time) ซึ่งใช้น้ำเกลือ (NaCl) เป็นตัวป้อนเข้า โดยทดลองที่ความถี่อยู่ในช่วง 1-10 รอบต่อวินาที แอมปริจูดอยู่ในช่วง 1-20 มิลลิเมตร

ผลการทดลองปรากฏว่า เมื่อทำการทดลองที่อัตราส่วนระหว่างรูภายในของแผ่นบัพเฟิลเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อที่ค่าความถี่และแอมปริจูดต่างกัน พบว่าที่ค่าความถี่เท่ากับ 10 รอบต่อวินาที และแอมปริจูดเท่ากับ 10 มิลลิเมตร จะให้ค่าเวลาในการผสม (Mixing time) มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าการผสมเข้ากันได้ดีมากที่สุด และสามารถสรุปค่าสภาวะการดำเนินงานของพารามิเตอร์ต่างที่เหมาะสมได้ดังนี้

1. อัตราส่วนระหว่างรูกลางของแผ่นบัพเฟิลเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (D_o/D) ค่าอยู่ระหว่าง 20 – 22 %
2. อัตราส่วนระยะห่างระหว่างแผ่นบัพเฟิลเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ค่าที่เหมาะสมคือ 2
3. ความหนาของแผ่นบัพเฟิลค่าที่เหมาะสมคือ 2 – 3 มิลลิเมตร

บทที่ 3

พื้นฐานและทฤษฎี

3.1 กลไกการถ่ายโอนความร้อน

การถ่ายโอนความร้อนเกิดขึ้น เมื่อสองส่วนของระบบมีความแตกต่างของอุณหภูมิโดยความร้อนจะถูกถ่ายโอนจากแหล่งอุณหภูมิสูง (Source) ไปสู่แหล่งอุณหภูมิต่ำ (Sink) ตามกฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ (Second of thermodynamics) การถ่ายโอนความร้อนจึงนิยามได้ว่าเป็นการไหลของพลังงานในรูปของความร้อน เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างแหล่งให้ (Source) กับแหล่งรับ (Sink)

กลไกการถ่ายโอนความร้อนเกิดได้ 3 ลักษณะ คือ การนำความร้อน (Conduction) การพาความร้อน (Convection) และการแผ่รังสีความร้อน (Radiation) การถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นในแต่ละกระบวนการ อาจอาศัยกลไกใดกลไกหนึ่งหรือกลไกทุกกลไก ความสัมพันธ์ของกลไก การถ่ายโอนความร้อนทั้ง 3 ลักษณะ สรุปได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 กระบวนการถ่ายโอนความร้อนแบบต่างๆ

การนำ	การพา	การแผ่รังสี
มีตัวกลาง	มีตัวกลาง	เป็นได้ทั้งแบบมีตัวกลางและไม่มี (เช่น สุญญากาศ)
ไม่จำเป็นต้องมีการเคลื่อนที่	ขึ้นอยู่กับเคลื่อนที่ของของไหล	ไม่จำเป็นต้องมีการเคลื่อนที่
เกิดในของแข็ง, ของเหลว และแก๊ส	เกิดในของเหลว, แก๊ส และของผสมหลายสถานะ	เกิดในตัวกลางโปร่งใส ส่วนใหญ่ในแก๊ส

ซึ่งไม่ว่าการถ่ายเทความร้อนในรูปแบบใดข้างต้น การถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อมีผลต่างของอุณหภูมิเท่านั้น โดยความร้อนจะไหลจากที่มีอุณหภูมิสูงไปยังที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ปรัชญาการนำความร้อนจะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิภายในวัตถุชิ้นหนึ่งมีค่าไม่เท่ากันทุกจุด หรือเมื่อนำวัตถุชิ้นที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันมาสัมผัสกัน ปัจจัยสำคัญที่มีส่วนในการกำหนดอัตราการนำความร้อนก็คือ ผลต่างของอุณหภูมิ มิติและรูปร่างของวัตถุ รวมถึงคุณสมบัติของวัตถุ ยิ่งผลต่างของอุณหภูมิมียิ่งสูงขึ้นเท่าไร อัตราการนำความร้อนก็จะสูงขึ้นเท่านั้น

ในกรณีการนำความร้อน ถ้าอุณหภูมิที่ทุกๆ จุดของวัตถุที่นำความร้อนมีค่าคงที่โดยไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา เรียกว่า การนำความร้อนในสภาวะคงที่ (Steady state Heat conduction) ในกรณีนี้ ปริมาณความร้อนที่ไหลผ่านพื้นที่หนึ่งหน่วยของวัตถุในหนึ่งหน่วยเวลาจะมีค่าคงที่ในทางตรงข้าม ถ้าอุณหภูมิของวัตถุทั้งชิ้นหรืออุณหภูมิของวัตถุส่วนหนึ่งมีการแปรเปลี่ยนตามเวลา อัตราการนำความร้อนของวัตถุย่อมเปลี่ยนค่าตามเวลาด้วย ในกรณีนี้เราเรียกว่า การนำความร้อนในสภาวะไม่คงที่ (Unsteady state Heat Conduction) โดยทั่วไปการนำความร้อนที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน สามารถถือได้ว่าเป็นการนำความร้อนในสภาวะคงตัว

การถ่ายเทความร้อนแบบการพาเป็นลักษณะเฉพาะของของไหล เพราะจะเกิดขึ้นในก๊าซและของเหลวเท่านั้น ในการพาความร้อน โมเลกุลของก๊าซหรือของเหลวจะเคลื่อนที่ไปยังผิวถ่ายเทความร้อนไม่ขาดสาย และทำการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ผิวนั้น ด้วยเหตุนี้ยังการเคลื่อนที่ของโมเลกุลมีการไหลที่มากขึ้น อัตราการพาความร้อนก็จะสูงขึ้นเท่านั้น เพราะจำนวนของโมเลกุลที่เคลื่อนที่ไปสัมผัสกับผิวถ่ายเทความร้อนมีเพิ่มขึ้น

เพื่อให้เกิดการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนนั้นมียุ่บ่อยๆ เช่นทำการกวนของไหลด้วยแรงกล การทำเช่นนี้เรียกว่าการพาความร้อนโดยบังคับ (Forced Convection) ในทางตรงกันข้ามการพาความร้อนที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของของไหลอย่างธรรมชาติ เนื่องจากแรงลอยตัว (Buoyant force) ที่เกิดจากการขยายตัวของของไหลด้วยความร้อน เราเรียกว่า การพาอย่างธรรมชาติ (Natural convection) หรือการพาความร้อนอย่างอิสระ (Free convection)

การแผ่รังสีความร้อนจะเกิดขึ้นระหว่างผิว 2 แห่งที่มีอุณหภูมิต่างกันและถูกกั้นกลางด้วยตัวกลางที่ยอมให้รังสีความร้อนวิ่งผ่านได้ อากาศที่บริสุทธิ์และสุญญากาศจะยอมให้รังสีความร้อนวิ่งผ่านได้ แต่ของเหลวส่วนใหญ่จะไม่ยอมให้รังสีความร้อนวิ่งผ่าน ก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ไอน้ำ และส่วนใหญ่ของก๊าซที่สันดาปได้จะมีคุณสมบัติที่ยอมให้รังสีที่มีความยาวคลื่นเฉพาะบางช่วงเท่านั้นวิ่งผ่าน เมื่อรังสีความร้อนแผ่ไปถึงผิวของวัตถุ รังสีส่วนหนึ่งจะถูกสะท้อนกลับจากผิววัตถุ รังสีส่วนหนึ่งจะถูกดูดกลืนเป็นความร้อนและไปเพิ่มอุณหภูมิของวัตถุที่รับรังสีความร้อน และในบางครั้งรังสีอีกส่วนหนึ่งจะวิ่งทะลุวัตถุนั้นโดยไม่เปลี่ยนเป็นความร้อน

3.1.1 การถ่ายเทความร้อนด้วยการนำ (Conduction Heat Transfer)

การนำความร้อนผ่านระบบผนังราบ (Plane wall)

ในกรณีผนังราบ (Plane wall) เมื่อพิจารณาค่าอุณหภูมิที่ถ่ายเทจากด้านในของวัตถุหนึ่งสู่ด้านนอก (Holman, 2002) กรณีแสดงว่ามีการถ่ายเทพลังงานจากขอบเขตที่มีอุณหภูมิต่ำ ลักษณะเช่นนี้เรากล่าวได้ว่าพลังงานถ่ายเทด้วยการนำ นั่นแสดงว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าอุณหภูมิแสดงดังสมการที่ 3.1

$$\frac{q}{A} = \alpha \frac{\partial T}{\partial x} \quad \dots(3.1)$$

เมื่อแทนด้วยสัดส่วนเป็นค่าคงที่จะได้สมการที่ 2

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad \dots(3.2)$$

เมื่อ q คืออัตราการถ่ายเทความร้อน $\frac{\partial T}{\partial x}$ คือค่าอุณหภูมิในทิศทางที่ความร้อนไหล A คือพื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการถ่ายเท (m^2) ค่าคงที่ k มีค่าเป็นบวก เรียกว่าสภาพนำความร้อนของวัสดุ (Thermal Conductivity, $W/m \cdot ^\circ K$) และถ้ามีค่าเป็นลบแสดงว่าเป็นไปตามหลักการของกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ ตัวอย่างความร้อนที่ไหลจะมีค่าลดต่ำลงตามสเกลอุณหภูมิที่แสดงด้วยระบบคอร์ดิเนต เรียกว่ากฎของฟูเรียร์ของการนำความร้อนที่ได้จากนักฟิสิกส์และคณิตศาสตร์ชื่อ โจเซฟ ฟูเรียร์ (Joseph Fourier) อย่างไรก็ดี ถ้าค่าอุณหภูมิของของแข็ง ก็จะทำให้ปัญหานี้ยุ่งยากมากขึ้น เราพิจารณากรณีทั่ว ๆ ไปซึ่งอุณหภูมิอาจจะเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับเวลา และแหล่งกำเนิดความร้อนจะประกอบรวมอยู่ในวัตถุ

การนำความร้อนระบบทรงกระบอก (Cylinder Heat Conduction)

ในกรณีของระบบทรงกระบอก การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมักจะเกิดในทิศทางตรงตามรัศมีเท่านั้น เท่านั้น ดังนั้นจึงคิดได้ว่าเป็นการนำความร้อนในมิติเดียว นอกจากนั้นแล้วภายใต้สภาวะคงตัวและไม่มีแหล่งกำเนิดความร้อนภายในตัวกลาง ตัวอย่างระบบทรงกระบอกที่พบบ่อยได้แก่การนำความร้อนการนำความร้อนผ่านผนังท่อรูปทรงกระบอกกลางซึ่งผิวในและนอกของทรงกระบอกสัมผัสกับของไหลที่มีอุณหภูมิต่างกัน ถ้าทรงกระบอกกลางมีความยาวมากเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาของผนัง การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในแนวรัศมีและประมาณได้ว่าเป็นการนำ

ความร้อนในมิติเดียวตามรัศมี ในกรณีนี้เมื่อเป็นสภาวะคงตัว และไม่มีกำเนินความร้อนภายในตัวกลาง สมการสำหรับพิกัดทรงกระบอกมิติคือ

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(kr \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad \dots(3.3)$$

ค่า k ในสมการที่ 3.3 อาจจะไม่ใช่ค่าคงที่ก็ได้ และถ้าพิจารณากฎของฟูเรียร์สำหรับพิกัดทรงกระบอกอัตราการนำความร้อนผ่านผิวของทรงกระบอกเขียนได้เป็น

$$q_r = -kA \frac{dT}{dr} = -k(2\pi rL) \frac{dT}{dr} \quad \dots(3.4)$$

โดยที่ $A = 2\pi rL$ คือพื้นที่ใดๆ ในผิวทรงกระบอกที่ตั้งฉากกับทิศทางการถ่ายเทความร้อนจากสมการที่ 3.3 และ 3.4 เห็นว่าอัตราการนำความร้อนนั้นมีค่าคงที่ในทิศทาง r

การกระจายอุณหภูมิในทรงกระบอกสามารถหาได้โดยการแก้สมการที่ 3.3 และใช้เงื่อนไขขอบเขตที่เหมาะสมสมมติว่าค่า k เป็นค่าคงที่ ซึ่งสามารถอินทิเกรตได้ดังนี้

$$T = C_1 \ln(r) + C_2 \quad \dots(3.5)$$

สมมติว่ารูอุณหภูมิที่ผิวทั้งสองด้านของทรงกระบอก เงื่อนไขขอบเขตสำหรับหา C_1 และ C_2 คือ

$$\text{ที่ } r = r_1, T = T_{s,1}$$

$$\text{และ } r = r_2, T = T_{s,2}$$

เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ 3.5 จะได้

$$T_{s,1} = C_1 \ln(r_1) + C_2 \quad \dots(3.6)$$

$$T_{s,2} = C_1 \ln(r_2) + C_2 \quad \dots(3.7)$$

แก้สมการทั้งสองเพื่อหาค่า C_1 และ C_2 แทนค่ากลับลงในสมการที่ 3.5 ได้ดังนี้

$$T = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{\ln(r_2/r_1)} \ln\left(\frac{r}{r_2}\right) + T_{s,2} \quad \dots(3.8)$$

เห็นได้ว่าการกระจายของอุณหภูมิของการนำความร้อนตามรัศมีของทรงกระบอกกลวงนั้นเป็นลักษณะ Logarithmic ไม่ใช่เส้นตรงดังในกรณีผนังราบ การแทนที่สมการที่ 3.4 ลงในกฎฟูเรียร์จะ

$$q_r = \frac{2\pi kL(T_{s,1} - T_{s,2})}{\ln(r_2 / r_1)} \quad \dots(3.9)$$

ในกรณีนี้เนื่องจากอัตราการนำความร้อนเป็นค่าคงที่จึงเขียนเป็นวงจรมีได้ และค่าความต้านทานความร้อนจะอยู่ในรูป

$$R_{cond} = \frac{\ln(r_2 / r_1)}{2\pi Lk} \quad \dots(3.10)$$

3.1.1.1 สภาพนำความร้อน (Thermal Conductivity)

สภาพนำความร้อน (Thermal Conductivity) การกำหนดค่าสภาพการนำความร้อนที่ได้นี้ ขึ้นอยู่กับค่าที่ได้จากการทดลอง โดยการหาค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุชนิดต่างๆ สำหรับก๊าซที่ให้ค่าอุณหภูมิต่ำ การวิเคราะห์กำหนดไว้ในทฤษฎีของโคเนติกหรือทฤษฎีของไหลของก๊าซต่างๆ ต้องนำมาใช้เพื่อกำหนดค่าความถูกต้องซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดลอง ทฤษฎีเหล่านี้สามารถนำมาใช้กับการกำหนดสภาพการนำความร้อนในของเหลวและของแข็ง แต่โดยทั่วไปต้องการค่าเพื่อนำไปใช้เฉพาะเจาะจงลงไปว่าเป็นของเหลวและของแข็งชนิดใด กลไกการนำความร้อนในก๊าซเป็นวิธีง่ายๆ วิธีหนึ่ง โดยจำแนกพลังงานโคเนติกโมเลกุลด้วยค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้น ดังนั้น ในขอบเขตที่มีอุณหภูมิสูง โมเลกุลจะมีความเร็วสูงกว่าขอบเขตที่มีอุณหภูมิต่ำ โมเลกุลเหล่านี้มีการเคลื่อนที่ไปมาอย่างต่อเนื่อง การไหลวนด้วยโมเลกุลอีกโมเลกุลหนึ่ง รวมทั้งมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานและโมเมนตัมด้วยโมเลกุลเหล่านี้มีการเคลื่อนที่ไปมา หรือไม่ก็แสดงค่าอุณหภูมิภายในก๊าซนั้นๆ ออกมา ถ้าโมเลกุลหนึ่งเคลื่อนที่ออกจากขอบเขตที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่อุณหภูมิต่ำ การเคลื่อนที่ของพลังงานโคเนติกไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าระบบ ทำให้พลังงานส่วนนี้ผ่านไปกระทบกับโมเลกุลที่มีพลังงานต่ำกว่าด้วย เราสังเกตได้ว่า สภาพการนำความร้อนมีหน่วยเป็นวัตต์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวเมตรต่อหนึ่งหน่วยของเสาเซลเซียส เมื่อค่าความร้อนที่ไหลนี้วัดหน่วยเป็นค่าวัตต์สังเกตว่าอัตราของความร้อนจะรวมอยู่ในเทอมนี้ และค่าตัวเลขของสภาพการนำความร้อนแสดงถึงการไหลของความร้อนได้ดีหรือได้เร็วขึ้นจะขึ้นอยู่กับวัสดุเป็นหลัก อย่างไรก็ตามอัตราของพลังงานที่ถ่ายเทที่เกิดขึ้นคิดจากโมเลกุลแล้วด้วยการวิเคราะห์ดังกล่าว ค่าการนำความร้อนสามารถหาได้ ใช้

กฎของฟูเรียร์ (Fourier's law) ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ จะในให้ค่าการนำความร้อนที่แตกต่างกันสามารถหาได้ดังสมการ

สมการการนำความร้อนสามารถนิยามได้โดยดังสมการที่ 3.11

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad \dots(3.11)$$

เมื่อ $\frac{\Delta Q}{\Delta t}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของความร้อนเทียบกับเวลา, k คือ ค่าการนำความร้อน, A คือ พื้นที่หน้าตัดการนำความร้อน, ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิ, x ความหนาของโลหะเพราะฉะนั้นเราค่าการนำความร้อนดังสมการที่ 3.12

$$k = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \frac{x}{A} \quad \dots(3.12)$$

3.1.2 การถ่ายเทความร้อนด้วยการพา (Convection Heat Transfer)

มักทราบกันดีว่าแผ่นโลหะร้อนจะเย็นตัวลงได้อย่างรวดเร็วเมื่อนำไปวางให้พัดลมเป่ามากกว่าการนำไปวางไว้ในอากาศนิ่งๆ วิธีการนี้เรียกว่าการพา หรือเรียกว่า กระบวนการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาสำหรับการพา (Holman, 2002) สำหรับการพาได้มาจากการตั้งเอาพฤติกรรมที่สังเกตได้ในกระบวนการถ่ายเทความร้อน อย่างไรก็ตามการตั้งเอาข้อสังเกตต้องขยายความออกมาด้วยเหตุผลหนึ่งก็เพื่อใช้เปรียบเทียบ แล้วนำมากำหนดการวิเคราะห์ในปัญหานั้นๆ ขึ้น เป็นต้น และมรผลกระทบทำให้เกิดการระบายความร้อนโดยตรง ตัวอย่างเช่น ถ้าเพิ่มความเร็วเป็นสองเท่า อัตราการถ่ายเทความร้อนจะเป็นสองเท่าหรือไม่ เรามักสงสัยว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนอาจจะแตกต่างกัน ถ้าเราระบายความร้อนแผ่นเรียบด้วยน้ำแทนที่จะใช้อากาศ จะมีค่าแตกต่างกันมากน้อยเพียงใด

ซึ่งการพาความร้อนซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท การพาความร้อนแบบบังคับ และการพาความร้อนแบบอิสระ ในบทนี้จะศึกษาเรื่องการพาความร้อนแบบบังคับสำหรับการไหลภายนอกเป็นการวิเคราะห์ปัญหาการพาความร้อน โดยการพาความร้อนแบบบังคับ (Force Convection Heat Transfer) ทั้งกรณีการพาความร้อนของของไหลออกจากผิวความร้อนของของแข็ง หรือการพาความร้อนจากของไหลเข้าสู่ผิวของแข็ง ดังนั้นพิจารณาการอนุรักษ์พลังงานความร้อนที่บริเวณผิวความร้อนของแข็ง ดังสมการที่ 3.13, 3.14

$$Q_{conduc} = Q_{convect} \quad \dots(3.13)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = h_c (T_s - T_\infty) \quad \dots(3.14)$$

$$q = hA (T_s - T_\infty) \quad \dots(3.15)$$

เมื่อ T_s คือ อุณหภูมิผิวความร้อน

T_∞ คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม

สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาได้ดังสมการที่ 3.16

$$h_c = \frac{-k (\partial T / \partial x)|_{x=0}}{[T_s - T_\infty]} \quad \dots(3.16)$$

ในที่นี้ h_c คือสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนด้วยการพา (Heat transfer coefficient, W/m²·K) ซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราการใช้ของความร้อนจากพื้นที่หนึ่งหน่วยตารางเมตร เนื่องจากผลต่างของอุณหภูมิหนึ่งองศาเซลเซียส ซึ่งสมการที่ 3.15 มีชื่อเรียกโดยทั่วไปว่า Newton's law of cooling เป็นสมการที่รวบรวมผลทั้งหมดที่ทำให้เกิดการพาความร้อน สำหรับในสภาวะที่ซับซ้อนต้องหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการทดลอง ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบางครั้ง เรียกว่า การนำผ่านฟิล์ม เพราะว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นกระบวนการนำความร้อนในชั้นบางๆ ของของไหลที่บริเวณผิวของผนัง

การวิเคราะห์เชิงมิติของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผ่านฟิล์ม ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผ่านฟิล์มมี อาทิ เช่น คุณสมบัติของไหล สภาพการไหล รูปร่างของพื้นที่ถ่ายเทความร้อน เป็นต้น ในบางกรณีเราอาจอนุพัทธ์ระหว่างปัจจัยเหล่านี้กับสัมประสิทธิ์ของฟิล์มได้โดยอาศัยทฤษฎี เราก็ยังสามารถทำการวิเคราะห์เชิงมิติ (Dimension analysis) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรไร้มิติกลุ่มต่างๆ ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้มิติ

ชื่อเรียก	สูตร	สัญลักษณ์
Nusselt Number	$\frac{hD}{k}$	Nu
Reynolds Number	$\frac{\rho v D}{\mu}$	Re
Prandtl Number	$\frac{C_p \mu}{k}$	Pr
Grashof Number	$\frac{g D^3 \rho^2 \beta \Delta T}{\mu^2}$	Gr

เนื่องจากกลุ่มไร้มิติเหล่านี้ไม่มีหน่วย ดังนั้นค่าของมันจะเท่ากันเสมอไม่ว่าจะใช้หน่วยระบบอะไร
 ทราบใดที่ตัวแปรทุกตัวใช้ค่าในระบบหน่วยเดียวกันอย่างถูกต้อง

อนึ่งในกรณีการถ่ายเทความร้อนไม่เกิดการเปลี่ยนวัฏภาคของของไหลสมการความสัมพันธ์ต่อไปนี้
 มักเป็นจริง

$$Nu = C Re^a Pr^b Gr^d \quad \dots(3.17)$$

โดยที่ค่า C, a, b และ d เป็นค่าคงที่ที่ต้องการจากการทดลอง เนื่องจากค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynold Number) เป็นตัวแปรที่บ่งบอกระดับมากน้อยของการผสมในของไหลความเร็วของไหลเฉื่อย ใน
 กรณีการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ จะมีอิทธิพลที่สำคัญมาก แต่ใน
 กรณีของการพาอย่างอิสระ ความเร็วของการไหลจะน้อยมาก ดังนั้นค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์จะหมด
 ความสำคัญไป แต่ค่าแกร์ชอฟนัมเบอร์ (Gr) ซึ่งเป็นผลของการขยายตัวเชิงปริมาตรของของไหล จะ
 กลับมีความสำคัญมากขึ้น โดยสามารถสรุปเป็นความสัมพันธ์กับลักษณะการพาความร้อนได้ดังนี้

การพาความร้อนแบบบังคับ (Force Convection) $Nu = C Re^a Pr^b$ (3.18)

การพาความร้อนแบบอิสระ (Free Convection) $Nu = C Pr^d Gr^e$ (3.19)

โดยค่าพรีนดท์เทิลนัมเบอร์ (Prandtl Number) จะขึ้นอยู่กับประเภทของของไหลเป็นหลัก ซึ่งจะพบว่าค่าพรีนดท์เทิลนัมเบอร์ของก๊าซจะแทบไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดัน แต่ค่าพรีนดท์เทิลนัมเบอร์ของของเหลวจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิก่อนข้างมาก ในกรณีของการไหลแบบปั่นป่วน ถ้าค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เพิ่มขึ้น การผสมจะเกิดขึ้น ดังนั้นความหนาของฟิล์มจะน้อยลง ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเพิ่มสูงขึ้น นั่นคือ ถ้าความเร็วเชิงเส้นหรือค่าความหนาแน่นมีค่าเพิ่มมากขึ้น หรือถ้าค่าความหนืดมีค่าน้อยลง ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น ถ้าเพิ่มเส้นผ่านศูนย์กลางให้มากขึ้น ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นก็จริง แต่ค่านัสเซลนัมเบอร์ (Nu) ก็มีตัวเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ด้วย ซึ่งมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมากกว่า ดังนั้นโดยทั่วไป ถ้าเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่ามากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะมีค่าลดลง

3.1.3 การแผ่รังสีความร้อน (Heat radiation)

การแผ่รังสีความร้อนเป็นปรากฏการณ์คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเหมือนกับรังสีแสงความเร็วของรังสีในสุญญากาศคือ 300,000 km/s แต่สิ่งที่แตกต่างกันคือ ความยาวคลื่นของรังสีความร้อนและของรังสีแสง สรุปแล้วการแผ่รังสีความร้อนแตกต่างกับการนำความร้อนและการพาความร้อนในแง่ที่ว่า การแผ่รังสีความร้อนไม่ต้องอาศัยวัสดุตัวกลาง แต่เกิดขึ้นโดยการแผ่กระจายและการดูดกลืนรังสีความร้อน

ของแข็งที่มีอุณหภูมิสูงจะแผ่กระจายรังสีความร้อนที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่สั้นมากๆ จนถึงยาวมากๆ และความเข้มของรังสีความร้อนก็มีค่าแตกต่างกันมาก ขึ้นกับความยาวคลื่นนั้นๆ วัตถุที่เรียกว่าวัตถุดำสมบูรณ์ คือวัตถุในอุดมคติที่ดูดกลืนรังสีความร้อนทุกความยาวคลื่นทั้งหมด โดยไม่มีการสะท้อนกลับเลย อัตราการถ่ายเทความร้อน โดยการแผ่รังสีสามารถคำนวณได้ตามสมการซึ่งเรียกว่า Stefan-Boltzman law

$$q = A\sigma T_s^4 \quad \dots(3.20)$$

แต่ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ส่งออกมาจากพื้นผิวที่แท้จริงจะมีค่าน้อยกว่านี้ และเป็นไปตามสมการ

$$q = A\varepsilon\sigma T_s^4 \quad \dots(3.21)$$

โดยที่ ε คือคุณสมบัติของการแผ่รังสีความร้อนตัวหนึ่งซึ่งมีชื่อเรียกว่า Emissivity เป็นตัวบอกประสิทธิภาพในการแผ่รังสีความร้อนของพื้นผิวโดยเปรียบเทียบกับวัตถุดำ

สมการที่ 3.21 นั้นใช้สำหรับหาอัตราการแผ่รังสีความร้อนโดยพื้นผิวหนึ่งๆ เท่านั้น การหาอัตราการแผ่รังสีความร้อนสุทธิระหว่างพื้นผิวต่างๆ นั้นเป็นเรื่องที่ซับซ้อนกว่ามาก อย่างไรก็ตามก็กรณีพิเศษที่พบบ่อยในทางปฏิบัตินั้นมักเกี่ยวกับอัตราการแลกเปลี่ยนสุทธิระหว่างพื้นผิวเล็กๆ กับพื้นผิวขนาดใหญ่กว่ามากซึ่งครอบคลุมพื้นที่ผิวเล็กๆ ทั่วหมด ถ้าสมมุติว่าพื้นผิวและสิ่งแวดล้อมนั้นแยกกันโดยก๊าซซึ่งไม่มีผลต่อการแผ่รังสีความร้อน อัตราการส่งถ่ายรังสีความร้อนสุทธิระหว่างพื้นผิวและสิ่งแวดล้อมสามารถคำนวณได้จาก

$$q = A\varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{sur}^4) \quad \dots(3.22)$$

3.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น (Double Pipe Heat exchanger)

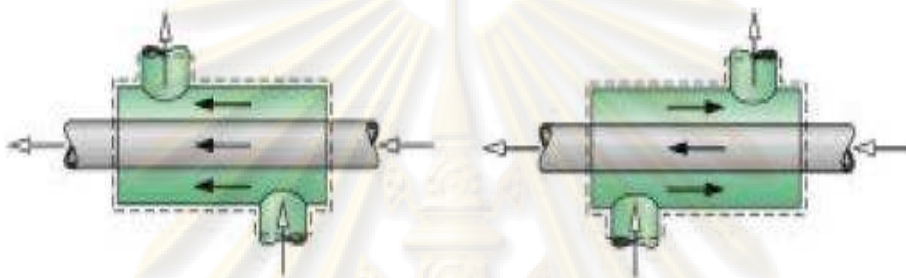
โครงสร้างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น (Double Pipe Heat Exchanger) ประกอบด้วยท่อ 2 ขนาดที่ซ้อนกันอยู่ (Holman, 2002) โดยมีแกนกลางของท่อร่วมกัน ของไหลชนิดหนึ่งจะไหลอยู่ภายในท่อ ส่วนของไหลอีกชนิดหนึ่งจะไหลอยู่ในช่องว่างรูปวงแหวนระหว่างท่อในและท่อนอก โดยทั่วไปปลายข้างหนึ่งจะถูกเชื่อมด้วยท่อโค้งรูปตัวยู (U Bend)



รูปที่ 3.1 แสดงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น

ลักษณะเด่นของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นนี้ คือ โครงสร้างค่อนข้างง่าย ราคาของเครื่องต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ถ่ายเทความร้อนมีราคาถูก และเมื่อมีความจำเป็นต้องใช้พื้นที่การถ่ายเทความร้อนมากก็สามารถนำมาต่อกันแบบอนุกรม (Series) หรือแบบขนาน (Parallel) ทำให้ได้พื้นที่ในการแลกเปลี่ยนมากขึ้น

ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น จะมี 2 ระบบคือ แบบไหลสวนทาง (Counter flow) และแบบไหลขนาน (Parallel flow) ถ้าพิจารณาการรวมค่าความต้านทานโดยอยู่บนฐานการอ้างอิงของพื้นผิวภายนอกของท่อชั้นในดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นแบบไหลทางเดียวและสวนทางกัน

โดยสมการทั่วไปของการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นซึ่งมีทั้งส่วนพาความร้อน (Convection) และการนำความร้อน (Conduction) มีสมการเป็นดังสมการที่ 3.23 ส่วน ในเทอมของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U_o) จะได้ดังสมการที่ 3.24

$$q = \frac{T_h - T_c}{\frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(D_o / D_i)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_o A_o}} \quad \dots(3.23)$$

$$U_i = \frac{T_h - T_c}{\frac{A_o}{h_i A_i} + \frac{A_o \ln(D_o / D_i)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_o}} \quad \dots(3.24)$$

โดยที่ D_o เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางกลางภายนอกของท่อชั้นใน

D_i เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางกลางภายในของท่อชั้นใน

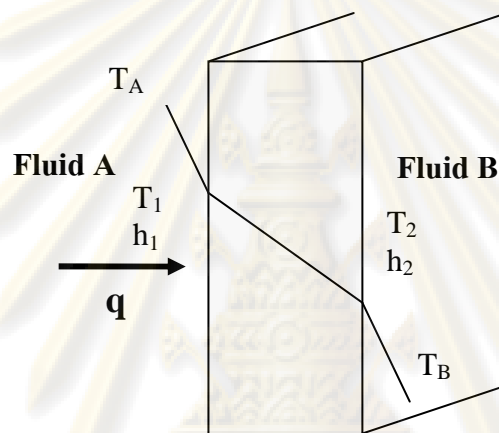
h_i ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของท่อใน

h_o ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของท่อนอก

k ค่าการนำความร้อนของท่อ

3.3 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall heat transfer coefficient)

เมื่อความร้อนไหลผ่านตัวกลางนำความร้อนซึ่งอธิบายได้ดังสมการที่ 3.25



รูปที่ 3.3 แสดงการถ่ายโอนความร้อนผ่านแผ่นตัวนำความร้อน

$$q = \frac{T_A - T_B}{1/h_1 A + \Delta x/kA + 1/h_2 A} \quad \dots(3.25)$$

เมื่อ T_A และ T_B คืออุณหภูมิของของไหลของแต่ละพื้นผิวของตัวนำความร้อน โดยสามารถหาสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวมได้ดังสมการที่ 3.26

$$q = UA\Delta T_{Overall} \quad \dots(3.26)$$

ดังนั้นเมื่อต้องการหาสมการการถ่ายโอนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น โดยมีของไหลไหลในท่อในและท่อนอก เมื่อตัวห้อย i และ o คือภายในและภายนอกของท่อใน ตามลำดับ ดังนั้น สมการหาประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนรวม (Overall heat transfer

coefficient) ภายในและภายนอกซึ่งแสดงไว้ในรูปของพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในและภายนอกได้ดังสมการ ที่ 3.27, 3.28 ตามลำดับ

$$U_i = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{A_i \ln(r_o / r_i)}{2\pi kL} + \frac{A_i}{A_o h_o}} \quad \dots(3.27)$$

$$U_o = \frac{1}{\frac{A_o}{A_i h_i} + \frac{A_o \ln(r_o / r_i)}{2\pi kL} + \frac{1}{h_o}} \quad \dots(3.28)$$

ถึงแม้จะมีสมการการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวมเพื่อง่ายและสะดวกต่อการหาก็ได้มีการหาสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวมแสดงดังในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แสดงค่าประมาณสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวมของวัสดุชนิดต่างๆ (Holman, 2002)

Physical situation	Overall heat transfer coefficient (U)	
	Btu/h.ft ² .oF	W/m ² .C
Frame exterior wall, plastic interior, annulated with rock-wood insulation	0.25	1.42
	0.07	0.4
Plate-glass window	1.10	6.2
Double plate-glass window	0.40	2.3
Stream condenser	200-1000	1100-5600
Feed water heater	200-1500	1100-8500
Freon-12 condenser with water coolant	50-150	280-850
Water-to-water heat exchanger	150-300	850-1700
Finned-tube heat exchanger, water in tubes, air across tubes	5-10	25-55

Physical situation	Overall heat transfer coefficient (U)	
	Btu/h.ft ² .oF	W/m ² .C
Water-to-oil heat exchanger	20-60	110-350
Stream to light fuel oil	30-60	170-340
Stream to heavy fuel oil	10-30	56-170
Stream to kerosene or gasoline	50-200	280-1140
Finned-tube heat exchanger, stream in tubes, air over tubes	5-50	28-280
Ammonia condenser, water in tubes	150-250	850-1400
Alcohol condenser, water in tubes	45-120	255-680
Gas-to-gas heat exchanger	2-8	10-40

3.4 การคำนวณหาประสิทธิภาพและการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

การคำนวณหาประสิทธิภาพและการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีวิธีอยู่หลายวิธี แต่วิธีที่ใช้กันมากที่สุดมีอยู่ 2 วิธีคือ วิธีหาอุณหภูมิเฉลี่ยแบบล็อกการิทึม (LMTD) และวิธีหาประสิทธิภาพโดยวิธี NTU (Effectiveness NTU)

3.4.1 อุณหภูมิเฉลี่ยแบบล็อกการิทึม (Log mean temperature Difference ; LMTD)

เป็นวิธีที่ใช้เพื่อหาพื้นที่ที่จำเป็นในการแลกเปลี่ยนความร้อนของ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อต้องการให้ได้อุณหภูมิตามต้องการ จึงจำเป็นต้องมีข้อมูลอุณหภูมิของสายร้อนและสายเย็น ทั้งขาเข้าและขาออกทั้งสองสาย โดยสำหรับ ท่อสองชั้น (Double Pipe) ดังสมการที่ 3.29, 3.30, 3.31 และ 3.32

$$Q = UA\Delta T_{LMTD} \quad \dots(3.29)$$

$$Q = m_h c_h (T_{h,i} - T_{h,o}) = m_c c_c (T_{c,o} - T_{c,i}) \quad \dots(3.30)$$

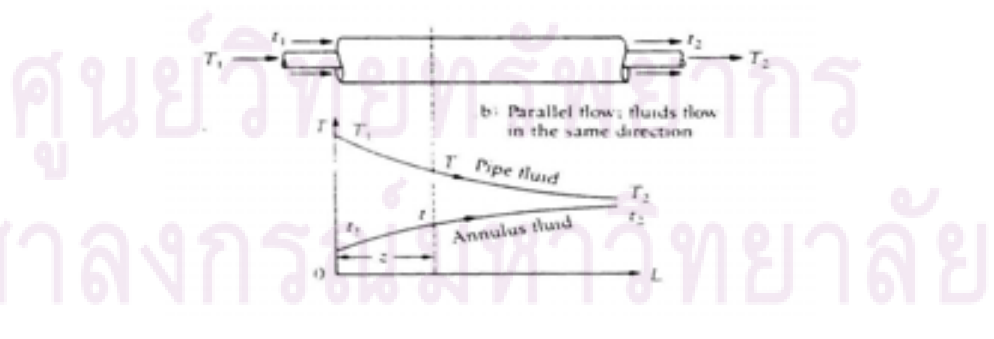
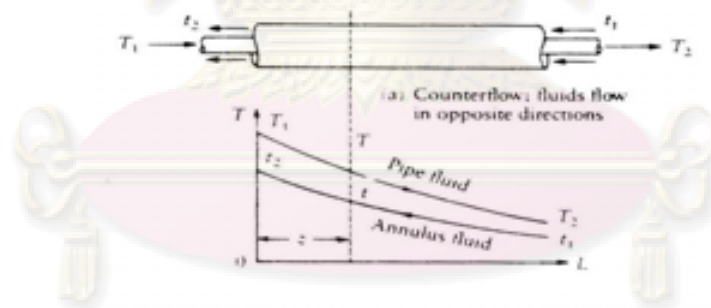
$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_{h,i} - T_{c,i}) - (T_{h,o} - T_{c,o})}{\ln\left(\frac{T_{h,i} - T_{c,i}}{T_{h,o} - T_{c,o}}\right)} \quad \dots(3.31)$$

สำหรับการไหลแบบทางเดียว (Co-Current Flow)

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_{h,i} - T_{c,i}) - (T_{h,o} - T_{c,o})}{\ln\left(\frac{T_{h,i} - T_{c,i}}{T_{h,o} - T_{c,o}}\right)} \quad \dots(3.32)$$

สำหรับการไหลแบบสวนทาง (Counter-Current Flow)

ซึ่งอุณหภูมิของของไหลในท่อและนอกท่อจะเปลี่ยนแปลงตามระยะทางของท่อ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 รูปแบบการไหลใน Double Pipe เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

(a) แบบไหลสวนทาง (counter flow) (b) แบบไหลขนาน (parallel flow)

3.4.2 วิธีหาประสิทธิภาพโดยวิธี NTU (Effectiveness NTU)

เป็นการหาค่าการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) ของ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน อีกวิธีหนึ่งซึ่งเป็นวิธีที่นิยมมากกว่าวิธีหา LMTD ของอุณหภูมิ เนื่องจากสามารถคำนวณหาประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ได้ โดยไม่จำเป็นต้องรู้อุณหภูมิขาออกของสารสายเย็น ค่าประสิทธิภาพนิยามโดย

Effectiveness = ε = ค่าการถ่ายเทความร้อนจริง (actual heat transfer) / ค่าการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด (maximum possible heat transfer)

$$\text{หรือ} \quad \varepsilon = \frac{Q}{Q_{\max}} \quad \dots(3.33)$$

โดย ค่าความร้อนที่เกิดจากแลกเปลี่ยนสามารถคำนวณได้ดังนี้

การไหลแบบขนาน (Parallel flow)

$$Q \text{ (Actual heat transfer rate)} = \dot{m}_h c_h (T_{h,in} - T_{h,out}) = \dot{m}_c c_c (T_{c,out} - T_{c,in}) \quad \dots(3.34)$$

การไหลแบบสวนทาง (Counter flow)

$$Q \text{ (Actual heat transfer rate)} = \dot{m}_h c_h (T_{h,in} - T_{h,out}) = \dot{m}_c c_c (T_{c,out} - T_{c,in}) \quad \dots(3.35)$$

เมื่อค่า C_c และ C_h คือค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Heat capacity) ของสายร้อนและสายเย็นตามลำดับ

การหาความร้อนมากที่สุดสามารถหาได้ดังสมการข้างล่างนี้

$$Q_{\max} \text{ (Maximum possible heat transfer rate)} = (\dot{m} \cdot c)_{\min} (T_{h,in} - T_{c,in}) \quad \dots(3.36)$$

จากค่า Exchanger Heat transfer Effectiveness จะได้

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{\max}} = \frac{C_c (T_{c,out} - T_{c,in})}{C_{\min} (T_{h,in} - T_{c,in})} = \frac{C_h (T_{h,in} - T_{h,out})}{C_{\min} (T_{h,in} - T_{c,in})} \quad \dots(3.37)$$

$$Q = \varepsilon C_{\min} (T_{h,in} - T_{c,in}) \quad \dots(3.38)$$

ซึ่งค่า ε จะขึ้นกับค่า C_{\min}/C_{\max} และการจัดเรียงสายการไหลแลกเปลี่ยนความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

3.5 วัสดุสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ในการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน สิ่งที่จะต้องคำนึงถึงเป็นสิ่งแรกคือการเลือกใช้วัสดุ วัสดุที่เหมาะสมที่สุดสำหรับความดันอุณหภูมิ ตลอดจนคุณสมบัติเชิงกายภาพ และคุณสมบัติเชิงเคมีของของไหลที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อน

ในทำนองเดียวกันกับวัสดุที่ใช้สร้างอุปกรณ์เคมีอื่นๆ เราสามารถแบ่งวัสดุที่ใช้สร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอย่างกว้างๆ เป็นวัสดุประเภทโลหะ และวัสดุประเภทอโลหะ นอกจากนี้วัสดุประเภทโลหะยังแบ่งออกเป็นวัสดุเหล็ก และวัสดุประเภทไม่ใช่เหล็ก ซึ่งจะเล็งการอธิบายถึงวัสดุทั่วไป แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะวัสดุที่ใช้สร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และคุณสมบัติของวัสดุเหล่านี้ ซึ่งก็คือเหล็กไร้สนิม (Stainless steel)

3.5.1 แสตนเลสตีล (Stainless steel)

แบ่งได้ดังนี้

1. Martensitic Stainless steel

ตัวอย่างของ Martensitic Stainless steel คือเหล็กเหนียว 13% Cr เหล็กเหนียวชนิดนี้มีคุณสมบัติทนกัดกร่อนของกำมะถัน Sulphurous Acid Gas ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และ Naphthenic Acid โคโรสสร้างแบบ Martensitic มีคุณสมบัติแข็งตัวได้เอง เนื่องจาก Heat treatment ดังนั้นจึงเกิดแรงเค้นของการแปรสภาพ และแตกร้าวได้ง่าย เนื่องจากผลกระทบจากความร้อนที่ได้รับในเวลาเชื่อมโดยทั่วไปต้องอุ่นให้ร้อน 200-400 °C และทำ Heat treatment ที่ 700-800 °C ทันทีหลังการเชื่อม

2. Ferritic Stainless Steel

เหล็กเหนียวชนิดนี้มี Cr มากกว่า 15% และมีคุณสมบัติทนการกัดกร่อนของกรดที่มีคุณสมบัติออกซิไดซ์ได้อย่างดีเลิศ เนื่องจากโดยทั่วไปเป็นโครงสร้างแบบ Ferrite จึงไม่มีคุณสมบัติแข็งตัวได้เองเนื่องจากการเชื่อมหรือ Quenching แต่ความเหนียวจะมีน้อยที่อุณหภูมิต่ำ และแข็งเปราะและแตกร้าวได้ง่ายถ้าเชื่อมแผ่นหนา ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอุ่นให้ร้อน 70-100 °C ในเวลาเชื่อม นอกจากนี้ยังต้องระวังคุณสมบัติแข็งเปราะที่ 475 °C เป็นพิเศษด้วย ถ้าเติม 0.1-0.3% Al เข้าใน 13Cr โครงสร้างจะกลายเป็นแบบ Ferrite ดังนั้นคุณสมบัติแข็งตัวได้เองในเวลาเชื่อมจึงหมดไป และคุณสมบัติแข็งเปราะที่ 475 °C ก็น้อยลงเพราะปริมาณ Cr มีน้อย จึงใช้จนถึง 550 °C สำหรับโครงสร้างที่เชื่อมได้

3. Austenitic Stainless Steel

เหล็กเหนียวไร้สนิมชนิดนี้มี 18Cr-18Ni เป็นตัวแทน และมีโครงสร้างแบบ Austenite ที่มีเสถียรภาพสูง เนื่องจากมีคุณสมบัติทนการกัดกร่อนได้ดีเลิศ จึงนิยมใช้กันกว้างขวางที่มากที่สุด ตามมาตรฐาน JIS มีรายละเอียดระบุสำหรับแผ่นเหล็กเหนียว ท่อนเหล็กเหนียว แบนด์เหล็กเหนียว และท่อเหล็กเหนียวโลหะผสมสำหรับหม้อไอน้ำและเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

4. เหล็กเหนียวสำหรับอุณหภูมิต่ำ

4.1 เหล็กเหนียว Ni ต่ำ เหล็กเหนียว 2.5% Ni, 3.5% Ni, 9% Ni เป็นต้น สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิจนถึง -50 ถึง -196 °C เหล็กเหนียว Ni ต่ำเหล่านี้มีรายละเอียดระบุไว้เป็นวัสดุเหล็กเหนียวอุณหภูมิต่ำ โดย ASTM

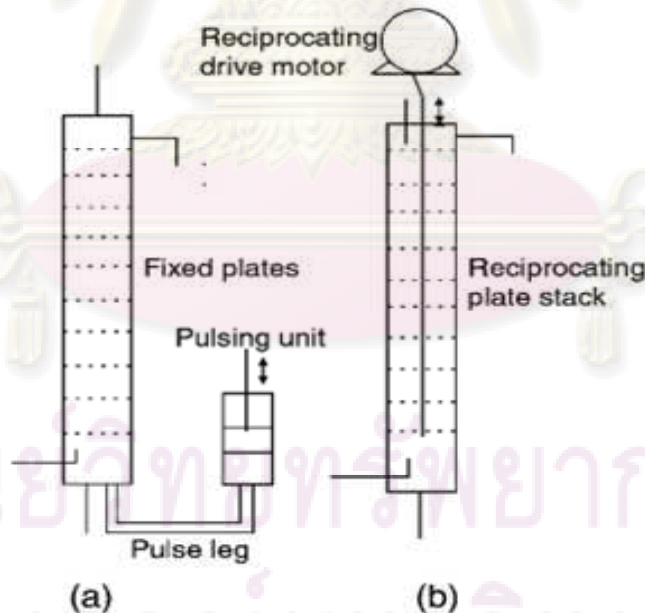
4.2 Austenitic Stainless Steel Sus 27, SUS 28 สามารถใช้ได้กับของอุณหภูมิต่ำจนถึง -273 °C เนื่องจาก Austenitic Stainless Steel มีโครงสร้างผลึกแบบ Face-centered Cubical Lattices จึงไม่เกิดการแข็งเปราะที่อุณหภูมิต่ำ แต่ถ้าโครงสร้าง Austenitic ไม่มีเสถียรภาพ Austenitic Stainless Steel จะเกิดการแยกตัวได้ง่าย หรือมีโครงสร้าง Ferrite ผสมอยู่ด้วย โครงสร้าง Austenite ที่ Meta-Stable (กึ่งเสถียรภาพ) เพราะมีการแปรรูปเป็นมาก จะเกิดการแข็งเปราะที่อุณหภูมิต่ำได้ง่าย นอกจากนี้ โครงสร้างนี้ยังก่อให้เกิดการแยกตัวของซิกม่าเฟส และการแยกตัวของสารประกอบคาร์ไบด์ที่ผิวร่วมของเม็ดผลึก เป็นต้นได้ง่าย ซึ่งเป็นสิ่งที่มิพึงปรารถนาอย่างยิ่ง

3.6 การไหลแบบสลับไปมา (Oscillation Flow)

เป็นกระบวนการที่ใช้เพิ่มประสิทธิภาพในการผสมสารให้เข้ากันได้ดียิ่งขึ้น ขณะที่ไหลของสาร 2 ชนิดผ่านซึ่งกันและกัน เมื่อเกิดการผสมสารเข้ากันได้ดีจะทำให้เกิดการถ่ายโอนระหว่างมวลและความร้อนได้ดียิ่งขึ้น โดยมีจุดเริ่มต้นในราวๆ ปี ค.ศ. 1940 – 1950 (Ni et al. 2003) อุตสาหกรรมที่มีความต้องการสกัดสารตัวหนึ่งออกจาก Plate or packed column เป็นจำนวนมาก ดังนั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัด จึงมีการคิดค้นหาวิธีใหม่ๆ มาช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพ นั่นก็คือการทำให้ของไหลสั่น (Oscillation Flow) โดยมี 2 วิธีดังนี้ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.5-ก และ 3.5-ข

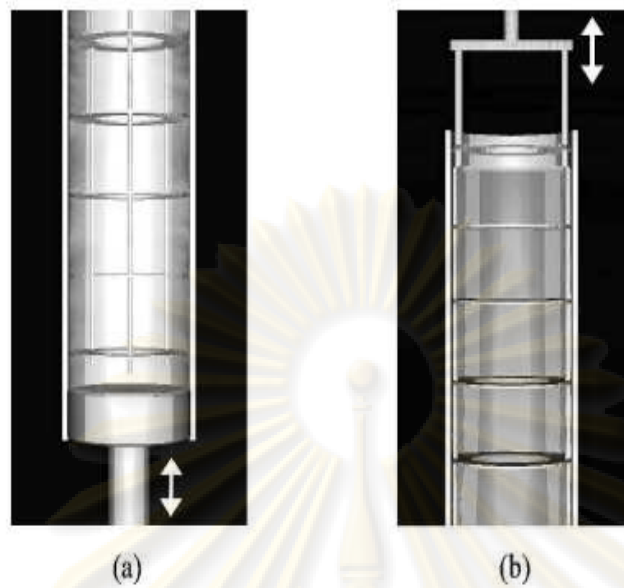
1 Pulsing the contents of the column คือ การทำให้ของเหลวในคอลัมน์สั่น โดยการอาจมีการใช้ปั๊มสูบเข้า - ออก ขณะมีการไหลผ่านของสารในคอลัมน์

2 Reciprocating plate column (RPC) คือ การทำให้แผ่นบัฟเฟิล (baffled plate) ที่ติดอยู่ในคอลัมน์สั่นขึ้นลง โดยผลของมันก็จะไปส่งผลทำให้ของเหลวระหว่างแผ่นบัฟเฟิล (Baffled plate) สั่นด้วย



รูปที่ 3.5-ก แสดงประเภทของการไหลแบบสลับ

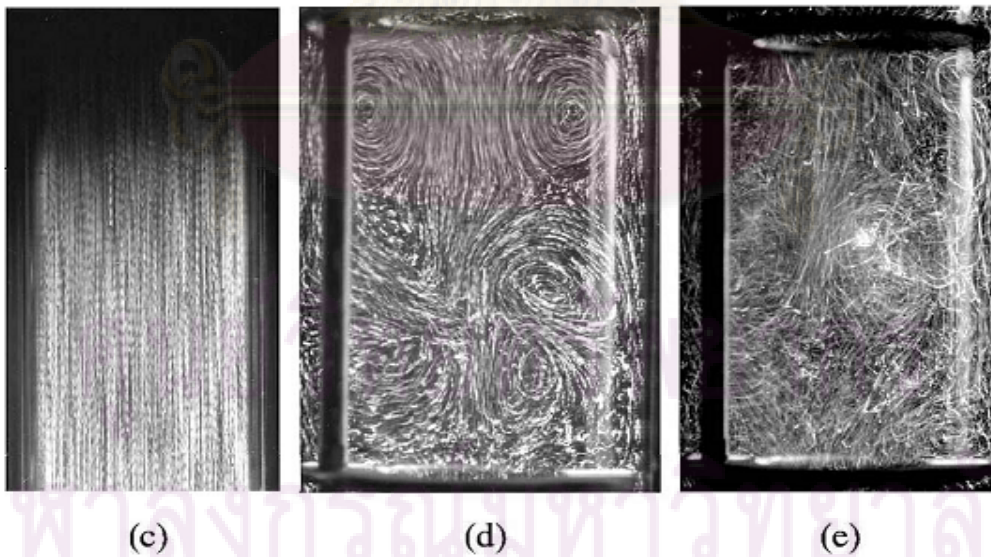
(a) Pulsing the contents of the column (b) Reciprocating plate column (RPC)



รูปที่ 3.5-ข แสดงประเภทของการไหลแบบสลับ

(a) Pulsing the contents of the column (b) Reciprocating plate column (RPC)

การไหลแบบสลับไปมาชนิดมีบัพเฟิลทั้งสองรูปแบบซึ่งอาศัยหลักการคือทำให้ของเหลวมีการผสมกันมากยิ่งขึ้นซึ่งทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทระหว่างความร้อนและมวลได้เป็นอย่างดี ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงการไหลแบบสั้นของของไหลภายในท่อ

(c) การไหลแบบไม่มีบัพเฟิล (d) และ (e) การไหลแบบสั้นภายในท่อชนิดมีบัพเฟิล

3.6.1 การนำไปใช้ประยุกต์ใช้ (Technical Overview)

สามารถนำไปใช้ในกระบวนการต่างๆ ได้หลายอย่างด้วยกัน เช่น

1. กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat transfer)
2. ถึงปฏิกรณ์แบบท่อไหล (Plug flow)
3. กระบวนการถ่ายโอนระหว่างมวล (Mass transfer)
4. การกระจายตัวของของแข็ง (Solid suspension)
5. กระบวนการโพลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization)
6. กระบวนการตกผลึก (Crystallization)
7. กระบวนการไฮโดรจิเนชัน (Hydrogenation)

ซึ่งการทำให้ของไหลสั่น (Oscillatory Flow) จะช่วยให้เกิดถ่ายโอนระหว่างมวล (Mass transfer) และความร้อน (Heat transfer) ได้ดียิ่งขึ้น และทำให้ของไหลอยู่ในคอลัมน์ได้นานยิ่งขึ้น เหมาะสำหรับในกระบวนการที่ของไหลไหลแบบ ลามินา (Laminar flow) หรือไหลแบบช้าๆ แต่ต้องการให้เกิดการปั่นป่วนเกิดขึ้น เพื่อให้เกิดการผสมของของไหล (Mixing) ได้ดียิ่งขึ้น โดยนิยมใช้แบบ Reciprocating plate column (RPC) มากกว่า Pulsing the contents of the column เพราะสามารถใช้ขนาดแอมพลิจูดได้มากกว่า

3.6.2 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการไหลของของไหลในรูปของเทอมไร้หน่วย

การถ่ายเทความร้อนแบบการสั่นสลับแบบมีบัฟเฟิล (Reciprocating plate column; RPC) มีตัวแปรหลายอย่างประกอบด้วยกัน (Mackley and Stonestreet, 1995) โดยการหาลักษณะการของของไหลแบบสั่นสลับไปมา สามารถหาสมการของตัวแปรไร้หน่วย ซึ่งประกอบสามตัวแปรด้วยกัน ในส่วนของตัวแปรไร้หน่วยแรกเป็นการหาค่าตัวแปรไร้หน่วยที่เกิดจากการสั่น ซึ่งมีค่าแอมพลิจูดและความถี่เข้ามาเกี่ยวข้อง คือ Re_o (Oscillatory Reynolds number) หรือ (Peak Reynolds number) ซึ่งมีสมการเป็นดังนี้

$$\text{Re}_o = \frac{2\pi f x_o D}{\nu} \quad \dots(3.39)$$

โดย x_o คือ ค่าแอมพลิจูด (Amplitude) จากระยะศูนย์กลางถึงระยะไกลที่สุด (Centre-to-peak)

f คือ ความถี่ของการสั่น (Frequency of oscillation)

D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ (Diameter)

ν คือ ค่า (Kinematic viscosity)

ส่วนที่สองเป็นส่วนตัวแปรไร้มิติที่เกี่ยวข้องกับการไหลของของไหลคือค่า Re_n (Net flow Reynolds number in the tube) โดยค่านี้จะขึ้นอยู่กับความเร็วของของไหล มีสมการเป็น ดังนี้

$$\text{Re}_n = \frac{UD}{\nu} \quad \dots(3.40)$$

เมื่อ U คือ ค่าเฉลี่ยความเร็วของการไหล (Average velocity)

โดยในส่วนที่สามคือ ตัวแปร Sr (Strouhal number) ซึ่งแปรผกผันกับค่า แอมพลิจูด ซึ่งมีสมการเป็น ดังสมการที่ 3.41

$$Sr = \frac{D}{4\pi x_o} \quad \dots(3.41)$$

3.7 สมการการถ่ายเทความร้อน (Equation of Heat transfer)

ประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนสามารถหาได้โดยการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในท่อ (Heat transfer coefficient in tube) ซึ่งสามารถหาได้ในรูปของตัวแปรไร้มิติ (Mackley and Stonestreet, 1995) คือ ค่านัทเชลล์นัมเบอร์ (Nusselt number; Nu) ดังสมการที่ 3.42

$$Nu_i = \frac{h_i D}{k} \quad \dots(3.42)$$

เมื่อ D คือ ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางภายในท่อ (Tube inner diameter)

k คือ ค่าการนำความร้อนของของไหล (Thermal conductivity of the fluid)

h_i คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในท่อ (Tube side heat transfer coefficient)

ดังนั้นสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวม (Overall Heat Transfer Coefficient; U_o) ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น (Shell and Tube) มีสามการเป็นดังนี้

$$\frac{1}{U_o A_o} = \frac{1}{h_o A_o} + \frac{\ln(D_o / D_i)}{2\pi kL} + \frac{1}{h_i A_i} \quad \dots(3.43)$$

หรือ

$$\frac{1}{U_o} = \frac{1}{h_i} + \frac{D_i}{D_o h_o} + \frac{D_i \ln(D_o / D_i)}{2k_{ss}} \quad \dots(3.44)$$

เมื่อ U_o คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวม (Overall heat transfer coefficient)

k_{ss} คือ ค่าการนำความร้อนของท่อ (Stainless steel)

D_o คือ เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของท่อด้านใน (Inner Diameter)

D_o คือ เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของท่อด้านนอก (Outer Diameter)

h_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของท่อด้านใน

h_o คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของท่อด้านนอก

โดยค่า U_o มีสมการสัมพันธ์กับสมการการถ่ายเทความร้อน ดังสมการต่อไปนี้

$$Q = AU_o \Delta T_{lm} = Q_{water} = m' C_p \Delta T \quad \dots(3.45)$$

เมื่อ ΔT_{lm} คือ อุณหภูมิเฉลี่ยแบบลอการิทึม (Log mean temperature difference)

ΔT คือค่าผลต่างของอุณหภูมิของไหลสายร้อน

m' คืออัตราการไหลเชิงมวล (กิโลกรัมต่อวินาที)

A คือพื้นที่ทั้งหมดของการแลกเปลี่ยนความร้อน

โดยอุณหภูมิเฉลี่ยแบบลอการิทึมที่มีสมการเป็นดังนี้ (LMTD) มีดังสมการที่ 3.46

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln[\Delta T_2 / \Delta T_1]} = \frac{(T_{h,out} - T_{c,in}) - (T_{h,in} - T_{c,out})}{\ln[(T_{h,out} - T_{c,in}) / (T_{h,in} - T_{c,out})]} \quad \dots(3.46)$$

เมื่อ $T_{h,in}$ และ $T_{h,out}$ คือ ค่าอุณหภูมิของน้ำร้อนขาเข้าและขาออก

$T_{c,in}$ และ $T_{c,out}$ คือ ค่าของอุณหภูมิของน้ำเย็นขาเข้าและขาออกตามลำดับ

จากนั้นเมื่อแทนสมการที่ได้จากที่ผ่านมามาทั้งหมด สามารถหาสมการของ U_o ได้ดังสมการข้างล่างต่อไปนี้

$$U_o = \frac{m' C_p \Delta T_{hot}}{A} \frac{\ln[(T_{h,out} - T_{c,in}) / (T_{h,in} - T_{c,out})]}{(\Delta T_{hot} + \Delta T_{cool})} \quad \dots(3.47)$$

แล้วนำสมการ U_o ที่ได้จากข้างบน ไปแทนในสมการที่ 3.42 เพื่อหาค่า Nu_t ได้ดังสมการดังนี้

$$\frac{1}{Nu_t} = \frac{k_{water}}{D} \left[\frac{1}{U_o} - \frac{D_i}{D_o h_s} - \frac{D_i \ln(D_o / D_i)}{2k_{ss}} \right] \quad \dots(3.48)$$

นำค่า นัทเชลล์นัมเบอร์ (Nu_t) แบบการสั่นแบบสลับไปมาที่ได้โดยนำมาเปรียบเทียบกับค่า นัทเชลล์นัมเบอร์ (Nu_t) แบบท่อสองชั้น ไม่มีการสั่นและไม่มีแผ่นบัฟเฟิลซึ่งมีความสัมพันธ์เปลี่ยนแปลงตามค่า $Re = \rho v D / \mu$ ดังสมการต่อไปนี้

เมื่อค่า $Re < 2,100$ ซึ่งเป็นช่วงการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) ของ Key and Nedderman ในปี 1985 ซึ่งมีสมการเป็นดังนี้ (Mackley and Stonestreet., 1995)

(Key and Nedderman, 1985) ซึ่งมีสมการเป็นดังนี้

$$Nu_t = 1.86 [Re Pr (D/Z)]^{1/3} (\mu / \mu_w)^{0.14} \quad \dots(3.49)$$

ค่า $2,100 < Re < 10,000$ ซึ่งอยู่ในช่วงทรานซิชัน (Transition) ดังสมการของ Levenspiel ในปี 1984 (Levenspiel, 1984) ซึ่งมีสมการเป็นดังนี้

$$Nu_t = 0.116[\text{Re}-125](\text{Pr})^{\frac{1}{3}} + \left[1 + (D/Z)^{\frac{2}{3}}\right](\mu/\mu_w) \quad \dots(3.50)$$

และเมื่อค่า $\text{Re} > 10,000$ เป็นช่วงการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent) สมการของ Holman ในปี 1976 (Holman, 1976) ซึ่งมีสมการเป็นดังนี้

$$Nu_t = 0.023(\text{Re})^{0.8} (\text{Pr})^{\frac{1}{3}} (\mu/\mu_w) \quad \dots(3.51)$$



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์

4.1 ความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้หน่วย

โดยลักษณะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นชนิดมีบัฟเฟิลสลับไปมา ซึ่งมีลักษณะเหมือนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นแต่จะแตกต่างกันที่ภายในท่อชั้นในมีแผ่นบัฟเฟิลเรียงซ้อนกันซึ่งมีแกนกลางยึดเพื่อทำหน้าที่ในการสลับแบบสลับไปมาโดยมีลักษณะของแผ่นบัฟเฟิลดังรูปที่ 4.1 ซึ่งมีตัวแปรที่สำคัญดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะของแผ่นบัฟเฟิล

ด้านในท่อ มีตัวแปรไร้หน่วยที่สำคัญดังต่อไปนี้

α คือ อัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของแผ่นบัฟเฟิลเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ

$$\alpha = \frac{d_o}{D_i} \quad \dots(4.1)$$

β คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นบัพเฟิลเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ

$$\beta = \frac{S}{D_i} \quad \dots(4.2)$$

Re_h คือค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของของไหลสายร้อน (Hot flow Reynolds Number)

$$Re_h = \frac{\rho_i v_i D_i}{\mu_i} \quad \dots(4.3)$$

Re_{osc} คือ ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของการสั่นของแผ่นบัพเฟิล (Oscillatory flow Reynolds Number)

$$Re_{osc} = \frac{\rho_i 2\pi f x_o D_i}{\mu_i} \quad \dots(4.4)$$

Pr_i คือค่าพรันด์เทิลนัมเบอร์ด้านในท่อ (Prandlt number)

$$Pr_i = \frac{Cp_i \mu_i}{k_i} \quad \dots(4.5)$$

Nu_i คือค่านัทเชลล์นัมเบอร์ด้านในท่อ (Nusselt Number)

$$Nu_i = \frac{h_i D_i}{k_i} \quad \dots(4.6)$$

ด้านนอกท่อ มีส่วนของตัวแปรไร้มิติที่สำคัญดังต่อไปนี้

Re_c คือค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของของไหลสายเย็น (Cool flow Reynolds Number)

$$Re_c = \frac{\rho_o v_o D_o}{\mu_o} \quad \dots(4.7)$$

Pr_o คือค่าพรันด์เทิลนัมเบอร์ด้านนอกท่อหรือในเซลล์ (Prandlt number)

$$Pr_o = \frac{Cp_o \mu_o}{k_o} \quad \dots(4.8)$$

Nu_o คือค่านัทเชลล์นัมเบอร์ด้านนอกท่อ (Nusselt Number)

$$Nu_o = \frac{h_o D_h}{k_o} \quad \dots(4.9)$$

D_h คือระยะทางของท่อด้านนอก

$$D_h = \frac{4V_{wet}}{A_{wet}} = \frac{\pi(D_s^2 - D_i^2)L}{\pi(D_s + D_i)L} \quad \dots(4.10)$$

4.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

เพื่อนำไปสู่การหาค่าความสัมพันธ์ที่ถูกต้องแม่นยำจึงมีความจำเป็นต้องทำการศึกษาและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ดังนี้

อัตราการถ่ายเทความร้อนของของไหลสายร้อน, น้ำมันพาราฟิน

$$Q_h = m_h C p_h (T_{h,i} - T_{h,o}) \quad \dots(4.11)$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนของของไหลสายเย็น, น้ำ

$$Q_c = m_c C p_c (T_{c,o} - T_{c,i}) \quad \dots(4.12)$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย

$$Q_{av} = \frac{Q_c + Q_h}{2} \quad \dots(4.13)$$

เมื่อจัดรูปให้อยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U_o) จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$Q_{av} = U_o A_o \Delta T_{lm} \quad \dots(4.14)$$

หรือ

$$U_o = \frac{Q_{av}}{A_o \Delta T_{lm}} \quad \dots(4.15)$$

โดยผลต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงลอการิทึม (Log Mean Temperature Difference; LMTD)

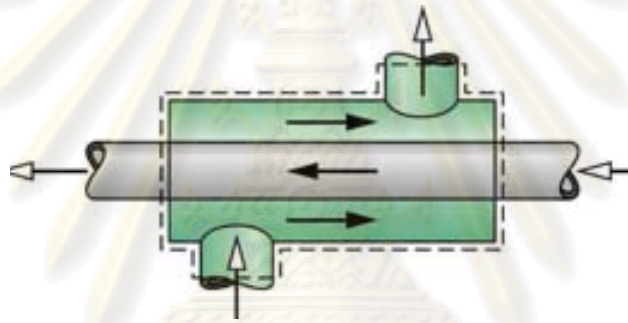
ลักษณะการไหลแบบสวนทางกัน สามารถหาได้จาก

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_a - \Delta T_b}{\ln(\Delta T_a / \Delta T_b)} \quad \dots(4.16)$$

เมื่อ

$$\Delta T_a = T_{h,i} - T_{c,o} \quad \text{และ} \quad \Delta T_b = T_{h,i} - T_{c,o}$$

เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมในรูปของความต้านทานการถ่ายเทความร้อนรวม จะประกอบไปด้วยความต้านทานที่ของผิวด้านนอกท่อ ความต้านทานการนำความร้อนของท่อ และความต้านทานการพาความร้อนของผิวด้านในท่อของทั้งสองชั้นแสดงดังสมการที่ 4.17



รูปที่ 4.2 แสดงการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น

$$\frac{1}{U_o A_o} = \frac{1}{h_o A_o} + \frac{\ln(D_o / D_i)}{2 \pi k L} + \frac{1}{h_i A_i} \quad \dots(4.17)$$

โดยเมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวท่อด้านใน ซึ่งมีสมการเป็นดังนี้

$$h_i = \left(C_1 \text{Re}_h^a \text{Pr}_i^b \left(1 + \frac{(C_2 - \alpha^d)^2}{(C_3 - \beta^e)^2} \right) + C_4 \text{Re}_h^f \text{Re}_{osc}^g \text{Pr}_i^h \frac{(C_5 - \alpha^i)^2}{(C_6 - \beta^j)^2} + C_7 \right) \frac{k_i}{D_i} \quad \dots(4.18)$$

เมื่อ $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, a, b, d, e, f, g, h, i, j$ มีค่าคงที่

เมื่อนำมาแทนในสมการที่ 4.6 จะได้ความสัมพันธ์ของนัทเชลล์นัมเบอร์ด้านในท่อ (Nusselt number) ได้ดังสมการที่ 4.19

$$Nu_i = C_1 \text{Re}_h^a \text{Pr}_i^b \left(1 + \frac{(C_2 - \alpha^d)^2}{(C_3 - \beta^e)^2} \right) + C_4 \text{Re}_h^f \text{Re}_{osc}^g \text{Pr}_i^h \frac{(C_5 - \alpha^i)^2}{(C_6 - \beta^j)^2} + C_7 \quad \dots(4.19)$$

โดยเมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวท่อด้านนอกท่อ ซึ่งมีสมการเป็นดังนี้

$$h_o = C_8 \text{Re}_c^k \text{Pr}_o^l \frac{k_o}{D_h} \quad \dots(4.20)$$

เมื่อ C_8, k, l มีค่าคงที่

เมื่อนำมาแทนในสมการที่ 4.9 จะได้ความสัมพันธ์ของนัทเชลล์นัมเบอร์ (Nusselt number) ได้ดังนี้

$$Nu_o = C_8 \text{Re}_c^k \text{Pr}_o^l \quad \dots(4.21)$$

เมื่อนำสมการที่ 4.7 และสมการที่ 4.20 มาแทนค่าในสมการที่ 4.17 จะได้

$$\frac{1}{U_o A_o} = \frac{1}{C_8 \text{Re}_c^k \text{Pr}_o^l \frac{k_o}{D_h} A_o} + \frac{\ln(D_o / D_i)}{2\pi kL} + \frac{1}{\left(C_1 \text{Re}_h^a \text{Pr}_i^b \left(1 + \frac{(C_2 - \alpha^d)^2}{(C_3 - \beta^e)^2} \right) + C_4 \text{Re}_h^f \text{Re}_{osc}^g \text{Pr}_i^h \frac{(C_5 - \alpha^i)^2}{(C_6 - \beta^j)^2} + C_7 \right) \frac{k_i}{D_i} A_i} \quad \dots(4.22)$$

โดยหาค่า U_o จากการคำนวณได้ดังสมการ

$$U_o = 1 / \left(\frac{1}{C_8 \text{Re}_c^k \text{Pr}_o^l \frac{k_o}{D_h}} + \frac{A_o \ln(D_o / D_i)}{2\pi k L} + \frac{A_o}{\left(C_1 \text{Re}_h^a \text{Pr}_i^b \left(1 + \frac{(C_2 - \alpha^d)^2}{(C_3 - \beta^e)^2} \right) + C_4 \text{Re}_h^f \text{Re}_{osc}^g \text{Pr}_i^h \frac{(C_5 - \alpha^i)^2}{(C_6 - \beta^j)^2} + C_7 \right) \frac{k_i}{D_i} A_i} \right) \quad \dots(4.23)$$

โดยค่า U_o สามารถหาได้จากการทดลอง และหาค่าคงที่ ในสมการที่ $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8, a, b, d, e, f, g, h, i, j, k, l$ เป็นค่าคงที่ที่ต้องอาศัยจากการทดลองในการหา โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Analysis) ซึ่งมีสมการเป็นดังนี้

$$E(C_1, C_2, C_3, C_4, a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k) =$$

$$\min \frac{1}{NP} \sum_{j=0}^{NP} \left[\left(\frac{(U_o)_{j,\text{exp}} - 1 / \left(\frac{1}{C_8 \text{Re}_c^k \text{Pr}_o^l \frac{k_o}{D_h}} + \frac{A_o \ln(D_o / D_i)}{2\pi k L} + \frac{A_o}{\left(C_1 \text{Re}_h^a \text{Pr}_i^b \left(1 + \frac{(C_2 - \alpha^d)^2}{(C_3 - \beta^e)^2} \right) + C_4 \text{Re}_h^f \text{Re}_{osc}^g \text{Pr}_i^h \frac{(C_5 - \alpha^i)^2}{(C_6 - \beta^j)^2} + C_7 \right) \frac{k_i}{D_i} A_i} \right)}{j,\text{cal}} \right)^2 \right] \quad \dots(4.24)$$

ซึ่งผลลัพธ์ของความสัมพันธ์ที่ได้พัฒนาขึ้นนี้ จะแสดงผลที่ได้ในบทที่ 4 โดยความสัมพันธ์ที่พัฒนาขึ้น จะมีความสำคัญต่อการทำนายการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นชนิดมีบัฟเฟิลสันแบบสลับไปมาของการแลกเปลี่ยนของไหลสายร้อนและของไหลสายเย็น ซึ่งจะช่วยในการทำนายการถ่ายเทความร้อนของระบบให้มีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น และใช้ในการคำนวณการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้อีกด้วย

4.3 การตรวจสอบความเหมาะสมของฟังก์ชัน

ในการสร้างสมการความสัมพันธ์เพื่อใช้อธิบายข้อมูลนั้น ในกรณีที่ตัวแปรในสมการมีมากกว่า 2 ตัวแปรขึ้นไป จะต้องใช้หลักการคำนวณทางสถิติ หลักการที่ใช้ในที่นี้คือวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Method) ซึ่งมีหลักการดังนี้

ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง (x_i, y_i) และค่าที่ได้จากการคำนวณจากสมการที่สร้างขึ้น $G(x_i)$ ความแตกต่างที่ได้คือ $y_i - G(x_i)$ เมื่อหาความแตกต่างของทุกๆ จุด ยกกำลังสองทุกค่าเพื่อทำให้เป็นค่าบวก ผลรวมกำลังสองของความแตกต่างของ y_i (จากข้อมูลการทดลอง) กับ $G(x_i)$ (จากการคำนวณจากสมการที่สร้างขึ้น) เรียกว่า ผลรวมกำลังสองของเศษเหลือ (The sum square of the residuals ; SSE)

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - G(x_i))^2 \quad \dots(4.25)$$

ซึ่งถ้าสมการโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นมีความเหมาะสม ค่า SSE ควรมีค่าน้อยที่สุด

ค่าจากการทดลอง y_i เมื่อนำมาหักกับค่าเฉลี่ยของข้อมูลจากการทดลองแล้ว (\bar{y}) ผลรวมกำลังสองของความแตกต่าง y_i และ \bar{y} ทุกค่าเรียกว่า ผลรวมกำลังสองของความถดถอย (The sum of the square of the regression ; SSR)

$$SSR = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad \dots(4.26)$$

สัมประสิทธิ์การกำหนดจะบอกว่าข้อมูลกับสมการโมเดลทางคณิตศาสตร์มีความเหมาะสมสอดคล้องกันหรือไม่ สามารถหาได้จาก

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SSR} \quad \dots(4.27)$$

ค่า R^2 จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ถ้าค่าจากข้อมูลและการคำนวณมีความใกล้เคียงกัน จะได้ค่า R^2 เข้าใกล้ค่า 1 เส้นกราฟที่ได้จะสอดคล้องและเหมาะสมกับข้อมูล โดยทั่วไปควรจะได้ค่า R^2 มากกว่า 0.9

บทที่ 5

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

โดยในบทนี้จะกล่าวถึงการทดลองการแลกเปลี่ยนความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นชนิดมีบัฟเฟิลแบบสลับไปมา โดยศึกษาถึงผลกระทบร่วมของการเคลื่อนที่แบบสลับและการกระตุ้นให้เกิดการปั่นป่วน ทั้งนี้เพื่อลดความหนาของชั้นฟิล์มต้านทานความร้อน โดยการติดตั้งแผ่นบัฟเฟิลแบบรูกวางภายในท่อเป็นช่วงๆ และให้มีการขยับขึ้นลงสลับไปมา โดยมีอุปกรณ์และวิธีการทดลองดังนี้

5.1 อุปกรณ์

โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนประกอบไปด้วย

5.1.1 วัสดุุดิบ

- น้ำมันพาราฟิน (Paraffin oil or White oil) NO.15, Grad A เพื่อใช้เป็นของไหลสายร้อน
- น้ำประปา เพื่อใช้เป็นของไหลสายเย็น

5.1.2 อุปกรณ์การทดลอง

- เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ซึ่งประกอบด้วยท่อสองชั้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อชั้นในเท่ากับ 82 มิลลิเมตร หนาประมาณ 3 มิลลิเมตร ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อชั้นนอกเท่ากับ 125 มิลลิเมตร ยาว 150 เซนติเมตร โดยใช้ท่อสเตนเลสสตีล (Stainless Steel) ท่อด้านนอกหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อน ซึ่งในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีตัววัดอุณหภูมิของขาเข้าและออกทั้งสองสาย ซึ่งแสดงดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แสดงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

- ระบบควบคุมและรับสัญญาณ

โดยทำการต่อตัวรับสัญญาณจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเข้าสู่คอมพิวเตอร์และบันทึกอัตโนมัติทุกๆ 10 วินาที เมื่อเห็นว่าระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ โดยจะเก็บข้อมูลเป็นดิจิทัล (Digital) ข้อมูลจะเก็บอยู่ในรูปของไฟล์เอ็กเซล (Excel) ซึ่งจะนำข้อมูลไปวิเคราะห์ต่อไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.2 ระบบควบคุมอุณหภูมิและระบบปรับสัญญาณ

- ระบบทำความร้อน

โดยใช้น้ำมันพาราฟินเป็นของไหลสายร้อน ในถังขนาด 60 ลิตร มีฮีทเตอร์ (Heater) เป็นตัวให้ความร้อน ขนาด 40 กิโลวัตต์ (kW) แสดงดังรูปที่ 5.3 โดยทำการควบคุมอุณหภูมิแบบพีไอดี (PID Control) ทำการควบคุมอุณหภูมิที่ 80 องศาเซลเซียส (C°) ซึ่งป้อนเข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยใช้ โรตารีมิเตอร์ (Rotary meter) เป็นตัววัดอัตราการไหล



รูปที่ 5.3 เครื่องทำความร้อน

- ระบบทำความเย็น

โดยใช้น้ำเป็นของไหลสายเย็น ซึ่งมีระบบทำความเย็น (Chiller) แสดงดังรูปที่ 5.4 ซึ่งเป็นตัวทำความเย็นและควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิเท่ากับ 20 องศาเซลเซียส (C°) โดยป้อนเข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งใช้โรตารีมิเตอร์ (Rotary meter) เป็นตัววัดอัตราการไหล



รูปที่ 5.4 เครื่องทำความเย็น (Chiller)

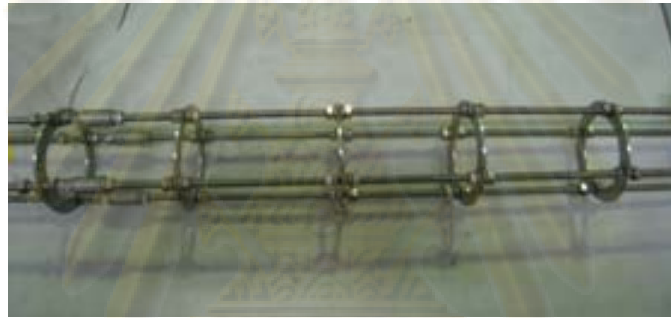
- ชนิดและการจัดเรียงของแผ่นบัพเฟิล

โดยแผ่นบัพเฟิลจะมีลักษณะเป็นรูกลวง (Orifice) 4 ชนิดด้วยกัน แสดงดังรูปที่ 5.5 ซึ่งมีขนาดรูภายในของแผ่นบัพเฟิลเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ เท่ากับ 0.4, 0.5, 0.6 และ 0.7 โดยมีแกนเป็นตัวยึดแผ่นบัพเฟิลที่ระยะแตกต่างกัน โดยมีระยะห่างระหว่างแผ่นบัพเฟิลเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ 1, 1.5, 2 และ 2.5 แสดงดังรูปที่ 5.6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.5 แสดงชนิดของแผ่นบัพเฟิล



รูปที่ 5.5 แสดงชนิดการจัดเรียงของแผ่นบัพเฟิล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2 วิธีการทดลอง

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยอาศัยการทดลอง ซึ่งมีการทดลองดังนี้

- 5.2.1 ติดตั้งชุดของแผ่นบัพเฟิล ขนาดรูปภายในของแผ่นบัพเฟิล (0.4D, 0.5D, 0.6D, 0.7D) และระยะห่างระหว่างแผ่นบัพเฟิล (1D, 1.5D, 2D, 2.5D) ภายในท่อชั้นในของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
- 5.2.2 ปรับอุณหภูมิของของไหลสายร้อนเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส ของไหลสายเย็นเท่ากับ 20 องศาเซลเซียส
- 5.2.3 ปรับอัตราการไหลของของไหลทั้งสายร้อนและเย็นตามที่ต้องการ
- 5.2.4 ปรับความถี่และแอมป์ริจูดของการสั่นของแผ่นบัพเฟิลตามที่ต้องการ
- 5.2.4 รอจนกระทั่งเมื่ออุณหภูมิของของไหลที่ต้องการวัด เข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady state) จึงบันทึกผลของข้อมูล
- 5.2.5 เมื่อทำการทดลองที่สภาวะแรกเสร็จ จึงเปลี่ยนค่าสภาวะการทดลองใหม่ และทำข้อ 5.1.1, 5.1.3, 5.1.4 จนครบทุกสภาวะที่ต้องการ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

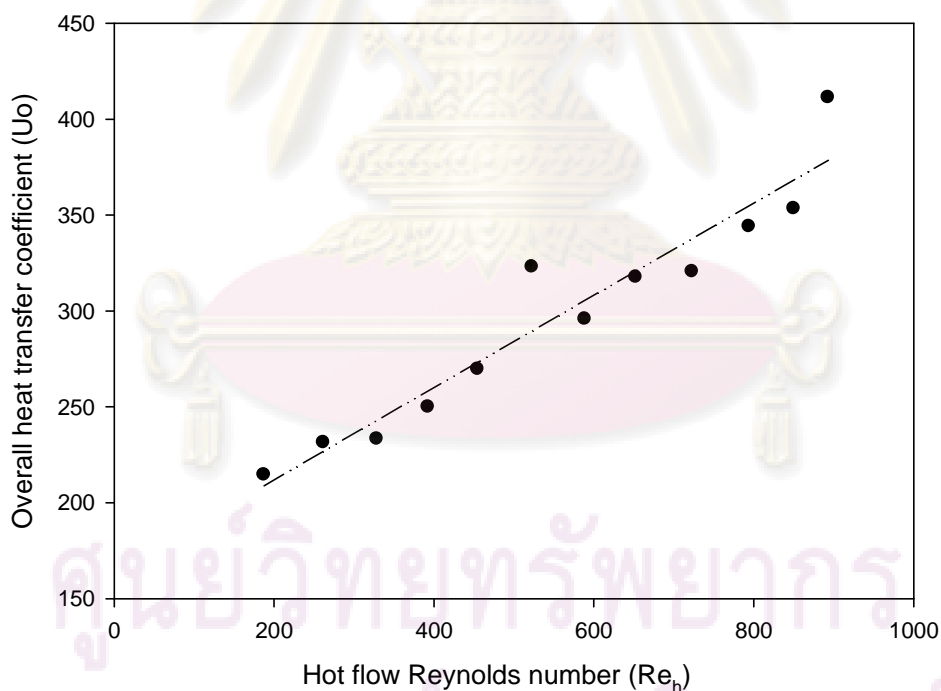
บทที่ 6

ผลการและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

6.1 ศึกษาค่าของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวม (Overall heat transfer Coefficient; U_o)

6.1.1 ผลการทดลอง กรณีศึกษาที่ 1 (ผลของอัตราการไหลของของไหลสายร้อน)

ผลของอัตราการไหลของของไหลสายร้อน (น้ำมันพาราฟิน) หรือเขียนในรูปของตัวแปรไร้หน่วย คือ เรย์โนลด์นัมเบอร์ของของไหลสายร้อน, Re_h เทียบกับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall heat transfer coefficient; U_o) แสดงดังรูปที่ 6.1.1



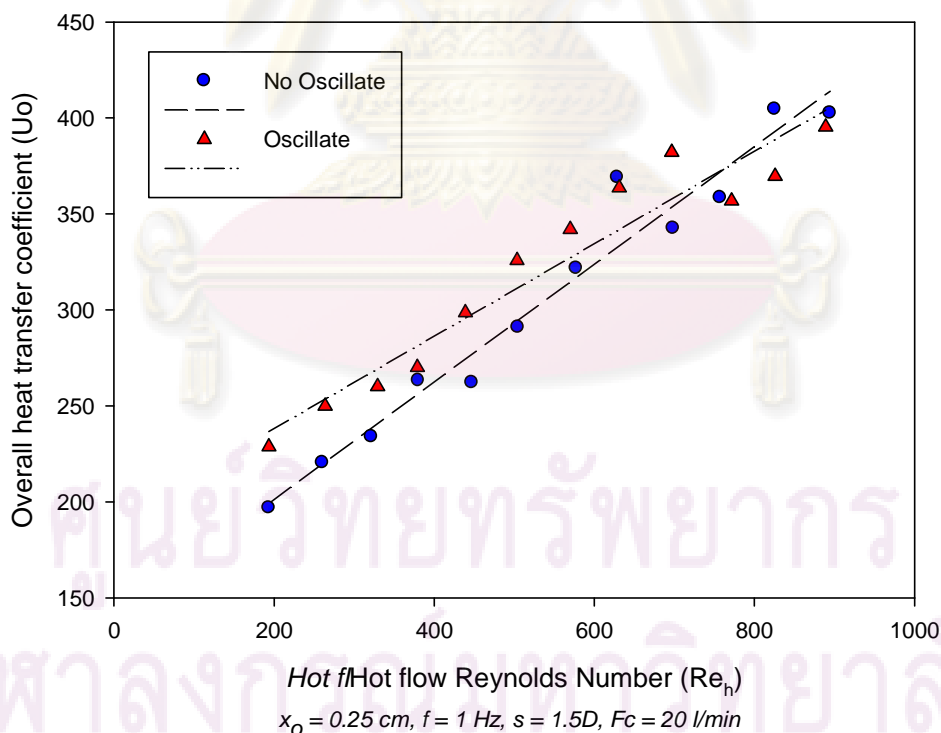
$x_o = 0.75$ cm, $d_o = 0.5D$, $S = 1.5D$, $F_c = 20$ l/min

รูปที่ 6.1.1 ผลของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเมื่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์สายร้อนเพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 6.1.1 จะเห็นได้ว่าเมื่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์การไหลของของไหลสายร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเพิ่มขึ้นด้วย เป็นผลมาจากการไหลที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดสถานะการไหลเป็นแบบปั่นป่วน (Turbulence Flow) ส่งผลให้ความหนาของชั้นฟิล์มต้านทานความร้อนลดลงประกอบกับอัตราของพลังงานความร้อนเพิ่มขึ้น เมื่อนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจึงมีค่าสูงขึ้น

6.1.2 ผลการทดลอง กรณีศึกษาที่ 2 (ผลของการสั่นกับไม่สั่นของแผ่นบัฟเฟิล)

เพื่อดูผลการถ่ายเทความร้อนชนิดมีบัฟเฟิลแบบสั่นและไม่สั่น โดยแสดงผลเป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Overall heat transfer coefficient; U_o) ซึ่งทำการทดลองที่ค่าสถานะการไหลของไหลสายร้อนที่ค่าอัตราการไหลเท่ากับ 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของของไหลสายเย็นมีค่าคงที่ เท่ากับ 20 ลิตรต่อนาที แอมปริจูดการสั่นเท่ากับ 0.25 เซนติเมตร ความถี่เท่ากับ 0 และ 1 รอบต่อวินาที โดยผลการทดลองเป็นไปดังรูปที่ 6.1.2



รูปที่ 6.1.2 แสดงผลของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนชนิดมีบัฟเฟิลสั่นกับไม่สั่น

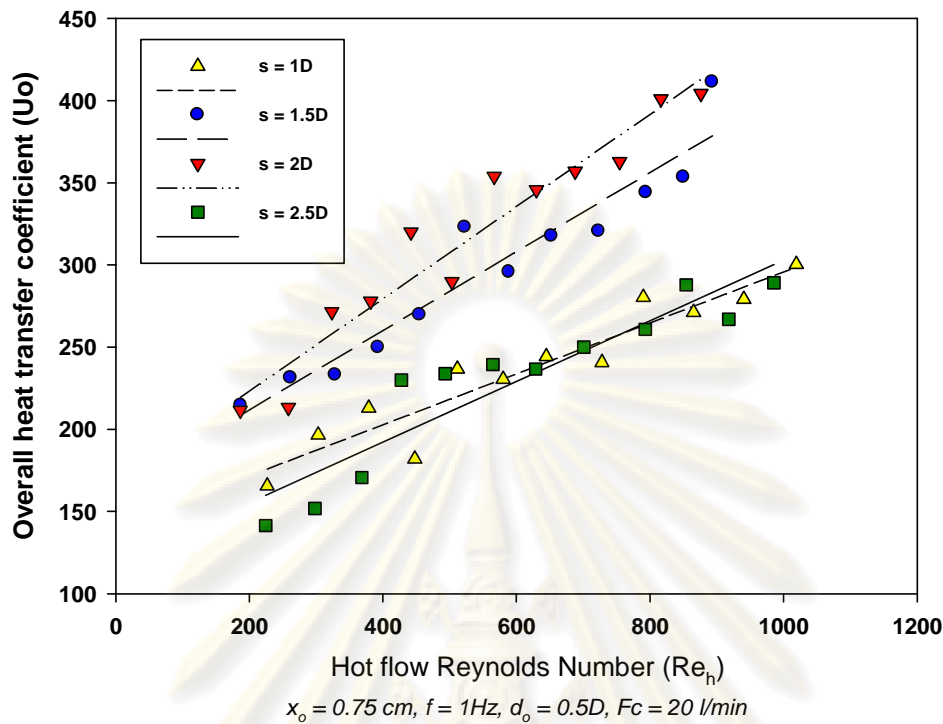
จากรูปที่ 6.1.2 สามารถสรุปได้ว่าการสั่นของแผ่นบัพเฟิลจะส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่สูงกว่าแบบไม่สั่นของแผ่นบัพเฟิล ในช่วงค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของของไหลสายร้อนน้อยกว่า 700 แต่เมื่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของสายร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่า 700 จะให้ผลให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากค่าเรย์โนลด์ของไหลสายร้อนต่ำๆหรือการไหลแบบช้าๆ ทำให้การไหลของของไหลมีลักษณะการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) ซึ่งจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมให้มีค่าลดลง แต่เมื่อมีการสั่นของแผ่นบัพเฟิลซึ่งจะช่วยให้เกิดการผสมเข้ากันได้ดี ของไหลเกิดการกระทบกับแผ่นบัพเฟิลเกิดการไหลแบบหมุนวนและเป็นลูกคลื่นระหว่างแผ่นบัพเฟิล โดยทำลายชั้นความต้านทานความร้อน จึงส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนระหว่างพลังงานความร้อนที่สูงขึ้น

แต่ในกรณีที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์สายร้อนเพิ่มขึ้นมากกว่า 700 เมื่อเปรียบเทียบกับแบบสั่นและไม่สั่นของแผ่นบัพเฟิล จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมมีค่าใกล้เคียงกัน อาจจะเป็นผลมาจากที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของไหลสายร้อนเพิ่มขึ้นนั้นจะส่งผลให้ของไหลจึงมีสภาวะการไหลแบบปั่นป่วนมากขึ้น ประกอบกับการที่มีบัพเฟิลอยู่แล้วจึงทำให้ค่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน

6.1.3 ผลการทดลอง กรณีศึกษาที่ 3 (ผลของระยะห่างระหว่างแผ่นบัพเฟิล; S)

วัตถุประสงค์เพื่อหาค่าระยะห่างที่เหมาะสมของแผ่นบัพเฟิลในการถ่ายเทความร้อน โดยเปลี่ยนค่าระยะห่างระหว่างแผ่นบัพเฟิลเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ที่ค่าเท่ากับ 1, 1.5, 2, และ 2.5 ตามลำดับ โดยทำการทดลองที่ขนาดรูภายในของแผ่นบัพเฟิลเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ 0.5 ความถี่ของการสั่น 1 รอบต่อวินาที แอมพลิจูดของการสั่น 0.75 เซนติเมตร การไหลของของไหลสายเย็น (น้ำ) อัตราการไหลคงที่ เท่ากับ 20 ลิตรต่อนาที และเปลี่ยนค่าอัตราการไหลของของไหลสายร้อน (น้ำมันพาราฟิน) ที่อัตราการไหล 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 ลิตรต่อนาที ซึ่งผลจากการทดลองแสดงดังรูปที่ 6.1.3

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.1.3 ผลของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเมื่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์สายร้อนเพิ่มขึ้นที่ ระยะห่างระหว่างแผ่นบัพเฟิลต่างกัน

จากรูปที่ 6.1.3 เมื่อเปรียบเทียบผลของระยะห่างระหว่างแผ่นบัพเฟิลที่ระยะต่างกัน จะเห็นได้ว่าที่ ระยะห่างระหว่างบัพเฟิลเท่ากับ 2 และ 1.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ จะให้ผลให้ค่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่มีค่าสูงสุดและรองลงมาตามลำดับ

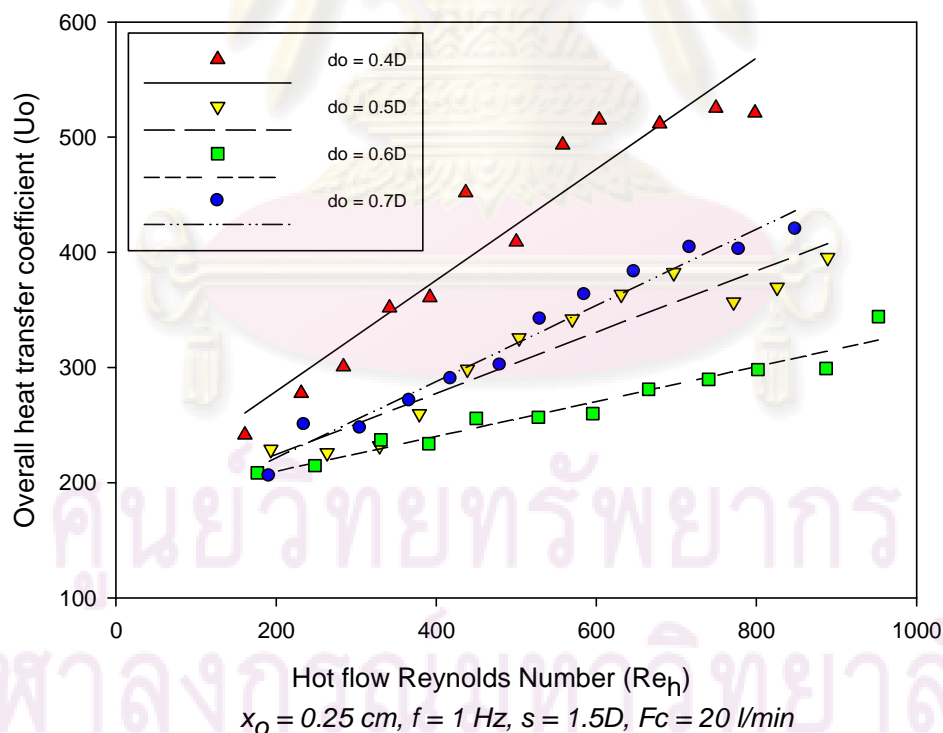
สามารถอธิบายได้ดังนี้เนื่องจากการไหลภายในท่อแบบมีบัพเฟิลจะมีลักษณะการไหลเป็นแบบ ไหลวนเป็นคลื่น ระยะของแผ่นบัพเฟิลจึงมีผลต่อการถ่ายเทความร้อน ซึ่งบางลักษณะที่เสริมกัน และหักล้างกัน ดังนั้นในกรณีของแผ่นบัพเฟิลอยู่ชิดกันมาก ก็ทำให้ของไหลมีพฤติกรรมการไหล ของ ไหลผ่านเฉพาะรูภายในของแผ่นบัพเฟิล เกิดลูกคลื่นสั้นๆ ตามแนวท่อที่ระยะห่างระหว่าง แผ่นบัพเฟิล เกิดการกระทบและการกระจายไปสู่ผิวข้างของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนน้อย ส่งผลให้ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าลดลง

แต่ในทางกลับกันถ้าระยะห่างระหว่างแผ่นบัพเฟิลห่างกันมาก ของไหลภายในท่อที่มีบัพเฟิลก็ แสดงพฤติกรรมการไหลเป็นแบบลูกคลื่นไม่เต็มคลื่น หรือเกิดการไหลวนเฉพาะในส่วนบริเวณที่ ใกล้กับแผ่นบัพเฟิล จึงส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมให้มีค่าลดลงเช่นกัน ดังนั้น

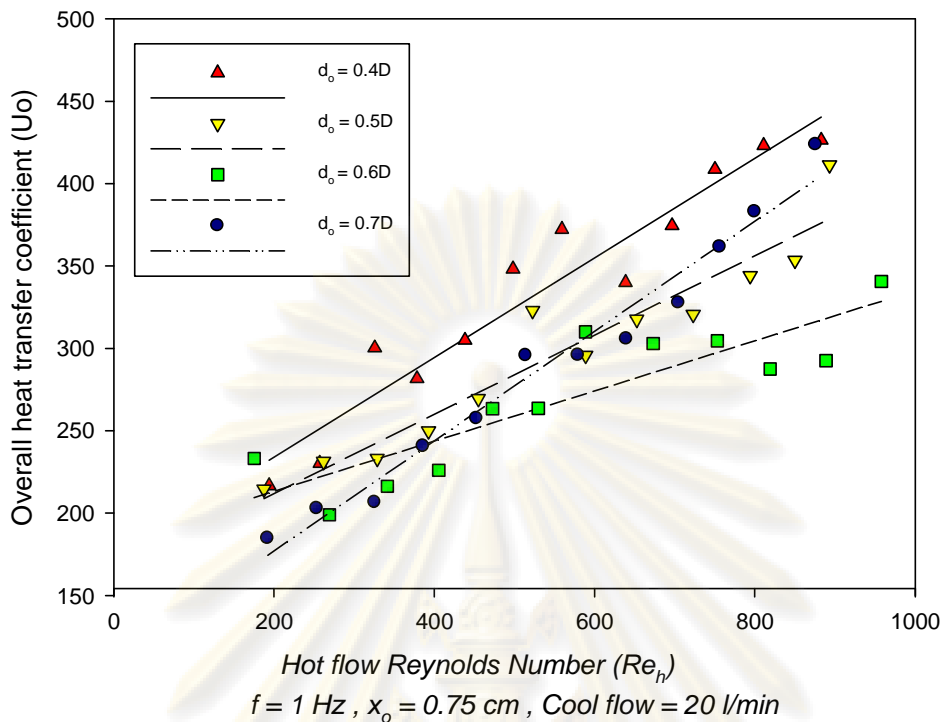
จึงสามารถสรุปได้ว่าที่ระยะห่างระหว่างแผ่นบัพเฟิลเท่ากับ 2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ เป็นระยะที่เหมาะสมของการออกแบบระยะห่างของแผ่นบัพเฟิลในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

6.1.4 ผลการทดลอง กรณีศึกษาที่ 4 (ผลของรูภายในของแผ่นบัพเฟิล; d_o)

วัตถุประสงค์เพื่อหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของรูภายในแผ่นบัพเฟิลที่เหมาะสมในการถ่ายโอนความร้อน โดยเปลี่ยนชนิดของแผ่นบัพเฟิล ที่ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของรูภายในแผ่นบัพเฟิลเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ 0.4, 0.5, 0.6 และ 0.7 ตามลำดับ โดยทำการทดลองที่ระยะห่างระหว่างแผ่นบัพเฟิลเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ 1.5 ความถี่ของการสั่น 1 รอบต่อวินาที แอมพลิจูดของการสั่น 0.25 และ 0.5 เซนติเมตร การไหลของของไหลสายเย็น(น้ำ) ที่อัตราการไหลคงที่เท่ากับ 20 ลิตรต่อนาที และเปลี่ยนค่าอัตราการไหลของของไหลสายร้อน (น้ำมันพาราฟิน) ที่อัตราการไหล 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 ลิตรต่อนาที ซึ่งผลจากการทดลองแสดงดังในรูปที่ 4.1.4ก, 4.1.4ข



รูปที่ 6.1.4ก แสดงผลการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall heat transfer coefficient, U_o) ที่ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของแผ่นบัพเฟิลต่างกัน



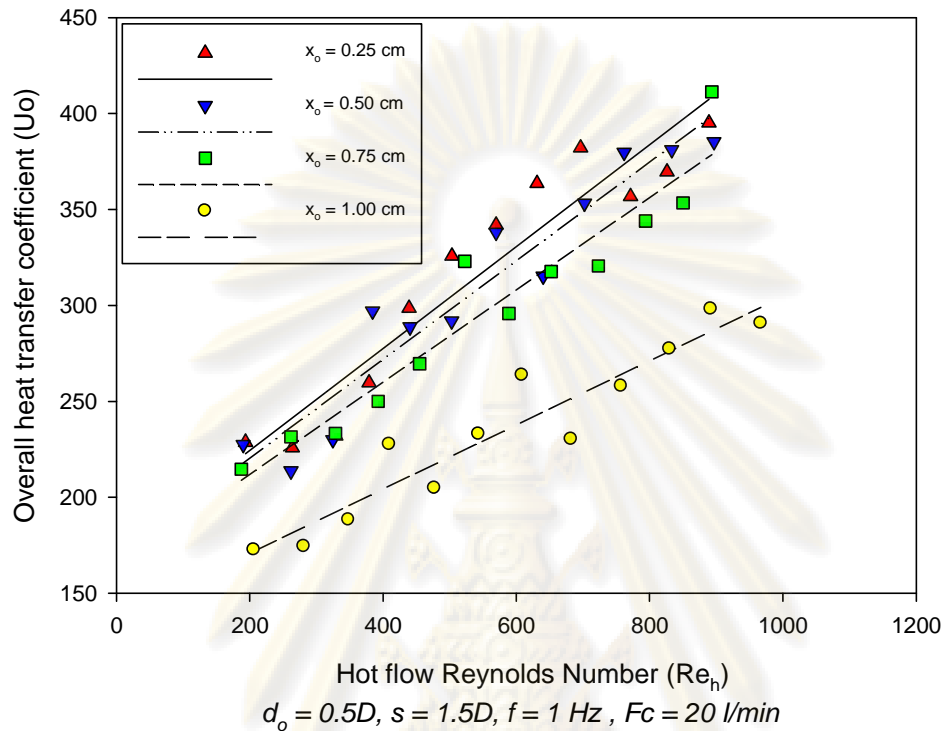
รูปที่ 6.1.4ข แสดงผลการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall heat transfer coefficient, U_o) ที่ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของแผ่นบัพเฟิลต่างกัน

จากรูปที่ 6.1.4ก และ 6.1.4ข ซึ่งทั้งสองรูปนั้นต่างกันที่ค่าแอมปริจูด เมื่อเปรียบเทียบผลของรูภายในของแผ่นบัพเฟิลที่ต่างกัน จะเห็นได้ว่าที่รูภายในของแผ่นบัพเฟิลเท่ากับ 0.4 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ จะให้ผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่มีค่าสูงสุด จึงเป็นแผ่นบัพเฟิลที่เหมาะสมของการออกแบบระยะห่างของแผ่นบัพเฟิลในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

6.1.5 ผลการทดลอง กรณีศึกษาที่ 5 (Amplitude; x_o)

วัตถุประสงค์เพื่อหาค่าแอมปริจูดที่เหมาะสมในการถ่ายโอนความร้อน โดยเปลี่ยนค่าของแอมปริจูดที่ค่าต่างๆ 4 ค่า คือ 0.25, 0.5, 0.75, 1 เซนติเมตร (cm) ทำการทดลองที่ชนิดของแผ่นบัพเฟิลที่ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของรูภายในแผ่นบัพเฟิลเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ 0.5 ระยะห่างระหว่างแผ่นบัพเฟิลเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ 1.5 ความถี่ของการสั่นเท่ากับ 1 รอบต่อวินาที การไหลของของไหลสายเย็น (น้ำ) ที่อัตราการไหลคงที่ เท่ากับ 20 ลิตรต่อนาที และเปลี่ยนค่าอัตรา

การไหลของของไหลสายร้อน (น้ำมันพาราฟิน) ที่อัตราการไหล 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 ลิตรต่อนาที ซึ่งผลจากการทดลองแสดงดังในรูปที่ 6.1.5



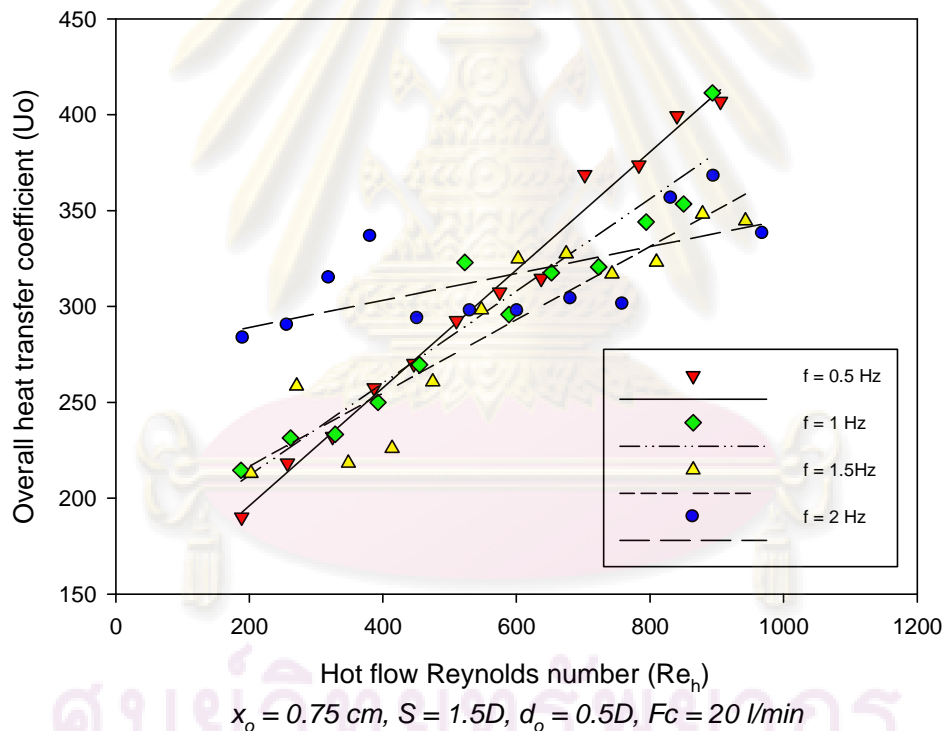
รูปที่ 6.1.5 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall heat transfer coefficient, U_o) ที่ค่าแอมปริจูดเท่ากับ 0.25, 0.5, 0.75, 1 เซนติเมตร

จากรูปที่ 6.1.5 สามารถสรุปได้ว่าค่าที่แอมปริจูดน้อย จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม สูงกว่าการสันแอมปริจูดมากกว่า เนื่องจากที่แอมปริจูดน้อยแผ่นบัพเฟิลจะทำลายความหนาของฟิล์มต้านทานความร้อนและการผสมตามแนวรัศมี (Radial) ได้มากกว่าที่ค่าแอมปริจูดมาก และที่ค่าแอมปริจูดมากจะส่งผลต่อการผสมในแนวระดับ (Axial) แทน จึงส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมมีค่าลดลง เมื่อค่าของแอมปริจูดของการสันเพิ่มขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.1.6 ผลการทดลอง กรณีศึกษาที่ 6 (ความถี่ในการสั่นของแผ่นบัพเฟิล, frequency)

วัตถุประสงค์เพื่อหาค่าความถี่ในการสั่นที่เหมาะสมในการถ่ายโอนความร้อนในการสั่นของแผ่นบัพเฟิล โดยนำค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของสายร้อนมาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ซึ่งเปลี่ยนค่าของความถี่ที่ค่าต่างๆ 4 ค่า คือ 0.5, 1, 1.5, 2 รอบต่อวินาที ทำการทดลองชนิดของแผ่นบัพเฟิลที่ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของรูภายในแผ่นบัพเฟิลเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ 0.5 ระยะห่างระหว่างแผ่นบัพเฟิลเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ 1.5 แอมปริจูดของการสั่นเท่ากับ 0.75 เซนติเมตร การไหลของของไหลสายเย็น (น้ำ) ที่อัตราการไหลคงที่ เท่ากับ 20 ลิตรต่อนาที และเปลี่ยนค่าอัตราการไหลของของไหลสายร้อน (น้ำมันพาราฟิน) ที่อัตราการไหล 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 ลิตรต่อนาที ซึ่งผลจากการทดลองแสดงดังในรูปที่ 6.1.6



รูปที่ 6.1.6 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall heat transfer coefficient, U_o) ที่ค่าความถี่เท่ากับ 0.5, 1, 1.5, 2 รอบต่อวินาที

จากรูปที่ 6.1.6 แสดงให้เห็นว่าที่ความถี่ของการมาก จะส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมให้มีค่าสูงกว่าความถี่ในการสั่นน้อย ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์สายร้อนลดลง

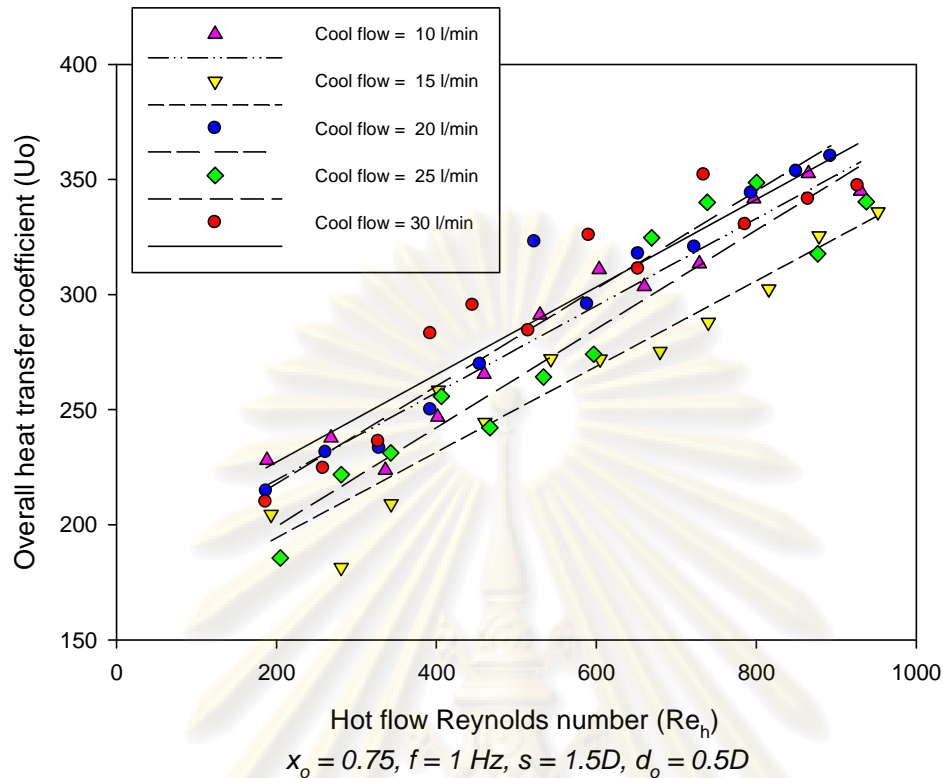
เนื่องจากที่ค่าการไหลช้าๆ หรือค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์สายร้อนมีค่าลดลง จะส่งผลให้การไหลของของไหลมีลักษณะการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) ความถี่ในการสั่นของแผ่นบัพเฟิลมากจึงมีผลมากกว่าความถี่ในการสั่นน้อย เนื่องจากความถี่ที่ความถี่มากไปช่วยการกวาดในแนวรัศมีและทำลายชั้นต้านทานความร้อนที่ผิวท่อจึงส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมให้มีค่าสูงกว่าที่ความถี่น้อย

แต่ในทางกลับกันที่ความถี่ในการสั่นมาก จะส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมให้มีค่าต่ำกว่าที่ความถี่ในการสั่นน้อยในช่วงค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์สายร้อนเพิ่มขึ้น เพราะเนื่องจากที่ความถี่สูงประกอบกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของไหลสายร้อนเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ของไหลเกิดการกวาดในแนวระดับมากกว่าในแนวรัศมี จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมมีค่าต่ำ

จึงสามารถสรุปได้ว่า ค่าความถี่ของการสั่นของแผ่นบัพเฟิล จะแปรผันตรงกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่ค่า เรย์โนลด์นัมเบอร์ของไหลสายร้อนน้อยกว่า 500 และ ค่าความถี่ของการสั่นของแผ่นบัพเฟิล จะแปรผกผันกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่ค่า เรย์โนลด์นัมเบอร์ของไหลสายร้อนมากกว่า 500 ดังนั้นในการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจึงต้องคำนวณหาค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของไหลสายร้อนเพื่อหาค่าความถี่ที่เหมาะสมต่อไป

6.1.7 ผลการทดลอง กรณีศึกษาที่ 7 (อัตราการไหลของน้ำเย็น, Cool Flow rate ; Fc)

วัตถุประสงค์เพื่อหาค่าอัตราการไหลของของไหลสายเย็นที่เหมาะสมในการถ่ายโอนความร้อนในการสั่นของแผ่นบัพเฟิล โดยค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของสายร้อนนำมาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ซึ่งเปลี่ยนค่าของอัตราการไหลของสายเย็น (น้ำ) 5 ค่า คือ 10, 15, 20, 25, 30 ลิตรต่อนาที ทำการทดลองที่ชนิดของแผ่นบัพเฟิลที่ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของรูภายในแผ่นบัพเฟิลเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ 0.5 ระยะห่างระหว่างแผ่นบัพเฟิลเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ 1.5 ความถี่และแอมปริจูดในการสั่นเท่ากับ 1 รอบต่อวินาทีและ 0.75 เซนติเมตร ตามลำดับ โดยเปลี่ยนค่าอัตราการไหลของของไหลสายร้อน (น้ำมันพาราฟิน) ที่อัตราการไหล 4 , 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 ลิตรต่อนาที ซึ่งผลจากการทดลองแสดงดังในรูปที่ 6.1.7

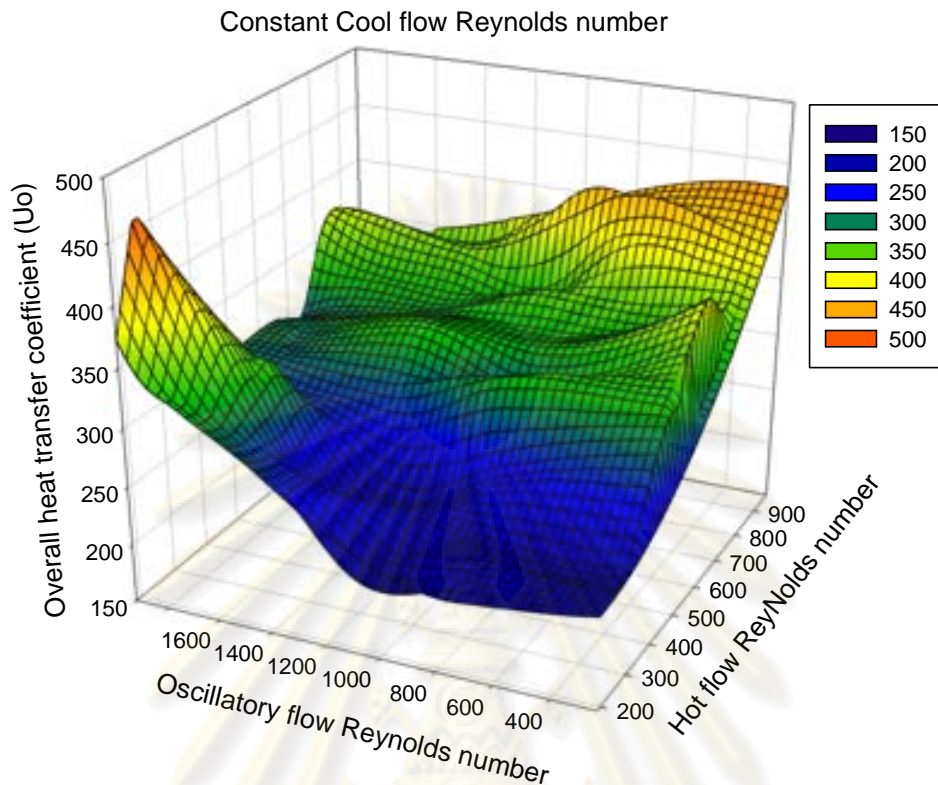


รูปที่ 6.1.7 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall heat transfer coefficient, U_o) ที่ค่าอัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 10, 15, 20, 25, 30 ลิตรต่อนาที

จากรูปที่ 6.17 แสดงให้เห็นว่าค่าอัตราการไหลของน้ำเย็นที่อัตราการไหลสูงๆ จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่สูงกว่าที่อัตราการไหลของน้ำเย็นต่ำกว่า

6.1.8 ผลการทดลอง กรณีศึกษาที่ 8 (ผลของค่า Reynolds Number; Re)

วัตถุประสงค์ เพื่อดูผลของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ที่ค่าเรย์โนลด์สเบอร์ของการสั่น (Oscillatory Reynolds number), เรย์โนลด์สเบอร์ของไหลสายร้อน (Hot flow Reynolds number) ต่างกัน โดยค่าเรย์โนลด์สเบอร์ของไหลสายเย็นมีค่าคงที่ (Constant Cool flow Reynolds Number) ซึ่งแสดงผลเป็นรูปสามมิติดังรูปที่ 6.1.8



รูปที่ 6.1.8 แสดงผลของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall heat transfer coefficient, U_o) ที่ค่าที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของการสั่น (Oscillatory Reynolds number) และเรย์โนลด์นัมเบอร์ของของไหลสายร้อน (Hot flow Reynolds number)

จากรูปที่ 6.1.8 จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมมีค่าสูงที่ค่าของเรย์โนลด์นัมเบอร์ในการสั่น (Oscillatory Reynolds number) เพิ่มขึ้นในช่วงเรย์โนลด์นัมเบอร์ของของไหลสายร้อน (Hot flow Reynolds number) ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับกรณีศึกษาที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าที่ค่าความถี่และแอมพลิจูดมาก จะให้ผลของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall heat transfer coefficient, U_o) ที่สูงกว่าค่าความถี่และแอมพลิจูดน้อย ในช่วงค่าการไหลมากหรือเรย์โนลด์นัมเบอร์ของของไหลสายร้อนลดลง

อีกกรณีคือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจะมีค่าสูงที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของของไหลสายร้อนเพิ่มขึ้น แต่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของการสั่น (Oscillatory Reynolds number) มีค่าน้อย ซึ่งเป็นผลมาจากที่ค่าความถี่และแอมพลิจูดน้อย จะให้ผลของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall heat transfer coefficient, U_o) ที่สูงกว่าค่าความถี่และแอมพลิจูดมาก ที่ค่าการไหลมากหรือเรย์โนลด์นัมเบอร์ของของไหลสายร้อนเพิ่มขึ้น

6.2 ศึกษาผลจากการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในรูปของนัทเชลล์นัมเบอร์ (Nusselt Number)

จากผลการทดลอง จำนวน 400 การทดลอง เพื่อนำมาหาความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน นัทเชลล์นัมเบอร์ (Nusselt Number) ในรูปของตัวแปรไร้มิติที่ใช้ในการทำนายการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดมีบัฟเฟิลแบบสลับไปมา ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

ด้านในท่อ (สายร้อน)

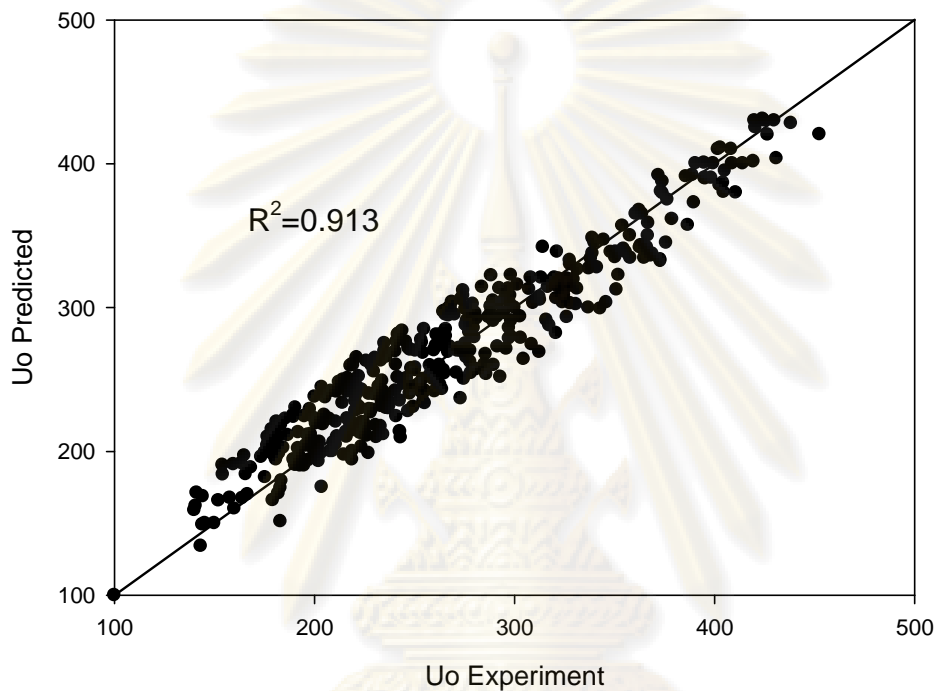
$$Nu_i = 0.3775 Re_h^{0.3876} Pr_i \left(1 + \frac{0.02 + (0.6919 - \alpha^{0.5})^2}{0.284 + (1.0 - \beta^{0.5})^2} \right) + 0.4588 Re_h^{0.02} Re_{osc}^{0.0503} Pr_i^{0.9944} \left(\frac{0.586 - \alpha^{1.5}}{2.079 - \beta^{1.3832}} \right)^2 - 100.0 \quad \dots(6.1)$$

ด้านนอกท่อ (สายเย็น)

$$Nu_o = 0.5 Re_c^{1.4310} \quad \dots(6.2)$$

จากสมการที่ 6.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในรูปของนัทเชลล์นัมเบอร์ (Nusselt Number) ซึ่งได้ทำนายสมการไว้สามส่วนด้วยกันคือ ส่วนแรกเป็นส่วนของการไหลภายในท่อสองชั้นแบบไม่มีการสั่นและไม่มีแผ่นบัฟเฟิล ส่วนที่สองคือการไหลภายในท่อสองชั้นแบบมีบัฟเฟิลแต่ไม่มีการสั่น ส่วนที่สามคือเป็นแบบมีบัฟเฟิลและมีการสั่น ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้ ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของไหลสายร้อนและค่าของเรโนลด์นัมเบอร์ของการสั่นมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้ค่านัทเชลล์นัมเบอร์มีค่าสูงด้วยๆ สำหรับค่าของอัตราส่วนระหว่างรูภายในระหว่างแผ่นบัฟเฟิลจากสมการจะเห็นได้ว่าเมื่ออัตราส่วนระหว่างรูภายในระหว่างแผ่นบัฟเฟิลมีค่าน้อยๆ หรือมากๆ จะส่งผลให้ค่านัทเชลล์นัมเบอร์ที่สูงขึ้น แต่สำหรับค่าระยะห่างระหว่างแผ่นบัฟเฟิลเมื่อค่าระยะห่างระหว่างแผ่นบัฟเฟิลมีค่าน้อยไปหรือมากไปก็จะส่งผลให้ค่านัทเชลล์นัมเบอร์มีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการอธิบายดัง 6.1 ซึ่งได้ศึกษาถึงพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม และจากสมการที่ 6.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้านนอกท่อซึ่งจะเห็นได้ว่าค่านัทเชลล์นัมเบอร์จะขึ้นอยู่กับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของไหลสายเย็นเท่านั้น

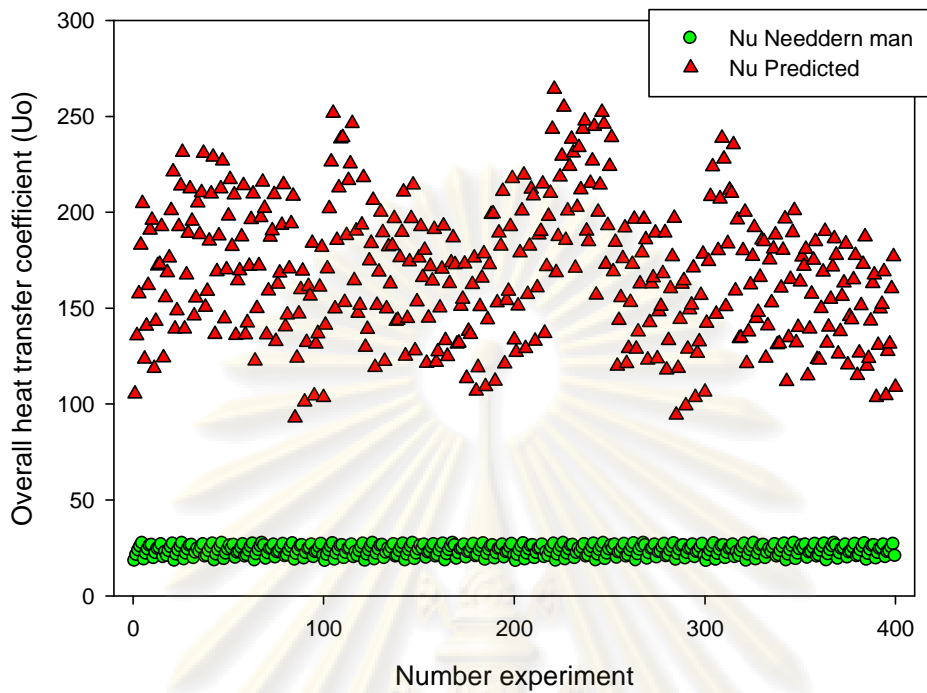
จากการทดลอง 400 การทดลอง เมื่อนำสมการที่ 6.1 และ 6.2 มาหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากการทดลอง ซึ่งถ้าสมการที่ 6.1 และ 6.2 มีความน่าเชื่อถือมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากสมการและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากการทดลองย่อมมีค่าเท่ากันหรือใกล้เคียงกันมากที่สุด แสดงดังในรูปที่ 6.1.9



รูปที่ 6.1.9 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากสมการทำนายและจากการทดลอง

จากสมการที่ 6.1 ซึ่งเป็นสมการทำนายของการไหลในช่วงสภาวะการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นที่มีแผ่นบัฟเฟิลสลับไปมา ซึ่งใช้สำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Nusselt Number) แต่เมื่อนำสมการที่ 6.1 มาเปรียบเทียบกับสมการของ Key and Nedderman ซึ่งเป็นสมการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Nusselt Number) ในท่อสองชั้น ที่มีสภาวะการไหลแบบราบเรียบ $Re < 2,100$ ในปี 1985 ซึ่งมีสมการเป็นดังนี้ (Mackley and Stonestreet., 1995) (Key and Nedderman, 1985) เมื่อ $Re < 2,100$ ซึ่งมีสมการเป็นดังนี้

$$Nu_t = 1.86 \left[Re Pr (D/Z) \right]^{1/3} (\mu / \mu_w)^{0.14} \quad \dots(6.3)$$



รูปที่ 6.1.10 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากสมการทำนายและสมการของ Key and Nedderman

จากผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในรูปของนัมเบอร์ (Nusselt Number) จำนวน 20 การทดลอง ในช่วงสภาวะการไหลแบบราบเรียบ (Larminar Flow) แสดงผลดังรูปที่ 6.1.10 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการถ่ายเทความร้อนของท่อสองชั้นชนิดมีบีฟเฟิลสันสลับไปมาจะให้ค่าสัมประสิทธิ์นัมเบอร์ (Nusselt Number) ที่สูงกว่าการไหลในท่อสองชั้นโดยปกติทั่วไปซึ่งไม่มีบีฟเฟิลและไม่มีการสั่น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 7

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาหาวิธีการที่มีประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ ท่อสองชั้น โดยผลกระทบร่วมของการเคลื่อนที่แบบสลับและการกระตุ้นให้เกิดการปั่นป่วน ทั้งนี้ ความหนาของชั้นฟิล์มต้านทานความร้อนจะลดลงโดยการติดตั้งแผ่นบัพเฟิลแบบรูกลวงภายในท่อ เป็นช่วงๆ และให้มีการขยับขึ้นลงสลับไปมา เพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการดำเนินงาน และมีประสิทธิภาพสูงสุด ตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน ได้แก่ รูภายในของ แผ่นบัพเฟิล ระยะห่างระหว่างแผ่นบัพเฟิล ค่าอัตราการไหลของสายร้อน อัตราการไหลของสายเย็น ความถี่ และแอมพลิจูดของการสั่น

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า ที่ค่า ระยะห่างระหว่างแผ่นของบัพเฟิลเทียบกับเส้นผ่าน ศูนย์กลางท่อ เท่ากับ 2, รูภายในของแผ่นบัพเฟิลเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ เท่ากับ 0.4, แอมพลิจูดเท่ากับ 0.25 เซนติเมตร จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมสูงสุด แต่สำหรับความถี่ นั้นที่ความถี่ของการสั่นมาก จะส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมให้มีค่าสูงกว่า ความถี่ในการสั่นน้อย ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์สายร้อนลดลง แต่ในทางกลับกันที่ความถี่ในการสั่น มาก จะส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมให้มีค่าน้อยกว่าหรือใกล้เคียงกันกับที่ ความถี่ในการสั่นน้อยในช่วงค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์สายร้อนเพิ่มขึ้น

จากผลการทดลอง 400 การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของนัทเซลล์นัมเบอร์ (Nusselt number) ของการถ่ายเทความร้อนผิวด้านในท่อและผิวด้านนอกท่อ ในรูปฟังก์ชันของตัวแปรไร้ หน่วย ในช่วงดังต่อไปนี้ เรย์โนลด์นัมเบอร์ของการสั่น 0 ถึง 2,000 เรย์โนลด์นัมเบอร์ของของไหลสาย ร้อน 100 ถึง 1,000 เรย์โนลด์นัมเบอร์ของของไหลสายเย็น 500 ถึง 2,500 รูภายในแผ่นบัพเฟิลเทียบ กับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 0.4 ถึง 0.7 และอัตราส่วนของระยะห่างระหว่างบัพเฟิลเทียบกับเส้นผ่าน ศูนย์กลางท่อ 1 ถึง 2.5 เป็นไปดังสมการ

$$Nu_i = 0.3775 Re_h^{0.3876} Pr_i \left(1 + \frac{0.02 + (0.6919 - \alpha^{0.5})^2}{0.284 + (1.0 - \beta^{1.5})^2} \right) + 0.4588 Re_h^{0.02} Re_{oc}^{0.0503} Pr_i^{0.9944} \left(\frac{0.586 - \alpha^{1.5}}{2.079 - \beta^{1.3832}} \right)^2 - 100.0$$

และ

$$Nu_o = 0.5 Re_c^{1.4310} \quad \text{ตามลำดับ}$$

รายการอ้างอิง

1. Baird, M. H. I., Duncan, G. J., Smith, J. I. and Taylor, J., 1966, Heat transfer in pulsed turbulent flow. Chem. Engng Sci. 21, 197-199.
2. Dickens, A. W., Mackley, M. R. and Williams, H. R., 1989., Experimental residence time distribution measurements for unsteady flow in baffled tubes, Chem Eng Sci, 44 : 1471-1479.
3. Holman, J. P., 1976, Heat Transfer, Fourth Edition. McGraw-Hill, New York.
4. John H., 2008, Heat Transfer Texbook. Third Edition. Diparment of Machanical Engineering Cambridge University.
5. Kay, J. M. and Nedderman, R. M., 1985., Fluid Mechanics and Transfer Processes. Cambridge University Press, Cambridge.
6. Mackley, M. R. and Ni, X., 1994, Experimental fluid dispersion measurements in periodic baffled tube arrays. Chem.Engng Sci. 48, 171-178.
7. Mackley, M. R., Smith, K. and Wise, N. P., 1993, The suspension of particles using oscillatory flow in baffled tubes. Trans. I. Chem. E. 71A, 649-656.
8. Mackley, M.R. and Ni, X., 1991, Mixing and dispersion in a baffled tube for steady laminar and pulsatile flow, Chem Eng Sci, 46:3139–3151.
9. Mackley, M.R.and Stonestreet,P., 1995., Heat transfer and associated energy dissipation for oscillatory flow in bafed tubes, Chem Eng Sci, 50 : 2211–2224.
10. Ni, X. et al., 2003., Mixing through oscillations and pulsations a guide to achieving process enhancements in the chemical and process indestries. Chem Eng., Chembrige, 81 : 373-383

11. Ni, X., 1995, A study of fluid dispersion in oscillatory flow through a baffled tube, J Chem Technol Biotechnol, 64: 165–174.
12. Ni, X., Cosgrove, J.A., Arnott, A.D., Greated, C.A. and Cumming, R.H., 2000b, On the measurement of strain rate in an oscillatory baffled column using particle image velocimetry, Chem Eng Sci, 55(16) : 3195–3208.
13. Ni, X. et al., 1998. A Systematic study the effect of geometrical parameters on mixing time in oscillatory baffled columns. Chem Eng, Strathclyde University, 76 : 635-541
14. Ralph, M. E., 1986, Oscillatory flows in wavy-walled tubes, J Fluid Mech, 168: 515-540.
15. Smith, K.B., 2000, The scale up of oscillatory flow mixing. Ph.D. Thesis, Cambridge University, UK.
16. Stonestreet, P. and van der Veecken, P.M.J., 1999, The effects of oscillatory flow and bulk flow components on the residence time distribution baffled tube reactors, TransIChemE, PartA, ChemEngResDes, 77 : 671–684.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต้นแบบ



รูปที่ ก-1 แสดงชุดของแผ่นบัพเฟิล



รูปที่ ก-2 แสดงลักษณะของแผ่นบัพเฟิล



รูปที่ ก-3 แสดงลักษณะของแผ่นบีฟเฟิลที่ขนาดรูภายในต่างกัน



รูปที่ ก-4 เครื่องทำความเย็น (Cooling Tower)



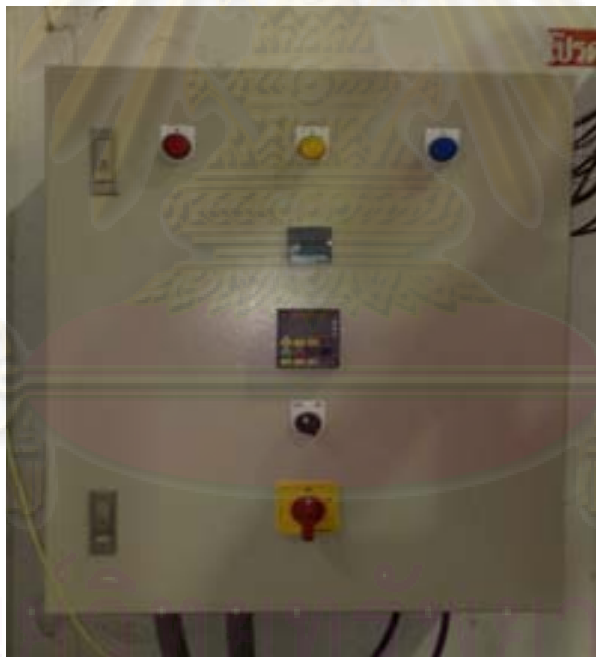
รูปที่ ก-5 เครื่องทำความเย็น (Chiller)



รูปที่ ก-6 ตัววัดอัตราการไหล (Rotary meter)



รูปที่ ก-7 ตัววัดอุณหภูมิ (Thermo couple)



รูปที่ ก-8 ตู้ควบคุมและระบบบันทึกข้อมูล (Data Logger)



รูปที่ ก-9 ตัวให้ความร้อน (Heater)



รูปที่ ก-10 ถังทำความร้อน (Heater)



รูปที่ ก-11 ป้่มของไหล (Pump)



รูปที่ ก-12 ตัววัดความดัน (Pressure transducer)



รูปที่ ก-13 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต้นแบบ



รูปที่ ก-14 ตัวมอเตอร์ทำหน้าที่ขยับขึ้นลง



ภาคผนวก ข

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณ

กรณีที่ 1

ดังสภาวะการทดลองที่ 1 ในภาคผนวก ข

เมื่อทำการทดลอง ชนิดของแผ่นบัพเฟิลเป็นดังนี้

อัตราส่วนระยะห่างระหว่างรูภายในแผ่นบัพเฟิล

$$\alpha = \frac{d_o}{D_i} = 0.4$$

เมื่อ d_o เส้นผ่านศูนย์กลางของรูภายในแผ่นบัพเฟิล

D_i คือเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อชั้นใน

อัตราส่วนระยะห่างระหว่างแผ่นบัพเฟิล

$$\beta = \frac{S}{D_i} = 1$$

เมื่อ S คือระยะห่างระหว่างแผ่นบัพเฟิล

แอมพลิจูดของการสั่น

$$x_o = 0.0025 \text{ m}$$

ความถี่ในการสั่น

$$f = 0 \text{ Hz}$$

อัตราการไหลของของไหลสายร้อน

$$F_h = 4 \text{ l/min}$$

อัตราการไหลของของไหลสายเย็น

$$F_c = 5 \text{ l/min}$$

ผลการทดลอง

การทดลองที่ 200 (ภาคผนวก ช) ซึ่งผลที่ได้แสดงเป็นอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) ได้ดังนี้

$$T_{h,i} = 78.7 \text{ C}^\circ$$

$$T_{h,o} = 49.2 \text{ C}^\circ$$

$$T_{c,o} = 25.9 \text{ C}^\circ$$

$$T_{c,i} = 21.5 \text{ C}^\circ$$

ผลการคำนวณ

อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลสายร้อน

$$T_{h,av} = \frac{T_{h,i} + T_{h,o}}{2} = 63.95$$

อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลสายเย็น

$$T_{c,av} = \frac{T_{c,i} + T_{c,o}}{2} = 23.7$$

อุณหภูมิเฉลี่ยแบบล็อกการริทึม

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_a - \Delta T_b}{\ln(\Delta T_a / \Delta T_b)}, \quad \Delta T_a = T_{h,i} - T_{c,o}, \quad \Delta T_b = T_{h,o} - T_{c,i}$$

$$\Delta T_{lm} = \frac{(78.7 - 25.9) - (49.2 - 21.5)}{\ln[(78.7 - 25.9)/(49.2 - 21.5)]} = 38.91$$

- อัตราการถ่ายเทความร้อนของของไหลสายร้อน (น้ำมันพาราฟิน)

$$Q_h = m_h C_{p_h} (T_{h,i} - T_{h,o})$$

เมื่อ C_{p_h} คือค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ อุณหภูมิ 63.95 C° (น้ำมันพาราฟิน)

$$C_{p_h} = 2146.6 (J / kg \cdot C^\circ)$$

$$\therefore m_h = |F_h (l / \text{min})| \times |\rho_h (kg / m^3)| \times \left| \frac{1 m^3}{1000 l} \right| \times \left| \frac{1 \text{ min}}{60 s} \right|$$

เมื่อ ρ_h คือค่าความหนาแน่นของของไหลสายร้อน (น้ำมันพาราฟิน)

$$\rho_h = 824.965 (kg / m^3)$$

$$\therefore m_h = 4 \times 824.965 \times \frac{1}{1000} \times \frac{1}{60} = 0.05499 (kg / s)$$

$$\therefore Q_h = 0.05499 \times 2146.6 \times (78.7 - 49.2) = 3,482.75 (J/s)$$

- อัตราการถ่ายเทความร้อนของของไหลสายเย็น (น้ำ)

$$Q_c = m_c C_{p_c} (T_{c,o} - T_{c,i})$$

เมื่อ C_{p_c} คือค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ อุณหภูมิ 23.7 C° (น้ำ)

$$C_{p_c} = 4177.9 (J / kg \cdot C^\circ)$$

$$\therefore m_c = |F_c (l / \text{min})| \times |\rho_c (kg / m^3)| \times \left| \frac{1 m^3}{1000 l} \right| \times \left| \frac{1 \text{ min}}{60 s} \right|$$

เมื่อ ρ_c คือค่าความหนาแน่นของของไหลสายร้อน (น้ำมันพาราฟิน)

$$\rho_c = 996.8 (kg / m^3)$$

$$\therefore m_c = 5 \times 996.8 \times \frac{1}{1000} \times \frac{1}{60} = 0.083 (\text{kg} / \text{s})$$

$$\therefore Q_c = 0.083 \times 4177.9 \times (25.9 - 21.5) = 1,527 (\text{J/s})$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย

$$Q_{av} = \frac{|Q_c| + |Q_h|}{2}$$

$$\therefore Q_{av} = \frac{1,527 + 3,482.75}{2} = 2,504.875 (\text{J} / \text{s})$$

การคำนวณหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม โดยมีความสัมพันธ์กับอัตราการถ่ายเทความร้อนดังนี้

$$Q_{av} = U_o A_o \Delta T_{lm}$$

เมื่อ $A_o = \pi D_i L = 0.333 (\text{m}^2)$

เมื่อนำมาแทนค่า จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall heat transfer coefficient, U_o) จากการทดลองได้ดังนี้

$$\therefore U_{o, \text{exp}} = \frac{Q_{av}}{A_o \Delta T_{lm}} = \frac{2504.875}{0.3336 \times 38.91} = 200.02 (\text{W/m}^2 \cdot \text{C}^\circ)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การคำนวณหาตัวแปรไว้หน่วย

เมื่อพิจารณาของไหลสายร้อน ที่อุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 63.95 C°

โดยมีค่าคุณสมบัติของของไหล (น้ำมันพาราฟิน) ดังนี้

$$Cp_i = 2.1466(\text{kJ/kg} \cdot \text{C}^\circ)$$

$$v_i = 5.4324505 \times 10^{-6} (\text{m}^2/\text{s})$$

$$\rho_i = 824.965 (\text{kg}/\text{m}^3)$$

$$k_i = 0.1325 (\text{W}/\text{m} \cdot \text{K})$$

$$\mu_i = 4.481 \times 10^{-3} (\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s})$$

ค่าพริ้นด์เทิลนัมเบอร์ด้านในท่อ (Prandlt number)

$$Pr_i = \frac{Cp_i \mu_i}{k_i} = 72.58$$

ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของของไหลสายร้อน (Hot flow Reynolds Number)

$$Re_h = \frac{\rho_i v_i D_i}{\mu_i} = 190.64$$

$$\text{เมื่อ } v_i = \frac{F_h (\text{l}/\text{min})}{A (\text{m}^2)} \times \left| \frac{1 \text{m}^3}{1000 \text{l}} \right| \times \left| \frac{1 \text{min}}{60 \text{s}} \right| = 0.0126 (\text{m}/\text{s})$$

ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของการสั่นของแผ่นบัฟเฟิล (Oscillatory flow Reynolds Number)

$$Re_{osc} = \frac{\rho_i 2\pi f x_o D_i}{\mu_i} = 0$$

เนื่องจากการทดลองที่ 1, $f = 0 (\text{Hz})$, $\therefore Re_{osc} = 0$

เมื่อพิจารณาของไหลสายเย็น ที่อุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 23.7 C°

โดยมีค่าคุณสมบัติของของไหล (น้ำ) ดังนี้

$$Cp_o = 4.1779(\text{kJ/kg} \cdot \text{C}^{\circ})$$

$$v_o = 9.7973 \times 10^{-7} (\text{m}^2/\text{s})$$

$$\rho_o = 996.805 (\text{kg}/\text{m}^3)$$

$$k_o = 0.61 (\text{W}/\text{m} \cdot \text{K})$$

$$\mu_o = 9.766 \times 10^{-4} (\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s})$$

ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของของไหลสายเย็น (Cool flow Reynolds Number)

$$\text{Re}_c = \frac{\rho_o v_o D_h}{\mu_o} = 515.92$$

$$\text{เมื่อ } D_h = \frac{4V_{wet}}{A_{wet}} = \frac{\pi(D_s^2 - D_i^2)L}{\pi(D_s + D_i)L} = 0.04$$

$$v_o = \frac{F_h (\text{l}/\text{min})}{A (\text{m}^2)} \times \left| \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ l}} \right| \times \left| \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \right| = 0.01263 (\text{m}/\text{s}), \quad A = \frac{\pi(D_s^2 - D_o^2)}{4} = 0.00659 (\text{m}^2)$$

ค่าพรันด์เทิลนัมเบอร์ค่านนอก (Prandlt number)

$$\text{Pr}_o = \frac{Cp_o \mu_o}{k_o} = 6.264$$

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรณีที่ 2

ตัวอย่างการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากสมการทำนาย

เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม จากสมการการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น

$$\frac{1}{U_o A_o} = \frac{1}{h_o A_o} + \frac{\ln(d_o / d_i)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_i A_i}$$

โดยเมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวท่อด้านใน ซึ่งมีสมการเป็นดังนี้

$$h_i = \left(C_1 \text{Re}_h^a \text{Pr}_i^b \left(1 + \frac{(C_2 - \alpha^d)^2}{(C_3 - \beta^e)^2} \right) + C_4 \text{Re}_h^f \text{Re}_{osc}^g \text{Pr}_i^h \frac{(C_5 - \alpha^i)^2}{(C_6 - \beta^j)^2} + C_7 \right) \frac{k_i}{D_i}$$

เมื่อ $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, a, b, d, e, f, g, h, i, j$ มีค่าคงที่

เมื่อนำมาแทนในสมการ ที่จะได้ความสัมพันธ์ของนัมเบอร์เชลล์นัมเบอร์ (Nusselt number) ได้ดังนี้

$$Nu_i = C_1 \text{Re}_h^a \text{Pr}_i^b \left(1 + \frac{(C_2 - \alpha^d)^2}{(C_3 - \beta^e)^2} \right) + C_4 \text{Re}_h^f \text{Re}_{osc}^g \text{Pr}_i^h \frac{(C_5 - \alpha^i)^2}{(C_6 - \beta^j)^2} + C_7$$

โดยเมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวท่อด้านนอกท่อ ซึ่งมีสมการเป็นดังนี้

$$h_o = C_8 \text{Re}_c^k \text{Pr}_o^l \frac{k_o}{D_h}$$

เมื่อ C_8, k, l มีค่าคงที่

เมื่อนำมาแทนในสมการ ที่ จะได้ความสัมพันธ์ของนัมเบอร์เชลล์นัมเบอร์ (Nusselt number) ได้ดังนี้

$$Nu_o = C_8 \text{Re}_c^k \text{Pr}_o^l$$

เมื่อนำสมการที่ และสมการที่ มาแทนค่าในสมการที่ จะได้

$$\frac{1}{U_o A_o} = \frac{1}{C_8 \text{Re}_c^k \text{Pr}_o^l \frac{k_o}{D_h} A_o} + \frac{\ln(D_o / D_i)}{2\pi kL} + \frac{1}{\left(C_1 \text{Re}_h^a \text{Pr}_i^b \left(1 + \frac{(C_2 - \alpha^d)^2}{(C_3 - \beta^e)^2} \right) + C_4 \text{Re}_h^f \text{Re}_{osc}^g \text{Pr}_i^h \frac{(C_5 - \alpha^i)^2}{(C_6 - \beta^j)^2} + C_7 \right) \frac{k_i}{D_i} A_i}$$

โดยหาค่า U_o จากการคำนวณได้ดังสมการ

$$U_o = 1 / \left[\frac{\frac{1}{C_8 \text{Re}_c^k \text{Pr}_o^l \frac{k_o}{D_h} A_o} + \frac{A_o \ln(D_o / D_i)}{2\pi kL}}{A_o} \right] \left[\left(C_1 \text{Re}_h^a \text{Pr}_i^b \left(1 + \frac{(C_2 - \alpha^d)^2}{(C_3 - \beta^e)^2} \right) + C_4 \text{Re}_h^f \text{Re}_{osc}^g \text{Pr}_i^h \frac{(C_5 - \alpha^i)^2}{(C_6 - \beta^j)^2} + C_7 \right) \frac{k_i}{D_i} A_i \right]$$

โดยค่า U_o สามารถหาได้จากการทดลอง และหาค่าคงที่ ในสมการที่

$C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8, a, b, d, e, f, g, h, i, j, k, l$ เป็นค่าคงที่ที่ต้องอาศัยจากการทดลองในการหา โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Analysis) ซึ่งมีสมการเป็นดังนี้

$$E(C_1, C_2, C_3, C_4, a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k) =$$

$$\min \frac{1}{NP} \sum_{j=0}^{NP} \left[\frac{(U_o)_{j,\text{exp}} - \left[\frac{\frac{1}{C_8 \text{Re}_c^k \text{Pr}_o^l \frac{k_o}{D_h} A_o} + \frac{A_o \ln(D_o / D_i)}{2\pi kL}}{A_o} \right] \left[\left(C_1 \text{Re}_h^a \text{Pr}_i^b \left(1 + \frac{(C_2 - \alpha^d)^2}{(C_3 - \beta^e)^2} \right) + C_4 \text{Re}_h^f \text{Re}_{osc}^g \text{Pr}_i^h \frac{(C_5 - \alpha^i)^2}{(C_6 - \beta^j)^2} + C_7 \right) \frac{k_i}{D_i} A_i \right]}{1} \right]^2$$

ความสัมพัทธ์ของนิตเชลล์นัมเบอร์ด้านในท่อและนอกท่อได้ดังนี้

- ด้านในท่อ

$$Nu_i = 0.3775 Re_h^{0.3876} Pr_i \left(1 + \frac{0.02 + (0.6919 - \alpha^{0.5})^2}{0.284 + (1.0 - \beta^{1.5})^2} \right) + 0.4588 Re_h^{0.02} Re_{osc}^{0.0503} Pr_i^{0.9944} \left(\frac{0.586 - \alpha^{1.5}}{2.079 - \beta^{1.3832}} \right)^2 - 100.0$$

- ด้านนอกท่อ

$$Nu_o = 0.5 Re_c^{1.4310}$$

การคำนวณย้อนกลับเพื่อหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่ได้จากสมการทำนาย

เมื่อนำมาหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในก็จะได้ดังสมการ

$$h_i = \frac{Nu_i k_i}{D_i}$$

$$h_i = \left[0.3775 Re_h^{0.3876} Pr_i \left(1 + \frac{0.02 + (0.6919 - \alpha^{0.5})^2}{0.284 + (1.0 - \beta^{1.5})^2} \right) + 0.4588 Re_h^{0.02} Re_{osc}^{0.0503} Pr_i^{0.9944} \left(\frac{0.586 - \alpha^{1.5}}{2.079 - \beta^{1.3832}} \right)^2 - 100 \right] \frac{k_i}{D_i}$$

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในก็จะได้ดังสมการ

$$h_o = \frac{Nu_o k_o}{D_h}$$

$$h_o = \left[0.5 Re_c^{1.4310} \right] \frac{k_o}{D_h}$$

เมื่อนำมาแทนในสมการข้างล่าง

$$\frac{1}{U_o A_o} = \frac{1}{h_o A_o} + \frac{\ln(d_o / d_i)}{2 \pi k L} + \frac{1}{h_i A_i}$$

จะได้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมดังนี้

โดยแทนค่าดังต่อไปนี้

$$D_i = 0.082, D_h = 0.04, A_o = 0.333, k_i = 0.1325, k_o = 0.61, \alpha = 0.4, \beta = 1,$$

$$\text{Pr}_i = 72.58, \text{Re}_h = 190.64, \text{Re}_{osc} = 0, \text{Pr}_o = 6.264, \text{Re}_c = 515.92$$

$$U_{o,cal} = \frac{1}{\left[\frac{1}{\left[0.5 \text{Re}_c^{1.4310} \right] \frac{k_o}{D_h} + \frac{A_o \ln(D_o/D_i)}{2\pi kL}} \right] \frac{A_o}{\left[0.3775 \text{Re}_h^{0.3876} \text{Pr}_i \left(1 + \frac{0.02 + (0.619 - \alpha^5)^2}{0.284 + (1.0 - \beta^5)^2} \right) + 0.4588 \text{Re}_h^{0.02} \text{Re}_{osc}^{0.6513} \text{Pr}_i^{0.9944} \left(\frac{0.586 - \alpha^5}{2079 - \beta^{3.832}} \right)^2 - 100 \right] \frac{k_i A_i}{D_i}}}$$

เมื่อแทนค่าตัวแปรต่างๆ ลงไป ซึ่งจะสามารถหาค่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมได้

$$U_{o,predict} = 221.85 (\text{W} / \text{m}^2 \cdot ^\circ \text{K})$$

เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ $U_{o,exp}$ ที่ได้จากการทดลองซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$U_{o,exp} = 200.019 (\text{W} / \text{m}^2 \cdot ^\circ \text{K})$$

ซึ่งค่าที่ได้มีความคลาดเคลื่อนเทียบกับผลการทดลองเท่ากับ

$$\left| \frac{U_{o,predict} - U_{o,exp}}{U_{o,exp}} \right| \times 100 = \left| \frac{221.85 - 200.019}{200.019} \right| \times 100 = 10.91\%$$



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

ลักษณะเฉพาะของสารและค่าตัวแปรของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

กรณีที่ 1

1. ลักษณะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (ด้านในของท่อชั้นใน)

$$D_i = 0.082 \text{ เมตร (m)}$$

เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (ด้านนอกของท่อชั้นใน)

$$D_o = 0.085 \text{ เมตร (m)}$$

เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (ด้านในของท่อชั้นนอก)

$$D_s = 0.125 \text{ เมตร (m)}$$

ความยาวของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

$$L = 1.25 \text{ เมตร (m)}$$

พื้นที่หน้าตัดของท่อชั้นใน (ของไหลสายร้อนไหลผ่าน)

$$A^i = \frac{\pi D_i^2}{4} = 0.00527 \text{ ตารางเมตร (m}^2\text{)}$$

พื้นที่หน้าตัดของท่อชั้นนอก (ของไหลสายเย็นไหลผ่าน)

$$A^o = \frac{\pi (D_s^2 - D_o^2)}{4} = 0.006594 \text{ ตารางเมตร (m}^2\text{)}$$

พื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ผนังท่อด้านใน

$$A_i = \pi D_i L = 0.3210 \text{ ตารางเมตร (m}^2\text{)}$$

พื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ผนังท่อด้านนอก

$$A_o = \pi D_o L = 0.3336 \text{ ตารางเมตร (m}^2\text{)}$$

ปริมาตรของท่อด้านใน (ของไหลสายร้อนไหลผ่าน)

$$V_i = \frac{\pi D_i^2 L}{4} = 0.0065875 \text{ ตารางเมตร (m}^2\text{)}$$

ปริมาตรของท่อด้านนอก (ของไหลสายเย็นไหลผ่าน)

$$V_o = \frac{\pi(D_s^2 - D_o^2)L}{4} = 0.008243 \text{ ตารางเมตร (m}^2\text{)}$$

ความถี่ในการสั่นของแผ่นบัพเฟิล (Frequency)

$$f = 0 - 2 \text{ รอบต่อวินาที (Hz)}$$

แอมพลิจูดในการสั่นของแผ่นบัพเฟิล (Amplitude)

$$x_o = 0 - 0.01 \text{ เมตร (m)}$$

ระยะห่างระหว่างแผ่นบัพเฟิลเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อด้านใน (Spacing/Inner Diameter)

$$S/D_i = 1 - 2.5 \text{ ไม่มีหน่วย}$$

อัตราส่วนระหว่างรูภายในแผ่นบัพเฟิลเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อด้านใน (Orifice Diameter/Inner Diameter)

$$d_o/D_i = 0.4 - 0.7 \text{ ไม่มีหน่วย}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรณีที่ 2

1. คุณสมบัติทางกายภาพของสารที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อน (สายร้อน)

น้ำมันพาราฟินหรือ น้ำมันขาว (Paraffin oil or white oil)

อุณหภูมิที่ป้อนเข้า

$$T_{h,in} = 80 \text{ องศาเซลเซียส (C}^\circ\text{)}$$

ช่วงอุณหภูมิขาออก

$$T_{h,out} = 50 - 70 \text{ องศาเซลเซียส (C}^\circ\text{)}$$

ช่วงอัตราการไหลของของไหล (น้ำมันพาราฟิน)

$$F_p = 4 - 15 \text{ ลิตรต่อนาที (liter/min)}$$

ช่วงความเร็วของของไหล (น้ำมันพาราฟิน)

$$v_p = F_p/A_1 = 0.01 - 0.06 \text{ เมตรต่อวินาที (m/s)}$$

ช่วงของค่าความหนืด (Viscosity) (เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ 20 - 100 C^o)

$$\mu = 3.5 - 35 \text{ เซนต์พอยต์ (cP)}$$

ช่วงของค่าความหนาแน่น (Density) (เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ 20 - 100 C^o)

$$\rho = 851 - 814 \text{ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m}^3\text{)}$$

ช่วงของค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Heat capacity) (เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ 20 - 100 C^o)

$$C_p = 1.994 - 2.21 \text{ กิโลจูลต่อกิโลกรัมเคลวิน (kJ/kg-K)}$$

ช่วงของค่าความนำความร้อน (Thermal Conductivity) (เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ 20 - 100 C^o)

$$k = 0.136 - 0.131 \text{ วัตต์ต่อเมตรเคลวิน (W/m-K)}$$

ตารางที่ ค-1 ตารางแสดงลักษณะเฉพาะของน้ำมันขาว (น้ำมันพาราฟิน) เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ

Temperature		Viscosity	Density		Heat Capacity		Thermal	
°F	°C		lb/ft ³	kg/m ³	BTU/lb-°F	kJ/kg-K	Conductivity	
		cP					BTU/ft-hr-°F	W/m-K
50	10	75.697	53.55	857.81	0.467	1.956	0.0791	0.1369
60	15.6	50.182	53.33	854.41	0.472	1.975	0.0788	0.1364
65	18.3	41.886	53.23	852.72	0.474	1.985	0.0787	0.1362
70	21.1	35.431	53.13	851.12	0.477	1.994	0.0785	0.1359
80	26.7	26.191	52.92	847.72	0.481	2.013	0.0783	0.1355
90	32.2	20.055	52.71	844.42	0.486	2.033	0.078	0.135
100	37.8	15.489	52.5	841.03	0.49	2.051	0.0778	0.1347
110	43.3	12.087	52.29	837.63	0.497	2.078	0.0775	0.1342
120	48.9	9.734	52.08	834.33	0.501	2.097	0.0773	0.1338
130	54.4	7.973	51.87	830.93	0.506	2.116	0.077	0.1333
140	60	6.625	51.66	827.54	0.51	2.134	0.0768	0.1329
150	65.6	5.574	51.44	824.14	0.515	2.153	0.0765	0.1324
160	71.1	4.742	51.24	820.84	0.519	2.172	0.0762	0.132
170	76.7	4.072	51.03	817.44	0.524	2.191	0.076	0.1315
180	82.2	3.526	50.81	814.05	0.528	2.21	0.0757	0.1311
190	87.8	3.077	50.6	810.65	0.533	2.229	0.0755	0.1306
200	93.3	2.703	50.39	807.25	0.537	2.247	0.0752	0.1302
210	98.9	2.432	50.18	803.95	0.542	2.266	0.0749	0.1297
220	104.4	2.191	49.97	800.56	0.546	2.285	0.0747	0.1293
230	110	1.983	49.76	797.16	0.551	2.304	0.0744	0.1288
240	115.6	1.801	49.55	793.76	0.555	2.323	0.0742	0.1284
250	121.1	1.642	49.34	790.47	0.56	2.342	0.0739	0.1279
260	126.7	1.503	49.13	787.07	0.564	2.36	0.0736	0.1275
270	132.2	1.382	49.02	785.37	0.569	2.379	0.0734	0.127
280	137.8	1.27	48.71	780.27	0.573	2.398	0.0731	0.1266

Temperature		Viscosity	Density		Heat Capacity		Thermal	
°F	°C		lb/ft ³	kg/m ³	BTU/lb-°F	kJ/kg-K	BTU/ft-hr-°F	W/m-K
290	143.3	1.172	48.49	776.88	0.578	2.417	0.0729	0.1261
300	148.9	1.085	48.29	773.58	0.582	2.436	0.0726	0.1257
310	154.4	1.01	48.08	770.18	0.587	2.455	0.0723	0.1252
320	160	0.945	47.86	766.78	0.591	2.473	0.0721	0.1248
330	165.6	0.885	47.65	763.39	0.596	2.492	0.0718	0.1243
340	171.1	0.832	47.45	760.09	0.6	2.511	0.0716	0.1239
350	176.7	0.783	47.23	756.69	0.605	2.53	0.0713	0.1234
360	182.2	0.737	47.02	753.3	0.609	2.549	0.071	0.123
370	187.8	0.696	46.81	749.9	0.614	2.568	0.0708	0.1225
380	193.3	0.658	46.6	746.6	0.618	2.586	0.0705	0.1221
390	198.9	0.623	46.39	743.2	0.623	2.605	0.0703	0.1216
400	204.4	0.59	46.18	739.81	0.627	2.624	0.07	0.1212
410	210	0.559	45.97	736.41	0.632	2.643	0.0697	0.1207
420	215.6	0.532	45.76	733.01	0.636	2.662	0.0695	0.1203
430	221.1	0.507	45.55	729.71	0.641	2.681	0.0692	0.1198
440	226.7	0.483	45.34	726.32	0.645	2.699	0.069	0.1194
450	232.2	0.46	45.13	722.92	0.65	2.718	0.0687	0.1189
460	237.8	0.439	44.91	719.52	0.654	2.737	0.0684	0.1185
470	243.3	0.42	44.71	716.23	0.659	2.756	0.0682	0.118
480	248.9	0.402	44.5	712.83	0.663	2.775	0.0679	0.1176

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. คุณสมบัติทางกายภาพของสารที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อน (สายเย็น)

น้ำ (water)

อุณหภูมิที่ป้อนเข้า

$$T_{h,in} = 20 \text{ องศาเซลเซียส (C}^\circ\text{)}$$

ช่วงอุณหภูมิขาออก

$$T_{h,out} = 20 - 40 \text{ องศาเซลเซียส (C}^\circ\text{)}$$

ช่วงอัตราการไหลของของไหล (น้ำ)

$$F_w = 5 - 25 \text{ ลิตรต่อนาที (liter/min)}$$

ช่วงความเร็วของของไหล (น้ำมันพาราฟิน)

$$v_p = F_p/A_i = 0.01 - 0.20 \text{ เมตรต่อวินาที (m/s)}$$

ช่วงของค่าความหนืด (Viscosity) (เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ 0 - 60 C^o)

$$\mu = 1.50 - 0.45 \text{ เซนต์พอยต์ (cP)}$$

ช่วงของค่าความหนาแน่น (Density) (เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ 0 - 60 C^o)

$$\rho = 1,000 - 980 \text{ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m}^3\text{)}$$

ช่วงของค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Heat capacity) (เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ 0 - 60 C^o)

$$C_p = 4.2 - 4.18 \text{ กิโลจูลต่อกิโลกรัมเคลวิน (kJ/kg-K)}$$

ช่วงของค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) (เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ 0 - 60 C^o)

$$k = 0.566 - 0.660 \text{ วัตต์ต่อเมตรเคลวิน (W/m-K)}$$

การประมาณค่าระยะทางของเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds Number) ของท่อทรงกระบอกกลาง

$$D_h = \frac{4V}{A} = 0.04 \text{ เมตร (m) or (4 x flow Volumn / Wetted Area)}$$

ตารางที่ ค-2 ตารางแสดงลักษณะเฉพาะของน้ำเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ

Temperature		Viscosity	Density		Heat Capacity		Thermal	
°F	°C		kg/m ³	lb/ft ³	BTU/lb-°F	kJ/kg-C	BTU/ft-hr-°F	W/m-K
32	0	0.00179		999.8		4.225		0.566
40	4.44	0.00155		999.8		4.208		0.575
50	10	0.00131		999.2		4.195		0.585
60	15.56	0.00112		998.6		4.186		0.595
70	21.11	0.00098		887.4		4.179		0.604
80	26.67	0.00086		995.8		4.179		0.614
90	32.22	0.000765		994.9		4.174		0.623
100	37.78	0.000682		993.0		4.174		0.630
110	43.33	0.000616		990.6		4.174		0.637
120	48.89	0.000562		988.8		4.174		0.644
130	54.44	0.000513		985.7		4.179		0.649
140	60	0.000471		983.3		4.179		0.654
150	65.55	0.00043		980.3		4.183		0.659
160	71.11	0.000401		977.3		4.186		0.665
170	76.67	0.000372		973.7		4.191		0.668
180	82.22	0.000347		970.2		4.195		0.673
190	87.78	0.000327		966.7		4.199		0.675
200	93.33	0.000306		963.2		4.204		0.678
220	104.4	0.000267		955.1		4.216		0.684
240	115.6	0.000244		946.7		4.229		0.685
260	126.7	0.000219		937.2		4.250		0.685
280	137.8	0.000198		928.1		4.271		0.685
300	148.9	0.000186		918		4.296		0.684
350	176.7	0.000157		890.4		4.371		0.677
400	204.4	0.000136		859.4		4.467		0.665
450	232.2	0.000120		825.7		4.585		0.646



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

กรณีที่ 1.

ผลจากการทดลองเพื่อที่พารามิเตอร์ต่างกันในเรื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ตารางที่ ง-1 ผลของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ค่า เรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ อัตราส่วน
ระยะห่างระหว่างแผ่นบัพเฟิลเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ $(S/D) = 1$,
 $d_o = 0.5D$, $x_o = 0.75$ cm, $f = 1$ Hz, Cool Flow = 20 l/min

การทดลองที่	Overall Heat transfer coefficient	Reynolds Number		
	$W/m^2 \cdot C^0$	การสั่น (Re_{os})	สายร้อน (Re_n)	สายเย็น (Re_c)
1	165.6911283	845.6722	226.7736	2205.902
2	196.6790237	904.073	303.0428	2217.956
3	212.9999779	941.5613	378.7305	2198.68
4	181.9470478	954.2724	447.8173	2196.275
5	236.6504877	954.2724	511.7912	2193.871
6	230.539004	961.5806	580.1746	2181.863
7	244.2992166	961.5806	644.6384	2189.065
8	240.7265775	987.3966	728.1399	2191.467
9	280.3514021	981.8351	789.8603	2208.311
10	271.2150224	992.9733	865.3891	2193.871
11	279.2452403	1002.3	940.7109	2208.311
12	300.5356508	1013.541	1019.209	2232.449

ตารางที่ ง-2 ผลของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ค่า เรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ อัตราส่วน
ระยะห่างระหว่างแผ่นบัฟเฟิลเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ (S/D) = 1.5,

$$d_o = 0.5D, x_o = 0.75 \text{ cm}, f = 1 \text{ Hz}, \text{Cool Flow} = 20 \text{ l/min}$$

การทดลองที่	Overall Heat transfer coefficient	Reynolds Number		
	$w/m^2 \cdot C^\circ$	การสั่น (Re_{os})	สายร้อน (Re_h)	สายเย็น (Re_c)
1	214.5767704	699.1136	187.4728	2143.142
2	231.3812729	781.3152	261.8947	2157.927
3	233.2489691	816.9838	328.6209	2180.904
4	249.9558351	836.6789	392.6335	2208.311
5	269.6236775	848.3522	454.9845	2211.203
6	322.9126175	866.4521	522.7783	2201.568
7	295.7239676	878.2845	588.7972	2222.784
8	317.6395723	884.8535	652.521	2174.671
9	320.5806076	898.8017	723.0621	2217.956
10	344.029624	911.1352	794.0661	2234.868
11	353.4541791	905.835	850.1736	2220.37
12	411.3517252	888.3255	893.2929	2246.97

ตารางที่ ง-3 ผลของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ค่า เรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ อัตราส่วน
ระยะห่างระหว่างแผ่นบัฟเฟิลเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ (S/D) = 2,

$$d_o = 0.5D, x_o = 0.75 \text{ cm}, f = 1 \text{ Hz}, \text{Cool Flow} = 20 \text{ l/min}$$

การทดลองที่	Overall Heat transfer coefficient	Reynolds Number		
	$w/m^2 \cdot C^\circ$	การสั่น (Re_{os})	สายร้อน (Re_h)	สายเย็น (Re_c)
1	211.5675126	695.4919	186.5016	2181.863
2	213.2455793	771.3908	258.5681	2182.343
3	271.4401692	804.0796	323.4304	2180.424
4	277.8956356	813.417	381.7172	2202.049
5	319.9811713	824.1585	442.0091	2179.945

การทดลองที่	Overall Heat transfer coefficient	Reynolds Number		
	w/m^2-C°	การสั่น (Re_{os})	สายร้อน (Re_h)	สายเย็น (Re_c)
6	289.9262869	834.3604	503.4156	2181.384
7	353.8717251	845.0033	566.4856	2198.199
8	345.6753662	854.4076	630.0692	2216.509
9	357.1002502	855.0826	687.8912	2178.985
10	362.8496111	865.9404	754.6783	2184.743
11	401.0541421	869.6979	816.257	2177.547
12	404.3914585	871.41	876.2828	2215.544

ตารางที่ ง-4 ผลของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ค่า เรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ อัตราส่วนระยะห่างระหว่างแผ่นบัพเฟิลเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ $(S/D) = 2.5$,
 $d_o = 0.5D$, $x_o = 0.75$ cm, $f = 1$ Hz, Cool Flow = 20 l/min

การทดลองที่	Overall Heat transfer coefficient	Reynolds Number		
	w/m^2-C°	การสั่น (Re_{os})	สายร้อน (Re_h)	สายเย็น (Re_c)
1	141.4632434	837.3423	224.5399	2165.096
2	151.8962201	890.0653	298.3475	2165.096
3	170.6988478	916.4567	368.6325	2198.68
4	230.0017203	911.1352	427.574	2196.275
5	233.944295	920.016	493.419	2225.199
6	239.4707272	936.1452	564.828	2186.663
7	236.6723712	937.9484	628.7955	2189.065
8	250.0251298	950.6303	701.0271	2220.37
9	260.899482	985.5411	792.8417	2251.817
10	287.9047553	979.9847	854.0693	2246.97
11	267.0016628	978.136	918.0319	2222.784
12	289.2630317	979.9847	985.4646	2254.241

ตารางที่ ง-5 ผลของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ค่า เรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ อัตราส่วนระหว่าง
รูภายในแผ่นบัพเฟิลเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ $(d_o/D) = 0.4$,

$$S = 1.5D, x_o = 0.75 \text{ cm}, f = 1 \text{ Hz}, \text{Cool Flow} = 20 \text{ l/min}$$

การทดลองที่	Overall Heat transfer coefficient	Reynolds Number		
	w/m^2-C°	การสั่น (Re_{os})	สายร้อน (Re_h)	สายเย็น (Re_c)
1	216.7441	722.415	193.7212	2191.467
2	230.2834	767.0866	257.1253	2179.465
3	300.2566	809.5416	325.6274	2210.721
4	281.6554	806.3247	378.389	2205.902
5	304.9452	817.6338	438.5098	2234.868
6	348.2109	825.7967	498.2487	2246.97
7	372.334	834.0297	559.129	2254.241
8	340.0369	865.9404	638.5739	2232.449
9	374.5181	865.9404	696.6261	2193.871
10	408.6292	860.8372	750.2308	2239.706
11	423.0758	864.2367	811.1314	2217.956
12	426.3164	877.9398	882.8491	2254.241

ตารางที่ ง-6 ผลของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ค่า เรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ อัตราส่วนระหว่าง
รูภายในแผ่นบัพเฟิลเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ $(d_o/D) = 0.5$,

$$S = 1.5D, x_o = 0.75 \text{ cm}, f = 1 \text{ Hz}, \text{Cool Flow} = 20 \text{ l/min}$$

การทดลองที่	Overall Heat transfer coefficient	Reynolds Number		
	w/m^2-C°	การสั่น (Re_{os})	สายร้อน (Re_h)	สายเย็น (Re_c)
1	214.5768	699.1136	187.4728	2143.142
2	231.3813	781.3152	261.8947	2157.927
3	233.249	816.9838	328.6209	2180.904
4	249.9558	836.6789	392.6335	2208.311
5	269.6237	848.3522	454.9845	2211.203

การทดลองที่	Overall Heat	Reynolds Number		
	transfer coefficient	การสั่น (Re_{os})	สายร้อน (Re_h)	สายเย็น (Re_c)
	w/m^2-C^0			
6	322.9126	866.4521	522.7783	2201.568
7	295.724	878.2845	588.7972	2222.784
8	317.6396	884.8535	652.521	2174.671
9	320.5806	898.8017	723.0621	2217.956
10	344.0296	911.1352	794.0661	2234.868
11	353.4542	905.835	850.1736	2220.37
12	411.3517	888.3255	893.2929	2246.97

ตารางที่ ง-7 ผลของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ค่า เรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ อัตราส่วนระหว่าง
รูภายในแผ่นบัพเฟิลเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ (d_0/D) = 0.6 ,

$$S = 1.5D, x_0 = 0.75 \text{ cm}, f = 1 \text{ Hz}, \text{Cool Flow} = 20 \text{ l/min}$$

การทดลองที่	Overall Heat	Reynolds Number		
	transfer coefficient	การสั่น (Re_{os})	สายร้อน (Re_h)	สายเย็น (Re_c)
	w/m^2-C^0			
1	233.2197	653.8195	175.3268	2131.727
2	199.0566	803.1192	269.2034	2174.671
3	216.3455	849.0233	341.5083	2210.721
4	226.0171	864.2367	405.5657	2217.956
5	263.4368	881.3915	472.7041	2210.721
6	263.663	877.9398	529.7095	2191.467
7	310.1036	877.9398	588.5661	2239.706
8	303.0174	912.9067	673.2084	2201.087
9	304.6886	936.1452	753.104	2198.68
10	287.4956	939.7538	819.0075	2222.784
11	292.5591	946.9964	888.8058	2227.615
12	340.6553	952.4504	957.7763	2251.817

ตารางที่ ง-8 ผลของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ค่า เรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ อัตราส่วนระหว่าง
รูภายในแผ่นบัพเฟิลเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ $(d_o/D) = 0.7$,

$$S = 1.5D, x_o = 0.75 \text{ cm}, f = 1 \text{ Hz}, \text{Cool Flow} = 20 \text{ l/min}$$

การทดลองที่	Overall Heat transfer coefficient	Reynolds Number		
	w/m^2-C°	การสั่น (Re_{os})	สายร้อน (Re_h)	สายเย็น (Re_c)
1	184.7603	716.6589	192.1777	2143.618
2	202.9383	756.4265	253.5521	2169.882
3	206.6015	809.5416	325.6274	2186.663
4	240.6577	822.5231	385.9905	2208.311
5	257.393	844.0007	452.6508	2213.132
6	295.7008	852.3852	514.291	2210.721
7	295.8993	864.2367	579.3796	2217.956
8	305.7436	867.6468	639.8323	2165.096
9	327.5242	876.2178	704.894	2215.544
10	361.5042	867.6468	756.1654	2225.199
11	382.9867	852.3852	800.0082	2179.465
12	423.559	871.0674	875.9383	2230.032

ตารางที่ ง-9 ผลของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ค่า เรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ

$$(x_o) = 0 \text{ cm}, d_o/D = 0.5, S = 1.5D, f = 1 \text{ Hz}, \text{Cool Flow} = 20 \text{ l/min}$$

การทดลองที่	Overall Heat transfer coefficient	Reynolds Number		
	w/m^2-C°	การสั่น (Re_{os})	สายร้อน (Re_h)	สายเย็น (Re_c)
1	196.8984	0	193.3342	2166.053
2	220.3664	0	260.4344	2145.523
3	233.9353	0	321.631	2177.547
4	263.2807	0	380.1255	2203.494
5	262.1904	0	446.9486	2181.863
6	290.9777	0	504.6144	2210.721

การทดลองที่	Overall Heat transfer coefficient w/m^2-C°	Reynolds Number		
		การสั่น (Re_{os})	สายร้อน (Re_h)	สายเย็น (Re_c)
7	321.7329	0	577.3282	2217.956
8	369.135	0	628.8262	2193.871
9	342.5995	0	698.2736	2221.335
10	358.5123	0	757.0588	2187.624
11	404.6705	0	825.2872	2188.104
12	402.5307	0	894.3423	2182.823

ตารางที่ ง-10 ผลของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ค่า เรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ

$(x_0) = 0.25$ cm, $d_0/D = 0.5$, $S = 1.5D$, $f = 1$ Hz, Cool Flow = 20 l/min

การทดลองที่	Overall Heat transfer coefficient w/m^2-C°	Reynolds Number		
		การสั่น (Re_{os})	สายร้อน (Re_h)	สายเย็น (Re_c)
1	228.7239	240.6124	193.5663	2145.047
2	225.7947	262.4214	263.8888	2196.275
3	231.9008	272.8699	329.2749	2156.972
4	259.7355	269.3106	379.1431	2194.832
5	298.5212	272.8699	439.0332	2209.275
6	325.7411	278.1201	503.4156	2199.162
7	341.9756	283.3436	569.856	2200.605
8	363.5789	285.2527	631.065	2179.945
9	382.122	288.6468	696.6261	2215.544
10	356.7528	295.0667	771.4634	2177.068
11	369.588	293.3365	825.9351	2198.68
12	395.2684	294.7201	889.1043	2235.835

ตารางที่ ง-11 ผลของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ค่า เรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ

$(x_0) = 0.5 \text{ cm}, d_0/D = 0.5, S = 1.5D, f = 1 \text{ Hz}, \text{Cool Flow} = 20 \text{ l/min}$

การทดลองที่	Overall heat transfer coefficient	Reynolds Number		
	$\text{w/m}^2\text{-C}^0$	การสั่น (Re_{os})	สายร้อน (Re_p)	สายเย็น (Re_c)
1	227.3308	472.2641	189.962	2175.15
2	213.6368	520.6688	261.7902	2150.29
3	229.8906	538.1924	324.7211	2177.068
4	296.9661	545.7398	384.154	2176.588
5	288.7161	547.2603	440.2564	2161.271
6	291.8184	555.7993	503.0166	2181.863
7	338.1317	566.2393	569.4056	2212.167
8	315.2097	578.8867	640.3361	2210.721
9	353.1724	582.0832	702.4057	2228.582
10	379.8274	582.7699	761.8373	2187.143
11	381.1579	591.7535	833.0875	2236.319
12	385.2682	594.306	896.4439	2229.065

ตารางที่ ง-12 ผลของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ค่า เรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ

$(x_0) = 0.75 \text{ cm}, d_0/D = 0.5, S = 1.5D, f = 1 \text{ Hz}, \text{Cool Flow} = 20 \text{ l/min}$

การทดลองที่	Overall heat transfer coefficient	Reynolds Number		
	$\text{w/m}^2\text{-C}^0$	การสั่น (Re_{os})	สายร้อน (Re_p)	สายเย็น (Re_c)
1	214.5768	699.1136	187.4728	2143.142
2	231.3813	781.3152	261.8947	2157.927
3	233.249	816.9838	328.6209	2180.904
4	249.9558	836.6789	392.6335	2208.311
5	269.6237	848.3522	454.9845	2211.203

การทดลองที่	Overall Heat transfer	Reynolds Number		
	coefficient	การสั่น (Re_{os})	สายร้อน (Re_p)	สายเย็น (Re_c)
	w/m^2-C^0			
6	322.9126	866.4521	522.7783	2201.568
7	295.724	878.2845	588.7972	2222.784
8	317.6396	884.8535	652.521	2174.671
9	320.5806	898.8017	723.0621	2217.956
10	344.0296	911.1352	794.0661	2234.868
11	353.4542	905.835	850.1736	2220.37
12	411.3517	888.3255	893.2929	2246.97

ตารางที่ ง-13 ผลของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ

(x_0) = 1 cm, $d_0/D = 0.5$, $S = 1.5D$, $f = 1$ Hz, Cool Flow = 20 l/min

การทดลองที่	Overall heat transfer	Reynolds Number		
	coefficient	การสั่น (Re_{os})	สายร้อน (Re_p)	สายเย็น (Re_c)
	w/m^2-C^0			
1	172.4849	1024.828	206.1118	2205.902
2	174.3634	1118.67	281.2315	2234.868
3	188.2551	1154.587	348.3131	2201.087
4	227.5564	1163.709	409.5756	2249.393
5	204.6936	1186.754	477.356	2210.721
6	232.9772	1200.742	543.3553	2208.311
7	263.6474	1210.132	608.4497	2263.944
8	230.2473	1233.83	682.4009	2215.544
9	257.9567	1255.415	757.4611	2256.666
10	277.2963	1269.934	830.0728	2271.228
11	298.129	1267.507	892.2164	2276.087
12	290.6965	1282.107	966.9576	2256.666

ตารางที่ ง-14 ผลของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ

$(x_0) = 0.75 \text{ cm}$, $d_0/D = 0.5$, $S = 1.5D$, $f = 0 \text{ Hz}$, $\text{Cool Flow} = 20 \text{ l/min}$

การทดลองที่	Overall heat transfer coefficient	Reynolds Number		
	$\text{w/m}^2\text{-C}^0$	การสั่น (Re_{os})	สายร้อน (Re_h)	สายเย็น (Re_c)
1	196.898385	0	193.3342	2166.053
2	220.366393	0	260.4344	2145.523
3	233.935275	0	321.631	2177.547
4	263.280729	0	380.1255	2203.494
5	262.190447	0	446.9486	2181.863
6	290.977675	0	504.6144	2210.721
7	321.732882	0	577.3282	2217.956
8	369.135019	0	628.8262	2193.871
9	342.599533	0	698.2736	2221.335
10	358.512306	0	757.0588	2187.624
11	404.670539	0	825.2872	2188.104
12	402.530692	0	894.3423	2182.823

ตารางที่ ง-15 ผลของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ

$(x_0) = 0.75 \text{ cm}$, $d_0/D = 0.5$, $S = 1.5D$, $f = 0.5 \text{ Hz}$, $\text{Cool Flow} = 20 \text{ l/min}$

การทดลองที่	Overall heat transfer coefficient	Reynolds Number		
	$\text{w/m}^2\text{-C}^0$	การสั่น (Re_{os})	สายร้อน (Re_h)	สายเย็น (Re_c)
1	190.033557	351.2372	188.374	2131.727
2	218.296309	383.5433	257.1253	2160.315
3	232.186871	403.1623	324.3334	2184.263
4	257.458937	412.0793	386.758	2157.927
5	270.090233	416.1888	446.4171	2174.671

การทดลองที่	Overall Heat transfer coefficient	Reynolds Number		
	w/m^2-C^0	การสั่น (Re_{os})	สายร้อน (Re_h)	สายเย็น (Re_c)
6	292.540066	422.8361	510.2406	2184.263
7	307.366083	428.7242	574.8287	2193.871
8	314.608448	432.1184	637.3176	2222.784
9	368.586652	436.3908	702.1296	2225.199
10	373.689892	449.4009	783.3173	2213.132
11	399.352751	447.6499	840.2857	2222.784
12	406.946112	450.2782	905.5922	2239.706

ตารางที่ ง-16 ผลของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ

$(x_0) = 0.75 \text{ cm}$, $d_0/D = 0.5$, $S = 1.5D$, $f = 1 \text{ Hz}$, Cool Flow = 20 l/min

การทดลองที่	Overall heat transfer coefficient	Reynolds Number		
	w/m^2-C^0	การสั่น (Re_{os})	สายร้อน (Re_h)	สายเย็น (Re_c)
1	214.57677	699.1136	187.4728	2143.142
2	231.381273	781.3152	261.8947	2157.927
3	233.248969	816.9838	328.6209	2180.904
4	249.955835	836.6789	392.6335	2208.311
5	269.623677	848.3522	454.9845	2211.203
6	322.912617	866.4521	522.7783	2201.568
7	295.723968	878.2845	588.7972	2222.784
8	317.639572	884.8535	652.521	2174.671
9	320.580608	898.8017	723.0621	2217.956
10	344.029624	911.1352	794.0661	2234.868
11	353.454179	905.835	850.1736	2220.37
12	411.351725	888.3255	893.2929	2246.97

ตารางที่ ง-17 ผลของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ

$(x_0) = 0.75 \text{ cm}, d_0/D = 0.5, S = 1.5D, f = 1.5 \text{ Hz}, \text{Cool Flow} = 20 \text{ l/min}$

การทดลองที่	Overall heat transfer coefficient	Reynolds Number		
	$\text{w/m}^2\text{-C}^0$	การสั่น (Re_{os})	สายร้อน (Re_h)	สายเย็น (Re_c)
1	212.93286	1132.373	202.4364	2205.902
2	258.573707	1211.898	270.8165	2181.863
3	218.270691	1298.911	348.3131	2210.721
4	226.069964	1322.087	413.6161	2191.467
5	260.810724	1327.28	474.5608	2232.449
6	298.3148	1361.399	547.6047	2225.199
7	324.892585	1348.203	602.5518	2203.494
8	327.396297	1372.021	674.5165	2242.127
9	316.929703	1385.377	742.9992	2198.68
10	323.216856	1393.431	809.5957	2227.615
11	348.302221	1404.218	878.6213	2186.663
12	344.695312	1406.923	943.1933	2210.721

ตารางที่ ง-18 ผลของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ

$(x_0) = 0.75 \text{ cm}, d_0/D = 0.5, S = 1.5D, f = 2 \text{ Hz}, \text{Cool Flow} = 20 \text{ l/min}$

การทดลองที่	Overall heat transfer coefficient	Reynolds Number		
	$\text{w/m}^2\text{-C}^0$	การสั่น (Re_{os})	สายร้อน (Re_h)	สายเย็น (Re_c)
1	283.457422	1421.9	190.6468	2181.863
2	290.236342	1531.11	256.6119	2193.871
3	314.777428	1587.143	319.2036	2201.087
4	336.49946	1625.54	381.4136	2215.544
5	293.73347	1684.664	451.7558	2193.871

การทดลองที่	Overall Heat transfer coefficient	Reynolds Number		
	w/m^2-C^0	การสั่น (Re_{os})	สายร้อน (Re_h)	สายเย็น (Re_c)
6	297.744787	1759.329	530.75	2189.065
7	297.642759	1794.099	601.3771	2196.275
8	303.960655	1847.169	681.0826	2205.902
9	301.238186	1886.742	758.9168	2203.494
10	356.432759	1908.545	831.6607	2227.615
11	367.853513	1908.545	895.6346	2208.311
12	338.029877	1926.825	968.7998	2196.275

ตารางที่ ง-19 ผลของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ

$(x_0) = 0.75 \text{ cm}$, $d_0/D = 0.5$, $S = 1.5D$, $f = 1 \text{ Hz}$, Cool Flow = 300 l/min

การทดลองที่	Overall heat transfer coefficient	Reynolds Number		
	w/m^2-C^0	การสั่น (Re_{os})	สายร้อน (Re_h)	สายเย็น (Re_c)
1	232.5834	692.7194	185.7581	585.464
2	217.1539	820.8905	275.1603	600.1087
3	228.4757	840.666	338.1468	606.2055
4	261.373	845.6722	396.8538	612.9014
5	287.7928	871.0674	467.1671	615.3325
6	293.1284	877.9398	529.7095	617.1541
7	303.6724	897.0495	601.3771	620.1868
8	307.2176	912.9067	673.2084	625.0288
9	320.3235	918.2352	738.6958	623.8196
10	339.8409	925.3722	806.4738	623.8196
11	353.0651	936.1452	878.6213	632.2634
12	371.1631	936.1452	941.38	629.8561

ตารางที่ ง-20 ผลของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ

$(x_0) = 0.75 \text{ cm}$, $d_0/D = 0.5$, $S = 1.5D$, $f = 1 \text{ Hz}$, $\text{Cool Flow} = 600 \text{ l/min}$

การทดลองที่	Overall heat transfer coefficient	Reynolds Number		
	$\text{w/m}^2\text{-C}^0$	การสั่น (Re_{os})	สายร้อน (Re_h)	สายเย็น (Re_c)
1	228.099	701.072	187.9979	1106.566
2	237.794	799.9251	268.1327	1134.4
3	223.6885	835.6846	336.1431	1144.122
4	246.8716	855.758	401.5868	1147.772
5	265.4267	857.4484	459.863	1144.122
6	291.1076	877.9398	529.7095	1145.338
7	310.8465	900.5564	603.7281	1152.642
8	303.6112	895.2997	660.2245	1145.338
9	313.4744	905.835	728.7202	1166.049
10	341.5896	914.6805	797.1559	1166.049
11	352.5153	921.7991	865.1568	1152.642
12	345.0216	925.3722	930.5467	1168.488

ตารางที่ ง-21 ผลของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ

$(x_0) = 0.75 \text{ cm}$, $d_0/D = 0.5$, $S = 1.5D$, $f = 1 \text{ Hz}$, $\text{Cool Flow} = 900 \text{ l/min}$

การทดลองที่	Overall heat transfer coefficient	Reynolds Number		
	$\text{w/m}^2\text{-C}^0$	การสั่น (Re_{os})	สายร้อน (Re_h)	สายเย็น (Re_c)
1	204.4907	720.9716	193.3342	1661.658
2	181.4392	839.0028	281.2315	1674.337
3	209.0191	854.0702	343.5384	1687.045
4	258.4246	857.4484	402.3801	1654.427
5	244.3869	859.1415	460.771	1688.862

การทดลองที่	Overall Heat transfer coefficient	Reynolds Number		
	w/m^2-C^0	การสั่น (Re_{os})	สายร้อน (Re_h)	สายเย็น (Re_c)
6	272.0449	900.5564	543.3553	1665.277
7	271.9697	902.3135	604.9061	1665.277
8	275.2495	921.7991	679.766	1683.411
9	287.9364	920.016	740.1285	1679.78
10	302.3354	936.1452	815.8627	1683.411
11	325.3866	936.1452	878.6213	1701.599
12	335.8379	946.9964	952.2919	1714.358

ตารางที่ ง-22 ผลของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ

(x_0) = 0.75 cm, $d_0/D = 0.5$, $S = 1.5D$, $f = 1$ Hz, Cool Flow = 1200 l/min

การทดลองที่	Overall heat transfer coefficient	Reynolds Number		
	w/m^2-C^0	การสั่น (Re_{os})	สายร้อน (Re_h)	สายเย็น (Re_c)
1	214.5768	699.1136	187.4728	2143.142
2	231.3813	781.3152	261.8947	2157.927
3	233.249	816.9838	328.6209	2180.904
4	249.9558	836.6789	392.6335	2208.311
5	269.6237	848.3522	454.9845	2211.203
6	322.9126	866.4521	522.7783	2201.568
7	295.724	878.2845	588.7972	2222.784
8	317.6396	884.8535	652.521	2174.671
9	320.5806	898.8017	723.0621	2217.956
10	344.0296	911.1352	794.0661	2234.868
11	353.4542	905.835	850.1736	2220.37
12	411.3517	888.3255	893.2929	2246.97

ตารางที่ ง-23 ผลของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ

$(x_0) = 0.75 \text{ cm}, d_0/D = 0.5, S = 1.5D, f = 1 \text{ Hz}, \text{Cool Flow} = 1500 \text{ l/min}$

การทดลองที่	Overall heat transfer coefficient	Reynolds Number		
	$\text{w/m}^2\text{-C}^0$	การสั่น (Re_{os})	สายร้อน (Re_h)	สายเย็น (Re_c)
1	185.6044	764.0262	204.8796	2718.339
2	221.8176	839.0028	281.2315	2682.5
3	231.2223	852.3852	342.8606	2679.523
4	255.8078	865.9404	406.3652	2703.382
5	242.1807	871.0674	467.1671	2688.459
6	264.1937	884.8535	533.8809	2760.389
7	274.0672	890.0653	596.695	2715.345
8	324.6677	907.5993	669.2946	2715.345
9	340.0679	918.2352	738.6958	2754.367
10	348.6741	918.2352	800.2538	2784.519
11	317.7034	934.3442	876.931	2778.48
12	340.3384	932.5454	937.76	2751.358

ตารางที่ ง-24 ผลของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ

$(x_0) = 0.75 \text{ cm}, d_0/D = 0.5, S = 1.5D, f = 1 \text{ Hz}, \text{Cool Flow} = 2100 \text{ l/min}$

การทดลองที่	Overall heat transfer coefficient	Reynolds Number		
	$\text{w/m}^2\text{-C}^0$	การสั่น (Re_{os})	สายร้อน (Re_h)	สายเย็น (Re_c)
1	209.873	696.8825	186.8745	3208.287
2	224.5531	771.6992	258.6715	3269.197
3	236.0953	814.3884	327.5769	3272.795
4	282.9908	837.3423	392.9448	3236.89
5	295.3261	830.7281	445.5325	3298.021

การทดลองที่	Overall Heat transfer coefficient w/m^2-C^0	Reynolds Number		
		การสั่น (Re_{os})	สายร้อน (Re_h)	สายเย็น (Re_c)
6	284.2686	854.0702	515.3076	3222.574
7	325.7681	881.3915	590.8801	3323.315
8	311.1474	884.8535	652.521	3262.007
9	351.8948	912.9067	734.4092	3305.241
10	330.3764	902.3135	786.3779	3305.241
11	341.5042	921.7991	865.1568	3247.645
12	347.2639	921.7991	926.9537	3316.082



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรณีที่ 2

ตารางแสดงการทดลองที่ค่าสภาวะต่างๆและผลการทดลอง แสดงผลเป็นอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

รวมทั้งค่าที่คำนวณได้จากการทดลอง

ตารางที่ ง-25 การทดลองที่อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางภายในแผ่นบัพเฟิลเทียบกับเส้นผ่านกลางของท่อ (d_0/D) เท่ากับ 0.4 จำนวน 100 การทดลอง

การทดลองที่	ระยะห่างระหว่างบัพเฟิลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ	แอมปริจูดของการสั่น	ความถี่ในการสั่น	อัตราการไหลของของไหล	
	S/D	เมตร (m)	รอบต่อวินาที (Hz)	ของไหลสายร้อน ลิตรต่อนาที (l/min)	ของไหลสายเย็น ลิตรต่อนาที (l/min)
1	1	0.0025	0	4	5
2	1	0.005	0.4	6.4	22.14286
3	1	0.005	0.266666	8.8	19.69388
4	1	0.005	0.133333	11.2	17.2449
5	1	0.0025	0.533333	13.6	14.79592
6	1	0.005	0.222223	4.48	12.34694
7	1	0.0025	0.088889	6.88	9.89796
8	1	0.005	0.488889	9.28	7.44898
9	1	0.0025	0.355556	11.68	24.59184
10	1	0.005	0.044444	12.16	19.34402
11	1	0.005	0.444445	4.96	16.89504
12	1	0.005	0.311112	7.36	14.44606
13	1	0.0025	0.177777	9.76	11.99708
14	1	0.005	0.577778	10.24	9.5481
15	1	0.0025	0.207407	12.64	7.09912

การทดลองที่	ระยะห่างระหว่าง บัพเฟิลต่อเส้น ผ่านศูนย์กลางท่อ	แอมปริจูดของการ สั่น	ความถี่ในการ สั่น	อัตราการไหลของของไหล	
	S/D	เมตร (m)	รอบต่อวินาที (Hz)	ของไหล สายร้อน ลิตรต่อนาที (l/min)	ของไหล สายเย็น ลิตรต่อนาที (l/min)
16	1	0.005	0.074074	5.44	24.24198
17	1	0.0025	0.474073	7.84	21.793
18	1.5	0.005	0.599999	6	7.85714
19	1.5	0.01	1.000001	8.4	5.40816
20	1.5	0.0075	0.866666	10.8	22.55102
21	1.5	0.0075	0.733333	13.2	20.10204
22	1.5	0.0075	1.133334	4.08	17.65306
23	1.5	0.01	0.822222	6.48	15.20408
24	1.5	0.0075	0.688889	8.88	12.7551
25	1.5	0.0075	1.088888	11.28	10.30612
26	1.5	0.0075	0.955555	13.68	5.0583
27	1.5	0.01	0.644445	4.56	22.20116
28	1.5	0.0075	1.044445	6.96	19.75218
29	1.5	0.0075	0.911111	9.36	17.3032
30	1.5	0.0075	0.777778	11.76	14.85422
31	1.5	0.01	1.177778	12.24	12.40524
32	1.5	0.0075	0.807408	5.04	9.95626
33	1.5	0.01	0.674075	7.44	7.50728
34	1.5	0.005	1.074074	9.84	24.65014
35	1.5	0.005	1.200001	8	10.71428
36	1.5	0.0025	1.6	10.4	8.2653
37	1.5	0.005	1.466667	12.8	5.81632
38	1.5	0.0025	1.333334	5.6	22.95918
39	1.5	0.005	1.733333	6.08	20.5102

การทดลองที่	ระยะห่างระหว่าง บัพเฟิลต่อเส้น ผ่านศูนย์กลางท่อ	แอมปริจูดของการ สั่น	ความถี่ในการ สั่น	อัตราการไหลของของไหล	
	S/D	เมตร (m)	รอบต่อวินาที (Hz)	ของไหล สายร้อน ลิตรต่อนาที (l/min)	ของไหล สายเย็น ลิตรต่อนาที (l/min)
40	1.5	0.0025	1.422221	8.48	18.06122
41	1.5	0.005	1.288888	10.88	15.61224
42	1.5	0.005	1.68889	13.28	13.16326
43	1.5	0.005	1.555556	4.16	7.91546
44	1.5	0.0025	1.244444	6.56	5.46648
45	1.5	0.005	1.644444	8.96	22.60932
46	1.5	0.0025	1.511111	11.36	20.16034
47	1.5	0.005	1.377778	13.76	17.71138
48	1.5	0.0025	1.777777	4.64	15.2624
49	1.5	0.005	1.407407	7.04	12.81342
50	1.5	0.005	1.274074	9.44	10.36444
51	1.5	0.005	1.674074	11.84	5.11662
52	2	0.0075	0.2	10	13.57142
53	2	0.0075	0.066667	12.4	11.12244
54	2	0.01	0.466666	5.2	8.67346
55	2	0.0075	0.333333	7.6	6.22448
56	2	0.01	0.022223	8.08	23.36734
57	2	0.005	0.422222	10.48	20.91836
58	2	0.01	0.288889	12.88	18.46938
59	2	0.0075	0.155556	5.68	16.0204
60	2	0.0075	0.555556	6.16	10.7726
61	2	0.0075	0.244444	8.56	8.32362
62	2	0.01	0.11111	10.96	5.87464
63	2	0.0075	0.511112	13.36	23.0175

การทดลองที่	ระยะห่างระหว่าง บัพเฟิลต่อเส้น ผ่านศูนย์กลางท่อ	แอมปริจูดของการ สั่น	ความถี่ในการ สั่น	อัตราการไหลของของไหล	
	S/D	เมตร (m)	รอบต่อวินาที (Hz)	ของไหล สายร้อน ลิตรต่อนาที (l/min)	ของไหล สายเย็น ลิตรต่อนาที (l/min)
64	2	0.01	0.377779	4.24	20.56852
65	2	0.0075	0.007407	6.64	18.11954
66	2	0.01	0.407407	9.04	15.67056
67	2	0.0075	0.274073	11.44	13.22158
68	2	0.0075	0.14074	13.84	7.97376
69	2	0.0025	0.799999	12	16.42858
70	2	0.005	0.666666	4.8	13.9796
71	2	0.0025	1.066667	7.2	11.53062
72	2	0.005	0.933334	9.6	9.08164
73	2	0.005	0.622222	10.08	6.63266
74	2	0.005	1.022222	12.48	23.77552
75	2	0.0025	0.888889	5.28	21.32654
76	2	0.005	0.755555	7.68	18.87756
77	2	0.0025	1.155555	8.16	13.62974
78	2	0.005	0.844445	10.56	11.18076
79	2	0.0025	0.711112	12.96	8.73178
80	2	0.005	1.111111	5.76	6.2828
81	2	0.005	0.977778	6.24	23.42566
82	2	0.005	0.607408	8.64	20.97668
83	2	0.0025	1.007408	11.04	18.5277
84	2	0.005	0.874075	13.44	16.07872
85	2.5	0.0075	1.4	4.4	19.28572
86	2.5	0.0075	1.266667	6.8	16.83674
87	2.5	0.0075	1.666667	9.2	14.38776

การทดลองที่	ระยะห่างระหว่าง บัฟเฟิลต่อเส้น ผ่านศูนย์กลางท่อ	แอมปริจูดของการ สั่น	ความถี่ในการ สั่น	อัตราการไหลของของไหล	
	S/D	เมตร (m)	รอบต่อวินาที (Hz)	ของไหล สายร้อน ลิตรต่อนาที (l/min)	ของไหล สายเย็น ลิตรต่อนาที (l/min)
88	2.5	0.01	1.533334	11.6	11.93878
89	2.5	0.0075	1.222222	12.08	9.4898
90	2.5	0.0075	1.622223	4.88	7.04082
91	2.5	0.0075	1.488888	7.28	24.18368
92	2.5	0.01	1.355555	9.68	21.7347
93	2.5	0.0075	1.755556	10.16	16.48688
94	2.5	0.01	1.444444	12.56	14.0379
95	2.5	0.0075	1.311111	5.36	11.58892
96	2.5	0.01	1.711111	7.76	9.13994
97	2.5	0.0075	1.577777	8.24	6.69096
98	2.5	0.0075	1.207408	10.64	23.83382
99	2.5	0.0075	1.607407	13.04	21.38484
100	2.5	0.01	1.474074	5.84	18.93586

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-26 การทดลอง ที่อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางภายในแผ่นบัพเฟิลเทียบกับเส้นผ่านกลาง
ของท่อ (d_0/D) เท่ากับ 0.5 จำนวน 100 การทดลอง

การทดลองที่	ระยะห่างระหว่าง บัพเฟิลต่อเส้น ผ่านศูนย์กลางท่อ	แอมปริจูดของการ สั่น	ความถี่ในการ สั่น	อัตราการไหลของของไหล	
	S/D	เซนติเมตร (cm)	รอบต่อวินาที (Hz)	ของไหล สายร้อน ลิตรต่อนาที (l/min)	ของไหล สายเย็น ลิตรต่อนาที (l/min)
101	1	0.0025	0	4	5
102	1	0.005	0.4	6.4	22.14286
103	1	0.005	0.266666	8.8	19.69388
104	1	0.005	0.133333	11.2	17.2449
105	1	0.0025	0.533333	13.6	14.79592
106	1	0.005	0.222223	4.48	12.34694
107	1	0.0025	0.088889	6.88	9.89796
108	1	0.005	0.488889	9.28	7.44898
109	1	0.0025	0.355556	11.68	24.59184
110	1	0.005	0.044444	12.16	19.34402
111	1	0.005	0.444445	4.96	16.89504
112	1	0.005	0.311112	7.36	14.44606
113	1	0.0025	0.177777	9.76	11.99708
114	1	0.005	0.577778	10.24	9.5481
115	1	0.0025	0.207407	12.64	7.09912
116	1	0.005	0.074074	5.44	24.24198
117	1	0.0025	0.474073	7.84	21.793
118	1.5	0.0025	0.599999	6	7.85714
119	1.5	0.01	1.000001	8.4	5.40816
120	1.5	0.0075	0.866666	10.8	22.55102
121	1.5	0.0075	0.733333	13.2	20.10204

การทดลองที่	ระยะห่างระหว่าง บัพเฟิลต่อเส้น ผ่านศูนย์กลางท่อ	แอมปริจูดของการ สั่น	ความถี่ในการ สั่น	อัตราการไหลของของไหล	
	S/D	เมตร (m)	รอบต่อวินาที (Hz)	ของไหล สายร้อน ลิตรต่อนาที (l/min)	ของไหล สายเย็น ลิตรต่อนาที (l/min)
122	1.5	0.0075	1.133334	4.08	17.65306
123	1.5	0.01	0.822222	6.48	15.20408
124	1.5	0.0075	0.688889	8.88	12.7551
125	1.5	0.0075	1.088888	11.28	10.30612
126	1.5	0.0075	0.955555	13.68	5.0583
127	1.5	0.01	0.644445	4.56	22.20116
128	1.5	0.0075	1.044445	6.96	19.75218
129	1.5	0.0075	0.911111	9.36	17.3032
130	1.5	0.0075	0.777778	11.76	14.85422
131	1.5	0.01	1.177778	12.24	12.40524
132	1.5	0.0075	0.807408	5.04	9.95626
133	1.5	0.01	0.674075	7.44	7.50728
134	1.5	0.005	1.074074	9.84	24.65014
135	1.5	0.005	1.200001	8	10.71428
136	1.5	0.0025	1.6	10.4	8.2653
137	1.5	0.005	1.466667	12.8	5.81632
138	1.5	0.0025	1.333334	5.6	22.95918
139	1.5	0.005	1.733333	6.08	20.5102
140	1.5	0.0025	1.422221	8.48	18.06122
141	1.5	0.005	1.288888	10.88	15.61224
142	1.5	0.005	1.68889	13.28	13.16326
143	1.5	0.005	1.555556	4.16	7.91546
144	1.5	0.0025	1.244444	6.56	5.46648
145	1.5	0.005	1.644444	8.96	22.60932

การทดลองที่	ระยะห่างระหว่าง บัพเฟิลต่อเส้น ผ่านศูนย์กลางท่อ	แอมปริจูดของการ สั่น	ความถี่ในการ สั่น	อัตราการไหลของของไหล	
	S/D	เมตร (m)	รอบต่อวินาที (Hz)	ของไหล สายร้อน ลิตรต่อนาที (l/min)	ของไหล สายเย็น ลิตรต่อนาที (l/min)
146	1.5	0.0025	1.511111	11.36	20.16034
147	1.5	0.005	1.377778	13.76	17.71138
148	1.5	0.0025	1.777777	4.64	15.2624
149	1.5	0.005	1.407407	7.04	12.81342
150	1.5	0.005	1.274074	9.44	10.36444
151	1.5	0.005	1.674074	11.84	5.11662
152	2	0.0075	0.2	10	13.57142
153	2	0.0075	0.066667	12.4	11.12244
154	2	0.01	0.466666	5.2	8.67346
155	2	0.0075	0.333333	7.6	6.22448
156	2	0.01	0.022223	8.08	23.36734
157	2	0.005	0.422222	10.48	20.91836
158	2	0.01	0.288889	12.88	18.46938
159	2	0.0075	0.155556	5.68	16.0204
160	2	0.0075	0.555556	6.16	10.7726
161	2	0.0075	0.244444	8.56	8.32362
162	2	0.01	0.111111	10.96	5.87464
163	2	0.0075	0.511112	13.36	23.0175
164	2	0.0075	0.377779	4.24	20.56852
165	2	0.0075	0.007407	6.64	18.11954
166	2	0.01	0.407407	9.04	15.67056
167	2	0.0075	0.274073	11.44	13.22158
168	2	0.0075	0.14074	13.84	7.97376
169	2	0.0025	0.799999	12	16.42858

การทดลองที่	ระยะห่างระหว่าง บัพเฟิลต่อเส้น ผ่านศูนย์กลางท่อ	แอมปริจูดของการ สั่น	ความถี่ในการ สั่น	อัตราการไหลของของไหล	
	S/D	เมตร (m)	รอบต่อวินาที (Hz)	ของไหล สายร้อน ลิตรต่อนาที (l/min)	ของไหล สายเย็น ลิตรต่อนาที (l/min)
170	2	0.005	0.666666	4.8	13.9796
171	2	0.0025	1.066667	7.2	11.53062
172	2	0.005	0.933334	9.6	9.08164
173	2	0.005	0.622222	10.08	6.63266
174	2	0.005	1.022222	12.48	23.77552
175	2	0.0025	0.888889	5.28	21.32654
176	2	0.005	0.755555	7.68	18.87756
177	2	0.0025	1.155555	8.16	13.62974
178	2	0.005	0.844445	10.56	11.18076
179	2	0.0025	0.711112	12.96	8.73178
180	2	0.005	1.111111	5.76	6.2828
181	2	0.005	0.977778	6.24	23.42566
182	2	0.005	0.607408	8.64	20.97668
183	2	0.0025	1.007408	11.04	18.5277
184	2	0.005	0.874075	13.44	16.07872
185	2.5	0.0075	1.4	4.4	19.28572
186	2.5	0.0075	1.266667	6.8	16.83674
187	2.5	0.0075	1.666667	9.2	14.38776
188	2.5	0.01	1.533334	11.6	11.93878
189	2.5	0.0075	1.222222	12.08	9.4898
190	2.5	0.0075	1.622223	4.88	7.04082
191	2.5	0.0075	1.488888	7.28	24.18368
192	2.5	0.01	1.355555	9.68	21.7347
193	2.5	0.0075	1.755556	10.16	16.48688

การทดลองที่	ระยะห่างระหว่าง บัพเฟิลต่อเส้น ผ่านศูนย์กลางท่อ	แอมพลิจูดของการ สั่น	ความถี่ในการ สั่น	อัตราการไหลของของไหล	
	S/D	เมตร (m)	รอบต่อวินาที (Hz)	ของไหล สายร้อน ลิตรต่อนาที (l/min)	ของไหล สายเย็น ลิตรต่อนาที (l/min)
194	2.5	0.01	1.444444	12.56	14.0379
195	2.5	0.0075	1.311111	5.36	11.58892
196	2.5	0.01	1.711111	7.76	9.13994
197	2.5	0.0075	1.577777	8.24	6.69096
198	2.5	0.0075	1.207408	10.64	23.83382
199	2.5	0.0075	1.607407	13.04	21.38484
200	2.5	0.01	1.474074	5.84	18.93586

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-27 การทดลองที่อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางภายในแผ่นบัพเฟิลเทียบกับเส้นผ่านกลาง
ของท่อ (d_0/D) เท่ากับ 0.6 จำนวน 100 การทดลอง

การทดลองที่	ระยะห่างระหว่าง บัพเฟิลต่อเส้น ผ่านศูนย์กลางท่อ	แอมปริจูดของการ สั่น	ความถี่ในการ สั่น	อัตราการไหลของของไหล	
	S/D	เซนติเมตร (cm)	รอบต่อวินาที (Hz)	ของไหล สายร้อน ลิตรต่อนาที (l/min)	ของไหล สายเย็น ลิตรต่อนาที (l/min)
201	1	0.0025	0	4	5
202	1	0.005	0.4	6.4	22.14286
203	1	0.005	0.266666	8.8	19.69388
204	1	0.005	0.133333	11.2	17.2449
205	1	0.0025	0.533333	13.6	14.79592
206	1	0.005	0.222223	4.48	12.34694
207	1	0.0025	0.088889	6.88	9.89796
208	1	0.005	0.488889	9.28	7.44898
209	1	0.0025	0.355556	11.68	24.59184
210	1	0.005	0.044444	12.16	19.34402
211	1	0.005	0.444445	4.96	16.89504
212	1	0.005	0.311112	7.36	14.44606
213	1	0.0025	0.177777	9.76	11.99708
214	1	0.005	0.577778	10.24	9.5481
215	1	0.0025	0.207407	12.64	7.09912
216	1	0.005	0.074074	5.44	24.24198
217	1	0.0025	0.474073	7.84	21.793
218	1.5	0.0025	0.599999	6	7.85714
219	1.5	0.01	1.000001	8.4	5.40816
220	1.5	0.0075	0.866666	10.8	22.55102
221	1.5	0.0075	0.733333	13.2	20.10204

การทดลองที่	ระยะห่างระหว่าง บัพเฟิลต่อเส้น ผ่านศูนย์กลางท่อ	แอมปริจูดของการ สั่น	ความถี่ในการ สั่น	อัตราการไหลของของไหล	
	S/D	เมตร (m)	รอบต่อวินาที (Hz)	ของไหล สายร้อน ลิตรต่อนาที (l/min)	ของไหล สายเย็น ลิตรต่อนาที (l/min)
222	1.5	0.0075	1.133334	4.08	17.65306
223	1.5	0.01	0.822222	6.48	15.20408
224	1.5	0.0075	0.688889	8.88	12.7551
225	1.5	0.0075	1.088888	11.28	10.30612
226	1.5	0.0075	0.955555	13.68	5.0583
227	1.5	0.01	0.644445	4.56	22.20116
228	1.5	0.0075	1.044445	6.96	19.75218
229	1.5	0.0075	0.911111	9.36	17.3032
230	1.5	0.0075	0.777778	11.76	14.85422
231	1.5	0.01	1.177778	12.24	12.40524
232	1.5	0.0075	0.807408	5.04	9.95626
233	1.5	0.01	0.674075	7.44	7.50728
234	1.5	0.005	1.074074	9.84	24.65014
235	1.5	0.005	1.200001	8	10.71428
236	1.5	0.0025	1.6	10.4	8.2653
237	1.5	0.005	1.466667	12.8	5.81632
238	1.5	0.0025	1.333334	5.6	22.95918
239	1.5	0.005	1.733333	6.08	20.5102
240	1.5	0.0025	1.422221	8.48	18.06122
241	1.5	0.005	1.288888	10.88	15.61224
242	1.5	0.005	1.68889	13.28	13.16326
243	1.5	0.005	1.555556	4.16	7.91546
244	1.5	0.0025	1.244444	6.56	5.46648
245	1.5	0.005	1.644444	8.96	22.60932

การทดลองที่	ระยะห่างระหว่าง บัพเฟิลต่อเส้น ผ่านศูนย์กลางท่อ	แอมปริจูดของการ สั่น	ความถี่ในการ สั่น	อัตราการไหลของของไหล	
	S/D	เมตร (m)	รอบต่อวินาที (Hz)	ของไหล สายร้อน ลิตรต่อนาที (l/min)	ของไหล สายเย็น ลิตรต่อนาที (l/min)
246	1.5	0.0025	1.511111	11.36	20.16034
247	1.5	0.005	1.377778	13.76	17.71138
248	1.5	0.0025	1.777777	4.64	15.2624
249	1.5	0.005	1.407407	7.04	12.81342
250	1.5	0.005	1.274074	9.44	10.36444
251	1.5	0.005	1.674074	11.84	5.11662
252	2	0.0075	0.2	10	13.57142
253	2	0.0075	0.066667	12.4	11.12244
254	2	0.01	0.466666	5.2	8.67346
255	2	0.0075	0.333333	7.6	6.22448
256	2	0.01	0.022223	8.08	23.36734
257	2	0.005	0.422222	10.48	20.91836
258	2	0.01	0.288889	12.88	18.46938
259	2	0.0075	0.155556	5.68	16.0204
260	2	0.0075	0.555556	6.16	10.7726
261	2	0.0075	0.244444	8.56	8.32362
262	2	0.01	0.111111	10.96	5.87464
263	2	0.0075	0.511112	13.36	23.0175
264	2	0.0075	0.377779	4.24	20.56852
265	2	0.0075	0.007407	6.64	18.11954
266	2	0.01	0.407407	9.04	15.67056
267	2	0.0075	0.274073	11.44	13.22158
268	2	0.0075	0.14074	13.84	7.97376
269	2	0.0025	0.799999	12	16.42858

การทดลองที่	ระยะห่างระหว่าง บัพเฟิลต่อเส้น ผ่านศูนย์กลางท่อ	แอมปริจูดของการ สั่น	ความถี่ในการ สั่น	อัตราการไหลของของไหล	
	S/D	เมตร (m)	รอบต่อวินาที (Hz)	ของไหล สายร้อน ลิตรต่อนาที (l/min)	ของไหล สายเย็น ลิตรต่อนาที (l/min)
270	2	0.005	0.666666	4.8	13.9796
271	2	0.0025	1.066667	7.2	11.53062
272	2	0.005	0.933334	9.6	9.08164
273	2	0.005	0.622222	10.08	6.63266
274	2	0.005	1.022222	12.48	23.77552
275	2	0.0025	0.888889	5.28	21.32654
276	2	0.005	0.755555	7.68	18.87756
277	2	0.0025	1.155555	8.16	13.62974
278	2	0.005	0.844445	10.56	11.18076
279	2	0.0025	0.711112	12.96	8.73178
280	2	0.005	1.111111	5.76	6.2828
281	2	0.005	0.977778	6.24	23.42566
282	2	0.005	0.607408	8.64	20.97668
283	2	0.0025	1.007408	11.04	18.5277
284	2	0.005	0.874075	13.44	16.07872
285	2.5	0.0075	1.4	4.4	19.28572
286	2.5	0.0075	1.266667	6.8	16.83674
287	2.5	0.0075	1.666667	9.2	14.38776
288	2.5	0.01	1.533334	11.6	11.93878
289	2.5	0.0075	1.222222	12.08	9.4898
290	2.5	0.0075	1.622223	4.88	7.04082
291	2.5	0.0075	1.488888	7.28	24.18368
292	2.5	0.01	1.355555	9.68	21.7347
293	2.5	0.0075	1.755556	10.16	16.48688

การทดลองที่	ระยะห่างระหว่าง บัพเฟิลต่อเส้น ผ่านศูนย์กลางท่อ	แอมพลิจูดของการ สั่น	ความถี่ในการ สั่น	อัตราการไหลของของไหล	
	S/D	เมตร (m)	รอบต่อวินาที (Hz)	ของไหล สายร้อน ลิตรต่อนาที (l/min)	ของไหล สายเย็น ลิตรต่อนาที (l/min)
294	2.5	0.01	1.444444	12.56	14.0379
295	2.5	0.0075	1.311111	5.36	11.58892
296	2.5	0.01	1.711111	7.76	9.13994
297	2.5	0.0075	1.577777	8.24	6.69096
298	2.5	0.0075	1.207408	10.64	23.83382
299	2.5	0.0075	1.607407	13.04	21.38484
300	2.5	0.01	1.474074	5.84	18.93586

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-28 การทดลองที่อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางภายในแผ่นบัพเฟิลเทียบกับเส้นผ่านกลาง
ของท่อ (d_0/D) เท่ากับ 0.7 จำนวน 100 การทดลอง

การทดลองที่	ระยะห่างระหว่าง บัพเฟิลต่อเส้น ผ่านศูนย์กลางท่อ	แอมปริจูดของการ สั่น	ความถี่ในการ สั่น	อัตราการไหลของของไหล	
	S/D	เซนติเมตร (cm)	รอบต่อวินาที (Hz)	ของไหล สายร้อน ลิตรต่อนาที (l/min)	ของไหล สายเย็น ลิตรต่อนาที (l/min)
301	1	0.0025	0	4	5
302	1	0.005	0.4	6.4	22.14286
303	1	0.005	0.266666	8.8	19.69388
304	1	0.005	0.133333	11.2	17.2449
305	1	0.0025	0.533333	13.6	14.79592
306	1	0.005	0.222223	4.48	12.34694
307	1	0.0025	0.088889	6.88	9.89796
308	1	0.005	0.488889	9.28	7.44898
309	1	0.0025	0.355556	11.68	24.59184
310	1	0.005	0.044444	12.16	19.34402
311	1	0.005	0.444445	4.96	16.89504
312	1	0.005	0.311112	7.36	14.44606
313	1	0.0025	0.177777	9.76	11.99708
314	1	0.005	0.577778	10.24	9.5481
315	1	0.0025	0.207407	12.64	7.09912
316	1	0.005	0.074074	5.44	24.24198
317	1	0.0025	0.474073	7.84	21.793
318	1.5	0.0025	0.599999	6	7.85714
319	1.5	0.01	1.000001	8.4	5.40816
320	1.5	0.0075	0.866666	10.8	22.55102
321	1.5	0.0075	0.733333	13.2	20.10204

การทดลองที่	ระยะห่างระหว่าง บัพเฟิลต่อเส้น ผ่านศูนย์กลางท่อ	แอมปริจูดของการ สั่น	ความถี่ในการ สั่น	อัตราการไหลของของไหล	
	S/D	เมตร (m)	รอบต่อวินาที (Hz)	ของไหล สายร้อน ลิตรต่อนาที (l/min)	ของไหล สายเย็น ลิตรต่อนาที (l/min)
322	1.5	0.0075	1.133334	4.08	17.65306
323	1.5	0.01	0.822222	6.48	15.20408
324	1.5	0.0075	0.688889	8.88	12.7551
325	1.5	0.0075	1.088888	11.28	10.30612
326	1.5	0.0075	0.955555	13.68	5.0583
327	1.5	0.01	0.644445	4.56	22.20116
328	1.5	0.0075	1.044445	6.96	19.75218
329	1.5	0.0075	0.911111	9.36	17.3032
330	1.5	0.0075	0.777778	11.76	14.85422
331	1.5	0.01	1.177778	12.24	12.40524
332	1.5	0.0075	0.807408	5.04	9.95626
333	1.5	0.01	0.674075	7.44	7.50728
334	1.5	0.005	1.074074	9.84	24.65014
335	1.5	0.005	1.200001	8	10.71428
336	1.5	0.0025	1.6	10.4	8.2653
337	1.5	0.005	1.466667	12.8	5.81632
338	1.5	0.0025	1.333334	5.6	22.95918
339	1.5	0.005	1.733333	6.08	20.5102
340	1.5	0.0025	1.422221	8.48	18.06122
341	1.5	0.005	1.288888	10.88	15.61224
342	1.5	0.005	1.68889	13.28	13.16326
343	1.5	0.005	1.555556	4.16	7.91546
344	1.5	0.0025	1.244444	6.56	5.46648
345	1.5	0.005	1.644444	8.96	22.60932

การทดลองที่	ระยะห่างระหว่าง บัพเฟิลต่อเส้น ผ่านศูนย์กลางท่อ	แอมปริจูดของการ สั่น	ความถี่ในการ สั่น	อัตราการไหลของของไหล	
	S/D	เมตร (m)	รอบต่อวินาที (Hz)	ของไหล สายร้อน ลิตรต่อนาที (l/min)	ของไหล สายเย็น ลิตรต่อนาที (l/min)
346	1.5	0.0025	1.511111	11.36	20.16034
347	1.5	0.005	1.377778	13.76	17.71138
348	1.5	0.0025	1.777777	4.64	15.2624
349	1.5	0.005	1.407407	7.04	12.81342
350	1.5	0.005	1.274074	9.44	10.36444
351	1.5	0.005	1.674074	11.84	5.11662
352	2	0.0075	0.2	10	13.57142
353	2	0.0075	0.066667	12.4	11.12244
354	2	0.01	0.466666	5.2	8.67346
355	2	0.0075	0.333333	7.6	6.22448
356	2	0.01	0.022223	8.08	23.36734
357	2	0.005	0.422222	10.48	20.91836
358	2	0.01	0.288889	12.88	18.46938
359	2	0.0075	0.155556	5.68	16.0204
360	2	0.0075	0.555556	6.16	10.7726
361	2	0.0075	0.244444	8.56	8.32362
362	2	0.01	0.111111	10.96	5.87464
363	2	0.0075	0.511112	13.36	23.0175
364	2	0.0075	0.377779	4.24	20.56852
365	2	0.0075	0.007407	6.64	18.11954
366	2	0.01	0.407407	9.04	15.67056
367	2	0.0075	0.274073	11.44	13.22158
368	2	0.0075	0.14074	13.84	7.97376
369	2	0.0025	0.799999	12	16.42858

การทดลองที่	ระยะห่างระหว่าง บัพเฟิลต่อเส้น ผ่านศูนย์กลางท่อ	แอมปริจูดของการ สั่น	ความถี่ในการ สั่น	อัตราการไหลของของไหล	
	S/D	เมตร (m)	รอบต่อวินาที (Hz)	ของไหล สายร้อน ลิตรต่อนาที (l/min)	ของไหล สายเย็น ลิตรต่อนาที (l/min)
370	2	0.005	0.666666	4.8	13.9796
371	2	0.0025	1.066667	7.2	11.53062
372	2	0.005	0.933334	9.6	9.08164
373	2	0.005	0.622222	10.08	6.63266
374	2	0.005	1.022222	12.48	23.77552
375	2	0.0025	0.888889	5.28	21.32654
376	2	0.005	0.755555	7.68	18.87756
377	2	0.0025	1.155555	8.16	13.62974
378	2	0.005	0.844445	10.56	11.18076
379	2	0.0025	0.711112	12.96	8.73178
380	2	0.005	1.111111	5.76	6.2828
381	2	0.005	0.977778	6.24	23.42566
382	2	0.005	0.607408	8.64	20.97668
383	2	0.0025	1.007408	11.04	18.5277
384	2	0.005	0.874075	13.44	16.07872
385	2.5	0.0075	1.4	4.4	19.28572
386	2.5	0.0075	1.266667	6.8	16.83674
387	2.5	0.0075	1.666667	9.2	14.38776
388	2.5	0.01	1.533334	11.6	11.93878
389	2.5	0.0075	1.222222	12.08	9.4898
390	2.5	0.0075	1.622223	4.88	7.04082
391	2.5	0.0075	1.488888	7.28	24.18368
392	2.5	0.01	1.355555	9.68	21.7347
393	2.5	0.0075	1.755556	10.16	16.48688

การทดลองที่	ระยะห่างระหว่าง บัพเฟิลต่อเส้น ผ่านศูนย์กลางท่อ	แอมพลิจูดของการ สั่น	ความถี่ในการ สั่น	อัตราการไหลของของไหล	
	S/D	เมตร (m)	รอบต่อวินาที (Hz)	ของไหล สายร้อน ลิตรต่อนาที (l/min)	ของไหล สายเย็น ลิตรต่อนาที (l/min)
394	2.5	0.01	1.444444	12.56	14.0379
395	2.5	0.0075	1.311111	5.36	11.58892
396	2.5	0.01	1.711111	7.76	9.13994
397	2.5	0.0075	1.577777	8.24	6.69096
398	2.5	0.0075	1.207408	10.64	23.83382
399	2.5	0.0075	1.607407	13.04	21.38484
400	2.5	0.01	1.474074	5.84	18.93586

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรณีที่ 3

ตารางแสดงผลการทดลองที่สภาวะต่างดังที่กล่าวมาใน กรณีที่ 1 โดยผลแสดงเป็นอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

ตารางที่ ง-29 ผลการทดลองอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางภายในแผ่นบัพเฟิลเทียบกับเส้นผ่านกลางของท่อ (d_0/D) เท่ากับ 0.4 จำนวน 100 การทดลอง

การทดลองที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
	สายร้อนขาเข้า	สายร้อนขาออก	สายเย็นขาออก	สายเย็นขาเข้า
1	78.7	49.2	25.9	21.5
2	79.1	57.2	22.7	20.8
3	79	58.8	24.2	21.7
4	79.4	59.8	23.7	21.1
5	79.4	61.1	25.1	21.6
6	78.3	54.2	23.3	20.4
7	78.5	58	26	22.2
8	78.7	59.8	28.1	23.3
9	79.1	58.3	22.7	20.7
10	78.9	60.8	24.4	22
11	78.4	56.1	23	20.3
12	79.2	58.5	24.7	21
13	78.7	59.6	25	21.5
14	79	60.5	26.8	21.7
15	78.9	60.4	29.7	23.5
16	79	56.9	22.1	20.7
17	78.9	57.3	23.2	21.5
18	78.9	49.5	26.8	21.7
19	78.8	56.5	32.1	24.2
20	78.7	54.9	22.9	21
21	79	55.2	23.6	21.1

การทดลองที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
	สายร้อนขาเข้า	สายร้อนขาออก	สายเย็นขาออก	สายเย็นขาเข้า
22	78.6	49.4	23.3	21.2
23	78.6	55.8	24.9	21.7
24	79.1	55.1	24.6	21
25	79.1	59.2	27.3	22.2
26	78.7	58.8	33.2	25.1
27	78.5	47.3	22.6	20.7
28	78.6	54	23.1	21.3
29	78.7	55.7	24.9	21.2
30	79.3	57.8	25.1	22
31	79.5	60.9	25.9	21.2
32	78.5	53.9	25.6	20.6
33	78.3	55.5	28	22.5
34	78.9	54.3	23.8	21.7
35	78.7	54.5	26.5	22
36	78.9	53.4	27.3	22.7
37	79.5	57.8	32.1	24.6
38	78.4	50.8	22.2	20.7
39	78.3	55.2	22.6	20.5
40	79.1	54.5	23.5	20.2
41	79.4	58.4	25.6	21.8
42	78.6	60.5	26.4	21.6
43	78.3	53.6	26.2	21.2
44	78.9	51.7	29.9	23.4
45	79	56.8	22.8	20.7
46	79	53.6	23.8	21.7
47	78.9	60.8	24.7	21.7
48	78.6	50.9	22.6	20
49	78.9	56	25.2	22
50	78.3	56.3	27	22.2

การทดลองที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
	สายร้อนขาเข้า	สายร้อนขาออก	สายเย็นขาออก	สายเย็นขาเข้า
51	79.5	57.8	32.9	23.9
52	78.9	63.7	24.6	20.8
53	78.8	65.7	26.1	21.6
54	78.9	60.9	25.9	22.6
55	78.7	63.9	29.9	22.7
56	78.9	60.9	22.3	20.5
57	78.8	63.2	23.9	21.7
58	79.3	64.5	23.8	20.9
59	78.9	62.7	24.4	21.9
60	78.8	62.7	25.6	22.3
61	79	64	27.4	22.8
62	78.9	65.4	32	25.4
63	79	64.7	23.6	20.7
64	78.2	51.9	21.7	20.6
65	79.1	60.4	23.7	21.6
66	78.6	63.1	24.2	21.2
67	79.2	64.7	26	22
68	78.7	65.9	29.4	23
69	78.9	64.4	24.7	22
70	78.4	57.6	23.1	21.2
71	78.5	62.8	25.7	21.6
72	79.2	64.5	26.9	23.1
73	78.8	65.3	29.6	23.8
74	79.1	64.6	23.3	20.8
75	78.7	59.8	23.4	21.3
76	78.6	62.8	23.4	21.3
77	78.9	63.4	24.7	21
78	79	66	26.7	21.8
79	78.9	65.8	27.3	22.9

การทดลองที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
	สายร้อนขาเข้า	สายร้อนขาออก	สายเย็นขาออก	สายเย็นขาเข้า
80	79.1	64.7	28.6	22.8
81	78.8	61.6	22.5	20.8
82	78.4	62.6	23.1	20.2
83	79	64.4	23.9	20.8
84	78.7	65.1	24.6	21.5
85	78.7	60.3	22.6	20.2
86	79	64.3	23.7	21.1
87	78.5	65.4	25.5	21.3
88	79.1	66.3	27.1	22.7
89	78.9	67.3	26.4	22.9
90	78.6	61.7	27.4	24.3
91	78.9	62.8	22.7	21
92	78.9	64.9	24.3	22.1
93	79	65.6	23.9	21.2
94	78.9	66.4	25.1	21.4
95	78.9	62.7	24.9	21.3
96	78.5	66.3	27.3	22.9
97	79	65.5	29.3	23.9
98	79	65.4	24	21.9
99	78.9	65.3	23.1	20.9
100	79.1	64.2	23.6	21.2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-30 ผลการทดลอง อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางภายในแผ่นบัพเฟิลเทียบกับเส้นผ่านกลางของท่อ (d_0/D) เท่ากับ 0.5 จำนวน 100 การทดลอง

การทดลองที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
	สายร้อนขาเข้า	สายร้อนขาออก	สายเย็นขาออก	สายเย็นขาเข้า
101	78.5	57.2	28.1	24.4
102	78.8	61.5	22.8	20.4
103	79	64.3	22.8	20.4
104	79	64.2	24	20.7
105	79.4	63.9	25.7	21.9
106	78.6	54.3	22.4	20.2
107	78.6	62.2	26.4	22.5
108	79.4	64.3	27.9	24.5
109	79.2	63	22.4	20.3
110	79.2	62.8	24.4	21.8
111	78.5	59.7	22.6	21
112	79	63.3	24	21.3
113	78.8	63.1	24.6	21.4
114	79	64.4	26.3	22.8
115	79	65.4	29.1	25.3
116	78.7	60.4	22.7	21.3
117	78.7	61.3	23.1	21.4
118	78.7	51.12	25.84	22.32
119	78.7	59.2	26.6	23.7
120	78.9	59.3	22.64	20.6
121	79.24	59.58	23.7	20.38
122	78.42	50.22	22.94	21.06
123	78.9	60	24.6	22.5
124	78.98	55.56	23.96	20.9
125	78.44	57.6	25.68	21.38
126	78.96	58.38	31.64	24.34

การทดลองที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
	สายร้อนขาเข้า	สายร้อนขาออก	สายเย็นขาออก	สายเย็นขาเข้า
127	78.5	53.2	22.2	20.8
128	78.52	56.44	22.84	20.08
129	78.8	58.42	23.86	20.42
130	78.9	58.72	24.6	21.6
131	79.4	64.5	26.6	23.3
132	78.86	53.4	24.34	21.4
133	78.6	62.2	29.1	24.7
134	78.86	55.34	22.26	20.58
135	78.86	53.82	25.1	22.74
136	78.62	55.7	26.46	22.18
137	79.1	56.32	30.24	24.82
138	78.86	54.76	22.94	20.94
139	78.44	55.24	22.42	19.98
140	78.9	56.3	23.54	21.36
141	79	57	23.6	20.3
142	79.22	57.86	25.34	21.98
143	78.84	51.28	26.1	21.82
144	78.84	53.5	28.42	22.96
145	78.8	57.58	23.02	20.26
146	78.94	57.48	22.66	20.4
147	79.1	59.58	24.62	21.38
148	78.56	51.66	23.26	20.8
149	78.7	55.7	24.66	21.5
150	78.96	55.94	24.92	22.24
151	78.94	57.68	31.24	25.26
152	78.88	56.98	23.4	20.5
153	78.46	56.48	24.78	21.68
154	78.62	51.8	24.78	21.4
155	78.66	54.04	27.54	23.9

การทดลองที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
	สายร้อนขาเข้า	สายร้อนขาออก	สายเย็นขาออก	สายเย็นขาเข้า
156	78.86	53.84	22.06	20.58
157	78.9	57.04	22.38	20.05
158	78.9	56.12	26.2	22.5
159	78.78	54.08	22.9	20.98
160	78.82	54.64	24.04	20.68
161	78.86	55.24	26.18	22.02
162	78.8	55.88	28.54	24.58
163	79.06	58.38	23.12	20.26
164	78.72	50.12	21.52	20.38
165	78.74	53.94	22.68	20.88
166	79.08	56.8	27.68	24.46
167	78.84	57	23.28	21
168	79.04	57.74	27.12	23.64
169	78.6	57.4	23.4	21.04
170	78.56	49.16	22.12	20.1
171	78.9	53.8	24.5	21.72
172	78.98	54.26	26.18	22.1
173	78.8	54.98	27.94	23.96
174	78.78	56.56	22.08	20.1
175	78.8	53.14	22.16	20.6
176	78.54	55.14	22.22	19.88
177	78.9	54.84	24.2	21.12
178	78.9	55.58	24.7	21.04
179	78.9	56.12	26.2	22.5
180	78.82	53.26	27.5	23.38
181	78.9	53.58	22.32	20.8
182	78.9	55.98	22.32	20.52
183	78.78	56.82	23	19.98
184	79.1	58.92	24.2	21.6

การทดลองที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
	สายร้อนขาเข้า	สายร้อนขาออก	สายเย็นขาออก	สายเย็นขาเข้า
185	79.1	60	22.6	21.2
186	78.8	61.9	24.2	21.2
187	78.9	63.5	24	20.6
188	78.9	67.1	25.5	21.6
189	79.1	65	27.1	23.5
190	78.5	60.4	26.9	24.2
191	79	60.9	23.4	21.5
192	79.1	60	22.6	21.2
193	78.9	63.6	25.2	21.9
194	78.8	61.9	24.2	21.2
195	78.9	61.8	24.3	21.5
196	78.9	63.5	24	20.6
197	78.8	63.6	28.8	24.2
198	79	63.5	22.6	20.8
199	78.9	63.8	24	21.9
200	79.1	65	27.1	23.5

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-31 ผลการทดลองอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางภายในแผ่นบัพเฟิลเทียบกับเส้นผ่านกลางของท่อ (d_0/D) เท่ากับ 0.6 จำนวน 100 การทดลอง

การทดลองที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
	สายร้อนขาเข้า	สายร้อนขาออก	สายเย็นขาออก	สายเย็นขาเข้า
201	78.3	44.9	26.2	22.7
202	78.7	49.7	22.8	21.2
203	78.7	50.3	23	20.3
204	79.4	53.4	23.3	21.1
205	79.1	50.3	24.3	22.2
206	78.2	47.4	22.4	20.6
207	78.5	50.5	25.4	21.9
208	79.1	52	28.6	24.3
209	79.7	50.6	22.4	20.7
210	79.4	55.1	22.8	20.7
211	78.4	49.2	23.1	21
212	79.1	51.1	24.1	21.6
213	78.4	53.1	25	22
214	79	54.6	26	22.7
215	79	54.8	28.3	24.8
216	78.6	49.3	22.6	21.2
217	78.7	49.9	22.3	20.9
218	78.8	57.6	27.8	23.9
219	78.8	69.1	30.1	25
220	78.8	61.6	23.4	21.5
221	78.8	62.2	24.3	21.8
222	78.3	50.7	22.4	20.3
223	78.6	59.2	24.2	21.7
224	79	60.6	24.9	23.2
225	78.9	63.9	25.4	23.2
226	78.9	65.8	32.3	25.8

การทดลองที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
	สายร้อนขาเข้า	สายร้อนขาออก	สายเย็นขาออก	สายเย็นขาเข้า
227	78.3	45.6	21.9	20
228	78.8	57.7	23.9	21.3
229	78.9	61.2	23.2	21.3
230	79.1	62.4	24.9	21.9
231	78.9	64.3	25.3	21.8
232	78.5	56.2	24.3	22.7
233	78.5	62.7	27.3	24.9
234	78.9	59.9	22.2	20.7
235	78.8	60.5	24.7	22.5
236	78.9	59.9	24.7	23
237	78.9	64.7	30	24.4
238	78.7	56.7	22	20
239	78.5	59.5	22.7	20.3
240	79.3	59.3	24	21.9
241	79	61.6	24.1	22.5
242	78.8	63.5	25.3	23.4
243	78.5	54.8	24.8	23.1
244	78.7	60.5	27.8	24
245	78.9	60.1	23.3	20.6
246	79.3	59.8	23.8	21.5
247	79.1	63.1	23.6	21.1
248	78.7	50.3	22.8	21.6
249	78.9	60.8	24.2	22.1
250	79	62.2	25.9	23.1
251	78.8	65.8	31.7	25.4
252	79	58.5	23.3	21.1
253	78.7	63.3	25	23.1
254	79.1	57.1	24.3	22.7
255	78.5	61	27.6	23.1

การทดลองที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
	สายร้อนขาเข้า	สายร้อนขาออก	สายเย็นขาออก	สายเย็นขาเข้า
256	78.7	56.4	23.1	21.2
257	78.9	59.2	23.2	21.3
258	79.1	63	23.5	21.9
259	78.9	56.8	22.9	20.6
260	78.9	59.7	24.6	22.2
261	78.8	60.9	25.3	23.5
262	78.7	62.9	28.4	24.2
263	79.3	62.4	22.6	20.4
264	78.5	44.3	21.4	20.7
265	78.5	56	22.6	21.7
266	78.9	61	22.9	21.3
267	79.3	62.9	24.1	21.3
268	78.9	65.2	27	22.7
269	78.8	63.1	23.5	21.8
270	78.7	50.4	22.5	21.4
271	78.5	59.7	24	22.4
272	79	62.4	25.5	22.9
273	78.8	61.9	27.2	24.7
274	79.1	62.3	22.3	20.6
275	78.9	55.5	21.9	20.4
276	79	58.5	23.3	21.1
277	78.9	61.3	24.1	22.6
278	78.8	62.9	24.1	22.3
279	79.2	65.4	26.5	24.1
280	78.6	61	27.3	23.4
281	79	58.6	22.5	20.7
282	79.2	60.3	22.2	20.1
283	78.9	61.7	22.7	20.7
284	79	63.8	23.6	21.3

การทดลองที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
	สายร้อนขาเข้า	สายร้อนขาออก	สายเย็นขาออก	สายเย็นขาเข้า
285	78.7	48.7	21.7	20.8
286	79	61.5	23.7	22
287	79	64.6	23.8	20.7
288	78.8	65.9	24.4	21.8
289	78.7	65.9	26	22.9
290	79	58.6	24.2	21.1
291	78.8	61.4	23.2	21
292	78.7	64.3	23.8	21.8
293	79.1	64.8	24.5	21
294	78.9	66.5	24.3	21.9
295	78.8	61.6	23.6	21
296	78.8	64.9	25.7	22.2
297	79	65.3	28.2	24.2
298	79.2	63.4	22.4	20.6
299	79	65.1	23.8	21.5
300	78.9	62.6	23	20.8

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-32 ผลการทดลองอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางภายในแผ่นบัพเฟิลเทียบกับเส้นผ่านกลางของท่อ (d_0/D) เท่ากับ 0.7 จำนวน 100 การทดลอง

การทดลองที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
	สายร้อนขาเข้า	สายร้อนขาออก	สายเย็นขาออก	สายเย็นขาเข้า
301	78.7	48.74	25.5	22.2
302	78.84	54.44	22.38	20.42
303	78.9	55.6	22.3	20.64
304	78.86	56.98	22.66	20.74
305	79.08	56.8	23.54	21.18
306	78.76	49.52	22.38	20.9
307	78.64	52.44	24.3	20.7
308	79.1	54.08	26.04	22.84
309	79.14	54.96	22.6	20.6
310	79.06	56.26	22.92	21
311	78.8	51.7	22.04	19.94
312	78.92	53.64	22.96	21
313	78.66	55.18	23.4	20.92
314	78.8	54.3	25.4	21.54
315	78.9	55.86	26.58	22.98
316	78.72	51.06	21.72	20.58
317	78.78	55.24	22.34	20.86
318	78.8	51.9	24.9	22.5
319	79	61.7	28.9	25
320	78.9	56.8	22.1	20.5
321	79.1	56.3	22.5	20.3
322	78.5	45.7	21.9	21.1
323	78.7	57.6	22.7	21.4
324	79	55.8	23.9	21.9
325	79	61.1	25.5	21.8
326	78.9	61.1	30.6	24.9

การทดลองที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
	สายร้อนขาเข้า	สายร้อนขาออก	สายเย็นขาออก	สายเย็นขาเข้า
327	78.7	53.3	22.5	21.3
328	78.9	55.4	23	21.3
329	78.9	59.6	23	21.2
330	79	57.6	23.4	21.4
331	79	62.2	24.3	21.5
332	78.8	55.3	23.4	21.4
333	78.8	58.4	26.3	23.1
334	78.9	57.1	22.4	21
335	78.9	56.3	24.4	23.1
336	78.8	58.9	25.7	24.4
337	79.1	61.4	28.9	25.7
338	78.5	51.4	21.6	20.5
339	78.6	53.9	22	20.4
340	78.8	53.9	23.4	21.3
341	78.5	58.6	23.8	21.9
342	78.7	59	24.9	21.7
343	78.4	48.2	24.1	22.9
344	78.8	55.9	28.2	24.8
345	79.1	56.2	22	20.3
346	78.9	57.5	22	20.4
347	78.9	59	23.6	21.4
348	78.7	50.5	22.3	20.6
349	78.6	55.4	24.1	22.7
350	78.9	57.5	25.5	23.7
351	79.1	60	29.7	23.9
352	78.7	60.4	23.7	20.6
353	79	62.9	24.2	20.8
354	78.6	54.4	24	21.5
355	78.6	58.4	26.9	22

การทดลองที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
	สายร้อนขาเข้า	สายร้อนขาออก	สายเย็นขาออก	สายเย็นขาเข้า
356	78.9	51.1	21.4	20
357	78.9	62.4	21.7	20.3
358	78.9	60.9	22.4	20.2
359	78.8	57	22.1	20.6
360	78.9	57.5	23.5	21.1
361	78.9	60.3	25.2	21.8
362	78.9	61.9	27.1	23.1
363	79	61.5	21.9	20.4
364	78.1	43.5	21.3	20.7
365	78.9	61	22.7	21.2
366	78.6	58.1	23.2	20.5
367	78.9	62.3	23.9	21.6
368	78.8	64.9	26.2	21.8
369	78.8	64.4	23.5	21.2
370	78.5	48	21.8	20.6
371	78.7	61.3	23.3	20.8
372	79.2	63.7	24.6	21.2
373	78.7	64.6	28.6	21.9
374	79.1	65.4	22.5	21.1
375	78.8	57.9	22.3	21
376	78.7	61.2	21.9	20.1
377	78.6	64	23.8	21.5
378	78.9	63.3	24.7	20.7
379	79	65.8	25.7	21.6
380	78.8	63.7	26.3	22.5
381	78.8	61.3	21.2	20.1
382	78.8	60.5	22.6	21.3
383	78.8	63.8	22.8	21.2
384	79.1	66.3	23.1	20.2

การทดลองที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
	สายร้อนขาเข้า	สายร้อนขาออก	สายเย็นขาออก	สายเย็นขาเข้า
385	78.6	53.1	22	20.2
386	78.9	54.1	22.6	20.1
387	78.9	54.6	23.1	20.4
388	79.2	54.1	24.3	21.4
389	79.2	55.4	25.1	21.1
390	78.4	55.6	25.7	22.2
391	78.9	53.3	22.4	20.5
392	78.8	51.3	22	20.6
393	79	54.8	23.4	21.3
394	78.8	53.8	24.2	21.7
395	78.8	54.8	23.6	21.5
396	78.6	55.3	25.1	22.2
397	78.9	55.4	26.8	22.6
398	78.8	53.5	23	21.3
399	79	53	22.3	20.2
400	78.7	53	22.9	21.2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรณีศึกษาที่ 4

ตารางแสดงผลการคำนวณจากค่าสถานะต่างๆและผลที่ได้จากการทดลอง จากกรณีศึกษาที่ 1 และกรณีศึกษาที่ 2 แสดงผลดังต่อไปนี้

ตารางที่ ง-33 ผลจากการคำนวณแสดงค่า สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนและค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds Number) ที่สภาวะการทดลอง อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางภายในแผ่นบัพเฟิล เทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (d_0/D) เท่ากับ 0.4 จำนวน 100 การทดลอง

การทดลองที่	Overall heat transfer coefficient	Reynolds Number		
	(Uo) $w/m^2 \cdot C^{\circ}$	การสั่น (Re_{os})	สายร้อน (Re_h)	สายเย็น (Re_c)
1	200.019	0	190.6468	515.9287
2	240.6042	224.1774	360.6899	2190.382
3	297.3887	153.9448	510.8591	1999.699
4	320.2174	79.11684	668.2984	1730.286
5	366.7199	162.2944	832.3304	1515.347
6	202.6446	115.4736	234.0961	1224.048
7	241.7508	25.00757	389.2797	1030.044
8	276.3549	286.1434	546.1893	801.4909
9	355.6613	101.8242	672.7257	2429.966
10	327.8294	26.63078	732.703	1974.778
11	222.9571	240.3424	269.7216	1667.597
12	281.0384	179.2496	426.4234	1463.676
13	288.4757	51.8219	572.1888	1226.065
14	309.4395	344.8566	614.609	996.7913
15	362.8241	61.65566	755.6988	777.9504
16	200.8568	41.18639	304.1662	2379.625
17	261.8498	132.5829	440.9709	2184.246
18	320.7796	143.6186	288.8436	820.2604
19	338.3103	1098.879	464.1096	611.0738

การทดลองที่	Overall heat transfer coefficient	Reynolds Number		
	(Uo) w/m^2-C^0	การสั่น (Re_{os})	สายร้อน (Re_h)	สายเย็น (Re_c)
20	374.0391	690.5095	576.8624	2240.563
21	452.5674	591.3042	713.5335	2014.767
22	235.1512	807.3562	194.8489	1765.462
23	278.9447	887.4972	351.6776	1555.48
24	339.0446	555.468	480.0134	1290.951
25	363.7904	952.2312	661.3001	1087.292
26	430.9901	822.5775	789.4736	582.5637
27	280.5901	585.7968	208.4096	2191.329
28	271.5076	815.7146	364.4119	1973.239
29	386.82	737.5826	507.9787	1760.744
30	374.22	664.2772	673.3353	1527.844
31	362.3912	1430.82	747.6438	1275.952
32	261.2855	628.0748	262.8327	1014.223
33	298.3675	718.9458	398.9815	800.3025
34	389.7145	565.9742	521.4097	2492.158
35	339.0004	632.33	423.9104	1118.537
36	404.4604	414.047	541.2709	876.5474
37	438.3235	838.3942	735.7808	659.7356
38	258.5517	324.3007	273.9358	2256.19
39	250.2122	918.8465	324.1053	2019.976
40	363.2818	377.7148	452.9438	1790.55
41	378.8631	744.0669	631.6077	1610.961
42	395.4536	1000.189	790.862	1366.952
43	216.6866	798.6835	214.785	816.7626
44	318.6971	311.2768	330.0098	599.6419
45	314.3275	912.5321	499.9871	2236.525
46	419.4512	393.3941	594.7872	2038.234
47	372.0952	825.5659	829.1113	1808.106

การทดลองที่	Overall heat transfer coefficient	Reynolds Number		
	(Uo) w/m^2-C^0	การสั่น (Re_{os})	สายร้อน (Re_h)	สายเย็น (Re_c)
48	241.1623	435.0034	228.3416	1494.873
49	274.5743	767.1626	385.8886	1319.344
50	354.0472	690.3528	514.3635	1090.014
51	420.4662	956.9546	680.5972	580.9286
52	259.9363	190.1259	637.2974	1370.601
53	267.1419	65.70267	819.2697	1151.348
54	163.4892	560.3456	313.9386	905.4816
55	223.1091	316.8765	484.346	677.984
56	233.9669	26.68385	487.8123	2293.769
57	261.106	264.5234	660.2461	2117.159
58	295.599	374.6318	839.8099	1851.13
59	180.9487	145.063	355.0985	1633.721
60	180.741	517.0827	384.3648	1117.506
61	217.5122	234.158	549.7113	884.5701
62	253.758	145.4561	721.4057	670.8361
63	323.7401	496.1666	869.4579	2296.935
64	177.1852	280.6639	211.1765	2007.909
65	210.8045	6.631485	398.5355	1827.942
66	240.871	507.544	566.2469	1582.597
67	279.7004	267.0692	747.3318	1373.008
68	297.1303	138.9664	916.1323	866.7594
69	266.5978	256.9098	775.0398	1682.558
70	165.0468	371.415	268.9144	1395.036
71	220.4725	329.6579	447.5264	1188.528
72	219.3891	604.0287	624.7602	963.1214
73	230.4154	405.7453	660.983	728.2964
74	297.9302	661.5543	812.1882	2367.399
75	203.2041	260.1302	310.7629	2137.495

การทดลองที่	Overall heat transfer coefficient	Reynolds Number		
	(Uo) $\text{w/m}^2\text{-C}^0$	การสั่น (Re_{os})	สายร้อน (Re_h)	สายเย็น (Re_c)
76	205.5556	467.9176	478.2842	1892.041
77	234.5747	364.0702	517.0546	1380.966
78	254.3791	560.0558	704.2805	1167.236
79	254.2371	234.49	859.4948	927.9462
80	168.3251	720.4451	375.5672	676.0129
81	192.0501	593.9253	381.1517	2312.191
82	264.7627	373.2722	533.9253	2070.468
83	277.5397	324.1323	714.3939	1856.975
84	283.8353	566.7505	876.3234	1636.143
85	183.0909	1241.224	261.5201	1893.112
86	190.5088	1220.323	439.1892	1689.333
87	249.4981	1624.074	601.0011	1475.124
88	262.5721	2049.147	779.4462	1263.49
89	207.9881	1243.365	823.8464	999.0763
90	140.0166	1475.195	297.5014	759.9064
91	202.3052	1391.134	456.0041	2397.517
92	235.4786	1757.885	631.1615	2218.836
93	223.7302	1733.43	672.5365	1659.631
94	260.8512	1926.756	842.3788	1434.631
95	179.3193	1222.67	335.0929	1180.539
96	184.4562	2261.205	515.6028	971.3223
97	198.2607	1554.964	544.4179	733.2226
98	246.3732	1187.711	701.6639	2420.064
99	265.8738	1575.234	856.6972	2127.024
100	182.0605	1893.522	377.1861	1899.951

ตารางที่ ง-34 ผลจากการคำนวณแสดงค่า สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนและค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds Number) ที่สภาวะการทดลอง อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางภายในแผ่นบัฟเฟิล เทียบกับเส้นผ่านกลางของท่อ (d_o/D) เท่ากับ 0.5 จำนวน 100 การทดลอง

การทดลองที่	Overall heat transfer coefficient	Reynolds Number		
	(Uo) w/m^2-C°	การสั้น (Re_{os})	สายร้อน (Re_p)	สายเย็น (Re_c)
101	144.2911	0	222.7662	544.0592
102	225.0104	242.4974	390.1658	2183.172
103	222.3019	171.2732	568.3625	1941.715
104	281.2414	85.47375	721.995	1728.404
105	331.6295	171.2732	878.3785	1529.983
106	179.3613	116.3994	235.973	1209.319
107	205.0161	27.20712	423.5189	1037.68
108	202.538	316.3957	603.9348	809.715
109	289.4046	111.807	738.6791	2411.305
110	307.3879	27.84415	766.0871	1970.535
111	154.1631	258.6024	290.2136	1673.101
112	197.8345	196.0384	466.3629	1457.353
113	235.0641	55.58188	613.7044	1219.487
114	223.7498	371.799	662.6263	1003.108
115	241.856	68.00781	833.5556	787.3348
116	175.3172	43.86765	323.9676	2411.207
117	217.329	142.8656	475.1711	2179.492
118	266.9193	295.5127	297.1655	817.3172
119	213.3444	1156.863	488.5992	575.3346
120	313.4606	756.41	631.9167	2224.393
121	408.4279	647.8755	781.7988	2001.182
122	216.4838	817.7555	197.3587	1755.846
123	200.1628	970.0613	384.3942	1563.83
124	312.5974	559.2401	483.2731	1280.633

การทดลองที่	Overall heat transfer coefficient	Reynolds Number		
	(Uo) w/m ² -C ^o	การสั่น (Re _{os})	สายร้อน (Re _h)	สายเย็น (Re _c)
125	354.6189	910.6889	632.4501	1059.592
126	420.0263	819.9861	786.9865	569.7708
127	200.0384	659.1268	234.4983	2184.105
128	285.6613	854.9924	381.9588	1941.467
129	330.8436	779.9987	537.191	1726.323
130	348.2914	671.1259	680.2774	1513.168
131	274.3606	1530.238	799.5927	1314.225
132	214.1631	626.3209	262.0987	1009.205
133	212.4245	825.2789	457.9914	827.643
134	337.2828	577.3685	531.9068	2420.758
135	288.2216	625.8017	419.5338	1110.748
136	350.4168	431.0686	563.5227	864.1464
137	424.9387	807.7665	708.9018	649.285
138	253.8848	354.2491	299.2331	2280.617
139	265.0421	922.1498	325.2705	2004.432
140	294.3809	389.9367	467.5999	1814.165
141	364.9204	718.0694	609.5394	1551.159
142	402.6175	961.2405	760.0648	1357.103
143	222.9887	770.7569	207.2749	821.2918
144	273.6657	322.2939	341.6899	588.0583
145	337.0695	923.0797	505.7663	2231.125
146	350.6422	424.4537	641.7473	1984.645
147	404.7079	809.2569	812.7322	1800.338
148	233.4155	441.314	231.6542	1519.058
149	272.3617	759.5699	382.0695	1304.714
150	301.5362	694.4841	517.4416	1066.727
151	375.9578	944.1852	671.5155	579.2515
152	316.0177	166.6735	558.6857	1348.392

การทดลองที่	Overall heat transfer coefficient	Reynolds Number		
	(Uo) w/m^2-C^o	การสั่น (Re_{os})	สายร้อน (Re_h)	สายเย็น (Re_c)
153	373.0872	54.55223	680.2309	1136.192
154	233.1951	465.2368	260.6531	883.3569
155	277.9469	260.8544	398.7163	670.0128
156	296.0229	23.18769	423.8984	2289.722
157	342.9798	234.9502	586.432	2045
158	491.4109	315.6929	707.6869	1932.216
159	224.4829	122.122	298.9413	1591.363
160	246.8863	441.4009	328.1081	1079.94
161	308.6691	196.7088	461.7951	866.2082
162	351.0925	120.6014	598.1359	643.2487
163	426.6336	439.4639	770.0948	2273.903
164	192.7797	364.9043	205.9203	1999.029
165	254.5209	5.794138	348.2131	1793.575
166	357.3721	452.8726	505.2522	1698.915
167	327.146	228.3136	638.883	1319.104
168	390.5897	119.4445	787.4345	852.3203
169	352.0505	222.849	672.2861	1641.928
170	230.7693	314.8424	227.9544	1363.487
171	278.2623	278.2452	377.7312	1174.853
172	357.902	492.205	509.0985	945.8928
173	345.9056	331.6885	540.3401	717.3189
174	389.1021	562.0949	690.0822	2317.896
175	225.6867	228.3776	272.8298	2092.517
176	289.7013	401.9626	410.868	1838.76
177	312.4974	307.7509	437.0696	1375.299
178	360.6335	456.4683	574.0174	1133.325
179	401.8859	194.2725	712.0824	913.4949
180	240.9625	572.5435	298.4662	672.4051

การทดลองที่	Overall heat transfer coefficient	Reynolds Number		
	(U _o) w/m ² -C ^o	การสั่น (Re _{os})	สายร้อน (Re _h)	สายเย็น (Re _c)
181	254.5935	507.8801	325.9322	2307.617
182	291.6183	330.96	473.4023	2060.007
183	376.5114	278.4077	613.6162	1822.316
184	373.1803	506.7872	783.6068	1630.857
185	144.058	1243.656	262.0326	1914.041
186	227.1334	1160.846	417.7835	1700.372
187	242.7956	1578.328	584.0724	1440.472
188	229.8898	2072.129	788.1881	1227.974
189	247.96	1195.499	792.1304	1012.694
190	140.7865	1435.43	289.4821	755.2413
191	234.4758	1343.444	440.3716	2429.137
192	250.5473	1605.565	576.4717	2157.094
193	274.774	1665.693	646.2559	1695.773
194	302.8279	1765.027	771.6708	1417.712
195	164.0478	1201.576	329.3117	1175.459
196	182.2053	2160.554	492.6523	915.0713
197	204.3649	1494.15	523.1257	731.7468
198	248.5559	1145.603	676.7877	2355.065
199	289.5012	1530.976	832.6269	2171.397
200	239.4392	1922.46	382.9505	2020.72

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-35 ผลจากการคำนวณแสดงค่า สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนและค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds Number) ที่สภาวะการทดลอง อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางภายในแผ่นบัพเฟิลเทียบกับเส้นผ่านกลางของท่อ (d_i/D) เท่ากับ 0.6 จำนวน 100 การทดลอง

การทดลองที่	Overall heat transfer coefficient	Reynolds Number		
	(Uo) w/m^2-C°	การสั่น (Re_{os})	สายร้อน (Re_h)	สายเย็น (Re_c)
201	228.2578	0	173.5936	524.1889
202	303.2644	191.4914	308.0998	2202.42
203	414.1996	129.2022	428.7518	1943.852
204	405.292	69.70019	588.7561	1722.762
205	533.3684	130.2401	667.9395	1512.098
206	220.5043	100.5974	203.9381	1214.667
207	317.5287	21.53384	335.2059	1020.24
208	394.9964	247.0325	471.5346	813.8248
209	477.4295	88.40424	584.0633	2421.962
210	403.0554	24.03386	661.2529	1913.52
211	260.1444	209.3926	234.9885	1682.289
212	326.2189	154.3986	367.3044	1463.676
213	368.9686	45.27543	499.9062	1232.652
214	358.0224	306.8938	546.951	998.8961
215	424.2359	55.3033	677.8395	777.1676
216	271.155	35.10841	259.2796	2405.932
217	331.3417	113.9311	378.935	2148.677
218	219.2352	168.4662	338.8169	848.0107
219	145.2972	1399.254	590.9723	603.959
220	278.4981	789.6497	659.6857	2265.144
221	329.5529	675.9853	815.7192	2045.549
222	218.9716	823.6652	198.7849	1730.936
223	217.6542	949.327	376.1781	1543.809
224	218.0855	617.9674	534.0229	1325.971

การทดลองที่	Overall heat transfer coefficient	Reynolds Number		
	(Uo) w/m^2-C^0	การสั่น (Re_{os})	สายร้อน (Re_p)	สายเย็น (Re_c)
225	218.9739	1039.096	721.6256	1077.062
226	273.3161	945.2867	907.2445	581.4663
227	291.8326	564.0395	200.669	2157.703
228	273.1683	881.512	393.8062	1990.488
229	236.0897	825.3166	568.4018	1730.472
230	294.8028	723.9161	733.7874	1522.949
231	270.2478	1510.038	789.0374	1275.952
232	160.0444	657.5437	275.1646	1022.966
233	166.6684	831.6934	461.5512	814.395
234	265.7843	632.3586	582.567	2422.36
235	203.7414	713.4465	478.2904	1103.205
236	235.9244	470.998	615.7213	855.589
237	267.5359	947.3886	831.435	645.0646
238	231.0559	367.0209	310.0214	2233.85
239	226.1419	1004.589	354.3493	2017.752
240	260.044	417.0258	500.0845	1833.92
241	245.2972	785.9473	667.1582	1597.237
242	259.638	1064.206	841.4809	1377.104
243	143.3097	821.3238	220.8735	821.1175
244	178.6919	369.2123	391.4319	590.5935
245	304.639	971.9631	532.5501	2246.356
246	327.9288	447.4528	676.5205	2033.823
247	308.2619	866.5035	870.2246	1775.158
248	196.5933	430.6742	226.0691	1524.711
249	189.7312	843.3201	424.1965	1306.681
250	228.2223	785.9952	585.6241	1087.728
251	242.1921	1101.983	783.7433	582.6036
252	275.512	172.1673	577.1006	1355.782

การทดลองที่	Overall heat transfer coefficient	Reynolds Number		
	(Uo) w/m^2-C^0	การสั่น (Re_{os})	สายร้อน (Re_p)	สายเย็น (Re_c)
253	237.7489	62.65019	781.2072	1156.246
254	154.2949	522.0457	292.4807	891.1635
255	207.4736	298.433	456.1551	664.9262
256	293.0311	24.32331	444.659	2331.846
257	298.3822	245.1894	611.9889	2092.02
258	265.736	362.6758	813.0082	1865.255
259	214.8529	129.2247	316.3281	1584.746
260	181.456	488.7025	363.2689	1104.475
261	192.8978	219.7063	515.7843	871.712
262	240.5256	138.154	685.19	639.8786
263	324.1263	477.5543	836.8427	2264.415
264	215.9886	242.6232	182.554	2003.467
265	195.1053	6.00822	361.0789	1808.163
266	214.4523	490.1446	546.8351	1562.071
267	263.0335	258.5529	723.5007	1335.271
268	264.5878	137.6631	907.5401	842.9887
269	243.9746	250.1193	754.5546	1657.354
270	191.9414	323.6522	234.3329	1388.947
271	181.2812	310.3226	421.2778	1177.129
272	214.3829	578.0166	597.8553	947.0936
273	219.0143	380.1598	619.3027	717.3189
274	287.1203	633.0649	777.2119	2336.411
275	202.2056	239.8641	286.5521	2081.907
276	255.2747	433.6068	443.2133	1885.864
277	190.6302	349.5936	496.4949	1395.91
278	209.574	526.0014	661.4565	1141.413
279	224.8302	234.0497	857.8812	931.8027
280	165.7972	664.4812	346.3932	671.1562

การทดลองที่	Overall heat transfer coefficient	Reynolds Number		
	(Uo) w/m^2-C^0	การสั่น (Re_{os})	สายร้อน (Re_p)	สายเย็น (Re_c)
281	223.4895	562.2456	360.8213	2309.649
282	255.1994	362.5416	518.5763	2047.754
283	264.5398	307.1521	676.9693	1830.757
284	275.638	556.0702	859.8093	1615.032
285	194.5572	985.4317	207.6259	1886.851
286	182.5474	1156.349	416.1652	1705.899
287	221.4664	1614.867	597.5939	1438.903
288	209.0191	2022.475	769.3009	1216.178
289	216.1995	1206.818	799.63	994.8895
290	152.121	1399.225	282.1807	710.2947
291	243.2604	1351.314	442.9513	2410.674
292	229.5833	1731.355	621.6361	2199.782
293	263.8705	1710.691	663.7142	1666.843
294	219.0152	1930.355	843.9521	1430.011
295	157.8012	1194.599	327.3996	1160.258
296	176.6237	2214.769	505.0145	948.1401
297	176.8069	1549.117	542.3707	727.3172
298	250.3531	1147.798	678.0844	2344.723
299	278.0461	1572.263	855.0812	2157.354
300	183.1524	1829.323	364.3978	1879.318

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-36 ผลจากการคำนวณแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนและค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds Number) ที่สภาวะการทดลอง อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางภายในแผ่นบัพเฟิลเทียบกับเส้นผ่านกลางของท่อ (d_i/D) เท่ากับ 0.7 จำนวน 100 การทดลอง

การทดลองที่	Overall heat transfer coefficient	Reynolds Number		
	(U_o) w/m^2-C^o	การสั้น (Re_{os})	สายร้อน (Re_h)	สายเย็น (Re_c)
301	189.7079	0	188.9018	517.5789
302	267.7477	211.113	339.6699	2173.572
303	288.4453	144.2051	478.5383	1936.164
304	326.3425	74.04775	625.4799	1704.001
305	394.8335	148.213	760.1139	1483.273
306	194.8886	106.1294	215.153	1218.416
307	288.3503	22.44865	349.4462	995.2845
308	321.3965	257.5131	491.5399	780.7702
309	410.7195	95.37434	630.1129	2424.629
310	373.3004	24.42886	672.1207	1922.352
311	232.2473	221.8967	249.0211	1643.466
312	268.228	161.857	385.0475	1436.236
313	312.8752	47.44056	523.8124	1197.46
314	366.9809	303.8485	541.5238	980.3999
315	385.7905	56.37046	690.9194	749.4246
316	233.3928	36.45367	269.2145	2366.514
317	268.8466	126.963	422.2791	2148.677
318	233.6055	300.7604	302.4426	810.7448
319	208.3383	1221.943	516.0856	596.8204
320	324.8374	719.9637	601.4689	2208.756
321	408.8967	605.5836	730.7647	1973.243
322	199.2265	748.4015	180.6206	1736.672
323	185.6139	921.6188	365.1985	1513.915
324	280.0909	562.1399	485.779	1293.744

การทดลองที่	Overall heat transfer coefficient	Reynolds Number		
	(Uo) w/m ² -C ^o	การสั่น (Re _{os})	สายร้อน (Re _h)	สายเย็น (Re _c)
325	291.4338	986.3532	684.997	1062.311
326	341.3898	863.8917	829.1252	567.1092
327	190.7032	663.0902	235.9084	2203.388
328	252.6279	843.8399	376.9766	1971.086
329	250.6191	799.901	550.8979	1724.815
330	327.0558	657.7454	666.7144	1490.415
331	279.3075	1453.177	759.3261	1258.258
332	173.4571	649.7378	271.898	998.9724
333	220.9688	769.1265	426.8294	791.1869
334	298.474	598.3916	551.2746	2435.727
335	228.4354	658.0188	441.132	1106.739
336	247.734	460.9263	602.5548	877.4598
337	292.58	892.6201	783.3698	646.3443
338	227.554	328.8738	277.7987	2236.328
339	237.0559	900.6923	317.7018	2004.432
340	320.7857	370.9931	444.8835	1810.221
341	291.8805	733.8674	622.9497	1581.833
342	368.2032	973.0669	769.4161	1346.69
343	178.5964	718.376	193.1884	813.282
344	222.3831	337.8204	358.1508	597.8334
345	297.3883	903.5217	495.0502	2207.133
346	316.8177	424.2857	641.4933	1970.241
347	366.3838	796.9495	800.372	1780.959
348	210.8152	432.4006	226.9754	1499.83
349	221.2533	753.5439	379.0383	1313.713
350	263.8177	715.4623	533.0719	1090.014
351	321.0353	991.415	705.1059	562.9562
352	275.9879	177.6649	595.5286	1354.303

การทดลองที่	Overall heat transfer coefficient	Reynolds Number		
	(Uo) w/m ² -C ^o	การสั่น (Re _{os})	สายร้อน (Re _h)	สายเย็น (Re _c)
353	275.8124	62.52983	779.7064	1118.412
354	189.5781	489.8528	274.4444	876.8968
355	237.4406	284.1281	434.2901	652.5606
356	322.1949	21.96939	401.6264	2258.46
357	225.9986	260.9791	651.3995	2035.286
358	312.8174	346.8814	777.6018	1808.98
359	180.988	129.4813	316.9561	1570.849
360	195.7458	467.9623	347.852	1078.53
361	227.3695	217.5708	510.7709	855.2188
362	247.1976	136.034	674.6755	624.3114
363	298.0246	466.5974	817.6422	2246.98
364	215.884	236.9226	178.2647	2001.247
365	176.9326	6.683436	401.6576	1800.272
366	285.1034	460.286	513.523	1553.545
367	253.4201	253.6199	709.697	1336.717
368	265.4661	136.6249	900.6959	828.0432
369	245.9058	256.4212	773.5661	1646.587
370	211.4586	307.2608	222.4651	1366.206
371	186.7756	321.4484	436.3817	1148.138
372	211.0952	594.905	615.3234	921.1467
373	245.0641	399.6378	651.0335	707.065
374	228.7902	671.6277	824.5553	2354.469
375	175.4154	251.0655	299.9338	2105.001
376	203.2052	454.4986	464.5679	1836.723
377	183.4549	366.1685	520.0347	1375.001
378	257.8976	531.0831	667.8468	1129.165
379	241.9106	234.9306	861.1099	900.035
380	141.2545	702.824	366.3813	657.982

การทดลองที่	Overall heat transfer coefficient	Reynolds Number		
	(Uo) w/m ² -C ⁰	การสั่น (Re _{os})	สายร้อน (Re _h)	สายเย็น (Re _c)
381	159.661	590.4703	378.9345	2261.577
382	216.7012	361.1275	516.5536	2084.144
383	221.2005	319.2241	703.5763	1842.841
384	255.0012	584.0565	903.0825	1587.023
385	203.7352	1073.922	226.2703	1880.598
386	277.991	997.2017	358.8888	1650.894
387	327.8717	1325.259	490.4226	1423.244
388	399.4435	1619.181	615.8974	1209.638
389	398.4509	993.385	658.2109	966.706
390	183.6378	1302.838	262.7425	730.3859
391	310.2188	1153.574	378.1336	2376.521
392	365.42	1342.78	482.1198	2128.802
393	344.7062	1404.313	544.8457	1652.43
394	429.9156	1504.154	657.6169	1425.396
395	197.0307	696.412	286.2947	1166.584
396	262.8802	1828.654	416.972	942.1064
397	286.0588	1274.736	446.3056	705.1555
398	389.9212	937.3565	553.7618	2378.396
399	467.6295	1240.435	674.6152	2092.222
400	242.8712	1507.657	300.3224	1885.5

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายประกิจ ชูหว่าง เกิดเมื่อวันที่ 4 กุมภาพันธ์ พุทธศักราช 2527 จังหวัดพัทลุง สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนพัทลุง จังหวัดพัทลุง สำเร็จการศึกษาปริญญาบัณฑิต ภาควิชาเคมีวิศวกรรม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2549 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2550



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย