

# สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยหลักการหมุนวน  
PERFORMANCE ENHANCEMENT OF HEAT EXCHANGER BY SWIRL FLOW



โดย

นาย ถนอมศักดิ์ บุญมาก

นาย ทวีป หล่อเจริญผล

นาย ธนวัชร จันทนา

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. พงษ์เจต พรหมวงศ์

๑/๑๒/๒๕๔๗

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....**62122**  
วัน,เดือน,ปี.....**31 ก.ค. 2549**

b. 11583289  
i. ....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2547

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะ วิศวกรรมศาสตร์เครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
เรื่อง การเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยหลักการหมุนวน

PERFORMANCE ENHANCEMENT OF HEAT EXCHANGER BY SWIRL FLOW

ผู้จัดทำ

- |                         |                       |
|-------------------------|-----------------------|
| 1. นาย อนุศักดิ์ บุญมาก | รหัสนักศึกษา 44010711 |
| 2. นาย ทวีป หล่อเจริญผล | รหัสนักศึกษา 44010716 |
| 3. นาย ธนวัชร จันทนา    | รหัสนักศึกษา 44010721 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยหลักการหมุนวน

นาย ธนอมศักดิ์ บุญมาก 44010711  
นาย ทวีป หล่อเจริญผล 44010716  
นาย ธนวัชร จันทนา 44010721  
รศ.ดร. พงษ์เจต พรหมวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2547

### บทคัดย่อ

ปัจจุบันความจำเป็นทางด้านการแลกเปลี่ยนความร้อนในโรงงานอุตสาหกรรมตั้งแต่ขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่มีความสำคัญเพิ่มมากขึ้นทำให้จำเป็นต้องมีการศึกษาและวิจัยเพื่อการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านการแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อให้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้น

สำหรับโครงการนี้เป็นการศึกษาเฟลคเตอร์ที่มีผลต่อการแลกเปลี่ยนความร้อน ได้แก่ การบิดใบบิดภายในท่อ ที่จะส่งผลถึงประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งจะทำการศึกษาโดยจะทำการเปรียบเทียบกับการไหลภายในท่อราบเรียบเพื่อหาความสัมพันธ์ ระหว่างการไหลในท่อที่จะส่งผลต่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อน อีกทั้งยังมีอิทธิพลให้เกิดแรงดันตกคร่อม (Pressure Drop) ของไหลภายในท่อ ซึ่งเราต้องการการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดีแต่ความดันตกคร่อมต่ำ ซึ่งผลสรุปโดยรวมปรากฏว่าการแลกเปลี่ยนความร้อน และความดันที่ลดลงจากการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับท่อปกติถือว่าเป็นที่น่าพอใจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**PERFORMANCE ENHANCEMENT OF HEAT EXCHANGER BY SWIRL FLOW**

Thanomsak Boonmak

Taweep Lorcharoenphol

Tanawach Chantana

Assoc. Prof. Pongchet Promvonge Advisor

**ABSTRACT**

At present , heat transfer in systems is needed and more essential in small and big scale industrial factories that result to research and develop the heat transfer technologies for improving heat exchanger efficiency .

This project is to study factors effecting on the heat exchanger efficiency by spiral plate insert in the tube . The study is made by changing the flow characteristics in the inner tube with a view to finding the relation between flow in the tube with waves plate and the tube without wave plate . Effects of flow characteristics on heat transfer performance and pressure drop in heat exchanger are investigated experimentally . The results obtained are compared with data of normal flow heat exchanger at same conditions. In summary , the performance of heat exchanger with wave plate depended on the pressure drop could be satisfied from considering the experiments .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี ด้วยการให้คำปรึกษาและความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์ คณะผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือทางด้านอุปกรณ์และสถานที่ที่ใช้ในการทดลอง

ขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านที่ให้คำแนะนำเกี่ยวข้องกับปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ และได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้แก่คณะผู้วิจัย

ขอขอบคุณ ลุง มณฑา เทียมเมือง ที่ได้ช่วยเหลือในงานครั้งนี้อย่างสูง

ขอขอบพระคุณบิดามารดาผู้วิจัย ที่ให้กำลังใจผู้วิจัยจนสำเร็จในการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณเพื่อนทุกคนที่ให้คำปรึกษาและเป็นกำลังใจ

ขอขอบพระคุณท่านผู้มีพระคุณทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือคณะผู้วิจัยที่มีได้กล่าวถึง ณ ที่นี้สุดท้ายนี้คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ คณะผู้วิจัยขอมอบแก่ผู้มี

พระคุณทุกท่าน

นาย ธนอมศักดิ์ บุญมาก

นาย ทวีป หล่อเจริญผล

นาย ธนวัชร จันทนา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

หน้าที่

บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	จ
สารบัญตาราง	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 เงื่อนไขในการเลือกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน	2
2.1 เงื่อนไขในการเลือกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน	2
2.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของของไหล	
2.1.2 เงื่อนไขของการเดินเครื่อง	
2.2 ความเหมาะสมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	3
บทที่ 3 การแบ่งประเภทการใช้งานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน	6
3.1 การแบ่งประเภทตามสภาวะของของไหลที่ใช้	6
3.2 การแบ่งประเภทตามจุดประสงค์ของการใช้งาน	7
3.3 การแบ่งประเภทตามโครงสร้างของอุปกรณ์	8
3.4 ลักษณะการแบ่งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แบ่งตาม Flow Arrangement	18
3.5 ลักษณะการแบ่งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แบ่งตาม Transfer Process	18
3.6 ลักษณะการแบ่งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แบ่งตาม According to Compactness	19
บทที่ 4 วัสดุที่ใช้ทำเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	21
4.1 พลาสติก	21
4.2 แกรไฟต์	21
4.3 แก้ว	22
บทที่ 5 ทฤษฎีการคำนวณ	25
5.1 สภาวะการไหล	25
5.2 การเปลี่ยนแปลงความดันและตัวประกอบเสียดทานในการไหลแบบปรับตัวเต็มที่แล้ว	26
5.3 สหพันธ์การพาความร้อน : การไหลแบบเทอร์บูเลนซ์ในท่อกลม	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้าที่

บทที่ 6 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	30
6.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	30
6.2 วิธีการทดลอง	30
บทที่ 7 ผลการทดลอง	37
บทที่ 8 การสรุปผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	41
8.1 สรุปผลการทดลอง	41
8.2 ข้อเสนอแนะ	41
บรรณานุกรม	42
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก	43
ภาคผนวก ข	48
ภาคผนวก ค	61



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

หน้าที่

รูปที่ 3.1 ลักษณะการไหลในท่อสองชั้น	9
รูปที่ 3.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น	10
รูปที่ 3.3 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน shell-and-tube	11
รูปที่ 3.4 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อหมุนวน	12
รูปที่ 3.5 ลักษณะการทำงานของฮีทปั๊ม	15
รูปที่ 3.6 โครงสร้างของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนแบบฮีทปั๊ม	16
รูปที่ 3.7 (a) การไหลขนานกัน (b) การไหลสวนทางกัน (c) การไหลตัดขวางกัน	18
รูปที่ 3.8 การไหลแบบ Multypass	18
รูปที่ 3.9 Cooling Towers แบบ Natural Convection	19
รูปที่ 3.10 Cooling Towers แบบ Force Convection	19
รูปที่ 4.1 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อในเซลล์ที่สร้างโดยใช้เทคนิครูไขว้	23
รูปที่ 4.2 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสี่เหลี่ยมที่ทำด้วยแกรไฟต์โดยใช้เทคนิครูไขว้	23
รูปที่ 4.3 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อในเซลล์ที่ทำด้วยแก้ว โดยมีเทฟลอนเป็นแผ่นยึดท่อและซีล	23
รูปที่ 4.4 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดท่อแก้ว	24
รูปที่ 6.1 Blower ที่ใช้ในการทดลอง	31
รูปที่ 6.2 ฮีตเตอร์แบบแผ่น	31
รูปที่ 6.3 อุปกรณ์วัดค่าต่างๆที่ใช้ในการทดลอง	32
รูปที่ 6.4 Magnetic Contactor และ Temperature Control	32
รูปที่ 6.5 ชุดควบคุมอุณหภูมิและตัดต่อฮีตเตอร์	33
รูปที่ 6.6 ไบพิด	33
รูปที่ 6.7 การติดตั้งไบพิดในชุดทดลอง	34
รูปที่ 6.8 การติดตั้งครีบนำความร้อนบนผิวท่อ	35
รูปที่ 6.9 การติดตั้งครีบบนตรงกัน	35
รูปที่ 6.10 การติดตั้งครีบบนสลับกัน	36
รูปที่ 7.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Reynolds number กับ Nusselt number	37
รูปที่ 7.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Pressure drop กับ Reynolds number	38
รูปที่ 7.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Reynolds number กับ Nusselt number ของท่อที่ติดครีบบนตรงกัน และท่อที่ ติดครีบบนสลับกัน	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

หน้าที่

รูปที่ 7.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Pressure Drop กับ Reynolds number ของท่อที่ติดครีบริบตรงกัน และท่อที่ติดครีบริบสลับกัน	39
รูปที่ 7.5 เปรียบเทียบค่า Nu ของท่อแบบต่างๆ กับ Nu ของ Bolter	39



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

หน้าที่

ตารางที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างของเหลวใช้งานกับอุณหภูมิ	16
ตารางที่ 3.2 การเปรียบเทียบเชิงปริมาณของสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แบบต่างๆ สำหรับกรณีก๊าซร้อนและก๊าซเย็น	17
ตารางภาคผนวก ก	
การทดลองผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเรียบ : ท่อเปล่า	44
การทดลองผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเรียบ : ใส่วิบิตมุมเฟส 180°	44
การทดลองผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเรียบ : ใส่วิบิตมุมเฟส 360°	45
การทดลองผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเรียบ : ใส่วิบิตมุมเฟส 360° (สลับทิศทางการหมุน)	45
การทดลองที่ชุดทดลองผิวแลกเปลี่ยนความร้อนติดครีบนำความร้อน	
ติดครีบบนตรงกัน : ท่อเปล่า	46
ติดครีบบนตรงกัน : ใส่วิบิตมุมเฟส 360°	46
ติดครีบบนสลับกัน : ท่อเปล่า	47
ติดครีบบนสลับกัน : ใส่วิบิตมุมเฟส 360°	47
ตารางภาคผนวก ข	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มา

ขบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของของไหล เป็นสิ่งสำคัญมากและขบวนการดังกล่าวพบได้บ่อยมากในทางวิศวกรรม ได้แก่ หม้อน้ำ คอนเดนเซอร์ อุปกรณ์ให้ความร้อนแก่น้ำ หม้อน้ำรถยนต์ คอยล์ร้อน คอยล์เย็น ต่างก็เป็นตัวอย่างของขบวนการที่ซึ่งความร้อนเกิดการแลกเปลี่ยนกันระหว่างของไหลร้อนและของไหลเย็น อุตสาหกรรมปิโตรเคมีสมัยใหม่ โรงงานผลิตพลังงาน ต่างก็มีขบวนการต่างๆ มากมายเกี่ยวข้องกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เช่น หม้อน้ำรถยนต์ หรือ หน่วยหล่อเย็นในเครื่องปรับอากาศ

### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

สำหรับโครงการนี้เป็นการศึกษาแฟกเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อน โดยในโครงการนี้จะทำการศึกษาโดยการเปลี่ยนลักษณะของกรไหลภายในท่อเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกรไหลในท่อที่จะส่งผลกระทบต่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อน

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยจะทำการศึกษากรไหลในท่อ 2 ชนิด คือท่อที่กรไหลปกติ และท่อที่มีแผ่นบิดอยู่ภายใน เพื่อหาว่าท่อชนิดใดมีประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนดีที่สุด

### 1.4 วิธีการดำเนินงาน

งานวิจัยของโครงการนี้เริ่มจากการสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) แบบใช้อากาศโดยท่อที่มีรูปทรงของหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยม มีการให้ความร้อนจาก ฮีตเตอร์ (Heater) ที่ผิวท่อด้านบนและด้านล่างในช่วงที่มีการทำความร้อน ทำการบันทึกอุณหภูมิที่ทางเข้าและทางออกของชุดทดลอง จากนั้นทำการหาความร้อนที่ถ่ายเทได้และค่าความดันตกคร่อม (Presser Drop) ภายในท่อ จากนั้น และทำการติดตั้งแผ่นบิดบริเวณทางเข้าของช่วงทดลองที่มีการให้ความร้อนและทำการบันทึกข้อมูลเพื่อนำมาวิเคราะห์ท่อที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### เงื่อนไขในการเลือกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

#### 2.1 เงื่อนไขในการเลือกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

คำนิยามของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในอุตสาหกรรม หมายถึง เครื่องมือใดๆ ที่มีการถ่ายเทความร้อนให้ของไหลที่ไหลผ่านบริเวณที่มีการทำความร้อน ในการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน สิ่งแรกที่จะต้องศึกษาคือคุณสมบัติที่ใช้ จากนั้นจึงทำการเลือกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมกับจุดประสงค์และเงื่อนไขของการใช้มากที่สุด หัวข้อที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้เป็นสิ่งที่จะต้องพิจารณาในการเลือกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงสุดและถูกหลักเศรษฐกิจด้วย

##### 2.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของของไหล

คุณสมบัติของของไหลที่สำคัญที่จะต้องคำนึงถึงในการเลือกประเภทของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน คือ ความหนืด ความหนาแน่น ความจุความร้อนจำเพาะของของไหล ปริมาณของสิ่งเจือปนหรืออนุภาคของแข็งที่มีอยู่ในของไหล ตลอดจนคุณสมบัติของสิ่งเจือปนเหล่านั้น เนื่องจากสิ่งเจือปนอนุภาคของแข็งและตะกอนมักจะสะสมในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจนเกิดการกีดขวางการไหลหรือเกาะเป็นคราบติดกับผิวหน้าความร้อน ทำให้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนลดลง จึงควรระวังเป็นพิเศษ ในกรณีที่มีการระเหยหรือการควบแน่นของของไหลในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ถ้าสภาพการไหลของไหลไม่เหมาะสมอาจเกิดการสั่นสะเทือน หรือเกิดการสะสมของก๊าซ ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องลดลง

##### 2.1.2 เงื่อนไขของการเดินเครื่อง

เงื่อนไขต่างๆ ที่เกี่ยวกับความแข็งแรงของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะถูกกำหนดโดยความดันและอุณหภูมิของไหลที่ใช้ในการออกแบบ เพื่อให้วิธีแลกเปลี่ยนความร้อน และความแข็งแรงของวัสดุที่ใช้ปลอดภัยพอสำหรับการปฏิบัติงาน

ในกรณีที่ต้องจำกัดผลการลดความดันของของไหล ระหว่างทางเข้าและทางออกจะถูกกำหนดโดยความดันและอุณหภูมิของเหลวที่ใช้ในการทดลอง ควรพิจารณาทบทวนแบบของเครื่องที่เลือกไว้แล้ว ในกรณีที่การเดินเครื่องเป็นช่วงๆ ปริมาณของไหล เวลาที่ใช้ในการเดินเครื่องและผลต่างของอุณหภูมิที่ยอมให้ได้ในการเดินเครื่องแต่ละครั้ง เป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึงด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 ความเหมาะสมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ถึงแม้ว่าการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน มาตรฐานต่างๆ ใจจะเป็นที่พอใจของการต้องการในการใช้งานหน่วยธรรมดาที่อุณหภูมิและความดันปานกลาง สำหรับกรณีโดยเฉพาะ ถูกออกแบบให้ใช้ได้ในงานพิเศษได้มากมาย คือทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิและความดันตั้งแต่ต่ำๆ จนสูงมาก

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนหลายตัวถูกออกแบบสำหรับงานหลายชนิด ดังนั้น จุดประสงค์สำหรับความเหมาะสมที่สุดขึ้นอยู่กับชนิดของงานที่จะนำไปใช้ เช่น ต้องการให้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีน้ำหนักน้อยที่สุด , ปริมาตรหรือพื้นที่ในการใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนน้อยที่สุด ตัวอย่างเช่น ถ้าต้นทุนในการผลิต (Initial cost) และค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน (Operation cost) จะมีค่าสูงเนื่องจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีขนาดใหญ่ ต้องใช้สารทำงาน (Working fluid) มากกว่า และต้องใช้ Pump ใหญ่ขึ้น , ความดันตกคร่อม (Pressure drop) ก็มากกว่าด้วย

ต่อมา เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนควรมีการถ่ายเทความร้อนให้กับของไหลมากที่สุดแต่ความดันตกคร่อมน้อยที่สุด (Pressure drop), ความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยน้อยที่สุด หรือมีอุณหภูมิสม่ำเสมอที่สุดนั่นเอง

ดังนั้น เพื่อที่จะนำไปสู่การศึกษาความเหมาะสมที่สุดในการออกแบบด้านอุณหภูมิของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ควรถูกแสดงและการคำนวณควรมีการทำซ้ำ สำหรับแต่ละการออกแบบที่สามารถแปรผันได้ จนกระทั่งที่เหมาะสมและยอมรับได้มากที่สุด

Bell อธิบาย คอมพิวเตอร์ช่วยการออกแบบกระบวนการทางความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิด Shell-and-Tube

Shah เกี่ยวกับพื้นฐานของลักษณะเด่น คอมพิวเตอร์ที่ช่วยในการออกแบบทางความร้อน และ กระบวนการที่เหมาะสมที่สุด สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกะทัดรัด

Spalding โครงร่างทั่วไป ลักษณะเด่นของวิธีการทาง Numerical สำหรับการคำนวณ Fluid dynamics และสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

โครงสร้างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ในขั้นพื้นฐานจะมีการมุ่งความสนใจ ไปทางด้าน การออกแบบให้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีขนาดกะทัดรัด แต่มีประสิทธิภาพสูง

ขั้นแรกของกระบวนการที่เหมาะสมที่สุด คือ การแก้ปัญหาของการประเมินค่า (Rating problem) และการกำหนดขนาด (Sizing problem)

ปัญหาด้านการประเมินค่า (Rating problem) ถูกเกี่ยวพันกับการหาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน อุณหภูมิที่ทางออกและความดันที่ลดลง ในแต่ละด้านและปริมาณต่อไปนี้เป็นปริมาณอย่างกว้างๆ ที่ระบุในปัญหาการประเมินค่า คือ ชนิดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน , พื้นผิวรูปทรงเรขาคณิต , การจัดการการไหล , อัตราการไหล และอุณหภูมิที่ทางเข้า

ปัญหาด้านขนาด (Sizing problem) จะเกี่ยวพันกับการหาค่ามิติของเมตริกซ์ เพื่อคำนวณหา การถ่ายเทความร้อนจำเพาะ (Specific heat transfer) และความดันตกคร่อม (Pressure drop) ที่ต้องการ

งานของผู้ที่ออกแบบ คือ การเลือกชนิดของโครงสร้าง , การจัดการการไหล และพื้นผิว รูปทรงเรขาคณิตทั้งสองด้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณต่อไปนี้ เป็นปริมาณอย่างกว้างๆ คือ อุณหภูมิของไหลที่ทางเข้าและทางออก, อัตราการไหล, ความดันตกคร่อม (Pressure drop) และอัตราการถ่ายเทความร้อน

Shah อธิบายจุดเด่นของความสำคัญของคอมพิวเตอร์ในการทำ Subroutine ที่ถูกต้อง การให้มีการคำนวณที่หาขนาด และการประเมินค่าอัตราต่างๆซึ่งรวมถึงสิ่งต่างๆต่อไปนี้

1) การออกแบบโดยเฉพาะ (Specific Design) การออกแบบโดยเฉพาะที่มีการกำหนดแน่นอนที่สมบูรณ์หาได้จาก Computer subroutine ข้อมูลควรรวบรวมชนิดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน, การจัดการการไหล, พื้นที่ผิวระขาคณิต, ค่าสภาวะการทำงาน เช่น อุณหภูมิที่ทางเข้า ความดัน อัตราการไหล ชนิดของของไหล และอื่นๆ

2) คุณสมบัติของของไหล (Fluid property) คุณสมบัติทางกายภาพหลายๆอย่างของของไหล เช่น ค่าความร้อนจำเพาะ, ความหนาแน่น, ความหนืด, ค่าการนำความร้อน และ เฟลนตันนัมเบอร์ ค่าเหล่านี้ควรถูกรวมเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิในเทอมที่มีความสัมพันธ์ร่วมกันหรือที่เรียกว่า สหสัมพันธ์ (Correlation)

3) Matrix geometry ข้อมูลที่บ่งบอกพฤติกรรมของ Matrix geometry ควรถูกแบ่งแต่ละด้านของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน รวมถึงพื้นที่การไหลแบบอิสระให้น้อยที่สุด เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกส์ ขนาดลูกคลื่น จำเป็นสำหรับการคำนวณประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนและอื่นๆ

4) ความสัมพันธ์  $h$  และ  $f$  ( $h$  and  $f$  relation) ลักษณะเฉพาะของการแลกเปลี่ยนความร้อนและความเสียดทานการไหลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนถูกใช้ในเทอม  $j$  และ  $f$  และ plot กราฟในความสัมพันธ์ของ Reynolds number และข้อมูล  $h$ ,  $f$  ควรถูกจัดทำขึ้นเป็นสหสัมพันธ์ (Correlation)

5) ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat transfer efficiency) เมื่อพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนมากขึ้น ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนย่อมจะสูงขึ้นตามไปด้วย

6) ความดันที่ลดลง (Pressure drop) ความดันที่ลดลงสำหรับการไหลภายในท่อเกิดจากความเสียดทานการไหล การเร่งและการหน่วง อันเนื่องมาจากการถ่ายเทความร้อน การหดและขยายตัวของพื้นที่ทางเข้าและทางออกของของไหล

Rating problem ถ้าเป็นปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการเหมาะสมที่สุด (Optimization) ซึ่งถูกสัมพันธ์กับอัตราการถ่ายเทความร้อนหรือ Pressure drop ถัดมา Rating problem ถูกแก้ปัญหาและเป็นผลให้อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนและความดันลดลงถูกคำนวณ การแก้ปัญหาของ Rating problem จะถูกคำนวณโดย คอมพิวเตอร์

Sizing problem ถ้าปัญหาเกี่ยวกับการเหมาะสมที่สุด (Optimization) ซึ่งสัมพันธ์กับ ขนาด น้ำหนัก หรือพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน รวมถึงราคาด้วย

Optimization problem มาตรการที่เหมาะสมที่สุดกับงาน โดยเฉพาะ ดังนั้น ปริมาณที่จะถูกทำให้เกิดสภาวะที่เหมาะสมที่สุดควรมีการกำหนดว่าต้องการมากที่สุด (Maximized) หรือต่ำที่สุด (Minimized) เนื่องจากอาจจะจะมีเงื่อนไขบางตัวถูกเพิ่มเข้ามา หลายๆวิธีอาจถูกนำมาใช้ให้ได้การออกแบบที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหมาะสมที่สุด แต่อย่างไรก็ตาม วิธีนั้นก็จะถูกปรับให้เหมาะสมกับแต่ละกรณีที่เกี่ยวข้องกับการแก้ปัญหาของ Rating problem หรือ Sizing problem

คาดการณ์ไว้ว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เป็นแบบเหมาะสมที่สุด สำหรับราคาที่ถูกที่สุด ปัญหาเกี่ยวกับเงื่อนไขต่างๆ เช่น พื้นที่ด้านที่คงที่ (Fixed Area) และช่วงของขนาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน รวมถึงเงื่อนไขที่เป็นนัย (Implicit Constraint) โดยเฉพาะอัตราการถ่ายเทความร้อนน้อยที่สุด และความดันตกคร่อม (Pressure drop) ที่มากที่สุดครั้งหนึ่งที่ผิวเรขาคณิตถูกเลือก ผู้ออกแบบมีทางเลือกในการเพิ่มเงื่อนไข เช่น ขนาดของลูกคลื่น , แอมพลิจูดของคลื่น (Amplitude) , ระยะของยอดคลื่น (Pitch) , วัสดุที่ใช้ทำลูกคลื่นที่มีผลต่อค่าการนำความร้อนของคลื่น อัตราการไหลของของไหล ดังนั้น ปัญหาที่ต้องคำนวณจะลดลงจากการแก้ปัญหา Rating problem ภายในช่วงของการปรับค่าที่เจาะจง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## การแบ่งประเภทการใช้งานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

### การแบ่งประเภทการใช้งานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

การแบ่งประเภทการใช้งานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาจกระทำได้ 6 วิธี คือ วิธีแบ่งประเภทตามสภาวะของของไหลที่ใช้ วิธีแบ่งประเภทตามลักษณะการใช้งาน หรือ จุดประสงค์ของการใช้งาน วิธีแบ่งประเภทตามโครงสร้างของอุปกรณ์ วิธีการแบ่งตามขนาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน วิธีการแบ่งตามการถ่ายเทความร้อนและวิธีการแบ่งตามการไหลของของไหล

#### 3.1 การแบ่งประเภทตามสภาวะของของไหลที่ใช้

วิธีการแบ่งนี้เป็นที่บ่งว่าของไหล 2 ประเภทที่ทำการแลกเปลี่ยนความร้อนผ่านผนังถ่ายเทความร้อน มีสภาวะเป็นอะไร และมีการเปลี่ยนสภาวะภายในระหว่างแลกเปลี่ยนความร้อนหรือไม่

- 1) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของเหลวกับของเหลว (ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะ) ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนี้ ของไหลทั้ง 2 ชนิดต่างก็เป็นของเหลวซึ่งเพียงแต่ถูกให้ร้อนขึ้น หรือเย็นลงเท่านั้น ตัวอย่างเช่น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำมันก๊าดร้อนและน้ำมันดิบในอุปกรณ์กลั่นน้ำมัน เป็นต้น
- 2) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของเหลวกับของเหลว (มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะ) ของเหลวฝ่ายหนึ่งในเครื่องจะเปลี่ยนสภาวะเป็นก๊าซหรือระเหยเป็นไอในระหว่างแลกเปลี่ยนความร้อน ยกตัวอย่างเช่น เครื่องต้มน้ำ (Boiler) ของหอกกลั่นน้ำมัน ซึ่งใช้น้ำมันอุณหภูมิสูงเป็นแหล่งความร้อน เป็นต้น
- 3) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซกับก๊าซ (ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะ) ของไหลทั้ง 2 ชนิดในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่างเป็นก๊าซซึ่งไม่เกิดการควบแน่นเป็นของเหลว ตัวอย่างเช่น เครื่องอุ่นอากาศ (Air preheater) ซึ่งใช้ก๊าซทิ้งเป็นแหล่งความร้อน เป็นต้น
- 4) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซกับก๊าซ (มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะ) ของไหลฝ่ายหนึ่งในเครื่องจะควบแน่นเป็นของเหลวในระหว่างการแลกเปลี่ยนความร้อนยกตัวอย่างเช่น เครื่องกระจายความร้อน (Radiator) สำหรับทำความอบอุ่น โดยการทำอากาศให้อุ่นด้วยไอน้ำ
- 5) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซกับของเหลว (ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะ) ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนี้ ของไหลฝ่ายหนึ่งของผนังถ่ายเทความร้อนจะเป็นก๊าซ ส่วนของไหลอีกฝ่ายหนึ่งจะเป็นของเหลว ยกตัวอย่างเช่น เครื่องอุ่นน้ำป้อน (Economizer หรือ Feed water Preheater) ซึ่งในก๊าซทิ้งจากหม้อไอน้ำเป็นแหล่งความร้อน
- 6) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซกับของเหลว (มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะ) ยกตัวอย่างเช่น หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ (Water tube boiler) ซึ่งระเหยน้ำให้เป็นไอกด้วยก๊าซสันดาป และ เครื่องควบแน่น (Condenser) ซึ่งควบแน่นไอ ให้เป็นของเหลวด้วยน้ำระบายความร้อน เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการแบ่งประเภทตามสถานะของของไหลนี้สะดวกสำหรับการหาค่าโดยประมาณของสัมประสิทธิ์แลกเปลี่ยนความร้อนได้

### 3.2 การแบ่งประเภทตามจุดประสงค์ของการใช้งาน

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่แบ่งประเภทตามจุดประสงค์ของการใช้งาน หรือ ลักษณะการใช้งานนั้น แบ่งออกได้ดังนี้

- 1) เครื่องระเหย (Evaporator) หรือหม้อเคี้ยว (Concentrator) จุดประสงค์ของการใช้งาน คือ การระเหยของเหลวให้เป็นไอน้ำ เพื่อใช้ไอที่เกิดขึ้นให้เป็นประโยชน์หรือเพื่อให้ได้ของเหลวที่เข้มข้นขึ้นโดยทั่วไป นอกจากส่วนของการถ่ายเทความร้อนแล้ว ยังมีส่วนสำหรับสะสมไอน้ำด้วย ดังนั้นรูปร่างภายนอกจึงมักจะแตกต่างจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเซลล์ต่อท่อ
- 2) เครื่องอุ่นหรือเครื่องทำให้ร้อนล่วงหน้า (Preheater) จุดประสงค์ก็เพื่ออุ่นหรือทำให้ของเหลวร้อนล่วงหน้า เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของกระบวนการ โดยทั่วไปมักจะเรียกชื่อตามการใช้งาน หรือ ตามประเภทของไหลที่อุ่นให้ร้อน ยกตัวอย่างเช่น เครื่องอุ่นน้ำป้อนหม้อไอน้ำ (Boiler feed water preheater)
- 3) เครื่องทำให้ร้อน (Heater) จุดประสงค์ก็เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของของไหลให้สูงขึ้น โดยการให้ความร้อน
- 4) เครื่องทำให้ร้อนยิ่งยวด (Super - heater) เครื่องนี้ทำหน้าที่เพิ่มความร้อนแก่ของไหลที่ถูกทำให้ร้อนมาแล้ว เพื่อให้อยู่ในสภาพร้อนยิ่งยวด อย่างเช่น เครื่องดงไอ (Stream Superheater) เป็นต้น
- 5) เครื่องต้มน้ำ (Boiler) เครื่องนี้ทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่ของเหลวควบแน่นเพื่อระเหยให้เป็นไอน้ำอีกครั้งหนึ่ง แสดงตัวอย่างของการใช้เครื่องต้มน้ำ ซึ่งติดตั้งอยู่ที่ใกล้ฐานของหม้อกลั่น หน้าที่ของเครื่องในที่นี้คือ การให้ความร้อนแก่น้ำมันก้นหอ เพื่อระเหยองค์ประกอบจุดเดือดต่ำที่มีอยู่ในน้ำมันนั้น เครื่องต้มน้ำมีเป็นแบบกาต้ม (Kettle Type) และแบบกาลักน้ำเชิงความร้อน ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดในภายหลัง
- 6) เครื่องควบแน่น (condenser) จุดประสงค์ก็เพื่อควบแน่นไอที่ควบแน่นได้ให้กลายเป็นของเหลว ยกตัวอย่างเช่น เครื่องควบแน่นไอน้ำให้กลับเป็นน้ำ
- 7) เครื่องควบแน่นหมด (Total Condenser) เครื่องนี้เป็นเครื่องควบแน่นประเภทหนึ่งที่ใช้หม้อกลั่น แต่ได้รับการออกแบบให้สามารถควบแน่นไอทั้งหมดที่ออกมาจากยอดของหม้อกลั่น
- 8) เครื่องควบแน่นบางส่วน (Partial Condenser) คล้ายกับเครื่องควบแน่นหมด เครื่องควบแน่นบางส่วนนี้เป็นเครื่องประเภทหนึ่งที่ใช้กับหม้อกลั่น แต่มีจุดประสงค์เพื่อเพียงควบแน่น ส่วนหนึ่งของไอที่ออกมาจากยอดของหม้อกลั่นให้เป็นของเหลว
- 9) เครื่องระบายความร้อน (Cooler) เครื่องนี้มีหน้าที่ระบายความร้อนออกจากของไหลเพื่อลดอุณหภูมิของของไหล
- 10) เครื่องทำให้เย็นจัด (Chiller) เครื่องนี้ทำหน้าที่ลดอุณหภูมิของของไหลให้เหลือต่ำมาก โดยการใช้ตัวทำความเย็น (Refrigerant) จำพวกแอมโมเนียและฟรอน เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 11) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในคำจำกัดความที่แคบนี้แตกต่างจากเครื่องต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้น ในแง่ที่ว่ามีจุดประสงค์เพื่อให้ความร้อนแก่ของไหลตัวหนึ่ง ในขณะที่เดียวกับที่ระบายความร้อนออกจากของไหลอีกตัวหนึ่ง
- จุดประสงค์ของตั้งแต่ (1) เครื่องระเหย จนถึง (5) เครื่องต้มฆ่า คือ การให้ความร้อนแก่ของไหล ส่วนจุดประสงค์ของ (6) เครื่องควบแน่น จนถึง (10) เครื่องทำให้เย็น ก็คือ การดึงเอาความร้อนออกจากของไหล อนึ่ง จุดประสงค์ของ (11) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนก็คือ ทั้งให้และดึงความร้อน แหล่งความร้อนที่นิยมใช้ในการให้ความร้อน ก็คือ ไอน้ำ แต่ในบางครั้งแหล่งความร้อนอาจจะเป็นของเหลว เช่น น้ำมันร้อน และน้ำร้อน เป็นต้น หรือเป็นก๊าซเนื้ออณูสูง เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไนโตรเจน หรือเป็นก๊าซที่ได้จากการสันดาปเชื้อเพลิง
- โดยทั่วไปจะใช้ไอน้ำ หรือน้ำบ่อในการระบายความร้อน หรือควบแน่นไอน้ำ แต่ในบางครั้ง อาจใช้สารทำความเย็นจำพวกแอมโมเนีย แคลเซียมคลอไรด์ ฟรีออน เป็นต้น อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนต้องมีใช้เสมอกับหอกัน ซึ่งทำหน้าที่แยกองค์ประกอบต่าง ๆ ออกจากของเหลวผสม โดยอาศัยความแตกต่างของจุดเดือดขององค์ประกอบเหล่านั้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง โรงกลั่นน้ำมันจะมีหอกันจำนวนมาก ในกรณีนี้จะเห็นได้ว่า หอกันหนึ่งหอกต้องการอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน 4 ประเภท ดังนั้น จึงทำให้เราสามารถวาดภาพออกได้ว่า อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีความสำคัญมากเพียงไร

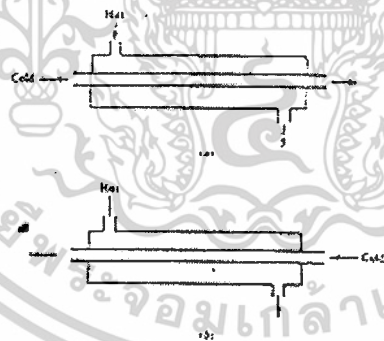
### 3.3 การแบ่งประเภทตามโครงสร้างของอุปกรณ์

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีมากมายหลายประเภท แต่เมื่อแยกประเภทตามโครงสร้างของอุปกรณ์แล้ว มีดังต่อไปนี้

- 1) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดท่อ เนื่องจากโครงสร้างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนี้เป็นแบบง่าย ๆ และราคาข้อมเยา จึงมีใช้กันมาก ในปัจจุบันจะพบเห็นบ่อย ๆ ในรูปของเครื่องระบายความร้อนแบบกล่อง (Box Cooler) ในกระบวนการกลั่นน้ำมัน และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีขนาดเล็ก หรือในกรณีที่ใช้ของเหลวที่มีฤทธิ์กัดกร่อนสูง โครงสร้างของเครื่องประเภทนี้ ไม่ต้องการกรรมวิธีการผลิตที่ละเอียดลออ วัสดุที่ใช้ทำขดท่อ(Coil) มีตั้งแต่ท่อทองแดง ท่อเหล็ก จนถึงวัสดุที่แปรรูปได้ยาก เช่น กระเบื้องดินเผา เซรามิค แก้ว เหล็กหล่อซิลิกอนสูง (High Silicon Cast Iron) กราไฟท์ (Graphite) ยางสังเคราะห์ (Synthetic Raisin) เป็นต้น เนื่องจากเป็นขดท่อจึงมีความแข็งแรงสูง แม้ว่าของไหลในท่อจะมีความดันสูง ดังนั้น ข้อดีคือ ปัญหาของการรั่วไหลมีน้อย แต่มีข้อเสียคือประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนต่ำและมีพื้นที่การถ่ายเทความร้อนค่อนข้างน้อย เมื่อเทียบกับสัดส่วนภายนอกของเครื่อง ด้วยเหตุนี้อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของเครื่องจึงมีค่าน้อย เครื่องแบบนี้มักใช้สำหรับการควบคุมอุณหภูมิของของเหลวในถังเก็บให้มีค่าอยู่ในช่วงที่ต้องการ

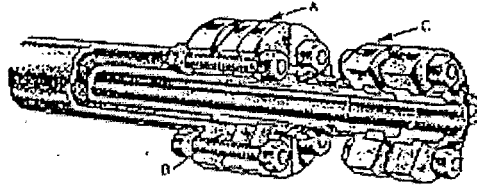
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปิด เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้ใช้ระบายความร้อน โดยการปล่อยให้ น้ำหยดลงบนท่อที่ติดตั้งอยู่ในแนวระดับเพื่อลดอุณหภูมิของของไหลที่ไหลอยู่ภายในท่อ ชื่อเรียกอื่น ๆ ของเครื่องประเภทนี้ก็มี เช่น เครื่องระบายความร้อนแบบทริกเกิล (Trickle Cooler) แบบทรอมโบน (Trombone Cooler) แบบคาสเคด (Cascade Cooler) หรือแบบตัว S (S-type Cooler) เป็นต้น โครงสร้างทั่วไปประกอบด้วยท่อตรงและส่วนโค้ง (Bend) และสามารถวางซ้อนกันหลาย ๆ ชั้น เพื่อเพิ่มความสามารถทำงานของเครื่อง เครื่องแบบนี้เหมาะที่จะใช้กับของไหลความดันสูงที่มีฤทธิ์กัดกร่อนสูง เพราะโอกาสที่จะเกิดการรั่วไหลมีน้อย และถ้าเกิดการรั่วไหลขึ้นก็รู้ได้ทันที วัสดุที่ใช้ทำท่อมืดตั้งแต่ท่อเหล็ก จนกระทั่งวัสดุประเภทต่าง ๆ ที่ทนการกัดกร่อน เช่นเดียวกับที่ใช้ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดท่อ
- 3) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น โครงสร้างของเครื่องแบบนี้ประกอบด้วยท่อ 2 ขนาดซ้อนกันอยู่ โดยมีแกนกลางของท่อร่วมกัน ของไหลชนิดหนึ่งจะไหลอยู่ในท่อใน และของไหลอีกชนิดหนึ่งจะไหลอยู่ในช่องว่างรูปวงแหวนระหว่างท่อในและท่อนอก โดยทั่วไปปลายข้างหนึ่งจะถูกเชื่อมต่อกันด้วยท่อโค้งรูปตัว U (U-Bend) ดังในรูป 3.1 บางทีก็เรียกชื่อตามรูปร่างของเครื่องว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแฮร์핀 เครื่องแบบนี้เหมาะสำหรับการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิของไหลภายในท่อที่มีความดันสูง ความหนืดสูง หรือฤทธิ์กัดกร่อนสูง ในบางครั้งจะใช้ท่อที่มีครีปเป็นท่อชั้นในเพื่อเพิ่มพื้นที่ถ่ายเทความร้อน และความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของเครื่อง



รูปที่ 3.1 ลักษณะการไหลในท่อสองชั้น (a) parallel flow (b) counter flow

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



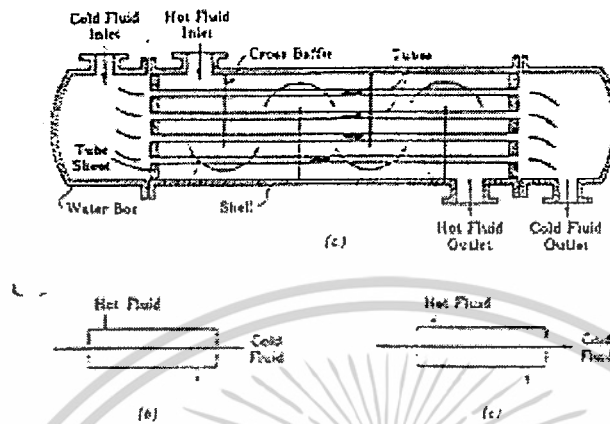
รูปที่ 3.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น

ลักษณะเด่นของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น คือ โครงสร้างค่อนข้างง่าย ราคาของเครื่องต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ความร้อนมีราคาถูก และเมื่อมีความจำเป็น สามารถเพิ่มความสามารถทำงานได้ง่าย โดยการเอาเครื่องที่มีส่วนคล้ายกันหลายๆ ชุดมาต่อกับแบบอนุกรม (Series) หรือแบบขนาน (parallel) เมื่อให้ของไหลไหลสวนทางกันด้วยความเร็วที่เหมาะสม ประสิทธิภาพการถ่ายความร้อนที่ได้จะมีค่าสูง ในขณะที่ความดันสูญเสียมีค่าต่ำ แต่หาเมื่อขนาดของเครื่องเพิ่มมากขึ้นเริ่ม ๆ ปริมาตรของเครื่องต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มตามขึ้น ทำให้ราคาของเครื่องค่อนข้างแพง เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบอื่น ดังนั้น เครื่องแบบนี้จึงควรเลือกใช้ในกรณีที่ปริมาณการถ่ายเทความร้อนมีค่อนข้างน้อย หรือในกรณีที่ต้องการพื้นที่ถ่ายเทความร้อนน้อยกว่า 20 ตร.ม.

- 4) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรมเคมีส่วนใหญ่ ลักษณะเป็น ประเภทนี้ เนื่องจากความนิยมใช้อุปกรณ์ประเภทนี้มีมากที่สุด ส่วนประกอบของ Heat Exchanger จะมีพวก tube bundle, shell, front and rear end header, and baffles เป็นตัวใช้ในการสนับสนุน (support) tube ทำให้เพิ่มการเป็นเทอร์บูเลนซ์ หลักการเลือก baffles จะขึ้นกับช่องว่าง, อัตราการไหล (flow rate), การเกิด pressure drop และ tube support requirement และการไหลที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนภายในท่อ ลักษณะของชนิดของของไหล แบ่งเป็นหลายแบบเช่น liquid to liquid, liquid to gas, gas to gas, liquid to liquid fluid ทั้ง 2 จะถูก pump ผ่าน Exchanger ดังนั้น Heat transfer ทั้งภายในและภายนอก tube จะเป็นแบบ forced convection ดังนั้น heat transfer coefficient จะสูงโดยเกิดจากการไหลของของไหลอยู่แล้ว ไม่จำเป็นต้องติดครีบกเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ liquid to gas ครีบกจะต้องถูกตัดเข้าไปใน gas side ของ tube ซึ่งเป็นจุดที่ค่า Heat transfer coefficient ต่ำแบบ Gas to Gas จะใช้กับ Exhaust gas และ เครื่องอุณหอากาศ สำหรับระบบ gas-turbine, cryogenic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

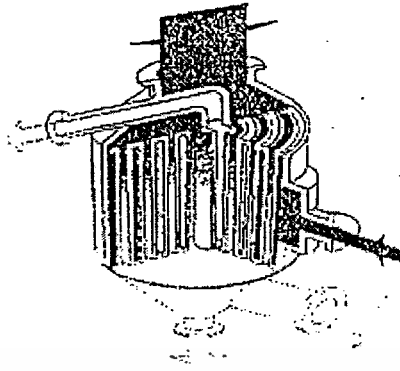
gas – liquefaction system และ shell furnances ทั้งในและนอก tube จะมีการติดครีบเข้าไปเพื่อเป็นการเพิ่ม Heat transfer



รูปที่ 3.3 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน shell-and-tube แบบ (a) one shell pass และ one tube pass (b) parallel flow (c) counter

- 5) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบดาบปลายปืน
- เส้นทางการไหลภายในท่อประกอบด้วยท่อนอกซึ่งปลายข้างหนึ่ง มีฝาปิดอยู่ และท่อในซึ่งสอดอยู่ในท่อนอก ของไหลภายในท่อจะแลกเปลี่ยนความร้อนกับของไหลภายในเชลล์ ในระหว่างที่ไหลอยู่ในช่องว่างระหว่างท่อในและท่อนอก เนื่องจากมีคัทของเครื่องประเภทนี้ สามารถติดตั้งหรือถอดออกได้ โดยไม่เกี่ยวข้องของเหลวภายในเชลล์ เครื่องประเภทนี้สะดวกที่จะสอดเข้าไปในภาชนะบรรจุ หรือระบบท่อได้ โดยตรงเพื่อเพิ่มหรือ ลดอุณหภูมิของของไหลในเชลล์ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบดาบปลายปืน มีราคาสูง เมื่อเทียบกับเครื่องชนิดอื่น ๆ ดังนั้น จึงไม่เหมาะสำหรับงานที่มีอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนสูง แต่เหมาะสำหรับใช้กับอุปกรณ์ที่มีอยู่ แล้วเพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนจากเดิมให้สูงขึ้น
- 6) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อหมุนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อหมุนวน

ดังที่แสดงไว้ในรูป 3.4 โครงสร้างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้ประกอบด้วยท่อทองแดง ท่ออลูมิเนียม หรือ ท่อวัสดุอื่น ๆ ซึ่งเล็กและยาวหมุนวนเป็นเกลียวหลายๆ ชั้น แล้ววางบรรจุในภาชนะรูปทรงกระบอก ผลที่ได้คือ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ที่มีพื้นที่ถ่ายเทความร้อนมาก แต่มีการสูญเสียความร้อนน้อยมาก เพราะพื้นผิวที่ความร้อนหนีออกจากเครื่องมีน้อย โดยโครงสร้างนอกจากการผลิต การซ่อม ทำได้ยากและราคาสูงแล้ว ข้อเสียอย่างอื่นคือ ของไหลในท่อ และในเซลล์จะต้องสะอาดและมีฤทธิ์กัดกร่อนน้อยจึงใช้ได้ ในปัจจุบันนี้ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อหมุนวนส่วนใหญ่จะใช้กับอุปกรณ์แยกก๊าซซึ่งทำให้อากาศหรือก๊าซอื่น ๆ กลายเป็นของเหลวที่อุณหภูมิต่ำมาก ๆ เพื่อทำการแบ่งแยกต่อไป

- 7) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ
- เนื่องจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้ ใช้อากาศเป็นตัวระบายความร้อนแทนน้ำเย็น จึงเป็นที่นิยมใช้กันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในปัจจุบันนี้ ซึ่งขาดแคลนน้ำระบายความร้อน โครงสร้างของเครื่องมี 3 องค์ประกอบ คือ มัดท่อซึ่งประกอบด้วยท่อถ่ายเทความร้อนที่มีครีป (Fin) โครงเหล็ก ซึ่งใช้สำหรับยึดมัดท่อ และเครื่องเป่าลม พร้อมมอเตอร์สำหรับเป่าอากาศผ่านมัดท่อ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศมีทั้งแบบที่เป่าพัดอากาศผ่านมัดท่อ (Forced - Draft) และแบบที่ชักนำอากาศให้ผ่านมัดท่อ (Induced - Draft) คุณลักษณะพิเศษของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนประเภทนี้คือ ไม่ต้องอาศัยน้ำเป็นตัวระบายความร้อน (ผลคือ ไม่ต้องกังวลเรื่องการแสวงหาแหล่งน้ำหรือการแก้ไขคุณภาพของน้ำที่ใช้) และอากาศที่ใช้สำหรับระบายความร้อนก็มีอยู่ไม่จำกัดปริมาณ ยิ่งกว่านั้น เหตุขัดข้องที่เกิดจากสนิมหรือความสกปรกของกรณีที่ใช้ น้ำระบายความร้อนก็ไม่มี ข้อดีอย่างอื่นคือ ค่าบำรุงรักษาถูกกว่ากรณีที่ใช้ น้ำ และเวลาเกิดการรั่วไหลของท่อขึ้น เรื่องที่น้ำจะเข้าไปปนกับของเหลวภายในท่อก็ไม่มี อย่างไรก็ตาม ข้อเสียหลายอย่าง เช่น เสียงดัง ต้องใช้พื้นที่ติดตั้งมาก ค่าก่อสร้างสูง และต้องเลือกสถานที่ติดตั้งให้ดี

- 8) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบปลอกหุ้ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบปลอกหุ้มนี้มีใช้ในกระบวนการของอุตสาหกรรมเคมีมาเป็นเวลานาน โครงสร้างของเครื่องประกอบด้วยปลอกหุ้มถังเก็บหรือถังปฏิกรณ์(Reactor)เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อน ข้อเสียคือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมมีค่าต่ำเทียบกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเซลล์และท่อ หรือแบบอื่น ๆ อีกทั้งพื้นที่ถ่ายเทความร้อนก็ถูกจำกัดโดยขนาดของตัวถัง ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับการให้ความร้อนหรือทำความเย็นแก่ของเหลวโดยเฉพาะอย่างยิ่งสะดวกสำหรับการรักษาอุณหภูมิของของเหลวในถังเก็บหรือถังตวงให้คงที่ ในบางครั้งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนอาจมีการติดตั้งเครื่องกวนสำหรับของเหลวภายในถังหรือเพิ่มพื้นที่การถ่ายเทความร้อนโดยใช้ขอต่อถ่ายเทความร้อนร่วมด้วยโดยปกติแล้วการทำความสะดวกภายในปลอกหุ้มทำไม่ได้ ดังนั้น ของไหลที่ใช้ในปลอกหุ้มควรเป็นไอน้ำ น้ำเย็น ฟรีออน (Freon) หรือแอมโมเนีย (Ammonia) ที่มีความสกปรกน้อย

9) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น

ลักษณะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น คือ การเอาแผ่นถ่ายเทความร้อนหลายๆ แผ่นมาวางเรียงกันในระยะที่ห่างกัน แล้วให้ของเหลวแต่ละชนิดไหลผ่านช่องว่างระหว่างแผ่นในลักษณะสลับกัน ช่องเว้นช่อง เครื่องแบบนี้ มักใช้กับการเพิ่มอุณหภูมิอากาศก่อนเข้าหม้อไอน้ำ (Boiler) ในกรณีนี้ค่าสูญเสียความดันจะน้อย แต่ประสิทธิภาพก็ไม่สู้ดีนัก ปัจจุบันได้มีการปรับปรุงและพัฒนาการเครื่องแบบนี้โดยจะใช้แผ่นเหล็กสแตนเลส (Stainless Steel) บาง ๆ หรือแผ่นไทเทเนียม (Titanium) ซึ่งทนต่อสนิมได้อย่างดี เอามาอัดให้เกิดส่วนนูน ส่วนเว้า แล้ววางประกบกันหลายๆ แผ่น ของไหลแต่ละชนิดจะไหลสลับกันไปตามช่องว่างที่เกิดจากการประกบเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อเพิ่มความแข็งแรง ป้องกันอากาศรั่ว และให้มีช่องว่างไหลดี ผิวของแผ่นนำความร้อนจะมีทั้งส่วนนูน และส่วนเว้า ปะเก็น (gasket) จะถูกติดตั้งไว้ในตำแหน่งที่เหมาะสมเพื่อป้องกันไม่ให้อากาศรั่วไหล และ รักษาระยะห่างระหว่างแผ่นที่ต้องการสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบปรับปรุงใหม่นี้มีค่าสูง ส่วนคุณลักษณะดีเด่นอย่างอื่น คือ สามารถอัดเป็นแผ่นๆ ออกมาทำความสะอาดได้ทั่วถึง การบำรุงรักษาก็ง่าย และสามารถปรับปริมาณการถ่ายเทความร้อนได้ โดยการเพิ่มหรือลดจำนวนแผ่นถ่ายเทความร้อน เนื่องจากปะเก็นที่ใช้โดยปกติทำจากยางหรือสังเคราะห์ จึงไม่เหมาะที่จะใช้กับอุณหภูมิสูง หรือความดันสูง เครื่องแบบนี้นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมเวชภัณฑ์ และอุตสาหกรรมอาหาร ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน รวมสูงประมาณ  $1300 - 3500 \text{ kcal} / \text{m}^2 \text{ hr } ^\circ\text{C}$  ส่วนความดันและอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ได้ประมาณ  $5 \text{ kg} / \text{cm}^2$  และ 150 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แผ่นจะต้องราบเรียบ หากแผ่นไม่สมมาตรจะไม่สามารถ ใช้กับงานที่ต้องทนความดันกับความดันสูง (high pressure) ค่าของ compactness factor จะอยู่ในช่วง 120 ถึง  $230 \text{ m}^2 / \text{m}^3$  การเอาแผ่นถ่ายเทความร้อน 2 แผ่นมาประกบกันให้เกิดช่องทางไหลเหมือนกับขดท่อ ลักษณะการใช้ มีตั้งแต่การเอามาวางประกบอันหลายๆ แผ่น ให้เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น การวางใช้ในภาชนะบรรจุแทนขดท่อถ่ายเทความร้อน (Coil) ตลอดจนการวางติดกับผนังถังแทนปลอกหุ้ม (jacket)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบหอยโข่ง

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้สร้างขึ้นจากแผ่นราบ 2 แผ่นที่เอามาตัดขนานกันให้เหมือนลายหอยโข่ง คุณลักษณะที่ดีเด่น คือ โครงสร้างเป็นแบบไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงการยืดหดตัวเชิงความร้อนสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมสูง เมื่อเทียบกับค่าสูญเสียความดันที่น้อย และการไหลก็สม่ำเสมอด้วย ดังนั้น จึงสามารถออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้ขนาดเล็กเมื่อเทียบกับพื้นที่ถ่ายเทความร้อน ข้อเสียคือ ทำความสะอาด หรือ ซ่อมแซมได้ยาก เพราะปกติสร้างขึ้นโดยการเชื่อมโลหะ (Welding) ดังนั้นจึงไม่เหมาะที่จะใช้กับของไหลที่สกปรกมาก ของไหลที่มีฤทธิ์กัดกร่อนแตกต่างกัน หรือของไหลที่มีความดันสูง ในปัจจุบันเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้มีใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น แต่การใช้ที่เหมาะสม คือ ใช้เป็นเครื่องทำความเย็นในกระบวนการอุตสาหกรรมเคมี โดยเฉพาะอย่างยิ่งใช้เป็นเครื่องควบแน่นที่ความดันใกล้สูญญากาศ

11) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบล้อยอก

ส่วนใหญ่แล้วเลือกการใช้วัสดุประเภทโลหะที่เหมาะสมกับการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารเคมีสองชนิดที่มีฤทธิ์กัดกร่อนผกผันกันนั้นทำได้ลำบาก ในกรณีเช่นนี้สมควรที่จะใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบล้อยอกซึ่งทำจากตะกั่วดำหรือวัสดุทนการกัดกร่อนอื่นๆ ก้อนๆเดียว โครงสร้างของเครื่องประกอบด้วย ก้อนวัสดุทนการกัดกร่อนซึ่งเจาะรูยาวจำนวนมากให้ตั้งฉากกันระหว่างแต่ละชั้นของรูของไหลแต่ละชนิดไหลสลับชั้นกันปามรูปที่เจาะไว้ เครื่องแบบนี้มีใช้ในอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ เช่น กรดเกลือ กรดกำมะถัน และ เคมีภัณฑ์อื่นๆ แต่โครงสร้างของเครื่องจำกัดการใช้ในเฉพาะกรณีปริมาณการแลกเปลี่ยนความร้อนน้อยที่ความดันต่ำและอุณหภูมิต่ำ

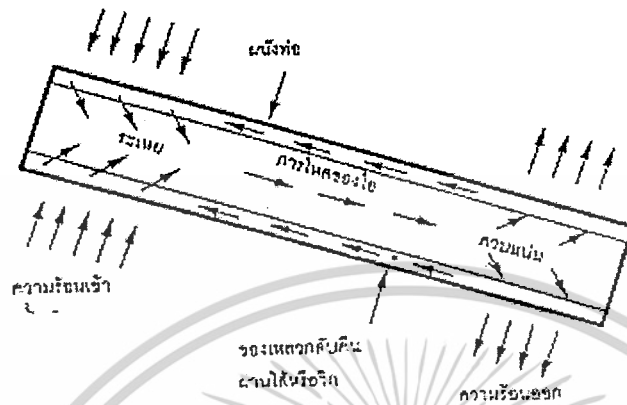
12) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกะทัดรัด

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้ได้มาจากความคิดริเริ่มที่ต้องการลดขนาดของเครื่องให้เล็กที่สุดแต่มีพื้นที่ถ่ายเทความร้อนสูง เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกะทัดรัดจะเรียกชื่อได้ก็ต่อเมื่ออัตราส่วนระหว่างพื้นที่ถ่ายเทความร้อน (ในหน่วย  $\text{ft}^2$ ) กับปริมาตร (ในหน่วย  $\text{ft}^3$ ) ของเครื่องมีค่ามากกว่า 200 ขึ้นไป เพื่อให้พื้นที่ถ่ายเทความร้อนต่อปริมาตรหนึ่งหน่วยมีค่าสูง ในกรณีที่ใช้ท่อกลมปกติจะใช้ท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า  $1/4$  นิ้วร่วมกับครีป (Fin) หรือแผ่น โครงร่างแสดงตัวอย่างทั่วไปของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกะทัดรัด เนื่องจากโครงสร้างแบบนี้ซ่อมแซมทำความสะอาดได้ยาก และอุณหภูมิหรือความดันที่ใช้ก็มีจำกัด จึงไม่ค่อยใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรมเคมี แต่เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดีเลิศระหว่างก๊าซ 2 ชนิด ที่สกปรกน้อย

13) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์

เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแนวใหม่ที่มีอัตราการนำความร้อนสูงและมีสมรรถนะสูง แม้ว่าผลต่างของอุณหภูมิระหว่างแหล่งให้ความร้อน (heat Source) และแหล่งรับความร้อน (Heat Sink) มีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าน้อยกว่า อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์ประกอบด้วยฮีทไปป์ ซึ่งเป็นท่อปิดผนึกภายในบรรจุวิกส์ (Wick) และของเหลวใช้งาน (Working Fluid) ที่ความดันสูญญากาศ



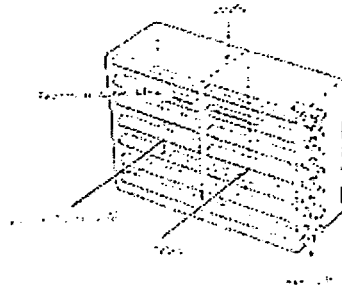
รูปที่ 3.5 ลักษณะการทำงานของฮีทไปป์

ลักษณะการทำงานของฮีทไปป์มีแสดงอยู่ในรูปที่ 3.5 กล่าวคือ เมื่อฮีทไปป์รับความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนผ่านผนังท่อของช่วงการระเหย (Evaporation Section) ไปยังวิกส์ ของเหลวใช้งานที่อยู่ในวิกส์จะระเหยกลายเป็นไอไอที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ไปตามท่อไปยังช่วงการควบแน่น (Condensation Section) ซึ่งมีความดันไอลดกว่า ณ ที่นี้ความร้อนแฝงที่เกิดขึ้นจากการควบแน่นจะถ่ายเทผ่านผนังท่อไปสู่แหล่งรับความร้อน ส่วนของเหลวจากการควบแน่นจะไหลซึมกลับไปยังช่วงการระเหยโดยแรงคาพิลลารี (Capillary Action) ของวิกส์ รูปที่ 3.6 แสดงตัวอย่างของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ฮีทไปป์เป็นตัวถ่ายเทความร้อน

จุดเด่นของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์มีดังต่อไปนี้

1. ไม่ต้องใช้แหล่งพลังงานเสริมในการใช้งาน ยกเว้น เครื่องเป่าลม หรือสูบของเหลว
2. อุณหภูมิที่ใช้งานมีช่วงกว้างและสามารถทำงานได้แม้อุณหภูมิระหว่างแหล่งให้ความร้อน และแหล่งรับความร้อนต่างกันไม่มาก ถ้าเลือกของเหลวใช้งานให้เหมาะสมกับช่วงอุณหภูมิ ดังแสดงในตารางที่ 3.1
3. อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่หนึ่งหน่วยมีค่าสูงกว่าอัตราการนำความร้อนของโลหะ
4. ปัญหาในการใช้งานและการดูแลรักษามีน้อย เพราะไม่มีส่วนที่เคลื่อนไหว (Moving Parts)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 โครงสร้างของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนแบบฮีทไปป์

ตารางที่ 3.1 ความสัมพันธ์ ระหว่างของเหลวใช้งานกับอุณหภูมิ

ช่วงอุณหภูมิ (องศาเซนติเกรด)	ของเหลวใช้งาน
20 – 40	แอมโมเนีย
50 – 200	น้ำ
250 – 650	ปรอท
400 – 800	โปแตสเซียม
500 – 1000	โซเดียม
1000 – 1800	ลิเทียม

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในลักษณะต่าง ๆ เช่นในการรักษาอุณหภูมิในยานอวกาศให้มีค่าสม่ำเสมอทุกจุด, ในการกำจัดความร้อนออกจากชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ประเภททรานซิสเตอร์ อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำและวงจรรวมไอซี, ในการถ่ายเทความร้อนระหว่างก๊าซร้อนและก๊าซเย็นเพื่อประหยัดพลังงาน, ในการควบคุมอุณหภูมิในถังปฏิกรณ์, ในการอบแห้งเส้นใยและกระดาษ, ในการเก็บความร้อนทิ้งจากหม้อไอน้ำ, ในการระบายความร้อนจากระบบเบรคของเครื่องบิน, เตาเผาขยะและกระบวนการผลิต เป็นต้น อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้สำหรับการถ่ายเทความร้อนระหว่างก๊าซร้อนและก๊าซเย็นในอดีตมีหลายประเภทการเปรียบเทียบเชิงปริมาณระหว่างสมรรถนะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์กับอุปกรณ์ประเภทอื่นๆทำได้ค่อนข้างลำบากก็จริงแต่Basiulisก็เคยลองทำการเปรียบเทียบโดยวิธีให้คะแนนหัวข้อเปรียบเทียบต่าง ๆ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 การเปรียบเทียบเชิงปริมาณของสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบต่าง ๆ สำหรับกรณีของก๊าซร้อนและก๊าซเย็น

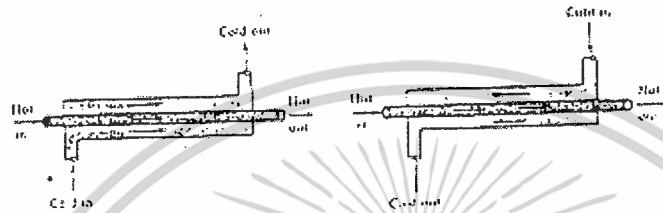
ประเภทของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	ความดันที่สูญเสีย	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน	การบำรุงรักษา	ราคา	พลังงานเสริม	การรั่วไหลของของไหล	พื้นที่การถ่ายเทความร้อนต่อปริมาตร 1 หน่วย	คะแนนรวม
Regeneration	ปานกลาง 3	สูง 4	ยาก 2	สูง 2	จำเป็น	มี 0	มาก 4	15
Shell and Tube	สูง 2	สูง 4	ธรรมดา 3	ปานกลาง 3	ไม่จำเป็น	ไม่มี 5	น้อย 2	19
Plate fin	ต่ำ 4	ปานกลาง 3	ธรรมดา 3	สูง 2	ไม่จำเป็น	ไม่มี 5	มากพิเศษ 5	22
Recirculating	ต่ำ 4	ต่ำ 2	ยาก 2	สูง 2	จำเป็น	ไม่มี 5	มากพิเศษ 3	18
Secondary medium								
Heat-pipe	ต่ำ 4	สูง 4	ง่าย 5	ปานกลาง 3	ไม่จำเป็น	ไม่มี 5	มาก 4	25

อย่างไรก็ดีถ้าการเลือกวัสดุและการออกแบบฮีทไปป์กระทำอย่างไม่ถูกต้องก็อาจเกิดปัญหาในการใช้งานได้ เช่น การหลุดลุ่ยของผนังท่อ จะทำให้ฮีทไปป์หมดประสิทธิภาพในการทำงานโดยสิ้นเชิง การผุกร่อนของผนังด้านในอาจก่อให้เกิดการอุดตัน หรือเสื่อมคุณภาพของวิกค์ ได้บางครั้งวิกค์อาจเกิดการแห้งตัวได้ (Dry out) ถ้าแรงคาพิลลารีไม่มีเพียงพอที่จะถ่ายเทความร้อนของเหลวควบแน่นกลับไปยังวงจรระเหยได้ทันของเหลวใช้งานก็อาจเสื่อมคุณภาพได้ที่อุณหภูมิสูงเกินไป

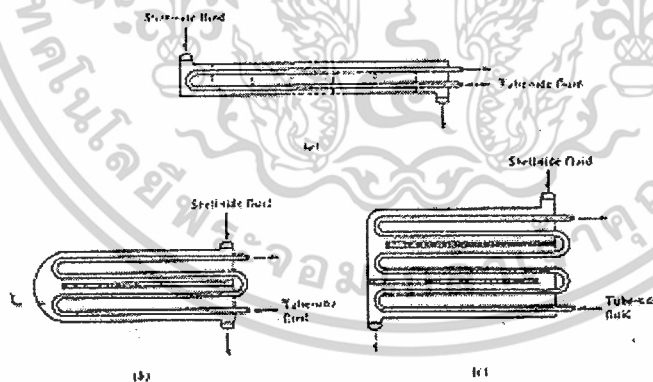
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 62122  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 ลักษณะการแบ่งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตาม flow arrangement

- 1) Parallel flow การไหลจะเป็นการไหลแบบทางเดียวกันดังรูป 3.7 (a)
  - 2) Counter flow จะเป็นการไหลแบบสวนทางกันดังรูป 3.7 (b)
  - 3) Cross flow จะเป็นการไหลแบบตัดขวางกันดังรูป 3.7 (c)
  - 4) Multi pass นิยมใช้ในการเพิ่มการทำ heat Exchanger เพราะว่าการเพิ่ม Multipassing จะทำให้ overall effectiveness over individual effectiveness
- ดังรูป 3.8



รูปที่ 3.7 (a) การไหลขนานกัน (b) การไหลสวนทางกัน (c) การไหลตัดขวางกัน



รูปที่ 3.8 การไหลแบบ Multipass (a) one shell pass, two tube pass (b) two shell pass, four tube pass (c) three shell pass, six tube pass

### 3.5 ลักษณะการแบ่งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แบ่งตาม Transfer Process

- 1) Direct Contact การถ่ายเทความร้อนจะเป็นการถ่ายเทระหว่าง Immiscible Fluids เช่น cooling Tower สำหรับส่วนในของ Cooling Towers จะใช้ความร้อนมาจากโรงงาน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

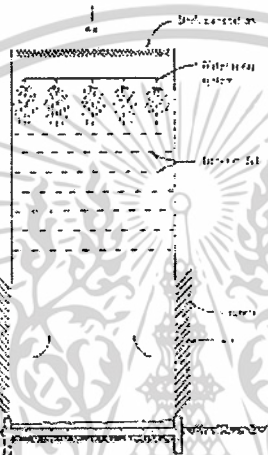
อุตสาหกรรม (Industrial Process) โดยนำความร้อนที่เกิดขึ้นส่งไปที่น้ำ เช่น River lake ocean โดยจะแบ่งเป็นการพาความร้อน 2 แบบคือ

ก. การพาแบบธรรมชาติ (Natural convection)

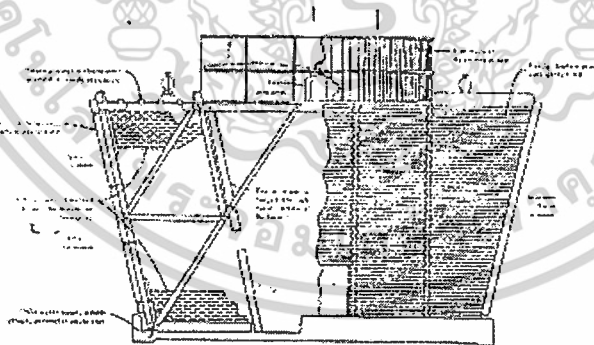
ข. การพาความร้อนแบบบังคับ (Forced Convection)

สำหรับ Cooling Towers แบบ Natural Convection เป็นตามรูป 3.9 โดยจะมีการพ่นน้ำ (sprayed water) จากทางด้านบนลงมาด้านล่าง โดยมีความร้อนขึ้นด้านบน สำหรับ Cooling Tower แบบ Forced Convection เป็นไปตามรูปแบบ 3.10

2) Indirect Contact) จะเป็นพวกหม้อน้ำรถยนต์ (Automobile Radiators)



รูปที่ 3.9 แสดง Cooling Towers แบบ Natural Convection



รูปที่ 3.10 แสดง Cooling Towers แบบ Force Convection

### 3.6 ลักษณะการแบ่งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แบ่งตาม According to Compactness

เป็นการแบ่งวัดตามอัตราส่วนของ Heat Transfer surface one area ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) ต่อปริมาตรของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) หากมีค่ามากกว่า  $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$  จะเรียกว่าเป็น Compact heat exchanger ยกตัวอย่างก็จะเป็นพวก

Automobile radiator จะมี Area Density ประมาณ  $1100 \text{ m}^2/\text{m}^3$  สำหรับ Vehicular gas turbine

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้จัดทำเห็นว่าเหมาะสมจะเผยแพร่เอกสารด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะมี Area Density ประมาณ  $6,000 \text{ m}^2/\text{m}^3$  เป็น Compact Heat Exchanger สำหรับปอดของมนุษย์ (Human lungs) จะมี Area Density ประมาณ  $20,000 \text{ m}^2/\text{m}^3$  จะถือว่าเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีค่า Compact heat exchanger สูงสุด สำหรับ Stirling engine เป็น Area Density เข้าใกล้ปอดของมนุษย์ (Human lungs) สำหรับ Plane tubular และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น (Shell and tube exchanger) ที่มี Area Density ในช่วง  $70$  ถึง  $500 \text{ m}^2/\text{m}^3$  จะไม่คิดว่าเป็น Considered Compact สำหรับการทำให้ Ratio มีค่าสูงทำได้โดยการติดครีบ (fins) ในการถ่ายเทความร้อน ระหว่างแก๊สไปที่ของเหลว (Gas to liquid) Heat transfer Coefficient ของทางด้านแก๊ส (gas) น้อยกว่าทางด้านของเหลว (liquid) จะต้องมีการติดครีบ (fin) ทางด้านแก๊ส (gas) เพื่อจะให้ความกะทัดรัดมากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### วัสดุที่ใช้ทำเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

#### วัสดุที่ใช้ในการทำ Heat exchanger

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบต่าง ๆ แทบทั้งหมดทำจากโลหะแทบทั้งสิ้น โลหะเป็นวัสดุที่มีให้เลือกใช้อย่างกว้างขวางพร้อมลักษณะสมบัติความแข็งแรงที่หลากหลาย โลหะสามารถแต่งขึ้นรูปได้สะดวกและสามารถเชื่อมต่อกันได้โดยการเชื่อมหรือการบัดกรี ปัจจัยทางด้านเศรษฐกิจเป็นตัวชี้้นำให้ใช้โลหะที่มีราคาต่ำสุดที่ยังสามารถทนต่อการไหลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนได้ ความสามารถในการทนต่อการไหลที่สำคัญคือ ความต้านทานต่อการกัดกร่อนของเหลวและไอที่กัดกร่อน เช่น กรดไฮดรอกซิด กรดกำมะถันและกรดฟอสฟอริก เป็นเหตุให้ต้องหันไปใช้โลหะที่มีราคาแพงเช่น ไททานเนียม แทนทาลัม เซอร์โคเนียมและแฮสเทลลอย ตลอดจนโลหะผสมอื่น ๆ ของไหลบางชนิดมีความกัดกร่อนมากจนไม่สามารถหาโลหะที่มีความเหมาะสมในเชิงความต้านทานต่อการกัดกร่อนได้ ภายใต้ข้อจำกัดทางเศรษฐศาสตร์ ทางเลือกก็คือใช้โลหะที่ไม่ใช่โลหะเช่น พลาสติก แกรไฟต์ แก้ว เป็นต้น

#### 4.1 พลาสติก

วัสดุพลาสติก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง Teflon หรือ Fluon (Polytetrafluoroethylene, PTFE) ได้รับความนิยมเป็นพิเศษเนื่องจากสมบัติที่ดีเยี่ยมในด้านความต้านทานต่อการทำลายทางเคมีและการเสื่อมสภาพเพราะสามารถสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงได้โดยการใช้กลุ่มท่อ PTFE ที่ยาวบางและยืดหยุ่น ซึ่งปลายท่อถูกยึดเข้ากับท่อพักที่ทำด้วยวัสดุชนิดเดียวกัน กลุ่มที่น้อยจะถูกม้วนหรือแขวนอยู่ในถังระบายความร้อนที่เปิดบรรจุน้ำระบายความร้อนอีกเทคนิคการเป็นการชุบ PTFE บนพื้นผิวภายในท่อและพื้นผิวภายนอกอื่น ๆ ที่สัมผัสกับของไหลที่กัดกร่อน

#### 4.2 แกรไฟต์

แกรไฟต์เป็นวัสดุที่มีการนำไปใช้อย่างกว้างขวางเช่นกันในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับของไหลที่กัดกร่อนมาก แกรไฟต์มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนสูงมาก เป็นตัวนำความร้อนที่ดี และมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ (นั่นคือทนต่อการกระโชกทางความร้อน) แกรไฟต์สามารถรับการกัดกร่อนทางกลได้ดี แต่ไม่สามารถเชื่อมได้และมีความต้านทานต่อแรงดึงต่ำ ในการออกแบบจึงมุ่งให้แกรไฟต์ทำงานภายใต้แรงกด ชิดจำกัด ทางด้านอุณหภูมิและความดันสำหรับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน แกรไฟต์โดยทั่วไปคือ 175c 1.7Mpa ตามลำดับการใช้แกรไฟต์เป็นวัสดุทางวิศวกรรมนับว่ามีประวัติอันยาวนาน แต่ได้ขยายขอบเขตการใช้งานในขบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวางเมื่อไม่กี่สิบปีมานี้ อันเป็นผลจากการพัฒนาเทคนิคทำให้แกรไฟต์ไม่เป็นรูพรุน โดยการทำให้อิมมัลชันได้ความดันโดยเรซินที่เหมาะสม การขยายขอบเขตการใช้งานนี้พอดีพ้องกับการขยายตัวโดยทั่วไปทางอุตสาหกรรมทางเคมี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนที่เกี่ยวข้องกับตัวประกอบอินทรีย์ของคลอรีนและฟลูออรีน ปัญหาจากการที่แกรไฟต์มีความแข็งแรงต้านทานแรงดึงต่ำสามารถแก้ไขได้โดยการออกแบบให้

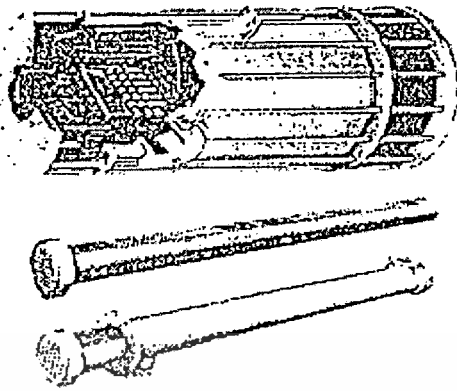
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชิ้นส่วนที่เป็นแกรไฟต์ทำงานอยู่ภายใต้ความเค้นกดแทนที่จะเป็นความเค้นดึง วิธีหนึ่งก็คือ การหุ้มแกรไฟต์ด้วยเปลือกโลหะ ชิ้นส่วนแกรไฟต์ ที่ประกอบเข้าด้วยกันค่อนข้างแน่นจะถูกประกอบที่อุณหภูมิสูงเพื่อว่าเมื่อเย็นตัวลงโลหะจะเกิดการหดตัวและบีบแกรไฟต์ให้อยู่ภายใต้แรงกด สำหรับการใช้งานที่ความดันสูงมักจะนำเอาเทคนิครูไขว้ ซึ่งจะทำการเจาะรูเป็นแถวขนานกันในแท่งแกรไฟต์ตันรูที่เจาะจะมีด้วยกันสองชุดที่ทำมุมจากกันและอาจมีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เท่ากันชุดที่หนึ่งสำหรับของไหลที่กักครอบทางด้านท่อ ส่วนอีกชุดหนึ่งสำหรับของไหลที่ไม่กักครอบทางด้านเซลล์ รูปที่ 4.1 และรูป 4.2 แสดงตัวอย่างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้เทคนิคดังกล่าวแม้ว่าแกรไฟต์จะสามารถต้านทานการกัดกร่อนโดยการไหลส่วนใหญ่ได้แต่ก็ไม่แนะนำให้ใช้กับสารละลายของโบรไมน์ ฟลูออไรน์ ฟอสฟอรัส แดง สารละลายซัลเฟอร์เมียม กรดไนตริก และกรดโคมิก หากมีข้อสงสัยควรปรึกษาผู้ผลิตแกรไฟต์โดยตรง

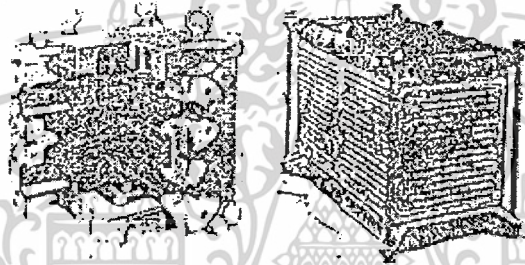
### 4.3 แก้ว

แก้วเป็นวัสดุอีกชนิดหนึ่งที่มีการนำมาใช้ทำอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ในงานพิเศษเฉพาะอย่าง แก้วเป็นวัสดุที่น่าสนใจเป็นพิเศษสำหรับการใช้งานที่กักครอบอื่น ๆ แก้วมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนสูง โดย นอกจากนี้แก้วยังได้รับความนิยมสูงในอุตสาหกรรมยา และอาหารซึ่งมีความสะอาดและความบริสุทธิ์ ถือเป็นหัวใจสำคัญ ถ้าวัสดุของกระบวนการผลิตสัมผัสเฉพาะกับแก้วและเทฟลอนเท่านั้นโอกาสเกิดการปนเปื้อนจะน้อยมาก อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ทำด้วยแก้วโดยทั่วไปมีโครงสร้างสองแบบ ดังที่แสดงในรูป 4.3 และ 4.4 รูปที่ 4.3 แสดงอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อในเซลล์ตามปกติทั่วไปที่ใช้ท่อซึ่งทำด้วยแก้วและใช้แผ่นยึดท่อและซีลที่ทำเทฟลอน ตัวเซลล์อาจจะทำด้วยแก้วด้วยตัวของไหลทั้งทางด้านเซลล์ และด้านท่อที่เป็นของไหลที่กักครอบ ในกรณีความดันและอุณหภูมิการใช้งานถูกจำกัดไว้ที่ประมาณ 140 kpa และ 175 c ตามลำดับ หากต้องการให้ทำงานที่ความดันและอุณหภูมิสูงกว่านี้ จะต้องใช้เซลล์ที่ทำด้วยเหล็กกล้าคาร์บอนซึ่งได้รับการฉาบหรือปิดหน้าด้วยเทฟลอนหรือยาง รูปที่ 4.4 แสดงชุดท่อคอนเดนเซอร์และชุดท่ออบยเลอรีที่เป็นแก้ว ในกรณีแรก น้ำหล่อเย็น จะไหลเวียนอยู่ภายใต้ชุดท่อ ส่วนในกรณีหลังไอน้ำหรือของไหลชนิดอื่นจะอยู่ในท่อในการใช้งานอาจมีชุดท่อ หลายชุดวางซ้อนกันในแนวตั้งก็ได้ เนื่องจากแก้วมีค่าสภาพการนำความร้อนต่ำมากเมื่อเทียบกับโลหะ จึงดูเหมือนว่าเป็นวัสดุที่ไม่เหมาะสมสำหรับการทำอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเลย อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาในทุก ๆ แง่แล้วข้อเสียในส่วนนี้ของแก้วก็ไม่ร้ายแรงอย่างที่คิดแต่แรกก็เป็นได้ ปัจจัยก็คือ พื้นผิวที่เรียบของแก้วจะช่วยลดทอนการเกิดคราบสกปรกได้อย่างได้ผลในหลาย ๆ กรณี ความต้านทานทางด้านฟาลิงเป็นตัวต้านทานที่มีความร้อนที่มีอิทธิพลที่สูงและเมื่อเปรียบเทียบกับแล้วความต้านทานจากท่อมีค่าน้อยมาก ถึงแม้ว่าแก้วคงจะไม่มีโอกาสที่จะกลายเป็นวัสดุทางการถ่ายเทความร้อนที่ใช้กันอย่างกว้างขวางแต่ด้วยคุณสมบัติที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนที่ดีเยี่ยมไม่ทำให้เกิดการปนเปื้อนและกันการซึมผ่านได้ดี ประกอบกับมีให้เลือกใช้ได้หลายรูปแบบในราคาที่ต่ำจึงทำให้ยังคงมีการใช้งานต่อไปในขบวนการหลายอย่างโดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมยา อาหาร เครื่องดื่ม

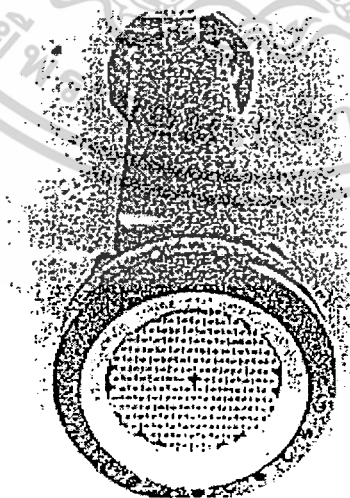
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อในเซลล์ที่สร้างโดยใช้เทคนิคโรโซว์

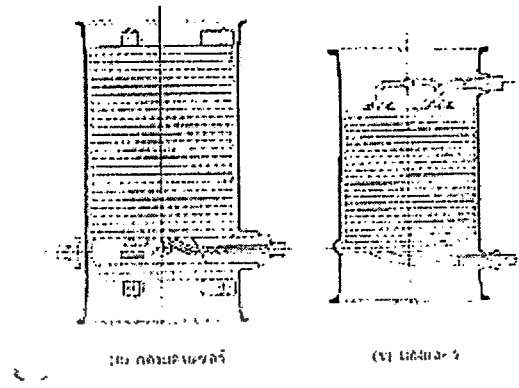


รูปที่ 4.2 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสี่เหลี่ยมที่ทำด้วยแกรไฟต์โดยใช้เทคนิคโรโซว์



รูปที่ 4.3 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อในเซลล์ที่ทำด้วยแก้วโดยมีเทฟลอนเป็นแผ่นยึดท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดท่อแก้ว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### ทฤษฎีการคำนวณ

#### 5.1 สถานะการไหล

การไหลภายในท่อมีข้อแตกต่างจากการไหลภายนอก คือ การไหลภายในท่อมักจะมีขอบเขตจำกัด โดยที่ความหนาของบาวนด์คาร์เลเยอร์ ไม่สามารถเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ได้ เพราะเมื่อไหลไปได้ระยะหนึ่งบาวนด์คาร์เลเยอร์จะ ก่อตัวเต็มหน้าตัดของท่อจึงไม่สามารถขยายตัวออกไปได้อีก รูปร่างของความเร็วจะมีลักษณะชัดเจนแน่นอน ไม่เปลี่ยนแปลงต่อไปอีก ซึ่งการไหลลักษณะนี้เรียกว่า การไหลที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว (fully developed flow) ส่วนการไหลก่อนหน้านี้นี้เรียกว่า การไหลที่กำลังปรับตัว (developing flow) และเรียกช่วงระยะการไหลแบบนี้ว่า Hydrodynamic entrance region

$$Re_D \equiv \frac{\rho u_m D}{\mu} \quad (5.1)$$

ซึ่ง

$u_m$  = เป็นความเร็วเฉลี่ยภายในท่อ

$D_h$  = เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic diameter)

โดย

$$D_h = \frac{4A_c}{P}$$

ซึ่ง  $A_c$  และ  $P$  เป็นพื้นที่หน้าตัดและเส้นรอบรูปของการไหลตามลำดับ

เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์วิกฤติ สำหรับการไหล จากลามินาร์เป็นเทอร์บูเลนต์ เริ่มต้นจาก

$$Re_{D,c} \approx 2300$$

และการไหลเป็นแบบเทอร์บูเลนต์เต็มที่ ที่  $Re_D \geq 4000$

สำหรับการไหลแบบลามินาร์ ( $Re_D \leq 2300$ ) ความยาวของช่วงบริเวณทางเข้าสำหรับการปรับตัว

$$\left( \frac{x_{fd,h}}{D} \right)_{lam} \approx 0.05 Re_D \quad (5.2)$$

ส่วนการไหลแบบเทอร์บูเลนต์ ( $Re_D \geq 4000$ ) ไม่มีสภาวะที่แน่นอนสำหรับการหาระยะทางสำหรับการปรับตัว แต่รู้เพียงว่าไม่เกี่ยวข้องกับเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ และมีค่าประมาณดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$10 \leq \left( \frac{x_{fd,h}}{D} \right)_{turb} \leq 60 \quad (5.3)$$

สำหรับค่าที่ใช้ในที่นี้ เราสมมุติว่า  $x_{fd} > 10D$  สำหรับการไหลแบบเทอร์บูเลนต์

5.2 การเปลี่ยนแปลงความดันและตัวประกอบเสียดทานในการไหลแบบปรับตัวเต็มที่แล้ว  
ตัวประกอบเสียดทานของ Moody (หรือDracy) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ไร้มิติ โดยนิยามว่า

$$f \equiv \frac{-(dp/dx)D}{\rho u_m^2/2} \quad (5.4)$$

ค่านี้ต่างกับสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน  $C_f$  ซึ่งบางครั้งเรียกว่า ตัวประกอบเสียดทานเฟ้นิ่ง ซึ่งนิยามว่า

$$C_f \equiv \frac{\tau_s}{\rho u_m^2/2} \quad (5.5)$$

เพราะว่าแรงเฉือนบนผิวของของไหลเท่ากับแรงบนผิวของของไหล ดังนั้นความเค้นเฉือนบนผิวกำหนดเป็น ..... จะได้

$$C_f = \frac{f}{4} \quad (5.6)$$

สำหรับการไหลแบบปรับตัวเต็มที่แล้ว ได้

$$f = \frac{64}{Re_D} \quad (5.7)$$

สำหรับการไหลแบบเทอร์บูเลนต์ที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว การวิเคราะห์ห่วยยากกว่าต้องใช้ผลจากการทดลองตัวประกอบเสียดทานสำหรับค่าเรโนลด์นัมเบอร์ต่างๆ ได้แสดงในไดอะแกรมของ Moody ในรูปที่ 5.1 ตัวประกอบเสียดทานจะมีค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์และสภาวะผิวของท่อ ซึ่งจะมีค่าน้อยสำหรับผิวเรียบ และเพิ่มมากขึ้นเมื่อความหยาบของผิว ( $e$ ) เพิ่มขึ้นโดยประมาณดังนี้

$$f = 0.316 Re_D^{-1/4} \quad Re_D \leq 2 \times 10^4 \quad (5.8)$$

$$f = 0.184 Re_D^{-1/5} \quad Re_D \geq 2 \times 10^4 \quad (5.9)$$

$$\Delta p = f \frac{\rho u_m^2}{2D} (x_2 - x_1) \quad (5.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิเฉลี่ย หาได้จาก

$$T_m = \frac{2}{u_m r_o^2} \int_0^r u T r dr \quad (5.10)$$

ค่าของ  $T_m$  จะเปลี่ยนตามแนวแกน x ถ้ามีความร้อนเข้าหรือออกจากของไหล ซึ่งต่างจาก  $U_m$  ที่มีค่าคงที่สำหรับท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่

ฟลักซ์ความร้อน ( $q_s''$ ) ระหว่างของไหลกับผิวท่อที่จุดใดๆ หาได้จาก

$$q_s'' = h(T_s - T_m) \quad (5.11)$$

ซึ่ง

$h$  = สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ตำแหน่งใดๆ

$T_s$  = เป็นอุณหภูมิผิวท่อ

$T$  = เป็นอุณหภูมิของของไหลที่ตำแหน่งใดๆ

$T_m$  = เป็นอุณหภูมิของของไหลทั่วพื้นที่หน้าตัดของท่อ

### 5.3 สหพันธ์การพาความร้อน : การไหลแบบเทอร์บูเลนซ์ในท่อกลม

สมการสำหรับหา  $Nu_x$  สำหรับการไหลแบบเทอร์บูเลนซ์ที่ปรับตัวเต็มที่แล้วในท่อ Dittus-Buelter ได้เสนอสมการดังนี้

$$Nu_D = 0.023 Re_D^{4/5} Pr^n \quad (5.12)$$

โดยที่  $n = 0.4$  สำหรับการทำให้ร้อน ( $T_s > T_m$ )

และ  $n = 0.3$  สำหรับการทำให้เย็น ( $T_s < T_m$ )

สมการนี้ได้รับการยืนยันจากการทดลองดังนี้

$$\left[ \begin{array}{l} 0.7 \leq Pr \leq 160 \\ Re_D \geq 10000 \\ L/D \geq 10 \end{array} \right]$$

สมการต่างๆนี้ใช้ได้เพียงเฉพาะกรณีย่อยๆ ที่ความแตกต่างอุณหภูมิ ( $T_s - T_m$ ) ไม่มากนัก โดยคุณสมบัติต่างๆคิดที่  $T_m$  สำหรับการไหลที่แสดงลักษณะการแปรเปลี่ยนคุณสมบัติมากๆ Seider และ Tate ได้แนะนำให้ใช้สมการต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Nu_D = 0.027 Re_D^{4/5} Pr^{1/3} \left( \frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0.14} \quad (5.13)$$

สำหรับ  $\left[ \begin{array}{l} 0.7 \leq Pr \leq 16700 \\ Re_D \geq 10000 \\ L/D \geq 10 \end{array} \right]$

โดยที่คุณสมบัติต่างๆ ยกเว้นค่า  $\mu_s$  หาที่  $T_m$  โดยที่  $\mu_s$  คัดที่  $T_s$

สำหรับการทดลองนี้ สมการที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

ปริมาณความร้อนที่เกิดจากพลังงานไฟฟ้า

$$Q = IV \quad (5.14)$$

ปริมาณความร้อนที่ได้จากพลังงานไฟฟ้า จะมีค่าประมาณเท่ากับ ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทให้กับอากาศ ตามสมการ

$$Q = m C_p (T_{out} - T_{in}) \quad (5.15)$$

ซึ่งค่าปริมาณความร้อนจากสมการทั้งสองที่กล่าวมาข้างต้น จะนำมาใช้หาค่า สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย โดยใช้สมการ

$$Q = \bar{h} A_s (\bar{T}_w - \bar{T}_b) \quad (5.16)$$

จะได้

$$\bar{h} = \frac{m C_p (T_{out} - T_{in})}{A_s (\bar{T}_w - \bar{T}_b)} \quad (5.17)$$

เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์

$$Re_D \equiv \frac{\rho u_m D}{\mu} \quad (5.18)$$

สำหรับการทดลอง ค่า Nusselt number สามารถคำนวณจาก

$$\bar{Nu}_D = \frac{\bar{h} D_h}{K} \quad (5.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการสำหรับหา  $Nu_x$  สำหรับการไหลแบบเทอร์บูลนต์ที่ปรับตัวเต็มที่แล้วในท่อ  
Dittus-Bueltner ได้เสนอสมการดังนี้

$$Nu_D = 0.023 Re_D^{4/5} Pr^n \quad (5.20)$$

โดยที่  $n = 0.4$  สำหรับการทำให้ร้อน ( $T_s > T_m$ )

และ  $n = 0.3$  สำหรับการทำให้เย็น ( $T_s < T_m$ )

เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกส์

$$D_h = \frac{4A_C}{P} \quad (5.21)$$

ค่า Friction factor หาได้จาก

$$\frac{\Delta P}{\rho} = f \frac{L V^2}{D_h 2} \quad (5.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

#### 6.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

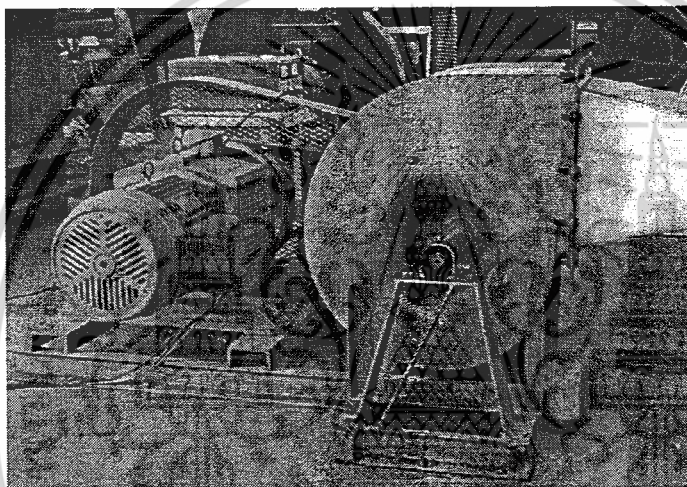
1. เครื่องควบคุมอุณหภูมิ ( Temperature Control )
2. ฮีตเตอร์ ( Heater )
3. เครื่องวัดอุณหภูมิ ( Thermometer )
4. Blower ขนาด 7500 w.
5. เทอร์โมคัปเปิล Type K
6. ฉนวนใยหิน
7. Magnetic Contactor
8. อุปกรณ์วัดความดันตกคร่อม ( Pressure Gauge )
9. อุปกรณ์วัดความเร็วลมโดยใช้เส้นลวดร้อน ( Hot wire )
10. AC / DC converter
11. ชุดท่ออลูมิเนียมที่ใช้ในการทดลอง

#### 6.2 วิธีการทดลอง

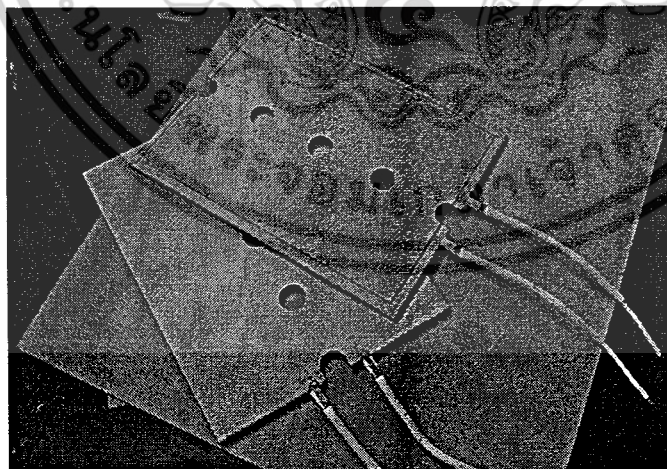
1. เปิดสะพานไฟเพื่อจ่ายไฟให้กับ Blower
2. ควบคุมความเร็วลมของ Blower โดยผ่านเครื่อง AC/DC converter
3. จ่ายไฟให้ชุดควบคุมอุณหภูมิ (Heater)
4. ติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์บนตำแหน่งต่างๆของท่อที่ต้องการวัด
5. ติดตั้งเครื่องวัดความดันตกคร่อมและเครื่องวัดความเร็วลม
6. ตั้ง AC / DC converter ที่ 12 Volt เป็นค่าสูงสุด เพื่อปรับความเร็วของลมให้ปริมาณมีความเสถียร ก่อนที่จะปรับเป็นความเร็วที่ใช้ในการทดลอง
7. เมื่อชุดทดลองพร้อมที่จะทำงาน ทำการปรับอัตราการไหลของลมเพื่อทำการทดลอง ปรับความเร็วลมโดยตั้ง AC / DC converter ไปที่ 10 Volt, 8 Volt, 6 Volt, 4 Volt และ 3 Volt ในแต่ละค่าความเร็วลมจะมีการทำความร้อนในช่วงที่มีการทดลอง โดยจะตั้งอุณหภูมิของชุดควบคุม ความร้อนไว้ที่ 50 °C
8. อ่านค่าอุณหภูมิที่จุดต่างของช่วงที่มีการทดลองจากเทอร์โมมิเตอร์ และทำการบันทึกค่าโดยจะ บันทึกอุณหภูมิที่ตำแหน่งดังนี้
  - อุณหภูมิลมที่ทางเข้า ( อุณหภูมิห้อง )
  - อุณหภูมิลมที่ทางออก
  - อุณหภูมิที่ผิวชุดทดลอง 4 ตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. บันทึกค่าความดันตกคร่อม
10. รอให้อุณหภูมิของผิวชุดทดลองเข้าสู่สภาวะปกติ ( ก่อนให้ความร้อน ) จึงทำการทดลองที่ความเร็วลมต่อไป
11. ทำการทดลองโดยจะมีการไหลภายในท่อที่ต่างกัน ดังนี้
  - ท่อเรียบ
  - ท่อใส่ใบพัดตลอดหน้าตัดของท่อ โดยจะเปลี่ยนมุมเฟสของใบพัดเป็น  $180^{\circ}$  และ  $360^{\circ}$
  - ท่อใส่ใบพัดที่มีมุมเฟส  $360^{\circ}$  โดยวางใบพัดสลับทางการหมุนกัน ไปตลอดหน้าตัด (ตามเข็มนาฬิกา – ทวนเข็มนาฬิกา สลับกัน )

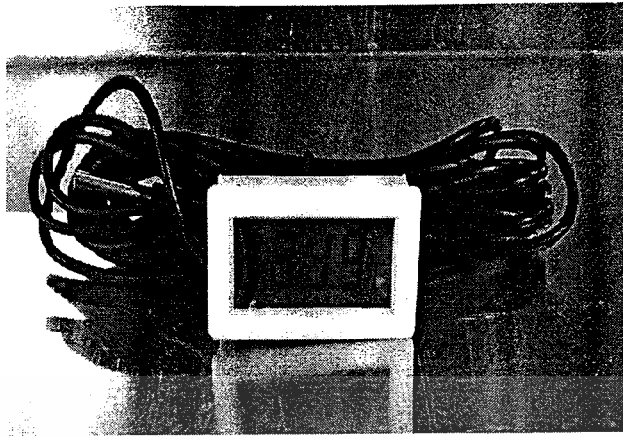


รูปที่ 6.1 Blower ที่ใช้ในการทดลอง

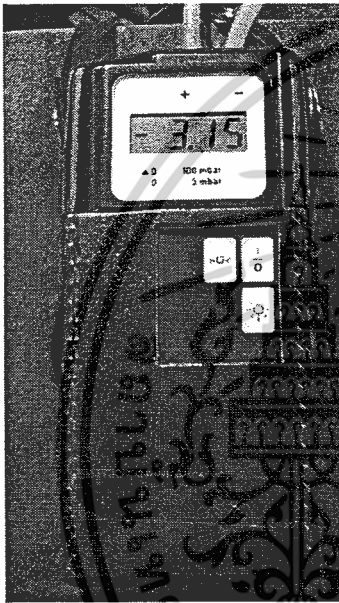


รูปที่ 6.2 ฮีตเตอร์แบบแผ่น

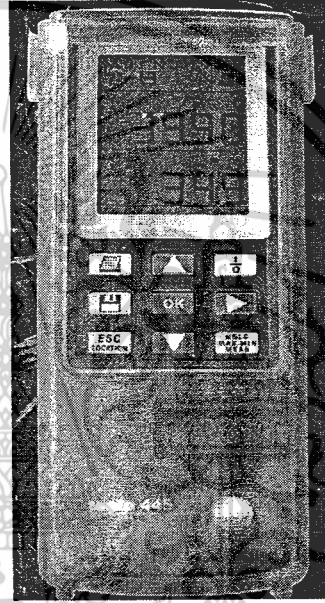
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

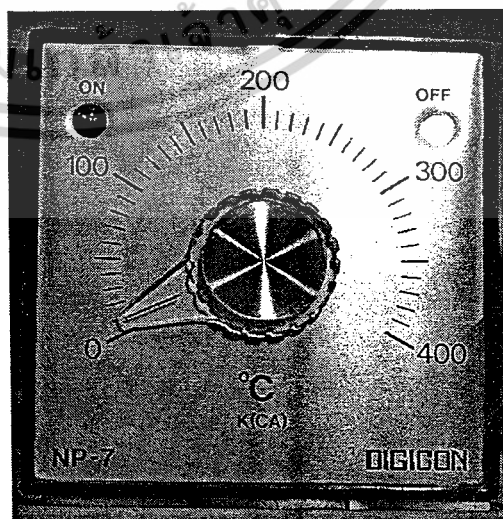
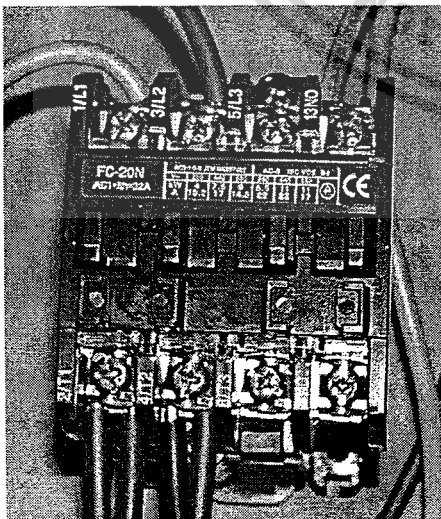


(ข)



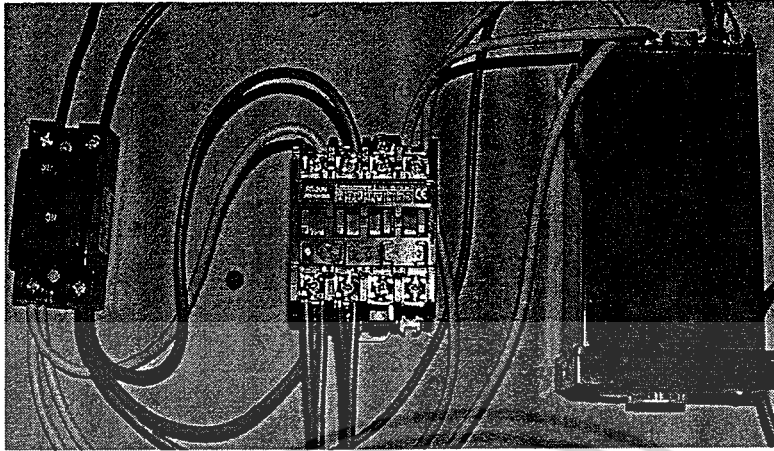
(ค)

รูปที่ 6.3 อุปกรณ์วัดค่าต่างๆที่ใช้ในการทดลอง (ก) เทอร์โมมิเตอร์แบบดิจิตอล (ข) อุปกรณ์วัดความดัน  
ตกคร่อม (ค) อุปกรณ์วัดความเร็วลมและอุณหภูมิทางออก

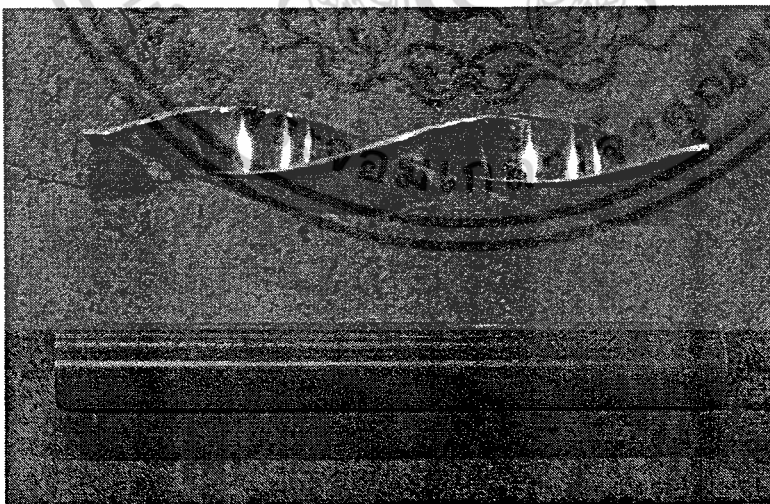
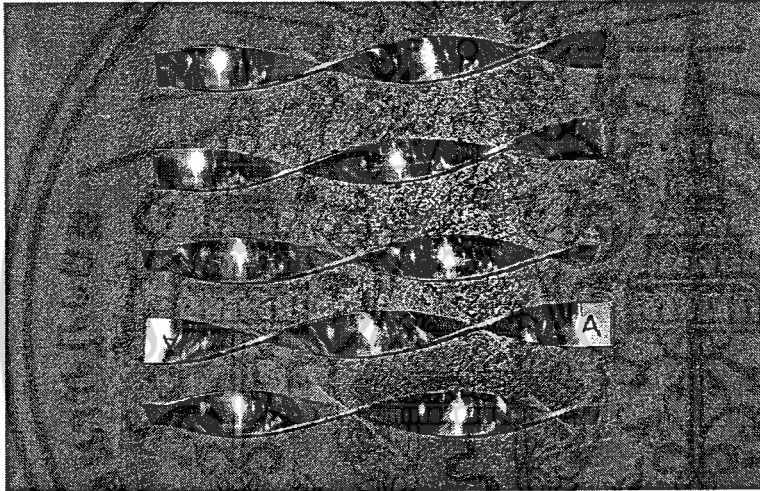


รูปที่ 6.4 Magnetic Contactor และ Temperature Control

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

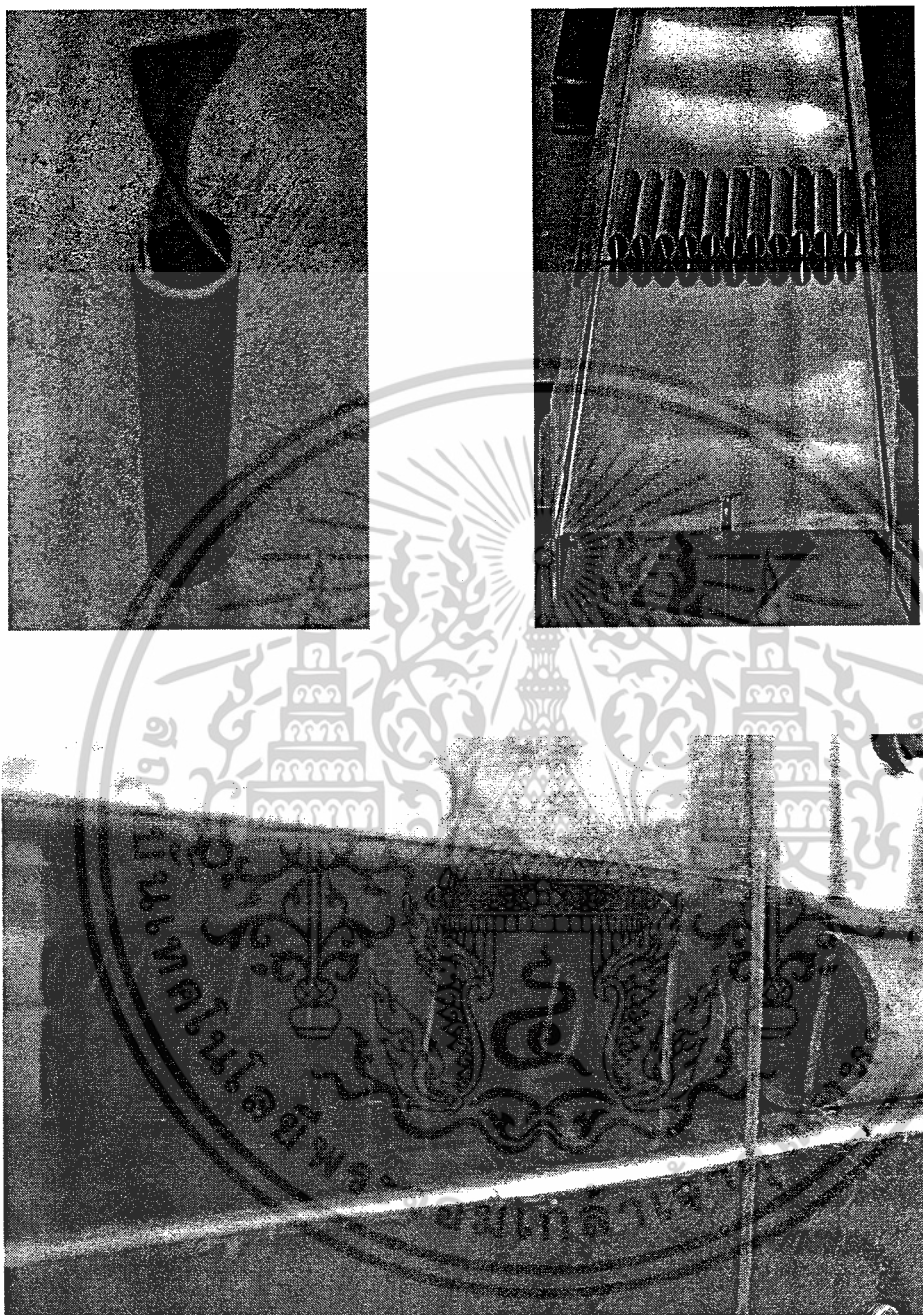


รูปที่ 6.5 ชุดควบคุมอุณหภูมิและตัดต่อฮีตเตอร์



รูปที่ 6.6 ไบบีด

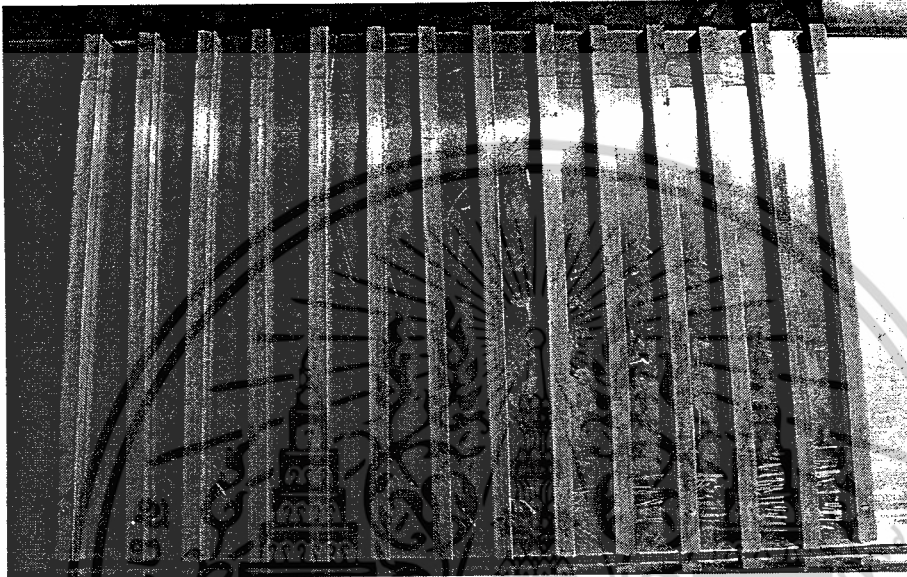
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



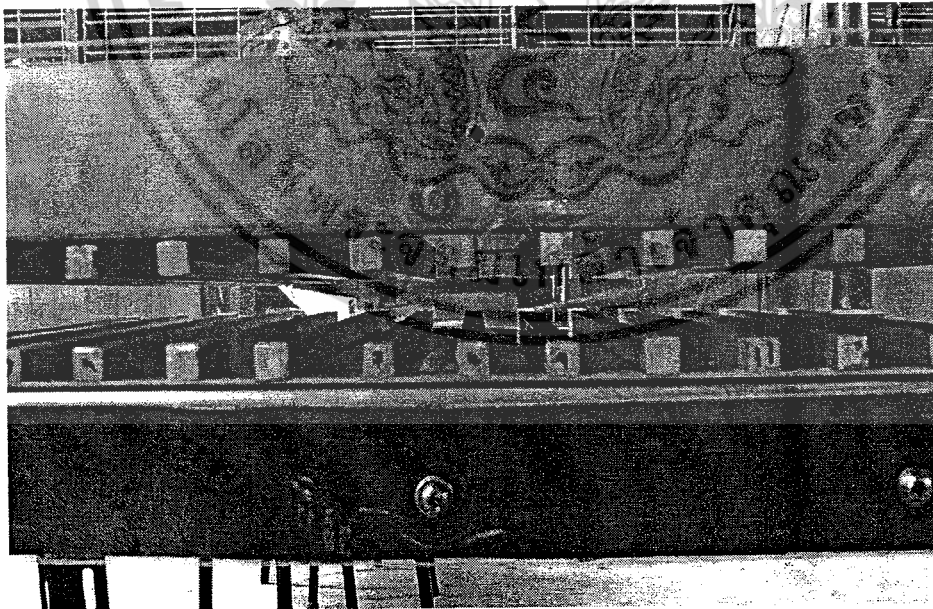
รูปที่6.7 การติดตั้งใบปิดในชุดทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. ทำการเพิ่มพื้นที่ผิวของส่วนที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อน โดยการติดครีบนำความร้อนในช่วงที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อน ทั้งแผ่นบนและแผ่นล่าง ซึ่งจะทำการติดตั้ง 2 แบบ คือ
- ครีบตรงกัน
  - ครีบสลับกัน

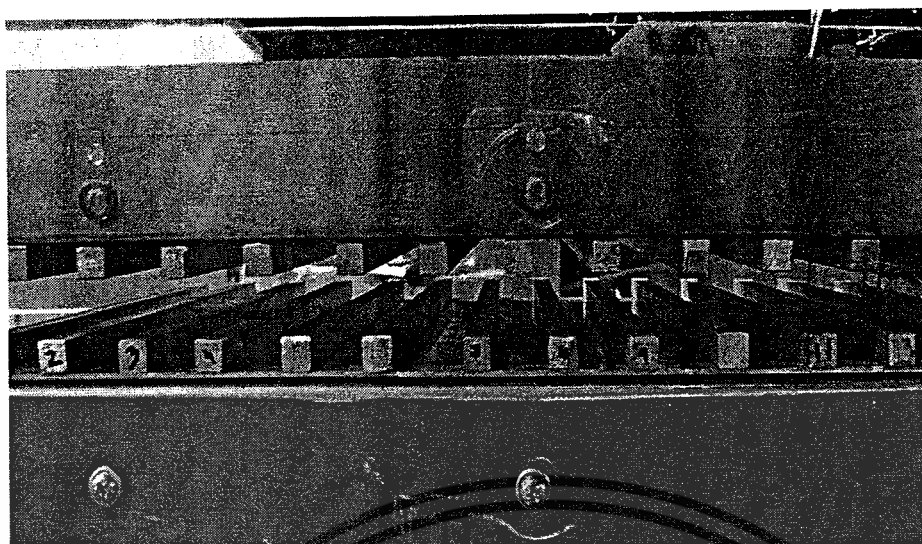


รูปที่ 6.8 การติดตั้งครีบนำความร้อนบนผิวท่อ



รูปที่ 6.9 การติดตั้งครีบแบบตรงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.10 การติดตั้งกริปแบบสลับกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

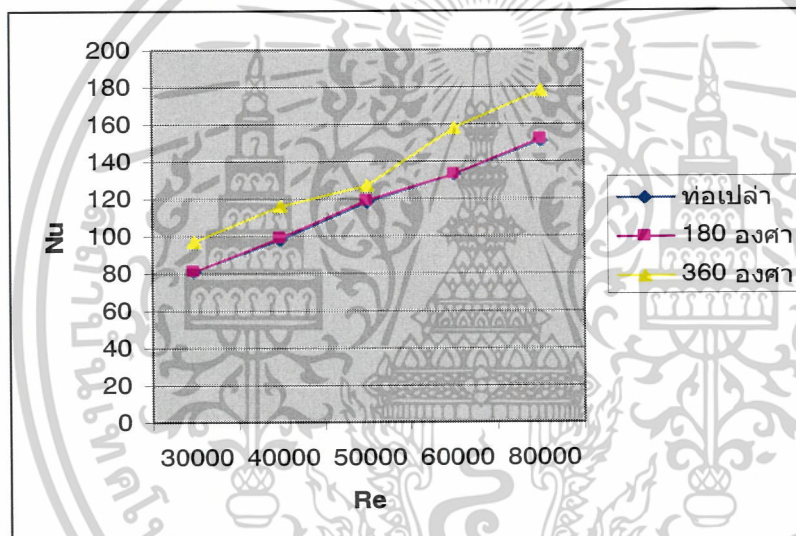
## บทที่ 7

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์

#### 7.1 ผลการทดลอง

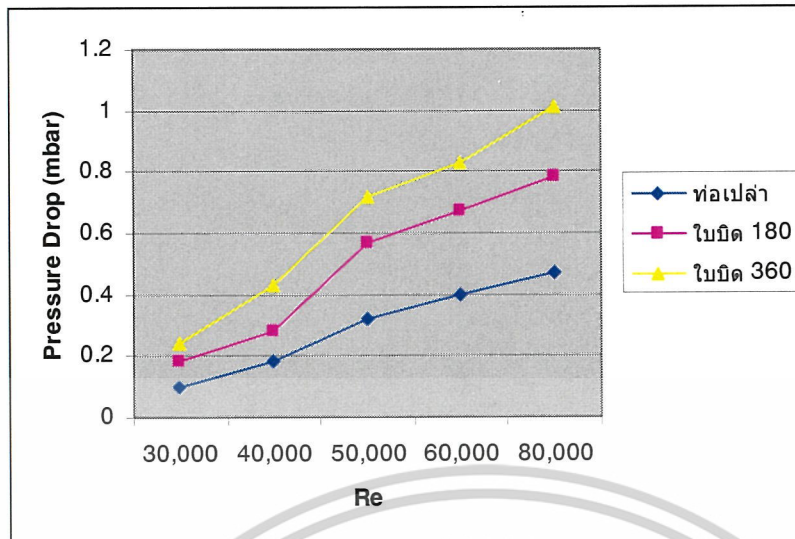
##### ตอนที่ 1

หลังจากที่ได้ทำการจัดเตรียมอุปกรณ์และทำการวัดอุณหภูมิทางเข้า ทางออกและที่จุดต่างๆของของชุดทดลอง อุณหภูมิที่ได้ทำให้เราสามารถคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนของชุดทดลองทั้งสาม ได้แก่ ท่อเปล่า ท่อที่ใส่ใบพัด 180° และท่อที่ใส่ใบพัด 360° เพื่อนำมาหาค่าการถ่ายเทความร้อนในรูปของ Nusselt number กับ Re และผลของ Pressure Drop กับ Re จะได้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 7.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Reynolds number กับ Nusselt number จากกราฟ จะเห็นว่าเมื่อ ค่า Reynolds number เพิ่มขึ้น ค่า Nusselt จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกคร่อม กับ Reynolds number สามารถแสดงได้จากกราฟ 7.2

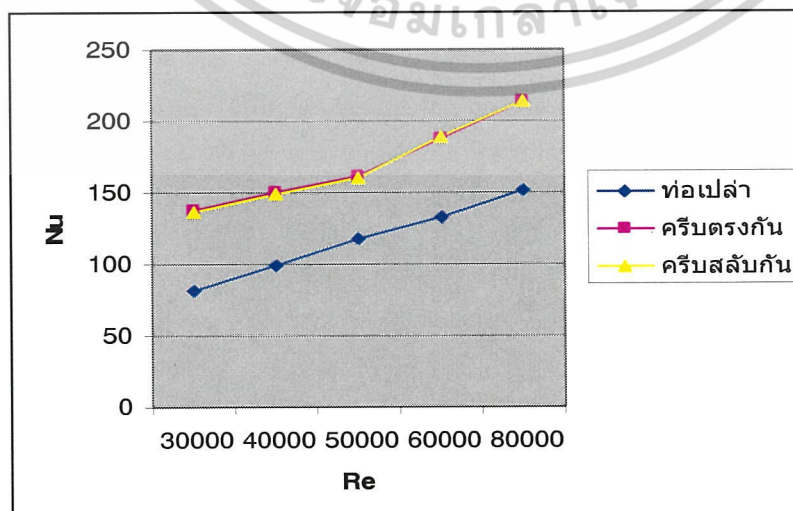


รูปที่ 7.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Pressure drop กับ Reynolds number จากกราฟจะเห็นว่า เมื่อค่า Reynolds number เพิ่มขึ้น ค่า Pressure drop จะเพิ่มขึ้นด้วย

สำหรับการทดลองที่ใช้ไบบิดที่มีมุมเฟส  $360^\circ$  โดยติดตั้งไบบิดที่มีการหมุนกลับทาง (ทวนเข็มนาฬิกา - ตามเข็มนาฬิกา) สลับกันนั้น ได้ผลการทดลองที่มีค่าใกล้เคียงกับการทดลองที่ติดตั้งไบบิดมุมเฟส  $360^\circ$  ที่หมุนไปทางเดียวกันทั้งหมด จึงไม่นำมาพิจารณาในที่นี้

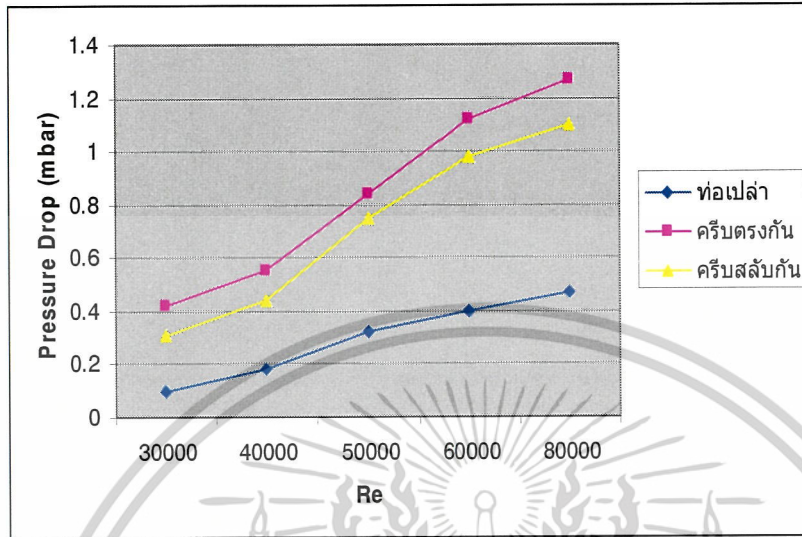
## ตอนที่ 2

เมื่อทำการติดตั้งครีบนำความร้อนที่บริเวณที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนและทำการบันทึกค่าต่าง เช่นเดียวกับตอนที่ 1 แล้ว ได้ผลการทดลองในรูปของกราฟที่เปรียบเทียบกันระหว่างการติดครีบตรงกันกับการติดครีบสลับกัน ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่าง Nusselt number และ Reynolds number ดังรูปที่ 7.3

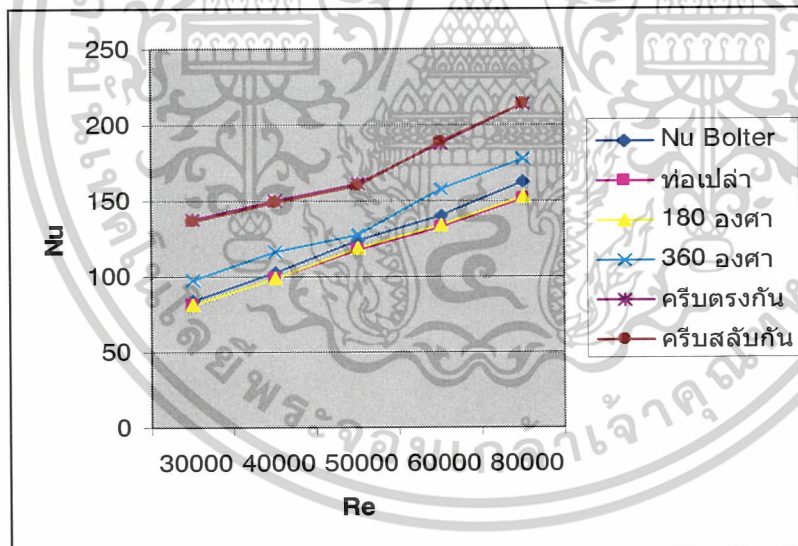


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 7.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Reynolds number กับ Nusselt number ของท่อที่ติดครีบริบตรงกัน และท่อที่ ติดครีบริบสลับกัน



รูปที่ 7.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Pressure Drop กับ Reynolds number ของท่อที่ติดครีบริบตรงกัน และท่อที่ติดครีบริบสลับกัน



รูปที่ 7.5 เปรียบเทียบค่า Nu ของท่อแบบต่างๆ กับ Nu ของ Bolter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 7.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

### ตอนที่ 1

จากรูป 7.1 จะเห็นว่า ค่า Nusselt number (Nu) จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามค่า Reynolds number (Re) ของการทดลอง โดยเฉพาะเมื่อใส่ใบพัดที่บิดด้วยมุม  $360^\circ$  จะมีค่า Nu มากที่สุด ด้วยเหตุผลที่ว่าอากาศเกิดการปั่นป่วนมากที่สุด ทำให้อากาศที่เย็นสามารถมาแลกเปลี่ยนความร้อนที่ผิวได้ดี ร่องลงมาก็เป็นชุดทดลองที่ใส่ใบพัด  $180^\circ$  ซึ่งมีแนวโน้มของค่า Nu ใกล้เคียงกับท่อเปล่า ซึ่งเกิดจากการที่ใบพัด  $180^\circ$  ยังไม่ทำให้อากาศในชุดทดลองเกิดการปั่นป่วนมาก

จากรูป 7.2 จะได้ว่า เมื่อค่า Re เพิ่มมากขึ้น ค่า ความดันตกคร่อม (Pressure Drop) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และจะเห็นว่า ชุดทดลองที่ใส่ใบพัด  $360^\circ$  มีค่าความดันตกคร่อม (Pressure Drop) มากที่สุดเมื่อเทียบกับอีกสองชุด ล่องลงมาจะเป็น ชุดทดลองที่ใส่ใบพัด  $180^\circ$  และสุดท้ายที่มีความดันตกคร่อม (Pressure Drop) น้อยที่สุดคือท่อเปล่า ที่เป็นเช่นนี้เกิดขึ้นเนื่องจากอากาศที่ไหลผ่านใบพัดที่มีมุม  $360^\circ$  จะเกิดการหมุนวนมากที่สุด ซึ่งจะทำให้อากาศที่เย็นกว่า มีโอกาสที่จะหมุนเวียนแลกเปลี่ยนอุณหภูมิหรือรับความร้อนจากผิวของท่อมากที่สุด ในขณะที่เดียวกันเมื่ออากาศมีการไหลวนมากจึงทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม (Pressure Drop) สูงตามไปด้วย เพราะอากาศถูกเปลี่ยนทิศทางการไหลอย่างกะทันหัน

### ตอนที่ 2

จากรูป 7.3 จะเห็นว่า ค่า Nusselt number (Nu) จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามค่า Reynolds number (Re) ของการทดลอง โดยเฉพาะเมื่อติดตั้งครีบ จะมีค่า Nu มากกว่าท่อเปล่า ด้วยเหตุผลที่ว่าผิวท่อที่มีพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนมากกว่าท่อเปล่านั้นเอง โดยการติดตั้งครีบบางแบบตรงกันและครีบบางแบบสลับกันนั้น ให้ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ไม่แตกต่างกันมาก

จากรูป 7.4 จะได้ว่า เมื่อค่า Re เพิ่มมากขึ้น ค่า ความดันตกคร่อม (Pressure Drop) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และจะเห็นว่า ชุดทดลองที่ติดตั้งครีบบางแบบตรงกัน จะมีความดันตกคร่อม (Pressure Drop) มากกว่าเมื่อเทียบกับท่อที่ติดตั้งครีบบางแบบสลับกัน เพราะว่าท่อที่ติดตั้งครีบบางแบบตรงกันจะมีช่องว่างให้อากาศไหลผ่านน้อยกว่าท่อที่ติดตั้งครีบบางแบบสลับกันเมื่อเปรียบเทียบที่หน้าตัดเดียวกัน

## บทที่ 8

### สรุปผลการทดลอง

#### 8.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า การใส่ไบบิตภายในชุดทดลองจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมากกว่าท่อเปล่า และ ไบบิตที่ใส่เข้าไปเมื่อมุมในการบิดมากขึ้นก็ยิ่งทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมากขึ้นตามไปด้วย ในขณะที่ค่าความดันตกคร่อม (Pressure Drop) ภายในท่อจะมีมากขึ้นตามค่าของ  $Re$  เช่นกัน โดยยิ่งใส่ไบบิตเข้าไปภายในชุดทดลองจะยิ่งทำให้ค่าความดันตกคร่อม (Pressure Drop) เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่ไบบิตเมื่อมุมในการบิดมากยิ่งขึ้นทำให้ค่าความดันตกคร่อม (Pressure Drop) เพิ่มขึ้น

#### 8.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการหุ้มฉนวนในบริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนเข้า หรือออกจากระบบและตรวจสอบว่าจุดที่หุ้มฉนวนอยู่ในสภาพดีก่อนการทดลองทุกครั้ง
2. ควรใช้ Heater ที่มีการให้ความร้อนหลายๆค่า เพื่อความหลากหลายของข้อมูล

## บรรณานุกรม

- [1] ผศ.ดร. พงษ์เจต พรหมวงศ์ “การถ่ายเทความร้อน” ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [2] G.F.Hewill, G.L.Shires, T.Bott, Begel House, “Process Heat Transfer”
- [3] Holman.J.P. “Heat transfer”, Mcgraw – Hill, New York, 1989
- [4] Inrppera, Frank P.,and David P.Dewitt “Fundamentals of Heat and mass Transfer”, Wiley, New York, 1990
- [5] Kenan Yakut, and Bayram Sahin “Flow-induced vibration analysis of conical rings used for heat transfer enhancement in heat exchangers”, science@direct, 2003
- [6] Fox and McDonald "Introduction to fluid mechanics" Fifth Editon
- [7] "Process Heat Transfer" G.F. Hewitt, G.L. Shires, T. Bott, Bogel House



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## ภาคผนวก ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การทดลองที่ชุดทดลองผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเรียบ

การทดลองผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเรียบ : ท่อเปล่า

	แรงดันไฟฟ้าที่ใช้กับปั๊มลม				
	3 Volt	4 Volt	5 Volt	6 Volt	8 Volt
$T_{in}$ ( $^{\circ}C$ )	33.5	33.5	33.5	33.5	33.5
$\bar{T}_w$	55.11	51.62	48.48	46.73	45.09
$T_{out}$ ( $^{\circ}C$ )	42.13	40.12	38.86	37.91	37.32
$V_{air-out}$	5.1	4.8	4.6	4.7	4.8
$\Delta P$	0.1	0.18	0.32	0.4	0.47
Re	33,850	43,680	54,870	63,815	77,145
$\bar{h}$	48.08	58.19	69.78	78.20	89.06
K	27.41	27.26	27.18	27.11	27.06
$Nu_D$ Bolter	84.12	103.10	123.74	139.63	162.51
$\bar{Nu}_D$	80.7	98.2	118.1	132.7	151.4

การทดลองผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเรียบ : ใส่ใบพัดมุมเฟส  $180^{\circ}$

	แรงดันไฟฟ้าที่ใช้กับปั๊มลม				
	3 Volt	4 Volt	5 Volt	6 Volt	8 Volt
$T_{in}$ ( $^{\circ}C$ )	34.0	34.0	34.0	34.0	34.0
$\bar{T}_w$	56.1	52.04	49.03	47.22	45.58
$T_{out}$ ( $^{\circ}C$ )	42.63	40.62	39.36	38.41	37.82
$V_{air-out}$	5.7	5.2	4.96	5.1	5.2
$\Delta P$	0.18	0.28	0.57	0.67	0.78
Re	33,850	43,680	54,870	63,815	77,145
$\bar{h}$	48.45	58.51	69.81	78.18	89.14
K	27.26	27.26	27.26	27.26	27.26
$\bar{Nu}_D$	81.2	98.6	118.9	133.3	152.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเรียบ : ใส่วิบิดมุมเฟส  $360^\circ$

	แรงดันไฟฟ้าที่ใช้กับปั๊มลม				
	3 Volt	4 Volt	5 Volt	6 Volt	8 Volt
$T_{in} (^{\circ}C)$	34	34	34	34	34
$\bar{T}_w$	52.95	49.78	48.5	45.56	44.19
$T_{out} (^{\circ}C)$	42.2	40.54	40.1	38.63	37.9
$V_{air-out}$	6.6	9.4	13.9	19.1	24.0
$\Delta P$	0.24	0.43	0.72	0.83	1.01
Re	33,850	43,680	54,870	63,815	77,145
$\bar{h}$	58.06	68.90	75.26	93.17	104.63
K	27.42	27.30	27.26	27.16	27.10
$\bar{Nu}_D$	97.41	116.1	127.0	157.8	177.6

การทดลองผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเรียบ : ใส่วิบิดมุมเฟส  $360^\circ$  (สลับทิศทางการหมุน)

	แรงดันไฟฟ้าที่ใช้กับปั๊มลม				
	3 Volt	4 Volt	5 Volt	6 Volt	8 Volt
$T_{in} (^{\circ}C)$	34	34	34	34	34
$\bar{T}_w$	53.19	49.87	48.22	45.55	44.17
$T_{out} (^{\circ}C)$	42.66	40.64	39.38	38.63	37.83
$V_{air-out}$	6.5	10.1	13.8	19.5	23.4
$\Delta P$	0.25	0.40	0.69	0.86	1.03
Re	33,850	43,680	54,870	63,815	77,145
$\bar{h}$	58.2	68.87	74.97	93.58	104.69
K	27.46	27.31	27.22	27.16	27.10
$\bar{Nu}_D$	97.5	116.0	126.7	158.5	177.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การทดลองที่ชุดทดลองผิวแลกเปลี่ยนความร้อนติดครีบนำความร้อน

ติดครีบบน : ท่อเปล่า

	แรงดันไฟฟ้าที่ใช้กับปั๊มลม				
	3 Volt	4 Volt	5 Volt	6 Volt	8 Volt
$T_{in} (^{\circ}C)$	34	34	34	34	34
$\bar{T}_w$	48.7	46.9	46.1	43.9	42.8
$T_{out} (^{\circ}C)$	42.3	40.4	40.1	38.3	37.9
$V_{air-out}$	7.1	10.6	13.5	20.2	24.4
$\Delta P$	0.42	0.56	0.84	1.13	1.27
Re	33,850	43,680	54,870	63,815	77,145
$\bar{h}$	81.88	88.98	95.57	110.82	125.81
K	27.43	27.30	27.27	27.14	27.10
$\bar{Nu}_D$	137.32	149.93	161.21	187.83	213.56

ติดครีบบน : ใส่ใบพัดมุมเฟส 360°

	แรงดันไฟฟ้าที่ใช้กับปั๊มลม				
	3 Volt	4 Volt	5 Volt	6 Volt	8 Volt
$T_{in} (^{\circ}C)$	34	34	34	34	34
$\bar{T}_w$	47.5	46.05	44.65	43.55	42.05
$T_{out} (^{\circ}C)$	42.2	40.5	38.9	38.1	37.5
$V_{air-out}$	7.6	11.2	14.2	21.4	25.8
$\Delta P$	0.57	0.68	0.95	1.31	1.53
Re	33,850	43,680	54,870	63,815	77,145
$\bar{h}$	91.61	97.77	104.98	115.31	137.00
K	27.42	27.30	27.18	27.12	27.08
$\bar{Nu}_D$	153.69	164.74	177.67	195.58	232.73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ติดครีบลับกัน : ท่อเปล่า

	แรงดันไฟฟ้าที่ใช้กับปั๊มลม				
	3 Volt	4 Volt	5 Volt	6 Volt	8 Volt
$T_{in}$ ( $^{\circ}C$ )	34	34	34	34	34
$\bar{T}_w$	48.92	47.15	45.76	43.97	42.76
$T_{out}$ ( $^{\circ}C$ )	42.7	40.8	39.3	38.4	37.8
$V_{air-out}$	6.9	8.8	13.1	19.4	22.6
$\Delta P$	0.31	0.42	0.75	0.98	1.10
Re	33,850	43,680	54,870	63,815	77,145
$\bar{h}$	81.68	88.57	94.77	111.07	125.92
K	27.46	27.32	27.21	27.14	27.10
$\bar{Nu}_D$	136.84	149.13	160.21	188.26	213.74

ติดครีบลับกัน : ใส่ใบพัดมุมเฟส  $360^{\circ}$

	แรงดันไฟฟ้าที่ใช้กับปั๊มลม				
	3 Volt	4 Volt	5 Volt	6 Volt	8 Volt
$T_{in}$ ( $^{\circ}C$ )	34	34	34	34	34
$\bar{T}_w$	47.7	46.09	45.25	43.62	42.26
$T_{out}$ ( $^{\circ}C$ )	42.4	40.6	40.0	38.5	38.0
$V_{air-out}$	7.1	9.1	13.8	20.1	23.3
$\Delta P$	0.39	0.51	0.85	1.13	1.31
Re	33,850	43,680	54,870	63,815	77,145
$\bar{h}$	90.8	98.25	104.63	117.19	137.96
K	27.44	27.30	27.26	27.15	27.11
$\bar{Nu}_D$	152.23	165.56	176.57	198.56	234.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การคำนวณเกี่ยวกับการทดลอง

#### 1. การคำนวณหาเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่ความต่างศักย์ต่างๆ

$$Re = \frac{\rho U_m D_h}{\mu}$$

โดย  $D_h$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (ประมาณ 0.046 cm)

$\mu$  คือ ค่าความหนืดสัมบูรณ์ของของไหล ( $N \cdot s / m^2$ )

	3 Volts	4 Volts	5 Volts	6 Volts	8 Volts
$U_m$	12.0	15.5	19.5	22.7	27.5
$Re (\cong)$	33,850	43,680	54,870	63,815	77,145

#### 2. การคำนวณหาอัตราการไหลที่ความต่างศักย์ต่างๆ

$$\dot{m} = \frac{Re \pi D_h \mu}{4}$$

	3 Volts	4 Volts	5 Volts	6 Volts	8 Volts
$\dot{m} (\cong)$	0.023	0.030	0.037	0.043	0.052

#### 3. สำหรับท่อเปล่า

##### 3.1 ค่าอุณหภูมิเฉลี่ย

$$\bar{T}_w = \frac{T_1 + T_2 + T_3 + T_4}{4}$$

	3 Volts	4 Volts	5 Volts	6 Volts	8 Volts
$\bar{T}_w$	55.11	51.62	48.48	46.73	45.09

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.2 ค่าอุณหภูมิอากาศเฉลี่ย

$$T_b = \frac{T_{in} + T_{out}}{2}$$

	3 Volts	4 Volts	5 Volts	6 Volts	8 Volts
$T_b$	37.2	36.8	36.2	35.7	35.4

## 3.3 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย

$$\bar{h} = \frac{mC_p(T_{out} - T_{in})}{A_s(T_w - T_b)}$$

โดย  $Q = mC_p(T_{out} - T_{in})$  มีค่าประมาณ 200 W ( $Q = IV$ )

ค่า  $C_p$  ที่อุณหภูมิทางเข้า  $T \approx 34^\circ\text{C}$  (1007.4 J/Kg·K)

$A_s$  คือ พื้นที่ที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อน หรือบริเวณที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ทำความร้อน

$$(A_s = 2 \times 0.40 \times 0.29)$$

	3 Volts	4 Volts	5 Volts	6 Volts	8 Volts
$\bar{h}$	48.08	58.19	69.78	78.20	89.06

## 3.4 ค่า Nusselt number

$$\bar{Nu}_{D_h} = \frac{\bar{h}D_h}{K}$$

โดย  $D_h = \frac{4A_c}{P}$

$A_c$  คือ พื้นที่หน้าตัดของการไหล ( $0.30 \times 0.025 \text{ cm}^2$ )

$P$  คือ เส้นรอบรูปของการไหล ( $0.30+0.30+0.025+0.025 \text{ cm}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	3 Volts	4 Volts	5 Volts	6 Volts	8 Volts
K	27.41	27.26	27.18	27.11	27.06
$\bar{Nu}_{D_h}$	80.7	98.2	118.1	132.7	151.4

#### 4. สำหรับท่อใส่ไบบิตมมเฟส 180°

##### 4.1 ค่าอุณหภูมิผิวเฉลี่ย

$$\bar{T}_w = \frac{T_1 + T_2 + T_3 + T_4}{4}$$

	3 Volts	4 Volts	5 Volts	6 Volts	8 Volts
$\bar{T}_w$	56.1	52.04	49.03	47.22	45.58

##### 4.2 ค่าอุณหภูมิอากาศเฉลี่ย

$$T_b = \frac{T_{in} + T_{out}}{2}$$

	3 Volts	4 Volts	5 Volts	6 Volts	8 Volts
$T_b$	38.31	37.31	36.68	36.20	35.91

##### 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย

$$h = \frac{m C_p (T_{out} - T_{in})}{A_s (T_w - T_b)}$$

โดย  $Q = m C_p (T_{out} - T_{in})$  มีค่าประมาณ 200 W ( $Q = IV$ )

ค่า  $C_p$  ที่อุณหภูมิทางเข้า  $T \cong 34^\circ C$  (1007.4 J/Kg·K)

$A_s$  คือ พื้นที่ที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อน หรือบริเวณที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ทำความร้อน

$$(A_s = 2 \times 0.40 \times 0.29)$$

	3 Volts	4 Volts	5 Volts	6 Volts	8 Volts
$\bar{h}$	48.45	58.51	69.81	78.18	89.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.4 ค่า Nusselt number

$$\bar{Nu}_{D_h} = \frac{\bar{h} D_h}{K}$$

$$\text{โดย } D_h = \frac{4A_c}{P}$$

$A_c$  คือ พื้นที่หน้าตัดของการไหล ( $0.30 \times 0.025 \text{ cm}^2$ )

$P$  คือ เส้นรอบรูปของการไหล ( $0.30+0.30+0.025+0.025 \text{ cm}$ )

	3 Volts	4 Volts	5 Volts	6 Volts	8 Volts
K	27.26	27.26	27.26	27.26	27.26
$\bar{Nu}_{D_h}$	81.2	98.6	118.9	133.3	152.1

## 5. สำหรับท่อใส่ไบบิตนัมเฟส 360°

## 5.1 ค่าอุณหภูมิเฉลี่ย

$$\bar{T}_w = \frac{T_1 + T_2 + T_3 + T_4}{4}$$

	3 Volts	4 Volts	5 Volts	6 Volts	8 Volts
$\bar{T}_w$	52.95	49.78	48.50	45.56	44.19

## 5.2 ค่าอุณหภูมิอากาศเฉลี่ย

$$T_b = \frac{T_{in} + T_{out}}{2}$$

	3 Volts	4 Volts	5 Volts	6 Volts	8 Volts
$T_b$	38.10	37.27	37.05	36.31	35.95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.3 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย

$$\bar{h} = \frac{mC_p(T_{out} - T_{in})}{A_s(T_w - T_b)}$$

โดย  $Q = mC_p(T_{out} - T_{in})$  มีค่าประมาณ 200 W ( $Q = IV$ )

ค่า  $C_p$  ที่อุณหภูมิทางเข้า  $T \cong 34^\circ\text{C}$  (1007.4 J/Kg·K)

$A_s$  คือ พื้นที่ที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อน หรือบริเวณที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ทำความร้อน

$$(A_s = 2 \times 0.40 \times 0.29)$$

	3 Volts	4 Volts	5 Volts	6 Volts	8 Volts
$\bar{h}$	58.06	68.90	75.26	93.17	104.63

## 5.4 ค่า Nusselt number

$$\bar{Nu}_{D_h} = \frac{\bar{h}D_h}{K}$$

โดย  $D_h = \frac{4A_c}{P}$

$A_c$  คือ พื้นที่หน้าตัดของการไหล ( $0.30 \times 0.025 \text{ cm}^2$ )

$P$  คือ เส้นรอบรูปของการไหล ( $0.30+0.30+0.025+0.025 \text{ cm}$ )

	3 Volts	4 Volts	5 Volts	6 Volts	8 Volts
K	27.42	27.30	27.26	27.16	27.10
$\bar{Nu}_D$	97.41	116.1	127.0	157.8	177.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6. สำหรับท่อใส่ไบบิตมมเฟส 360° (สลับทิศทางการหมุน)

## 6.1 ค่าอุณหภูมิผิวเฉลี่ย

$$\bar{T}_w = \frac{T_1 + T_2 + T_3 + T_4}{4}$$

	3 Volts	4 Volts	5 Volts	6 Volts	8 Volts
$\bar{T}_w$	53.19	49.87	48.22	45.55	44.17

## 6.2 ค่าอุณหภูมิอากาศเฉลี่ย

$$T_b = \frac{T_{in} + T_{out}}{2}$$

	3 Volts	4 Volts	5 Volts	6 Volts	8 Volts
$T_b$	38.33	37.32	36.69	36.31	35.91

## 6.3 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย

$$\bar{h} = \frac{m C_p (T_{out} - T_{in})}{A_s (T_w - T_b)}$$

โดย  $Q = m C_p (T_{out} - T_{in})$  มีค่าประมาณ 200 W ( $Q = IV$ )

ค่า  $C_p$  ที่อุณหภูมิทางเข้า  $T \cong 34^\circ C$  (1007.4 J/Kg·K)

$A_s$  คือ พื้นที่ที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อน หรือบริเวณที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ทำความร้อน

$$(A_s = 2 \times 0.40 \times 0.29)$$

	3 Volts	4 Volts	5 Volts	6 Volts	8 Volts
$\bar{h}$	58.2	68.87	74.97	93.58	104.69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.4 ค่า Nusselt number

$$\bar{Nu}_{D_h} = \frac{\bar{h} D_h}{K}$$

โดย  $D_h = \frac{4A_c}{P}$

$A_c$  คือ พื้นที่หน้าตัดของการไหล ( $0.30 \times 0.025 \text{ cm}^2$ )

$P$  คือ เส้นรอบรูปของการไหล ( $0.30+0.30+0.025+0.025 \text{ cm}$ )

	3 Volts	4 Volts	5 Volts	6 Volts	8 Volts
K	27.46	27.31	27.22	27.16	27.10
$\bar{Nu}_D$	97.5	116.0	126.7	158.5	177.7

## 7. ท่อเปล่าติดครีบตรงกัน

## 7.1 ค่าอุณหภูมิผิวเฉลี่ย

$$\bar{T}_w = \frac{T_1 + T_2 + T_3 + T_4}{4}$$

	3 Volts	4 Volts	5 Volts	6 Volts	8 Volts
$\bar{T}_w$	48.7	46.9	46.1	43.9	42.8

## 7.2 ค่าอุณหภูมิอากาศเฉลี่ย

$$T_b = \frac{T_{in} + T_{out}}{2}$$

	3 Volts	4 Volts	5 Volts	6 Volts	8 Volts
$T_b$	38.15	37.20	37.05	36.15	35.95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 7.3 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย

$$\bar{h} = \frac{\dot{m} C_p (T_{out} - T_{in})}{A_s (T_w - T_b)}$$

โดย  $Q = \dot{m} C_p (T_{out} - T_{in})$  มีค่าประมาณ 200 W ( $Q = IV$ )

ค่า  $C_p$  ที่อุณหภูมิทางเข้า  $T \cong 34^\circ C$  (1007.4 J/Kg·K)

$A_s$  คือ พื้นที่ที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อน หรือบริเวณที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ทำความร้อน

$$(A_s = 2 \times 0.40 \times 0.29)$$

	3 Volts	4 Volts	5 Volts	6 Volts	8 Volts
$\bar{h}$	81.88	88.98	95.57	110.82	125.81

## 7.4 ค่า Nusselt number

$$\bar{Nu}_{D_h} = \frac{\bar{h} D_h}{K}$$

โดย  $D_h = \frac{4A_c}{P}$

$A_c$  คือ พื้นที่หน้าตัดของการไหล ( $0.30 \times 0.025 \text{ cm}^2$ )

$P$  คือ เส้นรอบรูปของการไหล ( $0.30+0.30+0.025+0.025 \text{ cm}$ )

	3 Volts	4 Volts	5 Volts	6 Volts	8 Volts
K	27.43	27.30	27.27	27.14	27.10
$\bar{Nu}_D$	137.32	149.93	161.21	187.83	213.56

## 8. ท่อใส่ไบบิคมูมเฟส 360° ติดครีบริบตรงกัน

## 8.1 ค่าอุณหภูมิผิวเฉลี่ย

$$\bar{T}_w = \frac{T_1 + T_2 + T_3 + T_4}{4}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	3 Volts	4 Volts	5 Volts	6 Volts	8 Volts
$\bar{T}_w$	47.5	46.05	44.65	43.55	42.05

### 8.2 ค่าอุณหภูมิอากาศเฉลี่ย

$$T_b = \frac{T_{in} + T_{out}}{2}$$

	3 Volts	4 Volts	5 Volts	6 Volts	8 Volts
$T_b$	38.10	37.25	36.45	36.05	35.75

### 8.3 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย

$$\bar{h} = \frac{m C_p (T_{out} - T_{in})}{A_s (T_w - T_b)}$$

โดย  $Q = m C_p (T_{out} - T_{in})$  มีค่าประมาณ 200 W ( $Q = IV$ )

ค่า  $C_p$  ที่อุณหภูมิทางเข้า  $T \cong 34^\circ\text{C}$  (1007.4 J/Kg·K)

$A_s$  คือ พื้นที่ที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อน หรือบริเวณที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ทำความร้อน

$$(A_s = 2 \times 0.40 \times 0.29)$$

	3 Volts	4 Volts	5 Volts	6 Volts	8 Volts
$\bar{h}$	91.61	97.77	104.98	115.31	137.00

### 8.4 ค่า Nusselt number

$$\bar{Nu}_{D_h} = \frac{\bar{h} D_h}{K}$$

โดย  $D_h = \frac{4A_c}{P}$

$A_c$  คือ พื้นที่หน้าตัดของการไหล ( $0.30 \times 0.025 \text{ cm}^2$ )

$P$  คือ เส้นรอบรูปของการไหล ( $0.30+0.30+0.025+0.025 \text{ cm}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	3 Volts	4 Volts	5 Volts	6 Volts	8 Volts
K	27.42	27.30	27.18	27.12	27.08
$\bar{Nu}_D$	153.69	164.74	177.67	195.58	232.73

## 9. ท่อเปล่าติดครีบลับกัน

### 9.1 ค่าอุณหภูมิผิวเฉลี่ย

$$\bar{T}_w = \frac{T_1 + T_2 + T_3 + T_4}{4}$$

	3 Volts	4 Volts	5 Volts	6 Volts	8 Volts
$\bar{T}_w$	48.92	47.15	45.76	43.97	42.76

### 9.2 ค่าอุณหภูมิอากาศเฉลี่ย

$$T_b = \frac{T_{in} + T_{out}}{2}$$

	3 Volts	4 Volts	5 Volts	6 Volts	8 Volts
$T_b$	38.35	37.40	36.65	36.20	35.90

### 9.3 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย

$$\bar{h} = \frac{m C_p (T_{out} - T_{in})}{A_s (\bar{T}_w - T_b)}$$

โดย  $Q = m C_p (T_{out} - T_{in})$  มีค่าประมาณ 200 W ( $Q = IV$ )

ค่า  $C_p$  ที่อุณหภูมิทางเข้า  $T \cong 34^\circ C$  (1007.4 J/Kg·K)

$A_s$  คือ พื้นที่ที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อน หรือบริเวณที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ทำความร้อน

$$(A_s = 2 \times 0.40 \times 0.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	3 Volts	4 Volts	5 Volts	6 Volts	8 Volts
$\bar{h}$	81.68	88.57	94.77	111.07	125.92

#### 9.4 ค่า Nusselt number

$$\bar{Nu}_{D_h} = \frac{\bar{h} D_h}{K}$$

โดย  $D_h = \frac{4A_c}{P}$

$A_c$  คือ พื้นที่หน้าตัดของการไหล ( $0.30 \times 0.025 \text{ cm}^2$ )

$P$  คือ เส้นรอบรูปของการไหล ( $0.30+0.30+0.025+0.025 \text{ cm}$ )

	3 Volts	4 Volts	5 Volts	6 Volts	8 Volts
K	27.46	27.32	27.21	27.14	27.10
$\bar{Nu}_D$	136.84	149.13	160.21	188.26	213.74

#### 10. ท่อใส่ไบบิตมรมเฟส 360° ติดครีบลับกัน

##### 10.1 ค่าอุณหภูมิผิวเฉลี่ย

$$\bar{T}_w = \frac{T_1 + T_2 + T_3 + T_4}{4}$$

	3 Volts	4 Volts	5 Volts	6 Volts	8 Volts
$\bar{T}_w$	47.70	46.09	45.25	43.62	42.26

##### 10.2 ค่าอุณหภูมิอากาศเฉลี่ย

$$T_b = \frac{T_{in} + T_{out}}{2}$$

	3 Volts	4 Volts	5 Volts	6 Volts	8 Volts
$T_b$	38.2	37.3	37.0	36.2	36.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 10.3 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย

$$\bar{h} = \frac{m C_p (T_{out} - T_{in})}{A_s (T_w - T_b)}$$

โดย  $Q = m C_p (T_{out} - T_{in})$  มีค่าประมาณ 200 W ( $Q = IV$ )

ค่า  $C_p$  ที่อุณหภูมิทางเข้า  $T \cong 34^\circ C$  (1007.4 J/Kg·K)

$A_s$  คือ พื้นที่ที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อน หรือบริเวณที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ทำความร้อน

$$(A_s = 2 \times 0.40 \times 0.29)$$

	3 Volts	4 Volts	5 Volts	6 Volts	8 Volts
$\bar{h}$	90.8	98.25	104.63	117.19	137.96

## 10.4 ค่า Nusselt number

$$\bar{Nu}_D = \frac{\bar{h} D_h}{K}$$

โดย  $D_h = \frac{4A_c}{P}$

$A_c$  คือ พื้นที่หน้าตัดของการไหล ( $0.30 \times 0.025 \text{ cm}^2$ )

$P$  คือ เส้นรอบรูปของการไหล ( $0.30+0.30+0.025+0.025 \text{ cm}$ )

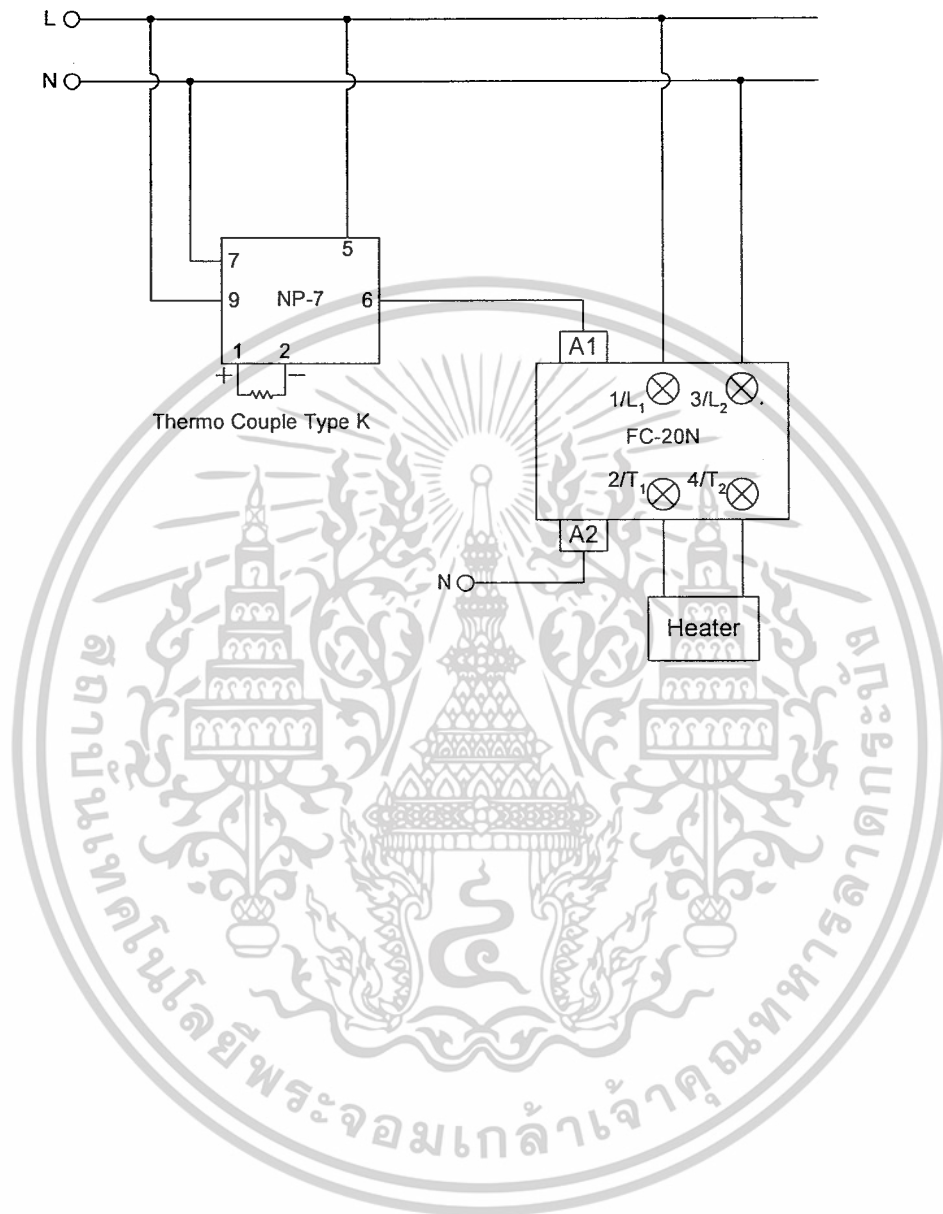
	3 Volts	4 Volts	5 Volts	6 Volts	8 Volts
K	27.44	27.30	27.26	27.15	27.11
$\bar{Nu}_D$	152.23	165.56	176.57	198.56	234.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รูปแสดงวงจรควบคุมเครื่องทำความร้อน (Heater)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้