

การเพิ่มสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเขาะร่อง

PERFORMANCE ENHANCEMENT OF HEAT EXCHANGER WITH GROOVE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การเพิ่มสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเจาะร่อง

PERFORMANCE ENHANCEMENT OF HEAT EXCHANGER WITH GROOVE

โดย

นายปฏิภาณ รักษาศิลป์
นายสมพงษ์ ไชยเจริญ
นายสุกมิตร์ สว่างเงินยวง

อาจารย์ที่ปรึกษา
รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์

2/8/50
2137ก
2550

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน.....81766

วัน,เดือน,ปี.....24 ส.ย. 2551

b. 1143749x
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2550

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การเพิ่มสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเซาะร่อง

PERFORMANCE ENHANCEMENT OF HEAT EXCHANGER WITH GROOVE

ผู้จัดทำ

- | | |
|-----------------------------|-----------------------|
| 1. นายปฏิภาณ รักษาศิลป์ | รหัสนักศึกษา 48015379 |
| 2. นายสมพงษ์ ไชยเจริญ | รหัสนักศึกษา 48015400 |
| 3. นายสุกมิตร์ สว่างเงินขวง | รหัสนักศึกษา 48015446 |



อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร.พงษ์เจด พรหมวงศ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเพิ่มสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเซาะร่อง

1. นายปฏิภาณ รักษาศิลป์ รหัสนักศึกษา 48015379
 2. นายสมพงษ์ ไชยเจริญ รหัสนักศึกษา 48015400
 3. นายสุกุมิตร สว่างเงินชวง รหัสนักศึกษา 48015446
- รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2550

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของช่องขนานที่เซาะร่องสี่เหลี่ยมชนิดที่มีการถ่ายเทความร้อนคงที่ (Constant Heat Flux) การศึกษาจะพิจารณา ถึงสัดส่วนความลึกของร่องต่อระยะห่างแผ่นความร้อน (e/D) และการจัดรูปแบบแผ่นเซาะร่องที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Nusselt Number) และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Friction factor) โดยมีขอบเขตการศึกษาที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number) ตั้งแต่ช่วงระหว่าง 4,000 – 23,000 สัดส่วนความลึกของร่องต่อระยะห่างแผ่นช่องขนานความร้อน (e/D) มีค่าเท่ากับ 0.20 การจัดระยะแผ่นเซาะร่องวางตรงและเอียงกัน และระยะพิคตังที่เท่ากับ 40 มิลลิเมตร โดยผลที่ได้ จะทำการศึกษาเปรียบเทียบกับ การถ่ายเทความร้อนของแผ่นช่องขนานความร้อนผิวเรียบ ภายใต้สภาวะการทดสอบเดียวกัน จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มขึ้นของสัดส่วนความลึกของร่องต่อระยะห่างแผ่นช่องขนาน (e/D) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพ การถ่ายเทความร้อนให้เพิ่มมากขึ้น แต่ค่าความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นก็มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน

PERFORMANCE ENHANCEMENT OF HEAT EXCHANGER WITH GROOVE

Mr. Patipan Raksasin 48015379

Mr. Sompong Chaicharoen 48015400

Mr. Supamit Swangngoenyuan 48015446

Assoc.Prof.Dr.Pongjet Promvong Advisor

Abstract

This paper presents the study of heat transfer enhancement in a ribbed channel with constant heat flux. Effects of Relative roughness height (e/D) and rib arrangement on heat transfer and friction loss in the ribbed channel are experimentally investigated. The scope of this experimental work is based on the Reynolds number at the inlet ranging from 4000 to 23000 ; Relative roughness height (e/D) of 0.20; and pitch length of 40 mm. The ribs used in the channel test section are placed in stagger and in-line arrangements. Experimental results obtained are compared with the results obtained from smooth plates under similar conditions. The experimental result reveals that the heat transfer rate and friction loss increase considerably with the rise of Reynolds number and the Relative roughness height (e/D).

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จได้ดี ด้วยการให้คำปรึกษาและความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา
รศ.ดร. พงษ์เจต พรหมวงศ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ควบคุมปริญญาบัตรคณะผู้วิจัยผู้ศึกษาซึ่งในความ
อนุเคราะห์ จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้ความช่วยเหลือ
ทางด้านอุปกรณ์และสถานที่ที่ใช้ในการทดลอง

ขอขอบอาจารย์ทุกท่านที่ให้คำแนะนำที่เกี่ยวข้อง กับปริญญาบัตรฉบับนี้ และได้ประ
สิทธิ์ประสาท วิชาความรู้แก่คณะผู้วิจัย

ขอขอบพระคุณ บิดามารดา ผู้วิจัย ที่ให้กำลังใจและกำลังใจแก่ผู้วิจัยจนสำเร็จในการ
ทำปริญญาบัตรฉบับนี้

ขอขอบคุณเพื่อนทุกคนที่ให้คำปรึกษาและกำลังใจ

สุดท้ายนี้คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากปริญญาบัตรฉบับนี้คณะผู้วิจัยขอมอบให้แก่ผู้
มีพระคุณทุกท่าน

นายปฏิภาณ รักษาศิลป์

นายสมพงษ์ ไชยเจริญ

นายสุกมิตร สว่างเงินชวง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้าที่
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญภาพ	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของเครื่องถ่ายเทความร้อน	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 วิธีการดำเนินการ	2
บทที่ 2 คุณสมบัติของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เคยมีการศึกษามาแล้ว	3
2.1 เงื่อนไขในการเลือกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน	3
2.1. 1 คุณสมบัติทางกายภาพของของไหล (Physical Properties of Fluid)	3
2.1. 2 เงื่อนไขของการเดินเครื่อง (Operating Condition)	3
2.1. 3 คุณสมบัติทางเคมีของของไหล (Chemical Properties of Fluid)	4
2.2 ความเหมาะสมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	4
บทที่ 3 การแบ่งประเภทการใช้งานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน	8
3.1 การแบ่งประเภทการใช้งานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน	8
3.1.1 การแบ่งประเภทตามสถานะของของไหลที่ใช้	8
3.1.2 การแบ่งตามจุดประสงค์ของการใช้งาน	9
3.1.3 การแบ่งประเภทตามโครงสร้างของอุปกรณ์	10
3.1.4 ลักษณะการแบ่งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตาม (Flow arrangement)	17
3.1.5 ลักษณะการแบ่งประเภทของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ (Transfer Process)	18
3.1.6 ลักษณะการแบ่งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แบ่งตาม (According Compactness)	20
บทที่ 4 วัสดุที่ใช้ทำเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและอุปกรณ์ต่างๆ	21
4.1 วัสดุที่ใช้ในการทำเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger)	21
4.1.1 พลาสติก	21
4.1.2 อะลูมิเนียม	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้าที่
4.1.3 ใยแก้ว (Fiber Glass)	23
บทที่ 5 ทฤษฎีและสูตรที่ใช้ในการคำนวณ	24
5.1 การไหลของของไหล	24
5.2 ความเร็วเฉลี่ย	25
5.3 การเปลี่ยนแปลงความดันและตัวประกอบเสียดทานในการไหลแบบปรับตัวเต็มที่แล้ว	26
5.4 การสมดุลพลังงาน (กรณีการถ่ายเทความร้อนที่ผิวคงที่ (Constant Heat flux))	28
5.5 งานที่ต้องป้อนให้กับระบบ	29
5.6 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Nusselt Number ; Nu_D)	29
5.7 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h (Convective heat transfer coefficient or film convective coefficient)	29
5.8 เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic diameter)	30
บทที่ 6 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	32
6.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	32
6.2 การเตรียมชุดอุปกรณ์ทดลอง	32
6.3 ขั้นตอนการทดลอง	39
6.4 ตัวอย่างการคำนวณ	41
บทที่ 7 ผลการทดลองและการวิเคราะห์	45
7.1 ผลการทดลอง	45
7.1.1 ค่าตัวเลขนัสเซลท์ นัมเบอร์ (Nusselt number)	45
7.1.2 ค่าตัวประกอบเสียดทาน (Friction factor)	46
7.2 อิทธิพลรูปร่างร่อง	47
บทที่ 8 สรุปผลการทดลอง	52
8.1 สรุปผลการทดลอง	52
8.2 ข้อเสนอแนะ	53
บรรณานุกรม	54
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก	55
ภาคผนวก ข	70
ภาคผนวก ค	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

		หน้าที่
ตารางภาคผนวก ก1	แสดงการทดลองของแผ่นเซาะร่องแบบแผ่นเรียบ (Smooth plate)	56
ตารางภาคผนวก ก2	แสดงการทดลองของแผ่นเซาะร่องแบบเซาะร่องตรง (Inline-Grooved)	57
ตารางภาคผนวก ก3	แสดงการทดลองของแผ่นเซาะร่องแบบร่องตรงเสริมครีบบ (Inline Grooved-Inline Rib)	58
ตารางภาคผนวก ก4	แสดงการทดลองของแผ่นเซาะร่องแบบร่องตรงเสริมครีบบวางเอียง (Inline grooved-Stagger Rib)	59
ตารางภาคผนวก ก5	แสดงการทดลองของแผ่นเซาะร่องแบบร่องตรงเสริมครีบบ วางชิดด้านหน้า	60
ตารางภาคผนวก ก6	แสดงการทดลองของแผ่นเซาะร่องแบบร่องตรงเสริมครีบบ (Inline-Rib-Double grooved)	61
ตารางภาคผนวก ก7	แสดงการทดลองของเซาะร่องตัววีตามทิศทางการ เคลื่อนที่ของของไหล(V-Downstream-Inline Grooved)	62
ตารางภาคผนวก ก8	แสดงการทดลองของร่องตัววีวางส่วนทิศทางการกับ การไหลของของไหล(V-Upstream-Inline Grooved)	63
ตารางภาคผนวก ก9	แสดงการทดลองของร่องตัววีเสริมครีบบวางช่อง วางทิศทางการกับการเคลื่อนที่ของของไหล (V-Downstream-Inline-Rib double Grooved)	64
ตารางภาคผนวก ก10	แสดงการทดลองของแผ่นเซาะร่องแบบร่องตัววีเสริมครีบบ วางช่องวางส่วนทางการกับการเคลื่อนที่ของของไหล (V-Upstream-Inline-Rib double Grooved)	65
ตารางภาคผนวก ก11	แสดงการทดลองของร่องตัววีเสริมครีบบวางเอียงเสริมช่อง วางส่วนทิศทางการเคลื่อนที่ของของไหล (V-Downstream-Inline Grooved-Staggered Rib)	66
ตารางภาคผนวก ก12	แสดงการทดลองของร่องตัววีเสริมครีบบวางเอียงเสริมช่อง วางทิศทางการกับการเคลื่อนที่ของของไหล (V-Upstream-Inline Grooved-Staggered Rib)	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้าที่

ตารางภาคผนวก ก13	แสดงการทดลองของร่องตัววีเสริมครีบทูช่อง วางสวนทิศทางการเคลื่อนที่ของของไหล (V-Upstream-Inline Grooved Rib)	68
ตารางภาคผนวก ก14	แสดงการทดลองของร่องตัววีเสริมครีบทูช่อง วางทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของของไหล (V-Downstream-Inline Grooved Rib)	69
ตารางภาคผนวก ข1	แสดงคุณสมบัติของอากาศที่ความดันบรรยากาศ	71



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

	หน้าที่
รูปที่ 3.1 ลักษณะการไหลในท่อสองชั้น (a) Parallel flow (b) counter flow	11
รูปที่ 3.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อ 2 ชั้น	12
รูปที่ 3.3 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน Shell-and-tube แบบ	13
(a) One shell pass และ one tube pass	
(b) Parallel flow	
(c) Counter flow	
รูปที่ 3.4 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน Shell-and-tube แบบ (a), (b) one shell pass และ Two tube pass (c) two shell pass และ four tube pass	13
รูปที่ 3.5 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อหมุนวน	14
รูปที่ 3.6 (a) การไหลแบบขนาน (b) การไหลแบบส่วนทาง (c) การไหลแบบตัดขวางกัน	18
รูปที่ 3.7 การไหลแบบ Multi pass (a) one shell pass, two tube pass (b) Two shell pass, four tube pass (c) Three shell pass, six tube pass	18
รูปที่ 3.8 แสดง Cooling Tower แบบ Natural Convection	19
รูปที่ 3.9 แสดง Cooling Tower แบบ Force Convection	19
รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะ โครงสร้างของใยแก้วและฉนวนใยแก้วชนิดปิดผิวด้วยอลูมิเนียมฟอยล์	23
รูปที่ 6.1 แสดงการต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	33
รูปที่ 6.2 แสดงพัดลม (Blower)	34
รูปที่ 6.3 แสดงเครื่องปรับค่าความเร็วของพัดลม (Blower)	34
รูปที่ 6.4 แสดงเครื่องมือวัดความดันคกร้อม หรือมาโนมิเตอร์	35
รูปที่ 6.5 แสดงลักษณะของกล่องลม (Air chamber)	35
รูปที่ 6.6 แสดงลักษณะของท่อปรับสภาพการไหล	36
รูปที่ 6.7 แสดงลักษณะของแผ่นอะลูมิเนียมเจาะรู	37
รูปที่ 6.8 แสดงลักษณะของแผ่นอะลูมิเนียมเมื่อนำมาประกอบกัน	37
รูปที่ 6.9 แสดงลักษณะของชุดทดสอบเมื่อนำฉนวนใยแก้วมาหุ้ม	38
รูปที่ 6.10 แสดงเครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเครื่องกำเนิดความร้อน (Heater)	38
รูปที่ 6.11 แสดงเครื่องอ่านค่าอุณหภูมิ (Temperature data logger)	39
รูปที่ 7.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าไนส์เชิล นัมเบอร์ (Nu) และค่าเร โนลด์ นัมเบอร์ (Re) กรณีท่อมีผนังเรียบ	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

	หน้าที่
รูปที่ 7.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทาน (μ) กับค่าเรโนลด์ นัมเบอร์ (Re)	46
รูปที่ 7.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่านัสเซิลท์ นัมเบอร์ กับค่าเรโนลด์ นัมเบอร์ กรณีที่มีร่องลักษณะต่าง ๆ	47
รูปที่ 7.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนนัสเซิลท์ นัมเบอร์ต่อค่าเรโนลด์ นัมเบอร์ ของท่อที่มีผนังเรียบกับค่าเรโนลด์ นัมเบอร์ กรณีที่มีร่องทรงลักษณะต่าง ๆ	48
รูปที่ 7.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนนัสเซิลท์ นัมเบอร์ต่อค่าเรโนลด์ นัมเบอร์ ของท่อที่มีผนังเรียบกับค่าเรโนลด์ นัมเบอร์ กรณีที่มีร่องรูปตัววีลักษณะต่าง ๆ	49
รูปที่ 7.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานกับเรโนลด์ นัมเบอร์ กรณีที่มีร่องลักษณะต่าง ๆ	49
รูปที่ 7.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน ต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อที่มีผนังเรียบกับค่าเรโนลด์ นัมเบอร์ กรณีที่มีร่องลักษณะต่าง ๆ	50
รูปที่ 7.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน กับค่าเรโนลด์ นัมเบอร์ กรณีที่มีร่องลักษณะต่าง ๆ	51
รูปที่ ค1 แสดงลักษณะการจัดวางแผ่นเซาะร่องแบบแผ่นเรียบ (Smooth plate)	74
รูปที่ ค2 แสดงการจัดวางแผ่นเซาะร่องแบบเซาะร่องตรง (Inline-Grooved)	75
รูปที่ ค3 แสดงลักษณะการจัดวางแผ่นเซาะร่องแบบร่องตรงเสริมครีบริบ	76
รูปที่ ค4 แสดงลักษณะการจัดวางแผ่นเซาะร่องแบบร่องตรงเสริมครีบริบวางเฉียง	77
รูปที่ ค5 แสดงลักษณะการจัดวางแผ่นเซาะร่องแบบร่องตรงเสริมครีบริบวางชิดด้านหน้า	78
รูปที่ ค6 แสดงลักษณะการจัดวางแผ่นเซาะร่องแบบร่องตรงเสริมครีบริบวางเฉียงเริ่มโดยครีบริบ	79
รูปที่ ค7 แสดงลักษณะการจัดวางแผ่นเซาะร่องแบบเซาะร่องตัววีตามทิศทางการเคลื่อนที่ ของของไหล	80
รูปที่ ค8 แสดงลักษณะการจัดวางแผ่นเซาะร่องแบบร่องตัววีวางส่วนทิศทางการเคลื่อนที่ ของของไหล	81
รูปที่ ค9 แสดงลักษณะการจัดวางแผ่นเซาะร่องแบบร่องตัววีเสริมครีบริบวางช่องเว้นช่อง	82
รูปที่ ค10 แสดงลักษณะการจัดวางแผ่นเซาะร่องแบบร่องตัววีเสริมครีบริบวางช่องเว้นช่อง วางส่วนทางกับการเคลื่อนที่ของของไหล	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

	หน้าที่
รูปที่ ค11 แสดงลักษณะการจัดวางแผ่นชะร่องแบบร่องตัววีเสริมครีบบางเชิงเสริมช่องเว้นช่องวางส่วนทิศทางการเคลื่อนที่ของของไหล	84
รูปที่ ค12 แสดงลักษณะการจัดวางแผ่นชะร่องแบบร่องตัววีเสริมครีบบางเชิงเสริมช่องเว้นช่องวางทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของของไหล	85
รูปที่ ค13 แสดงลักษณะการจัดวางแผ่นชะร่องแบบร่องตัววีเสริมครีบบทุกช่องวางส่วนทิศทางการเคลื่อนที่ของของไหล	86
รูปที่ ค14 แสดงลักษณะการจัดวางแผ่นชะร่องแบบร่องตัววีเสริมครีบบทุกช่องวางทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของของไหล	87



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของเครื่องถ่ายเทความร้อน

ขบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลเป็นสิ่งที่สำคัญมากในอุตสาหกรรม ที่การแลกเปลี่ยนความร้อน อาทิเช่น หม้อน้ำ คอนเดนเซอร์ คอยล์ร้อน คอยล์เย็น เป็นต้น ซึ่งจะเห็นว่ามีความสำคัญมากในทางอุตสาหกรรม จึงมีความพยายามที่จะหาทางลดขนาดและค่าใช้จ่ายของ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ในอุตสาหกรรมของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนตัวแปรที่สำคัญในการลดขนาดและค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนทำได้โดยการทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงขึ้น ซึ่งมีการวิจัยในเรื่องนี้เป็นจำนวนมาก มีการใช้วิธีการต่างๆ ในการเพิ่มอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับการพาความร้อนแบบบังคับขณะที่สามารถลดขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและทำให้เกิดการประหยัดพลังงานได้ โดยมีวิธีการที่สำคัญอยู่ 2 วิธีคือ

1. วิธีแบบ Passive ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่ต้องอาศัยพลังงานจากภายนอกเพิ่มเติม ได้แก่

- การใช้พื้นที่ผิวที่ได้รับการปรับภาพแล้ว
- การใช้พื้นผิวหยาบ
- การเพิ่มพื้นผิว
- การติดตั้งอุปกรณ์ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ
- การติดตั้งอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการไหลแบบหมุนวน
- การใช้ท่อที่เป็นขด
- การเค็มสารลงไปในของเหลวและก๊าซ

2. วิธีแบบ Active ซึ่งต้องการแหล่งพลังงานจากภายนอก ได้แก่

- การใช้อุปกรณ์ทางกล
- การทำให้เกิดการสั่นจากพื้นผิว
- การทำให้เกิดการสั่นของของไหล
- การใช้สนามไฟฟ้าสถิตย์
- การฉีดพ่นหรือการดูดของไหลและการฉีดพ่นแบบเจ็ท

ท่อที่ทำให้เกิดการไหลแบบหมุนวนเป็นอุปกรณ์ในทางปฏิบัติที่สำคัญเหมือนกับห้องเผาไหม้แบบซบเมียบ (Submerged Burner) ห้องเผาไหม้ และอุปกรณ์เพิ่มการถ่ายเทความร้อนในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบต่างๆ โดยทั่วไปการไหลแบบหมุนวนในท่อสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ การไหลแบบหมุนวนต่อเนื่อง และการไหลแบบหมุนวนเฉพาะช่วงเริ่มต้น ในการไหลแบบหมุนวนต่อเนื่องการเคลื่อนที่แบบหมุนวนจะเกิดขึ้นตลอดทั้งความยาวของท่อ ในขณะที่การไหลแบบหมุนวนเฉพาะช่วงเริ่มต้น การหมุนวนจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดขึ้นส่วนทางเข้าของท่อและจะเริ่มลดลงเรื่อยๆ ตามแนวการไหล แผ่นเทพเกลียวและขดลวดที่ถูกติดตั้งแทรกอยู่ภายในท่อ และการติดตั้งใบเฮลิคอป (helical vanes) หรือการเจาะร่องเกลียว (helical grooves) ในผิวท่อด้านในทำให้เกิดการไหลแบบหมุนวนต่อเนื่อง ในขณะที่อุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการไหลแบบหมุนวนที่ทางเข้าจะทำให้เกิดการหมุนวนภายในท่อ เฉพาะช่วงเริ่มต้น สำหรับการไหลแบบหมุนวน เฉพาะช่วงเริ่มต้นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะลดลงตามระยะทางการไหล ในขณะที่การไหลแบบหมุนวนต่อเนื่องสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะมีค่าคงที่

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

สำหรับโครงการนี้ ศึกษาแพ็คเกจต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเจาะร่อง ที่มีการไหลภายในท่อนานสี่เหลี่ยมที่มีการไหลเป็นแบบหมุนวน

- เพื่อศึกษาความแตกต่างของประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อน ของแผ่นเจาะร่องลักษณะต่างๆ
- เพื่อ ศึกษาถึงขั้นตอนของระบบการระบายความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเจาะร่อง
- เพื่อให้เกิดความเข้าใจถึงหลักการของการระบายความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเจาะร่อง
- เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ

เจาะร่อง

1.3 วิธีการดำเนินการ

งานวิจัยของ โครงการนี้เริ่มต้นด้วยการสร้าง เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) เป็นแบบช่องขนานสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีแผ่นอะลูมิเนียมที่ทำกรเจาะร่องเป็นอุปกรณ์ทดสอบ หาค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและค่าแพ็คเกจต่างๆ โดยมีการเปลี่ยนแบบเจาะร่องของแผ่นอะลูมิเนียม ไปเรื่อยๆ เพื่อหาแบบที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุด จากนั้นทำการทดลองเก็บค่าอุณหภูมิทางเข้าทางออก และอุณหภูมิผิวของแผ่นอะลูมิเนียม ในแต่ละจุด โดยมีการวัดอุณหภูมิทั้งหมด 12 จุด ที่บริเวณทางเข้าและทางออก 2 จุด และบริเวณผิวของแผ่นอะลูมิเนียม 10 จุด และวัดค่าความดันตกคร่อมที่ทางเข้าและทางออกของ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ช่วงของค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Raynold Number) ตั้งแต่ 4000 - 23000 แล้วนำค่าต่างๆ ที่ได้จากการทดลองไปคำนวณหาค่าต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบการแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งรายละเอียดจะอยู่ในบทที่ 5 และ 6 ของปริญาานิพนธ์นี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

คุณลักษณะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เคยมีการศึกษามาแล้ว

2.1 เงื่อนไขในการเลือกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน หมายถึงเครื่องมือที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลที่มีระดับพลังงานความร้อน หรืออุณหภูมิ แตกต่างกัน 2 ชนิด ผ่านผนังกันระหว่างของไหลทั้งสอง ในการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน สิ่งแรกที่ต้องทำการศึกษาคือ คุณสมบัติของของไหลที่ใช้ จากนั้น จึงทำการเลือกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมกับจุดประสงค์และเงื่อนไขของการใช้ให้มากที่สุด หัวข้อที่จะกล่าวถึงในต่อไปนี้เป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องนำมาพิจารณาในการเลือกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงสุดและถูกหลักเศรษฐกิจด้วย

2.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของของไหล (Physical Properties of Fluid)

คุณสมบัติของของไหลที่สำคัญที่จะต้องคำนึงถึงในการเลือกประเภทของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน คือ ความหนืด ความหนาแน่น ความจุความร้อนจำเพาะของของไหล ตลอดจนคุณสมบัติของสิ่งเจือปนเหล่านี้ เนื่องจากไม่ว่าจะเป็นสิ่งเจือปนที่มากับของไหลไม่ว่าจะเป็นของแข็งหรือของเหลวจะเกิดการสะสมในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจนเกิดการกีดขวางการไหล หรือเกาะเป็นคราบ (Scale) ติดกับผิวนำความร้อน ทำให้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนลดต่ำลง จึงควรระวังเป็นพิเศษ ในกรณีที่มีการระเหย หรือการควบแน่นของของไหลในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ถ้าสภาพการไหลของของไหลไม่เหมาะสม อาจเกิดการสั่นสะเทือนราวกับถูกค้อนน้ำ (Water Hammer) หรือเกิดการสะสมของก๊าซ ซึ่งล้วนแล้วแต่ทำให้ประสิทธิภาพเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนลดลงทั้งสิ้น

2.1.2 เงื่อนไขของการเดินเครื่อง (Operating Condition)

เงื่อนไขต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับความแข็งแรงของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะถูกกำหนดโดยความดันและอุณหภูมิของของเหลวที่ใช้ในการออกแบบ เพื่อให้วิธีการแลกเปลี่ยนความร้อนและความแข็งแรงของวัสดุที่ใช้ปลอดภัยพอสำหรับการปฏิบัติงานเราจำเป็นต้องใช้เงื่อนไขของการเดินเครื่องในการคำนวณความหนาของอุปกรณ์ที่ตกลงที่เหมาะสม

ในกรณีจำกัดผลของความดันของของไหล ระหว่างทางออกและทางเข้าของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนอย่างเคร่งครัด เราควรพิจารณาบททวนแบบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เลือกไว้แล้ว ในกรณีที่การเดินเครื่องเป็นแบบพัก ๆ ปริมาณของของไหล เวลาที่ใช้ในการเดินเครื่อง

และผลต่างของอุณหภูมิที่ขอมให้ได้ในกรณีเครื่องแต่ละครั้ง เป็นปัจจัยสำคัญที่จะต้องคำนึงถึงด้วย

2.1.3 คุณสมบัติทางเคมีของของไหล (Chemical Properties of Fluid)

การเกิดสนิม (Corrosion) และการกัดเซาะ (Erosion) ผิวสัมผัสของของไหลเป็นปัญหาสำคัญที่จะต้องคำนึงถึงเสมอ ในการออกแบบอุปกรณ์ทางอุตสาหกรรมเคมี การเกิดสนิมเป็นผลของการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่ของไหลกระทำต่อผิวสัมผัส ซึ่งโดยปกติแล้ว ผิวสัมผัสจะถูกกัดให้บางลงอย่างสม่ำเสมอแต่ในบางครั้ง สนิมอาจกัดเฉพาะแห่ง เนื่องจากปรากฏการณ์ทางด้านเซลล์ไฟฟ้า ส่วนการกัดเซาะนั้นเกิดจากการปะทะของของไหลกับผิวสัมผัสหรืออาจจะเป็นผลของความ

สึกหรอที่เกิดจากความดันต่ำที่เกิดขึ้น ณ จุดบางจุด วัสดุที่ใช้ทำเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจึงควรเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ไม่เกิดสนิมง่าย หรือถูกกัดเซาะโดยของไหลที่ใช้

สิ่งที่กล่าวถึงข้างต้นนี้คือ ปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบและเลือกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และวัสดุที่ใช้ทำเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ในขณะเดียวกัน ยังต้องคำนึงถึงราคาของการผลิตของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนประกอบเข้าไปด้วย

2.2 ความเหมาะสมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ถึงแม้ว่า การออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน มาตรฐานทั่วไป จะเป็นที่พอใจของความต้องการในการทำงาน หน่วยธรรมชาติของอุณหภูมิ และความดันปานกลาง สำหรับกรณี โดยเฉพาะ ถูกออกแบบให้ใช้งานได้กับงานพิเศษมากมาย คือได้ช่วงอุณหภูมิและความดัน ตั้งแต่ช่วงค่าต่ำๆ จนถึงค่าสูงๆ

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนหลายตัว ถูกออกแบบสำหรับงานหลากหลายชนิด ดังนั้น มาตรการสำหรับความเหมาะสมที่สุด ขึ้นอยู่กับงานที่จะนำไปใช้ เช่น มาตรการที่เหมาะสมที่สุด อาจจะถูกต้องการให้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน มีน้ำหนักให้น้อยที่สุด ปริมาตรหรือพื้นที่ที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนน้อยที่สุด เช่นถ้าต้นทุนในการผลิต (Initial) และค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน (Operation Cost) จะมีค่าสูงเพราะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีขนาดใหญ่ ต้องใช้สารทำงาน (Working fluid) มากกว่า และต้องใช้ปั๊ม (Pump) ใหญ่ขึ้นความดันลดลง (Pressure drop) ที่เกิดก็จะมากขึ้นตามไปด้วย ต่อมาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนควรมีการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด แต่ความดันลดลง (Pressure drop) ที่เกิดขึ้นควรมีค่าน้อยด้วย ความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยน้อยที่สุด

ดังนั้น เพื่อจะนำไปสู่การศึกษาความเหมาะสมที่สุดในการออกแบบด้านอุณหภูมิของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ควรแสดงและการคำนวณควรจะถูกทำซ้ำสำหรับแต่ละการออกแบบที่สามารถแปรผันได้ จนกระทั่ง มาตรการที่เหมาะสมที่สุด ถูกทำให้พึงพอใจ และได้มีการนำเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์มาช่วยในการออกแบบด้านรูปทรงของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนหรือรูปร่างของแผ่นเซาะร่องของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

Bell อธิบายไว้ว่า คอมพิวเตอร์ ช่วยการออกแบบกระบวนการทางความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ (Shell-And-Tube)

Shah อธิบายเกี่ยวกับคุณสมบัติพื้นฐานของคอมพิวเตอร์ ที่ช่วยในการออกแบบทางความร้อน และกระบวนการที่เหมาะสมที่สุด สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกะทัดรัด

Spalding โครงร่างทั่วไป ของลักษณะเด่น ของวิธีทางตัวเลข (Numerical) สำหรับการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Fluid Dynamic) และสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

โครงสร้างพื้นฐานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จะมุ่งการสนใจทางด้าน การออกแบบให้ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีขนาดกะทัดรัด ให้มีประสิทธิภาพดี

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

ปัญหาด้านการประเมินค่า (Rating Problem) ถูกเกี่ยวข้องกับการหาค่า อัตราการถ่ายเทความร้อน อุณหภูมิทางออกและความดันที่ลดลง ในแต่ละด้าน และปริมาณต่อไปนี้ เป็นปริมาณอย่างกว้างๆ ที่ระบุในปัญหาการประเมินค่า คือ ชนิดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน พื้นที่ผิวรูปทรงเรขาคณิต การจัดการการไหล อัตราการไหล อุณหภูมิทางเข้า

ปัญหาด้านขนาด (Sizing Problem) ถูกเกี่ยวข้องกับการหาค่า มิติของเมตริกซ์ เพื่อจะได้พบการถ่ายเทความร้อนจำเพาะ (Specific heat transfer) และความดันลดลง (Pressure drop) ที่ต้องการ งานของผู้ที่จะทำการออกแบบคือ การเลือกชนิดของโครงสร้าง การจัดการไหล และพื้นที่ผิวรูปทรงของแผ่นอะลูมิเนียม ทั้งสองด้าน

ปริมาณต่อไปนี้ เป็นปริมาณอย่างกว้างๆ คือ ของไหลที่ไหลเข้าและอุณหภูมิทางออก อัตราการไหล ความดันลดลง และอัตราการถ่ายเทความร้อน

Shah อธิบายจุดเด่น ของความสำคัญของ คอมพิวเตอร์ ในการทำซับรูทีน (Subroutine) ที่ถูกต้องการให้มีการคิดคำนวณการหาขนาด และการประเมินค่าอัตราต่างๆ ซึ่งรวมถึงข้อต่อไปนี้

1. การออกแบบโดยเฉพาะ (Design specific) การออกแบบโดยเฉพาะ ที่มีการกำหนดแน่นอนที่สมบูรณ์ ควรถูกหาได้ที่ (Computer Subroutine) ข้อมูลควรรวบรวมชนิดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน การจัดการไหล พื้นที่ผิวเรขาคณิต ค่าสภาวะการทำงาน เช่น อุณหภูมิทางเข้า อัตราการไหล ความดัน ชนิดของของไหล และอื่นๆ

2. คุณสมบัติของของเหลว (Fluid Properties) คุณสมบัติทางกายภาพหลายๆ อย่างของของเหลว เช่น ความร้อนจำเพาะ ความหนาแน่น ความหนืด ค่าการนำความร้อน และเพลาตัน นัม

เบอร์ ค่าเหล่านี้ ควรถูกรวมเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ ในเทอมที่มีความสัมพันธ์ร่วมกัน หรือที่เรียกว่าสหสัมพันธ์ (Correlation)

3. Metric geometry ข้อมูลที่บ่งบอกพฤติกรรมของ Metric geometry ควรถูกแบ่งแต่ละด้านของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนรวมถึงพื้นที่ที่มีการไหลแบบอิสระให้น้อยที่สุด เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก ขนาดครีบบมีความจำเป็นสำหรับการคำนวณประสิทธิภาพของครีบ และอื่น ๆ

4. ความสัมพันธ์ระหว่าง ϵ -NTU (ϵ -NTU Relation) เนื่องจากวิธี ϵ -NTU ถูกนำไปใช้ในการออกแบบเกี่ยวกับความร้อน ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกะทัดรัด การกำหนดสูตรหลาย ๆ สูตรสำหรับความสัมพันธ์ระหว่าง NTU ควรถูกจัดทำขึ้น ความสัมพันธ์ควรจะสามารถนำไปใช้ได้กับกรณีทั่วไปในการหาเมื่อรู้ NTU และ $C=C_{\min}/C_{\max}$ และคำนวณ NTU เมื่อรู้ ϵ และ C

5. ความสัมพันธ์ h และ f (hand f relation) ลักษณะเฉพาะของการแลกเปลี่ยนความร้อนและความเสียดทานการไหล ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกะทัดรัดถูกใช้ในเทอม j และ f และพล็อตกราฟ ของค่าเรย์โนลด์สเบอร์ (Reynolds Number) และข้อมูล h, f และ Re ควรถูกจัดทำขึ้นเป็นสหสัมพันธ์ (Correlation)

6. ประสิทธิภาพครีบ (Fin Efficiency) เมื่อพื้นผิวถูกขยาย มีการใช้ในการส่งถ่ายความร้อนเชิงเมทริก (Heat transfer Matrix) ประสิทธิภาพครีบ (η) และประสิทธิภาพของน้ำหนัพื้นที่ครีบ (η') ถูกต้องการในการคำนวณหาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน ดังนั้น ในการกำหนดสูตรประสิทธิภาพครีบ และข้อมูลถูกต้องการสำหรับการคำนวณ ประสิทธิภาพของพื้นที่ครีบควรถูกจัดทำ

7. ความดันลดลง (Pressure drop) ความดันที่ลดลงสำหรับการไหลผ่านตลอดเมทริก (Matrix) เกิดจากความเสียดทานการไหล การเร่งและการหน่วง อันเนื่องมาจากการถ่ายเทความร้อน การหดและการขยายที่ทางเข้าและทางออกของเมทริก (Matrix) ความสัมพันธ์ที่เหมาะสมควรถูกทำขึ้น การคำนวณความดันที่ลดลง เนื่องจากสาเหตุหลัก และรวมทั้งข้อต่อต่าง ๆ หัวจ่าย และ ท่อร่วม (Manifold)

Rating Problem ถ้าเป็นปัญหาเกี่ยวข้องกับการเหมาะสมที่สุด (Optimization) ซึ่งถูกสัมพันธ์กับอัตราการถ่ายเทความร้อน หรือความดันลดลง ถัดมา Rating Problem ถูกแก้ปัญหา และเป็นผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและความดันลดลง ถูกแก้ปัญหของ Rating Problem จะถูกนำคอมพิวเตอรืมาคิดแทน

Sizing Problem ถ้าเป็นปัญหาเกี่ยวข้องกับการเหมาะสมที่สุด (Optimization) ซึ่งถูกสัมพันธ์กับขนาด น้ำหนัก หรือพื้นที่การแลกเปลี่ยนความร้อน รวมถึงราคาค่าใช้จ่ายด้วย ดังนั้น Sizing Problem ถูกแก้ปัญหา และขนาดของแกนกลางของเมทริก (Matrix) และพื้นที่การแลกเปลี่ยนความร้อนถูกคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Optimization Problem มาตรการที่เหมาะสมที่สุดขึ้นอยู่กับงานโดยเฉพาะ ดังนั้น ปริมาณที่ทำให้เกิดสถานะที่เหมาะสมที่สุดควรมีการกำหนดว่าต้องการมากที่สุด (Maximized) หรือต่ำสุด (Minimized) เนื่องจากอาจมีเงื่อนไขบางตัว ถูกเพิ่มเข้ามา หนึ่งในความหลากหลายของวิธี อาจจะถูกนำมาใช้ ให้ถึงจุดของการออกแบบที่ดีที่สุด แต่อย่างไรก็ตาม วิธีนั้นก็จะถูกปรับให้เหมาะสมกับกรณีที่มีมันเกี่ยวข้องกับการแก้ปัญหาของ Rating Problem หรือ Sizing Problem

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เป็นแบบที่เหมาะสมที่สุดและราคาถูกที่สุด ปัญหาเกี่ยวกับเงื่อนไขที่เปิดเผยเห็นแจ้ง เช่น พื้นที่ด้านหน้าที่ที่ถูกคงที่ (Fixed Frontal Area) และช่วงของขนาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และเงื่อนไขที่แสดงเป็นนัย (Implicit Constraints) โดยเฉพาะอัตราการถ่ายเทความร้อนน้อยที่สุด และความดันลดลงมากที่สุดครั้งหนึ่งพื้นที่ผิวเรขาคณิต ถูกเลือกผู้ออกแบบมีทางเลือก ในการเพิ่มเงื่อนไข เช่น ค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดของครีป ความหนาครีป ระยะห่างระหว่างครีป ค่าการนำทางความร้อนของครีป ความยาวครีป อัตราการไหลของอากาศ ดังนั้นปัญหาลดลง จากการแก้ปัญหาของ Rating Problem ภายในช่วงของการปรับค่าที่เจาะจง

วิธีการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer Enhancement)

มีวิธีการหลายประการสำหรับช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในการไหลภายในท่อ วิธีที่มีการยอมรับกันคือ การเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h) และโดยการเพิ่มพื้นที่ผิวการพาให้มากขึ้น ตัวอย่างเช่น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h) อาจเพิ่มได้โดยการทำให้พื้นผิวขรุขระเพื่อให้เกิดการไหลแบบหมุนวน หรือเทอร์บูเลนซ์ ทำได้โดยการเจียรแต่งหรือสอดใส่ลวดคอยล์-สปริงก็ได้ การสอดใส่ลวดให้เป็นเกลียว (Helical roughness) ในการสัมผัสกับผิวภายในท่อ หรืออีกวิธีคือการออกแบบให้ภายในท่อเป็นร่องหรือเพิ่มครีปเพื่อให้การไหลของของไหลเป็นแบบหมุนวน หรือเทอร์บูเลนซ์

บทที่ 3

การแบ่งประเภทการใช้งานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

3.1 การแบ่งประเภทการใช้งานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

การแบ่งประเภทการใช้งานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาจกระทำได้ 6 วิธี คือ

- วิธีแบ่งประเภทตามสภาวะของของไหลที่ใช้
- วิธีแบ่งประเภทตามลักษณะการใช้งาน หรือจุดประสงค์ของการใช้งาน
- วิธีแบ่งประเภทตามโครงสร้างของอุปกรณ์
- วิธีแบ่งตามขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
- วิธีการแบ่งตามการถ่ายเทความร้อน
- วิธีการแบ่งตามการไหลของของไหล

3.1.1 การแบ่งประเภทตามสภาวะของของไหลที่ใช้

วิธีการแบ่งนี้เป็นแบบที่ว่าของไหล 2 ประเภทที่ทำการแลกเปลี่ยนความร้อนผ่านผนังถ่ายเทความร้อน มีสภาวะเป็นอะไร และมีการเปลี่ยนสภาวะภายในระหว่างแลกเปลี่ยนความร้อนหรือไม่

1. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของเหลว กับของเหลว (ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะ) ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนี้ ของไหลทั้ง 2 ชนิดต่างก็เป็นของเหลวซึ่งเพียงแต่ทำให้อุ่นขึ้นหรือเย็นลงแค่นั้นเอง ตัวอย่าง เช่น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำมันก๊าดร้อนและน้ำมันดิบในอุปกรณ์กลั่นน้ำมัน เป็นต้น

2. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของเหลว กับของเหลว (มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะ) ของเหลวฝ่ายหนึ่งในเครื่องจะเปลี่ยนแปลงสภาวะเป็นก๊าซหรือระเหยเป็นไอในระหว่างการแลกเปลี่ยนความร้อน ยกตัวอย่าง เช่น เครื่องคั้นน้ำ (Reboiler) ของหอกลั่นน้ำมัน ซึ่งใช้น้ำมันอุณหภูมิสูงเป็นแหล่งความร้อน เป็นต้น

3. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซกับก๊าซ (ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะ) ของไหลทั้ง 2 ชนิดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ต่างก็เป็นก๊าซซึ่งจะไม่เกิดการควบแน่นเป็นของเหลว ตัวอย่าง เช่น เครื่องอุ่นอากาศ (Air preheater) ซึ่งใช้ก๊าซทิ้งเป็นแหล่งความร้อน เป็นต้น

4. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซกับก๊าซ (มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะ) ของไหลฝ่ายหนึ่งในเครื่องควบแน่นเป็นของเหลวในระหว่างการแลกเปลี่ยนความร้อน ยกตัวอย่าง เช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องกระจายความร้อน (Radiator) สำหรับทำความอบอุ่น โดยการทำอากาศให้อุ่นด้วยไอน้ำ เป็นต้น

5. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซกับของเหลว (ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะ) ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้ ของไหลฝ่ายหนึ่งของผนังแลกเปลี่ยนความร้อนจะเป็นก๊าซ ส่วนอีกฝ่ายหนึ่งจะเป็นของเหลว ยกตัวอย่าง เช่น เครื่องอุ่นน้ำ (Economizer หรือ Feed water preheat)

6. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซและของเหลว (มีการเปลี่ยนแปลงสถานะ) ยกตัวอย่าง เช่น หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ (Water tube boiler) ซึ่งระเหยน้ำเป็นไอด้วยก๊าซสันดาป และเครื่องควบแน่น (Condenser) ซึ่งควบแน่น ให้เป็นของเหลวด้วยน้ำระบายความร้อน เป็นต้น

วิธีการแบ่งประเภทตามสถานะของของไหลนี้ สะดวกสำหรับการหาค่าโดยประมาณของสัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนความร้อน

3.1.2 การแบ่งตามจุดประสงค์ของการใช้งาน

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่แบ่งประเภทตามจุดประสงค์ของการใช้ หรือลักษณะการใช้งานนั้น แบ่งออกได้ดังนี้

1. เครื่องระเหย (Evaporator) หรือหม้อเคี้ยว (Concentrator) จุดประสงค์ของการใช้งาน คือ การระเหยของเหลวให้เป็นไอ เพื่อใช้ไอที่เกิดขึ้นเป็นประ โยชน์หรือให้ได้ของเหลวที่เข้มข้นขึ้น โดยทั่วไป นอกจากส่วนของ การถ่ายเทความร้อนแล้ว ยังมีส่วนของ การสะสมไอน้ำด้วย ดังนั้น รูปร่างภายนอกจึงอาจจะดูแปลกตาหรือแตกต่างจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเซลล์และท่อ

2. เครื่องอุ่นหรือเครื่องทำให้ร้อนล่วงหน้า (Preheater) จุดประสงค์ก็เพื่ออุ่นหรือทำให้ของเหลวร้อนล่วงหน้า เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของกระบวนการ โดยทั่วไปมักจะเรียกชื่อตามชนิดของงานหรือการใช้งาน หรือตามประเภทของไหลที่ทำให้ร้อน ยกตัวอย่าง เช่น เครื่องอุ่นน้ำป้อนน้ำเข้าหม้อน้ำ (Boiler feed water preheater)

3. เครื่องทำให้ร้อน (Heater) จุดประสงค์ก็เพื่อทำให้ร้อนหรือทำให้อุณหภูมิ ของของไหลสูงขึ้น โดยการให้ความร้อน

4. เครื่องทำให้ร้อนยิ่งยวด (Super-Heater) เครื่องนี้ทำหน้าที่เพิ่มความร้อนแก่ของไหลที่ถูกทำให้ร้อนมาแล้ว เพื่อให้อยู่ในสภาพร้อนยิ่งยวด อย่างเช่น เครื่องไอคง (Stream Superheater) เป็นต้น

5. เครื่องต้มซ้ำ (Reboiler) เครื่องนี้ทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่ของเหลวควบแน่นเพื่อระเหยกลับเป็นไอน้ำอีกครั้งหนึ่ง แสดงตัวอย่างของการใช้เครื่องต้มซ้ำ ซึ่งติดตั้งอยู่ที่ใกล้ฐานของหอกลั่นหน้าทีของเครื่องในทีนี้คือ การให้ความร้อนแก่น้ำมันก้นหอกลั่น เพื่อระเหยของค้ประกอบจุดเดือดต่ำที่มีอยู่ในน้ำมัน เครื่องต้มซ้ำมีทั้งที่เป็นแบบกาต้ม (Kettle Type) และแบบกาลักน้ำเชิงความร้อน (Thermosphe) ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดภายหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. **เครื่องควบแน่น (Condenser)** จุดประสงค์ก็เพื่อควบแน่น ไอที่ควบแน่นได้ให้กลายเป็นของเหลว ยกตัวอย่างเช่น เครื่องควบแน่นไอน้ำให้กลับมาเป็นน้ำอีกครั้ง

7. **เครื่องควบแน่นหมด (Total Condenser)** เครื่องนี้เป็นเครื่องควบแน่นประเภทหนึ่งที่ใช้หอกถัน แต่ได้รับการออกแบบให้สามารถควบแน่นไอทั้งหมดที่ออกมาจากยอดของหอกถัน

8. **เครื่องควบแน่นบางส่วน (Partial Condenser)** มีลักษณะคล้ายกับเครื่องควบแน่นทั้งหมด เครื่องควบแน่นแบบบางส่วนนี้เป็นเครื่องประเภทหนึ่งที่ใช้กับหอกถัน แต่มีจุดประสงค์เพื่อเพียงแต่ควบแน่น ส่วนหนึ่งของไอที่ออกมาจากยอดของหอกถันให้เป็นของเหลว

9. **เครื่องระบายความร้อน (Cooler)** เครื่องนี้มีหน้าที่ระบายความร้อนออกจากของไหลเพื่อลดอุณหภูมิของของไหล

10. **เครื่องทำให้เย็นจัด (Chiller)** เครื่องนี้ทำหน้าที่ลดอุณหภูมิของของไหลให้เหลือต่ำมาก โดยการใช้สารทำความเย็น (Refrigerant) จำพวกแอมโมเนียและฟรอน เป็นต้น

11. **เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger)** เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในคำจำกัดความที่แคบนี้ต่างจากเครื่องต่าง ๆ ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ในแง่ที่ว่ามิจุดประสงค์เพื่อให้ความร้อนแก่ของไหลตัวหนึ่ง ในขณะที่เดียวกันกับการระบายความร้อนออกจากของไหลอีกตัวหนึ่ง โดยทั่วไปจะใช้แม่น้ำ หรือบ่อน้ำในการระบายความร้อน หรือการควบแน่น แต่ในบางครั้ง อาจใช้สารทำความเย็นจำพวกแอมโมเนีย แคลเซียมคลอไรด์ ฟรอน เป็นต้น อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะต้องมีใช้เสมอกับหอกถัน ซึ่งทำหน้าที่แยกองค์ประกอบต่าง ๆ ออกจากของเหลวผสม โดยอาศัยความแตกต่างของจุดเดือดขององค์ประกอบเหล่านั้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง โรงกลั่นน้ำมันที่มีหอกถันจำนวนมาก ในกรณีนี้จะเห็นได้ว่า หอกถันหนึ่งหอกจะต้องการอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน 4 ประเภท ดังนั้น จึงทำให้เราสามารถคาดภาพออกได้ว่า อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีความสำคัญมากเพียงไร

3.1.3 การแบ่งประเภทตามโครงสร้างของอุปกรณ์

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีมากมายหลายประเภท แต่เมื่อแยกประเภทตามโครงสร้างของอุปกรณ์แล้ว สามารถแบ่งออกได้ดังต่อไปนี้

1. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดท่อ

เนื่องจากโครงสร้างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้เป็นแบบง่าย ๆ และราคาข้อมเยา จึงมีใช้กันมาก ในปัจจุบันจะพบเห็นกันบ่อยในรูปของเครื่องระบายความร้อนแบบกล่อง (Box Cooler) ในกระบวนการกลั่นน้ำมัน และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ขนาดเล็ก หรือในกรณีที่ใช้ของเหลวที่มีฤทธิ์กัดกร่อนสูง โครงสร้างของประเภทนี้ ไม่ต้องการกรรมวิธีการผลิตที่ละเอียดลออ วัสดุที่ใช้ทำขดท่อ (Coil) มีตั้งแต่ท่อทองแดง ท่อเหล็ก จนถึง วัสดุที่แปรรูปยาก เช่น กระจังดินเผา เซรามิก แก้ว เหล็กหล่อซิลิกอนสูง (High Silicon Cast Iron) กราไฟท์ (Graphite) ยางสังเคราะห์ (Synthetic Rasin) เป็นต้น เนื่องจากเป็นขดท่อจึงมีความแข็งแรงสูงแม้ว่า ของไหลในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

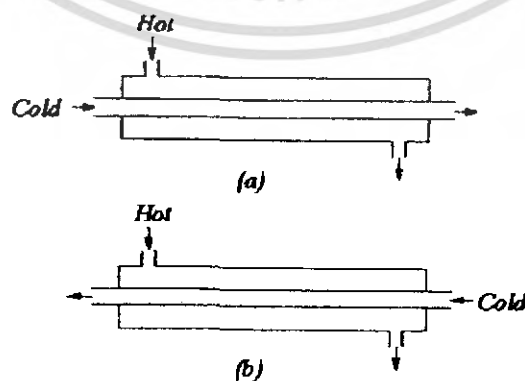
ห้องจะมีความดันสูง ดังนั้น ข้อดีของแบบนี้คือ ปัญหาของการรั่วไหลมีน้อย แต่ก็มีข้อเสียคือ ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนต่ำ และมีพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อนค่อนข้างน้อย เครื่องถ่ายเทความร้อนแบบนี้มักใช้สำหรับการควบคุมอุณหภูมิของของเหลวในถังเก็บให้มีค่าอยู่ในช่วงที่ต้องการ

2. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปิด

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้ใช้ระบายความร้อน โดยการปล่อยให้น้ำหยดลงบนท่อที่ติดตั้งอยู่ในแนวระดับเพื่อลดอุณหภูมิของของไหลที่ไหลอยู่ภายในท่อ โดยมีชื่อเรียกอื่นๆ ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้ คือ เครื่องระบายความร้อนแบบทริกเกิล (Trickle Cooler) แบบทรอมโบน (Trombone Cooler) แบบคาสเคด (Cascade Cooler) หรือแบบตัว S (S-type Cooler) เป็นต้น โครงสร้างทั่วไปประกอบด้วยท่อตรง และส่วนโค้ง (Bend) และสามารถวางซ้อนกันหลายๆ ชั้น เพื่อเพิ่มความสามารถในการทำงานของเครื่อง เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้เหมาะที่จะใช้กับของไหลความดันสูงที่มีอุณหภูมิก่อนสูง เพราะโอกาสที่จะเกิดการรั่วไหลมีน้อย แต่ถ้าเกิดการรั่วไหลขึ้นก็จะรู้ได้ทันทีวัสดุที่ใช้ทำท่อมีตั้งแต่เหล็ก จนกระทั่งวัสดุประเภทต่าง ๆ ที่ทนต่อการกัดกร่อน เช่นเดียวกับที่ใช้ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดท่อ

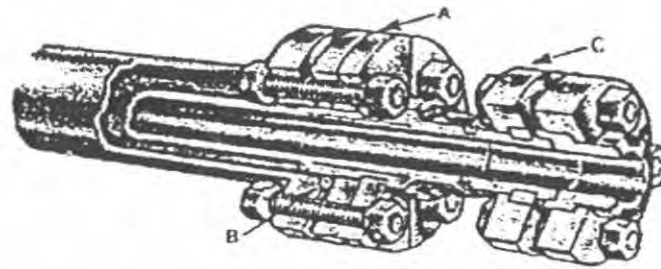
3. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น

โครงสร้างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้ประกอบด้วยท่อ 2 ขนาดซ้อนกันอยู่ โดยมีแกนกลางของท่อร่วมกัน ของไหลชนิดหนึ่งจะไหลอยู่ในท่อใน และของไหลอีกชนิดหนึ่งจะไหลอยู่ในช่องว่างรูปร่างแหวนระหว่างท่อในและท่อนอก โดยทั่วไปปลายข้างหนึ่งจะถูกเชื่อมต่อกันด้วยท่อโค้งรูปตัว U (U-Bend) ดังรูปที่ 3.1 บางทีก็เรียกชื่อตามโครงสร้างของเครื่องว่า เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแฮร์พิน เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้เหมาะสำหรับการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิของของไหลภายในท่อที่มีความดันสูง ความหนืดสูง หรืออุณหภูมิก่อนสูง ในบางครั้งจะใช้ท่อที่มีครีปเป็นท่อชั้นในเพื่อเพิ่มพื้นที่การถ่ายเทความร้อน และความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของเครื่อง



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อ 2 ชั้น

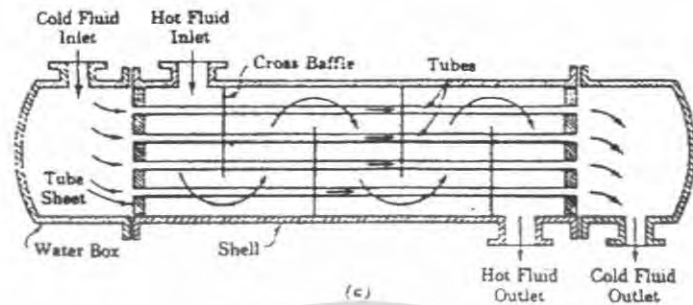
ลักษณะเด่นของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น คือ โครงสร้างค่อนข้างง่ายราคาของเครื่องต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ความร้อนมีราคาถูก และเมื่อมีความจำเป็น สามารถเพิ่มความสามารถในการทำงานได้ง่าย โดยการเอาเครื่องที่มีสัดส่วนเท่ากันหรือเหมือนกัน หลายๆ ชุดมาต่อกันแบบอนุกรม (Series) หรือแบบขนาน (Parallel) เมื่อให้ของไหลไหลสวนทางกันด้วยความเร็วที่เหมาะสม ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่ได้จะมีค่าสูง ในขณะที่ความดันสูญเสียมีค่าต่ำ แต่ถ้ามหาขนาดของเครื่องเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ปริมาตรของเครื่องต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มตามขึ้น ทำให้ราคาของเครื่องค่อนข้างแพง เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบอื่น ๆ ดังนั้น เครื่องแบบนี้จึงควรเลือกใช้ในกรณีที่ปริมาณการถ่ายเทความร้อนค่อนข้างน้อย หรือในกรณีที่ต้องการพื้นที่ถ่ายเทความร้อนน้อยกว่า 20 ตร.ม.

4. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเซลล์และท่อ

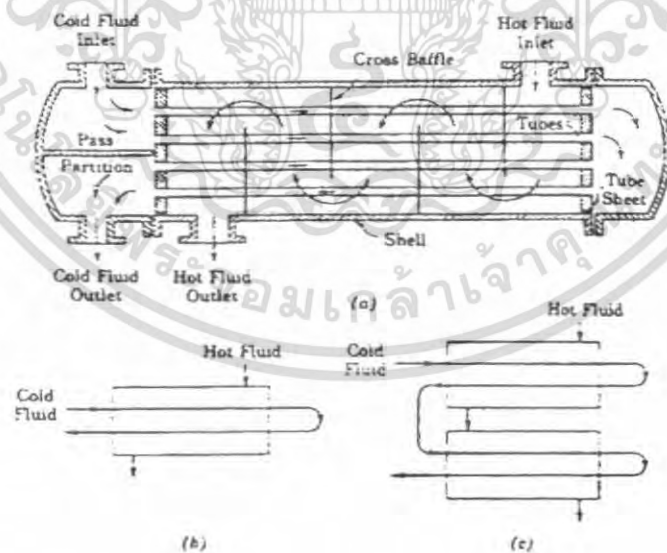
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในอุตสาหกรรมเคมี ส่วนใหญ่มีลักษณะประเภทนี้ เนื่องจากความนิยมใช้อุปกรณ์ประเภทนี้มีมากที่สุด ประกอบด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) จะมีพวก tube bundle, shell, front and rear end header and baffles จะขึ้นกับช่องว่าง อัตราการไหล (flow rate) การเกิดความดันลดลง (pressure drop) และท่อรองรับที่ต้องการ (tube support requirement) และการไหลที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนภายในท่อ ลักษณะของชนิดของของไหล แบ่งเป็นหลายแบบ เช่น ของเหลวกับของเหลว (liquid to liquid), ของเหลวกับแก๊ส (liquid to gas), ของเหลวกับของไหลเหลว (liquid to liquid fluid) ทั้ง 2 จะถูกปั๊ม (pump) ผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Exchanger) ดังนั้น การถ่ายเทความร้อน (Heater transfer) ทั้งภายในและภายนอกท่อ (tube) จะเป็นแบบการพาแบบบังคับ (forced convection) ดังนั้น ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน (heat transfer coefficient) จะสูงโดยเกิดจากการไหลของของไหลอยู่แล้ว ไม่จำเป็นต้องคิดครีบบหากเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของเหลวกับแก๊ส (liquid to gas) ครีบบจะต้องถูกคิดเข้าไปในด้านข้างของท่อแก๊ส (gas side) ซึ่งเป็นจุดที่ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน (heat transfer coefficient) ต่ำ แบบแก๊สกับแก๊ส (gas to gas) จะใช้กับแก๊สไอเสีย (Exhaust gas) และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องอุ่นอากาศ สำหรับระบบ gas-turbine, cryogenic gas liquefaction system และ steel furnances จะมีการติดครีบเข้าไปเพื่อเป็นการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer)



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



รูปที่ 3.4 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน shell-and-tube แบบ (a), (b) one shell pass และ two tube pass (c) two shell pass และ four tube pass

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบคาบปลายป็น

เส้นทางไหลภายในท่อประกอบด้วยท่อนอกซึ่งปลายข้างหนึ่ง มีฝาปิดอยู่ และท่อใน ซึ่งอยู่ในท่อนอก ของไหลภายในท่อจะแลกเปลี่ยนความร้อนกับของไหลภายในเซลล์ ในระหว่างที่ ไหลอยู่ในช่องว่างระหว่างท่อในและท่อนอก เนื่องจากมัดท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ประเภทนี้สามารถติดตั้ง หรือถอดออกได้ โดยไม่เกี่ยวข้องกับของไหลภายในเซลล์ เครื่องชนิดนี้ เหมาะที่จะสอดเข้าไปในภาชนะบรรจุ หรือระบบท่อได้โดยตรงเพื่อเพิ่ม หรือลดอุณหภูมิของของไหล ในเซลล์ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบคาบปลายป็น มีราคาสูง เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องชนิด อื่นๆ ดังนั้น จึงไม่เหมาะกับงานที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูง แต่เหมาะสำหรับการใช้อุปกรณ์ที่มี อยู่แล้ว เพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนให้สูงขึ้น

6. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อหมุนวน



รูปที่ 3.5 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อหมุนวน

ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.5 โครงสร้างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนประเภทนี้ประกอบด้วยท่อ ทองแดง ท่ออะลูมิเนียม หรือ วัสดุอ่อนอื่นๆ ซึ่งเล็กและยาวหมุนวนเป็นเกลียวหลายๆ ชั้นแล้วบรรจุ ในภาชนะรูปทรงกระบอก ผลที่ได้คือ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ที่มีพื้นที่การถ่ายเทความร้อน มาก แต่มีการสูญเสียความร้อนน้อยมาก เพราะพื้นผิวที่ความร้อนหนีออกจากเครื่องมีน้อย โดย โครงสร้างนอกจากการผลิตการซ่อมแซม ทำได้ยากและราคาสูงแล้ว ข้อเสียอย่างอื่นคือ ของไหลใน ท่อ และในเซลล์จะต้องสะอาด และมีฤทธิ์กัดกร่อนน้อยจึงจะใช้ได้ ในปัจจุบันนี้ เครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อนแบบท่อหมุนวนส่วนใหญ่จะใช้กับอุปกรณ์แยกก๊าซซึ่งทำให้อากาศหรือก๊าซอื่นๆ กลายเป็นของเหลว ที่อุณหภูมิต่ำมากๆ เพื่อทำการแบ่งแยกต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ

เนื่องจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้ ใช้อากาศเป็นตัวระบายความร้อนแทนน้ำเย็น จึงเป็นที่นิยมใช้กันเพิ่มขึ้นอย่างแพร่หลาย ในปัจจุบัน ซึ่งขาดแคลนน้ำในการระบายความร้อน โดยโครงสร้างของเครื่องมี 3 องค์ประกอบคือ มัดท่อซึ่งประกอบด้วยท่อถ่ายเทความร้อนที่มีครีป (Fin) โครงเหล็ก ซึ่งใช้สำหรับยึดมัดท่อ และเครื่องเป่าลม พร้อมมอเตอร์สำหรับเป่าอากาศผ่านมัดท่อ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศมีทั้งแบบที่เป่าอากาศผ่านมัดท่อ (Forced-Draft) และแบบที่ชักนำอากาศให้ไหลผ่านมัดท่อ (Induced-Draft) คุณลักษณะเด่นของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนประเภทนี้ คือ ไม่ต้องอาศัยน้ำเป็นตัวระบายความร้อน (ผลคือ ไม่ต้องกังวลเรื่องการแสวงหาแหล่งน้ำ หรือการแก้ไขคุณภาพน้ำที่ใช้) และอากาศที่ใช้ในการระบายความร้อนก็มีอยู่อย่างไม่จำกัดปริมาณ ยิ่งกว่านั้น เหตุขัดข้องที่เกิดจากสนิมหรือความสกปรกของกรณีที่ใช้ น้ำระบายความร้อนก็ไม่มี ข้อคืออย่างอื่น คือ ค่าบำรุงรักษาถูกกว่ากรณีที่ใช้ น้ำ และเวลาเกิดการรั่วไหลของท่อขึ้น เรื่องที่น้ำจะเข้าไปปะปนกับของไหลภายในท่อก็ไม่มี อย่างไรก็ตาม ข้อเสียหลายอย่าง เช่น เสียงดัง ต้องใช้พื้นที่ในการติดตั้งมาก ค่าก่อสร้างสูง และต้องเลือกสถานที่ติดตั้งให้ดี

8. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบปลอกหุ้ม

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้ มีใช้ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมเคมีเป็นเวลานาน โครงสร้างของเครื่องประกอบด้วยปลอกหุ้มดัดเก็บ หรือถังปฏิกรณ์ (Reactor) เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อน ข้อเสียของแบบนี้ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมมีค่าต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ หรือแบบอื่นๆ อีกทั้งพื้นที่ถ่ายเทความร้อนก็ถูกจำกัด โดยขนาดของตัวถัง ดังนั้น จึงไม่เหมาะกับงานที่มีจุดประสงค์หลักเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อน ส่วนของข้อดีคือ โครงสร้างเป็นแบบง่ายๆ ราคาถูก และความจุของภาชนะภายในสูง ดังนั้น จึงเหมาะสำหรับการให้ความร้อนหรือทำความเย็นแก่ของเหลว โดยเฉพาะอย่างยิ่งสะดวกสำหรับการรักษาอุณหภูมิของของเหลวในถังเก็บหรือถังควบให้คงที่ ในบางครั้งเพื่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนอาจมีการติดตั้งเครื่องกวนสำหรับของเหลวภายในถัง หรือเพิ่มพื้นที่การถ่ายเทความร้อน โดยใช้ท่อน้ำถ่ายเทความร้อนร่วมด้วย โดยปรกติแล้ว การทำความสะอาดภายในปลอกหุ้มทำไม่ได้ ดังนั้น ของไหลที่ใช้ในปลอกหุ้มควรเป็น ไขมันของน้ำเย็น ฟรีออน (Freon) หรือแอมโมเนีย (Ammonia) ที่มีความสกปรกน้อย

9. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น คือ การนำเอาแผ่นถ่ายเทความร้อนหลายๆ แผ่น มาวางเรียงติดกันในระยะห่างที่คงที่ แล้วให้ของเหลวแต่ละชนิดไหลผ่านช่องว่างระหว่างแผ่นใน ลักษณะสลับกัน ช่องเว้นช่อง เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้ มักใช้กับการเพิ่มอุณหภูมิอากาศก่อนเข้าหม้อไอน้ำ (Boiler) ในกรณีนี้ค่าการสูญเสียความดันจะมีน้อย แต่ประสิทธิภาพก็ไม่สู้จะดีนัก ในปัจจุบันได้มีการปรับปรุงและพัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้ โดยจะใช้แผ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหล็กสแตนเลส (Stainless Steel) บางๆ หรือแผ่นไทเทเนียม (Titanium) ซึ่งทนต่อสนิมได้อย่างดี เอามาอัดให้เกิดส่วนนูน ส่วนเว้า แล้ววางประกบกันหลายๆ แผ่น โดยของไหลแต่ละชนิดจะไหล สลับกันในแต่ละช่องว่างที่เกิดจากการประกบเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อเพิ่มความแข็งแรง ป้องกันอากาศรั่ว และให้มีช่องว่างไหลดี ผิวของแผ่นนำความร้อนจะมีทั้งส่วนนูน และส่วนเว้า ประเก็น (Gasket) จะถูกติดตั้งไว้ในตำแหน่งที่เหมาะสมเพื่อป้องกันไม่ให้อากาศรั่วไหล และรักษา ระยะห่างของแผ่นที่ต้องการสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ ปรับปรุงใหม่มีคุณภาพสูง ส่วนคุณลักษณะเด่นอย่างอื่นของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้ คือ สามารถถอดออกมาเป็นแผ่น ๆ เพื่อทำความสะอาดได้ทั่วถึง การบำรุงรักษาก็ง่าย และสามารถ ปรับปริมาณการถ่ายเทความร้อนได้ โดยการเพิ่มหรือลดจำนวนของแผ่นถ่ายเทความร้อน เนื่องจาก ประเก็นที่ใช้โดยปกติจะทำมาจากยางหรือยางสังเคราะห์ จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้กับเครื่องถ่ายเท ความร้อนที่มีอุณหภูมิสูง หรือความดันสูง เครื่องแบบนี้นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมเวชภัณฑ์ และอุตสาหกรรมอาหาร ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมสูงประมาณ $1300-3500 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr}^\circ\text{C}$ ส่วนความดันและอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ได้ประมาณ 5 kg/cm^2 และ 150 องศา เซลเซียส ตามลำดับ แผ่นจะต้องราบเรียบ หากแผ่นไม่สมมาตรจะไม่สามารถใช้กับงานที่ต้องทน กับความดันและอุณหภูมิสูง (high pressure) ค่าของ compactness factor จะอยู่ในช่วง $120-230 \text{ m}^2/\text{m}^3$ การนำเอาแผ่นถ่ายเทความร้อน 2 แผ่น มาประกบกันให้เกิดช่องทางการไหลเหมือนกับขด ท่อ ลักษณะการใช้ มีตั้งแต่การเอามาวางประกบกันหลายๆ แผ่น ให้เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แบบแผ่น การวางใช้ภาชนะบรรจุแทนขดท่อถ่ายเทความร้อน (Coil) ตลอดจนการวางติดกับผนังถึง แทนปลอกหุ้ม (jacket)

10. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบหอยโข่ง

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้สร้างขึ้นจากแผ่นราบ 2 แผ่น ที่เอามาตัดขนานกัน ให้เหมือนหอยโข่ง คุณลักษณะที่เด่นของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้ คือ โครงสร้างเป็น แบบที่ไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงการยืดหดตัวเชิงความร้อน สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมสูง เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการสูญเสียความดันต่ำ และการไหลก็สม่ำเสมอด้วย ดังนั้น จึงสามารถ ออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนให้มีขนาดเล็กได้เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่การถ่ายเทความร้อน ข้อเสียของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้ คือ ทำความสะอาด หรือ ซ่อมแซมได้ยาก เพราะปกติ แล้วสร้างขึ้นด้วยการเชื่อมโลหะ (Welding) ดังนั้นจึงไม่เหมาะที่จะใช้กับของไหลที่สกปรกมากๆ ของไหลที่มีฤทธิ์กัดกร่อนแตกต่างกัน หรือของไหลที่มีความดันสูง ในปัจจุบันเครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อนแบบนี้มีใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น แต่การใช้ที่เหมาะสม คือ ใช้เป็นเครื่องทำความเย็นในอุตสาหกรรมเคมี โดยเฉพาะอย่างยิ่งใช้เป็นเครื่องควบแน่นที่ความดันใกล้สูญญากาศ

11. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบถ้อย

โดยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้ส่วนใหญ่แล้วจะเลือกใช้วัสดุประเภทโลหะที่เหมาะสมกับการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารเคมีสองชนิดที่มีฤทธิ์กัดกร่อน ผิดแผกกันนั้นทำได้ลำบาก ในกรณีเช่นนี้สมควรที่จะใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบถ้อยซึ่งผลิตมาจากตะกั่วดำหรือวัสดุทนการกัดกร่อนอื่นๆ โครงสร้างของเครื่องประกอบด้วย ก้อนวัสดุทนการกัดกร่อนซึ่งเจาะรูยาวจำนวนมากให้ตั้งฉากกันแต่ละชั้นของรู ของไหลแต่ละชนิดไหลสลับชั้นกันไปตามรูที่เจาะไว้ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้ใช้ในอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ เช่น กรดเกลือ กรดกำมะถัน และ เคมีภัณฑ์อื่นๆ แต่โครงสร้างของเครื่องจำกัดการใช้ในเฉพาะกรณีปริมาณการแลกเปลี่ยนความร้อนน้อยที่ความดันต่ำและอุณหภูมิต่ำ

12. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกะทัดรัด

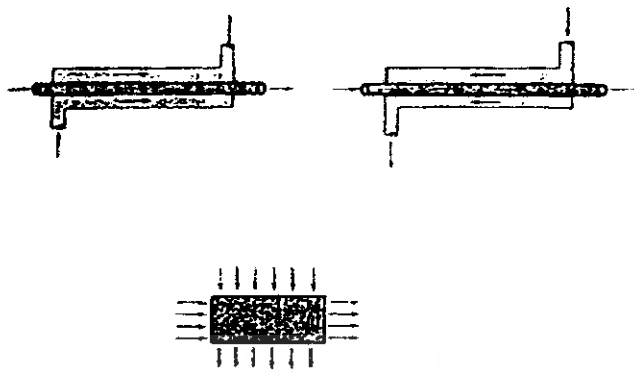
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้ได้มาจากการริเริ่มที่ต้องการลดขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนให้มีขนาดเล็กที่สุดแต่มีพื้นที่การถ่ายเทความร้อนสูง เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกะทัดรัดนี้ จะสามารถเรียกว่ากะทัดรัดได้ก็ต่อเมื่ออัตราส่วนระหว่างพื้นที่ถ่ายเทความร้อน (ในหน่วย ft^2) กับปริมาตร (ในหน่วย ft^3) ของเครื่องมีค่ามากกว่า 200 ขึ้นไป เพื่อให้พื้นที่การถ่ายเทความร้อนต่อปริมาตรหนึ่งหน่วยมีค่าสูง ในกรณีที่ใช้ท่อกลมปกติจะใช้ท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า $1/4$ นิ้ว ร่วมกับครีบ (Fin) หรือแผ่นโครงร่างแสดงตัวอย่างทั่วไปของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกะทัดรัดเนื่องจากโครงสร้างแบบนี้ซ่อมแซมทำความสะอาดได้ยาก และอุณหภูมิหรือความดันที่ใช้ ก็มีจำกัด จึงไม่ค่อยใช้ในอุตสาหกรรมเคมี แต่เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่คิเลศระหว่างก๊าซ 2 ชนิด ที่สกรปรกน้อย

อย่างไรก็ดีถ้าเลือกวัสดุและการออกแบบสัทไปปะกระทำอย่างไม่ถูกต้องก็อาจจะเกิดปัญหาในการใช้งาน เช่น การหลุดของผนังท่อ จะทำให้สัทไปปะหมดประสิทธิภาพในการทำงานโดยสิ้นเชิง การสึกกร่อนของผนังด้านในอาจก่อให้เกิดการอุดตัน หรือเสื่อมสภาพของวิกค์ได้ บางครั้งวิกค์อาจเกิดการแห้งตัวได้ (Dry out) ถ้าแรงคาพิลลารี มีไม่เพียงพอที่จะถ่ายเทความร้อนของของเหลวควบแน่นกลับไปช่วงการระเหยได้ทัน ของเหลวใช้งานก็อาจเสื่อมคุณภาพได้ที่อุณหภูมิสูงเกินไป

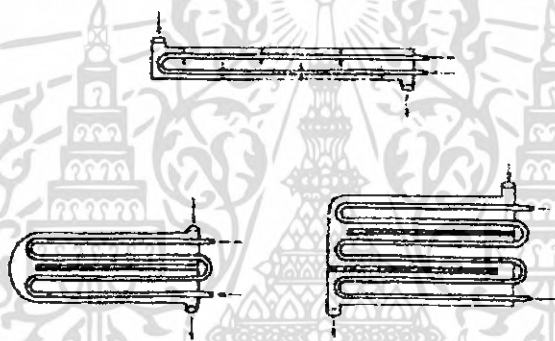
3.1.4 ลักษณะการแบ่งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตามการไหล (flow arrangement)

1. Parallel flow การไหลจะเป็นการ ไหลแบบทางเดียวกันดังรูปที่ 3.7 (a)
2. Counter flow จะเป็นการ ไหลแบบสวนทางกันดังรูปที่ 3.7 (b)
3. Cross flow จะเป็นการ ไหลแบบตัดขวางดังรูปที่ 3.7 (c)
4. Multi pass นิยมใช้ในการเพิ่มการทำเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (heat exchanger) เพราะว่าการเพิ่ม Multi passing จะทำให้ overall effectiveness over individual effectiveness ดังรูปที่ 3.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงหรือเผยแพร่ข้อมูลนี้อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 (a) การไหลแบบขนาน (b) การไหลแบบสวนทาง (c) การไหลแบบตัดขวางกัน



รูปที่ 3.7 การไหลแบบ Multi pass (a) one shell pass, two tube pass

(b) two shell pass, four tube pass

(c) three shell pass, six tube pass

3.1.5 ลักษณะการแบ่งประเภทของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Transfer Process

1. แบบสัมผัสโดยตรง (Direct Contact) การถ่ายเทความร้อนจะเป็นการถ่ายเทความร้อนระหว่าง Inmiscible Fluids เช่น หอคอยเย็น (Cooling tower) สำหรับส่วนในของหอคอยเย็น (Cooling tower) จะใช้ความร้อนมาจากโรงงานอุตสาหกรรม (Industrial Process) โดยการนำความร้อนที่เกิดขึ้นส่งไปที่น้ำ เช่น แม่น้ำ ลำธาร หรือทะเลสาบ โดยจะแบ่งการพาความร้อน 2 แบบ คือ

ก. การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural Convection)

ข. การพาความร้อนแบบบังคับ (Forced Convection)

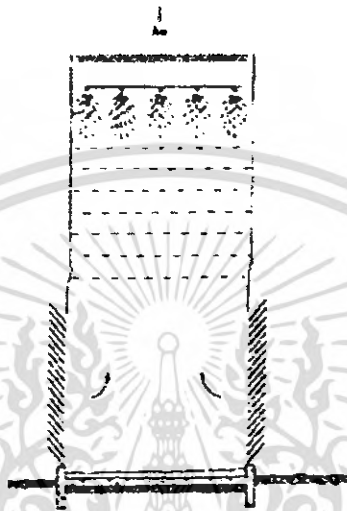
สำหรับหอคอยเย็น (Cooling tower) แบบการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural Convection) เป็นไปตามรูปที่ 3.9 โดยจะมีการพ่นน้ำ (Sprayed water) จากด้านบนลงมาด้านล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

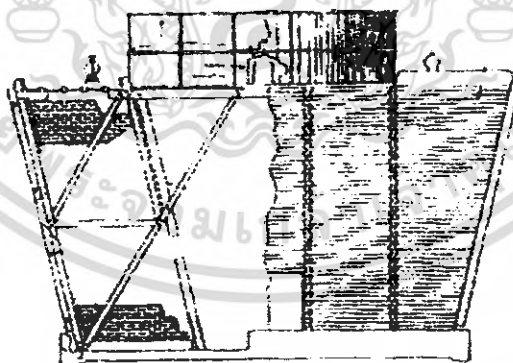
โดยมีความร้อนขึ้นด้านบน สำหรับ หอความเย็น (Cooling tower) แบบ การพาความร้อนแบบ บังคับ (Forced Convection)

เป็นไปตามรูปที่ 3.10

2. แบบไม่สัมผัสโดยตรง (Indirect Contact) จะเป็นพวกหม้อน้ำรถยนต์ (Automobile Radiators)



รูปที่ 3.8 แสดง Cooling Tower แบบ Natural Convection



รูปที่ 3.9 แสดง Cooling Tower แบบ Force Convection

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.6 ลักษณะการแบ่งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แบ่งตาม According Compactness

เป็นการแบ่งวัดอัตราส่วนของการถ่ายเทความร้อนต่อปริมาตร (Heat transfer surface area) ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) ต่อปริมาตรของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) หากมีค่ามากกว่า $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$ จะเรียกว่าแบบกะทัดรัด (Compact heat exchanger) ยกตัวอย่างก็จะเป็นพวกหม้อน้ำรถยนต์ (Automobile Radiators) จะมีความหนาแน่นของพื้นที่ (Area density) ประมาณ $1100 \text{ m}^2/\text{m}^3$ สำหรับพาหนะแก๊สเทอร์โบ (Vehicular gas turbine) จะมีความหนาแน่นของพื้นที่ (Area density) ประมาณ $6000 \text{ m}^2/\text{m}^3$ เป็นแบบกะทัดรัด (Compact heat exchanger) สำหรับปอดของมนุษย์ (Human lungs) จะมีความหนาแน่นของพื้นที่ (Area density) ประมาณ $20000 \text{ m}^2/\text{m}^3$ เป็นต้น จะถือว่าเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีค่าแบบกะทัดรัด (Compact heat exchanger) สูงสุดสำหรับเครื่องยนต์สเตอร์ลิง (Stirling engine) เป็นความหนาแน่นของพื้นที่ (Area density) เข้าใกล้ปอดของมนุษย์ (Human lungs) สำหรับ Plane tubular และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น (Shell and tube exchanger) ที่มีความหนาแน่นของพื้นที่ (Area density) ในช่วง $70\text{-}500 \text{ m}^2/\text{m}^3$ จะไม่ถือว่าเป็นแบบกะทัดรัด (Considered Compact) สำหรับการทำให้อัตราส่วน (Ratio) มีค่าสูงทำได้โดยการผลิตครีบ (fins) ในการถ่ายเทความร้อน ระหว่างแก๊สไปที่ของเหลว (Gas to liquid) ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer Coefficient) ของทางด้านแก๊ส (gas) น้อยกว่าทางด้าน (liquid) จะต้องมีการติดครีบ (Fins) ทางด้านแก๊ส เพื่อที่จะทำให้มีขนาดกะทัดรัดมากขึ้น

บทที่ 4

วัสดุที่ใช้ทำเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและอุปกรณ์ต่างๆ

4.1 วัสดุที่ใช้ในการทำเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger)

อุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบต่าง ๆ แทบทั้งหมดทำจากโลหะทั้งสิ้น โลหะเป็นวัสดุที่มีให้เลือกใช้อย่างกว้างขวางพร้อมกับลักษณะของคุณสมบัติความแข็งแรงที่หลากหลาย โดยสามารถสร้างขึ้นรูปร่างได้อย่างสะดวกและสามารถเชื่อมค่อได้โดยใช้การเชื่อมหรือการบัดกรี ปัจจัยทางด้านเศรษฐกิจเป็นตัวชี้้นำให้ใช้ โลหะที่มีราคาถูกและยังสามารถทนต่อการไหลของของไหลภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนได้ดี ความสามารถในการทนต่อการไหลได้ดีที่สำคัญ คือ ความต้านทานต่อการกัดกร่อนของของเหลวและไอที่กัดกร่อน เช่น กรดไฮดรอลิก กรดกำมะถัน และกรดฟอสฟอริก เป็นเหตุให้ต้องหันไปใช้โลหะที่มีราคาแพง เช่น ไทเทเนียม แทนทาลัม เซอร์โคเนียมและแฮสเทลลอย ตลอดจนโลหะผสมอื่นๆ ของไหลบางชนิดมีการกัดกร่อนมากจนไม่สามารถหาโลหะที่เหมาะสมในเชิงความต้านทานต่อการกัดกร่อนได้ ภายได้ข้อจำกัดทางเศรษฐศาสตร์ทางเลือกก็คือ ใช้วัสดุที่ไม่ใช่โลหะแทน เช่น พลาสติก แก้วไฟด์ เป็นต้น

4.1.1 พลาสติก

วัสดุพลาสติกโดยเฉพาะอย่างยิ่ง Teflon หรือ Fluon (Polyterfluroethylene, PTFE) ได้รับความนิยมเป็นพิเศษเนื่องจากคุณสมบัติที่เชื่อมโยงในด้านความต้านทานต่อการทำลายทางเคมีและเสื่อมสภาพ เราสามารถสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงได้โดยใช้กลุ่มท่อ PTFE ที่ยาวบางและยืดหยุ่น ซึ่งปลายท่อถูกยึดเข้ากับท่อพักที่ทำด้วยวัสดุชนิดเดียวกัน กลุ่มท่อนี้จะถูกม้วนหรือแขวนอยู่ในถังระบายความร้อนที่เปิดบรรจุน้ำระบายความร้อน อีกเทคนิคหนึ่งคือ ชุบ PTFE บนพื้นผิวภายในท่อและพื้นผิวบริเวณอื่นๆ ที่สัมผัสกับของไหล

4.1.2 อะลูมิเนียม

โดย อะลูมิเนียมจะมีคุณสมบัติทางเคมี , คุณสมบัติทางไฟฟ้า , คุณสมบัติทางฟิสิกส์ดังต่อไปนี้ คือ

คุณสมบัติทางเคมี (Chemical properties)

1. **ออกซิเจน** เมื่ออลูมิเนียม ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน จะทำให้เกิดชั้นฟิล์ม บางๆ เรียกว่า อลูมิเนียมออกไซด์ อยู่ที่ชั้นผิวของ อลูมิเนียม ซึ่งจะทำให้ไม่เกิด ปฏิกิริยาต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ไนโตรเจน เมื่ออุณหภูมิเย็น ทำปฏิกิริยา กับไนโตรเจน จะทำให้เกิดไนไตรด์ที่ อุณหภูมิสูง
3. กำมะถัน เมื่ออุณหภูมิเย็น ทำปฏิกิริยา กับกำมะถัน จะไม่มีปฏิกิริยาเกิดขึ้น
4. ไฮโดรเจน เมื่ออุณหภูมิเย็นทำปฏิกิริยา กับไฮโดรเจน ละลายแทรกซึม เข้าในอุณหภูมิเย็นได้และ
ในการหล่ออุณหภูมิเย็นถือ ว่าไฮโดรเจนเป็นก๊าซ ที่จะต้องกำจัดออก ให้หมดมากที่สุด
5. กรดอินทรีย์ (เข้มข้น) เมื่อเกิดปฏิกิริยากับ กรดอินทรีย์ ซึ่งอุณหภูมิเย็นสามารถ ทนได้บ้าง
6. กรดอินทรีย์ (เจือจาง) เมื่อเกิดปฏิกิริยากับ กรดอินทรีย์เจือจาง ซึ่งจะทำให้เกิด ปฏิกิริยา
ทันที
7. ค่าง เมื่อเกิดปฏิกิริยา กับค่าง ซึ่งสามารถ ละลายอุณหภูมิเย็นได้
8. เกลือ เมื่อเกิดปฏิกิริยา กับเกลือ ซึ่งสามารถ กัดกร่อนอุณหภูมิเย็นได้
9. กรดอินทรีย์ เมื่อเกิดปฏิกิริยา กับกรดอินทรีย์ ซึ่งสามารถละลาย ในอุณหภูมิเย็นได้ทันที
(ยกเว้นกรดน้ำส้ม)
10. กรดอินทรีย์ + น้ำ เมื่อเกิดปฏิกิริยา กับกรดอินทรีย์ + น้ำ ซึ่งไม่เกิด ปฏิกิริยากับอุณหภูมิเย็น
11. ฮาโลเจน เมื่อเกิดปฏิกิริยา กับฮาโลเจน ซึ่งทำให้เกิด ปฏิกิริยาทันที

คุณสมบัติทางไฟฟ้า (Electrical properties)

การต้านทานไฟฟ้าที่ 20°C 2.6548 u Ω -cm

การนำไฟฟ้า 94.94 %IACS

คุณสมบัติทางฟิสิกส์ (Physical properties)

หมายเลขอะตอม 13

น้ำหนักอะตอม 26.97

วาเลนซ์ 3

โครงสร้างผลึก f.c.c.

มิตของแลตทิส 4.049 \AA

ความหนาแน่นที่ 20°C 2.6989 g/mm^3

จุดหลอมเหลว 660.2 $^{\circ}\text{C}$

จุดเดือด 2450 $^{\circ}\text{C}$

การหดขยี้ดแข็งตัว 6.6 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความร้อนแฝงของการหลอมละลาย	94.5	cal/g
ความร้อนแฝงของการเป็นไอ	2260	cal/g
ความร้อนจำเพาะที่ 100°C	0.224	cal/g
การนำความร้อนที่ 20°C	0.57	cal/g
การสะท้อนแสง		
แสงจากหลอดทั้งสแตน	90	%
แสง 2000 - 2500 °A	86-87	%
แสง 10000 °A	96	%

สี

ขาวเงิน

4.1.3 ไยแก้ว (Fiber Glass) ไยแก้วเป็นฉนวนที่ผลิตจากการหลอมแก้วแล้วปั่นออกมาเป็นเส้นใยสีขาว จัดอยู่ในกลุ่มฉนวนเซรามิก มีความหนาแน่นต่างกันตั้งแต่ 10 kg/m³ ถึงมากกว่า 64 kg/m³ อาจผลิตในรูปแบบแข็ง แบบม้วน หรือขึ้นเป็นรูปทรงต่างๆกัน ตัวเส้นใยจะถูกเคลือบไว้ด้วยตัวประสาน (Binder) เช่น ฟีนอลิกเรซิน ซึ่งทำหน้าที่เชื่อมระหว่างเส้นใย ที่พบมากจะเป็น ฟีนอลฟอร์มอัลดีไฮด์ ซึ่งจะให้สีเหลืองหลังการผลิต



รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะโครงสร้างของใยแก้วและฉนวนใยแก้วชนิดปิดผิวด้วยอลูมิเนียมฟอยล์

ตัวใยแก้วเป็นสารอนินทรีย์จึงไม่ติดไฟ แต่ตัวประสานจะติดไฟได้ จึงควรพิจารณาอุณหภูมิในการใช้งาน และการดูดซับความชื้นจะทำให้ความสามารถในการต้านทานความร้อนลดลง จึงต้องมีแผ่นมาประกบเพื่อช่วยต้านทานไอน้ำ เช่น แผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ หรือ ฟิล์มพลาสติก ห่อหุ้มขณะใช้งานจริง ซึ่งต้องพิจารณาคุณภาพและคุณสมบัติการติดไฟในการเลือกใช้งานด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ทฤษฎีและสูตรที่ใช้ในการคำนวณ

การพาแบบบังคับสำหรับการไหลภายในท่อ (Forced Convection for Flow Inside Ducts)

การไหลของของไหลภายในท่อจะมีความแตกต่างจากการไหลผ่านภายนอกท่อ คือ การไหลภายในท่อมักมีขอบเขตจำกัด โดยที่ความหนาของบาวน์คาร์เรียเยอร์ ไม่สามารถเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ได้ เพราะว่าเมื่อไหลไปได้ระยะหนึ่งบาวน์คาร์เรียเยอร์ก็จะก่อตัวเต็มพื้นที่หน้าตัดของท่อจึงไม่สามารถขยายออกไปได้อีก รูปร่างของความเร็วจะมีลักษณะชัดเจนแน่นอนไม่เปลี่ยนแปลงต่อไป ซึ่งการไหลลักษณะนี้เรียกว่า การไหลที่รับตัวเต็มที่แล้ว (fully developed flow) ส่วนการไหลส่วนหน้านี้เรียกว่า การไหลก่อนการปรับตัว (developing flow) และเรียกช่วงระยะของการไหลแบบนี้ว่าบริเวณทางเข้าไฮดรอดนามิก (Hydrodynamic entrance region)

5.1 การไหลของของไหล

สำหรับการไหลภายในท่อนั้น ต้องคำนึงถึงการขยายตัวของช่วงบริเวณทางเข้า (entry region) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับว่าการไหลนั้นเป็นอย่างไร แบบลามินาร์หรือเทอร์บูเลนต์ โดยจะมีสูตรที่ใช้ในการคำนวณหาค่าการไหลภายในท่อ คือ ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์สำหรับการไหล

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\mu} \quad (5.1)$$

โดยที่

- Re = ค่าตัวเลขเรย์โนลด์
- μ = ค่าความหนืดพลวัตของอากาศ (kg/m.s)
- ρ = ความหนาแน่นของของไหล, kg/m^3
- D_h = เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic diameter), m.
- V = ความเร็วเฉลี่ยของของไหล, m/s

โดยค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์วิกฤติ สำหรับช่วงการเปลี่ยนแปลงของการไหล จากลามินาร์ เป็นเทอร์บูเลนต์ เริ่มต้นจาก

$$Re \approx 2300$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และการไหลจะเป็นแบบเทอร์บูเลนเต็มที่เมื่อค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ อยู่ในช่วง

$$Re \geq 4000$$

สำหรับการไหลแบบลามินาร์ ความยาวของช่วงบริเวณทางเข้าของเครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อน ที่ปรับตัวเต็มที่แล้วสามารถหาได้จากสมการ

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

สำหรับการไหลแบบเทอร์บูเลนซ์ ไม่มีสมการที่แน่นอนสำหรับการหาระยะทางการปรับตัว แต่รู้เพียงว่าไม่เกี่ยวข้องกับค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ และมีค่าประมาณ

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

โดยที่

$$\begin{aligned} Re &= \text{ค่าตัวเลขเรย์โนลด์์} \\ \left(\frac{x_{fd,h}}{D} \right)_{lam} &= \text{ความยาวของช่วงบริเวณทางเข้าสำหรับการไหลแบบลามินาร์} \\ \left(\frac{x_{fd,h}}{D} \right)_{turb} &= \text{ความยาวของช่วงบริเวณทางเข้าสำหรับการไหลแบบเทอร์บูเลนซ์} \end{aligned}$$

5.2 ความเร็วเฉลี่ย

ข้อแตกต่างสำหรับการไหลภายในและการไหลภายนอก คือ เราไม่สามารถจะใช้ความเร็วของกระแสอิสระ u_∞ ของของไหลได้ เนื่องจากความเร็วภายในท่อจะแปรเปลี่ยนทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัดของท่อ ดังนั้นจึงต้องใช้ความเร็วเฉลี่ย u_m (mean velocity) แทน โดยนิยามของความเร็วเฉลี่ยนี้ คือ ความเร็วที่เมื่อคูณด้วยพื้นที่หน้าตัดของท่อและความหนาแน่นของของไหลแล้วจะเท่ากับอัตราการไหลของมวล ซึ่งหาได้จากสมการ

$$\dot{m} = \rho u_m A_c \quad (5.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าเป็นการไหลที่สภาวะคงที่ ที่อัดตัวไม่ได้แล้ว ภายในท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่ ค่า m และ μ_m ขอมมีค่าคงที่ตลอดความยาว โดยสามารถหาได้จากสมการ

$$Re = \frac{4m}{\pi D \mu} \quad (5.5)$$

โดยที่

- Re = ค่าตัวเลขเรย์โนลด์
- μ = ค่าความหนืดพลวัตของอากาศ (kg/m.s)
- D_h = เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic diameter), m.
- m = อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ, kg/s
- A_c = พื้นที่หน้าตัดของท่อ, m^2

5.3 การเปลี่ยนแปลงความดันและตัวประกอบเสียดทานในการไหลแบบปรับตัวเต็มที่แล้ว

ปกติวิศวกรมักสนใจเกี่ยวกับความดันลดในการไหลภายในท่อ เนื่องจากตัวพารามิเตอร์นี้เกี่ยวข้องกับการหาขนาดกำลังงานของปั๊มหรือพัดลมโดยตรง ในการหาความดันลด เราจะใช้ตัวประกอบเสียดทานของ Moody (หรือ Darcy) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ไร้มิติ โดยนิยามว่า

$$f = \frac{-(dp/dx)D}{\rho u_m^2/2} \quad (5.6)$$

โดยค่านี้ต่างจากสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน c_f ซึ่งบางครั้งเรียกว่า ตัวประกอบเสียดทานเฟนนิ่ง ซึ่งนิยามว่า

$$c_f = \frac{\tau_s}{\rho u_m^2/2} \quad (5.7)$$

เพราะว่าแรงเฉือนบนผิวของของไหลเท่ากับ (ทิศทางตรงกันข้าม) แรงบนผิวของของไหล ดังนั้น ความเค้นเฉือนบนผิวกำหนดเป็น $\tau_s = -\mu(du/dr)$ จะได้สมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_f = \frac{f}{4} \quad (5.8)$$

สำหรับการไหลแบบลามินาร์ที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว จะได้สมการ

$$f = \frac{64}{Re} \quad (5.9)$$

โดยที่

f = ตัวประกอบแรงเสียดทาน

Re = ค่าตัวเลขเรย์โนลด์

สำหรับการไหลแบบเทอร์บูเลนที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว การวิเคราะห์จะยุ่งยากกว่าต้องใช้ผลจากการทดลองตัวประกอบเสียดทานสำหรับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ ได้แสดงไว้ในไดอะแกรมของ Moody ในรูปที่ 5.1 ตัวประกอบเสียดทานจะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์และสภาวะผิวท่อ ซึ่งจะมีค่าน้อยสำหรับผิวท่อเรียบและจะมีค่ามากเมื่อความหยาบของผิว (e) เพิ่มขึ้นสัมพันธ์โดยประมาณ เป็นดังนี้

$$f = 0.316 Re^{-1/4} \quad Re \leq 2 \times 10^4 \quad (5.10)$$

$$f = 0.184 Re^{-1/5} \quad Re \leq 2 \times 10^4 \quad (5.11)$$

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในท่อสี่เหลี่ยมที่อยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติ ในรูปของ f จะหาได้จากสมการ

$$\Delta p = f \frac{\rho L \bar{V}^2}{2D_h} \quad (5.12)$$

โดยที่

Δp = ความดันตกคร่อมของของไหล, N/m^2

f = สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

ρ = ความหนาแน่นของของไหล, kg/m^3

L = ความยาวท่อ, m

\bar{V} = ความเร็วเฉลี่ยของของไหล, m/s

D_h = เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic diameter), m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราอาจใช้ค่า f บ่งบอกค่า การสูญเสียภายในท่อในรูปของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ซึ่ง f เป็นตัวแปรไร้มิติที่เป็นฟังก์ชันของ $f = \phi[Re, e/D]$

จากสมการที่ (5.12) เราสามารถใช้หาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานได้ โดยจะมีสมการเป็น

$$f = \frac{2D_h \Delta P}{L \rho \bar{V}^2} \quad (5.13)$$

5.4 การควบคุมพลังงาน (กรณีการถ่ายเทความร้อนที่ผิวคงที่ (Constant Heat flux))

ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่อากาศได้รับ พิจารณาการไหลในท่อ ของไหลด้วย อัตรามวลคงที่ และมีการพาความร้อนเกิดขึ้น ผิวภายในโดยทั่วไปการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ และพลังงานศักย์ของของไหลรวมทั้งการนำความร้อนในทิศทางแนวแกนจะไม่นำมาคิดละทิ้งได้ ดังนั้นถ้าไม่มีงานเพลลาซึ่งกระทำโดยของไหลขณะไหลผ่านท่อแล้ว จะมีเพียงอิทธิพลเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อน และงานจากการไหลเท่านั้น

จะได้สมการของอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ใช้ในชุดอุปกรณ์ทดลอง คือ

$$Q = mC_p(T_i - T_o) = hA_s(T_w - T_b) \quad (5.14)$$

โดยที่

Q	=	อัตราการถ่ายเทความร้อนที่อากาศได้รับ, <i>Watt</i>
m	=	อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ, <i>kg/s</i>
C_p	=	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ, <i>kJ/kg. °K</i>
T_i	=	อุณหภูมิอากาศด้านขาเข้า, <i>°C</i>
T_o	=	อุณหภูมิอากาศด้านขาออก, <i>°C</i>
h	=	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน, <i>W/m². °K</i>
A_s	=	พื้นที่ผิวถ่ายเทความร้อน, <i>m²</i>
T_w	=	อุณหภูมิผิวเฉลี่ยผนังร้อน, <i>°C</i>
T_b	=	อุณหภูมิของไหลเฉลี่ย, $(T_i + T_o)/2$, <i>°C</i>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5 งานที่ต้องป้อนให้กับระบบ

การพิจารณาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของช่องขนานชนิดเซาะร่อง จำเป็นจะต้องพิจารณา ทั้งในส่วนพลังงานที่ต้องใช้ในการขับเคลื่อนพัคลมและการถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศที่ไหลผ่าน โดยพลังงานที่พัคลมใช้ในการขับเคลื่อนอากาศให้ไหลผ่านแผ่นช่องขนานสามารถพิจารณาได้จากสมการ

$$\dot{W}_{in} = Q \Delta p \quad (5.15)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} \dot{W}_{in} &= \text{พลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนอากาศให้ไหลผ่านช่องขนาน, Watt} \\ \dot{Q} &= \text{อัตราการไหลของของไหล, } m^3/s \\ \Delta p &= \text{ความดันตกคร่อมของของไหล, } N/m^2 \end{aligned}$$

5.6 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Nusselt Number ; Nu_D)

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Nusselt Number) เป็นค่าพารามิเตอร์ไร้มิติ ที่มีความสำคัญต่อความร้อนซึ่งอาจจะเรียกว่า เป็นค่า อัตราส่วนการนำกับการพาความร้อน จะหาได้จากสมการ

$$Nu_D = \frac{hD_h}{k} \quad (5.14)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} Nu_D &= \text{ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน} \\ k &= \text{สัมประสิทธิ์การนำความร้อนอากาศ; } W/mK \\ D_h &= \text{เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic diameter), } m \end{aligned}$$

5.7 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h (Convective heat transfer coefficient or film convective coefficient)

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามชนิดของการไหล (เช่น ลามินาร์ หรือ เทอร์บูลেন্ট) รูปทรงของวัตถุ พื้นที่ที่ของไหลไหลผ่าน คุณสมบัติต่างๆ ฟิสิกส์ของของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไหล อุณหภูมิเฉลี่ย และตำแหน่งต่างๆ ตามพื้นผิวของวัตถุ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับกลไกการถ่ายเทความร้อนว่าเป็นการพาความร้อนแบบบังคับ (การเคลื่อนที่ของของไหลเกิดจากการขับโดยปั๊มหรือพัดลม) หรือเป็นการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (การเคลื่อนที่ของของไหลเนื่องจากแรงลอยตัว) ค่าของ h จะแปรเปลี่ยนตามตำแหน่งต่างๆ ตามพื้นผิววัตถุ ดังนั้นในทางวิศวกรรมแล้ว เพื่อความสะดวกจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยตลอดพื้นผิว แทนค่า h ที่ตำแหน่งนั้นๆ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสามารถวิเคราะห์ได้จากการพิจารณาการไหลผ่านวัตถุซึ่งมีรูปทรงเรขาคณิตต่างๆ เช่น แผ่นเรียบ หรือการไหลภายในท่อทรงกระบอกสำหรับการไหลผ่านวัตถุที่มีรูปทรงสลับซับซ้อน ค่า h สามารถหาได้จากการทดลอง

สำหรับสมการที่ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของไหลภายในท่อสามารถหาได้จากสมการ

$$h = \frac{mc_p(T_o - T_i)}{A_s(T_w - T_b)} \quad (5.15)$$

โดยที่

h	=	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน, $W/m^2 \cdot ^\circ K$
m	=	อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ, kg/s
C_p	=	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ, $kJ/kg \cdot ^\circ K$
T_i	=	อุณหภูมิอากาศด้านขาเข้า, $^\circ C$
T_o	=	อุณหภูมิอากาศด้านขาออก, $^\circ C$
T_w	=	อุณหภูมิผิวเฉลี่ยผนังร้อน, $^\circ C$
T_b	=	อุณหภูมิของไหลเฉลี่ย, $(T_i + T_o)/2$, $^\circ C$

5.8 เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic diameter)

ถึงแม้ว่าเรามีข้อจำกัดมากมายเกี่ยวกับการพิจารณาต่อการไหลภายในท่อกลม การประยุกต์ทางวิศวกรรมส่วนใหญ่จำนวนมากเกี่ยวข้องกับการพาความร้อนในท่อที่ไม่กลม โดยสมการที่กล่าวมาแล้วใช้ได้ดีพอประมาณกับท่อที่ไม่มีพื้นที่หน้าตัดกลม โดยการใช้เส้นผ่านศูนย์กลางสิทธิผลเป็นความยาวเฉพาะ (Characteristic length) ซึ่งเรียกว่า เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic diameter) และสามารถนิยามได้ดังสมการ

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (5.16)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} D_h &= \text{เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic diameter),m} \\ A_c &= \text{พื้นที่หน้าตัดของท่อ ,m}^2 \\ P &= \text{เส้นรอบรูป ,m} \end{aligned}$$

หรือสามารถหาจากสมการ

$$D_h = \frac{4bh}{2(b+h)} \quad (5.17)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} D_h &= \text{เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic diameter),m} \\ b &= \text{ความกว้างของช่องปรับสภาพลม ,m} \\ h &= \text{ความสูงของช่องปรับสภาพลม ,m} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงกรรมวิธีการทดลองและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง และการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยในการติดตั้งและประกอบอุปกรณ์ต่างๆ ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต้องกระทำอย่างระมัดระวังที่สุด เพื่อให้ค่าที่วัดออกมามีความแม่นยำและเชื่อถือได้ และเป็นการป้องกันไม่ให้เกิดการรั่วไหลของของไหลในระบบซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ ดังนั้นขั้นตอนในการติดตั้งจึงมีความสำคัญมาก

6.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

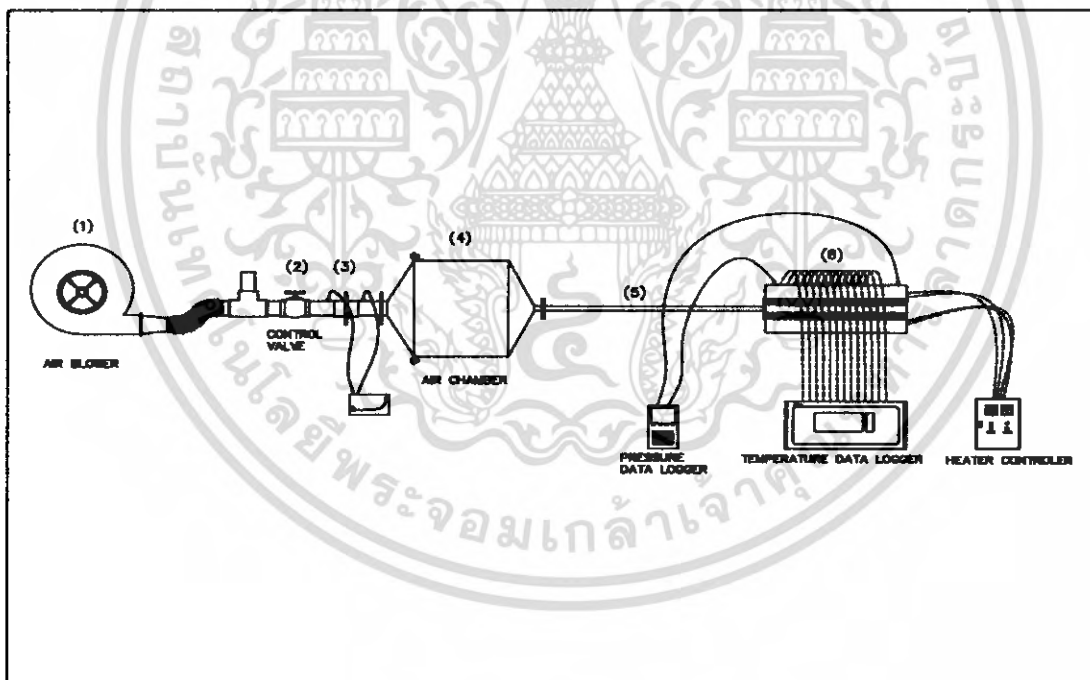
1. พัดลม (Blower) ขนาดพิกัด 1.5 kW
2. มานอมิเตอร์
3. วาล์วควบคุม (Control valve)
4. กล่องลม (Air chamber)
5. ท่อปรับสภาพการไหล
6. เทอร์โมคัปเปิล Type k
7. แผ่นอะลูมิเนียมเจาะรูลักษณะต่างๆ
8. เครื่องให้ความร้อน (Heater)
9. จนวนไขแก้ว
10. เครื่องมือวัดความดันตก (Pressure drop) TESTO 350 M/XL (Pressure data logger)
11. เครื่องมืออ่านค่าอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิล (Temperature data logger)
12. เครื่องมือควบคุมการทำงานของเครื่องให้ความร้อน (Heater controller)
13. เครื่องปรับค่าความเร็วของพัดลม

6.2 การเตรียมชุดอุปกรณ์ทดลอง

1. นำพัดลม (Blower) มาต่อกับอุปกรณ์ควบคุมความเร็วของพัดลม
2. นำท่อลมของพัดลม (Blower) มาต่อเข้ากับชุดวาล์วควบคุมการไหลและออริฟิซ (Orifice) เพื่อใช้ในการวัดอัตราการไหลของของไหล
3. ตรงบริเวณส่วนปลายของท่อควบคุมการไหลต่อเข้ากับกล่องลม (Air chamber)
4. จากกล่องลมต่อไปยังชุดท่อปรับสภาพการไหล

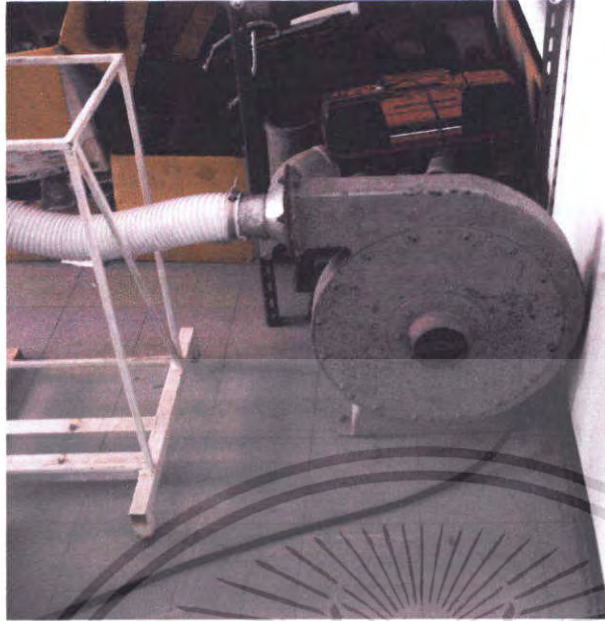
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. จากท่อปรับสภาพการไหลต่อเข้ากับชุดอุปกรณ์ทดลอง
6. ติดตั้งชุดเทอร์โมคัปเปิล Type k เข้ากับแผ่นอะลูมิเนียม
7. ประกอบเครื่องให้ความร้อน (Heater) ทั้งสองด้านของแผ่นอะลูมิเนียม
8. นำฉนวนใยแก้วหุ้ม โคครอบแผ่นอะลูมิเนียมและเครื่องให้ความร้อน (Heater)
9. ต่อเครื่องวัดความดัน (Pressure data logger) เข้ากับชุดทดสอบ
10. นำส่วนปลายของเทอร์โมคัปเปิลต่อเข้ากับเครื่องอ่านค่าอุณหภูมิ (Temperature data logger)
11. ต่อสายไฟของเครื่องให้ความร้อน (Heater) เข้ากับเครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเครื่องให้ความร้อน (Heater)
12. เสียบปลั๊กเครื่องให้ความร้อน (Heater controller)
13. เสียบปลั๊กพัดลม (Blower)
14. เสียบปลั๊กเครื่องวัดค่าแรงดัน (Pressure data logger)



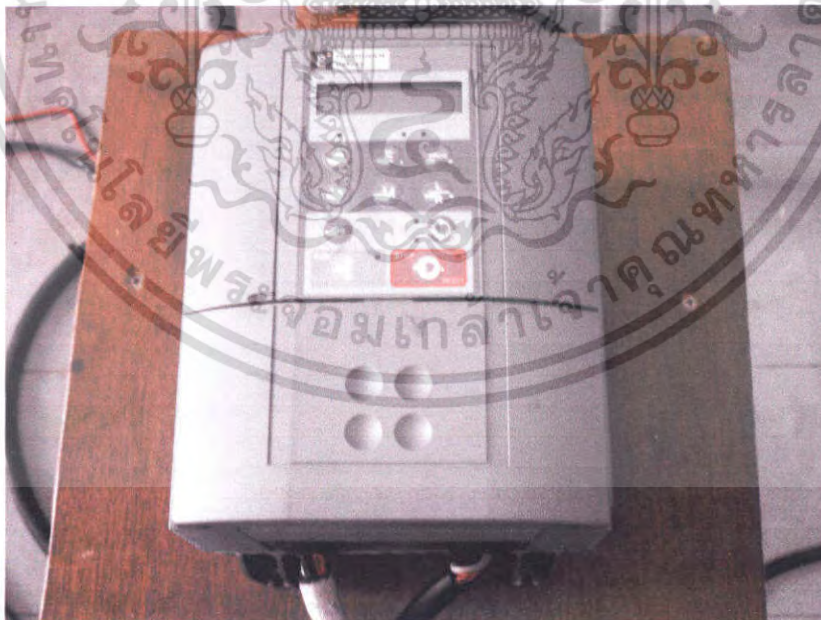
รูปที่ 6.1 แสดงการต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.2 แสดงพัดลม (Blower)

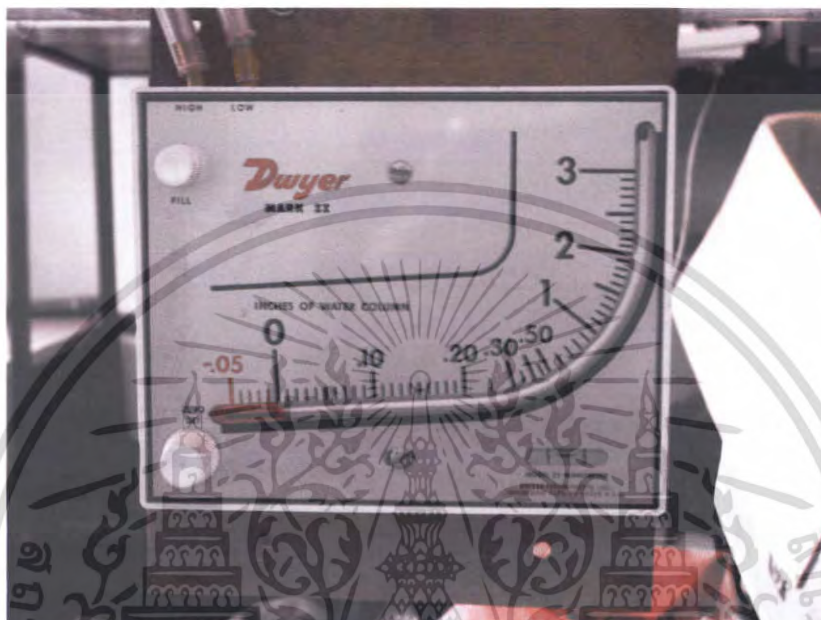
พัดลม (Blower) ขนาดพิกัด 1.5 kW มีหน้าที่ เป็นแหล่งกำเนิดลม ซึ่งควบคุมปริมาณไหลเข้าชิ้นงานทดสอบ โดยการปรับหัววาล์ว โดยความเร็วในการหมุนของพัดลมจะถูกควบคุมโดยเครื่องควบคุมความเร็ว



รูปที่ 6.3 แสดงเครื่องปรับค่าความเร็วของพัดลม (Blower)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องปรับความเร็วของพัดลม (Blower) มีหน้าที่ ความคุมความเร็วในการหมุนของพัดลม (Blower) ให้อยู่ในช่วงที่ต้องการทดสอบ คือมีความเร็วครอบคลุมในช่วงทดสอบตั้งแต่ค่า เรย์โนลด์ นัมเบอร์ตั้งแต่ 4000 – 23000 ซึ่งเป็นการไหลแบบเทอร์บูเลนต์



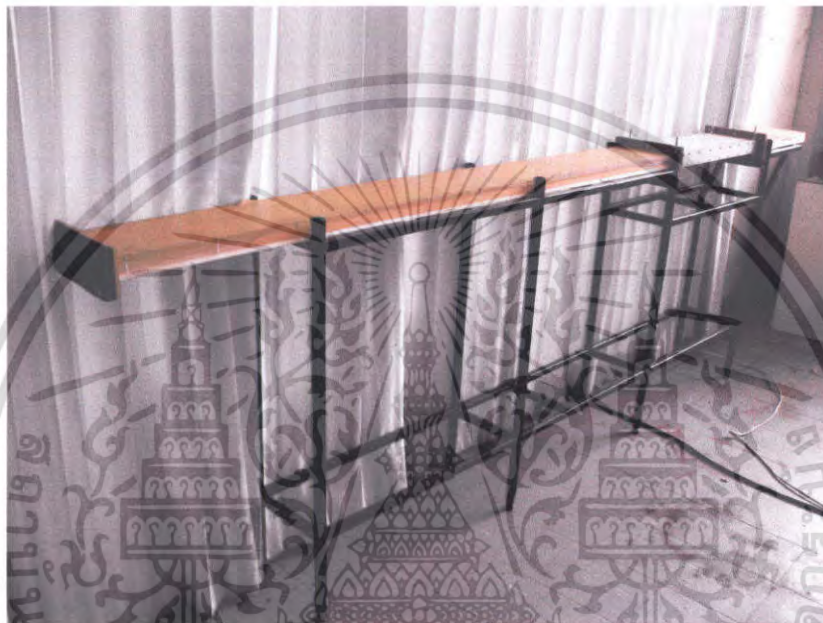
รูปที่ 6.4 แสดงเครื่องมือวัดความดันตกคร่อม หรือมานอมิเตอร์ มานอมิเตอร์ มีหน้าที่ วัดค่าความดันตกคร่อมของชุดทดสอบและเพื่อให้ทราบถึงอัตรา การไหลของของไหลที่ไหลเข้าสู่ชุดทดสอบว่าเป็นการไหลแบบใด



รูปที่ 6.5 แสดงลักษณะของกล่องลม (Air chamber)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

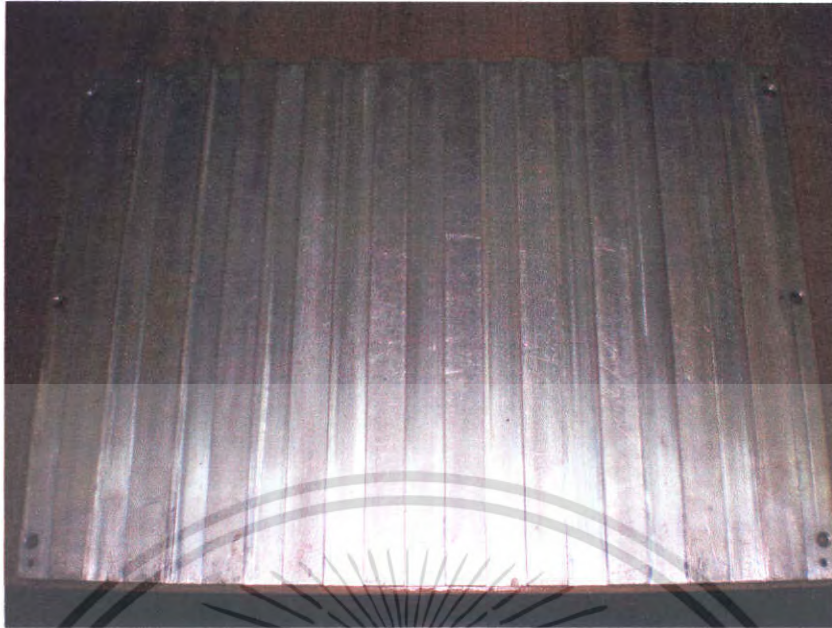
กล่องลม (Air chamber) มีหน้าที่ เมื่ออากาศจากพัดลม (Blower) ถูกดูดและเป่าเข้ามาที่ชุดทดสอบ การไหลของของไหล หรืออากาศที่ไหลเข้าสู่ชุดทดสอบจะไหลแบบไม่คงที่เนื่องจากอากาศที่ถูกดูดเข้ามามีการไหลแบบปั่นป่วน ดังนั้นจึงต้องมีอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ทำให้อากาศที่ปั่นป่วนนั้นมีการไหลราบเรียบมากขึ้นก่อนเข้าสู่ชุดทดสอบเพื่อให้ค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าแม่นยำมากที่สุด โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำให้อากาศที่ไหลเข้าสู่ชุดทดสอบมีการไหลแบบราบเรียบก็คือกล่องลม (Air chamber)



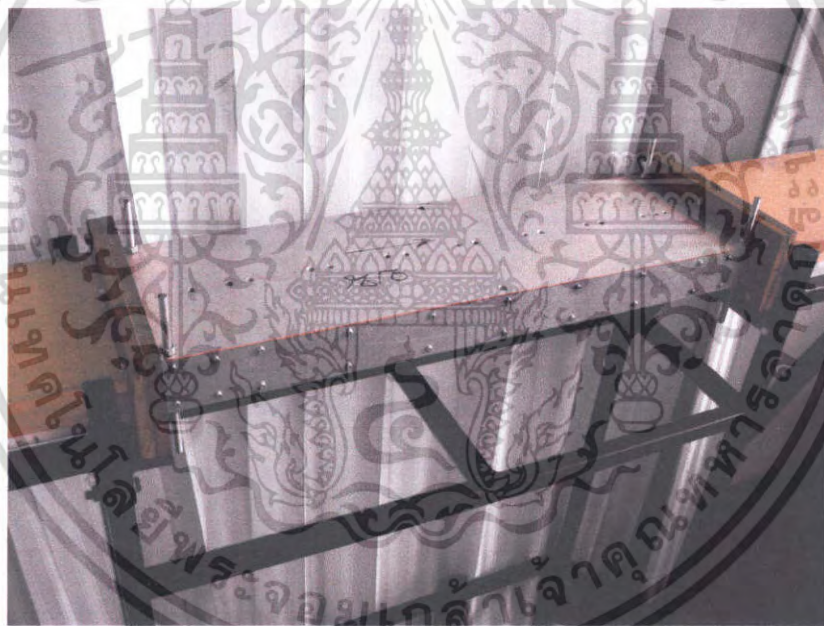
รูปที่ 6.6 แสดงลักษณะของท่อปรับสภาพการไหล

ท่อปรับสภาพการไหล มีหน้าที่ เนื่องจากการไหลของอากาศที่ออกมาจากพัดลม (Blower) เป็นการไหลแบบปั่นป่วนแต่มีกล่องลมเป็นตัวปรับสภาพการไหลให้ราบเรียบมากยิ่งขึ้น แต่ของไหลที่ไหลออกมาจากกล่องลมจะมีการไหลที่ยังไม่เต็มพื้นที่ของชุดทดสอบ อาจทำให้ค่าที่ได้จากการทดลองเกิดความผิดพลาดได้ ดังนั้นการที่จะทำให้อากาศที่ไหลออกมาจากกล่องลมเป็นการไหลแบบเต็มพื้นที่ (Fully development) จึงต้องมีการออกแบบระยะทางก่อนที่จะเข้าอุปกรณ์ทดสอบเพื่อให้การไหลเป็นแบบ เต็มพื้นที่ (Fully development) โดยสูตรที่ใช้ในการคำนวณหาความยาวของท่อปรับสภาพการไหลดูได้จากบทที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

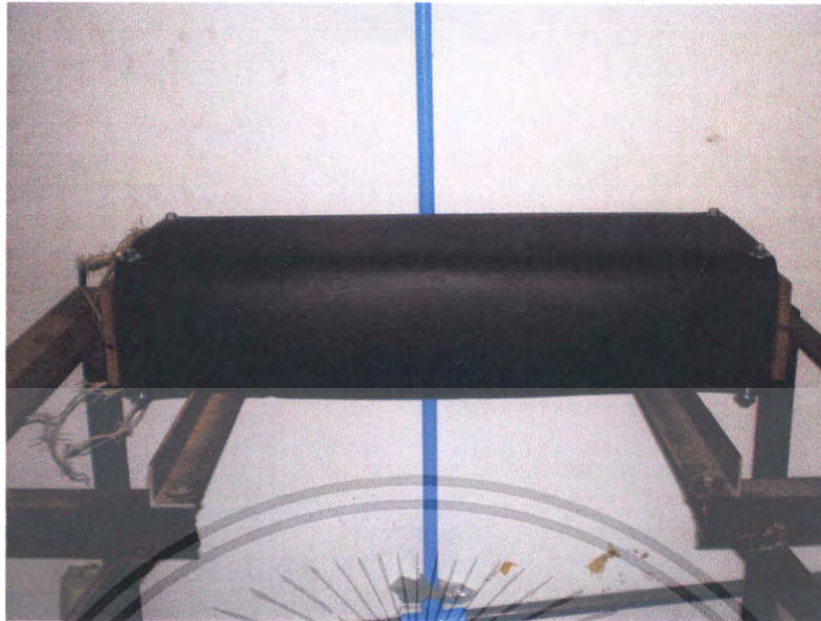


รูปที่ 6.7 แสดงลักษณะของแผ่นอะลูมิเนียมเจาะร่อง

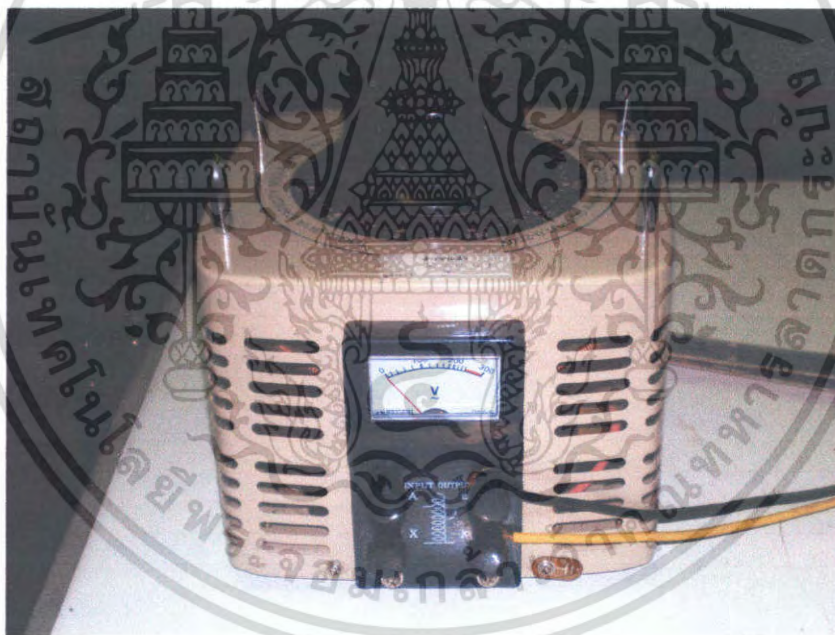


รูปที่ 6.8 แสดงลักษณะของแผ่นอะลูมิเนียมเมื่อนำมาประกอบกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.9 แสดงลักษณะของชุดทดสอบเมื่อนำจนวนโยแก้วมาหุ้ม



รูปที่ 6.10 แสดงเครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับ Heater

เครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้า (Heater controller) มีหน้าที่ ควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่จะจ่ายให้กับเครื่องให้ความร้อนชุดทดสอบ (Heater) เพื่อปรับค่าอุณหภูมิของชุดทดสอบให้อยู่ในค่าที่ต้องการในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.11 แสดงเครื่องอ่านค่าอุณหภูมิ (Temperature data logger)

เครื่องอ่านค่าอุณหภูมิ (Temperature data logger) มีหน้าที่ อ่านค่าอุณหภูมิที่เทอร์โมคัปเปิลได้รับความร้อนจากชุดทดสอบแล้วแสดงค่าอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ บนชุดทดสอบ ออกมีหน้าจอแสดงผล เพื่อนำค่าอุณหภูมิที่ได้ไปใช้ในการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของแผ่นอะลูมิเนียมเซาะร่องต่อไป

6.3 ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการเปิดเครื่องควบคุมความเร็วของพัดลม แล้วปรับค่าความเร็วของพัดลมโดยสังเกตได้จากค่าความดันตกคร่อมที่ มานอมิเตอร์ โดยเริ่มต้นตั้งแต่ 0.4 นิ้วน้ำ จนถึง 3.0 นิ้วน้ำ เพื่อให้ค่าการไหลของของไหลครอบคลุมในช่วงที่ต้องการศึกษา คือค่า เรย์โนลด์ นัมเบอร์ ตั้งแต่ 4000 ถึง 23000 ซึ่งเป็นการไหลแบบเทอร์บูเลนต์
2. ในช่วงต่อมาเมื่อทำการปรับค่าความดันตกคร่อมในช่วงแรกคือ 0.4 นิ้วน้ำ แล้วก็ทำการจับเวลาประมาณ 5 นาที เพื่อหาค่าความดันตกคร่อมชุดทดสอบ หรือแผ่นอะลูมิเนียม เพื่อใช้ค่าความดันตกคร่อมไปคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่อไป ทำเช่นเดิมไปเรื่อยๆ โดยการเพิ่มความดันตกคร่อมที่มานอมิเตอร์ทีละ 0.2 นิ้วน้ำ จนกว่าจะถึงค่าความดันตกคร่อม 3.0 นิ้วน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ ในขณะที่ทำการวัดค่าความดันตกคร่อมชุดทดสอบไม่ควรที่จะเปิดเครื่องให้ความร้อน เพราะอากาศที่ไหลผ่านชุดทดสอบจะเกิดการขยายตัว จะทำให้ค่าที่วัดได้มีความผิดพลาด ควรจะทำการวัดค่าความดันตกคร่อมที่อุณหภูมิห้อง

3. เมื่อทำการวัดค่าความดันตกคร่อมชุดทดสอบเสร็จแล้ว ก็ทำการเปิดเครื่องอ่านค่าอุณหภูมิ (Temperature data logger) แล้วเปิดเครื่องควบคุมเครื่องให้ความร้อนโดยปรับแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงประมาณ 120 - 180 V

4. ทำการปรับความเร็วของพัดลม (Blower) ให้อยู่ในช่วงความดันตกคร่อมที่มานอมิเตอร์ 0.4 นิ้วน้ำ อีกครั้งแล้วสังเกตที่เครื่องอ่านค่าอุณหภูมิ (Temperature data logger) โดยสังเกตการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในแต่ละจุดของแผ่นอะลูมิเนียม รอจนกว่าค่าอุณหภูมิทุกจุดบนแผ่นทดสอบนิ่ง แล้วทำการบันทึกค่า ทำเช่นเดิมไปเรื่อยๆ จนกว่าจะถึง 3.0 นิ้วน้ำ

หมายเหตุ ในการอ่านค่าอุณหภูมิแต่ละจุดของเทอร์โมคัปเปิล ควรรอจนกว่าค่าอุณหภูมินิ่งหรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ แล้วจึงบันทึกค่า (การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลในชุดทดสอบจะมีการติดตั้งทั้งหมด 12 จุด คือที่บริเวณทางเข้า 1 จุด ทางออกของชุดทดสอบอีก 1 จุด และบริเวณผิวของแผ่นอะลูมิเนียมอีก 10 จุด)

5. เมื่อทำงานครบทุกค่าการไหลของของไหลแล้ว หรือ ตั้งแต่ความดันตกคร่อม 0.4 นิ้วน้ำ จนถึง 3.0 นิ้วน้ำแล้ว ก็ทำการเปลี่ยนชุดทดสอบใหม่แล้วทำเช่นเดิม ตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1 - 4 แล้วจดบันทึกผลการทดลอง

หมายเหตุ ชุดทดลองหรือลักษณะการจัดวางแผ่นอะลูมิเนียมที่ทำการทดสอบทั้งหมดมี 14 ลักษณะแล้วค่าที่ได้จากการทดลองและคำนวณในแต่ละลักษณะจะถูกนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเพื่อหาแบบการจัดวางแผ่นอะลูมิเนียมที่ดีที่สุด

6. นำค่าที่ได้จากการทดลองทั้งหมดไปคำนวณ ตามสูตรต่างๆ ใน บทที่ 5

7. นำค่าที่ได้จากการทดลองไปพล็อตกราฟ แล้ววิเคราะห์ผลที่ได้ว่าเป็นอย่างไร ลักษณะการจัดวางแผ่นอะลูมิเนียมแบบไหนเป็นแบบที่มีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนดีที่สุด และความดันตกคร่อมน้อยที่สุดหรือสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานน้อยที่สุด

6.4 ตัวอย่างการคำนวณ

ในการทดลองนี้จะทำการศึกษาค่าประสิทธิภาพการพาความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเซาะร่องดังนั้นตัวประกอบต่างๆ ที่ต้องการศึกษาและทำการคำนวณจึงมีดังต่อไปนี้

หาค่าอัตราการไหลของของไหลที่ไหลเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้จากสมการที่ (5.4) คือสมการ โดยอ้างอิงที่อุณหภูมิทางออกบวททางเข้าแล้วหารสอง หรือ T_b เท่ากับ 10 องศาเซลเซียส หรือประมาณ 283.15 K

$$\dot{m} = \rho u_m A_c$$

เมื่อค่า	\dot{m}	=	อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ, kg/s
	A_c	=	พื้นที่หน้าตัดของท่อ, m^2
	ρ	=	ความหนาแน่นของของไหล, kg/m^3
	u_m	=	ความเร็วเฉลี่ยของของไหล, m/s

โดยค่า ρ หาได้จากการตารางอุณหภูมิ (T_b ไปเปิดตารางภาคผนวก ข ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.1274 kg/m^3)

u_m หาได้จากการทดลองหาค่าความเร็วเฉลี่ยโดยใช้เครื่องมือวัดความเร็วลมแบบ Hot wire โดยวัดเฉลี่ย 6 จุด แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย ซึ่งมีค่าเท่ากับ 9.12 m/s

A_c หาได้จากกาเอาขนาดความกว้างของท่อปรับสภาพการไหลคูณด้วยความสูงของท่อปรับสภาพการไหล ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.1176 m^2

นำค่าทั้งหมดแทนในสมการที่ (5.4) ได้

$$\begin{aligned} \dot{m} &= 1.1274 \times 9.12 \times 0.1176 \\ &= 0.04113 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

หาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic diameter) ได้จาก สมการที่ (5.16) ได้

$$D_h = \frac{4A_c}{P} \quad \text{เมื่อค่า } D_h = \text{เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก(Hydraulic diameter),m}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A_c = \text{พื้นที่หน้าตัดของท่อ, } m^2$$

$$P = \text{เส้นรอบรูป, } m$$

โดยค่า A_c หาได้จากกาเอาขนาดความกว้างของท่อปรับสภาพการไหลคูณด้วยความสูงของท่อปรับสภาพการไหล ซึ่งมีค่าเท่ากับ $0.1176 m^2$

P หาได้จากการนำเอาสองคูณกับความกว้างของช่องปรับสภาพลมบวกกับความสูงของช่องปรับสภาพลม ซึ่งมีค่าเท่ากับ $2(0.2+0.02)$

นำค่าทั้งหมดแทนในสมการที่ (5.16) ได้

$$D_h = \frac{4(0.2)(0.02)}{2(0.2+0.02)}$$

$$= 0.03636 m$$

หาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนได้จากสมการที่ (5.15) ได้

$$h = \frac{mc_p(T_o - T_i)}{A_s(T_w - T_b)}$$

เมื่อค่า

h = ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน, $W/m^2 \cdot K$

m = อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ, kg/s

C_p = ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ, $kJ/kg \cdot K$

T_i = อุณหภูมิอากาศด้านขาเข้า, $^{\circ}C$

T_o = อุณหภูมิอากาศด้านขาออก, $^{\circ}C$

T_w = อุณหภูมิผิวเฉลี่ยผนังร้อน, $^{\circ}C$

T_b = อุณหภูมิของไหลเฉลี่ย, $(T_i + T_o)/2$, $^{\circ}C$

โดยค่า m หาได้จากสมการที่ (5.4) มีค่าเท่ากับ $0.04113 kg/s$

C_p หาได้จากการนำค่าอุณหภูมิ T_b ไปเปิดหาค่าที่ตารางอุณหภูมิภาคผนวก ข ซึ่งมีค่าเท่ากับ $1.007408 kJ/kg \cdot K$

T_p, T_o หาได้จากการทดลองโดยอ่านค่าจากเครื่องอ่านค่าอุณหภูมิ (Temperature data logger) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $(T_o - T_i)$ เท่ากับ 10 องศาเซลเซียส

T_w หาได้จากการ อ่านค่า อุณหภูมิผิวทั้ง 10 จุดบนแผ่นอะลูมิเนียม โดยใช้เครื่องอ่านค่าอุณหภูมิ (Temperature data logger) แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยได้ 77.82 องศาเซลเซียส

แทนค่าทั้งหมดในสมการ (5.15) ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$h = \frac{0.04113 \times 1.007408 \times 10}{0.1176 \times 67.82}$$

$$= 51.951 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

หาค่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Nusselt Number) ได้จากสมการ (5.14) ได้

$$Nu_D = \frac{hD_h}{k}$$

เมื่อค่า Nu_D = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน
 k = สัมประสิทธิ์การนำความร้อนอากาศ; W/mK
 D_h = เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic diameter), m

โดยค่า k หาได้จากตารางภาคผนวก ข โดยการเอาอุณหภูมิ T_b อ้างอิง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.02705 W/mK
 D_h หาได้จากสมการ (5.16) มีค่าเท่ากับ 0.03636 m

แทนค่า ทั้งหมดในสมการได้

$$Nu_D = \frac{51.951 \times 0.03636}{0.02705}$$

$$= 69.826$$

หาค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ได้จากสมการที่ (5.1) ได้

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

เมื่อค่า Re = ค่าตัวเลขเรย์โนลด์
 μ = ค่าความหนืดพลวัตของอากาศ (kg/m.s)
 ρ = ความหนาแน่นของของไหล, kg/m^3
 D_h = เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic diameter), m .
 V = ความเร็วเฉลี่ยของของไหล, m/s

โดยที่ μ หาได้จากตารางภาคผนวก ข ซึ่งมีค่าเท่ากับ $1.9 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ρ หาได้จากตารางภาคผนวก ข ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.1274 kg/m^3
 D_h หาได้จากสมการที่ (5.16) มีค่าเท่ากับ 0.03636 m
 V หาได้จากการทดลองหาค่าความเร็วเฉลี่ยโดยใช้เครื่องมือวัดความเร็วลมแบบ Hot wide โดยวัดเฉลี่ย 6 จุด แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย ซึ่งมีค่าเท่ากับ 9.12 m/s

แทนค่าทั้งหมดลงในสมการที่ (5.1) ได้

$$Re = \frac{1.12745 \times 9.12 \times 0.03636}{1.9 \times 10^{-5}}$$

$$= 19677.159$$

หาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ได้จากสมการที่ (5.13) ได้

$$f = \frac{2D_h \Delta P}{L \rho \bar{V}^2}$$

เมื่อค่า

Δp = ความดันตกคร่อมของของไหล, N/m^2

f = สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

ρ = ความหนาแน่นของของไหล, kg/m^3

L = ความยาวท่อ, m

\bar{V} = ความเร็วเฉลี่ยของของไหล, m/s

D_h = เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic diameter), m

โดยที่

Δp หาได้จากการอ่านค่าจากเครื่องวัดแรงดันตกคร่อม (Pressure drop) TESTO 350

M/XL (Pressure data logger) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 36.7875 N/m^2

ρ หาได้จากตารางภาคผนวก ข ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.1274 kg/m^3

V หาได้จากการทดลองหาค่าความเร็วเฉลี่ยโดยใช้เครื่องมือวัดความเร็วลมแบบ Hot wide โดยวัดเฉลี่ย 6 จุด แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย ซึ่งมีค่าเท่ากับ 9.12 m/s

D_h หาได้จากสมการที่ (5.16) มีค่าเท่ากับ 0.03636 m

L มีค่าเท่ากับ 0.65 m

แทนค่าทั้งหมดในสมการ (5.13) ได้

$$f = \frac{2 \times 0.03636 \times 36.7875}{0.65 \times 1.12745 \times (9.12)^2}$$

$$= 0.042733$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

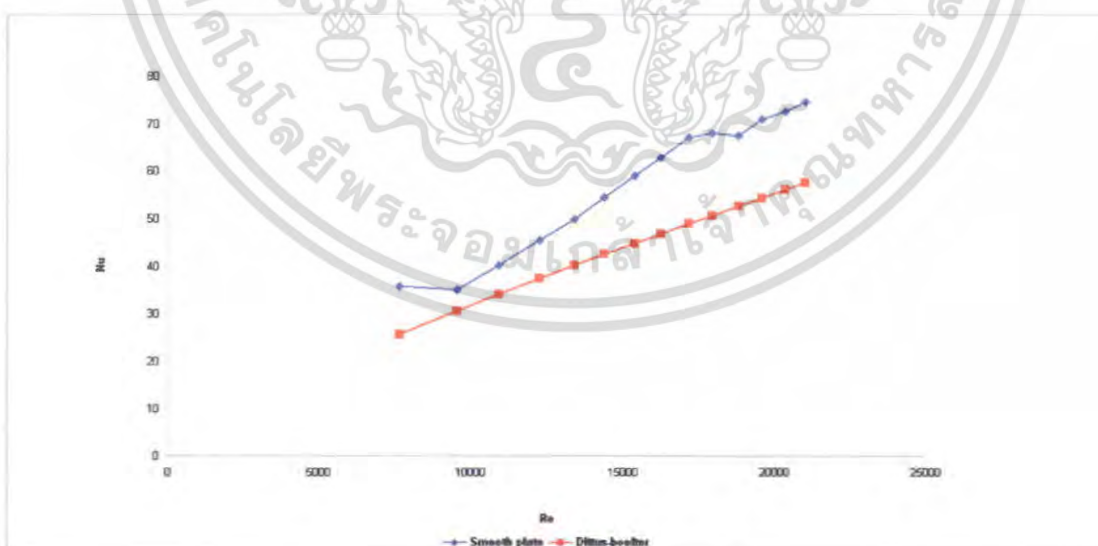
ผลการทดลองและการวิเคราะห์

จากผลการทดลองที่ได้ นำค่าต่างๆ มาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ต่าง เพื่อวิเคราะห์ผลที่ออกมาว่าจากการทดลองเกิดอะไรขึ้น ซึ่งผลที่ได้ได้ทำการทดลองหลาย ๆ ครั้งเพื่อให้ได้ค่าผิดพลาดน้อยที่สุด จากการทดลองเรานำค่าที่ผิดพลาดน้อยที่สุดมาทำการวิเคราะห์ โดยกราฟที่ได้มีดังต่อไปนี้

7.1 ผลการทดลองแบบแผ่นเรียบ

7.1.1 ค่าตัวเลขนัสเซิลท์ นัมเบอร์ (Nusselt number)

ในรูปที่ 7.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขนัสเซิลท์ นัมเบอร์ กับค่าเรโนลด์ นัมเบอร์ กรณีท่อมีผนังเรียบ จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบเทอร์บูเลนซ์ค่าเรโนลด์ นัมเบอร์เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าตัวเลขนัสเซิลท์ นัมเบอร์เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบค่าตัวเลขนัสเซิลท์ นัมเบอร์จากการทดลอง และค่าตัวเลขนัสเซิลท์ นัมเบอร์ทางทฤษฎี (Dittus-Boelter correlation) พบว่า ในช่วงการไหลแบบเทอร์บูเลนซ์ค่าตัวเลขนัสเซิลท์ นัมเบอร์จากการทดลองมีค่ามากกว่าค่าตัวเลขนัสเซิลท์ นัมเบอร์จากทางทฤษฎี โดยค่าตัวเลขนัสเซิลท์ นัมเบอร์ จากการทดลองมีค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 19 % เมื่อเทียบกับ Dittus-Boelter correlation

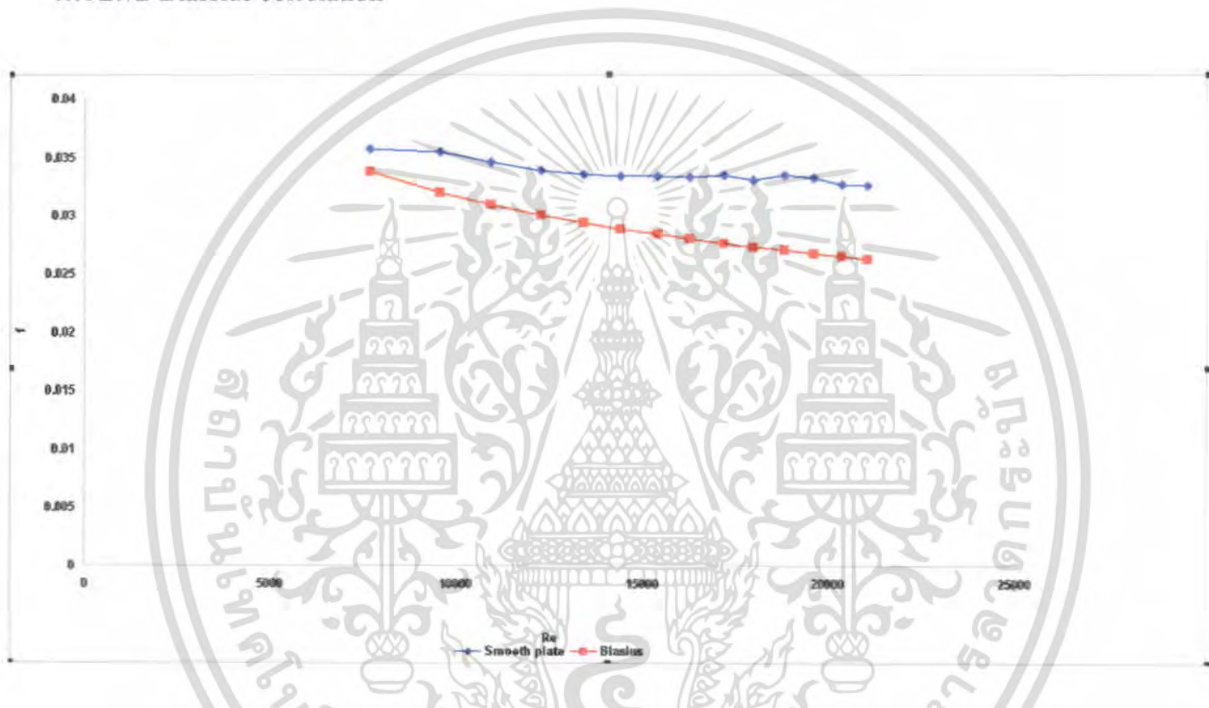


รูปที่ 7.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขนัสเซิลท์ นัมเบอร์ (Nu) และค่าเรโนลด์ นัมเบอร์ (Re) กรณีท่อมีผนังเรียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.1.2 ค่าตัวประกอบเสียดทาน (Friction factor)

ในรูปที่ 7.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทาน (f) กับค่าเรโนลด์ นัมเบอร์ (Re) กรณีท่อมีผนังเรียบ จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบเทอร์บูเลนต์ค่าตัวประกอบเสียดทานลดลงเล็กน้อยเมื่อค่าเรโนลด์ นัมเบอร์เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบค่าตัวประกอบเสียดทานจากการทดลอง และค่าตัวประกอบเสียดทานจากทางทฤษฎี (Blassius correlation) พบว่าในช่วงการไหลแบบเทอร์บูเลนต์ค่าตัวประกอบเสียดทานจากการทดลองมีค่ามากกว่าค่าตัวประกอบเสียดทานจากทางทฤษฎี โดยค่าตัวประกอบเสียดทานจากการทดลองมีค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยประมาณ 15 % เมื่อเทียบกับ Blassius correlation

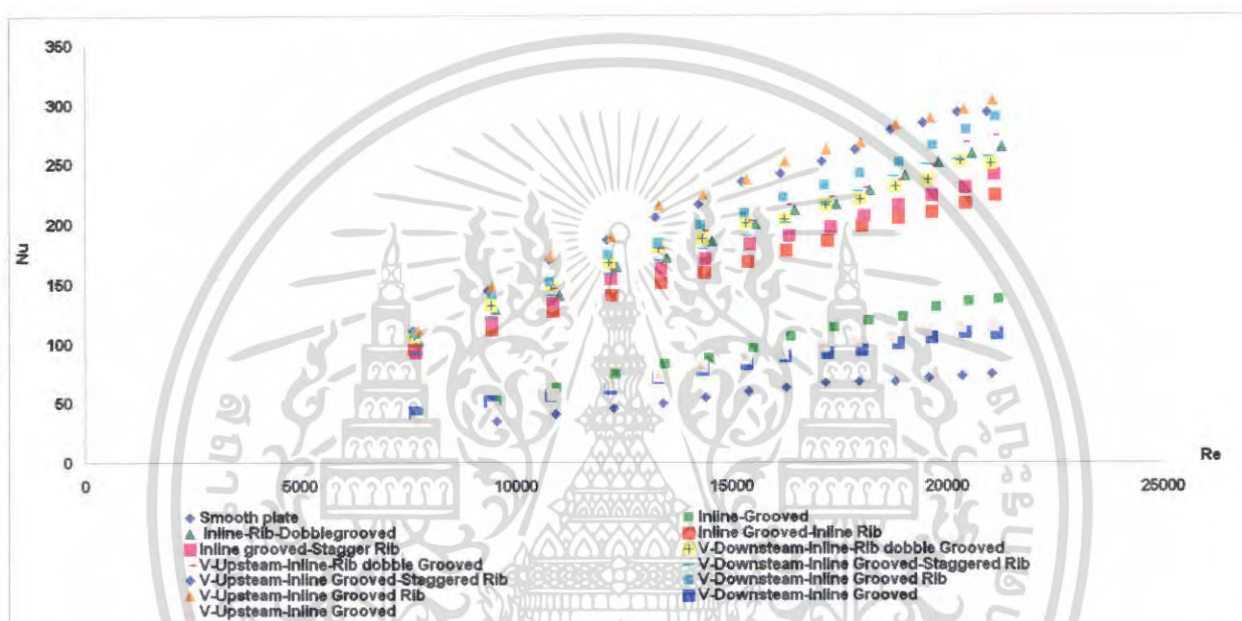


รูปที่ 7.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทาน (f) กับค่าเรโนลด์ นัมเบอร์ (Re)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.2 อธิทธิพลรูปร่างร่อง

ในรูปที่ 7.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขไรต์ นัมเบอร์ กับค่าเรโนลด์ นัมเบอร์ กรณีท่อที่มีร่องลักษณะต่าง ๆ จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบเทอร์บูเลนต์ เมื่อค่าเรโนลด์ นัมเบอร์เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าตัวเลขไรต์ นัมเบอร์เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน โดยชุดการทดลองแบบเซาะร่องที่มีการเสริมครีบบจะมีค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าชุดการทดลองที่ไม่มีการเสริมครีบ

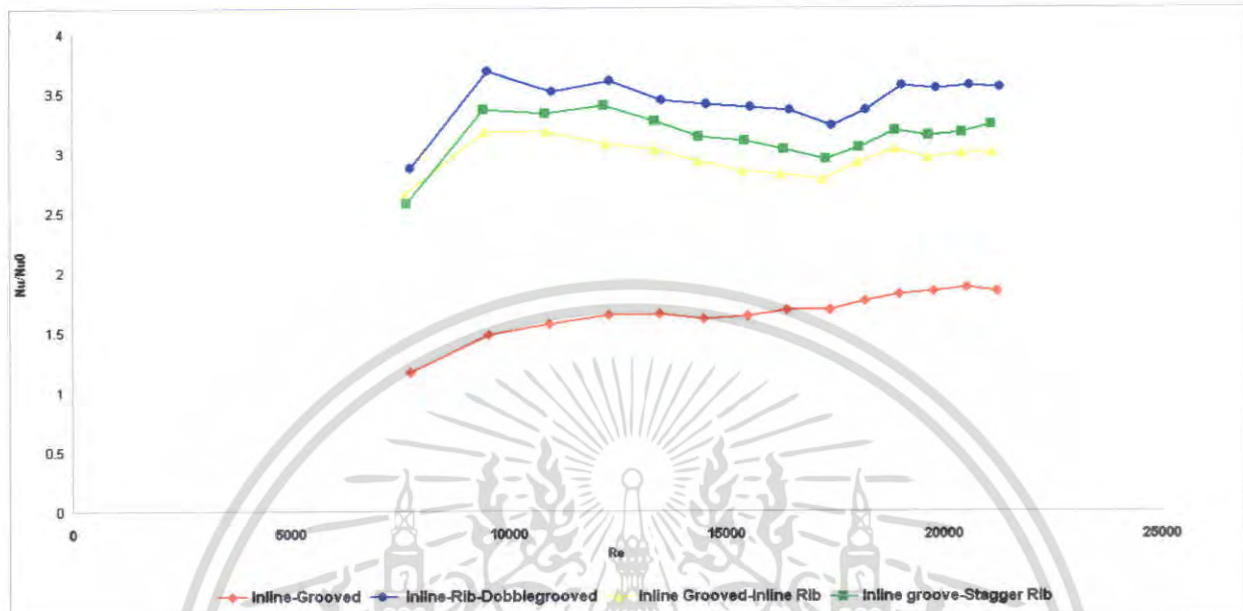


รูปที่ 7.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขไรต์ นัมเบอร์ กับค่าเรโนลด์ นัมเบอร์ กรณีท่อที่มีร่องลักษณะต่าง ๆ

ในรูปที่ 7.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวเลขไรต์ นัมเบอร์ต่อตัวเลขไรต์ นัมเบอร์ ของท่อที่มีผนังเรียบกับค่าเรโนลด์ นัมเบอร์ กรณีท่อที่มีร่องตรงลักษณะต่าง ๆ และมีการติดครีบแบบวางตรงกันและแบบวางเอียงกันพบว่าเมื่อค่าเรโนลด์ นัมเบอร์เพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราส่วนตัวเลขไรต์ นัมเบอร์ต่อตัวเลขไรต์ นัมเบอร์ของท่อที่มีผนังเรียบเพิ่มขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน โดยจากกราฟจะพบว่าการเซาะร่องตรงเสริมครีบ (Inline rib double groove) มีค่าตัวเลขไรต์ นัมเบอร์เฉลี่ยมากกว่าแผ่นเรียบ 2.85 ถึง 3.54 เท่าของแผ่นเรียบ และการเซาะร่องแบบร่องตรงเสริมครีบวางเอียง (Inline groove stagger rib) มีค่านัมเบอร์เฉลี่ยมากกว่าแผ่นเรียบ 2.50 ถึง 3.40 เท่า แบบเซาะร่องตรงเสริมครีบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

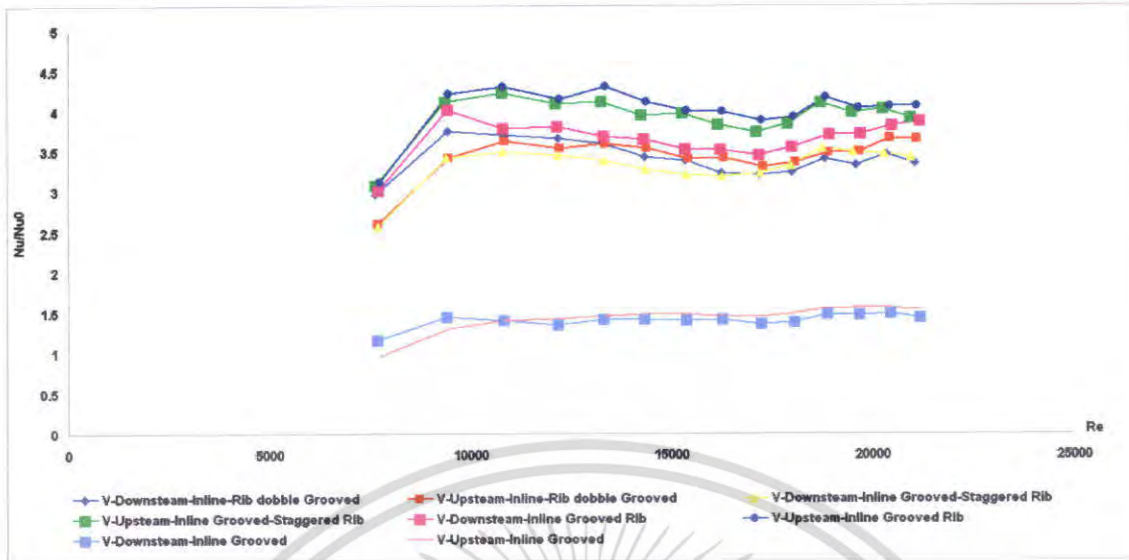
(Inline groove inline rib) มีค่านัมเบอร์เฉลี่ยมากกว่าแผ่นเรียบ 2.60 ถึง 3.10 เท่า แบบร่องตรง (Inline groove) มีค่านัมเบอร์เฉลี่ยมากกว่าแผ่นเรียบ 1.16 ถึง 1.86 เท่า



รูปที่ 7.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนนัสเซิลท์ นัมเบอร์ต่อนัสเซิลท์ นัมเบอร์ของท่อที่มีผนังเรียบกับค่าเร โนลด์ นัมเบอร์ กรณีท่อมีร่องตรงลักษณะต่าง ๆ

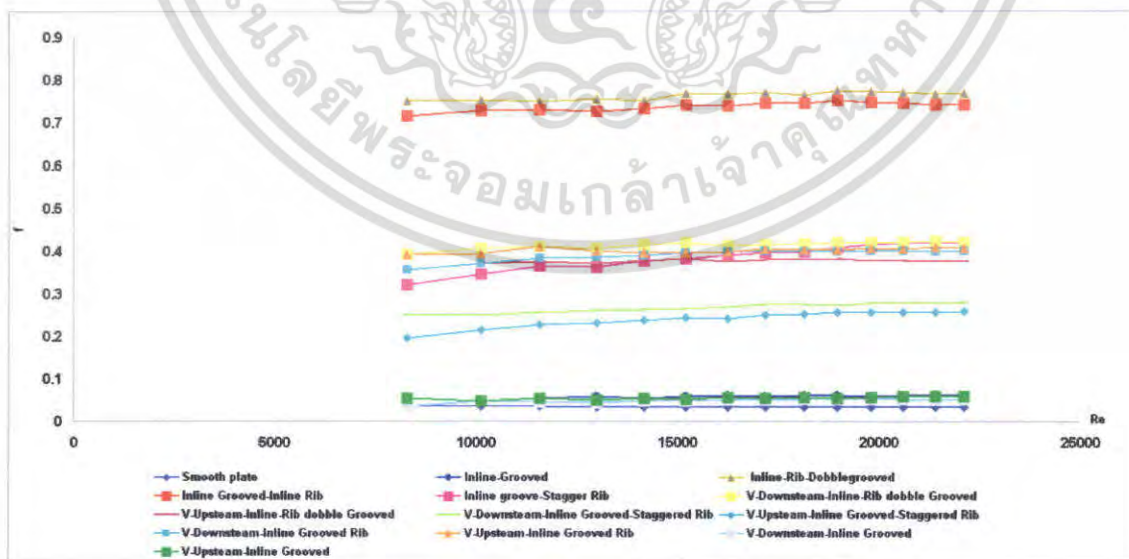
ในรูปที่ 7.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนนัสเซิลท์ นัมเบอร์ต่อนัสเซิลท์ นัมเบอร์ของท่อที่มีผนังเรียบกับค่าเร โนลด์ นัมเบอร์ กรณีท่อมีร่องรูปตัววีลักษณะต่าง ๆ และมีการติดครีบบางแบบวางตรงกันและแบบวางเอียงกันพบว่าเมื่อค่าเร โนลด์ นัมเบอร์เพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราส่วนนัสเซิลท์ นัมเบอร์ต่อนัสเซิลท์ นัมเบอร์ของท่อที่มีผนังเรียบเพิ่มขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน โดยจากกราฟจะพบว่าการเจาะร่องตัววีเสริมครีบบางยอนสร (V upstream inline groove rib) มีค่านัสเซิลท์ นัมเบอร์เฉลี่ยมากกว่าแผ่นเรียบ 3.12 ถึง 4.31 เท่า แบบเจาะร่องตัววีเสริมครีบบางยอนสร (V upstream inline groove stagger rib) มีค่านัสเซิลท์ นัมเบอร์เฉลี่ยมากกว่าแผ่นเรียบ 3.08 ถึง 4.03 เท่า แบบเจาะร่องตัววีเสริมครีบบางตามสร (V downstream inline groove rib) มีค่านัสเซิลท์ นัมเบอร์เฉลี่ยมากกว่าแผ่นเรียบ 3.01 ถึง 4.02 เท่า ส่วนค่านัสเซิลท์ นัมเบอร์ต่อนัสเซิลท์ นัมเบอร์แผ่นเรียบสำหรับร่องตัววีที่มีค่าต่ำสุดคือแบบเจาะร่องตัววีตามสร (V downstream inline groove) มีค่านัสเซิลท์ นัมเบอร์เฉลี่ยมากกว่าแผ่นเรียบ 1.16 ถึง 1.45 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนนัสเซลท์ นัมเบอร์ต่อนัสเซลท์ นัมเบอร์ของท่อที่มีผนังเรียบกับค่าเร โนลด์ นัมเบอร์ กรณีท่อมีร่องรูปตัววีลักษณะต่าง ๆ

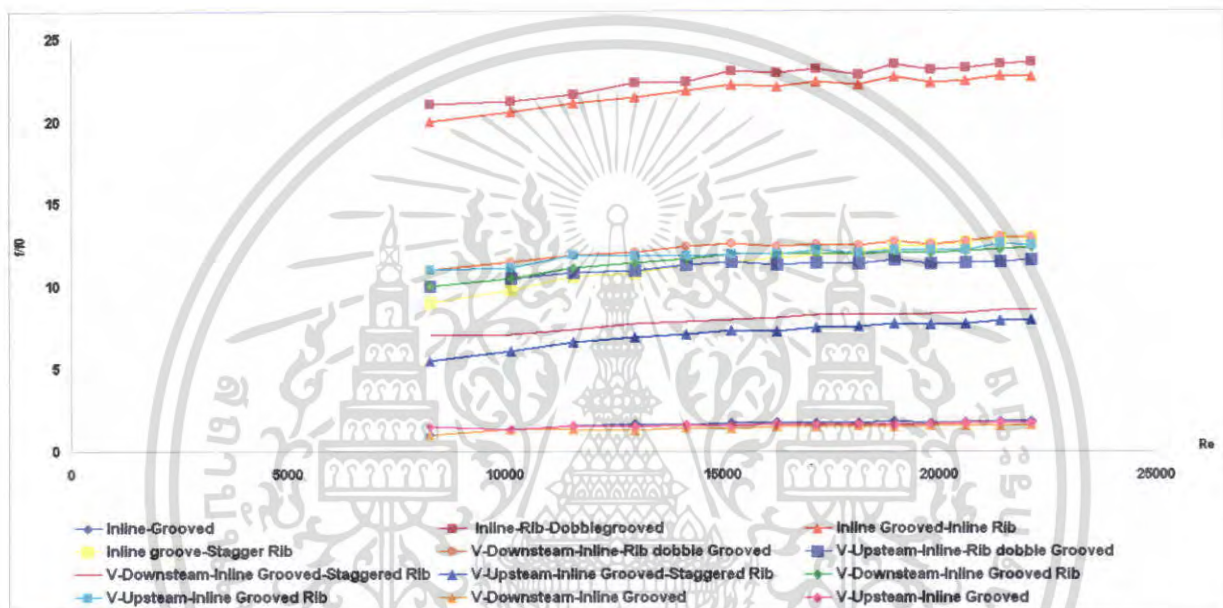
ในรูปที่ 7.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานกับเร โนลด์ นัมเบอร์ กรณีท่อมีร่องลักษณะต่าง ๆ เมื่อได้มีการคิดครีบบางแนวเดียวกันและแนวเอียงกันจากกราฟจะทำให้ทราบว่าชุดการทดลองแบบเซาะร่องที่ไม่มีการเสริมครีบบจะมีค่าตัวประกอบเสียดทานน้อยกว่าชุดทดลองที่มีการเสริมครีบบ และชุดการทดลองแบบเสริมครีบบเอียงจะมีตัวประกอบเสียดทานน้อยกว่าชุดการทดลองแบบเสริมครีบบางแนวเดียวกัน และร่องวีมีตัวประกอบเสียดทานน้อยกว่าร่องตรง



รูปที่ 7.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานกับเร โนลด์ นัมเบอร์ กรณีท่อมีร่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานลักษณะต่าง ๆ เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 7.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อที่มีผนังเรียบกับค่าเรโนลด์ นัมเบอร์ กรณีท่อที่มีร่องลักษณะต่าง ๆ จากการทดลองพบว่า การเซาะร่องแบบร่องตรงเสริมครีบบ (Inline rib double groove) เป็นแบบที่มีค่าตัวประกอบเสียดทานมากที่สุด โดยมีค่าตัวประกอบเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าแผ่นเรียบ 21.00 ถึง 23.53 เท่า และแบบที่มีค่าตัวประกอบเสียดทานน้อยที่สุดคือแบบเซาะร่องตัววีตามศร (V downstream inline groove) โดยมีค่าตัวประกอบเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าแผ่นเรียบ 1.00 ถึง 1.61 เท่า

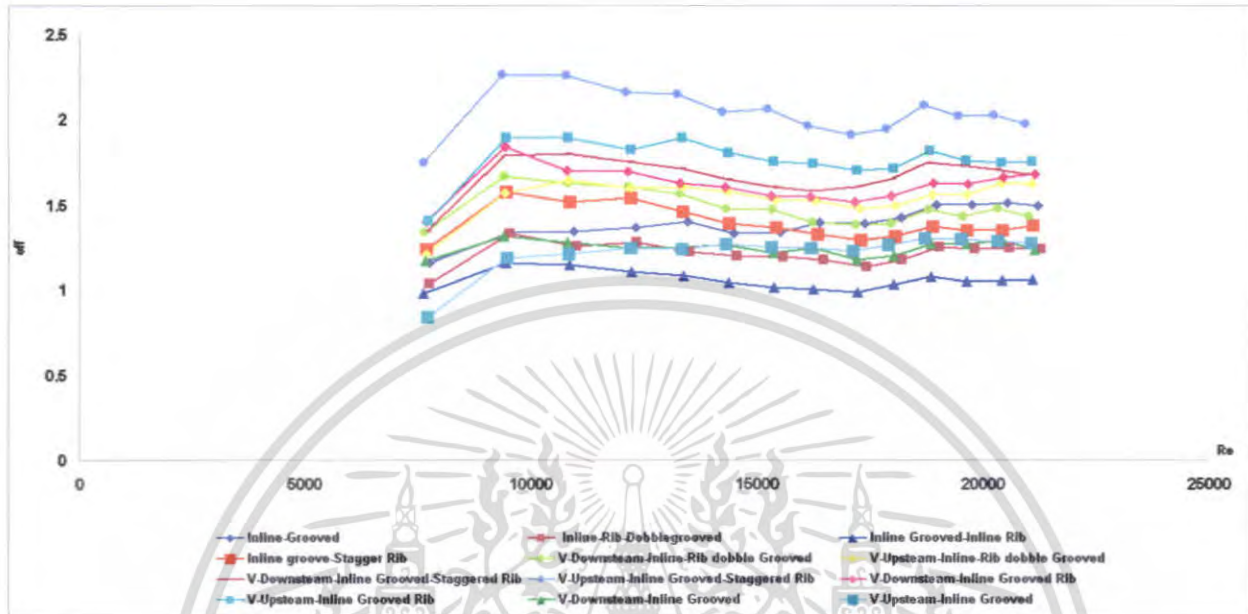


รูปที่ 7.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อที่มีผนังเรียบกับค่าเรโนลด์ นัมเบอร์ กรณีท่อที่มีร่องลักษณะต่าง ๆ

ในรูปที่ 7.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนกับค่าเรโนลด์ นัมเบอร์ กรณีท่อที่มีร่องลักษณะต่าง ๆ เมื่อติดครีบบแบบแนวเดียวกันและแนวเอียงกัน จากการทดลองพบว่า การไหลแบบเทอร์บูเลนต์ ทำให้ทราบว่าเมื่อค่าเรโนลด์ นัมเบอร์เพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยจากกราฟทำให้ทราบว่า การเซาะร่องแบบตัววีเสริมครีบบวางเอียงทิศทางขึ้นศร (V upstream inline groove stagger rib) มีค่าประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด โดยมีค่าประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 1.74 ถึง 2.26 เท่า สำหรับค่าประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนน้อยที่สุด จะเป็นแบบร่องตรงเสริมครีบบ (Inline groove

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

inline rib) โดยมีค่าประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 0.97 ถึง 1.15 เท่า



รูปที่ 7.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนกับค่าเรโนลด์ นัมเบอร์ กรณีที่มีร่องลักษณะต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 8

สรุปผลการทดลอง

8.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองชุดแรกเปลี่ยนความร้อนช่องขนานแบบเจาะร่องพบว่า ร่องภายในช่องขนานสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้เพิ่มสูงขึ้นได้ โดยการเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะขึ้นอยู่กับ รูปแบบการไหลของอากาศภายในช่องขนาน โดยการไหลแบบปั่นป่วนจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Nu) มีค่าสูงขึ้น รวมถึงการจัดรูปแบบการเจาะร่องภายในช่องขนาน โดยแผ่นเจาะร่องรูปตัววีจะมีแนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Nu) สูง กว่าร่องตรง

ส่วนค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นภายในช่องขนานที่เจาะร่องพบว่าจะมีค่าลดลงเมื่อค่าเรย์โนลด์ นัมเบอร์ (Re) มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนรูปแบบการจัดรูปแบบแผ่นเจาะร่องตรงและแผ่นเจาะร่องรูปตัววีพบว่าแผ่นเจาะร่องที่ได้มีการเพิ่มครีบบเข้าไปจะมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงกว่าแผ่นเจาะร่องที่ไม่ได้เพิ่มครีบ แต่แผ่นเจาะร่องที่มีการเพิ่มครีบก็จะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นตามไปด้วย โดยจะเห็นได้จากกราฟสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Nu) กับค่าเรย์โนลด์ นัมเบอร์ (Re) ที่ชุดการทดลองแบบเจาะร่องตัววีเสริมครีบวางเฉียง (V – Upstream inline-grooved stagger rib) จะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงเพราะได้มีการเพิ่มครีบจึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (f) สูงตามไปด้วย และจากกราฟของประสิทธิภาพ (η) ทำให้ทราบว่า การเจาะร่องแบบตัววีเสริมครีบวางเฉียง (V – Upstream inline-grooved stagger rib) มีสมรรถนะดีที่สุดเนื่องจากมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูง แต่มีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ จึงทำให้มีสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนดี ส่วนการเจาะร่องแบบเจาะร่องตรงเสริมครีบ (Inline-grooved inline rib) มีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนอยู่ในระดับปานกลางแต่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (f) สูงจึงทำให้มีสมรรถนะต่ำที่สุด

โดยสามารถจำแนกข้อดีข้อเสียของการจัดวางแผ่นเจาะร่องแบบต่าง ๆ ได้ดังต่อไปนี้

1. เมื่อค่าตัวเลขเรย์โนลด์ นัมเบอร์ เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย
2. ชุดแรกเปลี่ยนความร้อนแบบเจาะร่องเมื่อทำการติดครีบเข้าไปจะทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเพิ่มขึ้นตามไปด้วย
3. ชุดแรกเปลี่ยนความร้อนแบบเจาะร่องเมื่อทำการติดครีบเข้าไปจะทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ชุดแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเซาะร่องตรงมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมากกว่าชุดแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเซาะร่องรูปตัววี
5. ชุดแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเซาะร่องรูปตัววีมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนดีกว่าชุดแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเซาะร่องตรง
6. ชุดแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเซาะร่องเมื่อทำการติดครีบบเข้าไป ชุดการทดลองที่มีการติดครีบบนเยื้องจะมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน น้อยกว่าชุดการทดลองที่มีการติดครีบบนวางตรงกัน
7. ชุดแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเซาะร่องรูปตัววีย้อนศรมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมากกว่าชุดแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเซาะร่องรูปตัววีตามศร
8. ชุดแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเซาะร่องรูปตัววีตามศรมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมากกว่าชุดแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเซาะร่องรูปตัววีย้อนศร
9. ชุดแลกเปลี่ยนที่ตีควรมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานน้อยแต่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงจึงจะทำให้มีสมรรถนะดี

8.2 ข้อเสนอแนะ

ในการที่จะเลือกใช้การจัดวางแผ่นอะลูมิเนียมที่มีการเซาะร่องว่าต้องเลือกแบบใดนั้นควรคำนึงถึงตัวประกอบต่าง ๆ ที่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน ค่าความดันตกคร่อม ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และค่าแฟคเตอร์ต่าง ๆ ให้ดีเนื่องจากค่าแฟคเตอร์ต่างๆ เหล่านี้จะแปรเปลี่ยนไปตามลักษณะการจัดวางแผ่นอะลูมิเนียม ลักษณะการเซาะร่อง และอุณหภูมิที่ใช้งาน เพื่อให้ได้ลักษณะการจัดวาง และลักษณะการเซาะร่องที่เหมาะสมที่สุด สำหรับงานนั้น ๆ และเพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายที่ต้องเสียไปเนื่องจากงานที่ต้องป้อนให้แก่ระบบ และเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้สูงที่สุด

บรรณานุกรม

- [1] รศ.ดร พงษ์เจต พรหมวงศ์ “การถ่ายเทความร้อน” ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [2] Fox and Macdonald “Introduction to fluid mechanics” Fifth Edition
- [3] “Process Heat transfer” G.F.Hewill, G.L.Shires, T. Bott, Begel House
- [4] “Heat transfer basic approach”,M. Necati Ozisik, Megraw Hill international Edition
- [5] Chapman , J.P. : “Heat transfer” , Macmilan , New York , 1984
- [6] Holman , J.P. : “Heat transfer” , Mcgraw Hill , New York , 1989
- [7] Inppera , Frank P. , and David P. Dewitt : “Fundamentals of Heat transfer and Mass Transfer” , Wiley ,New York ,1990
- [8] Kreith ,F. : “Principle of Heat transfer” ,Inext ,New York ,1989

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก1 แสดงค่าที่ได้จากการทดลองแผ่นเซาะร่องแบบแผ่นเรียบ (Smooth plate)

$T_w (K)$	$T_b (K)$	$\Delta P (Pa)$	\bar{V}	$\rho (kg/m^3)$	$c_p (kJ/kg \cdot K)$	$\mu (N \cdot s/m^3)$	$k (W/m \cdot K)$	$h (W/m^2 \cdot K)$	$\dot{m} (kg/s)$	Re	f	Nu
378.02	310.2	36.7875	9.7240	1.129118	1.007388	1.89E-05	0.027018	167.5427	0.04119	19793.84	0.037589	69.82599
378.98	310.3	34.3350	9.4151	1.128952	1.007390	1.89E-05	0.027022	157.0547	0.039107	18790.36	0.037423	66.74559
380.04	310.45	31.8825	9.0662	1.128619	1.007394	1.89E-05	0.027029	154.2365	0.038102	18303.04	0.037476	66.03160
382.16	310.55	29.4300	8.7116	1.128453	1.007396	1.89E-05	0.027033	150.4385	0.037058	17799.41	0.037467	63.57332
384.02	310.95	26.9775	8.3398	1.128286	1.007398	1.89E-05	0.027036	144.8843	0.035564	17079.32	0.037475	64.12471
385.14	311.2	24.5250	7.9851	1.127954	1.007402	1.89E-05	0.027044	136.9018	0.033658	16160.20	0.037162	62.51264
386.24	310.95	22.0725	7.5504	1.127454	1.007408	1.89E-05	0.027055	131.5480	0.031749	15237.93	0.037408	58.50072
391.32	311.10	19.6200	7.1500	1.125790	1.007428	1.90E-05	0.027092	123.9932	0.029316	14052.45	0.037080	53.66373
394.95	311.10	17.1675	6.6924	1.123627	1.007862	1.90E-05	0.027140	118.6446	0.028046	13422.04	0.037033	50.77112
399.17	311.20	14.7150	6.2348	1.122130	1.007472	1.90E-05	0.027173	109.4932	0.025225	12058.84	0.036573	44.86089
404.02	311.35	12.2625	5.7143	1.119800	1.007500	1.91E-05	0.027225	105.3929	0.023337	11136.55	0.036283	41.47571
413.28	311.65	9.8100	5.0965	1.117970	1.007522	1.91E-05	0.027266	91.36005	0.020839	9931.089	0.03649	36.60319
418.75	311.85	7.3575	4.4559	1.114808	1.007560	1.91E-05	0.027336	76.70793	0.017257	8204.882	0.035802	30.35662
436.85	315.30	4.9050	3.6436	1.111646	1.007598	1.92E-05	0.027406	54.51371	0.012762	6053.305	0.035696	28.11273

ภาคผนวก ก2 แสดงค่าที่ได้จากการทดลองแผ่นเซาะร่องแบบเซาะร่องตรง (Inline-Grooved)

$T_w(K)$	$T_b(K)$	$\Delta P(Pa)$	\bar{V}	$\rho(kg/m^3)$	$c_p(kJ/kg \cdot K)$	$\mu(N \cdot s/m^3)$	$k(W/m \cdot K)$	$h(W/m^2 K)$	$\dot{m}(kg/s)$	Re	f	Nu
344.52	308.70	58.8600	9.72400	1.132446	1.007348	1.89E-05	0.026944	101.1208	0.044048	21219.90	0.060142	136.4737
345.21	308.80	56.4075	9.41512	1.132114	1.007352	1.89E-05	0.026951	100.3065	0.042636	20534.68	0.061480	135.3376
346.42	308.85	51.5025	9.06620	1.131947	1.007354	1.89E-05	0.026955	96.40116	0.04105	19768.30	0.060538	130.0505
348.82	308.95	46.5975	8.71156	1.131614	1.007358	1.89E-05	0.026962	90.65013	0.039433	18984.70	0.059322	122.2584
349.94	308.80	44.1450	8.33976	1.132114	1.007352	1.89E-05	0.026951	88.07065	0.037766	18189.29	0.061323	118.8285
352.84	309.10	39.2400	7.98512	1.131115	1.007364	1.89E-05	0.026973	83.48926	0.036128	17387.40	0.059459	112.5543
356.92	309.55	34.3350	7.55040	1.129618	1.007382	1.89E-05	0.027007	78.35173	0.034116	16400.60	0.058190	105.4980
361.71	309.70	31.8825	7.15000	1.129118	1.007388	1.89E-05	0.027018	71.27101	0.032293	15518.20	0.060254	95.92466
366.23	310.15	26.9775	6.69240	1.127621	1.007788	1.89E-05	0.027051	65.03961	0.030186	14489.50	0.058195	87.42997
369.95	310.45	22.0725	6.23480	1.126622	1.007418	1.90E-05	0.027073	61.08341	0.028097	13476.74	0.054860	82.04449
376.48	310.95	19.6200	5.71428	1.124958	1.007438	1.90E-05	0.027110	55.46420	0.025713	12318.03	0.058053	74.39535
383.94	311.35	14.7150	5.09652	1.123627	1.007454	1.90E-05	0.027140	46.76739	0.022906	10962.45	0.054735	62.66172
394.17	311.85	9.81000	4.45588	1.121963	1.007474	1.90E-05	0.027177	38.50038	0.019997	9558.384	0.047736	51.51485
409.33	313.20	4.90500	3.64364	1.11747	1.007528	1.91E-05	0.027277	31.06248	0.016287	7758.741	0.035696	41.41046

ภาคผนวก ก3 แสดงค่าที่ได้จากการทดลองแผ่นเซาะร่องแบบร่องตรงเสริมคريب(Inline Grooved-Inline Rib)

$T_w(K)$	$T_b(K)$	$\Delta P(Pa)$	\bar{V}	$\rho(kg/m^3)$	$c_p(kJ/kg \cdot K)$	$\mu(N \cdot s/m^3)$	$k(W/m \cdot K)$	$h(W/m^2 K)$	$\dot{m}(kg/s)$	Re	f	Nu
331.67	309.65	723.4875	9.72400	1.129285	1.007386	1.89E-05	0.027014	165.7492	0.043925	21110.49	0.739247	223.1147
332.13	309.75	679.3425	9.41512	1.128952	1.007390	1.89E-05	0.027022	161.1116	0.042517	20428.81	0.740433	216.8127
332.62	309.85	632.7450	9.06620	1.128619	1.007394	1.89E-05	0.027029	155.5189	0.040929	19661.02	0.743749	209.2291
333.79	310.05	586.1475	8.71156	1.127954	1.007402	1.89E-05	0.027044	151.7559	0.039305	18871.39	0.746214	204.0549
335.07	310.35	539.5500	8.33976	1.126955	1.007414	1.89E-05	0.027066	147.2146	0.037594	18036.50	0.749502	197.7861
337.95	310.70	490.5000	7.98512	1.125790	1.007428	1.90E-05	0.027092	137.9110	0.035958	17236.64	0.743232	185.1094
339.92	311.05	438.9975	7.55040	1.124626	1.007442	1.90E-05	0.027118	132.0308	0.033965	16267.22	0.743996	177.0474
341.11	311.20	389.9475	7.15000	1.124126	1.007448	1.90E-05	0.027129	125.2331	0.032150	15391.99	0.736958	167.8633
342.68	311.50	343.3500	6.69240	1.123128	1.007902	1.90E-05	0.027151	119.0059	0.030066	14383.38	0.740665	159.3859
344.12	311.70	294.3000	6.23480	1.122462	1.007468	1.90E-05	0.027166	112.4369	0.027993	13385.31	0.731465	150.5060
345.41	312.05	245.2500	5.71428	1.121298	1.007482	1.90E-05	0.027192	104.6510	0.025630	12244.45	0.725662	139.9505
349.22	312.85	196.2000	5.09652	1.118635	1.007514	1.91E-05	0.027251	95.08148	0.022805	10873.22	0.729793	126.8769
354.02	313.75	149.6025	4.45588	1.115640	1.007550	1.91E-05	0.027318	83.34152	0.019885	9459.909	0.727981	110.9399
363.44	316.05	98.10000	3.64364	1.107986	1.007642	1.92E-05	0.027488	71.53324	0.016148	7639.038	0.713915	94.63174

ภาคผนวก ก4 แสดงค่าที่ได้จากการทดลองแผ่นเซาะร่องแบบร่องตรงเสริมครีบบางเชิง(Inline grooved-Stagger Rib)

$T_w(K)$	$T_b(K)$	$\Delta P(Pa)$	\bar{V}	$\rho(kg/m^3)$	$c_p(kJ/kg \cdot K)$	$\mu(N \cdot s/m^3)$	$k(W/m \cdot K)$	$h(W/m^2 K)$	$\dot{m}(kg/s)$	Re	f	Nu
330.76	309.70	412.0200	9.72400	1.129118	1.007388	1.89E-05	0.027018	178.6387	0.043918	21104.75	0.420995	240.4323
331.72	309.75	385.0425	9.41512	1.128952	1.007390	1.89E-05	0.027022	170.7493	0.042517	20428.81	0.419668	229.7824
332.07	309.85	355.6125	9.06620	1.128619	1.007394	1.89E-05	0.027029	165.6800	0.040929	19661.02	0.417999	222.8994
332.69	309.90	326.1825	8.71156	1.128453	1.007396	1.89E-05	0.027033	159.6289	0.039322	18886.80	0.415257	214.7292
333.29	309.95	294.3000	8.33976	1.128286	1.007398	1.89E-05	0.027036	153.3376	0.037639	18075.82	0.408819	206.2381
334.27	310.05	262.4175	7.98512	1.127954	1.007402	1.89E-05	0.027044	146.5385	0.036027	17297.74	0.397629	197.0394
335.01	310.20	232.9875	7.55040	1.127454	1.007408	1.89E-05	0.027055	141.0852	0.034051	16342.68	0.394858	189.6289
337.03	310.70	206.0100	7.15000	1.125790	1.007428	1.90E-05	0.027092	136.1830	0.032198	15433.95	0.389336	182.7899
340.32	311.35	176.5800	6.69240	1.123627	1.007862	1.90E-05	0.027140	127.2464	0.030079	14395.13	0.380913	170.4922
341.80	311.80	152.0550	6.23480	1.122130	1.007472	1.90E-05	0.027173	121.4713	0.027985	13378.02	0.377924	162.5549
343.99	312.50	122.6250	5.71428	1.119800	1.007500	1.91E-05	0.027225	115.5940	0.025595	12214.46	0.362831	154.3955
348.03	313.05	98.1000	5.09652	1.117970	1.007522	1.91E-05	0.027266	99.91810	0.022791	10861.37	0.364897	133.2585
352.55	314.00	71.1225	4.45588	1.114808	1.007560	1.91E-05	0.027336	88.32075	0.019870	9447.02	0.346090	117.4884
360.08	314.95	44.1450	3.64364	1.111646	1.007598	1.92E-05	0.027406	69.20847	0.016202	7685.04	0.321262	91.82823

ภาคผนวก ก5 แสดงค่าที่ได้จากการทดลองแผ่นเขาระบบร่องตรงเสริมครีบบางชนิดด้านหน้า

$T_w(K)$	$T_b(K)$	$\Delta P(Pa)$	\bar{V}	$\rho(kg/m^3)$	$c_p(kJ/kg \cdot K)$	$\mu(N \cdot s/m^3)$	$k(W/m \cdot K)$	$h(W/m^2 K)$	$\dot{m}(kg/s)$	Re	f	Nu
328.52	310.10	762.7275	9.72400	1.127787	1.007404	1.89E-05	0.027047	199.9240	0.043866	21058.85	0.779342	268.7861
328.91	310.00	718.5825	9.41512	1.128120	1.007400	1.89E-05	0.027040	192.4617	0.042486	20401.03	0.783201	258.8242
329.31	310.05	671.9850	9.06620	1.127954	1.007402	1.89E-05	0.027044	187.3928	0.040905	19639.63	0.789873	251.9731
330.27	310.10	618.0300	8.71156	1.127787	1.007404	1.89E-05	0.027047	176.9210	0.039299	18866.25	0.786803	237.8599
331.68	310.25	564.0750	8.33976	1.127288	1.007410	1.89E-05	0.027059	169.8649	0.037605	18046.32	0.783571	228.2797
333.55	310.55	517.4775	7.98512	1.126290	1.007422	1.90E-05	0.027081	164.8060	0.035974	17250.72	0.784110	221.2995
334.16	310.70	461.0700	7.55040	1.125790	1.007428	1.90E-05	0.027092	156.4360	0.034001	16298.25	0.781404	209.9743
335.40	310.95	412.0200	7.15000	1.124958	1.007438	1.90E-05	0.027110	147.6746	0.032174	15412.96	0.778672	198.0792
336.57	311.30	362.9700	6.69240	1.123794	1.007880	1.90E-05	0.027136	140.8004	0.030084	14399.06	0.782988	188.6784
337.28	311.35	311.4675	6.23480	1.123627	1.007454	1.90E-05	0.027140	128.6871	0.028022	13410.85	0.774134	172.4225
338.72	311.90	262.4175	5.71428	1.121797	1.007476	1.90E-05	0.027181	119.5796	0.025641	12254.46	0.776458	159.9799
342.99	312.70	206.0100	5.09652	1.119134	1.007508	1.91E-05	0.027240	104.5377	0.022815	10882.11	0.766283	139.5521
347.58	313.20	154.5075	4.45588	1.117470	1.007528	1.91E-05	0.027277	92.3180	0.019917	9488.32	0.751850	123.0723
352.56	314.00	100.5525	3.64364	1.114808	1.007560	1.91E-05	0.027336	75.8126	0.016248	7724.97	0.731763	100.8495

ภาคผนวก ก6 แสดงค่าที่ได้จากการทดลองแผ่นเซาะร่องแบบร่องตรงเสริมคريب(Inline-Rib-Double grooved)

$T_w(K)$	$T_b(K)$	$\Delta P(Pa)$	\bar{V}	$\rho(kg/m^3)$	$c_p(kJ/kg \cdot K)$	$\mu(N \cdot s/m^3)$	$k(W/m \cdot K)$	$h(W/m^2 K)$	$\dot{m}(kg/s)$	Re	f	Nu
327.09	308.10	760.2750	9.72400	1.134443	1.007324	1.88E-05	0.026899	195.0521	0.044125	21289.27	0.766812	263.6789
327.83	308.30	711.2250	9.41512	1.133778	1.007332	1.89E-05	0.026914	191.0192	0.042699	20590.61	0.764490	258.0850
328.44	308.30	664.6275	9.06620	1.133778	1.007332	1.89E-05	0.026914	185.3638	0.041116	19827.53	0.769694	250.4441
329.12	308.35	613.1250	8.71156	1.133611	1.007334	1.89E-05	0.026918	177.5727	0.039502	19046.76	0.771192	239.8846
329.79	308.45	556.7175	8.33976	1.133278	1.007338	1.89E-05	0.026925	168.4405	0.037805	18223.95	0.77335	227.4853
330.51	308.55	517.4775	7.98512	1.132946	1.007342	1.89E-05	0.026933	159.5020	0.036187	17439.51	0.761813	215.3544
331.24	308.70	461.0700	7.55040	1.132446	1.007348	1.89E-05	0.026944	155.9722	0.034202	16476.63	0.768934	210.5017
333.16	308.95	409.5675	7.15000	1.131614	1.007358	1.89E-05	0.026962	147.7189	0.032364	15581.66	0.764767	199.2262
335.11	309.25	355.6125	6.69240	1.130616	1.007718	1.89E-05	0.026985	137.3981	0.030266	14560.65	0.767117	185.1543
337.88	309.80	306.5625	6.23480	1.128786	1.007392	1.89E-05	0.027025	127.1012	0.028151	13524.51	0.749752	171.0205
340.21	310.50	255.0600	5.71428	1.126456	1.007420	1.90E-05	0.027077	121.7490	0.025748	12348.25	0.754689	163.5055
341.51	310.45	201.1050	5.09652	1.126622	1.007418	1.90E-05	0.027073	104.5194	0.022967	11016.31	0.748038	140.3858
347.86	312.05	154.5075	4.45588	1.121298	1.007482	1.90E-05	0.027192	96.10281	0.019985	9547.974	0.751850	128.5189
354.67	313.20	103.0050	3.64364	1.117470	1.007528	1.91E-05	0.027277	76.71532	0.016287	7758.741	0.749611	102.2718

ภาคผนวก ก7 แสดงค่าที่ได้จากการทดลองแผ่นเซาะร่องแบบเซาะร่องตัววีตามทิศทางการเคลื่อนที่ของไหล(V-Downstream-Inline Grooved)

$T_w(K)$	$T_b(K)$	$\Delta P(Pa)$	\bar{V}	$\rho(kg/m^3)$	$c_p(kJ/kg \cdot K)$	$\mu(N \cdot s/m^3)$	$k(W/m \cdot K)$	$h(W/m^2 \cdot K)$	$\dot{m}(kg/s)$	Re	f	Nu
348.84	309.20	51.5025	9.72400	1.130782	1.007368	1.89E-05	0.026981	79.83815	0.043983	21162.25	0.052624	107.6027
350.33	309.70	46.5975	9.41512	1.129118	1.007388	1.89E-05	0.027018	80.68828	0.042523	20434.36	0.050788	108.5995
351.91	309.85	44.1450	9.06620	1.128619	1.007394	1.89E-05	0.027029	77.52440	0.040929	19661.02	0.051889	104.2983
353.10	310.05	41.6925	8.71156	1.127954	1.007402	1.89E-05	0.027044	74.30073	0.039305	18871.39	0.053078	99.90664
354.54	310.30	36.7875	8.33976	1.127122	1.007412	1.89E-05	0.027062	69.89405	0.037600	18041.41	0.051102	93.91706
359.81	310.80	34.3350	7.98512	1.125458	1.007432	1.90E-05	0.027099	67.86066	0.035948	17227.26	0.052026	91.06027
362.25	311.15	29.4300	7.55040	1.124293	1.007446	1.90E-05	0.027125	66.60223	0.033955	16258.36	0.049877	89.28629
365.82	311.40	26.9775	7.15000	1.123461	1.007456	1.90E-05	0.027144	61.70836	0.032131	15375.23	0.050984	82.66923
371.61	312.20	22.0725	6.69240	1.120798	1.007934	1.90E-05	0.027203	58.00152	0.030003	14328.63	0.047614	77.53417
377.88	312.70	19.6200	6.23480	1.119134	1.007508	1.91E-05	0.027240	52.82677	0.027910	13312.57	0.048764	70.52085
384.58	312.95	14.7150	5.71428	1.118302	1.007518	1.91E-05	0.027258	46.16451	0.025561	12184.54	0.043540	61.58527
392.63	313.75	12.2625	5.09652	1.115640	1.007550	1.91E-05	0.027318	42.24218	0.022744	10820.00	0.045612	56.23060
400.56	314.85	9.8100	4.45588	1.111979	1.007594	1.92E-05	0.027399	38.23792	0.019819	9403.318	0.047736	50.74911
415.68	315.10	4.9050	3.64364	1.111147	1.007604	1.92E-05	0.027417	31.45378	0.016194	7678.753	0.052624	41.71708

ภาคผนวก ก8 แสดงค่าที่ได้จากการทดลองแผ่นเซาะร่องแบบร่องตัววีวางส่วนทิศทางการไหลของของไหล(V-Upstream-Inline Grooved)

$T_w(K)$	$T_b(K)$	$\Delta P(Pa)$	\bar{V}	$\rho(kg/m^3)$	$c_p(kJ/kg \cdot K)$	$\mu(N \cdot s/m^3)$	$k(W/m \cdot K)$	$h(W/m^2 K)$	$\dot{m}(kg/s)$	Re	f	Nu
349.70	310.00	56.4075	9.72400	1.128120	1.007400	1.89E-05	0.027040	85.21320	0.043879	21070.32	0.057636	114.5955
351.62	310.75	53.9550	9.41512	1.125624	1.007430	1.90E-05	0.027096	84.41230	0.042392	20317.90	0.058807	113.2859
353.85	311.15	49.0500	9.06620	1.124293	1.007446	1.90E-05	0.027125	82.61762	0.040772	19522.35	0.057655	110.7564
357.94	311.50	44.1450	8.71156	1.123128	1.007460	1.90E-05	0.027151	77.97174	0.039137	18722.98	0.056200	104.4284
358.78	311.65	39.2400	8.33976	1.122629	1.007466	1.90E-05	0.027162	75.56111	0.037450	17909.26	0.054509	101.1585
360.26	311.75	36.7875	7.98512	1.122296	1.007470	1.90E-05	0.027170	72.80148	0.035847	17138.35	0.055742	97.43745
363.88	311.85	31.8825	7.55040	1.121963	1.007474	1.90E-05	0.027177	68.62563	0.033885	16196.49	0.054033	91.82349
366.62	311.90	29.4300	7.15000	1.121797	1.007476	1.90E-05	0.027181	65.29875	0.032083	15333.41	0.055619	87.36011
370.66	312.25	24.5250	6.69240	1.120632	1.007964	1.90E-05	0.027207	60.30814	0.029999	14324.73	0.052905	80.60661
374.81	312.30	22.0725	6.23480	1.120466	1.007492	1.90E-05	0.027210	54.38187	0.027944	13341.62	0.054860	72.67580
381.50	312.35	17.1675	5.71428	1.120299	1.007494	1.90E-05	0.027214	48.53890	0.025607	12224.45	0.050796	64.85844
390.53	313.10	14.7150	5.09652	1.117803	1.007524	1.91E-05	0.027269	42.35914	0.022788	10858.41	0.054735	56.48576
399.69	313.40	9.8100	4.45588	1.116805	1.007536	1.91E-05	0.027292	34.38846	0.019905	9477.979	0.047736	45.81958
415.63	314.10	7.3575	3.64364	1.114475	1.007564	1.91E-05	0.027343	25.76883	0.016243	7720.758	0.053544	34.26963

ภาคผนวก ก9 แสดงค่าที่ได้จากการทดลองแผ่นเซาร่องแบบร่องตัววีเสริมครีบบางช่องเว้นช่อง วางทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของของไหล (V-Downstream-Inline-
Rib double Grooved)

$T_w(K)$	$T_b(K)$	$\Delta P(Pa)$	\bar{V}	$\rho(kg/m^3)$	$c_p(kJ/kg \cdot K)$	$\mu(N \cdot s/m^3)$	$k(W/m \cdot K)$	$h(W/m^2 K)$	$\dot{m}(kg/s)$	Re	f	Nu
330.74	310.35	412.020	9.72400	1.126955	1.007414	1.89E-05	0.027066	186.0015	0.043834	21030.21	0.420995	249.8971
331.36	310.65	387.495	9.41512	1.125957	1.007426	1.90E-05	0.027088	187.6796	0.042404	20328.96	0.422341	251.9451
332.30	310.65	358.065	9.06620	1.125957	1.007426	1.90E-05	0.027088	176.1090	0.040833	19575.58	0.420881	236.4124
333.00	310.70	328.635	8.71156	1.125790	1.007428	1.90E-05	0.027092	171.7988	0.039230	18804.73	0.418379	230.5949
334.02	310.90	301.657	8.33976	1.125125	1.007436	1.90E-05	0.027107	164.1038	0.037533	17982.57	0.419040	220.146
335.23	311.25	274.680	7.98512	1.123960	1.007450	1.90E-05	0.027133	160.3132	0.035900	17185.09	0.416210	214.8557
336.52	311.45	245.250	7.55040	1.123294	1.007458	1.90E-05	0.027147	151.8659	0.033925	16231.82	0.415640	203.4234
337.79	311.85	218.272	7.15000	1.121963	1.007474	1.90E-05	0.027177	149.4240	0.032088	15337.59	0.412511	199.9345
339.55	312.15	193.747	6.69240	1.120965	1.007944	1.90E-05	0.027199	139.8616	0.030008	14332.54	0.417947	186.9870
341.15	312.70	166.770	6.23480	1.119134	1.007508	1.91E-05	0.027240	134.4757	0.027910	13312.57	0.414497	179.5176
343.61	313.20	137.340	5.71428	1.117470	1.007528	1.91E-05	0.027277	125.2103	0.025542	12167.95	0.406371	166.9222
346.63	313.80	110.362	5.09652	1.115474	1.007552	1.91E-05	0.027321	111.5681	0.022740	10817.05	0.410509	148.4936
350.71	314.45	83.385	4.45588	1.113310	1.007578	1.91E-05	0.027369	98.93176	0.019843	9423.861	0.405760	131.4436
358.00	315.80	53.955	3.64364	1.108818	1.007632	1.92E-05	0.027469	80.06221	0.016161	7649.471	0.392653	105.9861

ภาคผนวก ก10 แสดงค่าที่ได้จากการทดลองแผ่นเซาะร่องแบบร่องตัววีเสริมครีบบางช่องเว้นช่อง วางส่วนทางกับการเคลื่อนที่ของของไหล (V-Upstream-Inline-Rib double Grooved)

$T_w(K)$	$T_b(K)$	$\Delta P(Pa)$	\bar{V}	$\rho(kg/m^3)$	$c_p(kJ/kg \cdot K)$	$\mu(N \cdot s/m^3)$	$k(W/m \cdot K)$	$h(W/m^2 K)$	$\dot{m}(kg/s)$	Re	f	Nu
328.97	309.85	367.8750	9.72400	1.128619	1.007394	1.89E-05	0.027029	202.5787	0.043899	21087.53	0.375888	272.5416
329.23	309.95	343.3500	9.41512	1.128286	1.007398	1.89E-05	0.027036	198.2354	0.042492	20406.58	0.374226	266.6253
330.04	309.90	321.2775	9.06620	1.128453	1.007396	1.89E-05	0.027033	184.5049	0.040923	19655.67	0.377640	248.1918
330.93	309.95	296.7525	8.71156	1.128286	1.007398	1.89E-05	0.027036	174.9807	0.039317	18881.66	0.377790	235.3478
331.24	310.00	274.6800	8.33976	1.128120	1.007400	1.89E-05	0.027040	169.9914	0.037633	18070.90	0.381565	228.6060
332.15	310.25	250.1550	7.98512	1.127288	1.007410	1.89E-05	0.027059	164.7847	0.036006	17278.92	0.379048	221.4525
333.20	310.60	223.1775	7.55040	1.126123	1.007424	1.90E-05	0.027084	159.8579	0.034011	16307.13	0.378233	214.6259
335.45	311.05	198.6525	7.15000	1.124626	1.007442	1.90E-05	0.027118	150.1926	0.032164	15404.57	0.375431	201.4017
337.17	311.65	176.5800	6.69240	1.122629	1.007890	1.90E-05	0.027162	144.3242	0.030052	14371.63	0.380913	193.2161
339.42	312.05	152.0550	6.23480	1.121298	1.007482	1.90E-05	0.027192	133.9214	0.027964	13359.81	0.377924	179.0940
341.70	312.45	125.0775	5.71428	1.119966	1.007498	1.90E-05	0.027221	120.7156	0.025599	12217.79	0.370088	161.2582
344.86	313.25	100.5525	5.09652	1.117304	1.007530	1.91E-05	0.027281	109.2709	0.022777	10849.54	0.374019	145.6530
350.12	314.05	76.02750	4.45588	1.114642	1.007562	1.91E-05	0.027340	90.13229	0.019867	9444.445	0.369958	119.8820
356.47	314.65	49.0500	3.64364	1.112645	1.007586	1.92E-05	0.027384	70.10116	0.016216	7697.63	0.356958	93.08809

ภาคผนวก ก11 แสดงค่าที่ได้จากการทดลองแผ่นเซาะร่องแบบร่องตัววีเสริมครีบบางเชิงเสริมช่องเว้นช่องวางส่วนทิศทางการเคลื่อนที่ของของไหล

(V-Downstream-Inline Grooved-Staggered Rib)

$T_w(K)$	$T_b(K)$	$\Delta P(Pa)$	\bar{V}	$\rho(kg/m^3)$	$c_p(kJ/kg \cdot K)$	$\mu(N \cdot s/m^3)$	$k(W/m \cdot K)$	$h(W/m^2 \cdot K)$	$\dot{m}(kg/s)$	Re	f	Nu
333.03	311.00	272.2275	9.72400	1.124792	1.007440	1.90E-05	0.027114	190.5428	0.043750	20955.91	0.278157	255.5444
333.41	311.10	255.0600	9.41512	1.124459	1.007444	1.90E-05	0.027121	188.6260	0.042348	20279.21	0.277996	252.9046
333.79	311.20	235.4400	9.06620	1.124126	1.007448	1.90E-05	0.027129	185.5157	0.040766	19517.04	0.276744	248.6666
334.31	311.15	218.2725	8.71156	1.124293	1.007446	1.90E-05	0.027125	178.2446	0.039177	18758.70	0.277879	238.9529
335.18	311.20	196.2000	8.33976	1.124126	1.007448	1.90E-05	0.027129	168.7973	0.037500	17953.21	0.272546	226.2571
336.26	311.10	181.4850	7.98512	1.124459	1.007444	1.90E-05	0.027121	161.4217	0.035916	17199.13	0.274996	216.4299
337.67	311.20	161.8650	7.55040	1.124126	1.007448	1.90E-05	0.027129	149.4326	0.033950	16253.94	0.274323	200.3006
339.39	311.55	142.2450	7.15000	1.122962	1.007462	1.90E-05	0.027155	141.3250	0.032117	15362.67	0.268827	189.2524
341.47	312.05	122.6250	6.69240	1.121298	1.007930	1.90E-05	0.027192	133.7934	0.030017	14340.35	0.264523	178.9228
343.50	312.5	105.4575	6.23480	1.119800	1.007500	1.91E-05	0.027225	126.5735	0.027927	13327.09	0.262108	169.0606
345.86	313.05	88.2900	5.71428	1.117970	1.007522	1.91E-05	0.027266	118.1043	0.025554	12177.90	0.261238	157.5130
349.52	313.85	68.6700	5.09652	1.115307	1.007554	1.91E-05	0.027325	105.4007	0.022737	10814.10	0.255428	140.2659
354.51	314.60	51.5025	4.45588	1.112811	1.007584	1.91E-05	0.027380	90.26992	0.019834	9416.153	0.250617	119.8866
360.43	314.60	34.3350	3.64364	1.112811	1.007584	1.91E-05	0.027380	69.13148	0.016219	7699.730	0.249870	91.81284

ภาคผนวก ก12 แสดงค่าที่ได้จากการทดลองแผ่นเซาะร่องแบบร่องตัววีเสริมครีบบางเยื้องเสริมช่องเว้นช่อง วางทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของของไหล

(V-Upstream-Inline Grooved-Staggered Rib)

$T_w(K)$	$T_b(K)$	$\Delta P(Pa)$	\bar{V}	$\rho(kg/m^3)$	$c_p(kJ/kg \cdot K)$	$\mu(N \cdot s/m^3)$	$k(W/m \cdot K)$	$h(W/m^2 K)$	$\dot{m}(kg/s)$	Re	f	Nu
330.30	311.25	252.6075	9.72400	1.123960	1.007450	1.90E-05	0.027133	218.2227	0.043718	20927.40	0.258110	292.4674
330.53	311.45	235.4400	9.41512	1.123294	1.007458	1.90E-05	0.027147	218.4331	0.042304	20240.59	0.256612	292.5898
331.69	311.75	218.2725	9.06620	1.122296	1.007470	1.90E-05	0.027170	211.5815	0.040700	19458.66	0.256565	283.1806
332.37	311.85	201.1050	8.71156	1.121963	1.007474	1.90E-05	0.027177	207.2943	0.039096	18687.32	0.256023	277.3670
333.16	311.95	183.9375	8.33976	1.121630	1.007478	1.90E-05	0.027184	194.9578	0.037417	17880.02	0.255512	260.7893
334.29	312.25	166.7700	7.98512	1.120632	1.007490	1.90E-05	0.027207	187.8279	0.035794	17091.73	0.252699	251.0468
335.31	312.5	147.1500	7.55040	1.119800	1.007500	1.91E-05	0.027225	180.3729	0.033820	16139.23	0.249384	240.9188
337.12	312.95	127.5300	7.15000	1.118302	1.007518	1.91E-05	0.027258	175.7219	0.031983	15245.92	0.241018	234.4199
338.75	313.25	112.8150	6.69240	1.117304	1.008030	1.91E-05	0.027281	161.8695	0.029910	14246.87	0.243361	215.7645
340.41	313.65	95.6475	6.23480	1.115973	1.007546	1.91E-05	0.027310	154.1536	0.027831	13243.81	0.237726	205.2569
342.97	314.00	78.4800	5.71428	1.114808	1.007560	1.91E-05	0.027336	140.1682	0.025481	12114.99	0.232212	186.4584
346.06	314.30	61.3125	5.09652	1.113810	1.007572	1.91E-05	0.027358	127.4079	0.022706	10787.59	0.228060	169.3465
350.93	315.55	44.1450	4.45588	1.109650	1.007622	1.92E-05	0.027451	108.7271	0.019778	9367.466	0.214814	144.0296
357.35	316.10	26.9775	3.64364	1.107819	1.007644	1.92E-05	0.027491	83.17482	0.016146	7636.953	0.196327	110.0176

ภาคผนวก ก13 แสดงค่าที่ได้จากการทดลองแผ่นเซาะร่องแบบร่องตัววีเสริมครีบบททุกช่อง วางสวนทิศทางการเคลื่อนที่ของของไหล (V-Upstream-Inline Grooved Rib)

$T_w(K)$	$T_b(K)$	$\Delta P(Pa)$	\bar{V}	$\rho(kg/m^3)$	$c_p(kJ/kg \cdot K)$	$\mu(N \cdot s/m^3)$	$k(W/m \cdot K)$	$h(W/m^2 K)$	$\dot{m}(kg/s)$	Re	f	Nu
327.62	309.9	397.3050	9.72400	1.128453	1.007396	1.89E-05	0.027033	224.9176	0.043892	21081.79	0.405959	302.5540
328.04	309.95	375.2325	9.41512	1.128286	1.007398	1.89E-05	0.027036	219.3244	0.042492	20406.58	0.408975	294.9898
328.79	310.10	343.3500	9.06620	1.127787	1.007404	1.89E-05	0.027047	213.6999	0.040899	19634.28	0.403585	287.3070
329.83	310.45	318.8250	8.71156	1.126622	1.007418	1.90E-05	0.027073	209.9753	0.039259	18830.34	0.405891	282.0294
330.24	310.5	289.3950	8.33976	1.126456	1.007420	1.90E-05	0.027077	198.9499	0.037577	18021.78	0.402006	267.1840
331.29	310.85	264.8700	7.98512	1.125291	1.007434	1.90E-05	0.027103	194.3231	0.035942	17222.57	0.401345	260.7210
332.51	311.25	237.8925	7.55040	1.123960	1.007450	1.90E-05	0.027133	187.3934	0.033945	16249.51	0.403171	251.1492
333.75	311.45	210.9150	7.15000	1.123294	1.007458	1.90E-05	0.027147	176.4861	0.032126	15371.04	0.398606	236.4020
335.26	311.75	183.9375	6.69240	1.122296	1.007920	1.90E-05	0.027170	167.5741	0.030043	14363.80	0.396785	224.2810
336.74	312.3	159.4125	6.23480	1.120466	1.007492	1.90E-05	0.027210	160.6416	0.027944	13341.62	0.396210	214.6810
337.75	312.3	134.8875	5.71428	1.120466	1.007492	1.90E-05	0.027210	141.3873	0.025611	12227.78	0.399114	188.9496
342.61	313.8	110.3625	5.09652	1.115474	1.007552	1.91E-05	0.027321	129.8408	0.022740	10817.05	0.410509	172.8139
346.52	313.85	80.93250	4.45588	1.115307	1.007554	1.91E-05	0.027325	111.0400	0.019879	9454.752	0.393826	147.7707
351.44	313.65	53.95500	3.64364	1.115973	1.007546	1.91E-05	0.027310	83.70581	0.016265	7739.729	0.392653	111.4550

ภาคผนวก ก14 แสดงค่าที่ได้จากการทดลองแผ่นเซาะร่องแบบร่องตัววีเสริมครบทุกช่อง วางทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของของไหล (V-Downstream-Inline Grooved

Rib)

$T_w(K)$	$T_b(K)$	$\Delta P(Pa)$	\bar{V}	$\rho(kg/m^3)$	$c_p(kJ/kg \cdot K)$	$\mu(N \cdot s/m^2)$	$k(W/m \cdot K)$	$h(W/m^2 \cdot K)$	$\dot{m}(kg/s)$	Re	f	Nu
327.24	309.30	392.4000	9.72400	1.130450	1.007372	1.89E-05	0.026988	214.1492	0.043970	21150.74	0.400948	288.5425
328.02	309.45	365.4225	9.41512	1.129950	1.007378	1.89E-05	0.026999	206.1141	0.042554	20462.19	0.398283	277.6020
329.15	309.65	340.8975	9.06620	1.129285	1.007386	1.89E-05	0.027014	196.0962	0.040953	19682.43	0.400702	263.9648
330.34	309.70	313.9200	8.71156	1.129118	1.007388	1.89E-05	0.027018	186.1573	0.039346	18907.37	0.399646	250.5517
331.61	310.90	286.9425	8.33976	1.125125	1.007436	1.90E-05	0.027107	180.0953	0.037533	17982.57	0.398599	241.5987
333.47	311.40	262.4175	7.98512	1.123461	1.007456	1.90E-05	0.027144	172.7180	0.035884	17171.06	0.397629	231.3862
334.95	311.80	235.4400	7.55040	1.122130	1.007472	1.90E-05	0.027173	165.5471	0.033890	16200.90	0.399015	221.5380
336.03	312.10	210.9150	7.15000	1.121131	1.007484	1.90E-05	0.027195	156.1168	0.032064	15316.71	0.398606	208.7476
337.08	312.60	183.9375	6.69240	1.119467	1.007976	1.91E-05	0.027232	148.9955	0.029968	14297.43	0.396785	198.9548
339.44	312.85	156.9600	6.23480	1.118635	1.007514	1.91E-05	0.027251	137.5270	0.027898	13301.69	0.390115	183.5162
342.15	313.45	129.9825	5.71428	1.116638	1.007538	1.91E-05	0.027295	130.2874	0.025523	12151.37	0.384601	173.5729
346.82	314.10	103.0050	5.09652	1.114475	1.007564	1.91E-05	0.027343	114.2240	0.022720	10799.37	0.383142	151.9051
349.82	314.10	76.02750	4.45588	1.114475	1.007564	1.91E-05	0.027343	105.7720	0.019864	9441.869	0.369958	140.6648
354.68	314.60	49.0500	3.64364	1.112811	1.007584	1.91E-05	0.027380	81.12954	0.016219	7699.73	0.356958	107.7473



ภาคผนวก ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของอากาศที่ความดันบรรยากาศ

T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg·K)	$\mu \cdot 10^7$ (N·s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
100	3.5562	1.032	71.1	2.00	9.34	2.54	0.786
150	2.3364	1.012	103.4	4.426	13.8	5.84	0.758
200	1.7458	1.007	132.5	7.590	18.1	10.3	0.737
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	15.9	0.720
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
350	0.9950	1.009	208.2	20.92	30.0	29.9	0.700
400	0.8711	1.014	230.1	26.41	33.8	38.3	0.690
450	0.7740	1.021	250.7	32.39	37.3	47.2	0.686
500	0.6964	1.030	270.1	38.79	40.7	56.7	0.684
550	0.6329	1.040	288.4	45.57	43.9	66.7	0.683
600	0.5804	1.051	305.8	52.69	46.9	76.9	0.685
650	0.5356	1.063	322.5	60.21	49.7	87.3	0.690
700	0.4975	1.075	338.8	68.10	52.4	98.0	0.695
750	0.4643	1.087	354.6	76.37	54.9	109	0.702
800	0.4354	1.099	369.8	84.93	57.3	120	0.709
850	0.4097	1.110	384.3	93.80	59.6	131	0.716
900	0.3868	1.121	398.1	102.9	62.0	143	0.720
950	0.3666	1.131	411.3	112.2	64.3	155	0.723
1000	0.3482	1.141	424.4	121.9	66.7	168	0.726
1100	0.3166	1.159	449.0	141.8	71.5	195	0.728
1200	0.2902	1.175	473.0	162.9	76.3	224	0.728
1300	0.2679	1.189	496.0	185.1	82	238	0.719

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของอากาศที่ความดันบรรยากาศ(ต่อ)

T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg·K)	$\mu \cdot 10^7$ (N·s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
1400	0.2488	1.207	530	213	91	303	0.703
1500	0.2322	1.230	557	240	100	350	0.685
1600	0.2177	1.248	584	268	106	390	0.688
1700	0.2049	1.267	611	298	113	435	0.685
1800	0.1935	1.286	637	329	120	482	0.683
1900	0.1833	1.307	663	362	128	534	0.677
2000	0.1741	1.337	689	396	137	589	0.672
2100	0.1658	1.372	715	431	147	646	0.667
2200	0.1582	1.417	740	468	160	714	0.655
2300	0.1513	1.478	766	506	175	783	0.647
2400	0.1448	1.558	792	547	196	869	0.630
2500	0.1389	1.665	818	589	222	960	0.613
3000	0.1135	2.726	955	841	486	1570	0.536

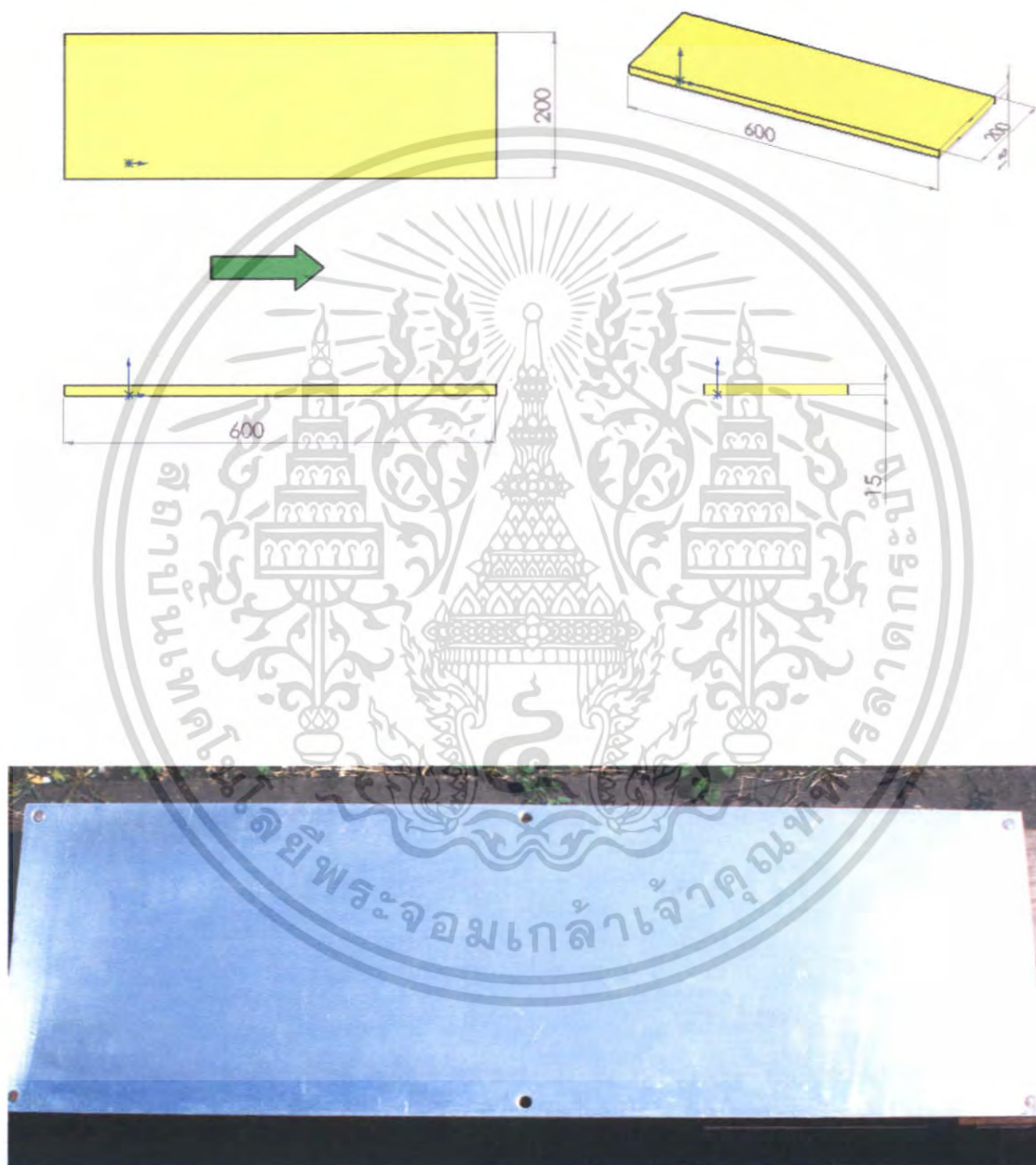
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

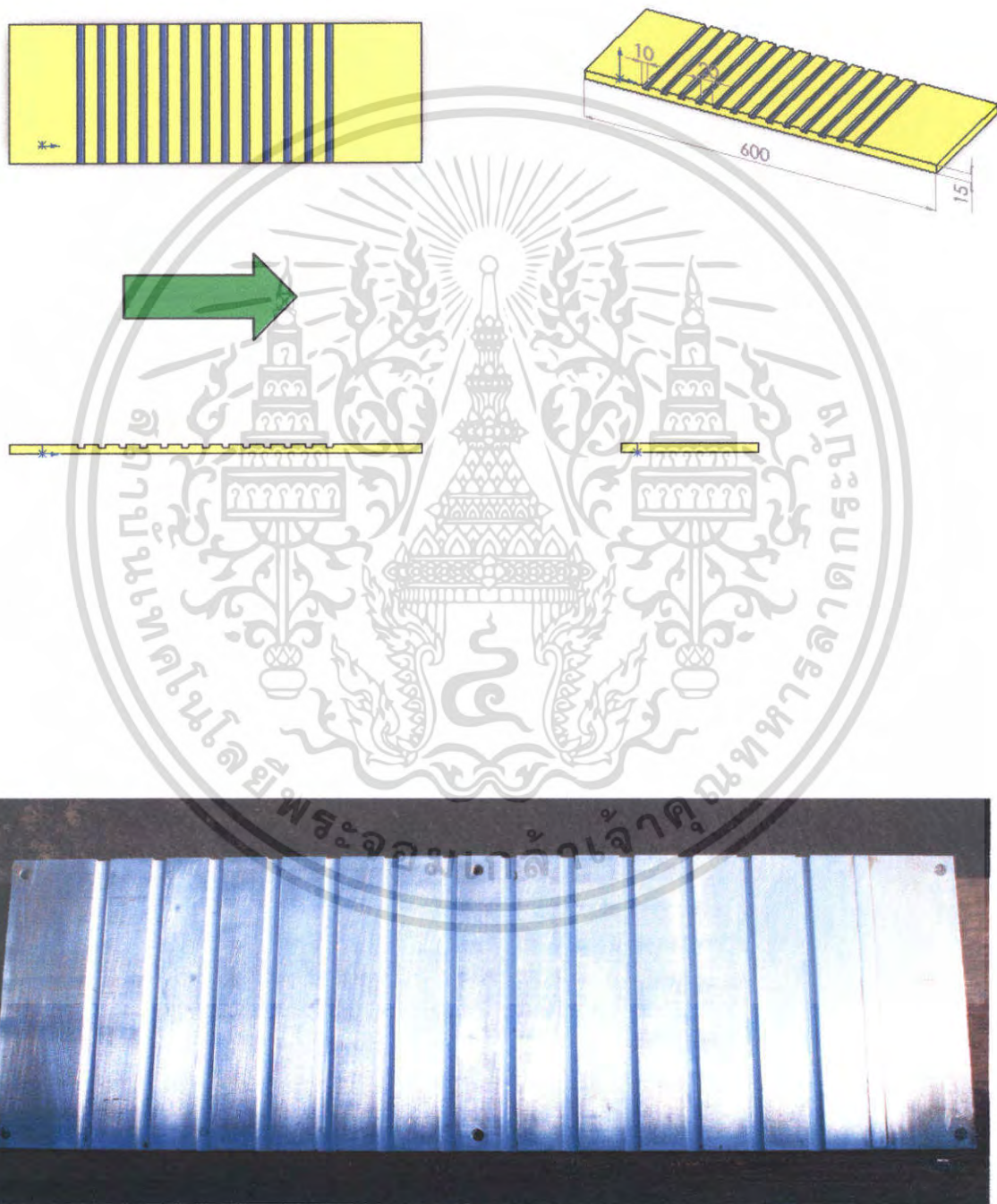
ภาคผนวก ค1 แสดงลักษณะการจัดวางแผ่นเซาะร่องแบบแผ่นเรียบ (Smooth plate)



รูปที่ ค1 แสดงลักษณะการจัดวางแผ่นเซาะร่องแบบแผ่นเรียบ (Smooth plate)

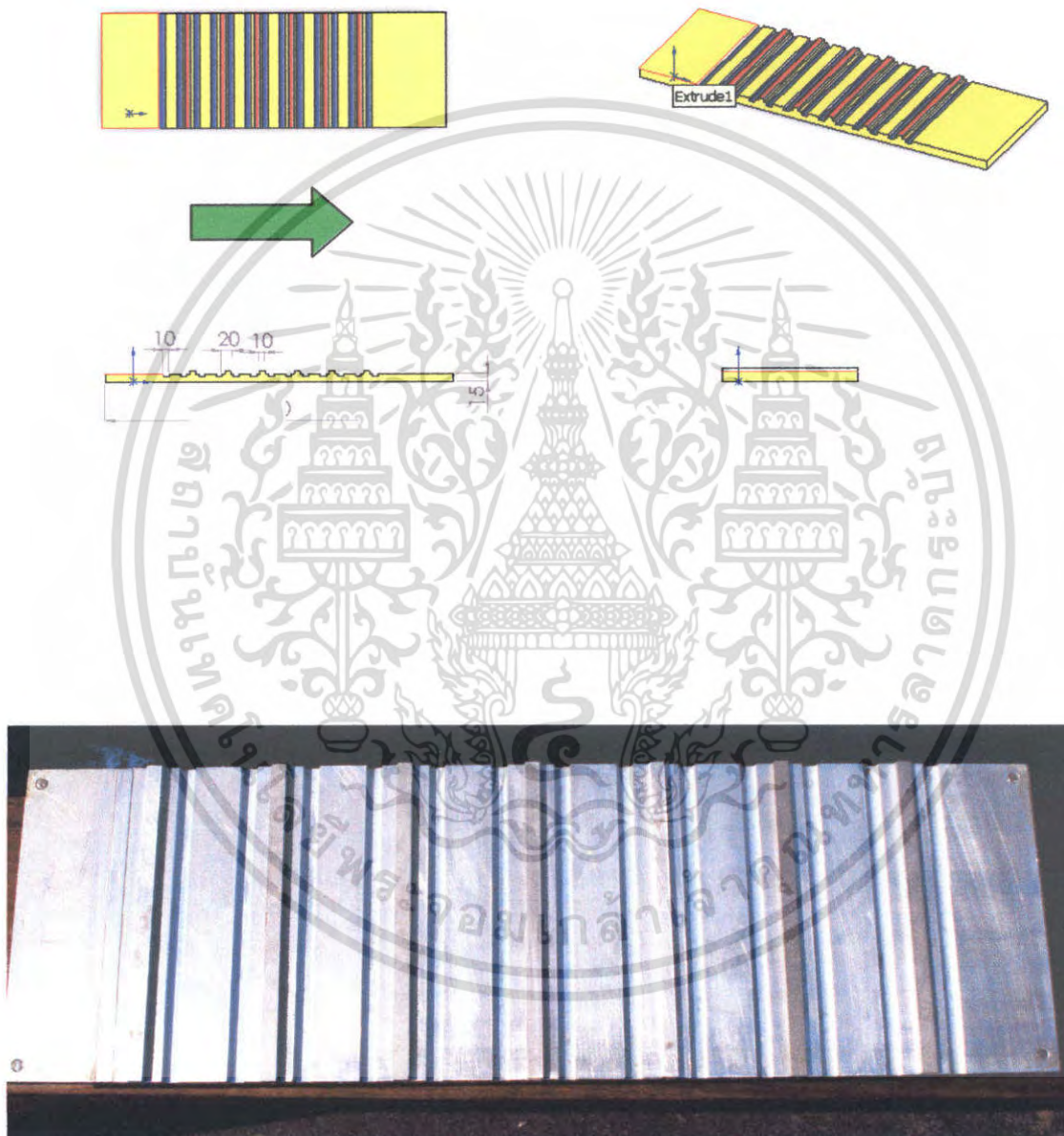
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค2 แสดงการจัดวางแผ่นเซาะร่องแบบเซาะร่องตรง (Inline-Grooved)



เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ ค2 แสดงการจัดวางแผ่นเซาะร่องแบบเซาะร่องตรง (Inline-Grooved) โยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

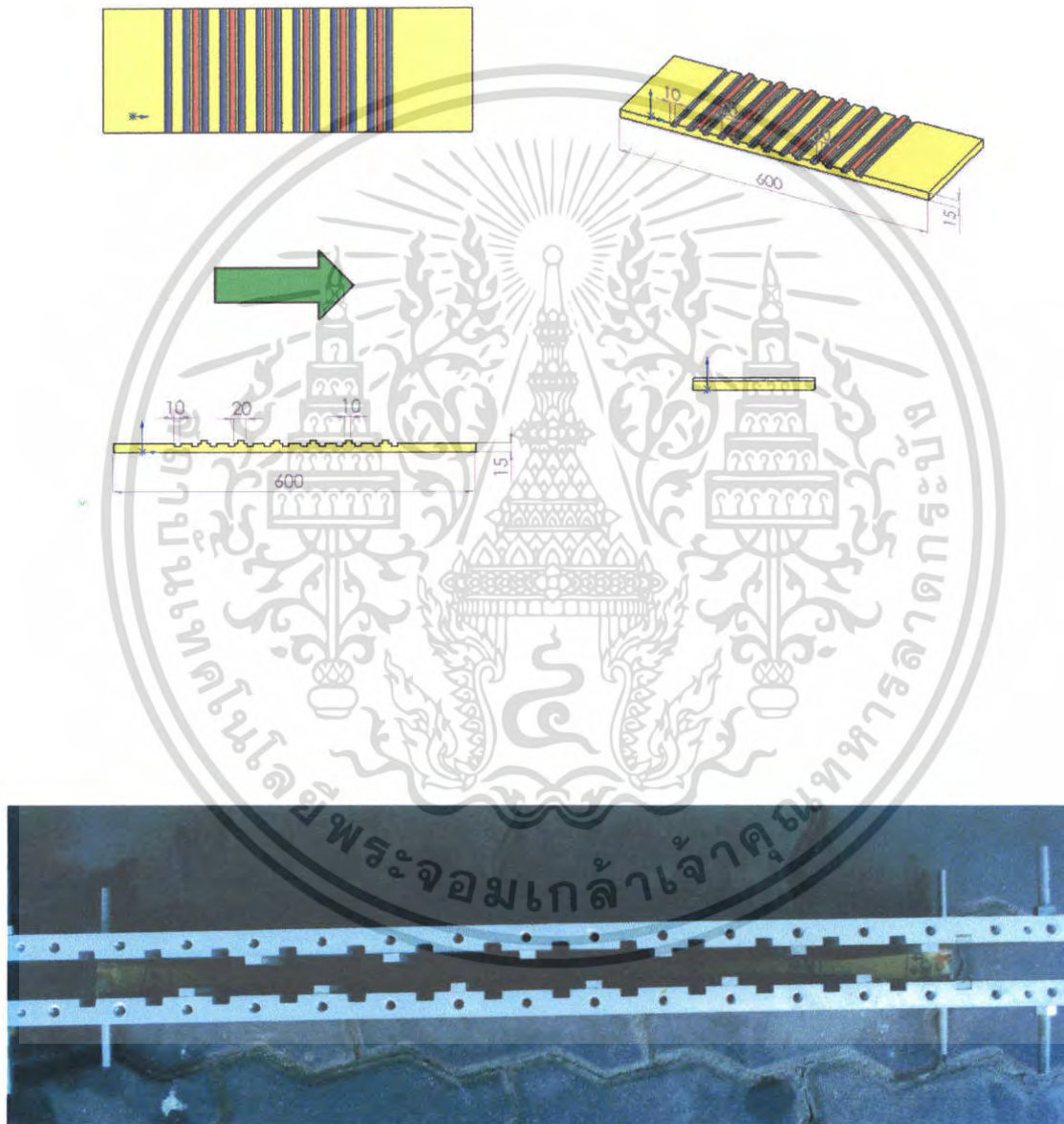
ภาคผนวก ค3 แสดงลักษณะการจัดวางแผ่นเซาะร่องแบบร่องตรงเสริมครีป



รูปที่ ค3 แสดงลักษณะการจัดวางแผ่นเซาะร่องแบบร่องตรงเสริมครีป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

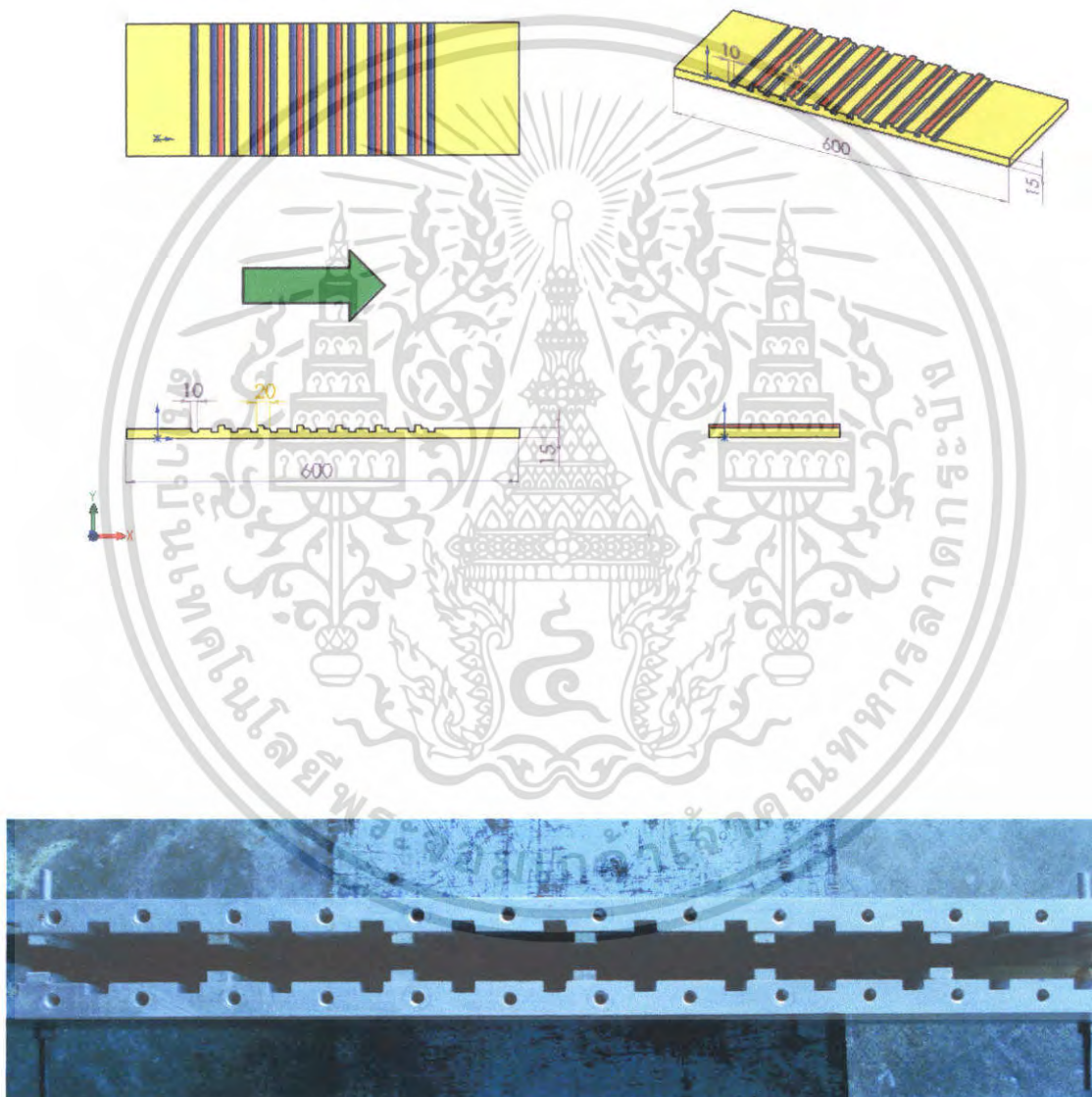
ภาคผนวก ค4 แสดงลักษณะการจัดวางแผ่นเซาะร่องแบบร่องตรงเสริมค้ำรับวางเอียง



รูปที่ ค4 แสดงลักษณะการจัดวางแผ่นเซาะร่องแบบร่องตรงเสริมค้ำรับวางเอียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

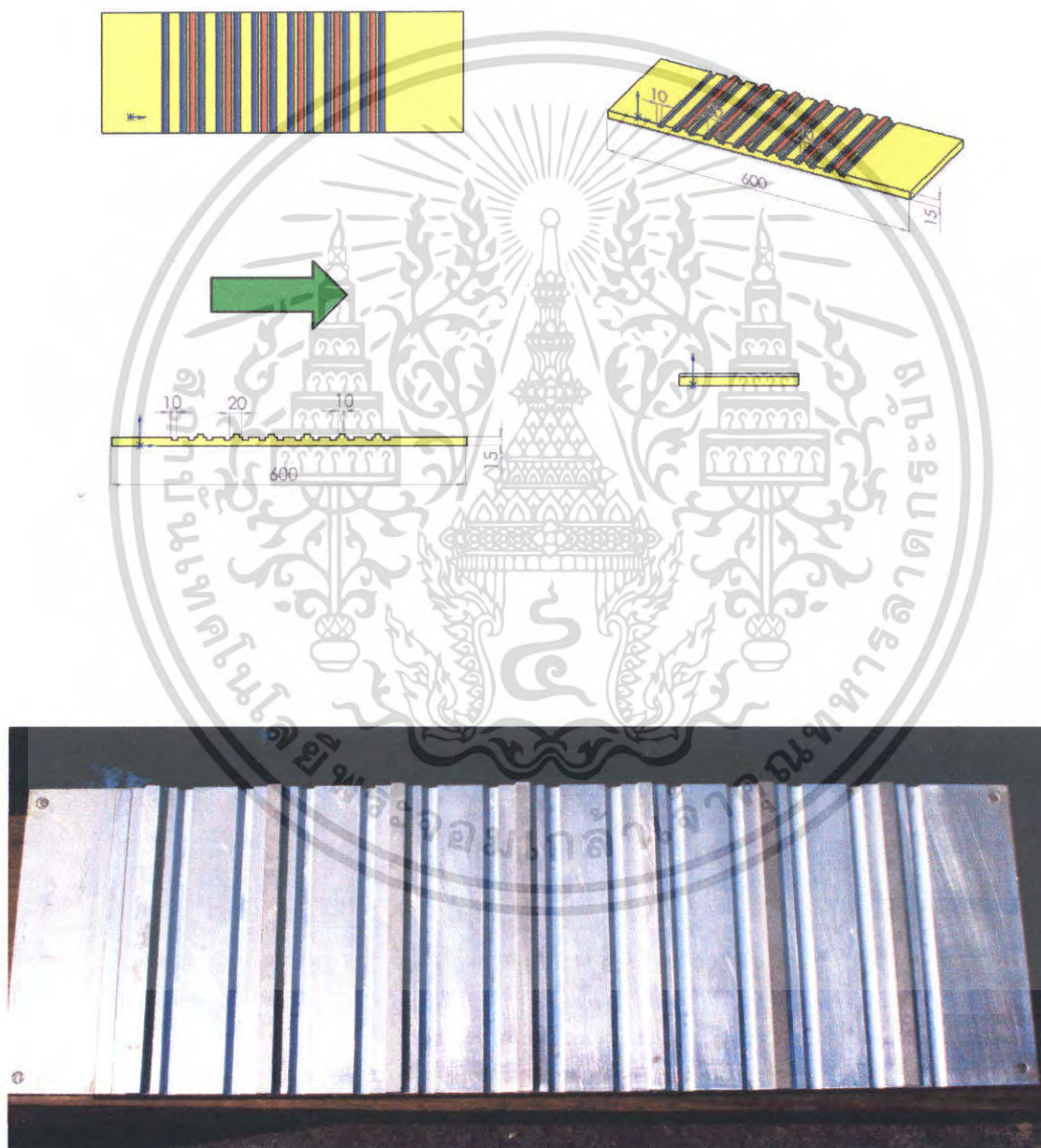
ภาคผนวก ค5 แสดงลักษณะการจัดวางแผ่นเซาะร่องแบบร่องตรงเสริมครีบบางชนิดด้านหน้า



รูปที่ ค5 แสดงลักษณะการจัดวางแผ่นเซาะร่องแบบร่องตรงเสริมครีบบางชนิดด้านหน้า

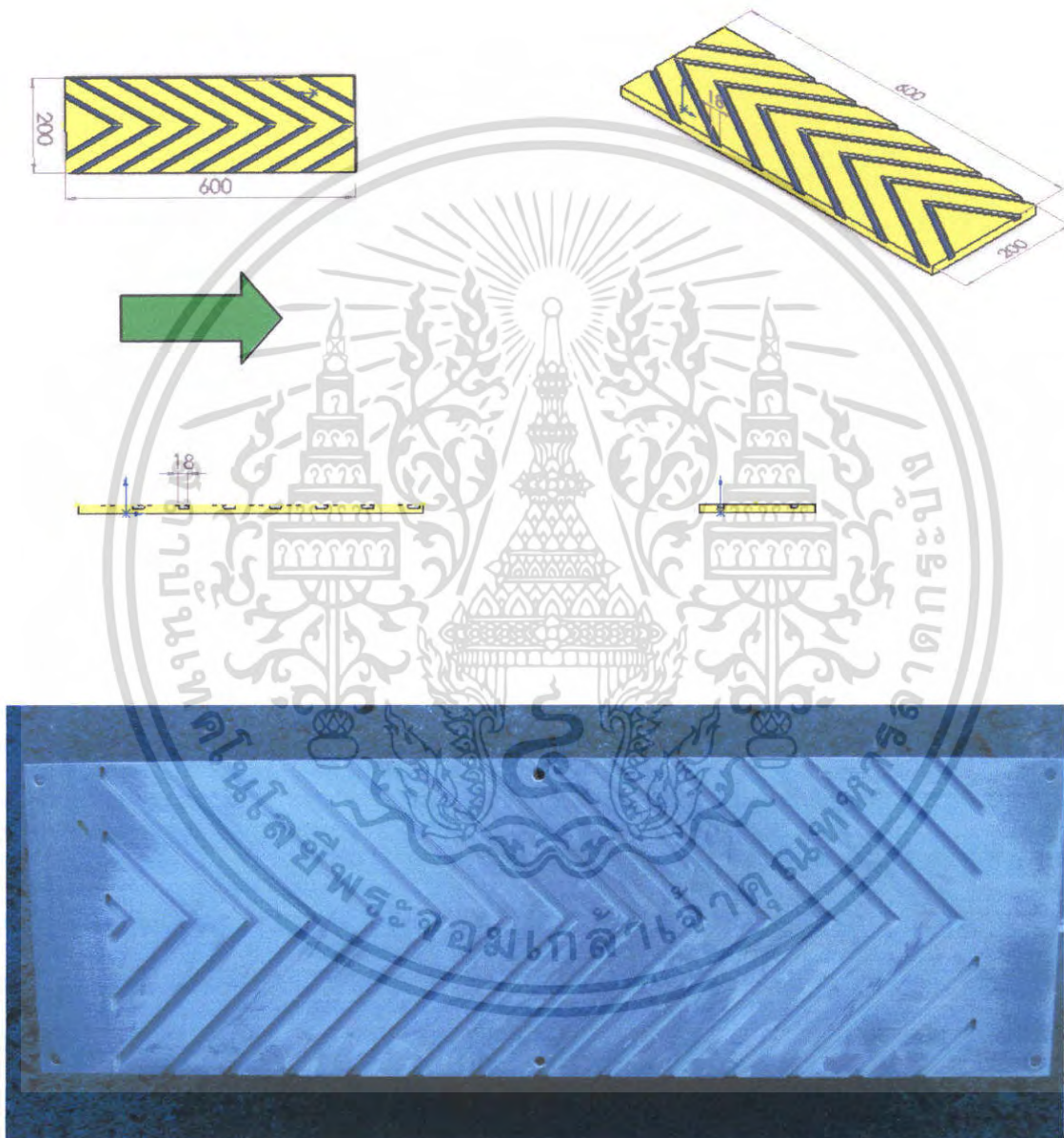
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค6 แสดงลักษณะการจัดวางแผ่นเซาะร่องแบบร่องตรงเสริมครีบริบ
(Inline-Rib-Double grooved)



รูปที่ ค6 แสดงลักษณะการจัดวางแผ่นเซาะร่องแบบร่องตรงเสริมครีบริบวางเยื้องเริ่ม โดยครีบริบ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

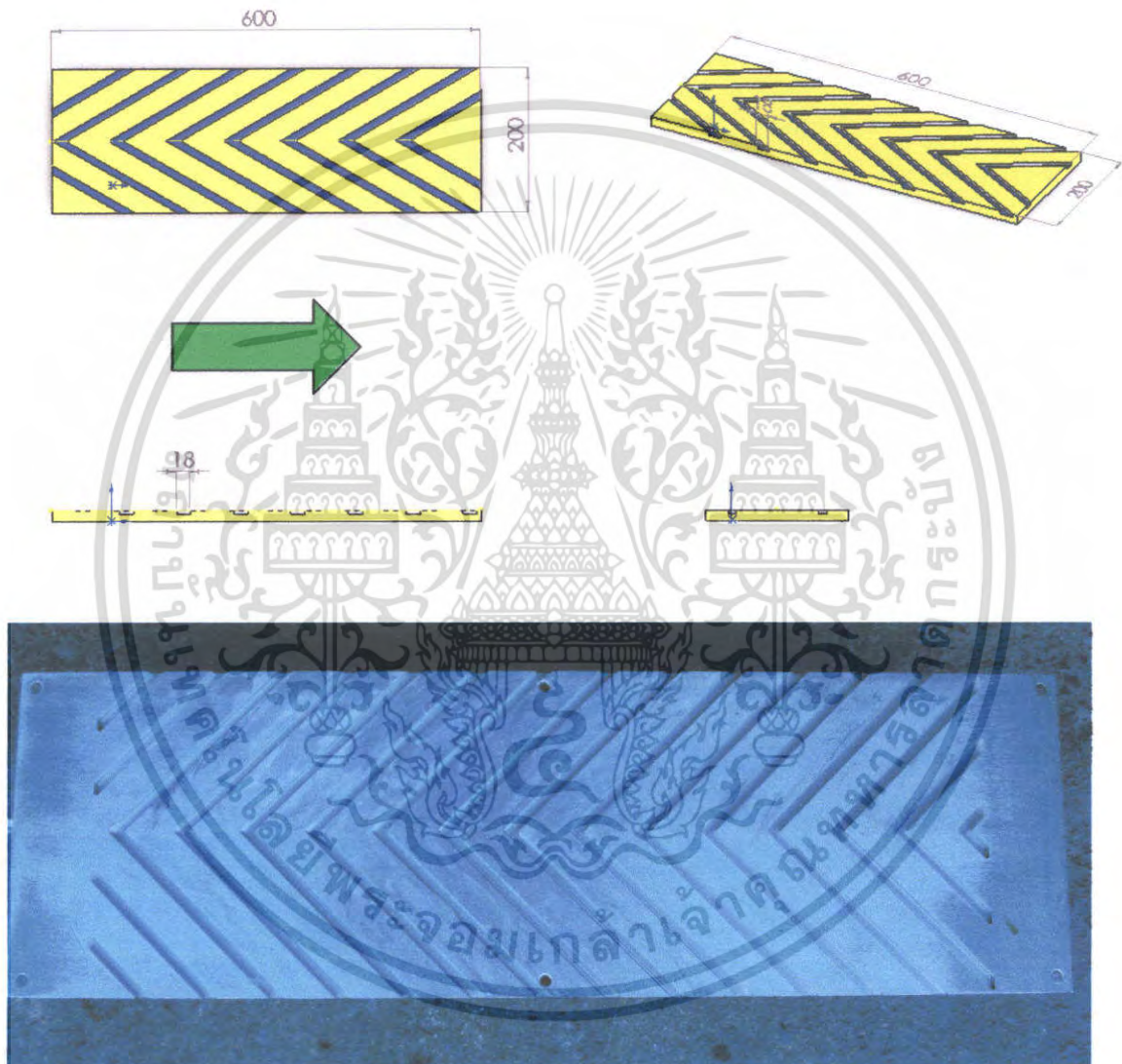
ภาคผนวก ค7 แสดงลักษณะการจัดวางแผ่นเซาะร่องแบบเซาะร่องตัววีตามทิศทางการเคลื่อนที่ของ
ของไหล (V-Downstream-Inline Grooved)



รูปที่ ค7 แสดงลักษณะการจัดวางแผ่นเซาะร่องแบบเซาะร่องตัววีตามทิศทางการเคลื่อนที่ของของ
ไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

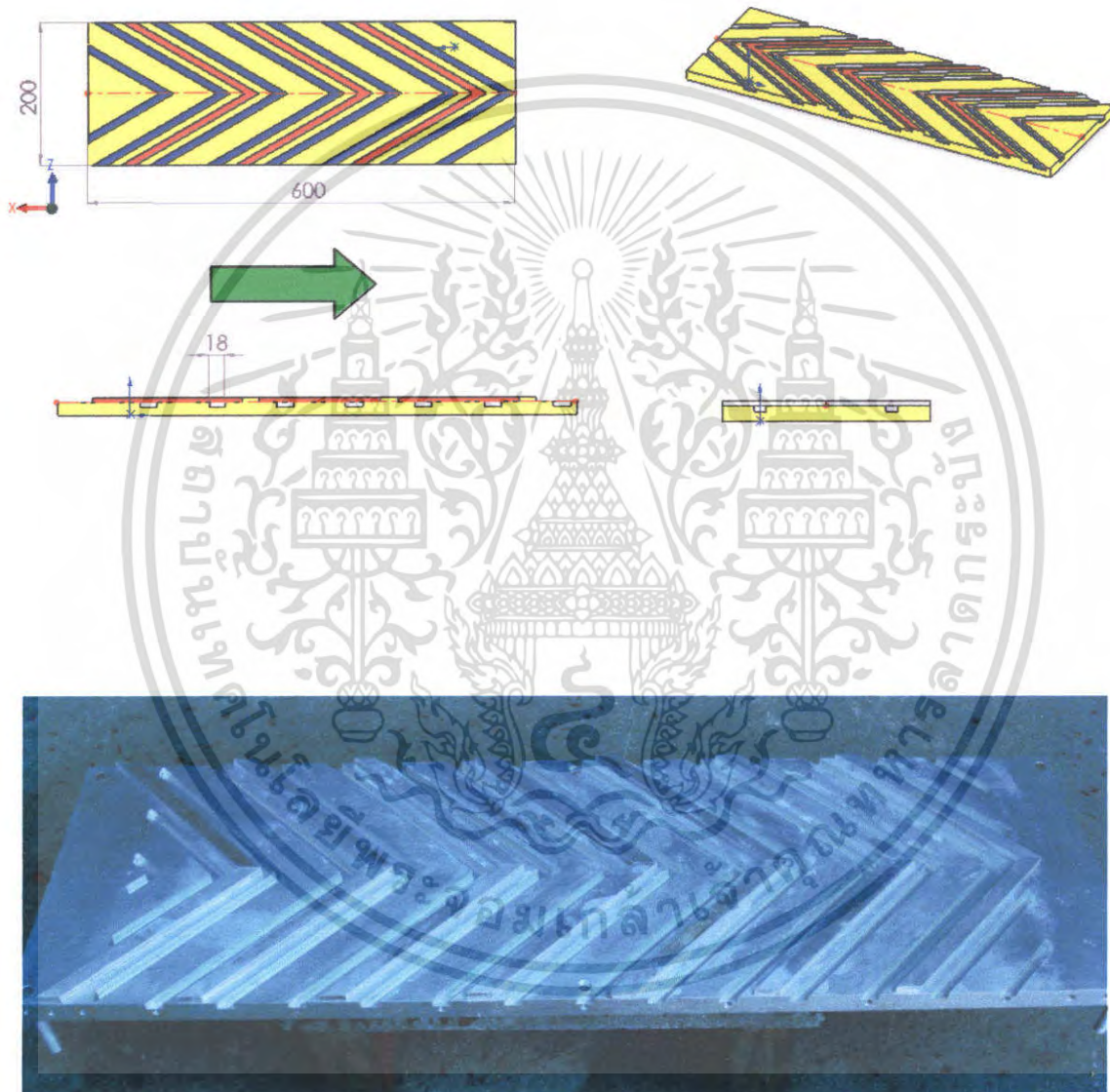
ภาคผนวก ค8 แสดงลักษณะการจัดวางแผ่นเซาะร่องแบบร่องตัววีวางส่วนทิศทางการไหลของ
ของไหล
(V-Upstream-Inline Grooved)



รูปที่ ค8 แสดงลักษณะการจัดวางแผ่นเซาะร่องแบบร่องตัววีวางส่วนทิศทางการไหลของของไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

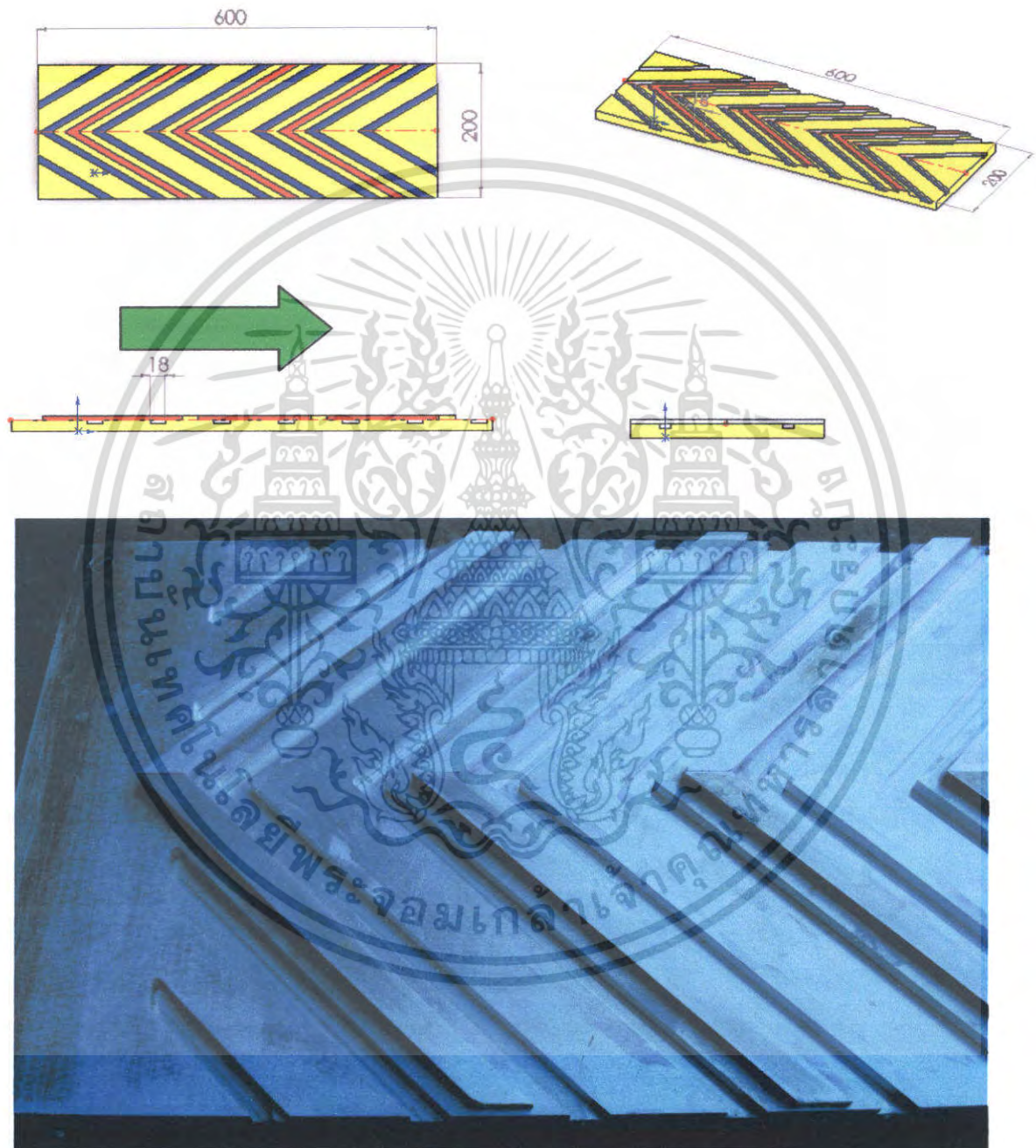
ภาคผนวก ก9 แสดงลักษณะการจัดวางแผ่นเซาะร่องแบบร่องตัววีเสริมกรีบวางช่องเว้นช่อง วางทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของของไหล (V-Downstream-Inline-Rib double Grooved)



รูปที่ ก9 แสดงลักษณะการจัดวางแผ่นเซาะร่องแบบร่องตัววีเสริมกรีบวางช่องเว้นช่อง วางทิศทาง
เดียวกับการเคลื่อนที่ของของไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

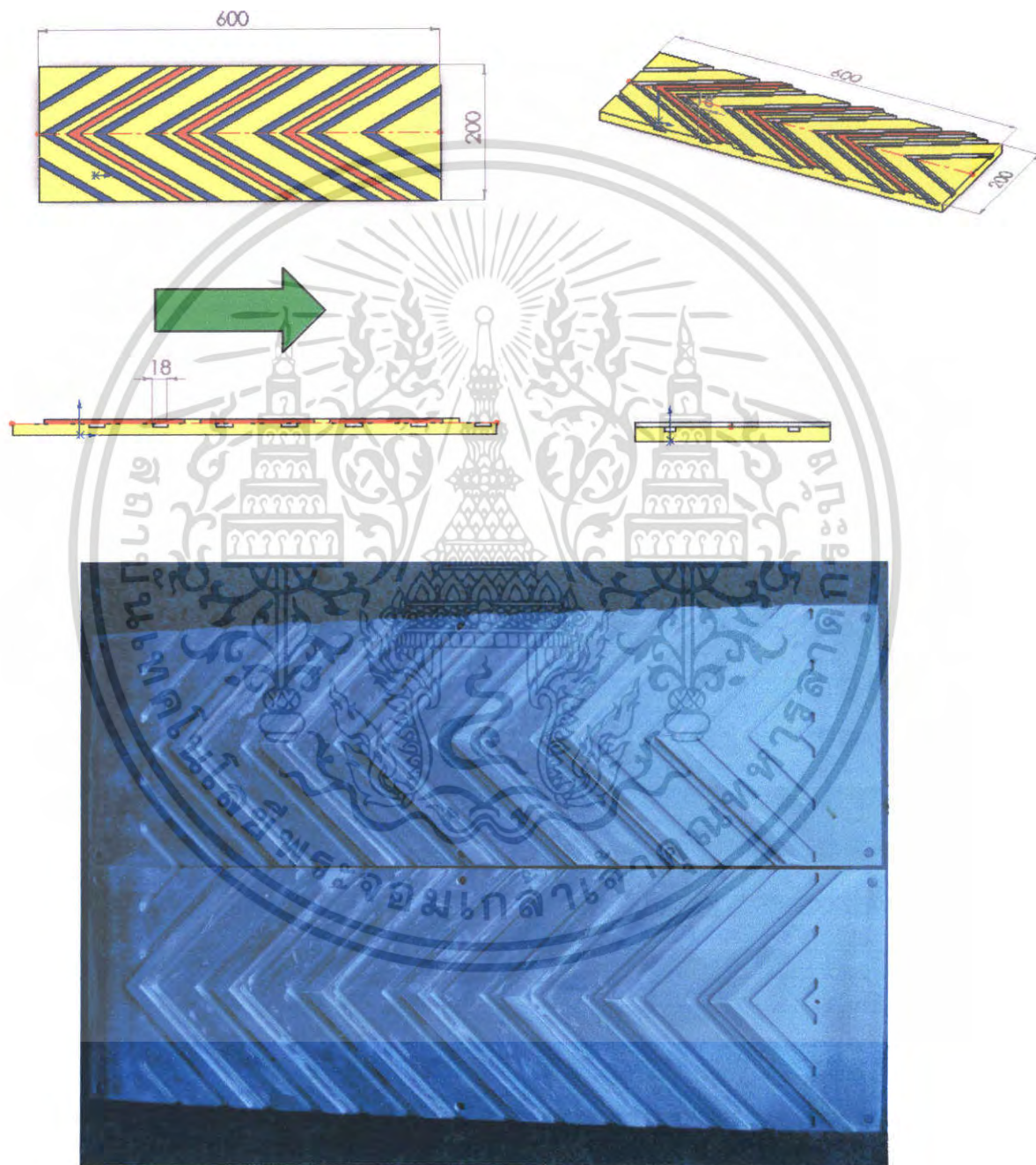
ภาคผนวก ค10 แสดงลักษณะการจัดวางแผ่นเซาะร่องแบบร่องตัววีเสริมครีบบางช่องเว้นช่อง วาง
 ส่วนทางกับการเคลื่อนที่ของของไหล (V-Upstream-Inline-Rib double Grooved)



รูปที่ ค10 แสดงลักษณะการจัดวางแผ่นเซาะร่องแบบร่องตัววีเสริมครีบบางช่องเว้นช่อง วางส่วน
 ทางกับการเคลื่อนที่ของของไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

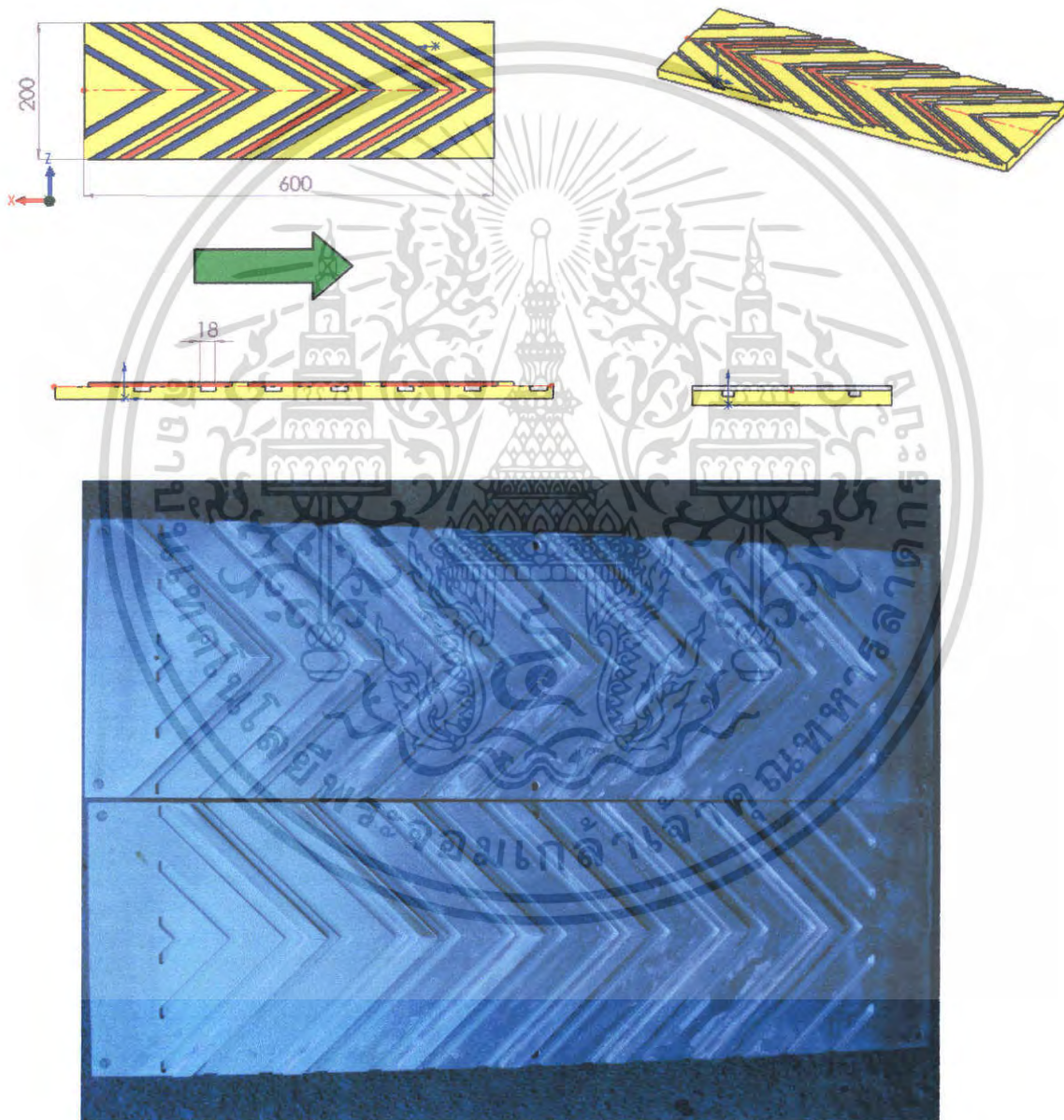
ภาคผนวก ค11 แสดงลักษณะการจัดวางแผ่นชะร่องแบบร่องตัววีเสริมครีบบางเอียงเสริมช่องเว้นช่องว่างส่วนทิศทางการเคลื่อนที่ของของไหล (V-Downstream-Inline Grooved-Staggered Rib)



รูปที่ ค11 แสดงลักษณะการจัดวางแผ่นชะร่องแบบร่องตัววีเสริมครีบบางเอียงเสริมช่องเว้นช่องว่างส่วนทิศทางการเคลื่อนที่ของของไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

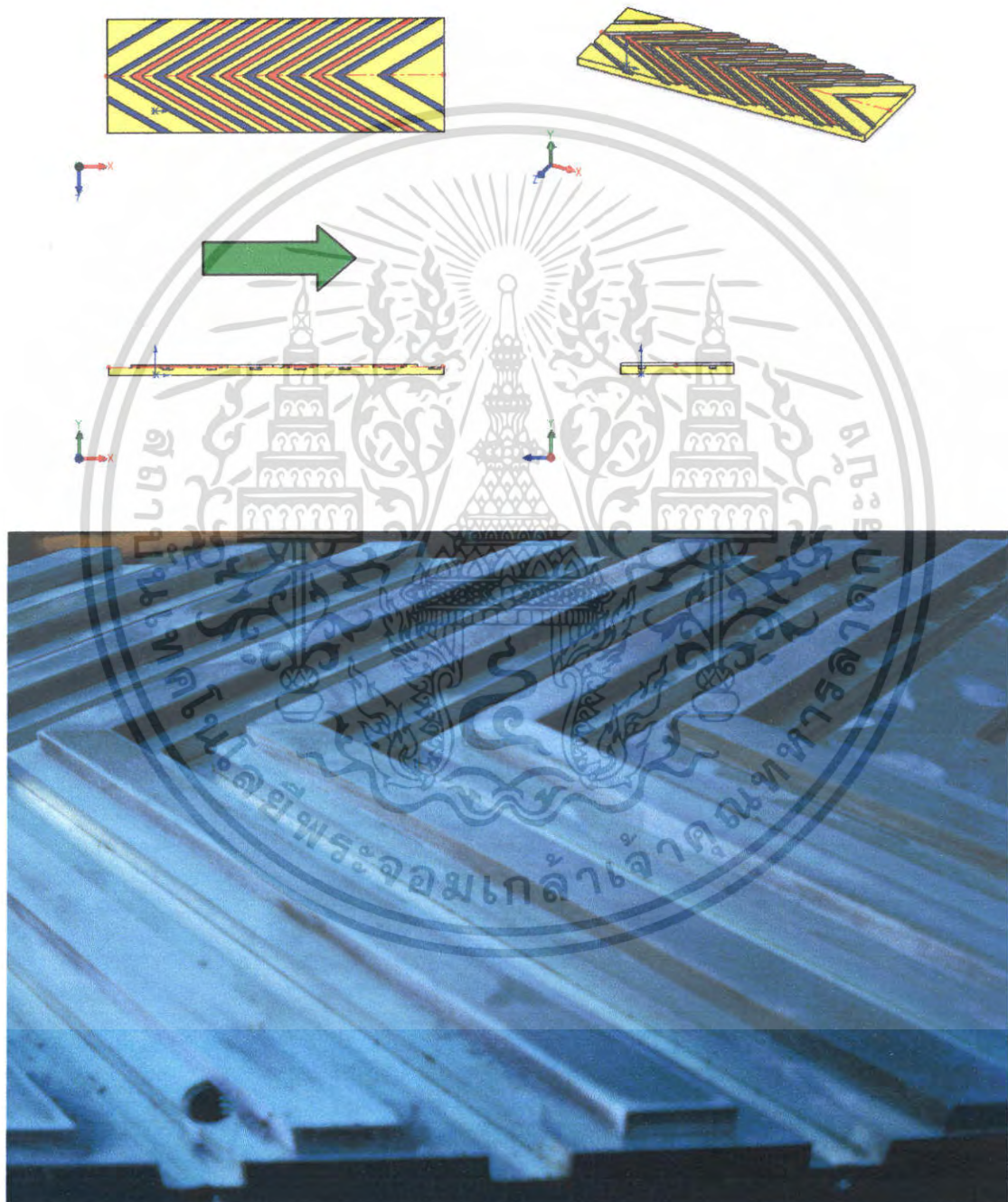
ภาคผนวก ค12 แสดงลักษณะการจัดวางแผ่นชะร่องแบบร่องตัววีเสริมครีบบางเอียงเสริมช่องเว้นช่อง วางทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของของไหล (V-Upstream-Inline Grooved-Staggered Rib)



รูปที่ ค12 แสดงลักษณะการจัดวางแผ่นชะร่องแบบร่องตัววีเสริมครีบบางเอียงเสริมช่องเว้นช่อง วาง

ทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของของไหล เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

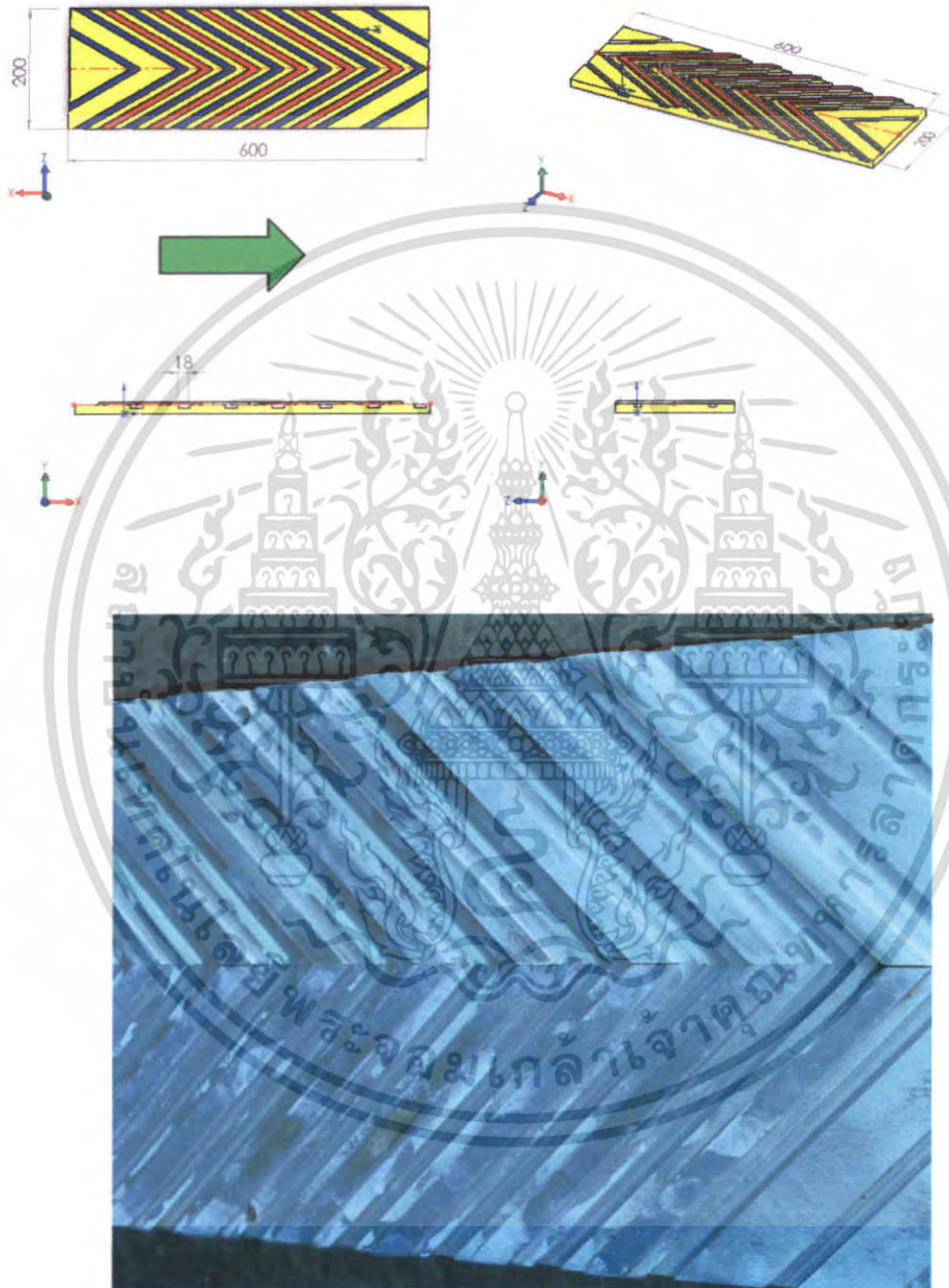
ภาคผนวก ค13 แสดงลักษณะการจัดวางแผ่นชะร่องแบบร่องตัววีเสริมครีบทูบช่อง วางสวนทิศทางการเคลื่อนที่ของของไหล (V-Upstream-Inline Grooved Rib)



รูปที่ ค13 แสดงลักษณะการจัดวางแผ่นชะร่องแบบร่องตัววีเสริมครีบทูบช่อง วางสวนทิศทางการ

เคลื่อนที่ของของไหล เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค14 แสดงลักษณะการจัดวางแผ่นชะร่องแบบร่องตัววีเสริมครีบทูบช่อง วางทิศทาง
 เกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของของไหล (V-Downstream-Inline Grooved Rib)



รูปที่ ค14 แสดงลักษณะการจัดวางแผ่นชะร่องแบบร่องตัววีเสริมครีบทูบช่อง วางทิศทาง
 เกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของของไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



สืบค้นข้อมูลออนไลน์ของบทความและปริญญานิพนธ์ได้ที่

www.kmitl.info

PS.01.2551

บทความประกอบวิชา 01054025 Project 2 ภาคเรียนที่ 2/2550 วันจันทร์ที่ 17 มีนาคม 2551

การเพิ่มสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเซาะร่อง

สมพงษ์ ไชยเจริญ¹, สุภมิตร สว่างเงินยวง², ปฏิภาณ รักษาศิลป์², พงษ์เจต พรหมวงศ์³

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของช่องขนานที่เซาะร่องสี่เหลี่ยมชนิดที่มีการถ่ายเท ความร้อนคงที่ (Constant Heat Flux) การศึกษาจะพิจารณา ถึงสัดส่วนความลึกของร่องต่อระยะห่างแผ่นความร้อน (e/D) และการจัดรูปแบบแผ่นเซาะร่องที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Nusselt Number) และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Friction factor) โดยมีขอบเขตการศึกษาที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number) ตั้งแต่ช่วงระหว่าง 4,000 – 20,000 สัดส่วนความลึกของร่องต่อระยะห่างช่องขนานความร้อน (e/D) มีค่าเท่ากับ 0.20 การจัดระยะห่างแผ่นเซาะร่องวางตรงและเอียงกัน และระยะพิตต์คองที่เท่ากับ 40 มิลลิเมตร โดยผลที่ได้ จะทำการศึกษาเปรียบเทียบกับ การถ่ายเทความร้อนของแผ่นช่องขนานความร้อนผิวเรียบ ภายใต้สภาวะการทดสอบเดียวกัน จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มขึ้นของสัดส่วนความลึกของร่องต่อระยะห่างช่องขนาน (e/D) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพ การถ่ายเทความร้อนให้เพิ่มมากขึ้น แต่ค่าความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นก็มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน

Abstract

This paper presents the study of heat transfer enhancement in a ribbed channel with constant heat flux. Effects of Relative roughness height (e/D) and rib arrangement on heat transfer and friction loss in the ribbed channel are experimentally investigated. The scope of this experimental work is based on the Reynolds number at the inlet ranging from 4000 to 20000 ; Relative roughness height (e/D) of 0.20; and pitch length of 40 mm. The ribs used in the channel test section are placed in stagger and in-line arrangements. Experimental results obtained are compared with the results obtained from smooth plates under similar conditions. The experimental result reveals that the heat transfer rate and friction loss increase considerably with the rise of Reynolds number and the Relative roughness height (e/D).

© 2007 Department of Mechanical Engineering, KMITL. All rights reserved

Keywords: Artificial roughness; Heat transfer coefficient; Friction factor; Thermo-hydraulic performance

1. บทนำ

การเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของแผ่นความร้อนที่ได้เคยมีการศึกษาค้นคว้าโดย Taslim et al. [1] รายงานค่านีสมเชิลล์นัมเบอร์ที่จุดใดๆ ในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีความหยาบเนื่องจากมุมร่อง, รูปร่างร่องรูปตัววี และความไม่ต่อเนื่องแนวร่อง (แนวร่องตัววีมีทิศทางการไหลและมีทิศทางการไหลข้ามกับการไหลสลับกันตลอดหน้าตัด) บนผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้าม โดยให้ผิวท่อด้านหนึ่งถูกให้ความร้อนด้วยฟลักซ์ความร้อนคงที่ ในขณะที่ผิวท่อด้านอื่นๆ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความร้อน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมากที่สุดเมื่อแนวร่องตัววีมีทิศทางการไหล Rajendra Kawa [2] ได้

¹ ชื่ออังกฤษ "Heat exchanger with grooved"

² นักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สจล. ห้อง 3Q/1,3Q/2 รหัส 48015400, 48015446 และ 48015379 ตามลำดับ

³ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สจล., โทร. 0 2326 4197, อีเมล Kppongje@kmitl.ac.th

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการศึกษาค่าการเพิ่มสมรรถนะของช่องทางตัดสี่เหลี่ยมที่มีร่องขวางอยู่หนึ่งด้าน โดยครีที่ทดลองมีลักษณะเป็นร่องตรง ร่องรูปตัววีต่อเนื่อง 60 องศา, ร่องรูปตัววีแบบแยกส่วน 60 องศา และร่องทรงมุม 60 องศา โดยทำการทดลองที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ในช่วง 2,800 – 15,000 อัตราการส่วนความกว้างต่อความสูงแผ่นทดลองเท่ากับ 7.19-7.75 และอัตราส่วนระยะพิคตต่อความสูงแผ่นเซาะร่องเท่ากับ 10 ความลึกร่อง 3.4 มิลลิเมตร ความกว้างร่อง 6.58 มิลลิเมตร ถ่ายเทความร้อนชนิดคงที่ Constant Heat Flux โดยผลการทดลองพบว่าร่องรูปตัววีแบบแยกส่วน 60 องศา จะมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด และมีค่าตัวประกอบความเสียดทานน้อยที่สุด ส่วนร่องตรงจะมีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนน้อยที่สุด ส่วนและร่องรูปตัววีต่อเนื่อง จะมีตัวประกอบความเสียดทานมากที่สุด Giovanni Tanda [3] ได้ทำการศึกษาค่าการถ่ายเทความร้อนและคุณสมบัติการเสียดทานของแผ่นโซลาร์ฮีตเตอร์สี่เหลี่ยม ชนิดผิวรูปร่าง V-Shape ชนิดแยกส่วน โดยการศึกษาเป็นการศึกษาในช่วงค่าเรย์โนลด์ 8,900 – 28,500 ความขรุขระสัมพัทธ์ (e/D) 0.009, 0.15 ระยะพิคตสัมพัทธ์ (p/e) เท่ากับ 4,8,13.5 อัตราส่วนความสูงพิคตต่อความสูงแผ่นช่องขนาน (e/H) 0.15,0.25 จากการทดลองสรุปได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อความสูงแผ่นเซาะร่อง (Rib) มีค่าสูงขึ้น และแผ่นเซาะร่องมีลักษณะเป็นแบบแยกส่วน ระยะพิคตที่ 0.05 เมตรมีค่ามากกว่าระยะพิคตที่ 0.03 เมตร และที่การทดลองในช่วงดังกล่าวจะมีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมากกว่าแผ่นเรียบอยู่ประมาณ 300 เปอร์เซ็นต์ ส่วนสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Friction factor) มีแนวโน้มลดลงเมื่อความลึกของแผ่นเซาะร่องมีค่าลดลง แผ่นเซาะร่องมีลักษณะเป็นรูปตัววี และร่องมีลักษณะเป็นแบบแยกส่วน Benlu, Pei-Xue Jiang [4] ได้ทำการศึกษาค่าการถ่ายเทความร้อนและคุณสมบัติการเสียดทานของแผ่นโซลาร์ฮีตเตอร์สี่เหลี่ยม ชนิดร่องเอียงทำมุม 0 ถึง 90 องศา กับทิศทางการไหล โดยมีขอบเขตการศึกษาในช่วงอัตราการไหลอากาศ 0.001 – 0.0018 kg/s ระยะพิคต เท่ากับ 4 มิลลิเมตร ความลึกแผ่นเซาะร่อง 0.8 มิลลิเมตร กว้าง 1 มิลลิเมตร จากการทดลองพบว่า ที่มุมร่อง 60 องศาจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและแรงดันตกคร่อมมากที่สุดแต่พบว่าที่มุม 20 องศาจะให้ประสิทธิภาพโดยรวมของการถ่ายเทความร้อนดีที่สุด เมื่อศึกษาต่อที่มุมร่อง 20 องศาพบว่าที่ระยะพิคตน้อยลงจะทำให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและแรงดันตกคร่อมเพิ่มมากขึ้น และที่ระยะพิคต 1 และ 2 มิลลิเมตรจะให้ประสิทธิภาพรวมของการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดและมีค่าใกล้เคียงกัน

2. ทฤษฎี

การพิจารณาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของช่องขนานชนิดเซาะร่องจำเป็นต้องพิจารณา ทั้งในส่วนพลังงานที่ต้องใช้ในการขับเคลื่อนพัลลวม และการถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศที่ไหลผ่าน โดยพลังงานที่พัลลวมใช้ในการขับเคลื่อนอากาศให้ไหลผ่านแผ่นช่องขนานสามารถพิจารณาได้คือ

$$\dot{W}_m = Q\Delta p \quad (1)$$

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

โดยที่

\dot{W}_m	=	พลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนอากาศให้ไหลผ่านช่องขนาน, $Watt$
Q	=	อัตราการไหลของของไหล, m^3/s
Δp	=	ความดันตกคร่อมของของไหล, N/m^2
f	=	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน
ρ	=	ความหนาแน่นของของไหล, kg/m^3
L	=	ความยาวท่อ, m .
\bar{V}	=	ความเร็วเฉลี่ยของของไหล, m/s
D_h	=	เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก(Hydraulic diameter), m .

การสมดุลพลังงาน (กรณีการถ่ายเทความร้อนที่ผิวคงที่ (Constant Heat flux))

$$Q = mC_p(T_i - T_o) = hA_s(T_w - T_o) \quad (3)$$

โดยที่

Q	=	อัตราการถ่ายเทความร้อนที่อากาศได้รับ, $Watt$
M	=	อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ, kg/s
C_p	=	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ, $kJ/kg \cdot K$
T_i	=	อุณหภูมิอากาศด้านขาเข้า, $^{\circ}C$
T_o	=	อุณหภูมิอากาศด้านขาออก, $^{\circ}C$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้ง ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน, $W/m^2 \cdot K$ อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

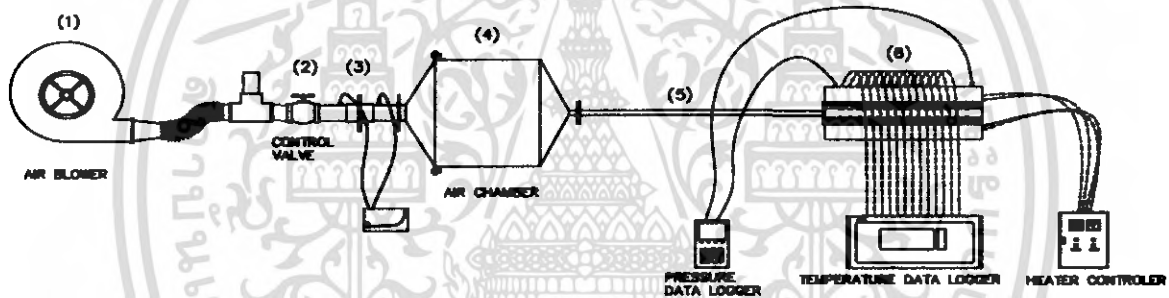
T_o	=	อุณหภูมิอากาศด้านขาออก, °C
T_w	=	อุณหภูมิผิวเฉลี่ยผนังร้อน, °C
T_f	=	อุณหภูมิของไหลเฉลี่ย, $(T_i + T_o)/2$, °C

3. อุปกรณ์ทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆตามรูปที่ (1) ด้านล่าง โดยใช้พัดลม (1) (Blower) ขนาดพิกัด 1.5 kW เป็นแหล่งกำเนิดลม ซึ่งควบคุมปริมาณลมไหลเข้าชั้นงานทดสอบโดยการปรับหัววาล์ว (2) โดยปริมาณลมแต่ละครั้งของการทดสอบจะถูกกำหนดโดยค่าความดันตกคร่อมแผ่น Orifice (3) อากาศที่ไหลผ่านเข้าสู่ชุดทดลองจะต้องไหลผ่านกล่องลม (4) ซึ่งมีหน้าที่จัดระเบียบการไหลของอากาศให้มีการไหลปั่นป่วนน้อยที่สุด และให้ไหลผ่านท่อปรับสภาพการไหล (5) เพื่อให้อากาศที่ไหลก่อนเข้าสู่ชุดทดลองมีลักษณะเป็น Fully Develop และไหลเข้าชั้นงานทดสอบ (6) โดยอุปกรณ์ให้ความร้อนคือ Heater controller เป็นตัวป้อนพลังงานไฟฟ้าแก่ Heater

ชิ้นงานที่ทดสอบประกอบด้วยช่องขนานอลูมิเนียมที่มีร่อง ขนาดกว้าง 200 มิลลิเมตร ยาว 650 มิลลิเมตร และระยะความสูงของช่องขนาน (D) เท่ากับ 20 มิลลิเมตร โดยลักษณะการเจาะร่องภายในช่องขนาน มีขนาดความสูง (e) เท่ากับ 5 มิลลิเมตร และกว้าง (f) เท่ากับ 10 มิลลิเมตร และระยะพิทช์ (P) คงที่เท่ากับ 40 มิลลิเมตร โดยแผ่นช่องขนานดังกล่าวถูกทำให้ร้อนด้วย Heater ไฟฟ้าขนาด 1,000 วัตต์ ติดตั้งประกบแผ่นคู่ขนานทั้ง 2 ด้าน โดยอุณหภูมิอากาศที่ไหลเข้าออก และอุณหภูมิผิวภายในถูกวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิล Type K จำนวนรวมทั้งสิ้น 12 จุด โดยบันทึกค่าที่วัดได้ลงอุปกรณ์ FLUKE 3680A ส่วนค่าความดันตกคร่อมแผ่นช่องขนานตรวจบันทึกค่าที่ได้ลงอุปกรณ์ TESTO 350 M/XL , TESTO 454

ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบจะต้องมีการหุ้มฉนวนใยแก้วกันความร้อนเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนจากแผ่น Heater ไหลออกสู่บรรยากาศภายนอก



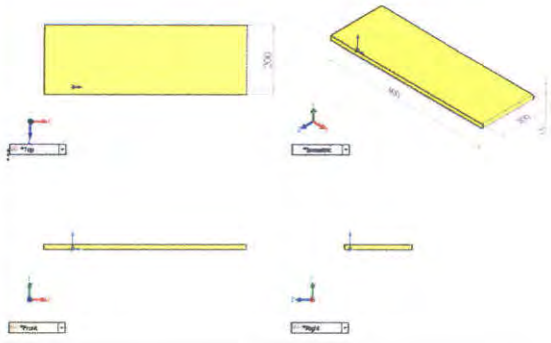
รูปที่ (1) แสดงอุปกรณ์การทดลอง

4. วิธีการทดลอง

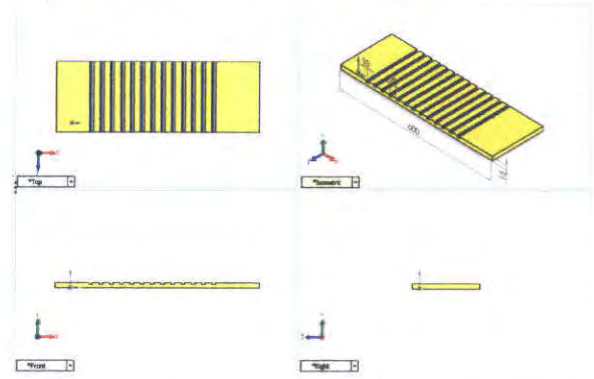
การทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของแผ่นช่องขนานที่มีการเจาะร่อง โดยทดลองที่ขนาดความสูงแผ่นช่องขนานที่ (D) 20 มิลลิเมตร โดยลักษณะแผ่นและร่องจะถูกติดตั้งในลักษณะตรงและเอียง และเสริมแผ่นครีตามรูปที่ (2)

การทดลองทำการเปิดพัดลม จากนั้นปรับปริมาณการไหลของลมให้ได้ตามที่ต้องการ โดยควบคุมความเร็วลมให้อยู่ในช่วง 3.64364 ถึง 9.7240 เมตรต่อวินาที ซึ่งที่ความเร็วดังกล่าวครอบคลุมค่าตัวเลขเรย์โนลด์ส์ให้มีค่าอยู่ระหว่าง 7000 ถึง 23,000 ในแต่ละช่วงความเร็วลมที่ทดสอบ จะต้องรอให้อุณหภูมิผิวภายในแผ่นช่องขนานและอุณหภูมิอากาศเข้าออก มีค่าคงที่ก่อนจะทำการบันทึกค่า โดยอุณหภูมิแผ่นช่องขนานทำการตรวจวัดทั้งหมด 10 จุด และอีก 2 จุดสำหรับอุณหภูมิอากาศเข้าและออกแผ่นช่องขนาน ในขณะที่เดียวกันก็ทำการบันทึกค่าความดันตกคร่อมแผ่นช่องขนานดังกล่าวด้วย

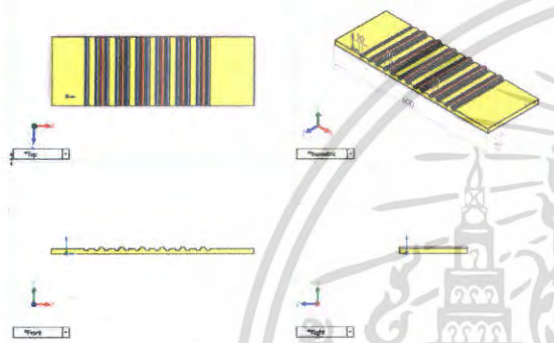
1. ช่องขนานแผ่นเรียบ (Smooth plate)



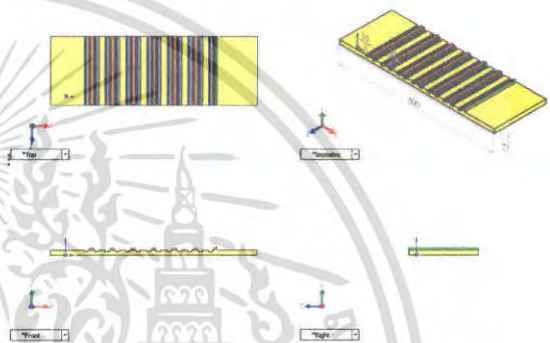
2. ช่องขนานแบบเซาะร่องตรง (Inline-Grooved)



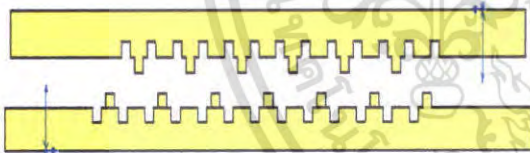
3. ช่องขนานเซาะร่องตรงเสริมครีบริบ (Inline-Grooved Inline-Rib)



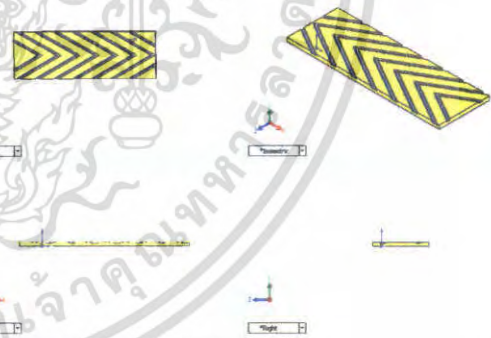
4. ช่องขนานเซาะร่องตรงเสริมครีบริบ (Inline-Rib Double-Grooved)



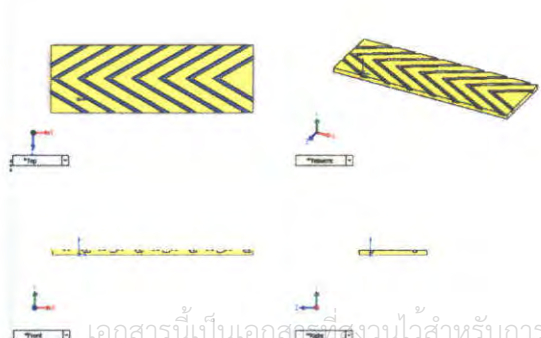
5. ช่องขนานเซาะร่องตรงเสริมครีบริบวางเยื้อง (Inline-Grooved stagger-Rib)



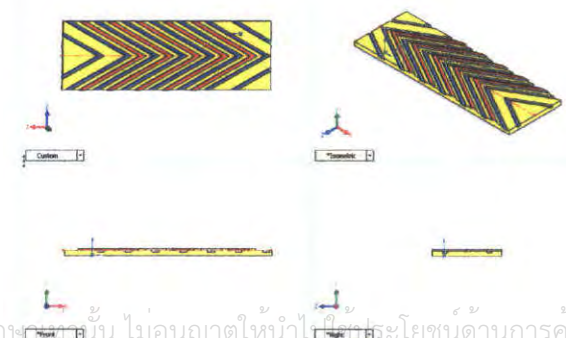
6. ช่องขนานเซาะร่องตัววี (V-Downstream Inline-Grooved)



7. ช่องขนานเซาะร่องตัววี (V-Upstream Inline-Grooved)

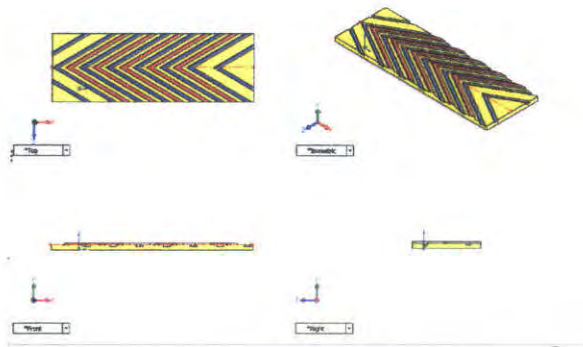


8. ช่องขนานเซาะร่องตัววีเสริมครีบริบ (V-Downstream Inline-Grooved)

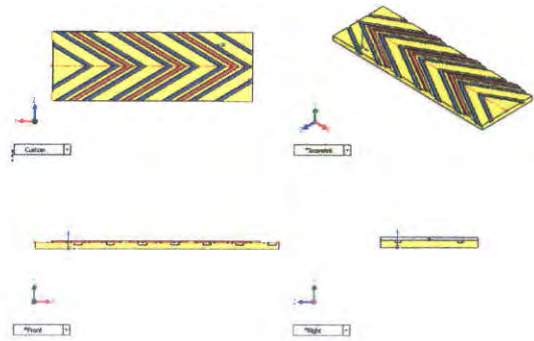


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเผยแพร่ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 รูปที่ (2) แสดงการจัดวางแผ่นเซาะร่อง

9. ช่องขนานเขาวงกตตัววีเสริมครีบริบ (V-Upstream Inline-Grooved rib)



10. ช่องขนานเขาวงกตตัววีเสริมช่องเว้าช่อง (V-Downstream Inline rib double Grooved)



11. ช่องขนานเขาวงกตตัววีเสริมช่องเว้าช่อง (V-Upstream Inline rib double Grooved)



12. ช่องขนานเขาวงกตตัววีเสริมครีบริบวางเยื้อง (V-Downstream Inline-Grooved Stagger rib)

แผ่นล่าง

แผ่นบน



13. ช่องขนานเขาวงกตตัววีเสริมครีบริบวางเยื้อง (V-Upstream Inline-Grooved Stagger rib)

แผ่นล่าง

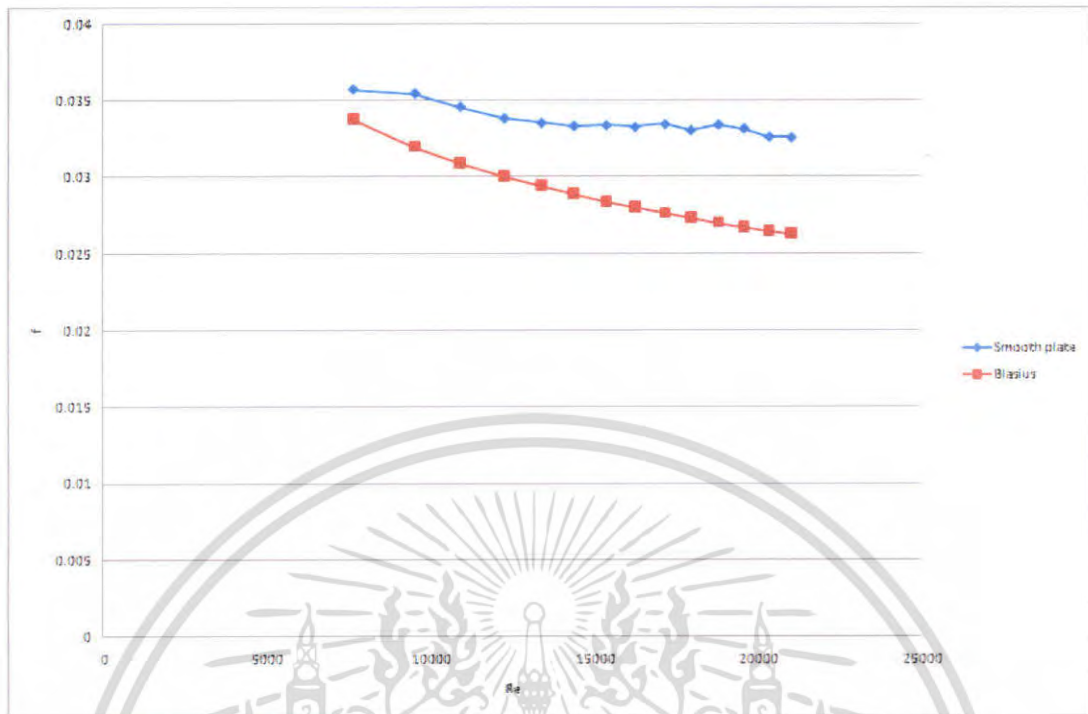
แผ่นบน



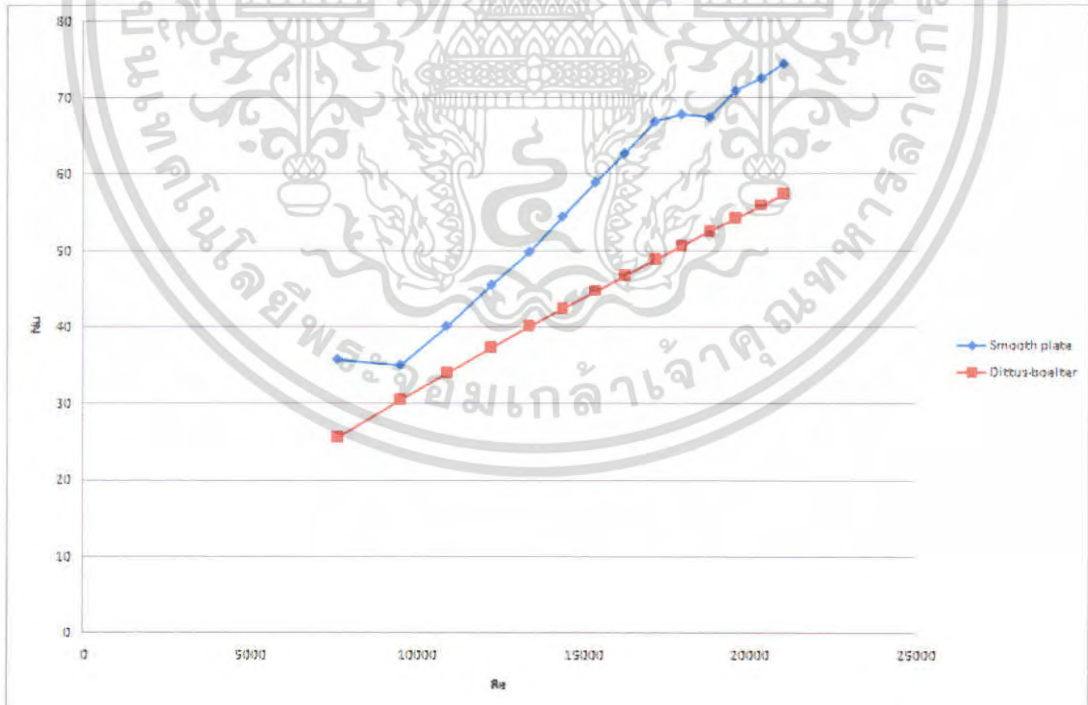
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



5.ผลการทดลอง

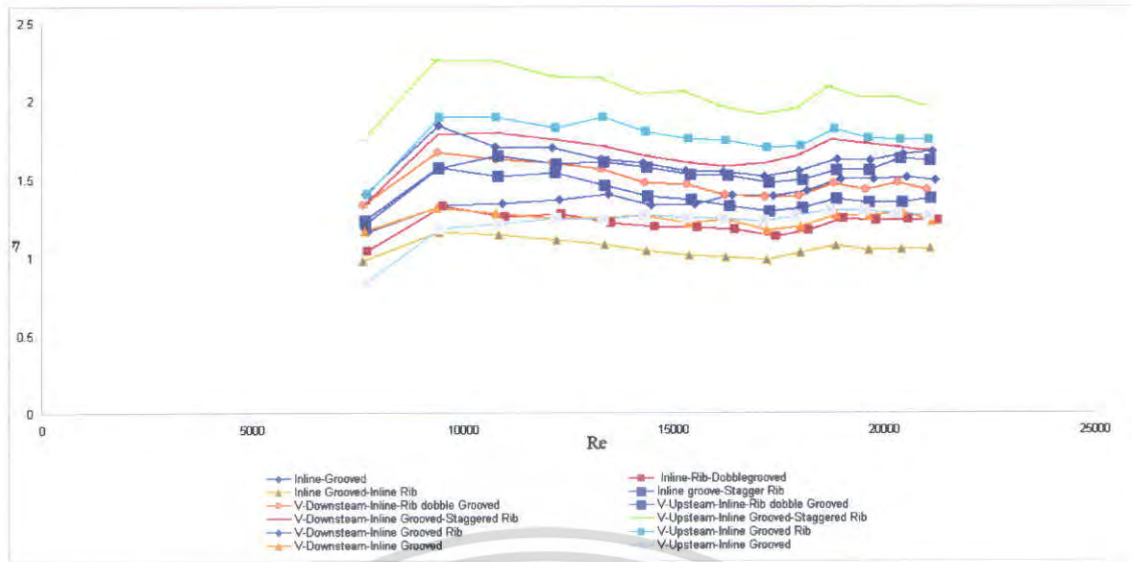


กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่าง f และ Re ของแผ่นเรียบและค่าทางทฤษฎีของ Blasius

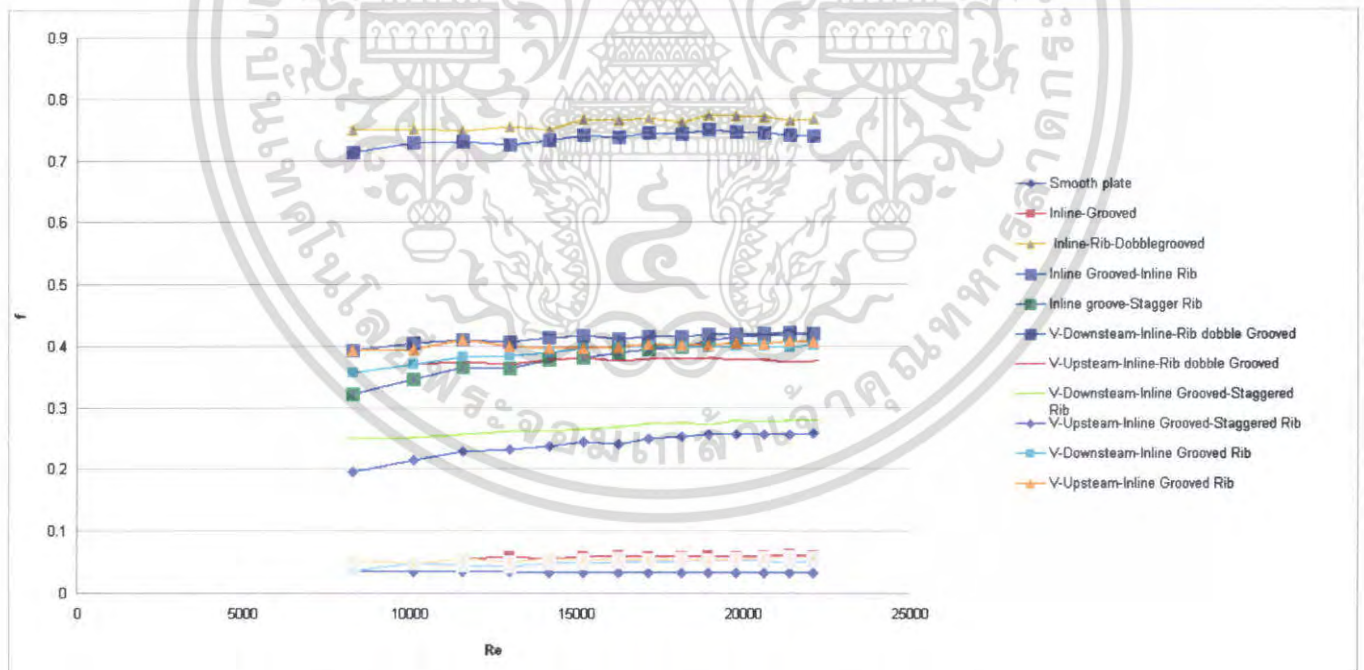


กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่าง Nu และค่า Re ของแผ่นเรียบและค่าทางทฤษฎีของ Dittus-boelter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

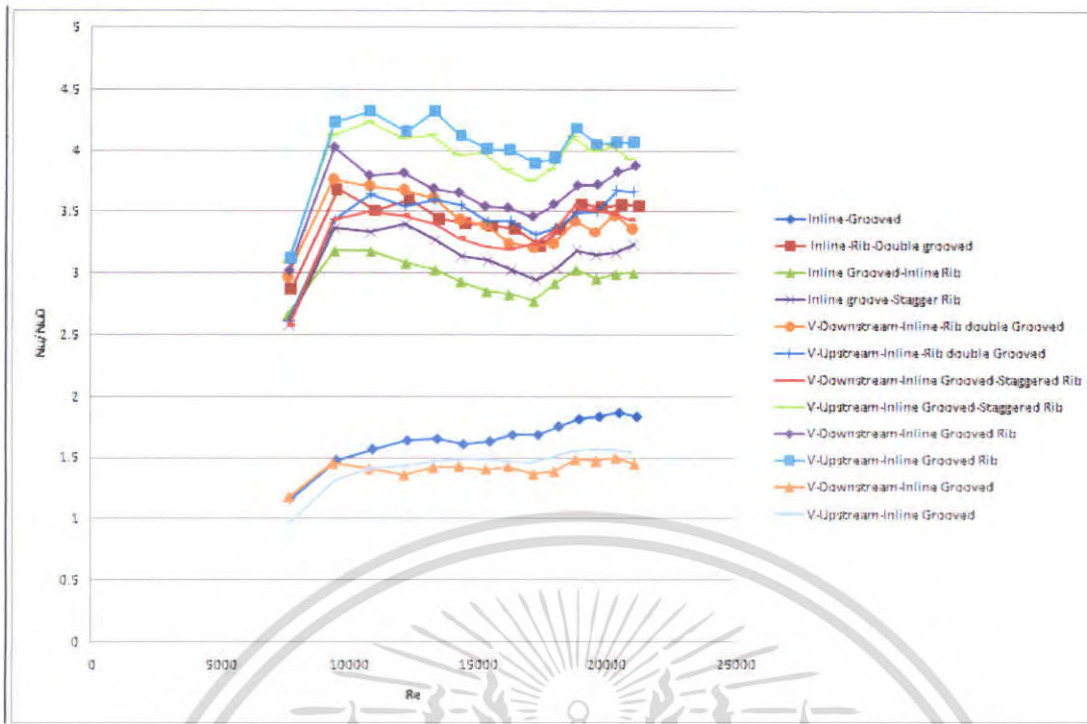


จากรูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพการเซาะร่อง ; η และค่าเลขเรย์โนลด์(Re)ในช่วง 7,000-23,000 ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเซาะร่องตรง,เซาะร่องรูปตัววีและแบบเซาะร่องตรงเสริมครีบริบ,เซาะร่องรูปตัววีเสริมครีบริบ จากกราฟพบว่าเมื่อค่าเลขเรย์โนลด์(Re)เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าประสิทธิภาพการเซาะร่องเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และจากกราฟทำให้ทราบว่าชุดแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ V-Upsteam-Inline Grooved-Staggered Rib มีค่าประสิทธิภาพการเซาะร่องมากที่สุด เนื่องมาจากชุดแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ V-Upsteam-Inline Grooved-Staggered Rib มีค่า Nu/Nu_0 สูงแต่มีค่า f/f_0 ต่ำ และชุดแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Inline Grooved-Inline Rib มีค่าประสิทธิภาพการเซาะร่องน้อยที่สุดเนื่องมาจากชุดแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Inline Grooved-Inline Rib มีค่า Nu/Nu_0 ต่ำแต่มีค่า f/f_0 สูง

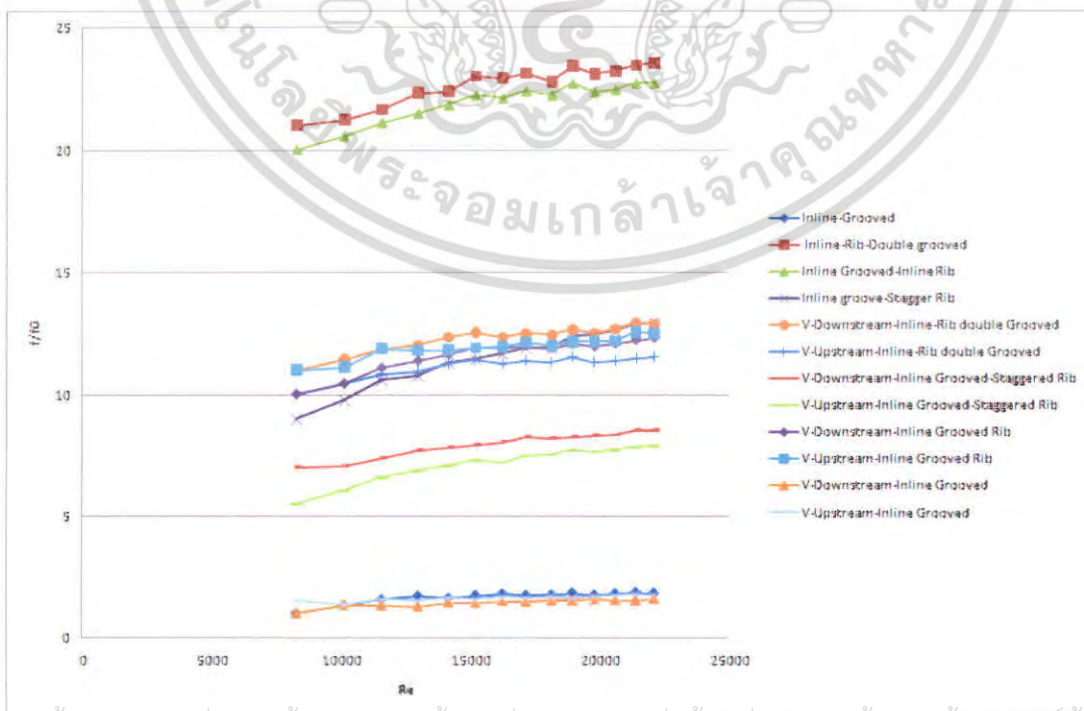


จากรูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ; (f) และค่าเลขเรย์โนลด์(Re)ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเซาะร่องตรง,เซาะร่องรูปตัววีและแบบเซาะร่องตรงเสริมครีบริบ,เซาะร่องรูปตัววีเสริมครีบริบ จากกราฟทำให้ทราบว่าชุดแลกเปลี่ยนความร้อน Smooth plate มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานน้อยที่สุดคืออยู่ที่ 0.035696 และชุดแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Inline Rib double grooved มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมากที่สุดคืออยู่ที่ 0.7667

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จากรูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของแผ่นเรียบ ; (N/N_0) และค่าเลขเรย์โนลด์ ; (Re) โดยค่า (N/N_0) ของกลุ่มที่น้อยคือ V-Downstream-Inline Grooved, V-Upstream-Inline Grooved, In-line-Grooved สังกะว่ากลุ่มของชุดการทดลองแบบเซาะร่องที่ไม่มีการเสริมครีจะมีค่า (N/N_0) น้อย ซึ่งเป็นผลเสียต่อการถ่ายเทความร้อน แต่ข้อดีที่สังเกตได้คือจะมีค่า (f/f_0) น้อยตามไปด้วยจึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การเสียดทานน้อยเช่นกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของแผ่นเรียบ ; (f/f_0) และค่าเลขเรย์โนลด์ ; (Re)

โดยค่า (f/f_0) จะแบ่งกลุ่มกันเป็นชั้นโดยกลุ่มที่มีค่า (f/f_0) น้อยที่สุดคือ V-Downstream-Inline Grooved, V-Upstream-Inline Grooved, Inline-Grooved สาเหตุมาจากค่า f ของชุดการทดลองเหล่านี้มีค่าใกล้เคียงกับค่า f ของแผ่นเรียบ

โดยกลุ่มที่มี f/f_0 คือ Inline-Rib-Dobblegrooved, Inline Grooved-Inline Rib, ร่องตรงเสริมขีดหน้า โดยค่า f ของชุดการทดลองเหล่านี้มีค่ามากกว่า f ของแผ่นเรียบมาก โดยค่าเหล่านี้เป็นผลมาจาก Pressdrop ที่มีมากจึงทำให้เกิดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมากตามไปด้วย

6. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองชุดแรกเปลี่ยนความร้อนช่องทางแบบเจาะร่องพบว่า ร่องภายในช่องทางสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้เพิ่มขึ้นได้ โดยการเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะขึ้นอยู่กับ รูปแบบการไหลของอากาศภายในช่องทาง โดยการไหลแบบปั่นป่วนจะทำให้ค่า Nu มีค่าสูงขึ้น รวมถึงการจัดรูปแบบการเจาะร่องภายในช่องทางโดยแผ่นเจาะร่องรูปตัววีจะมีแนวโน้มของค่า Nu สูง กว่าร่องตรง

ส่วนค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นภายในช่องทางที่เจาะร่องพบว่าจะมีค่าลดลงเมื่อค่า Re มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนรูปแบบการจัดรูปแบบแผ่นเจาะร่องตรงและแผ่นเจาะร่องรูปตัววีพบว่าแผ่นเจาะร่องที่ได้มีการเพิ่มครีบบนเข้าไปจะมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงกว่าแผ่นเจาะร่องที่ไม่ได้เพิ่มครีบ แต่แผ่นเจาะร่องที่มีการเพิ่มครีบก็จะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นตามไปด้วย โดยจะเห็นได้จากกราฟ Nu กับ Re ที่ชุดการทดลองแบบ V – Upstream inline-grooved stagger rib จะมีค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์สูงแต่เนื่องจากมีค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์สูงเพราะได้มีการเพิ่มครีบจึงทำให้ค่า f สูงตามไปด้วย และจากกราฟของ η ทำให้ทราบว่า V – Upstream inline-grooved stagger rib มีสมรรถนะดีที่สุดเนื่องจากมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูง แต่มีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ จึงทำให้มีสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนดี ส่วน Inline-grooved inline rib มีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนอยู่ในระดับปานกลางแต่มีค่า f สูงจึงทำให้มีสมรรถนะต่ำที่สุด

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเครื่องมือตรวจวัด และอุปกรณ์บันทึกข้อมูลต่างๆ ที่จำเป็นสำหรับการทดลอง และ ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์ ที่ให้คำปรึกษาในทุกเรื่อง

เอกสารอ้างอิง

- [1] M.E. Taslim, T. Li, D.M. Kercher, 1996. Experimental heat transfer and friction in channels roughened with angled, V-shaped, and discrete ribs on two opposite walls, ASME J. Turbomachinery Vol.118, , pp. 20-28.
- [2] Rajendra Karwa, Experimental, 2003. Studies of Augmented Heat Transfer and Friction in Asymmetrically Heated Rectangular Ducts with Ribs on The Heated wall in Transverse, Inclined, V-Continuous and V-Discrete Pattern, Int. Comm Heat Mass Transfer Vol. 30 No.2, pp.241-250
- [3] Giovanni Tanda, 2004 . Heat transfer in rectangular channels with transverse and V-shaped broken ribs, Int J of Heat and Mass Transfer 47 pp.229-243
- [4] Benlu, Pei-Xue Jiang, 2005. Experimental and numerical investigation of convection heat transfer in a rectangular channel with angled ribs. Int J of Experimental Thermal and Fluid and science
- [5] พงษ์เจต พรหมวงศ์ “การถ่ายเทความร้อน” ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2542

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้