

การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อรูปสี่เหลี่ยมโดยใช้แผ่นบางรูปตัว Z

HEAT TRANSFER AUGMENTATION IN A RECTANGULAR DUCT WITH
Z-SHAPED BAFFLES



T128567



วพ.

ว 414 D

ที่ en

เลขหมู่..... 2005
เลขทะเบียน..... 128567
วัน, เดือน, ปี..... 5 11 2556

b. 12553001
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2555

KMITL-2012-EN-D-058-156

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HEAT TRANSFER AUGMENTATION IN A RECTANGULAR DUCT WITH
Z-SHAPED BAFFLES



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ KMITL-2012-EN-D-058-156 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2012

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อรูปสี่เหลี่ยมโดยใช้แผ่นบางรูปตัว Z
นักศึกษา	นายภาคภูมิ ศรีธรรมรินทร์
รหัสนักศึกษา	49060101
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2555
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในช่องขนานหรือท่อสี่เหลี่ยมโดยใช้แผ่นบางรูปตัว Z เป็นอุปกรณ์ช่วยสร้างการไหลหมุนวนในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน โดยการให้สภาวะในการทดสอบเป็นแบบพลักซ์ความร้อนคงที่ที่ผิวท่อด้านบน อากาศเป็นของไหลภายในท่อทดสอบที่มีความสูง (H) = 30 mm และมีอัตราส่วนบ่งบอกลักษณะความกว้างต่อความสูง (W/H , AR) เท่ากับ 10 การทดลองทั้งหมดกระทำในช่วงเลขเรย์โนลด์ (Re) ตั้งแต่ 4400 ถึง 20,400 โดยศึกษาการถ่ายเทความร้อนในพจน์เลขนัสเซิลท์ (Nu) และการสูญเสียความดันในพจน์ของตัวประกอบเสียดทาน (f) ผลที่ได้จากทั้งสองตัวแปรจะนำมาคำนวณเป็นสมรรถนะความร้อน (TEF) ของการใช้ครีบทัว Z ในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน งานนี้ได้แบ่งส่วนที่จะศึกษาเป็น 2 ส่วนหลักดังนี้

ส่วนแรกเป็นการศึกษาการติดตั้งบางบนผนังด้านที่ให้ความร้อนเท่านั้นซึ่งประกอบไปด้วยครีบบางเอียงแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffles, DB) และครีบบางแบบซิกแซก (zigzag, Z) ในส่วนของครีบบาง Z ยังมีการศึกษาจัดวางครีบบางในลักษณะต่างๆซึ่งประกอบไปด้วยการจัดวางแบบแถวตรงกัน (in-phase) และวางแบบแถวเยื้องกัน (out-phase) การเปลี่ยนมุมปะทะของครีบบางทิศทางไหลหลัก 3 มุม (α) คือ 30°, 45° และ 60° นอกจากนี้ยังมีการปรับมุมการวางของแถวที่กระทำกับทิศทางไหล 4 มุม (θ) คือ 30°, 45°, 60° และ 90° โดยการทดลองทั้งหมดได้เปลี่ยนความสูงครีบบาง (e) 4 ค่าคือ $e/H = 0.05, 0.1, 0.2$ และ 0.3 และระยะพิตช์ (P) ทั้งหมด 4 ระยะคือ $P/H = 1.0, 1.5, 2.0$ และ 3.0

ส่วนที่สองเป็นการศึกษาการวางครีบทัว Z บนผนังท่อบน-ล่าง การศึกษาจะกระทำโดยเปลี่ยนลักษณะการวางครีบบางบนผนังทั้งสอง ซึ่งมีลักษณะการวาง 4 รูปแบบดังนี้ ครีบบางบน-ล่างวางตรงกัน (Z), ครีบบางบน-ล่างวางกลับกัน (X), ครีบบางบน-ล่างเหมือนกันแต่แถวเยื้องกัน (ZS) และครีบบางบน-ล่างวางกลับกันแต่แถวเยื้องกัน (XS) โดยการจัดวางครีบบางทั้งหมดจะทำการเปลี่ยนความสูงครีบบาง 3 ค่าคือ $e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3 และระยะพิตช์ 3 ระยะคือ $P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่า TEF มีค่าสูงสุดที่ค่า Re ต่ำและมีค่าต่ำที่ค่า Re สูงสุด โดยครีบทัว Z มุม $\alpha = 45^\circ$ ติดบนผนังบน-ล่างและจัดวางแบบ XS ที่ $e/H=0.1$ และ $P/H=1.5$ ให้ค่า TEF สูงที่สุดอยู่ในช่วง 2.24-3.63 ซึ่งขึ้นอยู่กับค่า Re เมื่อเปรียบเทียบกับกรังการจัดวางแบบอื่นๆ การวางครีบบาง Z ในแบบ ZS, X และ Z ให้ค่า TEF อยู่ในช่วง 2.08-3.37, 1.92-3.12 และ 1.78-2.89 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	HEAT TRANSFER AUGMENTATION IN A RECTANGULAR DUCT WITH Z-SHAPED BAFFLES
Student	Mr. Parkpoom Sriromreun
Student ID.	49060101
Degree	Doctor of Engineering
Program	Mechanical Engineering
Year	2012
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Pongjet Promvonge

ABSTRACT

The thesis presents a study on heat transfer enhancement in a constant heat-fluxed rectangular channel or parallel-plate channel with Z-shaped baffles used as a vortex generator. The tested channel having a constant heat flux applied only to the upper wall has an aspect ratio, $AR = 10$ and height, $H = 30$ mm and air is employed as the test fluid. The airflow rate is presented in terms of Reynolds numbers based on the hydraulic diameter of the channel in a range of 4400 to 20,400. The heat transfer and the pressure drop in the tested channel are in the form of Nusselt number (Nu) and friction factor (f), respectively. The relation of Nu with f values is analyzed to obtain the thermal performance enhancement factor (TEF). The present study in the thesis is divided into two sections as follows:

Firstly, discrete inclined baffles (DB) and zigzag baffles (Z) placed on the heated wall only at similar baffle height and pitch are investigated. For the Z-shaped baffle, two baffle arrangements: in-phase and out-phase arrays are examined. The baffle study in this section is focused on three baffle attack angles (α) with the main flow direction ($\alpha = 30^\circ, 45^\circ$ and 60°) including four array attack angles ($\theta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ and 90°). Four baffle heights ($e/H = 0.05, 0.1, 0.2$ and 0.3) and pitches ($P/H = 1.0, 1.5, 2.0$ and 3.0) for all cases mentioned are also studied.

Secondly, the study is emphasized on Z-baffles mounted on the upper and lower walls of the tested channel. There are four Z-baffle arrangements: inline Z-baffles (Z), inline Z- and reversed Z-baffles (X), staggered Z-baffles (ZS) and staggered Z- and reversed Z-baffles (XS). For all cases, three different baffle heights ($e/H = 0.1, 0.2$ and 0.3) and pitches ($P/H = 1.5, 2.0$ and 3.0) are introduced.

The experimental result reveals that the maximum and minimum TEF values for using the Z-baffle are at the lowest and highest Re values, respectively. The Z-baffle with $\alpha = 45^\circ$ placed on both upper and lower walls and the XS arrangement at $e/H = 0.1, P/H = 1.5$ provides the highest TEF in a range of 2.24-3.63. In comparison, other Z-baffles with ZS, X and Z arrangements yield the TEF ranging from 2.08-3.37, 1.92-3.12 and 1.78-2.89, respectively.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณา และช่วยเหลือจากหลายๆ ท่าน ประกอบไปด้วย รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้ความกรุณา และช่วยเหลือในการให้คำแนะนำในการทำ และนำเสนอวิทยานิพนธ์นี้ ตลอดจนให้ความรู้ความเข้าใจในเนื้อหาที่ใช้ในการจัดทำ การเรียนในรายวิชาต่างๆ ตลอดหลักสูตร รวมถึงการเขียนบทความวิชาการในวารสารวิชาการ และงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ชินรัักษ์ เขียรพงษ์, รศ.ดร.จำลอง ปราบแก้ว, รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข และ รศ.ดร.สมิทธิ เอี่ยมสะอาด กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้ความกรุณาชี้แนะ และแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ รวมถึงประสพการณ์ และความรู้ในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกๆ ท่าน ที่ให้ความรู้ความเข้าใจในวิชาความรู้ที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์

งานวิจัยนี้สำเร็จลงไปได้ด้วยดี จากการได้รับทุนสนับสนุนการวิจัย จากกองทุนสนับสนุนการวิจัย(สกว.) ผ่านโครงการเครือข่ายเชิงกลยุทธ์เพื่อการผลิตและพัฒนาอาจารย์ในสถาบันอุดมศึกษา พ.ศ. 2549 ประเภททุนศึกษาระดับปริญญาเอกภายในประเทศ

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ห้องปฏิบัติการ Thermofluid & CFD และน้องร่วมสถาบันที่เป็นกำลังใจ และคอยช่วยเหลือ พิจิตรกร กนกนัยการ สำหรับคำแนะนำ ความรู้ต่างๆ ดร.ธีรพัฒน์ ชมภูคำ ดร.สมพล สกุลหลง และประธาน ศรีชัยสำหรับขอแนะนำความช่วยเหลือในการทดลอง การคำนวณและการทำเล่ม สมบัติ ทำนา และดร.วิชาดา เจษฎารัตนชัย สำหรับความรู้ และคำแนะนำในการใช้โปรแกรมสำหรับการคำนวณหาลักษณะการไหล และการถ่ายเทความร้อนของแผ่นทดสอบ ภาณุวัฒน์ หุ่นพงษ์ ช่วยเหลือในการทำการทดลอง สุริยา โชคเพิ่มพูน, สุภัทรชัย สุวรรณพันธุ์, วิษณุ อำไพจิตร และกิตติชัย ดวงตา คำ สำหรับความช่วยเหลืออย่างดีตลอดมา

ที่สำคัญที่สุดขอขอบคุณครอบครัวของข้าพเจ้า ภรรยา และครอบครัวของภรรยาที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกเรื่อง คอยช่วยเหลือในด้านต่างๆ ทั้งในการดำเนินชีวิตประจำวัน การเรียน และการทำวิทยานิพนธ์

ภาคภูมิใจ ศรีธรรมรินทร์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	IX
สารบัญรูป	XI
รายการคำย่อและสัญลักษณ์	XIX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	3
1.5 โครงร่างวิทยานิพนธ์	3
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์	5
2.1 บทนำ	5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.3 แนวทางการศึกษาวิจัย	15
บทที่ 3 ทฤษฎี	17
3.1 บทนำ	17
3.2 กลศาสตร์ของไหล	17
3.2.1 สภาวะการไหล	17
3.2.2 ความเร็วเฉลี่ย	18
3.2.3 การเปลี่ยนแปลงความดันและตัวประกอบเสียดทานในการไหล แบบปรับตัวเต็มที่	19
3.3 การถ่ายเทความร้อน	20
3.3.1 อุณหภูมิเฉลี่ย	20
3.3.2 สภาวะการปรับตัวเต็มที่	21
3.3.3 การสมดุลของพลังงาน	22
3.3.4 สหสัมพันธ์การพาความร้อน สำหรับท่อที่ไม่กลม	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.5 สมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน	24
3.4 การสร้างสมการสหสัมพันธ์ด้วยรีเกรสชันเส้นตรงแบบหลายตัวแปร.....	25
บทที่ 4 การออกแบบอุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	27
4.1 บทนำ.....	27
4.2 การออกแบบอุปกรณ์และชุดทดลอง	27
4.2.1 พัดลม.....	27
4.2.2 ความยาวท่อทางเข้าชุดทดลอง	28
4.3 การเตรียมอุปกรณ์ในการทดลอง	29
4.3.1 ชุดทดลองท่อแลกเปลี่ยนความร้อนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า	29
4.3.2 แหล่งจ่ายอากาศ	29
4.3.3 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ.....	31
4.3.4 ถังพักลม.....	31
4.3.5 อุปกรณ์ควบคุมฟลักซ์ความร้อนของแผ่นฮีตเตอร์.....	32
4.3.6 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ	32
4.3.7 เครื่องวัดความดันตกคร่อม.....	33
4.3.8 อุปกรณ์วัดความเร็วของอากาศ	34
4.4 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง.....	34
4.4.1 อุปกรณ์ชุดทดลอง.....	34
4.4.2 ครีบ.....	36
4.5 วิธีการทดลอง	41
4.6 การวิเคราะห์ข้อมูล	42
บทที่ 5 ครีบบาง แบบซิกแซก (zigzag, Z) มุม 45° บนผนังด้านเดียว.....	44
5.1 บทนำ.....	44
5.2 ผลการทวนสอบท่อผนังเรียบ	45
5.2.1 เลขนัสเซิลท์ (Nu).....	45
5.2.2 ตัวประกอบเสียดทาน (f).....	45
5.3 ครีบบางวางลักษณะเอียง แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffles, DB) บนผนังด้านเดียว.....	46
5.3.1 ความสูง ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3).....	48
5.3.2 ระยะพิตช์ ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0)	49
5.3.3 ตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อน (TEF)	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.4 ครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางตรงกัน (Z-in-phase)	50
5.4.1 ความสูง ($e/H = 0.05, 0.1, 0.2$ และ 0.3).....	50
5.4.2 ระยะพิตช์ ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0)	53
5.4.3 ตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อน (TEF)	53
5.5 ครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางเอียงกัน (Z-out-phase).....	54
5.5.1 ความสูง ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3).....	54
5.5.2 ระยะพิตช์ ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0)	56
5.5.3 ตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อน (TEF)	57
5.6 ครีบบางรูปตัว Z ที่มุมของแถวต่างกัน (θ).....	57
5.7 การเปรียบเทียบลักษณะครีบบางที่ทำมุม 45° บนผนังด้านเดียว	60
5.8 สรุป	64
บทที่ 6 ครีบบาง แบบซิกแซก (zigzag, Z) มุม 30° บนผนังด้านเดียว.....	66
6.1 บทนำ	66
6.2 ครีบบางวางลักษณะเอียง แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffles, DB) บนผนังด้านเดียว.....	67
6.2.1 ความสูง ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3).....	67
6.2.2 ระยะพิตช์ ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0)	69
6.2.3 ตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อน (TEF)	70
6.3 ครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางตรงกัน (Z- in-phase).....	70
6.3.1 ความสูง ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3).....	72
6.3.2 ระยะพิตช์ ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0)	73
6.3.3 ตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อน (TEF)	73
6.4 ครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางเอียงกัน (Z-out-phase).....	74
6.4.1 ความสูง ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3).....	74
6.4.2 ระยะพิตช์ ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0)	76
6.4.3 ตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อน (TEF)	77
6.5 การเปรียบเทียบลักษณะครีบบางที่ทำมุม 30° บนผนังด้านเดียว	77
6.6 การเปรียบเทียบลักษณะครีบบางที่ทำมุม 30° กับ 45° บนผนังด้านเดียว.....	81
6.7 สรุป	83
บทที่ 7 ครีบบาง แบบซิกแซก (zigzag, Z) มุม 60° บนผนังด้านเดียว.....	84
7.1 บทนำ	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

7.2 ครีบบางวางลักษณะเอียง แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffles, DB) บนผนังด้านเดียว	85
7.2.1 ความสูง ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3)	85
7.2.2 ระยะพิตช์ ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0)	87
7.2.3 ตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อน (TEF)	88
7.3 ครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางตรงกัน (Z- in-phase)	88
7.3.1 ความสูง ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3)	89
7.3.2 ระยะพิตช์ ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0)	90
7.3.3 ตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อน (TEF)	91
7.4 ครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางเยื้องกัน (Z-out-phase)	92
7.4.1 ความสูง ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3)	92
7.4.2 ระยะพิตช์ ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0)	94
7.4.3 ตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อน (TEF)	95
7.5 การเปรียบเทียบลักษณะครีบบางที่ทำมุม 60° บนผนังด้านเดียว	95
7.6 การเปรียบเทียบลักษณะครีบบางที่ทำมุม $30^\circ, 45^\circ$ และ 60° บนผนังด้านเดียว	99
7.7 การสร้างสมการสหสัมพันธ์ครีบบางที่ทำมุม 45° บนผนังด้านเดียว	101
7.8 สรุป	103
บทที่ 8 ครีบบาง แบบซิกแซก (zigzag, Z) มุม 45° บนผนังบนล่าง	105
8.1 บทนำ	105
8.2 ครีบบางวางลักษณะซิกแซก ติดครีบบน-ล่างวางกลับกัน (X)	106
8.2.1 ความสูง ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3)	106
8.2.2 ระยะพิตช์ ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0)	108
8.2.3 ตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อน (TEF)	109
8.3 ครีบบางวางลักษณะซิกแซก ครีบบน-ล่างวางตรงกัน (Z)	110
8.3.1 ความสูง ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3)	110
8.3.2 ระยะพิตช์ ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0)	112
8.3.3 ตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อน (TEF)	113
8.4 ครีบบางวางลักษณะซิกแซก ครีบบน-ล่างวางกลับกันแต่แถวเยื้องกัน (XS)	113
8.4.1 ความสูง ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3)	114
8.4.2 ระยะพิตช์ ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0)	116
8.4.3 ตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อน (TEF)	116
8.5 ครีบบางวางลักษณะซิกแซก ครีบบน-ล่างเหมือนกันแต่แถวเยื้องกัน (ZS)	117

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
8.5.1 ความสูง ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3)	117
8.5.2 ระยะพิตช์ ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0)	120
8.5.3 ตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อน (TEF)	120
8.6 การเปรียบเทียบลักษณะครีบบางที่ทำมุม 45° บนผนังบนล่าง	121
8.7 การเปรียบเทียบลักษณะครีบบางที่ทำมุม 45° บนผนังด้านเดียว และบนผนังบนล่าง ...	125
8.8 การสร้างสมการสหสัมพันธ์ครีบบางที่ทำมุม 45° ครีบบน-ล่างวางกลับกันแต่แถว เยื้องกัน (XS)	126
8.8 สรุป	128
บทที่ 9 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	129
9.1 บทนำ	129
9.2 ครีบบางบนผนังด้านเดียว	129
9.2.1 ลักษณะของครีบบาง	129
9.2.2 ครีบบางรูปตัว Z ที่มีลักษณะการวางต่างกัน	129
9.2.3 ครีบบางรูปตัว Z ที่มีมุมปะทะต่างกัน (α)	129
9.2.4 ครีบบางรูปตัว Z ที่มีมุมของแถวต่างกัน (θ)	130
9.2.5 ครีบบางรูปตัว Z ที่มีความสูง (e) ต่างกัน	130
9.2.6 ครีบบางรูปตัว Z มีระยะพิตช์ (P) ต่างกัน	130
9.3 ครีบบางบนผนังสองด้าน	131
9.3.1 ครีบบางที่มีลักษณะการวางต่างกัน	131
9.3.2 ครีบบางรูปตัว Z ที่มีความสูง (e) ต่างกัน	131
9.3.3 ครีบบางรูปตัว Z มีระยะพิตช์ (P) ต่างกัน	131
9.4 สรุป	131
9.5 ข้อเสนอแนะ	132
บรรณานุกรม	134
ภาคผนวก	138
ภาคผนวก ก	139
ภาคผนวก ข	141
ภาคผนวก ค	145
ประวัติผู้เขียน	175

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ค่า Nu_D สำหรับการไหลแบบราบเรียบที่ปรับตัวเต็มทีในท่อพื้นที่หน้าตัดต่างๆ กัน [46].....	24
5.1 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน และตัวประกอบเพิ่มสมรรถนะความร้อน กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะเอียงแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffles) ที่ทำมุมกับทิศทางการไหล (α) 45°	61
5.2 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน และตัวประกอบเพิ่มสมรรถนะความร้อน กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซกแบบวางตรงกัน (Z-in-phase) ที่ทำมุมกับทิศทางการไหล (α) 45°	62
5.3 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน และตัวประกอบเพิ่มสมรรถนะความร้อน กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซกแบบวางเอียงกัน (Z-out-phase) ที่ทำมุมกับทิศทางการไหล (α) 45°	62
5.4 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน และตัวประกอบเพิ่มสมรรถนะความร้อน กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก ที่ทำมุมกับทิศทางการไหล (α) 45° ความสูงครีบบาง 3 mm . ($e/H = 0.1$) มีการวางแนวทำมุม (θ) 30° , 45° , 60° และ 90°	63
6.1 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน และตัวประกอบเพิ่มสมรรถนะความร้อน กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะเอียงแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffles) ที่ทำมุมกับทิศทางการไหล (α) 30°	78
6.2 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน และตัวประกอบเพิ่มสมรรถนะความร้อน กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซกแบบวางตรงกัน (Z-in-phase) ที่ทำมุมกับทิศทางการไหล (α) 30°	79
6.3 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน และตัวประกอบเพิ่มสมรรถนะความร้อน กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซกแบบวางเอียงกัน (Z-out-phase) ที่ทำมุมกับทิศทางการไหล (α) 30°	79
7.1 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน และตัวประกอบเพิ่มสมรรถนะความร้อน กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะเอียงแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffles) ที่ทำมุมกับทิศทางการไหล (α) 60°	96
7.2 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน และตัวประกอบเพิ่มสมรรถนะความร้อน กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซกแบบวางตรงกัน (Z-in-phase) ที่ทำมุมกับทิศทางการไหล (α) 60°	97
7.3 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน และตัวประกอบเพิ่มสมรรถนะความร้อน กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซกแบบวางเอียงกัน (Z-out-phase) ที่ทำมุมกับทิศทางการไหล (α) 60°	97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
8.1 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ต์ อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน และตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อน กรณีติดตั้ง ครีบบางวางลักษณะซิกแซก ครีบบน-ล่างวางกลับกัน (X) ที่ทำมุมกับทิศทางการไหล (α) 45°	121
8.2 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ต์ อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน และตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อน กรณีติดตั้ง ครีบบางวางลักษณะซิกแซก ครีบบน-ล่างวางตรงกัน (Z) ที่ทำมุมกับทิศทางการไหล (α) 45°	122
8.3 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ต์ อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน และตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อน กรณีติดตั้ง ครีบบางวางลักษณะซิกแซก ครีบบน-ล่างวางกลับกันแต่แถวเอียงกัน (XS) ที่ทำมุมกับทิศทางการไหล (α) 45°	122
8.4 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ต์ อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน และตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อน กรณีติดตั้ง ครีบบางวางลักษณะซิกแซก ครีบบน-ล่างเหมือนกันแต่แถวเอียงกัน (ZS) ที่ทำมุมกับทิศทางการไหล (α) 45°	123
9.1 ช่วงของค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ต์ อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน และสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ของแต่ละหัวข้อ.....	133
ก-1 คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของอากาศที่ความดันบรรยากาศ.....	140

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างครีบบของ Olsson and Sunden [7]	6
2.2 รูปแบบครีบบภายในท่อสี่เหลี่ยมของ Karwa [17]	8
2.3 รูปแบบครีบบภายในท่อสี่เหลี่ยมของ Tanda [18].....	9
2.4 แผ่นทดสอบที่ติดครีบบางทำมุม 60° ของ สกุกหลง [29]	11
2.5 แผ่นทดสอบของ มะลิกุล [30].....	11
2.6 ครีบบักรูปตัววีมุม 45° ของ อำไพจิตร [32]	12
2.7 รูปแบบครีบบภายในท่อสี่เหลี่ยมของ Hyun Lee and Rhee [34].....	13
2.8 ครีบบางตัววีของ กนกนัยการ [38].....	14
2.9 โครงสร้างช่องขนานและโดเมนการคำนวณเชิงตัวเลขของ Sripattanapipat [39]	15
3.1 การก่อตัวของชั้นขอบเขตการไหลแบบราบเรียบในท่อกลม [46]	18
3.2 การก่อตัวของชั้นขอบเขตทางความร้อนในท่อกลม [46].....	20
3.3 ปริมาตรควบคุมสำหรับการไหลภายในท่อ [46].....	22
4.1 ชุดทดลองท่อแลกเปลี่ยนความร้อนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า	29
4.2 พัดลมแรงดันสูง (high-pressure blower).....	30
4.3 มอเตอร์.....	30
4.4 inverter.....	30
4.5 orifice meter	31
4.6 เครื่องวัดความดันแบบระนาบเอียง (inclined manometer).....	31
4.7 ถังพักลม (settling tank).....	32
4.8 แหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ (AC power supply).....	32
4.9 เครื่องเก็บข้อมูล	33
4.10 เซนตเซอร์วัดอุณหภูมิ	33
4.11 เครื่องวัดความดันตกคร่อม, Dwyer 475 Mark III Digital Manometer.....	34
4.12 เครื่องวัดความเร็วของอากาศ (vane-type Anemometer), TESTO 445	34
4.13 แผนผังของชุดทดลองท่อแลกเปลี่ยนความร้อนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า	35
4.14 ตำแหน่งติดตั้งเซนตเซอร์วัดอุณหภูมิ	36
4.15 ส่วนทดสอบของการศึกษาส่วนที่ 1.1 ครีบบางวางในลักษณะซิกแซก (zigzag, Z) และในแบบครีบบางวางแบบเอียงไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffles, DB)	37
4.16 ส่วนทดสอบของการศึกษาส่วนที่ 1.2 ครีบบางวางในลักษณะซิกแซก (zigzag, Z) ที่มีการจัดวางครีบบในแบบ วางตรงกัน (in-phase) และแบบวางเยื้องกัน (out-phase).....	37
4.17 ส่วนทดสอบของการศึกษาส่วนที่ 1.3 ครีบบางวางในลักษณะซิกแซก (zigzag, Z) ที่มีมุมกระทำกับทิศทางการไหล ก) 30°, ข) 45° และ ค) 60°	38
4.18 ส่วนทดสอบของการศึกษาส่วนที่ 1.4 ครีบบางวางในลักษณะซิกแซก (zigzag, Z) ที่มีมุมของแถว กระทำกับทิศทางการไหล ก) 30°, ข) 45°, ค) 60° และ ง) 90°	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

4.19	ส่วนทดสอบของการศึกษาส่วนที่ 2 ติดครีบบน-ล่าง ก) ครีบบน-ล่างวางกลับกัน (X), ข) ครีบบน-ล่างวางเหมือนกัน (Z), ค) ครีบบน-ล่างวางกลับกันแต่วางแถวเยื้องกัน (XS) และง) ครีบบน-ล่างวางตรงกันแต่วางแถวเยื้องกัน (ZS).....	40
5.1	ความสัมพันธ์ของเลขนัยสเกลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อผนังเรียบ	45
5.2	ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อผนังเรียบ	46
5.3	ความสัมพันธ์ของเลขนัยสเกลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะเอียงแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffles) บนผนังด้านเดียว	47
5.4	ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนเลขนัยสเกลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะเอียง แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffles) บนผนังด้านเดียว.....	47
5.5	ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะเอียง แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffles) บนผนังด้านเดียว	48
5.6	ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะเอียง แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffles) บนผนังด้านเดียว.....	48
5.7	ความสัมพันธ์ของตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนกับเลขเรย์โนลด์กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะเอียง แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffles) บนผนังด้านเดียว	50
5.8	ความสัมพันธ์ของเลขนัยสเกลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซกแบบวางตรงกัน (Z-in-phase) บนผนังด้านเดียว	51
5.9	ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนเลขนัยสเกลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางตรงกัน (Z-in-phase) บนผนังด้านเดียว.....	51
5.10	ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางตรงกัน (Z-in-phase) บนผนังด้านเดียว	52
5.11	ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางตรงกัน (Z-in-phase) บนผนังด้านเดียว.....	52
5.12	ความสัมพันธ์ของตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนกับเลขเรย์โนลด์กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางตรงกัน (Z-in-phase) บนผนังด้านเดียว.....	53
5.13	ความสัมพันธ์ของเลขนัยสเกลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซกแบบวางเยื้องกัน (Z-out-phase) บนผนังด้านเดียว.....	54
5.14	ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนเลขนัยสเกลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางเยื้องกัน (Z-out-phase) บนผนังด้านเดียว.....	55
5.15	ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางเยื้องกัน (Z-out-phase) บนผนังด้านเดียว.....	55
5.16	ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางเยื้องกัน (Z-out-phase) บนผนังด้านเดียว.....	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยและการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.17 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนกับเลขเรย์โนลด์กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางเยื้องกัน (Z-out-phase) บนผนังด้านเดียว	57
5.18 ความสัมพันธ์ของเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์กรณีติดตั้งครีบบางวางแนวทำมุม 30°, 45°, 60° และ 90° บนผนังด้านเดียว มีความสูงครีบบาง 3 mm ($e/H=0.1$) และระยะพิตช์ 45, 60 และ 90 mm ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0).....	58
5.19 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์กรณีติดตั้งครีบบางวางแนวทำมุม 30°, 45°, 60° และ 90° บนผนังด้านเดียว มีความสูงครีบบาง 3 mm ($e/H=0.1$) และระยะพิตช์ 45, 60 และ 90 mm ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0)	58
5.20 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์กรณีติดตั้งครีบบางวางแนวทำมุม 30°, 45°, 60° และ 90° บนผนังด้านเดียว มีความสูงครีบบาง 3 mm ($e/H=0.1$) และระยะพิตช์ 45, 60 และ 90 mm ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0)	59
5.21 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์กรณีติดตั้งครีบบางวางแนวทำมุม 30°, 45°, 60° และ 90° บนผนังด้านเดียว มีความสูงครีบบาง 3 mm ($e/H=0.1$) และระยะพิตช์ 45, 60 และ 90 mm ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0).....	59
5.22 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนกับเลขเรย์โนลด์กรณีติดตั้งครีบบางวางแนวทำมุม 30°, 45°, 60° และ 90° บนผนังด้านเดียว มีความสูงครีบบาง 3 mm ($e/H=0.1$) และระยะพิตช์ 45, 60 และ 90 mm ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0).....	60
5.23 ความสัมพันธ์ของเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางมุม 45° มีระยะพิตช์ 45 mm ($P/H=1.5$) บนผนังด้านเดียว	63
5.24 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางมุม 45° มีระยะพิตช์ 45 mm ($P/H=1.5$) บนผนังด้านเดียว	64
5.25 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนกับเลขเรย์โนลด์กรณีติดตั้งครีบบางมุม 45° มีระยะพิตช์ 45 mm ($P/H=1.5$) บนผนังด้านเดียว	64
6.1 ความสัมพันธ์ของเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะเอียง แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffles) บนผนังด้านเดียว	67
6.2 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะเอียง แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffles) บนผนังด้านเดียว.....	68
6.3 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะเอียง แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffles) บนผนังด้านเดียว	68
6.4 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะเอียง แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffles) บนผนังด้านเดียว.....	69
6.5 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนกับเลขเรย์โนลด์กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะเอียง แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffles) บนผนังด้านเดียว	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การคัดลอกโดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.6 ความสัมพันธ์ของเลขน้สเชิลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางตรงกัน (Z-in-phase) บนผนังด้านเดียว	71
6.7 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนเลขน้สเชิลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวาง ลักษณะซิกแซก แบบวางตรงกัน (Z-in-phase) บนผนังด้านเดียว.....	71
6.8 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะ ซิกแซก แบบวางตรงกัน (Z-in-phase) บนผนังด้านเดียว	72
6.9 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบาง วางลักษณะซิกแซก แบบวางตรงกัน (Z-in-phase) บนผนังด้านเดียว.....	72
6.10 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนกับเลขเรย์โนลด์กรณีติดตั้ง ครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางตรงกัน (Z-in-phase) บนผนังด้านเดียว.....	74
6.11 ความสัมพันธ์ของเลขน้สเชิลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางเอียงกัน (Z-out-phase) บนผนังด้านเดียว.....	75
6.12 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนเลขน้สเชิลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวาง ลักษณะซิกแซก แบบวางเอียงกัน (Z-out-phase) บนผนังด้านเดียว	75
6.13 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะ ซิกแซก แบบวางเอียงกัน (Z-out-phase) บนผนังด้านเดียว.....	76
6.14 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบาง วางลักษณะซิกแซก แบบวางเอียงกัน (Z-out-phase) บนผนังด้านเดียว	76
6.15 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนกับเลขเรย์โนลด์กรณีติดตั้ง ครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางเอียงกัน (Z-out-phase) บนผนังด้านเดียว	77
6.16 ความสัมพันธ์ของเลขน้สเชิลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางมุม 30° มีระยะพิตช์ 45 mm ($P/H=1.5$) บนผนังด้านเดียว	80
6.17 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางมุม 30° มี ระยะพิตช์ 45 mm ($P/H=1.5$) บนผนังด้านเดียว.....	80
6.18 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนกับเลขเรย์โนลด์กรณีติดตั้ง ครีบบางมุม 30° มีระยะพิตช์ 45 mm ($P/H=1.5$) บนผนังด้านเดียว.....	81
6.19 ความสัมพันธ์ของเลขน้สเชิลท์กับเลขเรย์โนลด์ ครีบบางที่ทำมุม 30° กับ 45° บนผนัง ด้านเดียว มีความสูงครีบบ 3 mm ($e/H=0.1$) และระยะพิตช์ 45 mm ($P/H=1.5$)	82
6.20 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ ครีบบางที่ทำมุม 30° กับ 45° บนผนังด้านเดียว มีความสูงครีบบ 3 mm ($e/H=0.1$) และระยะพิตช์ 45 mm ($P/H= 1.5$).....	82
6.21 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ ครีบบางที่ มุม 30° กับ 45° บนผนังด้านเดียว มีความสูงครีบบ 3 mm ($e/H=0.1$) และระยะพิตช์ 45 mm ($P/H=1.5$).....	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ใช้เฉพาะที่อาคารเรียนเท่านั้น ไม่สามารถนำออกไปใช้ประโยชน์ได้ 83

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.1 ความสัมพันธ์ของเลขนัสเซลล์ท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะเอียงแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffles) บนผนังด้านเดียว	85
7.2 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะเอียงแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffles) บนผนังด้านเดียว.....	86
7.3 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะเอียงแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffles) บนผนังด้านเดียว	86
7.4 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะเอียงแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffles) บนผนังด้านเดียว.....	87
7.5 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนกับเลขเรย์โนลด์กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะเอียงแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffles) บนผนังด้านเดียว	88
7.6 ความสัมพันธ์ของเลขนัสเซลล์ท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซกแบบวางตรงกัน (Z-in-phase) บนผนังด้านเดียว	89
7.7 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซกแบบวางตรงกัน (Z-in-phase) บนผนังด้านเดียว.....	89
7.8 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซกแบบวางตรงกัน (Z-in-phase) บนผนังด้านเดียว	90
7.9 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซกแบบวางตรงกัน (Z-in-phase) บนผนังด้านเดียว.....	91
7.10 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนกับเลขเรย์โนลด์กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซกแบบวางตรงกัน (Z-in-phase) บนผนังด้านเดียว.....	92
7.11 ความสัมพันธ์ของเลขนัสเซลล์ท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซกแบบวางเอียงกัน (Z-out-phase) บนผนังด้านเดียว.....	93
7.12 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซกแบบวางเอียงกัน (Z-out-phase) บนผนังด้านเดียว	93
7.13 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซกแบบวางเอียงกัน (Z-out-phase) บนผนังด้านเดียว.....	94
7.14 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซกแบบวางเอียงกัน (Z-out-phase) บนผนังด้านเดียว	94
7.15 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนกับเลขเรย์โนลด์กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซกแบบวางเอียงกัน (Z-out-phase) บนผนังด้านเดียว	95
7.16 ความสัมพันธ์ของเลขนัสเซลล์ท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางมุม 60° มีระยะพิตช์ 45 mm ($P/H=1.5$) บนผนังด้านเดียว	98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.17 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางมุม 60° มีระยะพิตช์ 45 mm ($P/H=1.5$) บนผนังด้านเดียว.....	98
7.18 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนกับเลขเรย์โนลด์กรณีติดตั้งครีบบางมุม 60° มีระยะพิตช์ 45 mm ($P/H=1.5$) บนผนังด้านเดียว.....	99
7.19 ความสัมพันธ์ของเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์ ครีบบางที่ทำมุม 30° , 45° และ 60° บนผนังด้านเดียว มีความสูงครีบบน 3 mm ($e/H=0.1$) และระยะพิตช์ 45 mm ($P/H=1.5$).....	100
7.20 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ ครีบบางที่ทำมุม 30° , 45° และ 60° บนผนังด้านเดียว มีความสูงครีบบน 3 mm ($e/H=0.1$) และระยะพิตช์ 45 mm ($P/H=1.5$).....	100
7.21 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ ครีบบางที่ทำมุม 30° , 45° และ 60° บนผนังด้านเดียว มีความสูงครีบบน 3 mm ($e/H=0.1$) และระยะพิตช์ 45 mm ($P/H=1.5$).....	101
7.22 ความสัมพันธ์ของสมการสหสัมพันธ์เลขนัสเซิลท์ กับเลขนัสเซิลท์จากการทดลอง กรณีติดตั้งครีบบน Z-in-phase มุม 45° บนผนังด้านเดียว $e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3 , $P/H = 1, 2$ และ 3	102
7.23 ความสัมพันธ์ของสมการสหสัมพันธ์ตัวประกอบเสียดทาน กับเลขนัสเซิลท์จากการทดลอง กรณีติดตั้งครีบบน Z-in-phase มุม 45° บนผนังด้านเดียว $e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3 , $P/H = 1, 2$ และ 3	103
8.1 ความสัมพันธ์ของเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก ครีบบน-ล่างวางกลับกัน (X).....	107
8.2 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก ครีบบน-ล่างวางกลับกัน (X).....	107
8.3 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก ครีบบน-ล่างวางกลับกัน (X).....	108
8.4 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก ครีบบน-ล่างวางกลับกัน (X).....	108
8.5 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนกับเลขเรย์โนลด์กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก ครีบบน-ล่างวางกลับกัน (X).....	109
8.6 ความสัมพันธ์ของเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก ครีบบน-ล่างวางตรงกัน (Z).....	110
8.7 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก ครีบบน-ล่างวางตรงกัน (Z).....	111
8.8 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก ครีบบน-ล่างวางตรงกัน (Z).....	111

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

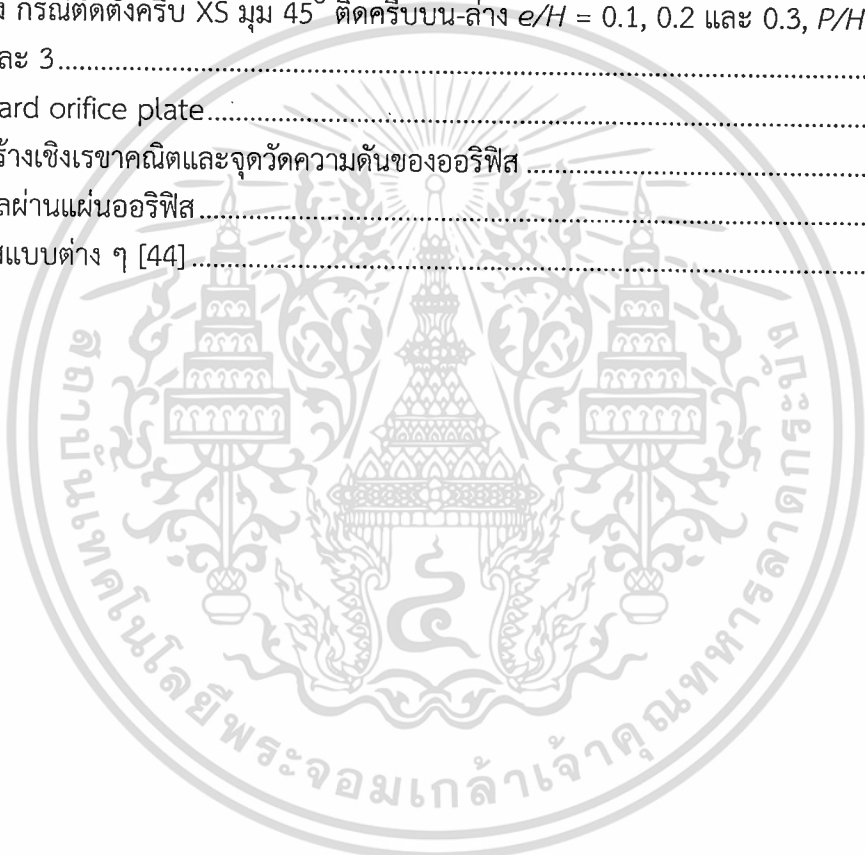
สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
8.9 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก ครีบบน-ล่างวางตรงกัน (Z)	112
8.10 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนกับเลขเรย์โนลด์กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก ครีบบน-ล่างวางตรงกัน (Z)	113
8.11 ความสัมพันธ์ของเลขนัสเชิลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก ครีบบน-ล่างวางกลับกันแต่แถวเอียงกัน (XS).....	114
8.12 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนเลขนัสเชิลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก ครีบบน-ล่างวางกลับกันแต่แถวเอียงกัน (XS)	114
8.13 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก ครีบบน-ล่างวางกลับกันแต่แถวเอียงกัน (XS).....	115
8.14 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก ครีบบน-ล่างวางกลับกันแต่แถวเอียงกัน (XS)	115
8.15 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนกับเลขเรย์โนลด์กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก ครีบบน-ล่างวางกลับกันแต่แถวเอียงกัน (XS)	117
8.16 ความสัมพันธ์ของเลขนัสเชิลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก ครีบบน-ล่างเหมือนกันแต่แถวเอียงกัน (ZS).....	118
8.17 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนเลขนัสเชิลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก ครีบบน-ล่างเหมือนกันแต่แถวเอียงกัน (ZS).....	118
8.18 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก ครีบบน-ล่างเหมือนกันแต่แถวเอียงกัน (ZS).....	119
8.19 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก ครีบบน-ล่างเหมือนกันแต่แถวเอียงกัน (ZS)	119
8.20 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนกับเลขเรย์โนลด์กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก ครีบบน-ล่างเหมือนกันแต่แถวเอียงกัน (ZS).....	120
8.21 ความสัมพันธ์ของเลขนัสเชิลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางที่ทำมุม 45° มีระยะพิตช์ 45 mm ($P/H=1.5$) บนผนังบน-ล่าง	123
8.22 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางที่ทำมุม 45° มีระยะพิตช์ 45 mm ($P/H=1.5$) บนผนังบน-ล่าง.....	124
8.23 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนกับเลขเรย์โนลด์กรณีติดตั้งครีบบางที่ทำมุม 45° มีระยะพิตช์ 45 mm ($P/H=1.5$) บนผนังบน-ล่าง	124
8.24 ความสัมพันธ์ของเลขนัสเชิลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางที่ทำมุม 45° มีความสูงครีบบาง 3 mm ($e/H=0.1$) และระยะพิตช์ 45 mm ($P/H=1.5$).....	125
8.25 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางที่ทำมุม 45° มีความสูงครีบบาง 3 mm ($e/H=0.1$) และระยะพิตช์ 45 mm ($P/H=1.5$).....	125

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานทดแทน การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
8.26 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนกับเลขเรย์โนลด์กรณีติดตั้งครีบบางที่ทำมุม 45° มีความสูงครีบบน 3 mm ($e/H=0.1$) และระยะพิตช์ 45 mm ($P/H=1.5$)	126
8.27 ความสัมพันธ์ของสมการสหสัมพันธ์เลขนัสเซลท์ กับเลขนัสเซลท์จากการทดลอง กรณีติดตั้งครีบบน 45° ติดครีบบน-ล่าง $e/H = 0.1, 0.2$ และ $0.3, P/H = 1, 2$ และ 3	127
8.28 ความสัมพันธ์ของสมการสหสัมพันธ์ตัวประกอบเสียดทาน กับเลขนัสเซลท์จากการทดลอง กรณีติดตั้งครีบบน 45° ติดครีบบน-ล่าง $e/H = 0.1, 0.2$ และ $0.3, P/H = 1, 2$ และ 3	128
ช-1 Standard orifice plate	142
ช-2 โครงสร้างเชิงเรขาคณิตและจุดวัดความดันของออริฟิส	142
ช-3 การไหลผ่านแผ่นออริฟิส	143
ช-4 ออริฟิสแบบต่าง ๆ [44]	143



รายการคำย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์ตัวอักษรลาติน

A พื้นที่การพาความร้อนของช่องขนาน, m^2

A_c พื้นที่หน้าตัด, m^2

A_o พื้นที่หน้าตัดรูออริฟิส, m^2

A_s พื้นที่ผิว, m^2

AR อัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของช่องขนาน (W/H)

b ค่าคงที่

C_d ค่าสัมประสิทธิ์การจ่าย (discharge coefficient)

C_f สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน หรือ ตัวประกอบเสียดทานของแผ่นผนัง

C_p ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศที่ความดันคงที่, $J/kg K$

C_v ค่าความจุความร้อนจำเพาะของของไหลที่ปริมาตรคงที่, $J/kg K$

d_o เส้นผ่านศูนย์กลางรูออริฟิส, m

D เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ, m

D_h เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก, m

d' ระยะห่างระหว่างแต่ละครีป, m

e ความสูงครีป, m

f ตัวประกอบเสียดทาน

h สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย, W/m^2K

H ความสูงช่องขนาน

I กระแสไฟฟ้า, A

j ตัวประกอบการถ่ายเทความร้อนของโคเบอร์

k สัมประสิทธิ์การนำความร้อน, W/m^2K

L ความยาวของส่วนทดสอบ, m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

\dot{m}	อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ, kg/s
N	ตัวแปรอิสระ
Nu	เลขนัสเซลท์
\overline{Nu}	เลขนัสเซลท์เฉลี่ย
n	ค่าคงที่
P	ระยะพิตช์ตามยาว, m
P_e	ความยาวเส้นรอบรูป, m
Pr	เลขพรานส์
p	ความดันของไหล, N/m ²
Δp	ความดันตกคร่อม, N/m ²
Q	ค่าการถ่ายเทความร้อน, W
q_{conv}	อัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อทั้งหมด, W
q_s''	ฟลักซ์ความร้อนที่ผิว, W/m ²
R	ค่าคงที่ของก๊าซ, J/kg K
Re	เลขเรย์โนลด์ (UD/ν)
r	รัศมีที่ตำแหน่งใด ๆ, m
r_0	รัศมีที่อกกลม, m
St	เลขสแตนต์ัน
T	อุณหภูมิของของไหลที่ตำแหน่งใดๆ, °C
T_b	อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหล, °C
T_m	อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลทั่วพื้นที่หน้าตัดของท่อ, °C
$T_{m,i}$	อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลทั่วพื้นที่หน้าตัดของท่อที่ทางเข้า, °C
$T_{m,o}$	อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลทั่วพื้นที่หน้าตัดของท่อที่ทางออก, °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

T_s	อุณหภูมิเฉลี่ยผิวครีบ, °C
TEF	ตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อน
\overline{TEF}	ตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนเฉลี่ย
t	ความหนาครีบ, m
U	ความเร็วเฉลี่ย, m/s
u	ความเร็วตามแนวแกน x , m/s
u_m	ความเร็วเฉลี่ยภายในท่อ, m/s
V	ความต่างศักย์ไฟฟ้า, V
\dot{V}	อัตราการไหลเชิงปริมาตร, m ³ /s
\bar{V}	ความเร็วเฉลี่ยของของไหล, m/s
v	ปริมาตรจำเพาะ, m ² /s
W	ความกว้างช่องขนาน, m
\dot{w}_m	การจ่ายกำลังให้พัดลม, J/s
w	ความกว้างครีบ, m
X	ตัวแปร
x	ความยาวที่ตำแหน่งใด ๆ, m
X_{fd}	ความยาวของทางเข้าสำหรับการปรับตัวเต็มที่, m
$X_{fd,h}$	ความยาวของทางเข้าสำหรับการปรับตัว, m
$X_{fd,t}$	ความยาวของทางเข้าสำหรับการปรับตัวเต็มที่ของความร้อน, m
Y	ตัวแปร

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์ตัวอักษรกรีก

ρ ความหนาแน่นของอากาศ, kg/m^3

v ความหนืดเชิงจลน์, m^2/s

α มุมปะทะของครีป ($^\circ$, degree)

θ มุมของแถว ($^\circ$, degree)

ϕ ค่าคงที่

μ ความหนืดสมบูรณ์ของของไหล, $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$

τ_s ความเค้นเฉือนบนผิว, N/m^2

สัญลักษณ์ตัวห้อย

0 ผนังเรียบ

baffle ครีป

c จุดวิกฤต

D เส้นผ่าศูนย์กลาง

i เข้า

lam การไหลแบบราบเรียบ

o ออก

pp กำลั้งขับ

s พื้นผิวช่องขนาน

turb การไหลแบบปั่นป่วน

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากอดีตถึงปัจจุบันอัตราการใช้พลังงานเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องมีผลมาจากความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี โดยเฉพาะในประเทศอินเดีย และจีนที่มีจำนวนประชากรมาก เมื่อความเจริญเข้าไปประชากรในแต่ละประเทศก็มีความต้องการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ราคาพลังงานเพิ่มสูงอย่างรวดเร็ว และปัญหาที่ตามมาคือมลภาวะที่เกิดจากการใช้พลังงานก็จะเพิ่มสูงตาม ดังนั้นวิธีการใช้พลังงานให้มีประสิทธิภาพสูงที่สุดจึงเป็นทางเลือกที่สำคัญในการแก้ปัญหาดังกล่าว

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็นสิ่งจำเป็นในภาคอุตสาหกรรมและชีวิตประจำวันเช่น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เครื่องยนต์ เครื่องอบแห้ง เตาดูแล แผงระบายความร้อน อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เครื่องทำความเย็น เครื่องกลั่น เครื่องจักรหรืออุปกรณ์ในกระบวนการผลิตต่าง ๆ เป็นต้น ทำให้มีการแข่งขันและพัฒนาสินค้าหรือผลิตภัณฑ์อย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะการเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน ซึ่งถ้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีประสิทธิภาพสูงขึ้นนอกจากจะสามารถลดการใช้พลังงาน และลดมลภาวะที่เกิดจากการใช้พลังงานลงได้แล้วยังสามารถลดขนาดของตัวอุปกรณ์ให้มีขนาดเล็กลงได้อีกด้วยก็จะทำให้ลดต้นทุนของวัตถุดิบในการผลิต ทำให้สามารถประยุกต์ใช้งานได้ง่ายยิ่งขึ้น ราคาถูกลง มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน อายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น บำรุงรักษาง่าย ความน่าเชื่อถือและความปลอดภัยสูง

การเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนได้แบ่งออกเป็นสองลักษณะคือ แบบ active techniques เป็นการเอาพลังงานภายนอกเข้ามาช่วยเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนโดยการทำให้เกิดการสั่นของผิวทำให้ของไหลเกิดการสั่นสามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ดียิ่งขึ้น เช่น อุปกรณ์ทางกล อุปกรณ์ทางไฟฟ้าและ แบบ passive techniques เป็นการออกแบบลักษณะพื้นผิวของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนให้ต่างไปจากพื้นผิวเรียบและ ปรับปรุงของไหล เพื่อให้มีการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ดีมากขึ้นเช่น การใส่สารแขวนลอยเข้าไปเพิ่มค่าการนำความร้อน โดยไม่มีพลังงานภายนอกเข้ามาเกี่ยวข้อง

แบบ passive techniques เป็นการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่นิยมมาก เนื่องจากไม่ต้องไปพึ่งพลังงานภายนอกอื่นให้ยุ่งยาก โดยการเพิ่มพื้นที่ผิวในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เป็นการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนในพื้นที่ผิวเรียบ หรือวิธีการปรับปรุงพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อให้อของไหลมีลักษณะการเคลื่อนที่ส่งเสริมการแลกเปลี่ยนความร้อนเช่นเป็นการไหลแบบปั่นป่วน หมุนวน หรือมีการกระทบบนพื้นผิว ซึ่งก็จะเป็นการเพิ่มค่าการแลกเปลี่ยนความร้อน แม้การเพิ่มพื้นที่หรือปรับปรุงผิวภายในท่อสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน แต่ความเสียหายภายในท่อมักเพิ่มขึ้นจากการที่มีวัตถุไปขวางการเคลื่อนที่ของของไหล ทำให้เกิดการสูญเสียความดันภายในท่อทำให้จำเป็นต้องเพิ่มกำลังในส่วนของการขับเคลื่อนของไหลให้ไหลผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งกำลังที่ต้องใช้เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนลดลง ดังนั้นการหาลักษณะของพื้นผิวที่ให้ประสิทธิภาพทางความร้อนสูงจำเป็นต้องคำนึงถึงผลของความเสียหายด้วยเช่นกัน

แนวคิดในการเอาครีมาขวางการไหลภายในท่อเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน จึงต้องพิจารณารูปร่าง, ขนาด, มุม, ตำแหน่งการวาง และระยะพิทของแผ่นครีบ ที่มีผลต่อลักษณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การไหลของของไหล การสูญเสียความดันและแรงเสียดทาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาการทดลองเกี่ยวกับการหาลักษณะที่ให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของครีบบางรูปตัว Z ที่วางวางทิศทางการไหล โดยจะมีอากาศเป็นของไหลที่ใช้ในการทดลอง เพื่อเป็นองค์ความรู้ใหม่ และแนวทางในการตัดสินใจเลือกใช้ และออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมให้มีประสิทธิภาพการทำงานสูงสุด

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1.2.1 ศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลหลักต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในช่องขนานสี่เหลี่ยมที่มีครีบบางวางเป็นรูปตัว Z โดยการวิเคราะห์ทางการทดลองจาก อัตราส่วนความสูงครีบบต่อความสูงช่องขนาน (e/H), มุมของครีบ (α), มุมของแถวที่วางครีบ (θ) ระยะพิตของการจัดวางครีบ (P), รูปทรงของครีบ และลักษณะการวางครีบ

1.2.2 ศึกษาการถ่ายเทความร้อน และการสูญเสียความดันผ่านท่อทดสอบที่มีครีบบรูปตัว Z

1.2.3 เปรียบเทียบผลการทดลองของท่อทดสอบมีครีบบรูปตัว Z กับท่อผนังเรียบ

1.2.4 สร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของตัวแปรที่มีอิทธิพลหลักต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในท่อทดสอบที่มีครีบบรูปตัว Z

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 ทำการศึกษาเชิงการทดลองเพื่อคำนวณหาค่าเฉลี่ยของเลขนัสเซลท์ (Nu) ตัวประกอบเสียดทาน (f) และตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อน (TEF)

1.3.2 ของไหลในการทดสอบ คือ อากาศ

1.3.3 ความเร็วอากาศ อยู่ในช่วงเลขเรย์โนลด์ระหว่าง 4400 ถึง 20,400

1.3.4 การให้ความร้อนที่ผิวเป็นแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ (constant heat flux) โดยให้ที่ผิวบนของท่อสี่เหลี่ยมแบบขนานเพียงด้านเดียว

1.3.5 ท่อในช่วงทดสอบที่ทำการติดครีบ และให้ความร้อนเป็นท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง 300 mm สูง (H) 30 mm ยาว (L) 380 mm

1.3.6 ครีบบทดสอบเป็นครีบบาง พับเป็นรูปตัว Z วางวางทิศทางการไหลตัวครีบบมีมุม $\alpha = 30^\circ, 45^\circ$ และ 60°

1.3.7 การวางครีบบทำมุมกับทิศทางการไหล $\theta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ และ 90°

1.3.8 การวางครีบบมีการวางระยะห่างระหว่างแถวตามอัตราส่วนระยะพิตต่อความสูงช่องขนานคงที่ (P/H) = 1.0, 1.5, 2.0 และ 3.0 มีความสูง $e = 0.05H, 0.1H, 0.2H$ และ $0.3H$

1.3.9 การติดตั้งครีบบมีแบบ ผิวบนด้านเดียว และผิวบน-ล่าง การจัดวางครีบบมี 2 แบบ คือ แบบแถวครีบบอยู่แนวกัน (in-phase) และแบบแถวครีบบอยู่แนวเยื้องกัน (out-phase) ในส่วนมุมแหลมครีบบ ส่วนผิวบน-ล่างจะเพิ่มในส่วนของการวางในลักษณะการวางครีบบแถวบนกับแถวล่างตรงกัน (inline) และเยื้องกัน (stagger)

1.3.10 หาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่สำคัญในการเพิ่มสมรรถนะความร้อนภายในท่อรูปทรง การจัดวาง ความสูง ความดันตกคร่อมในและการถ่ายเทความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 องค์ความรู้ใหม่เกี่ยวกับการเพิ่มสมรรถนะความร้อนภายในท่อด้วยการติดครีบบางรูปตัว Z และกลไกการไหลภายในท่อของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

1.4.2 ทำให้เกิดเทคโนโลยีใหม่และหลักการเพิ่มสมรรถนะความร้อนการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในท่อ

1.4.3 เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาและออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ทั้งในภาคอุตสาหกรรมและการประยุกต์ใช้งานในภาคการเกษตรกรรม

1.4.4 ประหยัดพลังงาน ลดขนาดและการใช้วัสดุในการสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนำไปสู่การลดต้นทุนการผลิต เกิดประโยชน์ทั้งในแง่พื้นที่การติดตั้ง ประสิทธิภาพที่สูงขึ้นและราคาต่ำ

1.5 โครงร่างวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์เรื่อง “การเพิ่มการแลกเปลี่ยนความร้อนในท่อบริเวณที่เปลี่ยนโดยใช้ครีบบางรูปตัว Z” เล่มนี้ ได้แบ่งรายละเอียดของการนำเสนอออกเป็นทั้งหมด 9 บทด้วยกัน คือ บทที่ 1 บทนำ ประกอบไปด้วย ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา, วัตถุประสงค์, ขอบเขตงานวิจัย, ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และโครงร่างวิทยานิพนธ์ ในบทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์ ประกอบไปด้วย งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง นำเสนอการศึกษาวิจัยที่เคยศึกษาผ่านมาและ แนวทางการศึกษาวิจัย ในหัวข้อ การเพิ่มสมรรถนะความร้อนภายในท่อที่เปลี่ยนด้วยการติดครีบบาง บทที่ 3 ทฤษฎี กล่าวถึง ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ เพื่อเป็นพื้นฐานในการศึกษา และทำความเข้าใจในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย กลศาสตร์ของไหล, การถ่ายเทความร้อน และการสร้างสมการสหสัมพันธ์ด้วยรีเกรสชันเส้นตรงแบบหลายตัวแปร บทที่ 4 การออกแบบอุปกรณ์และวิธีการทดลอง จะเป็นการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อที่เปลี่ยนผิวด้านที่มีการติดตั้งครีบบางที่ใช้ในการทดลอง จะประกอบไปด้วย การออกแบบอุปกรณ์ และชุดทดลอง, การเตรียมอุปกรณ์ในการทดลอง, การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง, วิธีการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูล

บทที่ 5 ครีบบาง แบบซิกแซก (zigzag, Z) มุม 45° บนผนังด้านเดียว นำเสนอการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยใช้ครีบบางติดบนแผ่นทดสอบ ประกอบไปด้วย ผลการทวนสอบผนังเรียบ, ครีบบางวางลักษณะเอียง แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffles), ครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางแถวครีบบางอยู่แนวเดียวกัน (Z-in-phase) และแบบวางแถวครีบบางอยู่แนวเอียงกัน (Z-out-phase) และการเปรียบเทียบลักษณะครีบบางที่ทำมุม 45° บนผนังด้านเดียว บทที่ 6 ครีบบาง แบบซิกแซก (zigzag, Z) มุม 30° บนผนังด้านเดียว มีเนื้อหาของบทนี้เช่นเดียวกับในบทที่ 5 แต่จะเพิ่มในส่วนของการเปรียบเทียบลักษณะครีบบางที่ทำมุม 30° กับ 45° บนผนังด้านเดียว บทที่ 7 ครีบบาง แบบซิกแซก (zigzag, Z) มุม 60° บนผนังด้านเดียว มีเนื้อหาของบทนี้เช่นเดียวกับในบทที่ 5 แต่จะเพิ่มในส่วนของการเปรียบเทียบลักษณะครีบบางที่ทำมุม 30° , 45° และ 60° บนผนังด้านเดียว และการสร้างสมการสหสัมพันธ์ครีบบางที่ทำมุม 30° , 45° และ 60° บนผนังด้านเดียว บทที่ 8 ครีบบาง แบบซิกแซก (zigzag, Z) มุม 45° บนผนังบนล่าง จะเป็นหัวข้อที่ทำการทดลองติดครีบบางสองด้าน ครีบบางวางลักษณะซิกแซก จะประกอบไปด้วย ครีบบน-ล่างวางกลับกัน (X), ครีบบน-ล่างวางตรงกัน (Z), ครีบบน-ล่างวางกลับกันแต่แถวเอียงกัน (XS), ครีบบน-ล่างเหมือนกันแต่แถวเอียงกัน (ZS), การเปรียบเทียบลักษณะครีบบางที่ทำมุม 45° บนผนังบนล่าง, การเปรียบเทียบลักษณะครีบบางที่ทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ผ่านการคัด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มุม 45° ทั้งแบบผนังด้านบน และผนังบนและล่าง และการสร้างสมการสหสัมพันธ์ครึ่งบางที่ทำมุม 45° ครึ่งบน-ล่างวางกลับกันแต่แถวเดียวกัน (XS) บทที่ 9 สรุปลผลการทดลองและข้อเสนอแนะ จะเป็นส่วนสุดท้ายที่สรุปลผลการทดลองจากบทที่ 5 – 8



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทรรศน์

2.1 บทนำ

เนื้อหาในส่วนนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยในอดีตที่ศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนในช่องการไหลแบบขนาน ที่มีการติดครีบบนผนังเพื่อปรับปรุงลักษณะการไหลให้การไหลของของไหลส่งเสริมการถ่ายเทความร้อน เพื่อที่จะนำข้อมูลในอดีตมาทำการวิจัยหาแนวทางในการปรับปรุงลักษณะครีบบนผนังเพื่อที่จะเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การแลกเปลี่ยนความร้อนมีความสำคัญเป็นอย่างมากต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ ในชีวิตประจำวัน และในส่วนของอุตสาหกรรม อาทิเช่น ระบบระบายความร้อนในรถยนต์ ระบบปรับอากาศ ขบวนการผลิตอาหารในอุตสาหกรรม เป็นต้น ซึ่งทำให้มีการวิจัยในการพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนกันอย่างต่อเนื่อง ซึ่งในระบบการระบายความร้อนในช่องการไหลแบบขนานก็เป็นอีกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการพัฒนามาตลอดดังนี้

Han et al. [1] ทำการทดลองหาผลของรูปร่าง, มุมครีบบนผนัง และอัตราส่วนระยะพิชต์ต่อความสูงของช่องการไหล ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน และความเสียดทานในท่อที่ติดครีบบนผนังและด้านล่างของผิวท่อ โดยทำการทดลองในช่วงค่าเลขเรย์โนลด์ $Re = 3000-30,000$ โดยพบว่า การจัดวางครีบบนผนังแบบสมมาตรมีผลการทดลองไม่ต่างกับการจัดวางครีบบนผนังแบบเอียงกัน แต่รูปร่างของครีบบนผนังมีผลอย่างมากต่อค่าความเสียดทาน แต่มีผลน้อยต่อการถ่ายเทความร้อน ซึ่งสรุปได้ว่าครีบบนผนังที่มีมุม 45° ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุด

Liou et al. [2, 3] ทำการทดลองหาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน และความเสียดทานที่เกิดขึ้นของช่องการไหลสี่เหลี่ยมที่ติดครีบบนผนังลักษณะต่างๆ จากการศึกษาพบว่า ครีบบนผนังสี่เหลี่ยมจัตุรัสให้การเพิ่มสมรรถนะความร้อนดีที่สุด และยังศึกษาถึงผลของอัตราส่วนการปิดกั้นของครีบบนผนังและมุมปะทะ ที่มีอิทธิพลต่อการเพิ่มสมรรถนะความร้อน

Zhang et al. [4] ทำการศึกษากาการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมเปรียบเทียบกับอิทธิพลของร่องระหว่างครีบบนผนัง กับผนังครีบบนผนังที่มี Aspect Ratio, $AR = 1-10$ ที่ค่าเลขเรย์โนลด์ $Re = 10,000-50,000$ พบว่า ร่องระหว่างครีบบนผนังให้ค่าการถ่ายเทความร้อนมากกว่าผนังครีบบนผนัง แต่มีค่าความดันตกคร่อมใกล้เคียงกัน

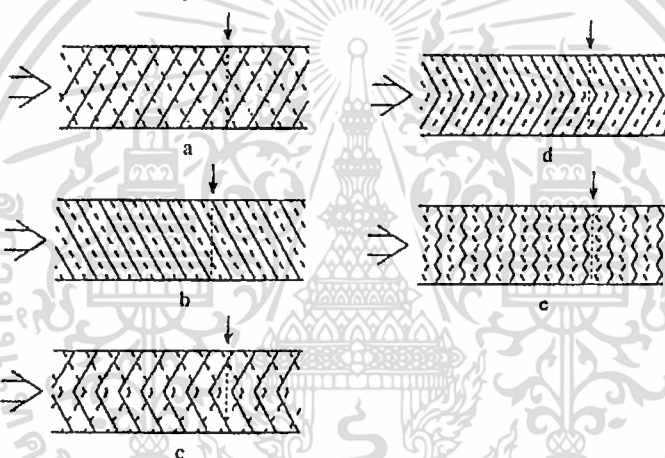
Taslim et al. [5] แสดงค่าเลขนัสเซิลท์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในท่อสี่เหลี่ยมที่มีครีบบนผนัง รูปตัววีเรียงต่อกันตลอดความกว้างช่องทดสอบ และไม่เรียงต่อเนื่อง โดยที่แนวครีบบนผนังวางทิศทางเดียวกับการไหลและมีทิศทางตรงข้ามกับการไหลสลับกันตลอดหน้าตัด บนผิวท่อทดสอบทั้งสองด้านตรงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้าม โดยให้ผิวท่อด้านหนึ่งถูกให้ความร้อนด้วยฟลักซ์ความร้อนคงที่ ในขณะที่ผิวท่อด้านอื่น ๆ ไม่มีการให้ความร้อนพบว่า ค่าเลขนัสเซลล์ท์มากที่สุดเมื่อแนวครีบบรูปตัววีมีทิศทางทางตรงข้ามกับการไหล

Gentry and Jacobi [6] ทำการทดลองการถ่ายเทความร้อนบนแผ่นทดสอบเรียบโดยมีการออกแบบครีบบเป็นลักษณะปีกไปติดบนแผ่นทดสอบ เพื่อทำให้เกิดการหมุนวนของของไหล เป็นการเพิ่มระดับการปั่นป่วนของการไหลของของไหล ช่วยให้การพาความร้อนดียิ่งขึ้นทำให้เพิ่มสมรรถนะทางความร้อน

Olsson and Sunden [7, 8] ทำการทดสอบผลของครีบบแบบต่าง ๆ ที่ติดบนท่อสี่เหลี่ยม บนผนังท่อสองด้านที่วางบนผนังตรงข้ามกัน โดยทำการศึกษารูปแบบการไหล ความดันตกคร่อม และการถ่ายเทความร้อนภายในท่อ ลักษณะการวางครีบบดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งทำการทดลองในช่วงค่าเลขเรย์โนลด์ $Re = 500-15,000$ การถ่ายเทความร้อนและความดันตกคร่อม พบว่า ครีบบรูปตัววีแบบต่อสลับทิศทางกันให้ค่ามากกว่าครีบบรูปอื่น ๆ



รูปที่ 2.1 โครงสร้างครีบบของ Olsson and Sunden [7]

Saidi and Sunden [9] ได้ทำการติดครีบบเอียงบนผนังสองด้านในทิศทางตรงข้ามกัน ในท่อทดสอบสี่เหลี่ยม ที่มีการไหลแบบปั่นป่วน เพื่อหาหลักการถ่ายเทความร้อน

Cho et al. [10] ได้ทำการทดลองหาหลักการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมที่มีครีบบวางเอียง 45° และ 90° ได้ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนประมาณ 1.2

Murata and Mochizuki [11] ได้ทำการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์เพื่อหาหลักการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมที่มีครีบบเอียงวางทำมุม 60° , $e/H = 0.1$ และ $P/e = 10$ ใช้ large eddy method ในการหาค่า ผลที่ได้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่กึ่งกลางระหว่างครีบบจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

Ahn [12] ทำการทดลองหาผลกระทบของครีบบรูปแบบต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทานในท่อสี่เหลี่ยม โดยทำการศึกษารูปทรงครีบบ 5 ชนิด ได้แก่ ครีบบรูปสี่เหลี่ยม ครีบบรูปสามเหลี่ยม ครีบบวงกลม ครีบบครึ่งวงกลมตรงต่ำ และครีบบครึ่งวงกลม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทรงสูง รวมถึงผนังเรียบดังแสดงใน โดยทำการศึกษาที่ความสูงครีบต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (e/D_h) เท่ากับ 0.0476 อัตราส่วนระยะพิชต์ต่อความสูงครีบ (P/e) เท่ากับ 8 และอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงเท่ากับ (AR) 2.33 จากการทดลองพบว่า แผ่นครีบสามเหลี่ยมมีค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนดีที่สุด ตามด้วยครีบสี่เหลี่ยม ส่วนครีบวงกลมและครึ่งวงกลมมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนใกล้เคียงกัน โดยที่ช่วงค่าเลขเรย์โนลด์ $Re = 10,000$ แผ่นครีบสามเหลี่ยมมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าแผ่นเรียบ 3 เท่า

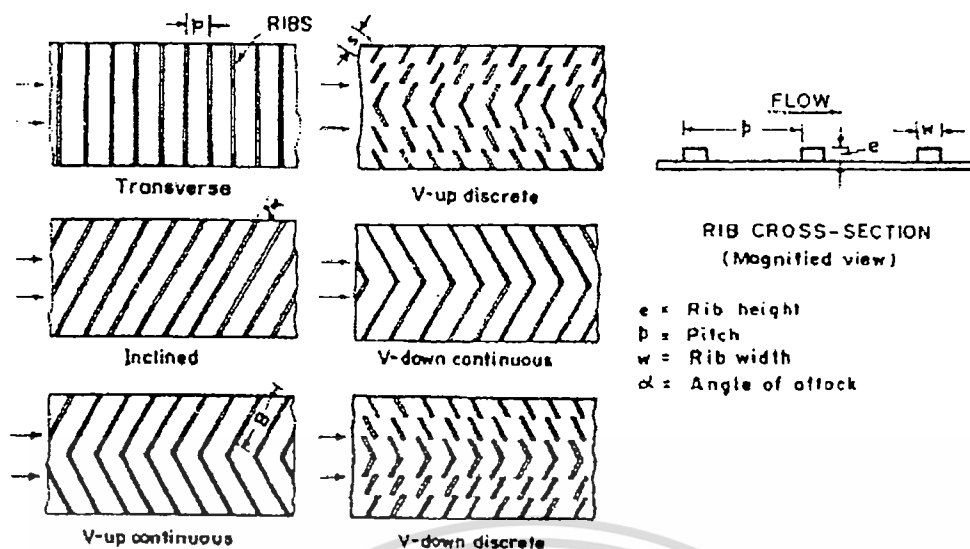
Gao and Sunden [13] ได้ใช้เครื่องมือ laser doppler velocimetry และ smoke visualization ทำการหาลักษณะการไหลในช่องขนานที่ติดครีบรูปตัววีมีทิศทางเดียวกับการไหล และตรงข้ามกับการไหล และทำการทดลองหาค่าการถ่ายเทความร้อน และความดันตกคร่อม ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า ครีบรูปตัววีมีทิศทางตรงข้ามกับการไหลให้ค่าการถ่ายเทความร้อน ตัวประกอบเสียดทาน และการเพิ่มสมรรถนะความร้อนมากกว่าครีบรูปตัววีที่มีทิศทางเดียวกับการไหล

Momin et al. [14] พบว่าครีบที่วางเป็นรูปตัว V มีมุม 60° ให้ค่า Nu และ f สูงประมาณ 2.3 และ 2.8 เท่าเมื่อเทียบกับแผ่นเรียบ โดยเรียงตามลำดับ

Bhagoria et al. [15] ทำการหาค่า Nu และ f ของช่องการไหลที่ใส่ครีบแบบลิ้มที่มีค่า $e/D = 0.015-0.033$ มีมุมระหว่าง $8^\circ - 15^\circ$ ได้ค่ามากกว่าแผ่นเรียบ 2.4 และ 5.3 เท่าตามลำดับ โดยมีการเปรียบเทียบกับครีบแบบอื่นด้วย

Chandra et al. [16] ได้ทำการวัดหาค่าการถ่ายเทความร้อน และความดันสูญเสียในท่อสี่เหลี่ยมที่มีการติดตั้งครีบแบบต่อเนื่องในบริเวณแผ่นทดสอบ มีค่า $e/H = 0.0625$ และ $P/e = 8$ บนผนังในแบบด้านเดียว สอง สาม และสี่ด้าน

Karwa [17] ทำการศึกษากการถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่เกิดขึ้นภายในท่อสี่เหลี่ยมที่มีติดตั้งครีบด้านเดียว โดยครีบที่ทดสอบมีลักษณะเป็นครีบตรง ครีบเอียง ครีบรูปตัววี ทั้งในลักษณะยาวต่อเนื่อง และแบบแยกส่วนดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยอุปกรณ์ที่ทดสอบมีอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงท่อสี่เหลี่ยมเท่ากับ (AR) 7.19 ถึง 7.75 อัตราส่วนความสูงครีบต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (e/D_h) เท่ากับ 0.0476 และ 0.050 และอัตราส่วนระยะพิชต์ต่อความสูงครีบ (P/e) เท่ากับ 10 โดยครีบรูปตัววีที่ทดสอบเป็นครีบรูปตัววีทำมุม 60° และครีบทแยงมุม โดยทำการทดลองในช่วงค่าเลขเรย์โนลด์ $Re = 2800-15,000$ และความร้อนที่ให้กับท่อสี่เหลี่ยมเป็นอิทธิพลของความชื้น

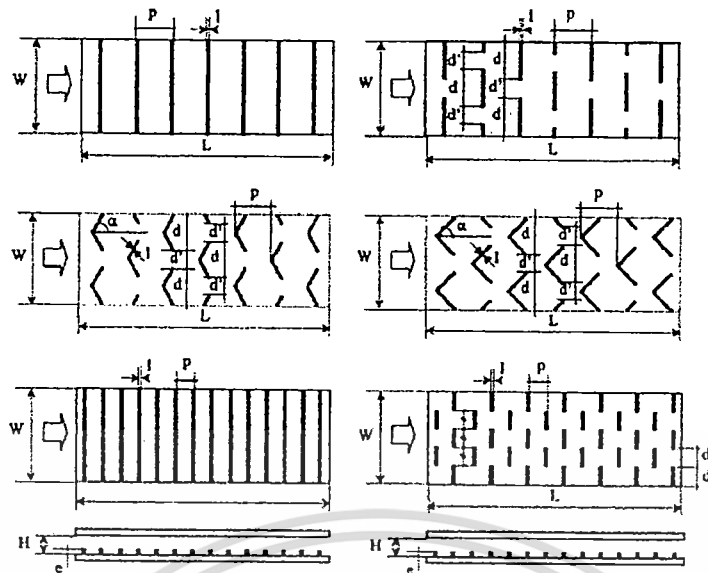


รูปที่ 2.2 รูปแบบครีบบนท่อสี่เหลี่ยมของ Karwa [17]

จากผลการทดลองพบว่า แผ่นครีบบรูปตัววียาวต่อเนื่อง ทำให้เกิดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมากที่สุด และมีค่ามากกว่าแผ่นเรียบประมาณ 3.40 ถึง 3.92 เท่า ส่วนแผ่นครีบบรูปตัววีชนิดยาวไม่ต่อเนื่องมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับแผ่นครีบลักษณะต่าง ๆ และมีค่ามากกว่าแผ่นเรียบประมาณ 2.35 ถึง 2.47 เท่า ในขณะที่ค่าเลขสแตนตัน (stanton number, St) สำหรับแผ่นครีบบรูปตัววีมีทิศทางตรงกันข้ามกับการไหลจะมีแนวโน้มมากที่สุดคือ 2.10 ถึง 2.47 เท่า เมื่อเทียบกับแผ่นเรียบ และครีบบตรงมีค่าเลขสแตนตันน้อยที่สุด

Tanda [18] ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมที่มีครีบบยาวต่อเนื่องและครีบบยาวไม่ต่อเนื่องบนแผ่นทดสอบ โดยทำการทดลองในช่วงค่าเลขเรย์โนลด์ $Re = 8900-28,500$ อัตราส่วนความสูงครีบบต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (e/D_h) เท่ากับ 0.09 และ 0.15 อัตราส่วนระยะพิทช์ต่อความสูงครีบบ (P/e) เท่ากับ 8 และ 13.3 และอัตราส่วนความสูงครีบบต่อความสูงช่องขนานเท่ากับ (e/H) 0.15 และ 0.25 รูปแบบครีบบนท่อสี่เหลี่ยมแสดงในรูปที่ 2.3 โดยครีบบมีความหนา (t) 3 mm ความสูง (e) 3 และ 5 mm และระยะพิทช์ (P) 40 mm แผ่นครีบบรูปตัววีมุม 45° และ 60° และครีบบยาวไม่ต่อเนื่องมีระยะห่างระหว่างแต่ละครีบบ (d') 20 mm

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อครีบบมีความสูงเพิ่มขึ้น ระยะพิทช์มีระยะกว้างขึ้น ค่าการเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตาม ส่วนค่าตัวสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน มีแนวโน้มลดลงเมื่อความสูงครีบบมีค่าลดลง



รูปที่ 2.3 รูปแบบครีบบนภายในท่อสี่เหลี่ยมของ Tanda [18]

Jaurker et al. [19] ทำการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของแผ่นโซลาร์ฮีตเตอร์สี่เหลี่ยมชนิดผิวครีบ-ร่อง โดยมีขอบเขตการศึกษาในช่วงค่าเลขเรย์โนลด์ $Re = 3000-21,000$ ลักษณะครีบ มีรายละเอียดดังนี้ ความสูงครีบต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (e/D_h) เท่ากับ $0.0181-0.0363$ อัตราส่วนระยะพิตช์ต่อความสูงครีบ (P/e) เท่ากับ $4.5-10.0$ และระยะร่องต่อระยะพิตช์เท่ากับ $0.3-0.7$

จากผลการทดลองพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าเลขเรย์โนลด์ และ e/D_h เพิ่มขึ้น และการเพิ่มขึ้นมีลักษณะเป็นเส้นตรง แต่ P/e และระยะร่องต่อระยะพิตช์มีค่าเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะมีค่าลดลง โดยที่แผ่นครีบ-ร่องจะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมากกว่าแผ่นครีบอย่างเดียว ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะร่องต่อระยะพิตช์ ความสูงครีบต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก และอัตราส่วนระยะพิตช์ต่อความสูงครีบ มีค่าเพิ่มขึ้น

Lu and Jiang [20] ทำการศึกษาครีบเอียงทำมุม $0^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ และ 90° กับทิศทางการไหล ครีบมีความสูง 0.8 mm มีความกว้าง 1 mm และมีระยะพิตช์ 4 mm เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของแผ่นโซลาร์ฮีตเตอร์สี่เหลี่ยมศึกษาในช่วงอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ $0.0010-0.0018 \text{ kg/s}$

จากการทดลองพบว่า ครีบมุม 60° ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและความดันตกคร่อมมากที่สุด ครีบมุม 0° ให้ค่าความดันตกคร่อมน้อยที่สุด ที่ระยะพิตช์ 6 mm ให้ความดันตกคร่อมน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับครีบมุมเดียวกัน

Sahu and Bhagoria [21] ได้รายงานถึงผลของผนังขรุขระสามารถแลกเปลี่ยนความร้อนได้ประสิทธิภาพสูงสุดประมาณ $51-83\%$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บูรณโชคไพศาล [22] ทำการศึกษาผลของการเจาะผิวบนพื้นผิวภายในช่องขนานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า รูปแบบครีบและการจัดวางครีบ ต่อการเพิ่มสมรรถนะความร้อนผ่าน เปรียบเทียบผลระหว่างช่องขนานผิวเรียบ กับช่องขนานเจาะร่องสี่เหลี่ยม, เจาะร่องสี่เหลี่ยมจัดวางรูปตัววี และเจาะร่องสี่เหลี่ยมที่มีการเพิ่มครีบสี่เหลี่ยม จัดวางแบบตรงกันและเยื้องกัน ใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ ช่วงเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 500-20,000 จากผลการทดลองพบว่า ช่องขนานที่มีการเจาะร่อง ทำให้เพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดัน และช่องขนานที่มีการเจาะร่องจัดวางแบบเยื้องกัน ให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าการจัดวางแบบตรงกัน แต่จะให้ผลตรงกันข้ามในกรณีที่ติดตั้งครีบเพิ่มเข้าไป โดยที่ช่องขนานเจาะร่องจัดวางรูปตัววีที่ $e/D_h = 0.33$ ให้สมรรถนะความร้อนสูงสุด

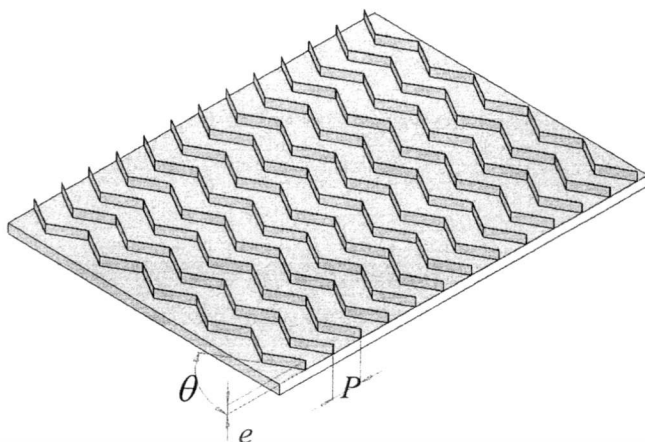
Mittal et al. [23] ได้ทำการเปรียบเทียบถึงผลของครีบวางเอียง และวางเป็นรูปตัว V ว่ามีประสิทธิภาพทางความร้อนสูงกว่าครีบในรูปแบบอื่น

Varun et al. [24] and Hans et al. [25] วิจัยเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน และความเสียดทาน รวมถึงได้ทำการเรียบเรียง และสรุปเทคนิคการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของของไหลภายในท่ออากาศร้อน ด้วยการจำลองความขรุขระบนผิวท่อเป็นฟังก์ชันกับความสูงของผิวขรุขระของ Varun et al. [24]

Promvong and Thianpong [26] และ Eiamsa-ard, S. and Promvong [27] ทำการศึกษาหาลักษณะการถ่ายเทความร้อนของครีบรูปหน้าตัดสามเหลี่ยมหน้าจั่ว และสามเหลี่ยมมุมฉาก ใช้อากาศในการทดสอบ โดยการไหลเป็นแบบปั่นป่วนที่ช่วงเลขเรย์โนลด์อยู่ในตั้งแต่ 5000 ถึง 16,000 ส่วนท่อทดสอบ และลักษณะการจัดวางครีบ

Varun et al. [28] ทำการทดลองหาลักษณะการถ่ายเทความร้อน และความเสียดทานที่เกิดขึ้นกับครีบวางเอียงบนแผ่นทดสอบที่รับความร้อนจากแสงอาทิตย์ พบว่าประสิทธิภาพที่ดีที่สุดคือที่ $P/e = 8$

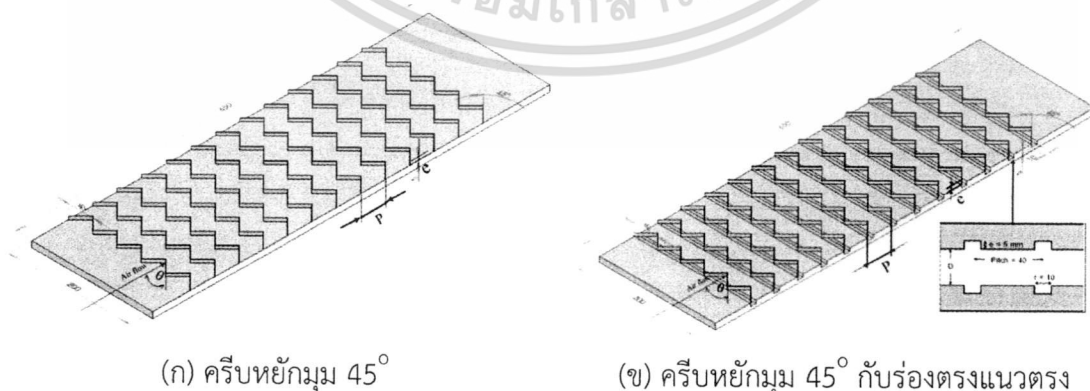
สกุลหลง [29] ได้ใช้แผ่นอลูมิเนียมบางพับเป็นครีบ ติดในช่องขนาดแล้วทำการศึกษากการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยช่องขนานที่มีครีบบาง และครีบสามเหลี่ยมที่สภาวะการให้ความร้อนที่ผิวแบบคงที่ ใช้อากาศในการทดลองไหลอยู่ในช่วงเลขเรย์โนลด์ $Re = 5000-25,000$ และทำการเปรียบเทียบผลของช่องขนานที่มีผนังเรียบ ช่องขนานที่มีครีบสามเหลี่ยมแบบต่าง ๆ ช่องขนานที่มีครีบบาง ทำมุม $45^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ และครีบตรง (90°) อัตราส่วนระยะพิชต์ต่อความสูงช่องขนาน $P/H = 1, 2$ และ 3 อัตราส่วนความสูงครีบต่อความสูงช่องขนาน $e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3 แผ่นทดสอบแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แผ่นทดสอบที่ติดครีบบางทำมุม 60° ของ สกูลหลง [29]

ผลการทดลองพบว่าครีบบางให้สัมประสิทธิ์การเพิ่มสมรรถนะความร้อนมากกว่า ครีบบางสามเหลี่ยม และผนังเรียบ โดยที่ครีบบาง 30° มีค่าสัมประสิทธิ์การเพิ่มสมรรถนะความร้อนเฉลี่ยมากที่สุดคือ 1.97

มะลิกุล [30] ทำการศึกษาการเพิ่มสมรรถนะความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนภายในท่อช่องทางานสี่เหลี่ยมเช่นเดียวกับ สกูลหลง [29] มีข้อแตกต่างตรงที่มีการเพิ่มร่องบนแผ่นทดสอบ แล้วทำการติดครีบบางเพื่อเปรียบเทียบกับกรณีเป็นแผ่นเรียบที่มีการติดครีบบาง ใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ ในช่วงของค่าเลขเรย์โนลด์ $Re = 3000-20,000$ อีกทั้งยังมีการพิจารณาถึงกรณีการติดครีบบางที่ผิวบนด้านเดียวเท่านั้น และกรณีติดครีบบางทั้งผิวบนและผิวล่าง ซึ่งมีการจัดวางครีบบางเป็น 2 แบบ คือ แบบตรงกันและเยื้องกัน แสดงในรูปที่ 2.5 ผลการทดลองพบว่า ที่ค่าเลขเรย์โนลด์ต่ำ ๆ สำหรับกรณีท่อที่มีครีบบางที่มีค่าอัตราส่วนระยะพิช $P/H = 1.0$ ติดตั้งด้านเดียวบนแผ่นเรียบและบนแผ่นทดสอบที่มีร่อง จะมีค่าสมรรถนะความร้อนสูงสุดเท่ากับ 1.84 และ 1.71 ตามลำดับ มีค่ามากกว่ากรณีติดครีบบางทั้งผิวบนและผิวล่าง



(ก) ครีบบางมุม 45°

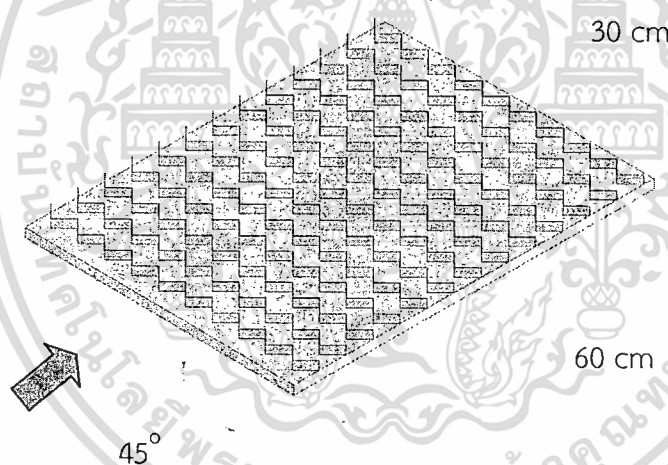
(ข) ครีบบางมุม 45° กับร่องตรงแนวตรง

รูปที่ 2.5 แผ่นทดสอบของ มะลิกุล [30]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sripattanapipat and Promvong [31] แสดงการวิเคราะห์เชิงตัวเลขการถ่ายเทความร้อนของของไหลที่ไหลแบบราบเรียบในลักษณะ 2 มิติ ในช่องขนานที่ติดแผ่นกั้นรูปเพชรที่ผนังบนและล่างแนวเอียงมีมุมยอดเพชร 0° (แผ่นกั้นแบน), 5° , 10° , 15° , 25° และ 35° ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ในการคำนวณคิดลักษณะการไหลเป็นคาบ ใช้เงื่อนไขอุณหภูมิที่ผนังคงที่ เลขเรย์โนลด์ที่ใช้ในการคำนวณอยู่ในช่วง 100-600 พบว่าเมื่อลดมุมที่ยอดรูปเพชรจะทำให้ค่าเลขนัสเซิลท์และสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเพิ่มขึ้น และมุมยอดเพชรที่ 5° และ 10° ให้ค่าสัมประสิทธิ์การเพิ่มสมรรถนะความร้อนสูงกว่ามุมยอดเพชรที่ 0° (แผ่นกั้นแบน), 15° , 25° และ 35°

อำไพจิตร [32] ทำการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อแผ่นขนานที่มีครีบริบหักรูปตัววีทำมุมปะทะกับของไหล 45° กำหนดให้อัตราส่วนความสูงครีบริบต่อความสูงช่องขนาน $e/H = 0.05, 0.1, 0.15, 0.2$ และ 0.25 อัตราส่วนระยะพิชต์ต่อความสูงช่องขนาน $P/H = 1, 2$ และ 3 โดยติดตั้งครีบริบที่ผิวบนด้านเดียว และทั้งผิวบนและผิวล่าง มีการจัดวางครีบริบแบบเอียงกันและตรงกัน ทำการทดลองที่สภาวะให้ความร้อนแบบฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ ที่ผนังด้านบนของแผ่นทดสอบ และใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ ในช่วงเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 5000 ถึง 23,000 แผ่นทดสอบแสดงในรูปที่ 2.6



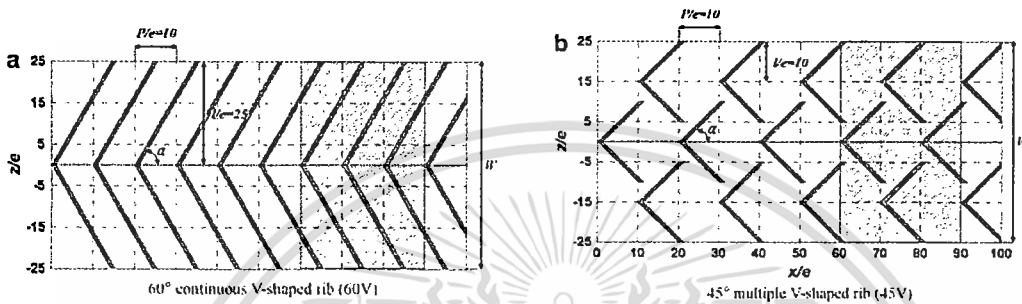
รูปที่ 2.6 ครีบริบหักรูปตัววีมุม 45° ของ อำไพจิตร [32]

ผลการทดลองพบว่า ชุดท่อแผ่นขนานที่ติดตั้งครีบริบหักรูปตัววีโดยติดตั้งที่ผิวบนและผิวล่างแบบวางครีบริบตรงกัน ที่ $e/H = 0.10$, $P/H = 1$ มีการเพิ่มสมรรถนะความร้อนเฉลี่ยมากกว่าท่อแผ่นขนานผนังเรียบ 2.91 เท่า

Thianpong et al. [33] ได้ทำการศึกษาหาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนพบว่าครีบริบสามเหลี่ยมให้ค่ามากที่สุด

Lee and Rhee [34] ทำการศึกษาลักษณะการไหล และการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมที่ติดตั้งครีบริบหักรูปตัววีที่ผิว ทำมุม 60° แบบครีบริบเดียวต่อเนื่อง และครีบริบหักรูปตัววีมุม 45° หลายครีบริบ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วางสลับแถว ค่าเลขเรย์โนลด์ $Re=10,000-30,000$ โดยเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (D_h) เท่ากับ 75, 50, 38.4 ค่า Aspect Ratio เท่ากับ 3, 5, 6.8 อัตราส่วนความสูงครีบอกต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (e/D_h) เท่ากับ 0.04, 0.06, 0.078 และอัตราส่วนระยะพิชต์ต่อความสูงครีบอก (P/e) เท่ากับ 10 รูปแบบครีบอก แสดงในรูปที่ 2.7 ผลการทดลองพบว่า ครีบอกรูปตัววีมุม 60° แบบครีบอกเดี่ยวต่อเนื่องให้การถ่ายเทความร้อนมากกว่าครีบอกรูปตัววีมุม 45° หลายครีบอกวางสลับแถว และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของครีบอกรูปตัววีมุม 45° หลายครีบอกวางสลับแถวจะน้อยกว่าครีบอกรูปตัววีมุม 60° แบบครีบอกเดี่ยวต่อเนื่อง



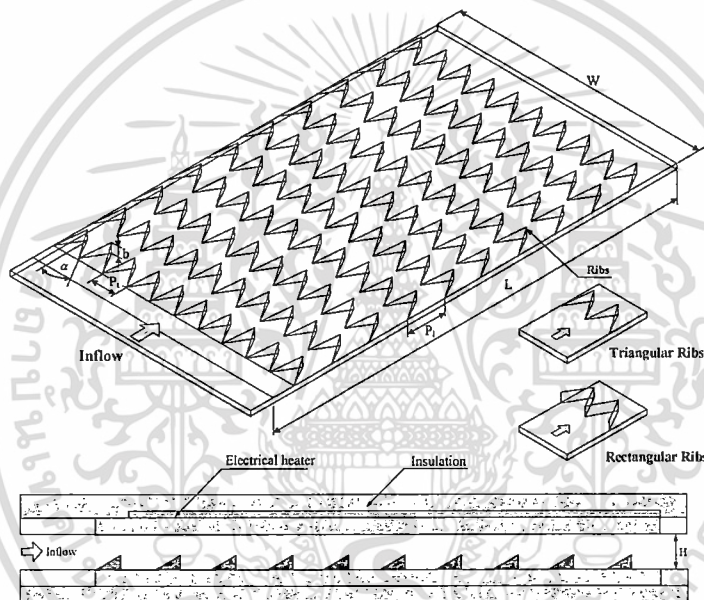
รูปที่ 2.7 รูปแบบครีบอกภายในท่อสี่เหลี่ยมของ Lee and Rhee [34]

ทำนา [35] นำเสนอการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อหาลักษณะการถ่ายเทความร้อนของการไหลในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีอุณหภูมิผนังคงที่ ไหลในแบบราบเรียบช่วงจาก $Re = 100$ ถึง 1000 โดยมีการติดตั้งแผ่นกั้นวางขวาง แผ่นกั้นวางเอียง และแผ่นกั้นวางเอียงรูปตัววีที่ผนังทั้งสองด้านของท่อ ซึ่งมีการวางแผ่นกั้นแบบตรงกัน ในส่วนแผ่นกั้นวางเอียงมีลักษณะการจัดวางเอียงทำมุมปะทะกับทิศทางการไหลดังนี้ $\alpha = 20^\circ, 30^\circ$ และ 45° และมีค่าอัตราส่วนความสูงครีบอกต่อความสูงช่องการไหล (e/H) เท่ากับ 0.10, 0.15, 0.20, 0.25 และ 0.30 ตามลำดับ ส่วนแผ่นกั้นวางเอียงรูปตัววีมีลักษณะการจัดวางเอียงทำมุมปะทะที่ $\alpha = 30^\circ$ การไหลผ่านแผ่นกั้นรูปตัววีพิจารณา 2 กรณี คือ กรณีปลายวีชี้ตามทิศทางการไหล และกรณีปลายวีชี้ทวนทิศทางการไหล ผลลัพธ์ที่ได้จากท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดแผ่นกั้นถูกนำไปเปรียบเทียบกับท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบ พบว่ามีการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบ การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนการปิดกั้นทำให้ค่าเลขนัสเซิลท์และสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเพิ่มขึ้น จากลักษณะการจัดวางแผ่นกั้นพบว่า แผ่นกั้นวางเอียงรูปตัววีจะเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าแผ่นกั้นวางเอียงและแผ่นกั้นวางขวาง โดยแผ่นกั้นวางเอียงรูปตัววีที่ $\alpha = 30^\circ$ แบบปลายวีชี้ทวนทิศทางการไหลให้การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าแบบปลายวีชี้ตามทิศทางการไหล และยังพบว่าแผ่นกั้นรูปตัววีแบบปลายวีชี้ทวนทิศทางการไหลที่ $e/H = 0.125$ มีสัมประสิทธิ์การเพิ่มสมรรถนะความร้อนสูงที่สุดเท่ากับ 3.33

Promvong et al. [36] และ Chompookham et al. [37] ทำการทดลองหาลักษณะการถ่ายเทความร้อนของครีบอก และ ปีกช่วยให้เกิดการหมุนวน (winglet vortex generators) ที่มีการปรับเปลี่ยนมุม ผลพบว่าถ้ามีการติดตั้งอุปกรณ์ช่วยให้การไหลปั่นป่วน (turbulators) ก่อนถึงบริเวณทดสอบจะมีค่าการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าติดตั้งครีบอก หรือปีกช่วยให้เกิดการหมุนวน เพียงอย่างเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

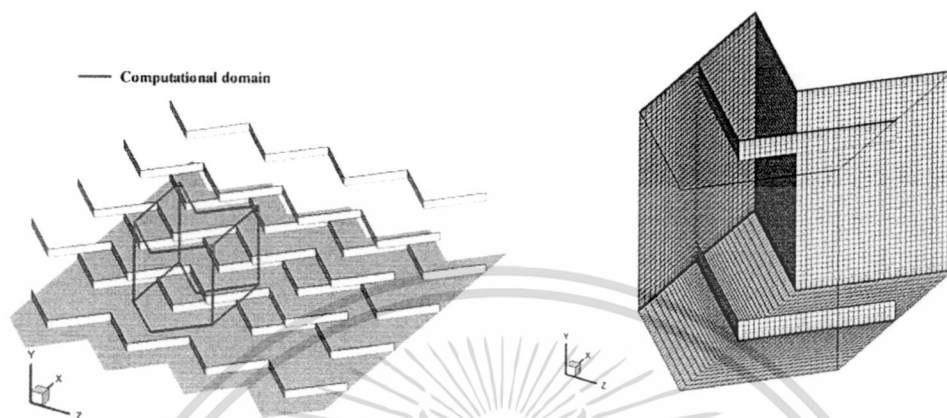
กนกนัยการ [38] ได้ศึกษาคุณลักษณะของการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานในช่องแผ่นขนานที่ติดครีบบางตัววีรูปสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมผืนผ้าทำมุม 30° ซี่ตามทิศทางการไหล ที่อัตราส่วนระยะพิตช์ต่อความสูงช่องขนาน $P/H = 1, 2, 3$ และ 4 อัตราส่วนความสูงครีบบต่อความสูงช่องขนาน $e/H = 0.2, 0.3$ และ 0.4 แสดงในรูปที่ 2.16 ที่สภาวะพลักซ์ความร้อนแบบคงที่ ในช่วงเลขเรย์โนลด์ $Re = 5000-25,000$ โดยทำการเปรียบเทียบกับผลของช่องขนานผนังเรียบ จากผลการทดลองพบว่า กรณีครีบบางตัววีรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่ค่า $e/H = 0.4, P/H = 1$ ให้ค่าการถ่ายเทความร้อน และสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงที่สุด ให้ค่าเลขนัสเซลท์เฉลี่ยมากกว่าท่อผนังเรียบ 6.15 เท่า มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าท่อผนังเรียบ 67.68 เท่า เมื่อพิจารณาถึงค่าสัมประสิทธิ์การเพิ่มสมรรถนะความร้อนพบว่า ครีบบางตัววีรูปสามเหลี่ยม ที่ค่า $e/H = 0.4, P/H = 1$ ให้ค่าสัมประสิทธิ์การเพิ่มสมรรถนะความร้อนเฉลี่ยมากกว่าท่อผนังเรียบ 1.839 เท่าซึ่งเป็นค่าสูงสุด



รูปที่ 2.8 ครีบบางตัววีของ กนกนัยการ [38]

Sripattanapipat [39] ทำการศึกษาเชิงตัวเลขเพื่อหาลักษณะการถ่ายเทความร้อนและพฤติกรรมการไหลแบบราบเรียบของช่องการไหลที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นรูปคลื่นแบบสามเหลี่ยมที่ผนังผิวบน และผิวล่างตรงกันที่มีอุณหภูมิผิวคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ในส่วนของครีบบมีมุมปะทะ (α) เท่ากับ $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ และ 90° ตามลำดับ และอัตราส่วนความสูงครีบบต่อความสูงช่องการไหล e/H ตั้งแต่ 0.05 ถึง 0.30 สำหรับอัตราส่วนระยะพิตช์ต่อความสูงช่องขนาน P/H จะให้เป็น 1.0 สำหรับกรณี มุมปะทะ $45^\circ, 60^\circ$ และ 90° ส่วนมุมปะทะ 30° จะมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นตั้งแต่ 0.5 ถึง 2.0 ในการศึกษาใช้อัตราการไหลที่ใช้จะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าเลขเรย์โนลด์ ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 100 จนถึง 1000 ผลที่ได้พบว่าช่องการไหลที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นจะเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าช่องการไหลผิวเรียบ โดยการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนความสูงครีบบต่อความสูงช่องการไหล ทำให้ค่าเลขนัสเซลท์และสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเพิ่มขึ้น นอกจากนี้จากการวิเคราะห์สนามการไหลพบว่า เมื่อมุมปะทะของแผ่นกั้นมีขนาดเล็กลง จะทำให้เกิดการหมุนเอกสสารนี้เป็นเอกสสารที่สวางไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วนตามทิศทางการไหลเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มการถ่ายความร้อน ในขณะที่เดียวกัน การสูญเสียความดันก็จะลดลงอีกด้วย ทำให้ตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อน (TEF) ของแผ่นกั้นรูปคลื่นสูงกว่าแผ่นกั้นขวางที่ใช้กันอยู่ทั่วไป โดยมีค่า TEF สูงสุดเท่ากับ 2.33 ที่ $e/H = 0.075$, $P/H = 1.00$ ที่ $Re = 1000$ ของแผ่นกั้นรูปคลื่นมุมปะทะ 30°



รูปที่ 2.9 โครงสร้างช่องขนานและโดเมนการคำนวณเชิงตัวเลขของ Sripattanapit [39]

Promvong et al. [40] แสดงผลที่ได้จากการคำนวณทางคณิตศาสตร์หาค่าประสิทธิภาพทางความร้อนของการไหลแบบราบเรียบผ่านช่องการไหลที่มีครีบบางเอียงทำมุม 45° บนผนังด้านเดียว ซึ่งพบว่าที่มุมครีบบาง 45° ที่ครีบบางที่มีค่า $P/H=0.4$ จะมีค่าประสิทธิภาพทางความร้อนมากกว่าครีบบางที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล (90°) 2-3 เท่า

2.3 แนวทางการศึกษาวิจัย

จากงานวิจัยที่ได้ยกตัวอย่างมาโดยส่วนใหญ่แล้วจะมุ่งสนใจที่จะศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน และการสูญเสียความดันภายในช่องขนานแบบสี่เหลี่ยม ที่ใช้ครีบบางเป็นแผ่นบางวางขวางการไหล โดยมีการปรับระยะพิตต์ และความสูงครีบบาง ตัวครีบบางจะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมวางตรง และเอียงขวางทิศทางการไหล ซึ่งในงานวิจัยนี้จะนำแนวคิดในการประยุกต์นำครีบบางมาทำการติดตั้งในท่อสี่เหลี่ยมขนานเช่นเดียวกัน โดยพิจารณารูปร่าง, ขนาด, มุม, ระยะพิตต์ และตำแหน่งการติดตั้งครีบบาง ซึ่งส่งผลต่อลักษณะการถ่ายเทความร้อนของช่องไหล การสูญเสียความดันและแรงเสียดทานภายในท่อทดสอบ โดยกำหนดวัตถุประสงค์เพื่อทำการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนภายในช่องขนานที่มีครีบบางวางในลักษณะซิกแซก (zigzag, Z) ต่อเนื่องตลอดช่วงทดสอบ ซึ่งจะเป็นการหาพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อน เพื่อเป็นองค์ความรู้ใหม่ และแนวทางในการตัดสินใจเลือกใช้ และออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมให้มีประสิทธิภาพการทำงานสูงสุด และเพื่อการขยายข้อมูลการศึกษาครีบบางในรูปแบบต่างๆ ตลอดจนลักษณะการติดตั้ง การจัดวาง และทิศทางการของมุมครีบบาง เป็นทางเลือกให้กับผู้ใช้งานตัดสินใจเลือกใช้ตามความเหมาะสมของระบบของผู้ใช้งานต่อไป อีกทั้งยังเป็นแนวทางในการพัฒนาเทคโนโลยีของผู้ที่สนใจ นักออกแบบ นักศึกษาและนักวิจัย อาทิเช่น ตัวแปรหรือพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในท่อที่มีการติดตั้งครีบบาง และยังเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น นำไปสู่การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ลดการใช้เชื้อเพลิง ซึ่งสามารถ

ไม่่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลดการเกิดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ยังสามารถลดขนาดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนให้มีขนาดกะทัดรัดเหมาะสม นำไปสู่การลดการใช้วัสดุ และพื้นที่ทำงาน อีกทั้งยังมีประโยชน์ต่อระบบ และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งหลาย โดยเฉพาะระบบทำความเย็นที่จะมีขนาดเล็กลง นำไปสู่การลดใช้ปริมาณสารทำความเย็นให้น้อยลง ทำให้ลดปรากฏการณ์เรือนกระจก ที่นำไปสู่ภาวะโลกร้อนลงได้

ดังนั้นจะเห็นได้ว่า งานวิจัยนี้จึงมีผลดีทำให้มีการใช้พลังงาน และทรัพยากรอย่างคุ้มค่า และมีประสิทธิภาพ สามารถลดต้นทุนการผลิตในอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นประโยชน์โดยตรงต่อการพัฒนาในเชิงเศรษฐกิจ องค์ความรู้ที่ได้ก็เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาเทคโนโลยีที่ยั่งยืนเพื่อความเป็นอยู่ที่ดีของสังคม ลดภาวะโลกร้อน ลดมลพิษ และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 ทฤษฎี

3.1 บทนำ

ในงานวิจัยนี้ศึกษาถึงลักษณะการถ่ายเทความร้อนของของไหลภายในท่อ ที่ไหลผ่านครีบบางที่วางเรียงขวางในลักษณะซิกแซก (zigzag, Z) ไปมาตลอดช่วงทดสอบที่มีการให้ความร้อน ซึ่งทฤษฎี [41-49] ที่เกี่ยวข้องทั้งหมดจะประกอบไปด้วยหลักๆ อยู่สองหัวข้อคือ กลศาสตร์ของไหล และการถ่ายเทความร้อน ในส่วนของกลศาสตร์ของไหลจะเน้นในส่วนของทฤษฎีการไหลภายในท่อ และการถ่ายเทความร้อนก็จะมีอยู่หลายหัวข้อประกอบไปด้วย สมดุลพลังงาน สหสัมพันธ์การพาความร้อนในรูปแบบต่าง ๆ การเพิ่มการถ่ายเทความร้อน เพื่อวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน การสูญเสียความดัน และตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อน (thermal performance enhancement factor, TEF)

3.2 กลศาสตร์ของไหล

ลักษณะการไหลภายในท่อมี่ลักษณะตามรูปที่ 3.1 คือชั้นขอบเขตของการไหลที่ได้รับผลกระทบจากความหนืดของของไหลเรียกว่า ชั้นขอบเขตการไหล (boundary Layer) จะค่อยๆ ขยายบริเวณจากผนังท่อไปสู่กึ่งกลางท่อ โดยในส่วนนี้ความเร็วของของไหลที่หน้าตัดเดียวกันนั้นจะมีค่าไม่เท่ากันจากผลของความหนืดของของไหลกระทำกับผนัง แต่ที่นอกบริเวณดังกล่าวความหนืดจะไม่มีผลกระทบต่อลักษณะการไหล ในส่วนช่วงแรกที่เกิดผลของความหนืดยังไม่มีผลต่อของไหลตลอดทั้งหน้าตัดนั้นจะเรียกว่า การไหลที่กำลังปรับตัว (developing flow) และเรียกช่วงระยะของการไหลแบบนี้ว่า hydrodynamic entrance region และหลังจากที่ความหนืดมีผลต่อการไหลทั้งหน้าตัดรูปร่างของความเร็วจะมีลักษณะชัดเจนแน่นอนไม่เปลี่ยนแปลงต่อไปอีก ซึ่งการไหลลักษณะเช่นนี้เรียกว่า การไหลที่ปรับตัวเต็มที่ (fully developed flow)

ตัวพารามิเตอร์ความดันตกคร่อมเกี่ยวข้องกับกำลังงานของพัลลมโดยตรง ยิ่งความดันตกคร่อมมากจำเป็นต้องใช้กำลังขับเคลื่อนของไหลมากขึ้น

การจ่ายกำลังให้พัลลม, \dot{W}_{in}

$$\dot{W}_{in} = \dot{V} \Delta p \quad (3.1)$$

ความดันตกคร่อมของของไหล, Δp

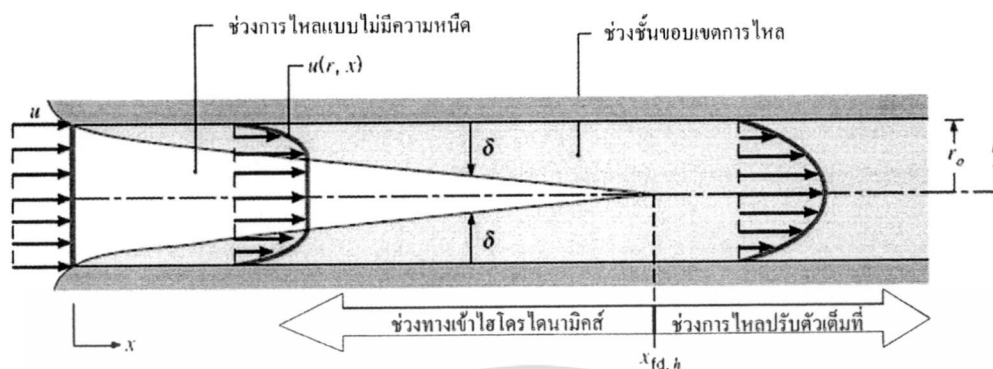
$$\Delta p = f \frac{\rho L \bar{V}^2}{2D} \quad (3.2)$$

3.2.1 สภาวะการไหล

พิจารณาการไหลแบบราบเรียบในทอกลมที่มีรัศมี r_0 ตามรูปที่ 3.1 สำหรับการไหลภายในทอนั้นต้องคำนึงถึงการขยายตัวของช่วงบริเวณทางเข้า (entry region) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับว่าการไหลเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั่นเป็นการไหลแบบใดระหว่างการไหลแบบราบเรียบหรือแบบปั่นป่วน เลขเรย์โนลด์สำหรับการไหลภายในท่อกลมกำหนดเป็น



รูปที่ 3.1 การก่อตัวของชั้นขอบเขตการไหลของการไหลแบบราบเรียบในท่อกลม [46]

$$Re_D = \frac{\rho u_m D}{\mu} \tag{3.3}$$

เมื่อ

u_m คือ ความเร็วเฉลี่ยภายในท่อ
 D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ

เลขเรย์โนลด์วิกฤติ สำหรับการเปลี่ยนแปลงของการไหล จากการไหลแบบราบเรียบเป็นการไหลแบบปั่นป่วน เริ่มต้นจาก $Re_{D,c} \approx 2300$ และการไหลเป็นแบบปั่นป่วนเต็มที่ ที่ $Re_D \geq 4000$

ส่วนในการไหลแบบปั่นป่วน $Re_D \geq 4000$ ไม่มีสมการที่แน่นอนสำหรับหาระยะทางสำหรับการปรับตัว แต่รู้เพียงว่าไม่เกี่ยวข้องกับเลขเรย์โนลด์ และมีค่าประมาณดังนี้

$$10 \leq (x_{fd,h}/D) \leq 60 \tag{3.4}$$

สำหรับค่าที่ใช้ในที่นี้ เราจะสมมุติว่า $x_{fd} > 10D$ สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน

3.2.2 ความเร็วเฉลี่ย

ความเร็วภายในท่อจะแปรเปลี่ยนทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัดของท่อ ดังนั้นจึงใช้ความเร็วเฉลี่ย u_m แทน โดยนิยามว่า ความเร็วเฉลี่ย คือ ความเร็วคูณด้วยพื้นที่หน้าตัดของท่อและความหนาแน่นของของไหล จะเท่ากับอัตราการไหลของมวล

$$\dot{m} = \rho u_m A_c \tag{3.5}$$

ถ้าเป็นการไหลสภาวะคงที่ ที่อัดตัวไม่ได้ภายในท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่ ค่า m และ u_m ย่อมมีค่าคงที่ตลอดความยาวท่อ สำหรับการใช้น้ำเพื่อการศึกษานี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับท่อกลม ($A_c = \pi D^2/4$) ค่าของเลขเรย์โนลด์ต์คือ

$$Re_D = \frac{4\dot{m}}{\pi D \mu} \quad (3.6)$$

เพราะว่าค่า \dot{m} อาจหาได้จากการอินทิเกรตของฟลักซ์มวล (ρu) ทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัด

$$\dot{m} = \int_{A_c} \rho u(r, x) dA_c \quad (3.7)$$

ดังนั้น สำหรับท่อกลม กรณีของไหลอัดตัวไม่ได้ จะได้

$$u_m = \frac{\int_{A_c} \rho u(r, x) dA_c}{\rho A_c} = \frac{2\pi\rho}{\rho\pi r_0^2} \int_0^{r_0} u(r, x) r dr = \frac{2}{r_0^2} \int_0^{r_0} u(r, x) r dr \quad (3.8)$$

ซึ่งจะหาค่า u_m ได้ทันที เมื่อรู้ velocity profile, $u(r)$ ที่ตำแหน่งนั้น

3.2.3 การเปลี่ยนแปลงความดันและตัวประกอบเสียดทานในการไหลแบบปรับตัวเต็มที่

ในงานด้านวิศวกรรมทั่วไป จะให้สนใจเกี่ยวกับการเกิดความดันตกคร่อมในการไหลภายในท่อ เนื่องจากตัวพารามิเตอร์นี้เกี่ยวข้องกับการหาขนาดกำลังงานของปั๊มหรือพัดลมโดยตรง ในการหาความดันตกคร่อม หาได้โดยใช้ตัวประกอบเสียดทานของ Moody ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ไร้มิติ โดยนิยามว่า

$$f = \frac{-(dp/dx)D}{\rho u_m^2/2} \quad (3.9)$$

ค่านี้ต่างกับสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน C_f ซึ่งบางครั้ง เรียกว่า ตัวประกอบเสียดทานแผ่นนิ่ง ซึ่งนิยามว่า

$$C_f = \frac{\tau_s}{\rho u_m^2/2} \quad (3.10)$$

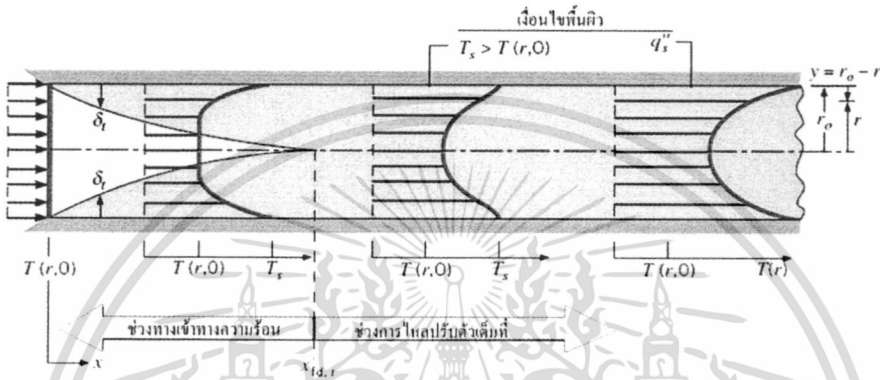
เพราะว่าแรงเฉือนบนผิวของของไหลเท่ากับทิศทางตรงกันข้ามแรงบนผิวของของไหล ดังนั้นความเค้นเฉือนบนผิวกำหนดเป็น $\tau_s = -\mu(du/dr)|_{r=r_0}$ ได้

$$C_f = \frac{f}{4} \quad (3.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การถ่ายเทความร้อน

การก่อตัวของชั้นขอบเขตทางความร้อนในท่อกลม แสดงในรูปที่ 3.2 ที่อุณหภูมิสม่ำเสมอ $T(r,0)$ ซึ่งมีค่าแตกต่างจากอุณหภูมิที่ผิว การพาความร้อนจะเกิดขึ้นและชั้นขอบเขตการไหลของความร้อนจะเริ่มต้นก่อตัวขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าสถานะที่ผิวของท่อคงที่ โดยอาจเป็นอุณหภูมิผิวสม่ำเสมอคงที่ ($T_s = \text{คงที่}$) หรือ ฟลักซ์ความร้อนที่ผิวสม่ำเสมอ ($q_s'' = \text{คงที่}$) สถานะที่ปรับตัวคงที่ของความร้อน (thermally fully developed condition) ก็จะเกิดขึ้น ในที่สุดรูปร่างของอุณหภูมิที่ปรับตัวเต็มที่จะแตกต่างกันตามเงื่อนไขไม่ว่าอุณหภูมิผิวคงที่หรือฟลักซ์ความร้อนคงที่



รูปที่ 3.2 การก่อตัวของชั้นขอบเขตทางความร้อนในท่อกลม [46]

สำหรับการไหลแบบราบเรียบ ระยะความยาวของทางเข้าสำหรับปรับตัว

$$\left(\frac{x_{fd,t}}{D} \right)_{\text{lam}} \approx 0.05 \text{Re}_D \text{Pr} \tag{3.12}$$

โดยการเปรียบเทียบบริเวณทางเข้า (entrance region) ของอุณหภูมิตามสมการ (3.12) กับสมการของความเร็ว (3.4) จะพบว่าต่างกันที่ค่า Pr เท่านั้น จึงพอสรุปได้ว่า ถ้า $Pr > 1$ ไฮโดรไดนามิกส์ชั้นขอบเขตการไหลขยายเร็วกว่าชั้นขอบเขตการไหลของความร้อนมาก ($x_{fd} > x_{fd,t}$) และจะกลับกันถ้า $Pr < 1$ สำหรับค่า Pr สูง ๆ เช่น น้ำมัน ($Pr \geq 100$) x_{fd} จะน้อยกว่า $x_{fd,t}$ มาก และอาจสมมติได้ว่ารูปทรงของความเร็วที่ปรับตัวเต็มที่มีตลอดช่วงบริเวณทางเข้าของความร้อน ในทางกลับกันของไหลที่มีค่า Pr ต่ำมาก ๆ เช่น โลหะเหลว $Pr \leq 0.05$ รูปร่างอุณหภูมิอาจเป็นแบบปรับตัวเต็มที่ได้เร็วมาก ในขณะที่รูปร่างของความเร็วยังอยู่ในช่วงกำลังก่อตัวอยู่ ส่วนในการไหลแบบปั่นป่วนเงื่อนไขทั้งสองเกือบจะเป็นอิสระไม่ขึ้นกับ Pr และโดยการประมาณได้ว่า $x_{fd,t}/D = 10$

3.3.1 อุณหภูมิเฉลี่ย

ในเรื่องอุณหภูมิ จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิเฉลี่ย (T_m) โดยให้ความหมายได้ดังสมการ (3.13)

$$T_m = \frac{\int_{A_c} \rho u c_v T dA_c}{\dot{m} c_p} \tag{3.13}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับท่อกลม และเป็นการไหลที่อัดตัวไม่ได้

$$T_m = \frac{2}{u_m r_0^2} \int_0^{r_0} u T r dr \quad (3.14)$$

ค่าของ T_m จะเปลี่ยนแปลงตามแนว x ถ้ามีความร้อนเข้าหรือออกจากของไหล ซึ่งต่างจาก u_m มีค่าคงที่ สำหรับท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่

ฟลักซ์ความร้อน (q_s'') ระหว่างของไหลกับผิวท่อที่จุดใด ๆ หาได้จากกฎการเย็นตัวของนิวตัน

$$q_s'' = h(T_s - T_m) \quad (3.15)$$

ซึ่ง h เป็นสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ตำแหน่งใด ๆ T_m เปลี่ยนแปลงตามทิศทาง นั่นคือ dT_m/dx จะไม่เป็นศูนย์ ถ้ามีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้น

3.3.2 สถานะการปรับตัวเต็มที่

เนื่องจากการพาความร้อนเกิดขึ้นจริงระหว่างผิวและของไหล นั่นคืออุณหภูมิของไหลยังคงเปลี่ยนแปลงตามระยะ x สิ่งหนึ่งที่อยาการู้คือเกิดภาวะ thermal fully developed หรือยัง สถานการณ์นี้จะแตกต่างไปจากกรณีการไหลของของไหลที่ $(\partial u/\partial x) = 0$ ในช่วงบริเวณปรับตัวเต็มที่ ในทางกลับกัน ถ้ามีการพาความร้อน (dT_m/dx) เช่นเดียวกับ $(\partial T/\partial x)$ ที่รัศมี r ใด ๆ จะไม่เป็นศูนย์ ผลที่ตามมา คือ รูปร่างของอุณหภูมิ $T(r)$ จะเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องกับ x ซึ่งเปรียบเสมือนว่า สถานะการปรับตัวเต็มที่ของอุณหภูมิไม่เคยเกิดขึ้นเลย ปรากฏการณ์นี้จะต้องจัดใหม่ให้อยู่ในรูปไร้มิติของอุณหภูมิเพื่อให้ได้เงื่อนไข

ความแตกต่างอุณหภูมิไร้มิติในรูป $(T_s - T)/(T_s - T_m)$ ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่มีอยู่จริง ซึ่งอัตราส่วนนี้จะเป็นอิสระกับ x นั่นคือถึงแม้ว่า $T(r)$ ยังคงเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องกับ x แต่รูปร่างสัมพัทธ์ของ profile นี้จะไม่เปลี่ยนแปลงเลย และการไหลแบบนี้เรียกว่า การไหลปรับตัวเต็มที่ทางความร้อน (thermally fully developed) และจะได้ว่า

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{T_s(x) - T(r, x)}{T_s(x) - T_m(x)} \right]_{f,d,t} = 0 \quad (3.16)$$

เมื่อ T_s คือ อุณหภูมิผิวท่อ

T คือ อุณหภูมิของของไหลที่ตำแหน่งใด ๆ

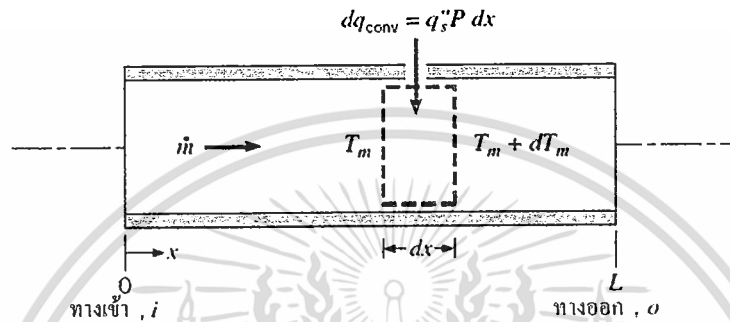
T_m คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลทั่วพื้นที่หน้าตัดของท่อ

เงื่อนไขที่กำหนดให้สำหรับสมการ (3.16) ซึ่งจะเกิดขึ้นในท่อ อาจจะเป็นกรณี q_s'' คงที่ หรือ T_s คงที่ก็ได้ เงื่อนไขที่ผิวแบบนี้เกิดขึ้นมากในทางวิศวกรรม เช่น ในผนังท่อที่ได้รับความร้อนจากไฟฟ้าหรือผิวภายนอกที่ได้รับความร้อนจากการแผ่รังสีอย่างสม่ำเสมอ จะเป็นกรณีของ q_s'' คงที่ ส่วนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณี T_s คงที่ จะเกิดขึ้นถ้ามีการเปลี่ยนสถานะ (เนื่องจากการเดือดหรือการควบแน่น) เกิดขึ้นที่ผิวภายนอก

3.3.3 การสมดุลของพลังงาน

พิจารณาการไหลในท่อตามรูปที่ 3.3 ของไหลไหลด้วยอัตรามวลคงที่ \dot{m} และมีการพาความร้อนเกิดขึ้นที่ผิวภายใน โดยทั่วไปการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ของของไหล รวมทั้งการนำความร้อนในทิศทางตามแนวแกนจะไม่นำมาคิด ดังนั้นถ้าไม่มีงานเพลลาซึ่งกระทำโดยของไหล ขณะไหลผ่านท่อ จะมีเพียงอิทธิพลที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนและงานจากการไหลเท่านั้น



รูปที่ 3.3 ปริมาตรควบคุมสำหรับการไหลภายในท่อ [46]

งานของการไหลเป็นงานที่ใช้เคลื่อนของไหลผ่านปริมาตรควบคุม คิดต่อหน่วยมวลของไหล และจะอยู่ในรูปของผลคูณของความดัน p และปริมาตรจำเพาะ v (ซึ่ง $v = 1/\rho$) โดยการประยุกต์การอนุรักษ์พลังงานต่อปริมาตรควบคุมตามรูปที่ 3.3 และจากนิยามของ T_m จะได้

$$dq_{\text{conv}} + \dot{m}(c_v T_m + pv) - \left[\dot{m}(c_v T_m + pv) + \dot{m} \frac{d(c_v T_m + pv)}{dx} dx \right] = 0 \quad (3.17)$$

หรือ

$$dq_{\text{conv}} = \dot{m} d(c_v T_m + pv) \quad (3.18)$$

ถ้าของไหลเป็นแก๊สสมบูรณ์ ($pv = RT_m$ และ $c_p = c_v + R$) จะได้

$$dq_{\text{conv}} = \dot{m} c_p dT_m \quad (3.19)$$

สมการนี้ใช้ได้สำหรับของเหลวที่อัดตัวไม่ได้เช่นกัน ในกรณีนี้ $c_v = c_p$ เพราะ v น้อยมาก ๆ $d(pv)$ โดยทั่วไปจะน้อยกว่า $d(c_v T_m)$ มากจนตัดทิ้งได้

รูปของสมการ (3.19) เกี่ยวข้องกับเงื่อนไขสำหรับท่อทั้งหมด โดยการอินทิเกรตจากทางเข้าถึงทางออกของท่อ จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$q_{\text{conv}} = \dot{m}c_p(T_{m,o} - T_{m,i}) \quad (3.20)$$

โดยที่ q_{conv} เป็นอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อทั้งหมด

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, h

$$h = \frac{\dot{m}c_p(T_{m,o} - T_{m,i})}{A_s(T_s - T_b)} \quad (3.21)$$

อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหล, T_b

$$T_b = \frac{T_{m,i} + T_{m,o}}{2} \quad (3.22)$$

เลขนัสเซิลท์, Nu_D

$$Nu_D = \frac{hD}{k} \quad (3.23)$$

เงื่อนไขความร้อนที่ผิว คือ ฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ โดยติดแผ่นฮีตเตอร์ที่ผิวครีป

3.3.4 สหสัมพันธ์การพาความร้อน สำหรับท่อที่ไม่กลม

ถึงแม้ว่ามีข้อจำกัดมากเกี่ยวกับการพิจารณาต่อการใช้การไหลภายในท่อกลม การประยุกต์ทางวิศวกรรมส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับการพาความร้อนในท่อที่ไม่กลม โดยการใช้เส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิภาพผลเป็นความยาวเฉพาะ (characteristic length) ซึ่งเรียกว่า เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก

เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (hydraulic diameter), D_h

$$D_h = \frac{4A_c}{P_e} \quad (3.24)$$

เมื่อ

A_c คือ พื้นที่หน้าตัด

P_e คือ เส้นรอบรูปของหน้าตัดการไหล











เส้นผ่านศูนย์กลางนี้จะใช้ในการคำนวณพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น Re_D และ Nu_D

สำหรับการไหลแบบราบเรียบ ค่า Nu_D ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขปรับตัวเต็มที่ได้จากตาราง

ที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ค่า Nu_D สำหรับการไหลแบบราบเรียบที่ปรับตัวเต็มทีในท่อพื้นที่หน้าตัดต่าง ๆ กัน [46]

หน้าตัดขวาง	$\frac{b}{a}$	$Nu_D = \frac{hD_h}{k}$		$f Re_{D_h}$
		(Uniform q_s'')	(Uniform T_s)	
	—	4.36	3.66	64
	1.0	3.61	2.98	57
	1.43	3.73	3.08	59
	2.0	4.12	3.39	62
	3.0	4.79	3.96	69
	4.0	5.33	4.44	73
	8.0	6.49	5.60	82
	∞	8.23	7.54	96
	∞	5.39	4.86	96
	—	3.11	2.49	53

3.3.5 สมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนของของไหลเราสามารถหาสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้จากการนำเอาส่วนของกำลังที่ใช้ในการปั๊มให้ของไหลเคลื่อนที่ผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมาคำนวณรวมกับค่าการถ่ายเทความร้อนที่ได้ โดยสมการหามาจากกำลังที่ใช้ในการจ่ายของไหลผ่านท่อที่มีผนังเรียบ ($power_0$) เท่ากับกำลังที่ใช้ในการจ่ายของไหลผ่านท่อที่มีการติดตั้งครีบลักษณะต่างๆ ($power_{baffle}$) [45]

$$power_0 = power_{baffle}$$

$$(\Delta pQ)_0 = (\Delta pQ)_{baffle}$$

$$\left[\left(\frac{f \rho L V^2}{2D_h} \right)_{(VA)}^{-1} \right]_0 = \left[\left(\frac{f \rho L V^2}{2D_h} \right)_{(VA)}^{-1} \right]_{baffle}$$

$$(fV^3)_0 = (fV^3)_{baffle}$$

$$(fRe^3)_0 = (fRe^3)_{baffle}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{f_0}{f_{\text{baffle}}} = \frac{\text{Re}_{\text{baffle}}^3}{\text{Re}_0^3}$$

$$\frac{\text{Re}_{\text{baffle}}}{\text{Re}_0} = \left(\frac{f_0}{f_{\text{baffle}}} \right)^{1/3}$$

$$\frac{\text{Re}_{\text{baffle}}}{\text{Re}_0} = \frac{1}{(f_{\text{baffle}}/f_0)^{1/3}} \quad (3.25)$$

ค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนพิจารณาที่กำลังของพัดลมที่ใช้ในการจ่ายอากาศผ่านท่อที่มีผนังเรียบและท่อที่มีการติดตั้งครีบลักษณะต่างๆ เท่ากัน ดังนั้นค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสามารถหาได้ดังนี้

$$\text{TEF} = \frac{h_b}{h_0} \Big|_{\text{pp}} = \frac{\text{Nu}_b}{\text{Nu}_0} \Big|_{\text{pp}} = \left(\frac{\text{Nu}_b}{\text{Nu}_0} \right) \left(\frac{f_b}{f_0} \right)^{-1/3} \quad (3.26)$$

เมื่อตัวห้อย

baffle คือ ครีบล

0 คือ ท่อผนังเรียบ

pp คือ ที่กำลังขับเดียวกัน (pumping power)

ซึ่งค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนจะเป็นตัวชี้วัดที่แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการถ่ายเทความร้อน โดยเมื่อให้ค่ามากกว่า 1 แสดงว่าให้มีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนมากกว่าท่อผนังเรียบ เมื่อใช้กำลังขับพัดลมของระบบค่าเดียวกัน โดยการพัฒนาและออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีจุดมุ่งหมายเพื่อให้ได้ค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสูงสุด ซึ่งจะส่งผลให้สามารถลดขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและประหยัดพลังงานที่ต้องป้อนให้กับระบบ นำไปสู่การลดต้นทุนการผลิต เกิดประโยชน์ทั้งในแง่การลดพื้นที่การติดตั้ง ได้ประสิทธิภาพที่สูงขึ้น ด้วยราคาขายที่ต่ำลง ลดการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัด เพื่อเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการช่วยเยียวยาและแก้ปัญหาวิกฤตทรัพยากรพลังงาน

3.4 การสร้างสมการสหสัมพันธ์ด้วยรีเกรสชันเส้นตรงแบบหลายตัวแปร

โดยทั่วไป ตัวแปรตามแต่ละตัวหรือผลตอบสนอง (response; Y) จะขึ้นอยู่กับตัวแปรอิสระ n (independent หรือ regressor variables) เช่น x_1, x_2, \dots, x_n เป็นต้น ความสัมพันธ์ของตัวแปรเหล่านี้ สามารถอธิบายโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่เรียกว่า “สมการรีเกรสชัน” (สมการถดถอย; regression equation) แบบจำลองรีเกรสชันจะสอดคล้องกับกลุ่มของข้อมูลของตัวอย่าง บางกรณีผู้ทดสอบทราบถึงฟังก์ชันความสัมพันธ์ที่แท้จริงของตัวแปร เช่น $Y = \phi(x_1, x_2, \dots, x_n)$ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม โดยส่วนใหญ่จะไม่ทราบฟังก์ชันความสัมพันธ์ที่แท้จริงของตัวแปร ดังนั้นจึงต้องมีการประมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าของฟังก์ชันเพื่อประมาณค่า ϕ โดยในการทดสอบนี้จะใช้โปรแกรม Microsoft Office Excel เป็นเครื่องมือในการหาฟังก์ชันดังกล่าว

ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อน ในพจน์ของเลขชี้สเกลต์ มีตัวแปรอิสระที่สนใจศึกษา มากกว่า 1 ตัวแปร เช่น เลขเรย์โนลด์ (Re), เลขพรานท์ (Pr), อัตราส่วนความสูงครีบต่อความสูงท่อ (e/H), อัตราส่วนระยะพิชต์ครีบต่อความสูงท่อ (P/H), มุมปะทะ (α) และพารามิเตอร์ที่ศึกษาอื่น ๆ เป็นต้น แบบจำลองทั่วไปที่ใช้จะอยู่ในรูปแบบของ multiple exponential regression model ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$Y = b_0 x_1^{b_1} x_2^{b_2} x_3^{b_3} \dots x_n^{b_n} \quad (3.27)$$

ซึ่งสามารถแปลงให้อยู่ในรูป multiple linear regress in logarithmic scale คือ

$$\ln(Y) = \ln b_0 + b_1 \ln(x_1) + b_2 \ln(x_2) + b_3 \ln(x_3) \dots + b_n \ln(x_n) \quad (3.28)$$

เมื่อ

b_i = ค่าสัมประสิทธิ์หรือพารามิเตอร์ของเส้นตรงของตัวแปร x_i



บทที่ 4

การออกแบบอุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

4.1 บทนำ

ในบทนี้กล่าวถึง การออกแบบอุปกรณ์ และชุดทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อ สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการติดตั้งครีบบางที่วางแบบซิกแซก (zigzag, Z) ตลอดช่วงทดสอบ รายละเอียดในส่วนเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในชุดทดลอง ตลอดจนวิธีการทดลองในแต่ละขั้นตอน และขั้นตอนการเก็บข้อมูลเพื่อนำมาทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยแบ่งส่วนในการศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในช่องขนานโดยศึกษาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของครีบบาง แบ่งเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ ดังนี้

1. ครีบบาง (baffle) บนผนังด้านเดียว ศึกษาอิทธิพลของรูปทรง, ความสูง, ระยะห่างระหว่างแถวของครีบบาง (ระยะพิตซ์), ลักษณะการจัดวาง และมุมของครีบบาง
2. ครีบบาง (baffle) บนผนังสองด้าน จะเป็นการวางครีบบางบนผนังสองด้านในช่วงทดสอบ โดยวางบนผนังด้านตรงข้ามกัน จะศึกษาอิทธิพลรูปทรง, ระยะพิตซ์, ความสูง, มุมของครีบบาง และการจัดวาง เมื่อติดตั้งที่ทั้งผิวบนและผิวล่าง (แบบตรงกันและเยื้องกัน) ของครีบบาง

จากนั้นกล่าวถึง สมการในการวิเคราะห์ข้อมูลการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในช่องขนาน โดยการถ่ายเทความร้อนในเทอมของเลขนัสเซิลท์ (Nu) และการสูญเสียความดันในเทอมของตัวประกอบเสียดทาน (f) จากนั้นก็เปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อน และการสูญเสียความดันกับท่อผนังเรียบ (Nu_0, f_0) และตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อน (TEF) ซึ่งเป็นข้อมูลที่คำนวณที่กำลังขับเดียวกัน

4.2 การออกแบบอุปกรณ์ และชุดทดลอง

4.2.1 พัดลม

การหาขนาดพัดลมที่จะใช้ในการทดลอง โดยพิจารณาที่เลขเรย์โนลด์มากที่สุดที่จะทำการทดสอบ $Re = 20,400$ ซึ่งจะเป็นการทำงานของพัดลมที่รับภาระสูงสุด จากสมการเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (hydraulic diameter)

$$\begin{aligned} D_h &= \frac{4A_c}{P_e} \\ &= \frac{4(3 \times 30 \times 10^{-4})}{(2(3 + 30)) \times 10^{-2}} \\ &= 0.0545 \text{ m} \end{aligned}$$

จากตารางคุณสมบัติอากาศที่อุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 318 K (อุณหภูมิเฉลี่ยของทางเข้า และทางออกของอากาศที่ใช้ในการทดลอง) จะได้ $\rho = 1.099712 \text{ kg/m}^3$ และ $\mu = 191.3993 \times 10^{-7} \text{ N.s/m}^2$ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการเลขเรย์โนลด์

$$Re_D = \frac{\bar{\rho} V D_h}{\mu}$$

หาความเร็วเฉลี่ย

$$\bar{V} = \frac{Re_D \mu}{\rho D_h}$$

$$= \frac{20,400 \times 191.3993 \times 10^{-7}}{1.099712 \times 0.0546}$$

$$= 6.50 \text{ m/s}$$

จากสมการ

$$\dot{V} = \bar{V} A_c$$

$$= 6.50 \times 3 \times 30 \times 10^{-4}$$

$$= 0.0585 \text{ m}^3/\text{s} = 3511.5 \text{ LPM}$$

ดังนั้น ในการทดลองกำหนดให้ใช้พัดลม ที่สามารถให้ค่าอัตราการไหลมากกว่า 3512 ลิตรต่อนาที

4.2.2 ความยาวท่อทางเข้าสู่ชุดทดลอง

ในการทดลองจำเป็นต้องให้อากาศที่ไหลเข้าบริเวณช่วงทดสอบต้องมีลักษณะการไหลเป็นแบบปรับตัวเต็มที่ (fully developed flow) ดังนั้นมีความจำเป็นที่จะต้องหาระยะความยาวท่อที่ทำให้ของมีลักษณะดังกล่าวก่อนเข้าสู่ช่วงทดสอบ เลขเรย์โนลด์วิกฤติ สำหรับช่วงการเปลี่ยนแปลงของการไหลจากแบบราบเรียบเป็นแบบปั่นป่วน เริ่มต้นจาก $Re_{D,c} \approx 2300$ และการไหลเป็นแบบปั่นป่วนเต็มที่ เมื่อ $Re_D \geq 4000$

ส่วนในการไหลแบบปั่นป่วน $Re_D \geq 4000$ ไม่มีสมการที่แน่นอนสำหรับหาระยะทางสำหรับการปรับตัว แต่รู้เพียงว่าไม่เกี่ยวข้องกับเลขเรย์โนลด์ และมีค่าประมาณดังนี้

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

สำหรับค่าที่ใช้ในที่นี้ เราจะสมมติว่า $x_{fd} = 30D_h$ สำหรับการไหลที่ปรับตัวเต็มที่ (fully developed flow)

จากสมการ

$$x_{fd} = 30D_h$$

$$= 30 \times 0.05455$$

$$= 1.64 \text{ m}$$

ดังนั้น ในการทดลองจึงกำหนดท่อทางเข้าสู่ชุดทดลองให้มีความยาว 1.8 m

4.3 การเตรียมอุปกรณ์ในการทดลอง

ในการศึกษาผลของครีบบางวางในลักษณะซิกแซก เพื่อหาผลของค่าต่างๆ ที่มีผลต่อลักษณะในการถ่ายเทความร้อน เป็นการทำการทดลอง และนำผลที่ได้มาทำการวิเคราะห์หาลักษณะการถ่ายเท

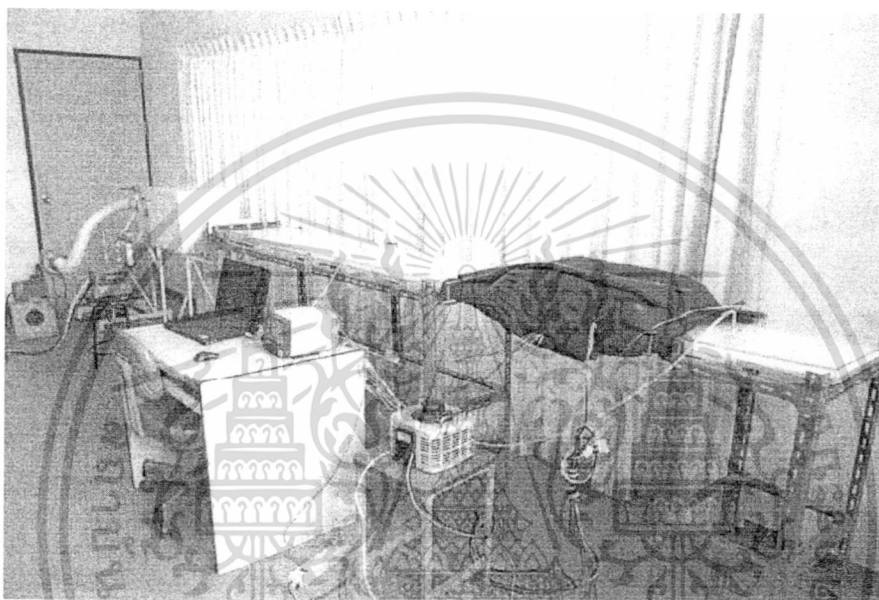
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ขึ้นต้นการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความร้อน แล้วนำมาเปรียบเทียบเพื่อหาลักษณะของครีปที่ให้ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุด ซึ่งจำเป็นที่จะต้องมีการจัดเตรียม และสร้างอุปกรณ์ในการทดลอง โดยมีรายละเอียดต่าง ๆ ของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ดังนี้

4.3.1 ชุดทดลองท่อแลกเปลี่ยนความร้อนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ชุดทดลองท่อแลกเปลี่ยนความร้อนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในช่องขนานที่มีครีบบางวางในแบบซิกแซกในช่องทดสอบ แสดงในรูปที่ 4.1 โดยการติดตั้งครีปที่ผิวด้านในตามการออกแบบการทดลอง และเปรียบเทียบผลการทดลองกับท่อผนังเรียบ



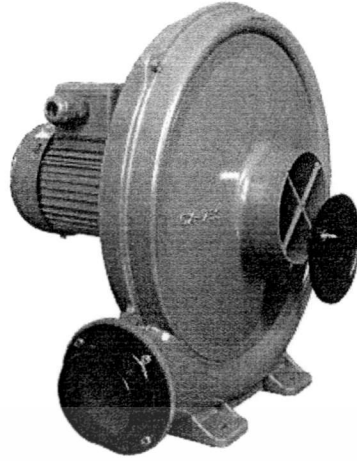
รูปที่ 4.1 ชุดทดลองท่อแลกเปลี่ยนความร้อนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ท่อทดสอบมีความกว้าง 300 mm ความยาว 380 mm และมีระยะห่างระหว่างผิวบน และผิวล่างภายในชุดทดลองเท่ากับ 30 mm ซึ่งผนังของชุดทดลองจะประกอบไปด้วยฉนวน 4 ชั้น ฉนวนชั้นแรกใช้วัสดุเป็นฉนวนใยแก้ว ฉนวนชั้นที่สองเป็นแผ่นกระเบื้อง ฉนวนชั้นที่สามเป็นฉนวนใยแก้ว และชั้นที่สี่หุ้มด้วยฉนวนพองน้ำที่ใช้ในเครื่องปรับอากาศ

4.3.2 แหล่งจ่ายอากาศ

แหล่งจ่ายอากาศ ใช้พัดลม (high-pressure blower) MODEL TB-150 เป็นแบบพัดลมหอยโข่งแรงดันสูง 12 ใบพัด ขนาด 1.5 kW หรือ 2 HP ใช้กระแสไฟฟ้า 380 V แสดงในรูปที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



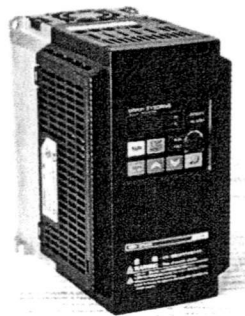
รูปที่ 4.2 พัดลมแรงดันสูง (high-pressure blower)

มอเตอร์ (motor) เป็นต้นกำลังในการขับพัดลม ขนาด 1.5 kW ใช้กระแสไฟฟ้า 380 V 50 Hz 2900 rpm 14.8 A แสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 มอเตอร์

อินเวอร์เตอร์ (inverter) Omron inverter, 3G3JX-A4037, 380-480V 3PHASE 3.7kW 5 HP เป็นอินเวอร์เตอร์แบบปรับความถี่ (frequency inverter) ถูกนำมาใช้ในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ใช้ขับพัดลม ในการควบคุมอัตราการไหลของอากาศให้ได้ตามที่กำหนด แสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 inverter

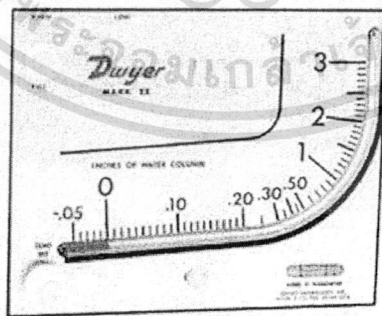
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ

ในการทดลองจะใช้ orifice meter เป็นอุปกรณ์ในการวัดอัตราการไหลของอากาศ ติดตั้งที่ทางเข้าชุดทดลองระหว่างพัดลม และถังพักลม ดังแสดงในรูปที่ 4.1 เป็นอุปกรณ์วัดอัตราการไหลจากผลต่างความดันของของไหลที่ผ่าน โดยทำการวัดผลต่างความดันที่ ก่อน และหลังที่ของไหลไหลผ่านตัวอุปกรณ์โดยมีระยะติดตั้งที่ใช้ในการวัดผลต่างความดันจะแสดงรายละเอียดในหัวข้อที่ 4.4.1 อุปกรณ์ชุดทดลอง โดยในการสร้างอุปกรณ์ orifice meter ได้สร้างตามมาตรฐานของ JIS (JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD) measurement of fluid flow by means of orifice plates, nozzles and venturi tubes JIS Z 8762 ทำจากแผ่นเหล็กความหนา 5 mm โดยออริฟิสออกแบบให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านหน้า 47 mm และเส้นผ่านศูนย์กลางด้านหลัง 51 mm แสดงในรูปที่ 4.5 และรายละเอียดเพิ่มเติมของออริฟิส แสดงในภาคผนวก ข.

รูปที่ 4.5 orifice meter

เครื่องวัดความดันแบบระนาบเอียง (inclined manometer) รุ่น Mark II Model No.25 ใช้วัดความแตกต่างของความดันระหว่างด้านหน้า และด้านหลัง orifice meter เพื่อใช้หาอัตราการไหลของอากาศ ความแตกต่างของความดัน ซึ่งสามารถอ่านค่าได้จากความแตกต่างของระดับ red gage oil (specific gravity = 0.826) แสดงในรูปที่ 4.6

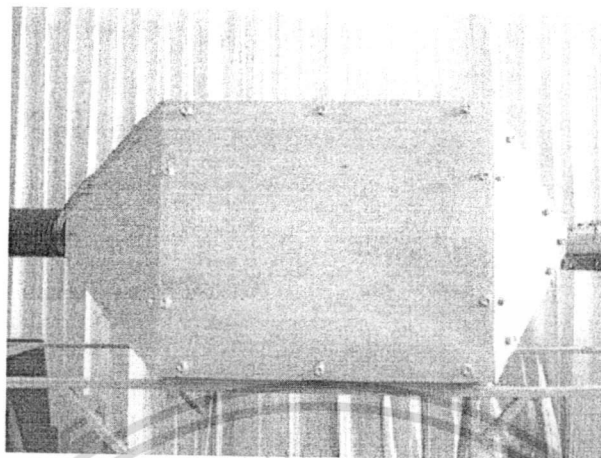


รูปที่ 4.6 เครื่องวัดความดันแบบระนาบเอียง (inclined manometer)

4.3.4 ถังพักลม (settling tank)

ถังพักลม เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับสภาพการไหลของอากาศ จากท่อกลมมาเป็นท่อสี่เหลี่ยม เพื่อให้จัดเรียง และปรับสภาพการไหลอากาศ ให้เกิดการปั่นป่วนน้อยสุดก่อนเข้าสู่ท่อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

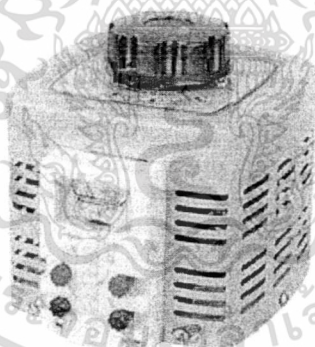
สี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาดความกว้าง 380 mm ความยาว 450 mm และความสูง 380 mm แสดง
 ในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ถังพักลม (settling tank)

4.3.5 อุปกรณ์ควบคุมพลังความร้อนของแผ่นฮีตเตอร์

แหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ (AC power supply) ใช้เครื่องปรับความต่างศักย์ไฟฟ้า รุ่น TDGC 2-3 kW CAPACITY: 3000 W MAX. 12 A เป็นอุปกรณ์ในการควบคุมความต่างศักย์ที่จ่ายให้กับแผ่นฮีตเตอร์ ในการควบคุมพลังความร้อนของแผ่นฮีตเตอร์ให้ได้ตามที่กำหนด แสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ (AC power supply)

4.3.6 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ

R3000 series Color Paperless Recorder, SUPCON เป็นอุปกรณ์เก็บข้อมูล (recorder) และแสดงผลอุณหภูมิ สามารถแสดงค่าอุณหภูมิได้ทั้งหมด 12 ค่า การใช้งานโดยเชื่อมต่อเครื่องเข้ากับเทอร์โมคัปเปิล หรือ RTDs ทั้งหมด 12 ตัว เพื่อแสดงผล และเก็บข้อมูลอุณหภูมิผิว 10 ตำแหน่ง อุณหภูมิทางเข้า และทางออกส่วนทดสอบ 2 ตำแหน่ง แสดงในรูปที่ 4.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 เครื่องเก็บข้อมูล

คอมพิวเตอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เชื่อมต่อกับเครื่องเก็บข้อมูล เพื่อใช้ในการเก็บข้อมูลอุณหภูมิผิวส่วนทดสอบ อุณหภูมิทางเข้าและออกของส่วนทดสอบ



RTD Pt100

เทอร์โมคัปเปิลชนิด K

รูปที่ 4.10 เซนตเซอร์วัดอุณหภูมิ

เทอร์โมคัปเปิล (thermocouple) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดอุณหภูมิผิวครีบ อุณหภูมิที่ทางเข้าครีบ และอุณหภูมิที่ทางออกครีบ แสดงในรูปที่ 4.10 โดยเทอร์โมคัปเปิลแบบชนิด K จำนวน 10 ตัว เพื่อวัดอุณหภูมิผิวทั้งหมด 10 ตำแหน่ง

RTD Pt100 จำนวน 2 ตัว เพื่อวัดอุณหภูมิทางเข้าและอุณหภูมิทางออกส่วนทดสอบ RTD จะเป็นเซนเซอร์ที่ให้ความละเอียดในการวัดสูงกว่า เทอร์โมคัปเปิล โดยสามารถให้ค่าเป็นทศนิยมได้ในการวัดอุณหภูมิ ในส่วนของทางเข้า และทางออกของชุดทดสอบจำเป็นที่จะต้องได้ค่าที่แม่นยำมากจึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้เซนเซอร์ดังกล่าว

4.3.7 เครื่องวัดความดันตกคร่อม

เครื่องวัดความดันตกคร่อม (differential pressure gages) รุ่น Dwyer 475 Mark III ช่วงการใช้งาน 0-2.49 kPa เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดความดันตกคร่อมระหว่างส่วนทดสอบ แสดงในรูปที่ 4.11

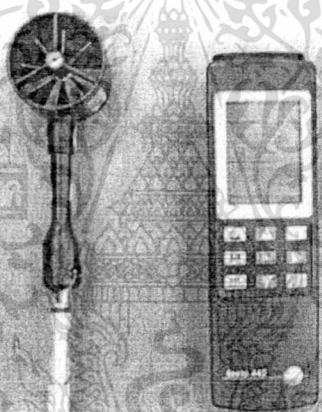
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 เครื่องวัดความดันตกคร่อม, Dwyer 475 Mark III Digital Manometer

4.3.8 อุปกรณ์วัดความเร็วของอากาศ

เครื่องวัดความเร็วของอากาศ (Vane-type Anemometer) รุ่น 445 ยี่ห้อ TESTO เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดความเร็วลมที่ตำแหน่งทางออกของชุดออริฟิส ใช้ในการสอบเทียบ (calibration) ความเร็วลมในการทดลอง แสดงในรูปที่ 4.12



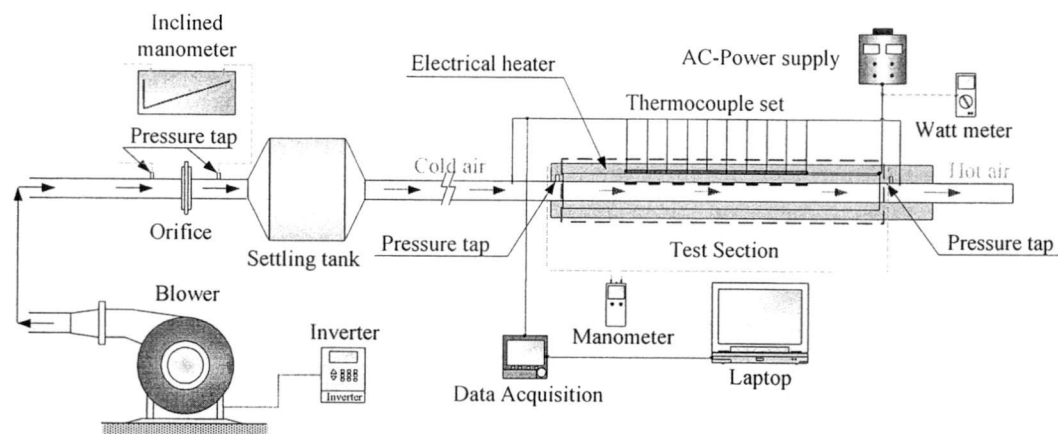
รูปที่ 4.12 เครื่องวัดความเร็วของอากาศ (Vane-type Anemometer), TESTO 445

4.4 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง

4.4.1 อุปกรณ์ชุดทดลอง

ชุดทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการติดตั้งครีบบาง และอุปกรณ์การทดลองต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 4.13 อากาศเป็นของไหลทดสอบ ถูกส่งตรงเข้าสู่ระบบโดยพัดลมความดันสูง (high-pressure blower) ขนาด 1.5 kW โดยท่อกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 7 mm ใช้เชื่อมต่อระหว่างพัดลมกับถังพักลม (settling tank) โดยมีอินเวอร์เตอร์เพื่อปรับความเร็วรอบการทำงานของพัดลมเพื่อให้ได้อัตราการไหลของอากาศตามที่ต้องการ อัตราการไหลของอากาศในระบบถูกวัดโดยใช้แผ่นออริฟิสถูกสอบเทียบค่ามาก่อนโดยใช้ hot wire และ Vane-type Anemometers (Testo 445) ความดันตกคร่อมออริฟิส วัดโดยใช้ inclined manometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



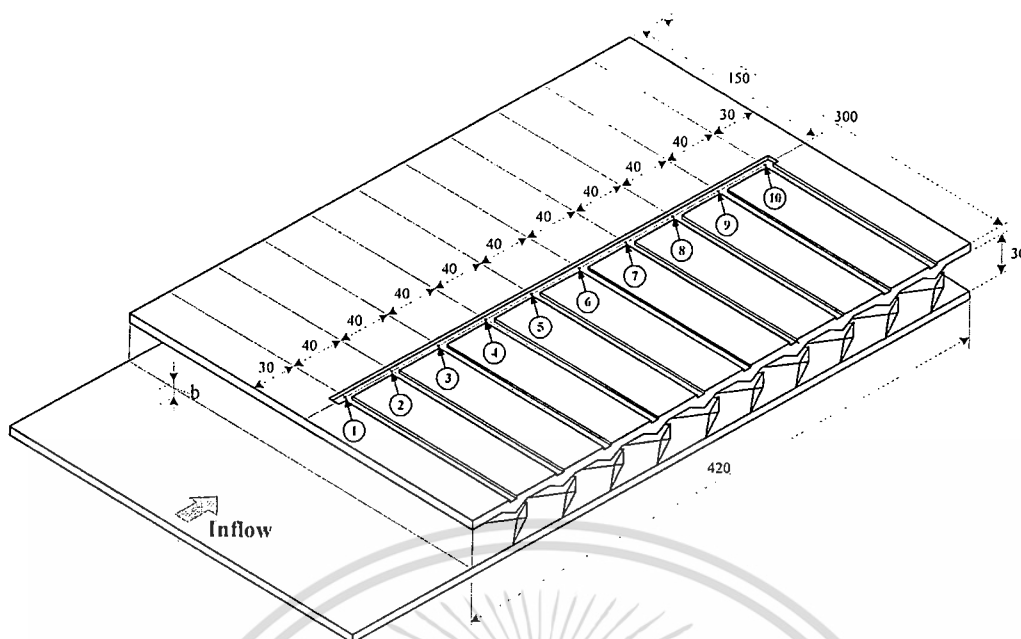
รูปที่ 4.13 แผนผังของชุดทดลองท่อแลกเปลี่ยนความร้อนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

โครงสร้างของช่องขนานสี่เหลี่ยมผืนผ้า ความยาว 1,800 mm มีอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของช่องขนาน ($AR, W/H$) = 10, ความสูงช่องขนาน (H) = 30 mm, ส่วนทดสอบ ความยาว (L) = 420 mm ความกว้าง (W) = 300 mm ซึ่งครีถูกสร้างจากแผ่นอะลูมิเนียม การวัดอุณหภูมิผิวส่วนทดสอบด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสาย 1.5 mm จำนวน 10 ตัว ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิผิวของผนังทดสอบด้านบนเนื่องจากให้สมมติให้เป็นผนังแบบสมมาตร โดยเทอร์โมคัปเปิลถูกติดตั้งที่รูจากด้านหลัง และตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่น ตำแหน่งหัวต่อไม่เกิน 3 mm จากผนังด้านบน และระยะห่างกันตามแนวแกน 40 mm และ RTD แบบ Pt-100 จำนวน 2 ตัว ติดตั้งที่ก่อนถึงส่วนทดสอบ 80 mm และด้านหลังส่วนทดสอบ 30 mm เพื่อวัดอุณหภูมิทางเข้า และทางออก ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจากเทอร์โมคัปเปิลถูกส่งเข้าสู่เครื่องเก็บข้อมูล และบันทึกลงในคอมพิวเตอร์

จุดวัดความดันสถิตย 2 จุด อยู่ที่ด้านบนของช่องขนานเพื่อวัดความดันตกคร่อมตลอดช่วงของส่วนทดสอบ เพื่อใช้หาค่าตัวประกอบเสียดทาน ซึ่งจุดที่วัดอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของช่องขนาน จุดแรกตำแหน่ง 50 mm จากขอบทางเข้าส่วนทดสอบ และจุดที่สองอยู่ที่ตำแหน่ง 50 mm จากขอบทางออกส่วนทดสอบ ความดันตกคร่อมวัดโดยใช้เครื่องวัดผลต่างความดันแบบดิจิตอลเชื่อมต่อจุดวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 2 mm

แหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ (AC power supply) เป็นแหล่งพลังงานของฮีตเตอร์แผ่น ขนาด 1000 W มีรูปทรงเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดความกว้าง 300 mm และความยาว 400 mm ที่ผิวภายนอกชุดทดลองถูกหุ้มด้วยฉนวน ใช้สำหรับให้ความร้อนแก่ส่วนทดสอบเพื่อให้ได้ ฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ สารประกอบนำความร้อนถูกใช้เชื่อมต่อระหว่างแผ่นฮีตเตอร์ และผนังทดสอบเพื่อที่จะลดความต้านทานผิวสัมผัส ในส่วนของแผ่นไม้ซึ่งมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำกว่าผนังโลหะถูกออกแบบมาเพื่อรองรับแผ่นทดสอบ และเป็นฉนวน ที่ตำแหน่งทางเข้าและทางออกของผิวบน-ล่างเพื่อเป็นตัวกันขวางทางความร้อนที่ทางเข้าและออกของส่วนทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 ตำแหน่งติดตั้งเซนตเซอร์วัดอุณหภูมิ

4.4.2 ครีบบ

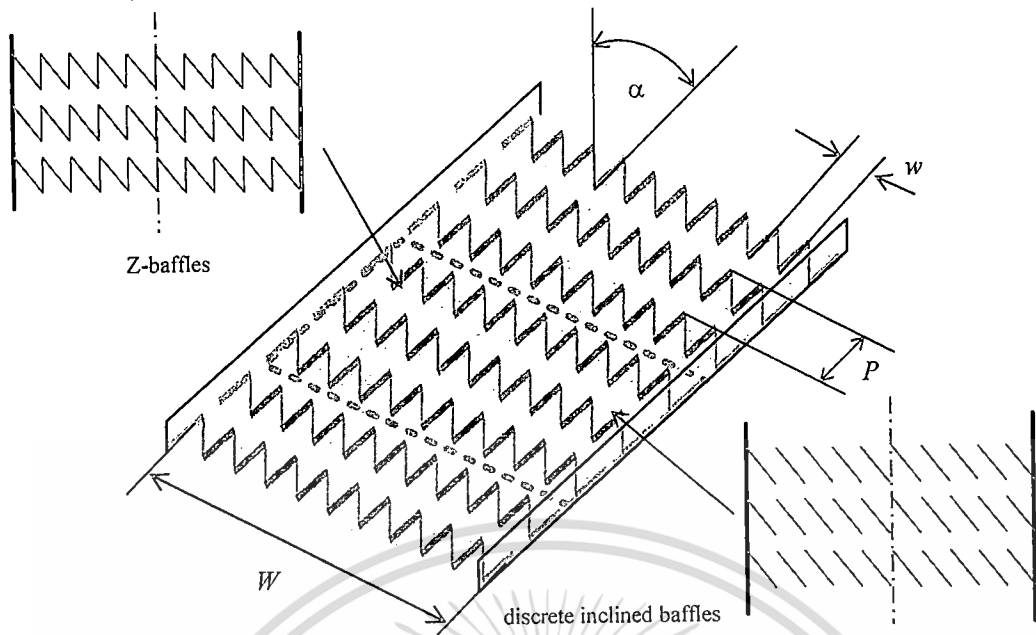
งานวิจัยนี้ศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในช่องขนานที่มีครีบบางที่ทำการติดตั้งครีบบตามแนวยาวในส่วนทดสอบของช่องขนาน แบ่งส่วนการศึกษาอิทธิพลของครีบบตามแนวยาว ออกเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ ดังนี้

1. ครีบบาง (baffle) บนผนังด้านเดียว ศึกษาอิทธิพลของรูปทรง, ความสูง, ระยะห่างระหว่างแถวของครีบบ (ระยะพิตซ์), ลักษณะการจัดวาง และมุมของครีบบ
2. ครีบบาง (baffle) บนผนังสองด้าน จะเป็นการวางครีบบางบนผนังสองด้านในช่วงทดสอบ โดยวางบนผนังด้านตรงข้ามกัน จะศึกษาอิทธิพลรูปทรง, ระยะพิตซ์, ความสูง, มุมของครีบบ และการจัดวาง เมื่อติดตั้งที่ทั้งผิวบนและผิวล่าง (แบบตรงกันและเยื้องกัน) ของครีบบาง

ส่วนที่ 1 ครีบบาง (baffle) แบบซิกแซก (zigzag, Z) บนผนังด้านเดียว แบ่งการศึกษาในส่วนนี้ออกเป็น 5 ส่วนย่อย ดังนี้

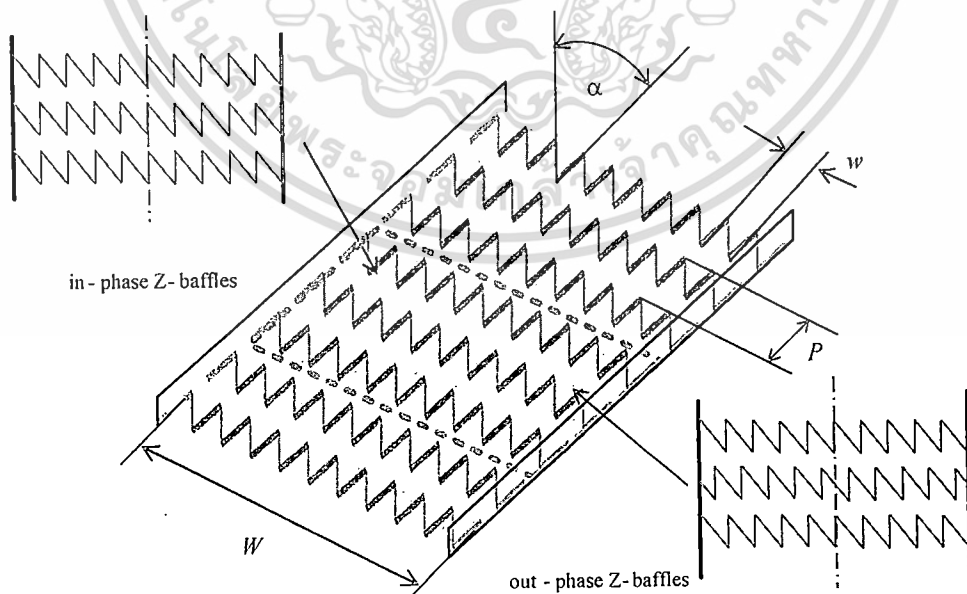
ส่วนที่ 1.1 ลักษณะของครีบบ จะเป็นการเปรียบเทียบลักษณะของครีบบแบบซิกแซก (Z) กับในลักษณะครีบบเอียงแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffles, DB) ที่มีขนาดเท่ากันวางยาวตลอดช่วงทดสอบเช่นกัน ดังแสดงลักษณะของครีบบในรูปที่ 4.15 ครีบบทำจากอะลูมิเนียมบาง ลักษณะครีบบมีความกว้าง (w) 30 mm วางตลอดความยาวช่วงทดสอบ (W) 420 mm โดยจะเป็นการศึกษาอิทธิพลของลักษณะครีบบ และส่วนลักษณะประกอบอื่นๆ ประกอบด้วยตัวครีบบทำมุม (α) 30° , 45° และ 60° กับทิศทางการไหล, ความสูงทั้งหมด 4 แบบคือ 1.5, 3, 6 และ 9 mm ($e/H = 0.5, 1.0, 2.0$ และ 3.0) และมีระยะพิตซ์ 3 แบบ คือ 4.5, 6.0 และ 9 mm ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0) แผ่นครีบบถูกจัดวางแบบตรงกัน ภายในชุดทดลองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า แผ่นครีบบแต่ละแผ่นมีครีบบจำนวน 10 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 ส่วนทดสอบของการศึกษาส่วนที่ 1.1 ครีบบางวางในลักษณะซิกแซก (zigzag, Z) และในแบบครีบบางวางแบบเอียงไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffles, DB)

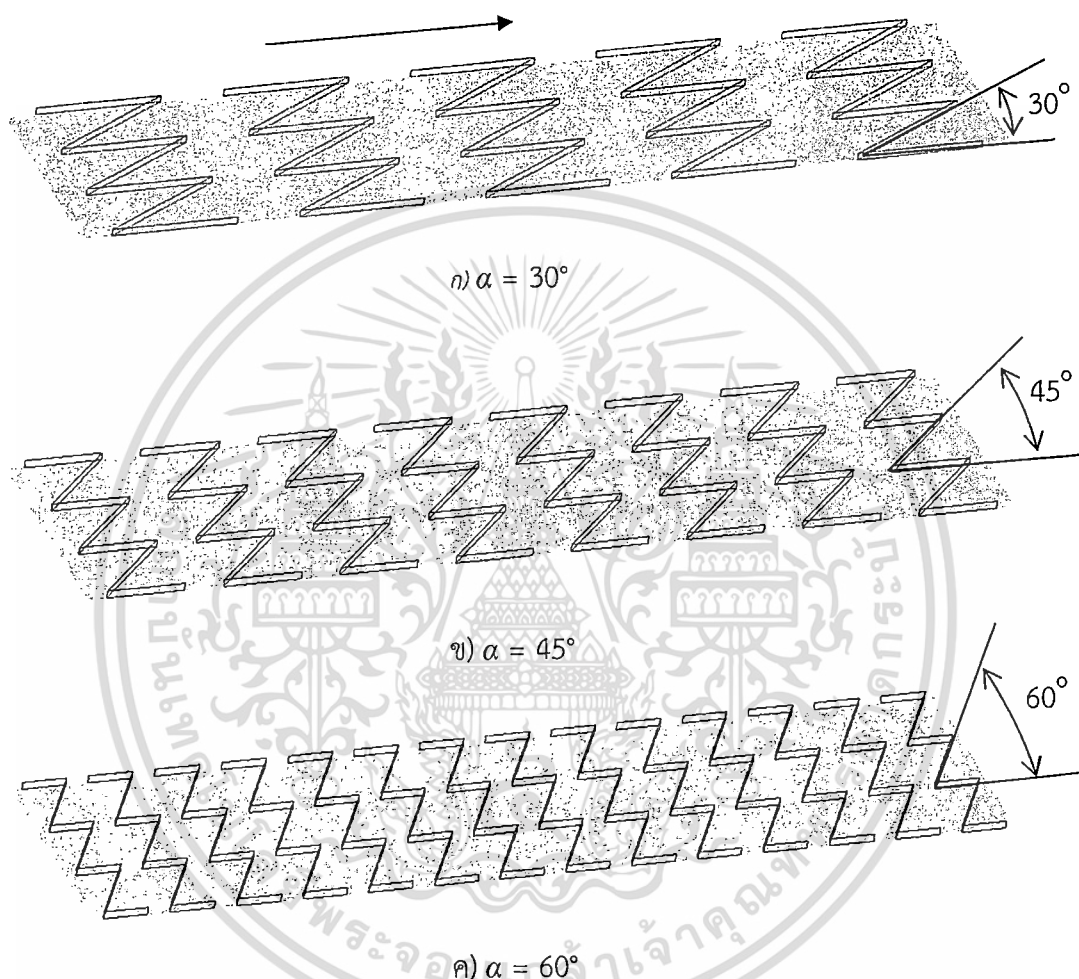
ส่วนที่ 1.2 ครีบบางรูปตัว Z ที่มีลักษณะการวางต่างกัน คือจะมีการจัดวางครีบแบบแถวครีบอยู่แนวเดียวกัน (in-phase) และแบบแถวครีบอยู่แนวเยื้องกัน (out-phase) ลักษณะการวางแสดงในรูปที่ 4.16 เป็นการศึกษาอิทธิพลของการจัดวางทั้งสองลักษณะ และลักษณะประกอบอื่นๆ ตามส่วนที่ 1.1 แต่ในส่วนของครีบวางแบบเยื้องกันจะมีระยะพิตซ์ต่างกันคือจะมีระยะ 3.0, 4.5, 6.0 และ 9 mm ($P/H = 1.0, 1.5, 2.0$ และ 3.0)



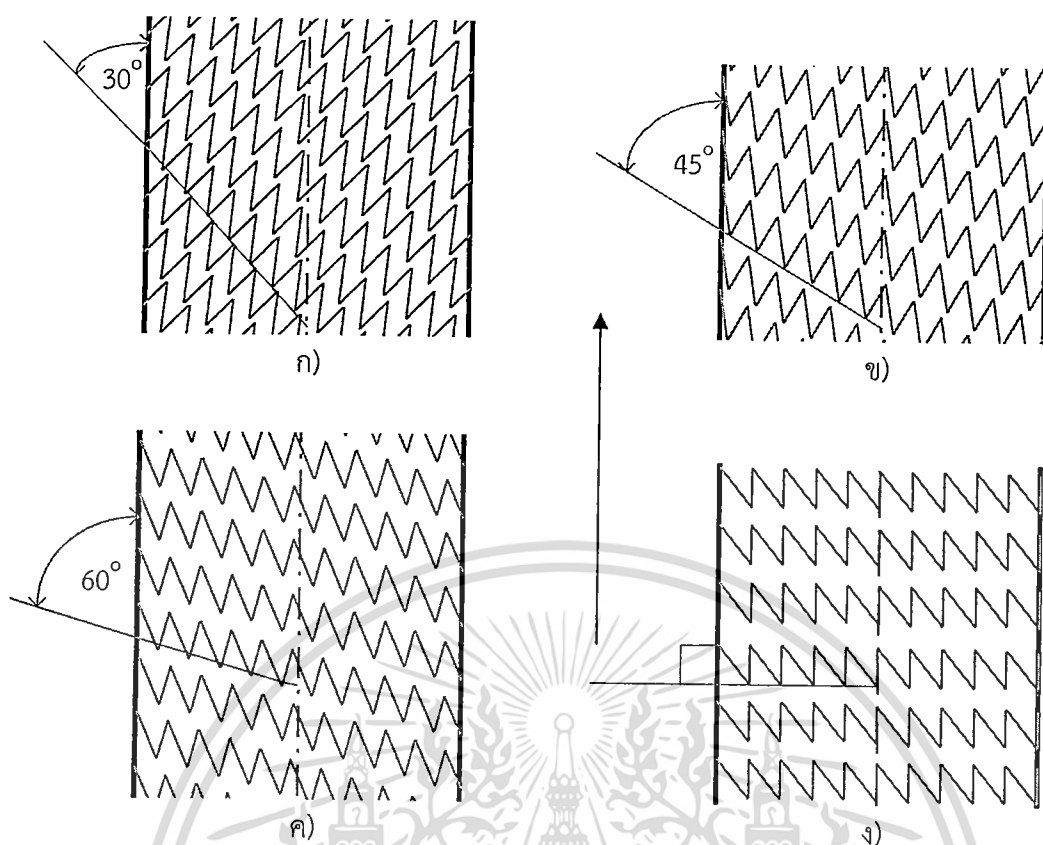
รูปที่ 4.16 ส่วนทดสอบของการศึกษาส่วนที่ 1.2 ครีบบางวางในลักษณะซิกแซก (zigzag, Z) ที่มีการจัดวางครีบในแบบแถวครีบอยู่แนวเดียวกัน (in-phase) และแนวเยื้องกัน (out-phase) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่ 1.3 ครีบบางรูปตัว Z ที่มีมุมของครีบต่างกัน ในการทดลองครีบบรูปตัว Z จะทำการปรับเปลี่ยนมุมที่กระทำกับทิศทางการไหล 3 ค่าคือ $\alpha = 30^\circ$, 45° และ 60° ศึกษาอิทธิพลของมุมปะทะ ตามรูปที่ 4.17 และลักษณะประกอบอื่นๆ ตามส่วนที่ 1.1

ส่วนที่ 1.4 ครีบบางรูปตัว Z ที่มีมุมของแถวต่างกัน ในการทดลองครีบบรูปตัว Z จะทำการปรับเปลี่ยนมุมของแถวที่กระทำกับทิศทางการไหล 4 ค่าคือ $\theta = 30^\circ$, 45° , 60° และ 90° ศึกษาอิทธิพลของมุมปะทะ ตามรูปที่ 4.18 และลักษณะประกอบอื่นๆ ตามส่วนที่ 1.1



รูปที่ 4.17 ส่วนทดสอบของการศึกษาส่วนที่ 1.3 ครีบบางวางในลักษณะซิกแซก (zigzag, Z) ที่มีมุมกระทำกับทิศทางการไหล ก) 30° , ข) 45° และ ค) 60°

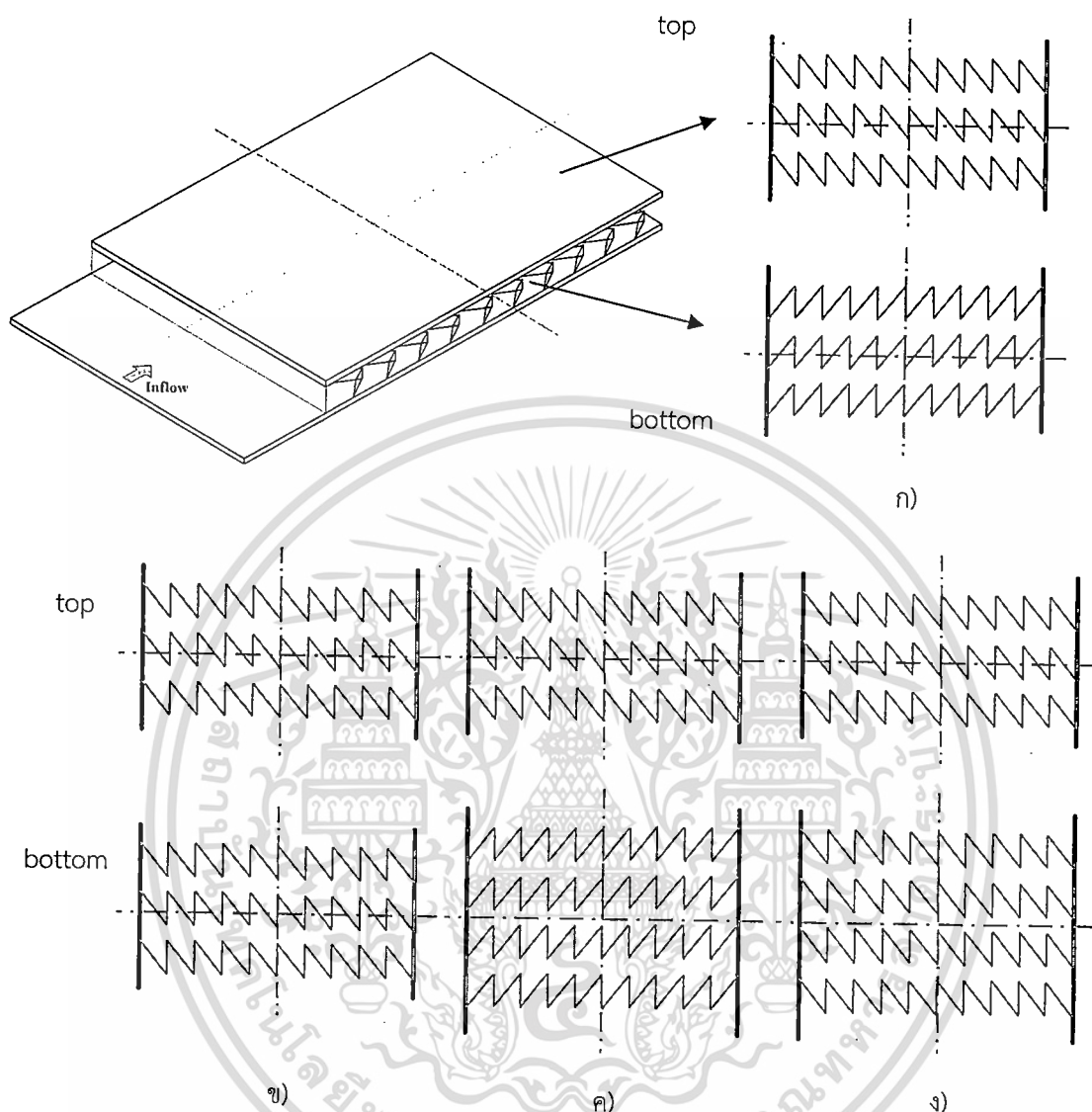


รูปที่ 4.18 ส่วนทดสอบของการศึกษาส่วนที่ 1.4 ครีบบางวางในลักษณะซิกแซก (zigzag, Z) ที่มีมุมของแถวกระทำกับทิศทางการไหล ก) 30° , ข) 45° , ค) 60° และ ง) 90°

ส่วนที่ 1.5 ครีบบางรูปตัว Z ที่มีความสูง (e) ต่างกัน ศึกษาถึงผลของความสูงครีบบางที่มีความสูงทั้งหมด 4 แบบคือ 1.5, 3, 6 และ 9 mm ($e/H = 0.5, 1.0, 2.0$ และ 3.0) และลักษณะประกอบอื่นๆ ตามส่วนที่ 1.1

ส่วนที่ 1.6 ครีบบางรูปตัว Z มีระยะพิตซ์ (P) ต่างกัน ศึกษาอิทธิพลของระยะพิตซ์ มีระยะพิตซ์ 3 แบบ คือ 4.5, 6.0 และ 9 mm ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0) การจัดวางครีบบาง และลักษณะประกอบอื่นๆ ตามส่วนที่ 1.1

ส่วนที่ 2 ครีบบาง (baffle) บนผนังสองด้าน แบ่งการศึกษาในส่วนนี้ออกเป็น 4 ส่วนย่อย ดังนี้



รูปที่ 4.19 ส่วนทดสอบของการศึกษาส่วนที่ 2 ติดครีบบนล่าง ก) ครีบบน-ล่างวางกลับกัน (X), ข) ครีบบน-ล่างวางตรงกัน (Z), ค) ครีบบน-ล่างวางกลับกันแต่แถวเอียงกัน (XS) และ ง) ครีบบน-ล่างเหมือนกันแต่แถวเอียงกัน (ZS)

ส่วนที่ 2.1 ครีบบางที่มีลักษณะการวางต่างกัน จะประกอบไปด้วย 4 ลักษณะ ประกอบไปด้วย ครีบบน-ล่างวางกลับกัน (X)*, ครีบบน-ล่างวางตรงกัน (Z)*, ครีบบน-ล่างวางกลับกันแต่แถวเอียงกัน (XS)* และครีบบน-ล่างวางเหมือนกันแต่แถวเอียงกัน (ZS)* จะแสดงในรูปที่ 4.20 เป็นการศึกษาอิทธิพลของการจัดวางทั้งสี่ลักษณะ และลักษณะประกอบอื่นๆ ตามส่วนที่ 1.1

* หมายเหตุ อักษรย่อที่ใช้ เรียกแทนลักษณะการวางครีบบนและล่างในส่วนที่ 2.1 ตัวย่อ X และ Z จะย่อแทนลักษณะของครีบบนที่วางทั้งบนและล่างที่วางซ้อนกันเมื่อมองจากมุมบนจะเป็นตัวอักษรดังกล่าว ตามที่แสดงในรูปที่ 4.20 ติดครีบบนล่างวางครีบบนกลับกัน ก็จะย่อด้วย X และ ติดครีบบนล่างวางครีบบนตรงกันก็จะย่อด้วย Z ส่วนตัวย่อ S จะแทนลักษณะการวางแทนแถวบนและล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่เชิงพาณิชย์ การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบเยื้องกันที่เรียกว่า stagger

ส่วนที่ 2.2 ครีบบางรูปตัว Z ที่มีความสูง (e) ต่างกัน ศึกษาถึงผลของความสูงครีบบนมีความสูงทั้งหมด 4 แบบคือ 3, 6 และ 9 mm ($e/H = 1.0, 2.0$ และ 3.0) และลักษณะประกอบอื่นๆ ตามส่วนที่ 1.1

ส่วนที่ 2.3 ครีบบางรูปตัว Z มีระยะพิตช์ (P) ต่างกัน ศึกษาอิทธิพลของระยะพิตช์ มีระยะพิตช์ 3 แบบ คือ 4.5, 6.0 และ 9 mm ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0) การจัดวางครีบ และลักษณะประกอบอื่นๆ ตามส่วนที่ 1.1

4.5 วิธีการทดลอง

1. ติดตั้งครีบทดสอบในส่วนแผ่นทดสอบ แล้วทำการติดตั้งไปในชุดทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
2. เปิดสวิทช์พัดลม ให้อากาศไหลผ่านชุดทดลอง และปรับอินเวอร์เตอร์เพื่อปรับความเร็วรอบการทำงานของพัดลมเพื่อให้ได้อัตราการไหลของอากาศตามที่ต้องการ โดยคู่อัตราการไหลของอากาศในระบบจากค่าความดันตกคร่อมแผ่นออริฟิส
3. วัดค่าความดันตกคร่อมส่วนทดสอบ ที่ความเร็วลมทั้ง 15 ระดับตามที่ออกแบบไว้ คือค่าเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ $Re = 4400$ ถึง $20,400$ แล้วปรับความเร็วลมที่ค่าความเร็วลมค่าแรกของการทดสอบ
4. เปิดสะพานไฟจ่ายไฟให้กับแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ ปรับค่าความต่างศักย์แหล่งจ่ายไฟกระแสสลับจ่ายไฟให้กับแผ่นฮีตเตอร์ เพื่อให้ความร้อนกับผิวท่อด้วยเงื่อนไขพลัสความร้อนคงที่
5. สังเกตอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ทั้ง 12 ตำแหน่ง คือ อุณหภูมิผิวทดสอบ 10 ตำแหน่ง และอุณหภูมิทางเข้าและทางออก 2 ตำแหน่ง ให้อุณหภูมิคงที่ แล้วทำการบันทึกผล อุณหภูมิผิวทดสอบ อุณหภูมิทางเข้าและอุณหภูมิทางออกส่วนทดสอบ
6. ปรับอินเวอร์เตอร์เพื่อเพิ่มความเร็วลมตามค่าที่ออกแบบไว้ค่าต่อไปจนครบทั้ง 15 ระดับ ซึ่งค่าเลขเรย์โนลด์อยู่ตั้งแต่ $Re = 4400$ ถึง $20,400$ แล้วดำเนินการทดลองซ้ำตามขั้นตอน 4 – 5
7. เปลี่ยนครีบทดสอบในส่วนทดสอบของชุดทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าแล้วดำเนินการทดลองตามขั้นตอน 2 ถึง 6 ตามลำดับ เพื่อเก็บค่าความดันตกคร่อมส่วนทดสอบ อุณหภูมิผิวทดสอบ อุณหภูมิทางเข้าและอุณหภูมิทางออกส่วนทดสอบ ตามค่าความเร็วลมที่ออกแบบไว้ทั้ง 15 ระดับ
8. ทำการวิเคราะห์ข้อมูลของค่าการถ่ายเทความร้อนซึ่งอยู่ในรูปของเลขนัสเซลท์ ค่าการสูญเสียความดันซึ่งอยู่ในรูปของตัวประกอบเสียดทาน และค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อน ซึ่งจะกล่าวถึงสมการการคำนวณในหัวข้อ 4.6 ต่อไป

เพื่อที่จะกำหนดความคลาดเคลื่อนของการวัดข้อมูลที่ได้จากการทดลองกำหนด โดยความคลาดเคลื่อนในการคำนวณอ้างอิงจากเอกสาร [49] ค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุดสำหรับพารามิเตอร์ไว้หน่วย $\pm 5\%$ สำหรับเลขเรย์โนลด์, $\pm 5\%$ สำหรับเลขนัสเซลท์และ $\pm 10\%$ สำหรับความเสียดทาน ความคลาดเคลื่อนในการวัดความเร็วในแนวแกนประมาณน้อยกว่า $\pm 7\%$ และความดันมีความคลาดเคลื่อนประมาณ $\pm 5\%$, ส่วนความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิของผนังช่องขนานประมาณ $\pm 0.5\%$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

เป้าหมายของงานวิจัยนี้เพื่อหาการถ่ายเทความร้อนในช่องขนานในพจน์ของเลขนัสเซิลท์ โดยเลขเรย์โนลด์ในพจน์ของเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (D_h) สามารถเขียนได้เป็น

$$Re = UD_h / \nu \quad (4.1)$$

เมื่อ U และ ν เป็นความเร็วเฉลี่ยและความหนืดเชิงจลน์ของอากาศ ตามลำดับ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย (h) หาค่าได้จากการวัดอุณหภูมิและความร้อนที่ป้อนเข้าระบบ ความร้อนที่ให้กับอากาศ (Q_{air}) และความแตกต่างของอุณหภูมิผนังท่อกับอุณหภูมิอากาศ ($T_w - T_o$), สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยหาได้จากข้อมูลทดลอง ดังสมการ

$$Q_{air} = Q_{conv} = \dot{m}C_p(T_o - T_i) \leq VI \quad (4.2)$$

$$h = \frac{Q_{conv}}{A(\bar{T}_s - T_b)} \quad (4.3)$$

โดยที่ $T_b = (T_o + T_i) / 2 \quad (4.4)$

และ $\bar{T}_s = \sum T_s / 10 \quad (4.5)$

พจน์ A คือ พื้นที่การถ่ายเทความร้อนแบบการพาของผนังด้านบนของช่องขนานที่ถูกให้ความร้อน เมื่อ \bar{T}_s คือ อุณหภูมิผิวเฉลี่ยที่ได้จากอุณหภูมิผิวท่อในแต่ละจุด (T_s) ตามแนวยาวของช่องขนาน T_i และ T_o คือ อุณหภูมิทางเข้าและทางออกตามลำดับ โดยพจน์ \dot{m} , C_p , V และ I คือ มวลการไหลของอากาศ, ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ, ความต่างศักย์ และกระแสไฟฟ้า ตามลำดับ

เลขนัสเซิลท์เฉลี่ย (Nu) เขียนได้เป็น

$$Nu = \frac{hD_h}{k} \quad (4.6)$$

ตัวประกอบเสียดทาน (f) หาค่าได้จาก

$$f = \frac{2}{(L/D_h)} \frac{\Delta p}{\rho U^2}, \quad (4.7)$$

เมื่อ Δp คือ ค่าความดันตกคร่อม, ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ และ k คือ ค่าการนำความร้อน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร้อนของอากาศ คุณสมบัติทางกายภาพของอากาศถูกกำหนดที่อุณหภูมิของไหลเฉลี่ย (T_b) จากสมการ (4.4)

ที่สภาวะกำลังขับ (pumping power) เดียวกัน

$$(\dot{V} \Delta p)_0 = (\dot{V} \Delta p) \quad (4.8)$$

เมื่อ \dot{V} อัตราการไหลของอากาศ และเขียนในพจน์ตัวประกอบเสียดทาน และเลขเรย์โนลด์ ได้เป็น

$$(f Re^3)_0 = (f Re^3) \quad \text{และ} \quad Re_0 = Re(f/f_0)^{1/3} \quad (4.9)$$

ตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อน (thermal performance enhancement factor, TEF) คือ อัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของพื้นผิวทดสอบ (h) เทียบกับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนท่อผนังเรียบ (h_0) ที่กำลังขับเดียวกัน

$$TEF = \frac{h}{h_0} \Bigg|_{pp} = \frac{Nu}{Nu_0} \Bigg|_{pp} = \left(\frac{Nu}{Nu_0} \right) \left(\frac{f}{f_0} \right)^{-1/3} \quad (4.10)$$

ซึ่งจะเป็นตัวชี้วัดที่แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการถ่ายเทความร้อน โดยเมื่อให้ค่ามากกว่า 1 แสดงว่าให้มีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนมากกว่าท่อผนังเรียบ เมื่อใช้กำลังขับพัสดุของระบบค่าเดียวกัน โดยการพัฒนาและออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีจุดมุ่งหมายเพื่อให้ได้ค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนสูงที่สุด ซึ่งจะเป็นผลให้สามารถลดขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ประหยัดพลังงานที่ต้องป้อนให้กับระบบ นำไปสู่การลดต้นทุนการผลิต เกิดประโยชน์ทั้งในแง่การลดพื้นที่การติดตั้ง ได้ประสิทธิภาพที่สูงขึ้น ด้วยราคาขายที่ต่ำลง ลดการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัด เพื่อเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการช่วยแก้ปัญหาวิกฤตพลังงาน

บทที่ 5

ครีบบาง แบบซิกแซก (zigzag, Z) มุม 45° บนผนังด้านเดียว

5.1 บทนำ

ในบทนี้ กล่าวถึงผลการทดลองส่วนที่ 1 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยใช้ครีบบาง (baffle) แบบซิกแซก (zigzag, Z) ที่ทำมุมกับทิศทางการไหล (α) 45° บนผนังด้านเดียว ตามรูปที่ 4.18 ศึกษาอิทธิพลของความสูง, ระยะพิตช์, การจัดวางของครีบบาง และลักษณะของครีบบาง โดยแบ่งการศึกษาในส่วนนี้ออกเป็น

- (1.1) ผลการทวนสอบผนังเรียบ เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองการถ่ายเทความร้อน และการสูญเสียความดันที่ได้กับสหสัมพันธ์ที่เชื่อถือได้ เพื่อเป็นการยืนยันถึงขั้นตอนอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองว่ามีความน่าเชื่อถือ
- (1.2) ครีบบางวางลักษณะเอียง แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffles) ที่ทำมุมกับทิศทางการไหล (α) 45° ลักษณะตามรูปที่ 4.16 บนผนังด้านเดียวเพื่อศึกษาอิทธิพลของลักษณะของครีบบางในรูปแบบดังกล่าว และผลของความสูงครีบบาง 3, 6 และ 9 mm ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3) ระยะพิตช์ 45, 60 และ 90 mm ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0)
- (1.3) ครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางตรงกัน (Z-in-phase) ที่ทำมุมกับทิศทางการไหล (α) 45° ลักษณะตามรูปที่ 4.17 บนผนังด้านเดียวเพื่อศึกษาอิทธิพลของลักษณะการวาง และลักษณะครีบบางในรูปแบบดังกล่าว และผลของความสูงครีบบาง 1.5, 3, 6 และ 9 mm ($e/H = 0.05, 0.1, 0.2$ และ 0.3) ระยะพิตช์ 45, 60 และ 90 mm ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0)
- (1.4) ครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางเยื้องกัน (Z-out-phase) ที่ทำมุมกับทิศทางการไหล (α) 45° ลักษณะตามรูปที่ 4.17 บนผนังด้านเดียวเพื่อศึกษาอิทธิพลของลักษณะการวาง และลักษณะครีบบางในรูปแบบดังกล่าว และผลของความสูงครีบบาง 3, 6 และ 9 mm ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3) ระยะพิตช์ 30, 45 และ 60 mm ($P/H = 1, 1.5$ และ 2.0)
- (1.5) ครีบบางรูปตัว Z ที่มุมของแถวต่างกัน ที่ทำมุมกับทิศทางการไหล (θ) $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ และ 90° ลักษณะตามรูปที่ 4.18 บนผนังด้านเดียวเพื่อศึกษาอิทธิพลของลักษณะของการวางครีบบางในรูปแบบดังกล่าว และผลของความสูงครีบบาง 3 mm ($e/H = 0.1$) ระยะพิตช์ 30, 45 และ 60 mm ($P/H = 1, 1.5$ และ 2.0)
- (1.6) การเปรียบเทียบลักษณะครีบบางที่ทำมุม 45° บนผนังด้านเดียว จากการทดลองในหัวข้อที่ผ่านมาจะนำเอาลักษณะของครีบบางที่มีค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนที่สูงนำมาเปรียบเทียบกัน

ทำการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนในพจน์ของเลขนัสเซลท์ (Nu) และการสูญเสียความดันในพจน์ของตัวประกอบเสียดทาน (f) จากนั้นก็เปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันกับท่อผนังเรียบ และตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อน (TEF) ซึ่งเป็นข้อมูลที่คำนวณที่กำลังซับซ้อน โดยกำหนดจากค่าเลขเรย์โนลด์ (Re) ของการทดลอง มีผลดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ผลการทวนสอบท่อผนังเรียบ

การทดลองนี้ศึกษาผลของการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันของท่อผนังเรียบในพจน์ของ Nu และ f ตามลำดับ เปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter และสหสัมพันธ์ของ Blasius อ้างอิงเอกสาร [46, 47] ในช่วงการไหลปั่นป่วน สหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter,

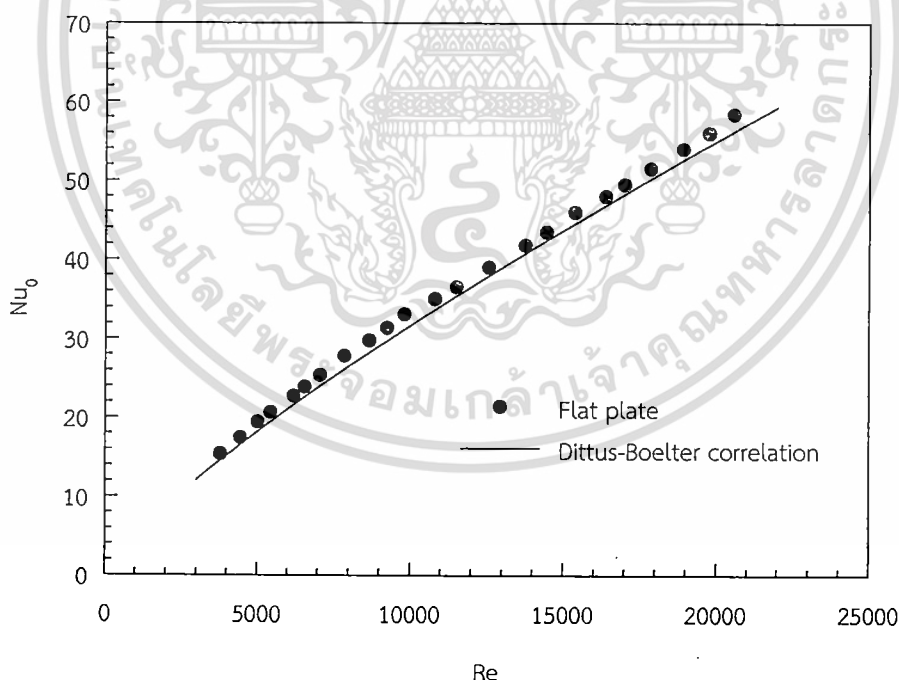
$$Nu = 0.023Re^{0.8} Pr^{0.4} \text{ สำหรับการให้ความร้อน} \quad (5.1)$$

สหสัมพันธ์ของ Blasius,

$$f = 0.316Re^{-0.25} \quad 4,400 \leq Re \leq 20,400 \quad (5.2)$$

5.2.1 เลขนัสเซิลท์ (Nu)

ในรูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ของ Nu กับ Re กรณีท่อผนังเรียบ จากการทดลองพบว่า ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนค่า Re เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่า Nu เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบค่า Nu จากการทดลองกับค่า Nu จากสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter พบว่า ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนค่า Nu จากผลการทดลอง มีค่ามากกว่าค่า Nu จากสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter โดยจะมีค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยน้อยกว่า 6% เมื่อเทียบกับสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter ที่ใช้หาค่า Nu สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนที่ปรับตัวเต็มทีในท่อผนังเรียบ ในช่วง $Re_0 \geq 10,000$

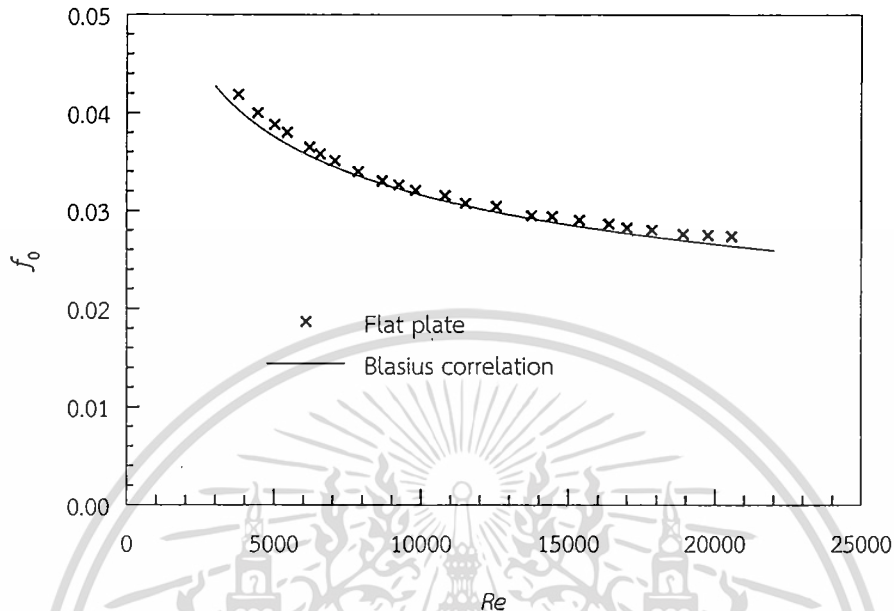


รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ของเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อผนังเรียบ

5.2.2 ตัวประกอบเสียดทาน (f)

รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ของ f กับ Re กรณีท่อผนังเรียบ จากการทดลองพบว่า ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ค่า f ลดลงเล็กน้อยเมื่อ Re เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบค่า f จากการทดลอง และค่า f เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสหสัมพันธ์ของ Blasius พบว่า ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนค่า f จากการทดลองมีค่ามากกว่า จากสหสัมพันธ์ของ Blasius โดยจะมีค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยน้อยกว่า 5% เมื่อเทียบกับสหสัมพันธ์ของ Blasius ที่ใช้หา f สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนที่ปรับตัวเต็มทีในท่อผิวเรียบ ในช่วง $Re_D \leq 20,000$

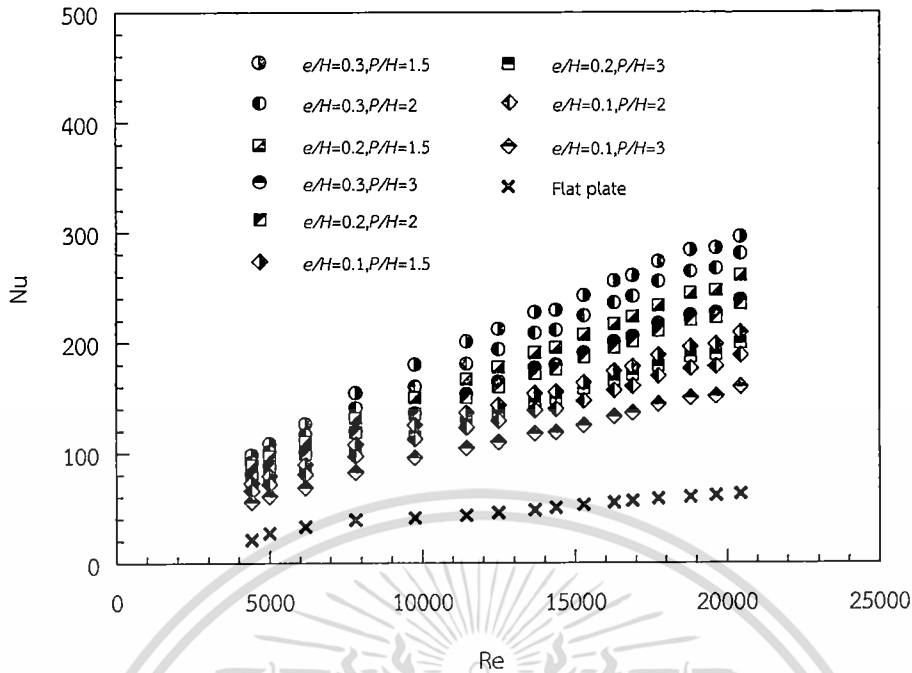


รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อผนังเรียบ

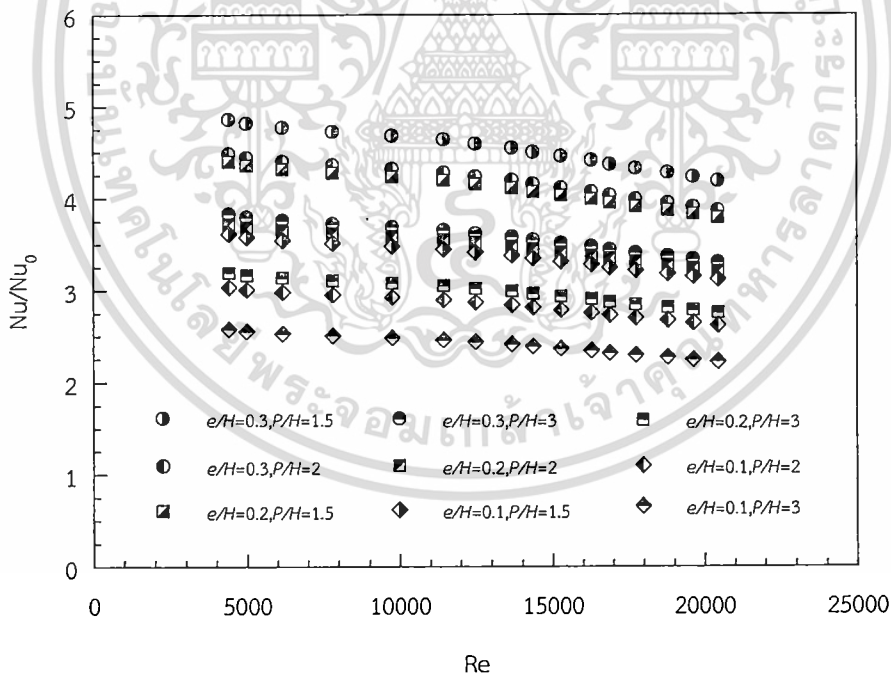
ผลการทดลองท่อผนังเรียบ ทำการเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ที่น่าเชื่อถือและได้รับความนิยม โดย Nu จะเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยน้อยกว่า 6% และ f จะเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ของ Blasius ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยน้อยกว่า 5% โดยทั่วไป ผลการทดลองสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยไม่ควรเกิน 10% ซึ่งถือว่าผลการทดลองในครั้งนี้น่าเชื่อถือได้

5.3 ครีบบางวางลักษณะเอียง แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffles) บนผนังด้านเดียว

ในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาถึงลักษณะของครีบบางวางแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffles, DB) ดังแสดงในรูปที่ 4.16 ซึ่งในการทดลองได้ทำการทดลองในหลายลักษณะ ประกอบไปด้วย ความสูง (e) ทั้งหมด 3 ความสูงคือ 3, 6 และ 9 mm ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3) และ ระยะพิตช์ (P) ทั้งหมด 3 ระยะคือ 45, 60 และ 90 mm ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0) โดยจะทำการหาผลของการเปลี่ยนความสูง และระยะพิตช์ต่อครีบบางวางในลักษณะดังกล่าว ซึ่งการที่จะนำเสนอผลการทดลองเพื่อให้เห็นถึงพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนจะแสดงเป็นกราฟของ Nu, f และ TEF

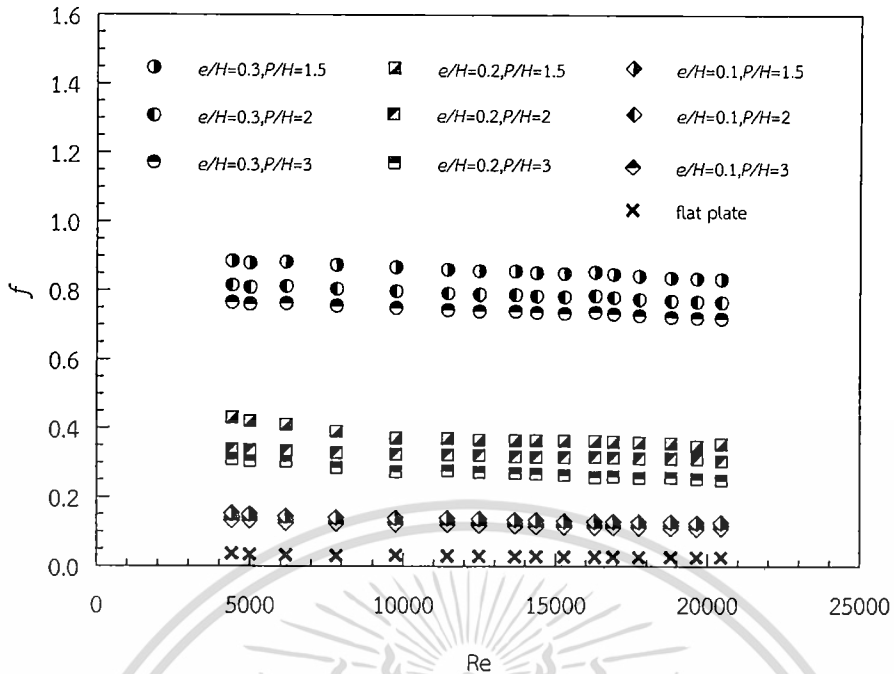


รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ของเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะเอียง แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffles) บนผนังด้านเดียว

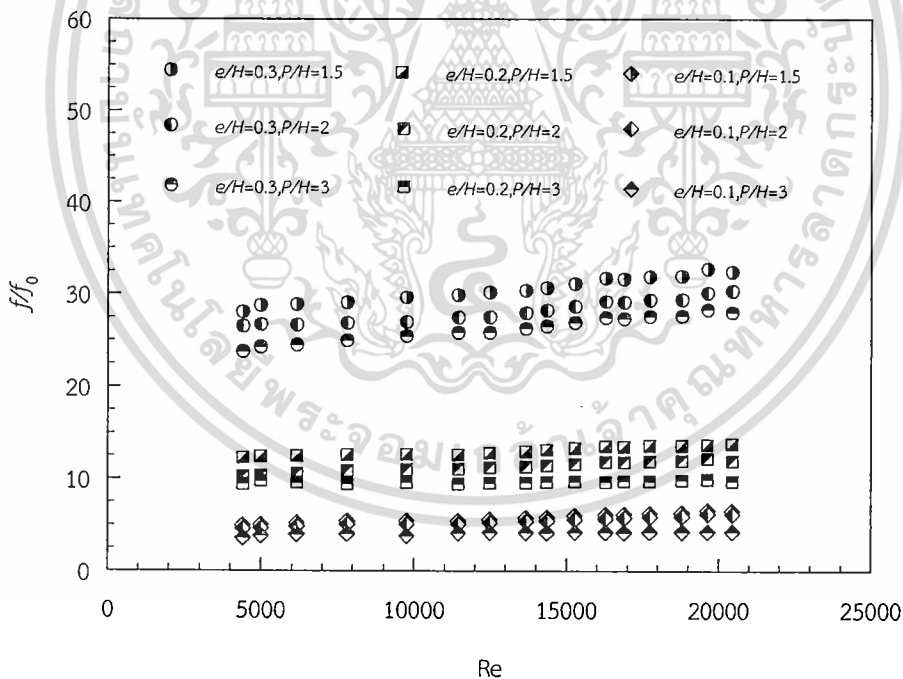


รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะเอียง แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffles) บนผนังด้านเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะเอียง แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffles) บนผนังด้านเดียว



รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะเอียง แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffles) บนผนังด้านเดียว

5.3.1 ความสูง ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3)

ผลการทดลองของครีบบางวางเอียงแบบไม่ต่อเนื่องทำมุมกับทิศทางการไหล 45° มีความสูงสม่ำเสมอ 3 แบบ $e = 3, 6$ และ 9 mm ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3) Nu ที่ได้จากการทดสอบในช่วงเอกรการไหลปั่นป่วน แสดงในรูปที่ 5.3 จากรูปกราฟเราจะเห็นถึงค่า Nu มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามค่า Re ที่มีการคำนวณไว้ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มขึ้น จากการที่ค่า Re มีค่าสูงการไหลยิ่งปั่นป่วนมาก มีผลทำให้การถ่ายเทความร้อนยิ่งสูงขึ้น โดยในส่วนของความสูงครีบ ยิ่งมีความสูงมากค่า Nu จะมีค่ามากกว่าความสูงครีบที่น้อยกว่า จากกราฟที่ระยะพิตซ์ 45 mm ($P/H = 1.5$) ที่ความสูงครีบ 9 mm ($e/H = 0.3$) จะมีค่า Nu มากที่สุดเรียงลงมาตามความสูงที่ลดลง โดยที่ความสูง $e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3 จะมีค่า Nu มากกว่าแผ่นเรียบในช่วง 395-340%, 485-417% และ 574-495% ตามลำดับ ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ดังแสดงในรูปที่ 5.4 เนื่องจากครีบที่สูงจะเป็นตัวที่ทำให้ของไหลที่ไหลผ่านเกิดการไหลแบบปั่นป่วนมากยิ่งขึ้น จะทำให้การถ่ายเทความร้อนยิ่งสูงขึ้นตาม

ในส่วนของ f จะมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของค่า Re และในส่วนของความสูงครีบยิ่งครีบมีความสูงมาก ค่า f จะมีค่าสูงขึ้นตามดังแสดงในรูปที่ 5.5 โดยที่ระยะพิตซ์ 45 mm ($P/H = 1.5$) ที่ความสูงครีบ 9 mm ($e/H = 0.3$) จะมีค่า f มากที่สุดเรียงลงมาตามความสูงที่ลดลง โดยที่ความสูง $e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3 จะมีค่า f มากกว่าแผ่นเรียบในช่วง 4.9-6.5, 12.2-13.8 และ 28.0-32.7 เท่าตามลำดับ ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ดังแสดงในรูปที่ 5.6 เนื่องจากครีบที่สูงจะยิ่งขวางการเคลื่อนที่ของของไหลทำให้เกิดผลต่างความดันของของไหลมากกว่าระหว่างทางเข้า กับทางออกจากแผ่นทดสอบซึ่งทำให้ค่า f มีค่าสูงตามสมการที่ 3.2 แสดงในบทที่ 3

5.3.2 ระยะพิตซ์ ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0)

ผลการทดลองของครีบบางวางเอียงแบบไม่ต่อเนื่องทำมุมกับทิศทางการไหล 45° มีระยะพิตซ์ 3 แบบ $P = 45, 60$ และ 90 mm ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0) Nu ที่ได้จากการทดสอบในช่วงการไหลปั่นป่วน แสดงในรูปที่ 5.3 จากรูปกราฟเราจะเห็นถึงผลของระยะพิตซ์ ยิ่งมีค่าน้อยค่า Nu จะมีค่ามากยิ่งขึ้น จากกราฟที่ความสูงครีบ 9 mm ($e/H = 0.3$) ที่ระยะพิตซ์ 45 mm ($P/H = 1.5$) จะมีค่า Nu มากที่สุดเรียงลงมาตามระยะพิตซ์ที่เพิ่มขึ้น โดยที่ระยะพิตซ์ $P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0 จะมีค่า Nu มากกว่าแผ่นเรียบในช่วง 574-495%, 490-422% และ 417-359% ตามลำดับ ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ดังแสดงในรูปที่ 5.4 เนื่องจากครีบเป็นตัวที่ทำให้ของไหลที่ไหลผ่านเกิดการไหลแบบปั่นป่วน ทำให้เพิ่มการถ่ายเทความร้อนให้สูงขึ้น เมื่อมีระยะพิตซ์สั้นจะทำให้ของไหลจะไหลไปเจอครีบมากยิ่งขึ้น ซึ่งทำให้ของไหลปั่นป่วนมาก และการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นตาม

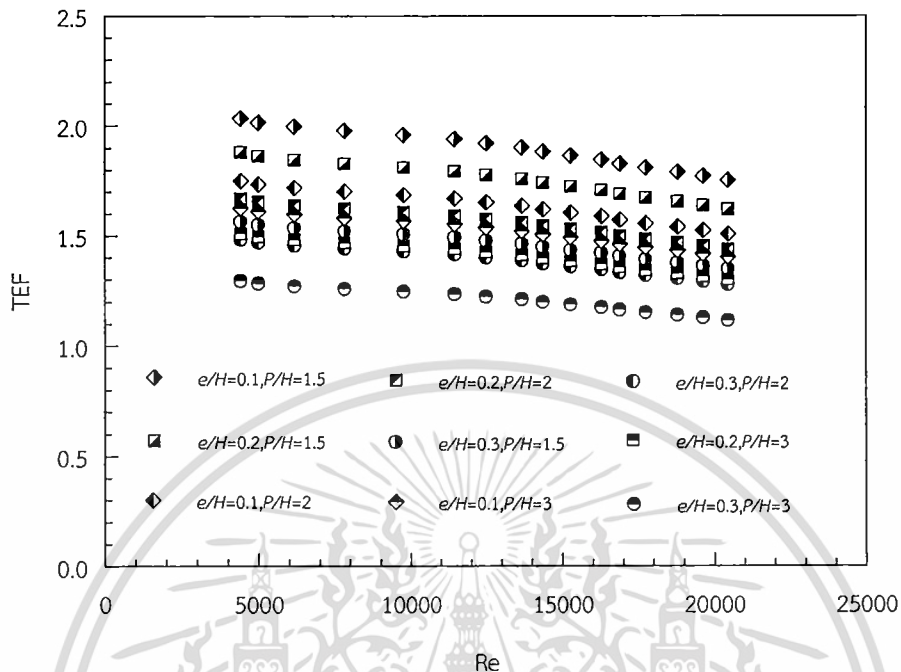
ในส่วนของ f ส่วนของระยะพิตซ์ยังมีระยะสั้น ค่าตัวประกอบเสียดทานจะมีค่าสูงขึ้นตามดังแสดงในรูปที่ 5.5 โดยที่ความสูงครีบ 9 mm ($e/H = 0.3$) ที่ระยะพิตซ์ 45 mm ($P/H = 1.5$) จะมีค่า f มากที่สุดเรียงลงมาตามระยะพิตซ์ที่ลดลง ที่ระยะพิตซ์ $P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0 จะมีค่า f มากกว่าแผ่นเรียบในช่วง 28.0-32.4, 26.5-30.3 และ 23.8-28.0 เท่าตามลำดับ ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ดังแสดงในรูปที่ 5.6 เนื่องจากระยะพิตซ์ที่สั้นจะมีจำนวนแถวของครีบเยอะกว่าเมื่อเทียบกับระยะพิตซ์ที่ยาว ในระยะช่วงทดสอบเดียวกัน จะทำให้ของไหลต้องเจอครีบขวางการไหลมากกว่า ทำให้ความดันตกคร่อมมีค่าสูง ส่งผลให้ค่า f เพิ่มขึ้นตาม

5.3.3 ตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อน (TEF)

จากรูปกราฟที่ 5.4 และ 5.6 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของสัดส่วน Nu และ f ซึ่งทั้งสองค่านี้นำมาคำนวณเป็นค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อน (thermal performance enhancement factor, TEF) ตามสมการที่ 3.50 ในบทที่ 3 ซึ่งจะเป็นค่าที่แสดงถึงประสิทธิภาพทางความร้อน โดยจะเป็นการคิดถึงพลังงานที่ใช้ในการขับของไหลผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนกับค่าพลังงานที่ได้จากการแลกเปลี่ยนความร้อน จากรูปที่ 5.7 แสดงให้เห็นถึงค่า TEF ที่มีค่าลดลงตามค่า Re ที่เพิ่มขึ้น ครีบที่มีความสูง 0.3 mm ($e/H = 0.1$) ระยะพิตซ์ 45 mm ($P/H = 1.5$) มีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TEF สูงมากที่สุดคือมีค่าอยู่ในช่วง 2.02-1.85 ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ซึ่งค่า TEF จะมีค่าสูงที่สุดเมื่อค่า Re มีค่าต่ำที่สุด



รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนกับเลขเรย์โนลด์กรณิตั้งครีบบางวางลักษณะเอียง แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffles) บนผนังด้านเดียว

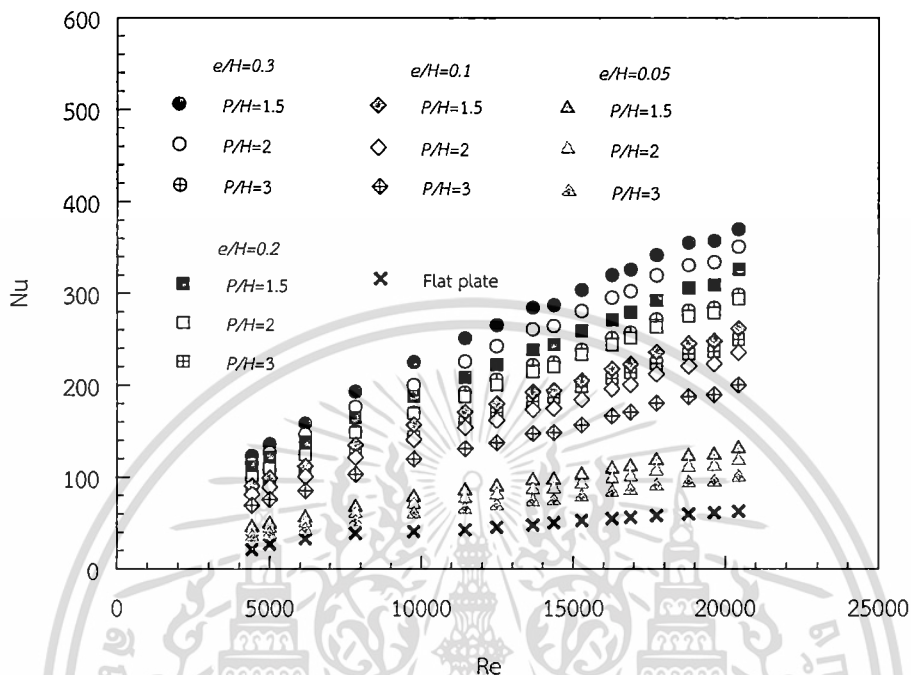
5.4 ครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางตรงกัน (Z- in-phase)

ในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาถึงลักษณะของครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางตรงกัน (Z-in-phase) ดังแสดงในรูปที่ 4.17 ซึ่งในการทดลองได้ทำการทดลองในหลายลักษณะ ประกอบไปด้วย ความสูง (e) ทั้งหมด 4 ความสูงคือ 1.5, 3, 6 และ 9 mm ($e/H = 0.05, 0.1, 0.2$ และ 0.3) และ ระยะพิทช์ (P) ทั้งหมด 3 ระยะคือ 45, 60 และ 90 mm ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0) ในการทดลองชุดนี้จะเพิ่มความสูงมาหนึ่งค่าคือที่ความสูง 1.5 mm ($e/H = 0.05$) เนื่องจากผลการทดลองที่ผ่านมา ค่าของ TEF จะมีค่าสูงที่ความสูงครีบบาง 3 mm ($e/H = 0.1$) ซึ่งเป็นค่าที่ครีบบางมีความสูงต่ำที่สุดดังนั้นในส่วนนี้ต้องการทดสอบในส่วนของความสูงว่าต่ำกว่า 3 mm เพื่อจะหาแนวโน้มของค่า TEF ว่าจะมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงจากค่าความสูงครีบบางที่ต่ำกว่า 3 mm โดยจะทำการหาผลของการเปลี่ยนความสูงและระยะพิทช์ต่อครีบบางในลักษณะดังกล่าว ซึ่งการที่จะนำเสนอผลการทดลองเพื่อให้เห็นถึงพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนจะแสดงเป็นกราฟของ Nu, f และ TEF

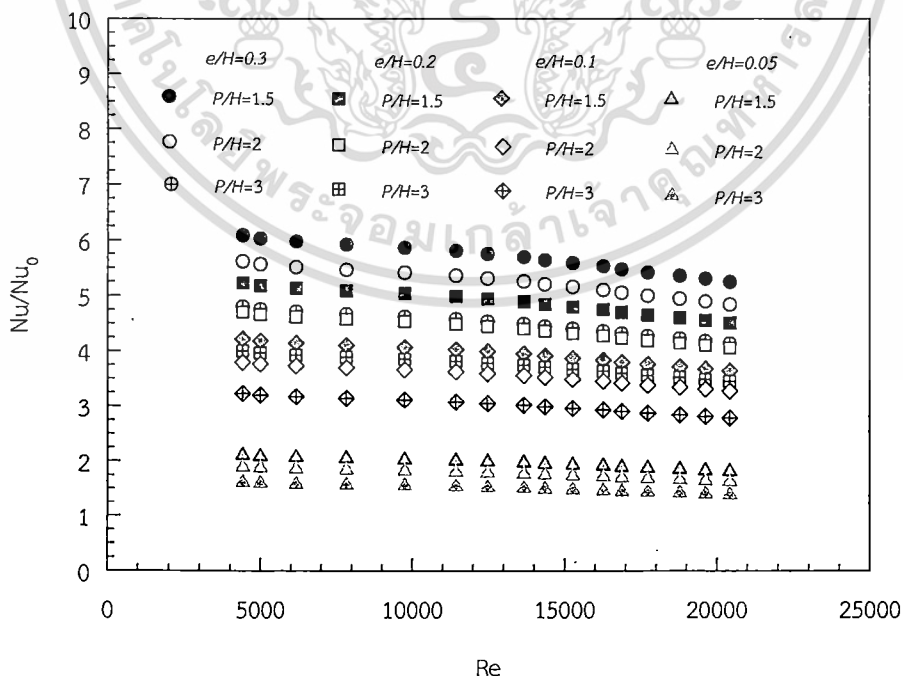
5.4.1 ความสูง ($e/H = 0.05, 0.1, 0.2$ และ 0.3)

ผลการทดลองของครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางตรงกันทำมุมกับทิศทางการไหล 45° มีความสูงสม่ำเสมอ 4 แบบ $e = 1.5, 3, 6$ และ 9 mm ($e/H = 0.05, 0.1, 0.2$ และ 0.3) Nu ที่ได้จากการทดสอบในช่วงการไหลปั่นป่วน แสดงในรูปที่ 5.8 จากกราฟเราจะเห็นถึงค่า Nu มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่า Re ที่เพิ่มขึ้น ในส่วนของความสูงครีบบาง ยังมีความสูงมากค่า Nu จะมีค่ามากกว่าความสูงครีบบางที่น้อยกว่า เช่นเดียวกับลักษณะครีบบางเอียงแบบไม่ต่อเนื่องในหัวข้อ 5.3.1 จากกราฟที่ระยะพิทช์ 45 mm ($P/H = 1.5$) ที่ความสูงครีบบาง 9 mm ($e/H = 0.3$) จะมีค่า Nu มากที่สุดเรียงลงมาตามความ

สูงที่ลดลง โดยที่ความสูง $e/H = 0.05, 0.1, 0.2$ และ 0.3 จะมีค่า Nu มากกว่าแผ่นเรียบในช่วง 211-181%, 333-287%, 472-407% และ 557-480% ตามลำดับ ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ดังแสดงในรูปที่ 5.9

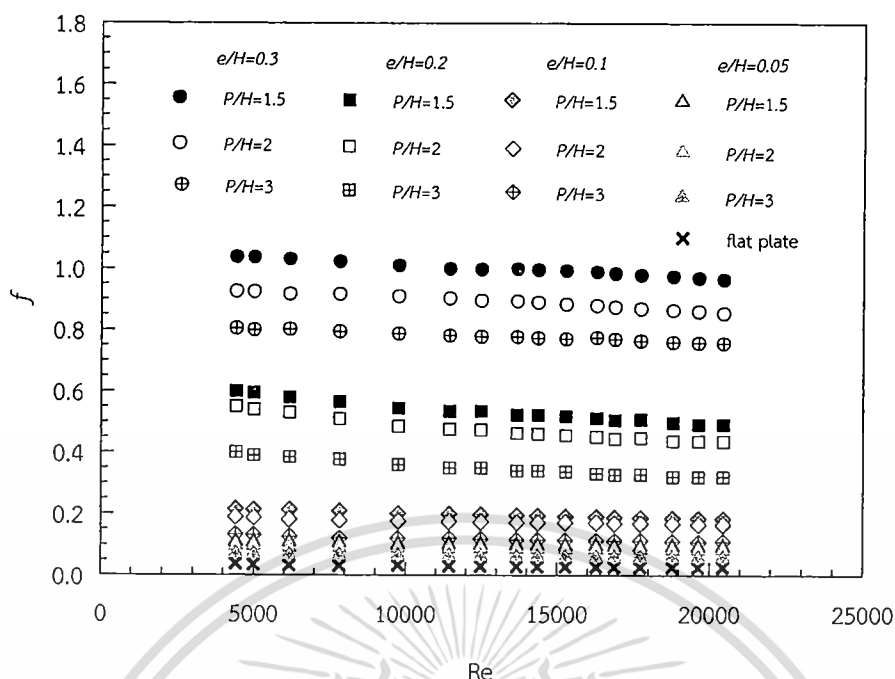


รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ของเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวงลักษณะซิกแซก แบบวางตรงกัน (Z- in-phase) บนผนังด้านเดียว

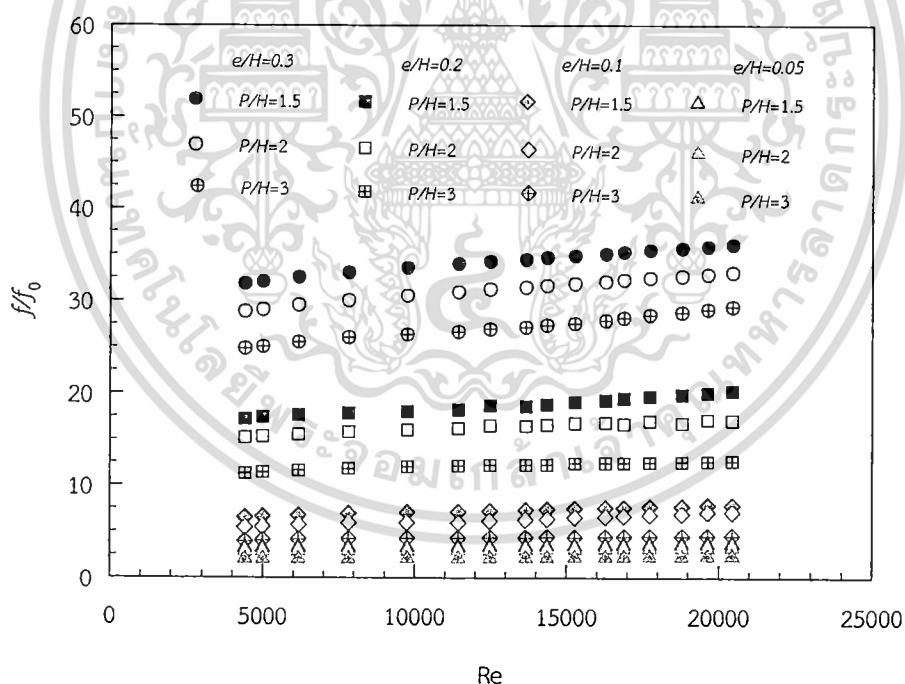


รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวงลักษณะซิกแซก แบบวางตรงกัน (Z- in-phase) บนผนังด้านเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางตรงกัน (Z- in-phase) บนผนังด้านเดียว



รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางตรงกัน (Z- in-phase) บนผนังด้านเดียว

ในส่วนของ f จะมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของ Re และในส่วนของความสูงครีบบังครีบบังมีความสูงมาก ค่า f จะมีค่าสูงขึ้นเช่นเดียวกับครีบบังในหัวข้อที่ 5.3.1 ตามดังแสดงในรูปที่ 5.10 โดยที่ระยะพิตช์ 45 mm ($P/H = 1.5$) ที่ความสูงครีบบัง 9 mm ($e/H = 0.3$) จะมี f มากที่สุดเรียงลงมาตามความสูงที่ลดลง โดยที่ความสูง $e/H = 0.05, 0.1, 0.2$ และ 0.3 จะมีค่า f มากกว่าแผ่นเรียบในช่วง

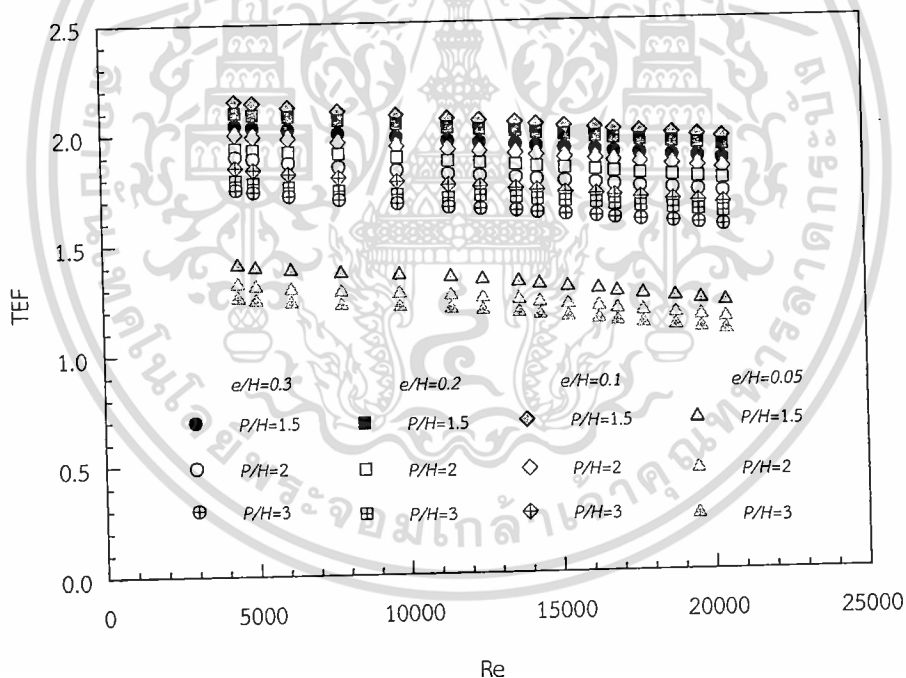
เอกราชบัณฑิตยสถาน
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2-3.7, 6.5-7.7, 17.2-20.2 และ 31.8-36 เท่าตามลำดับ ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ดังแสดงในรูปที่ 5.11

5.4.2 ระยะเวลาพิตช์ ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0)

ผลการทดลองของครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางตรงกันทำมุมกับทิศทางการไหล 45° มีระยะเวลาพิตช์ 3 แบบ (P) 45, 60 และ 90 mm ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0) Nu ที่ได้จากการทดสอบในช่วงการไหลปั่นป่วน แสดงในรูปที่ 5.8 จากรูปกราฟเราจะเห็นถึงผลของระยะเวลาพิตช์ ยิ่งมีค่าน้อยค่า Nu จะมีค่ามากยิ่งขึ้นเช่นเดียวกับครีบบนหัวข้อที่ 5.3.2 จากกราฟที่ความสูงครีบบน 9 mm ($e/H = 0.3$) ที่ระยะเวลาพิตช์ 45 mm ($P/H = 1.5$) จะมีค่า Nu มากที่สุดเรียงลงมาตามระยะเวลาพิตช์ที่เพิ่มขึ้น โดยที่ระยะเวลาพิตช์ $P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0 จะมีค่า Nu มากกว่าแผ่นเรียบในช่วง $557-480\%$, $511-440\%$ และ $427-367\%$ ตามลำดับ ในช่วง $Re = 4400-20,400$ ดังแสดงในรูปที่ 5.9

ในส่วนของ f ส่วนของระยะเวลาพิตช์ยังมีระยะสั้น ค่า f จะมีค่าสูงขึ้นตามดังแสดงในรูปที่ 5.10 โดยที่ความสูงครีบบน 9 mm ($e/H = 0.3$) ที่ระยะเวลาพิตช์ 45 mm ($P/H = 1.5$) จะมีค่า f มากที่สุดเรียงลงมาตามระยะเวลาพิตช์ที่ลดลง ที่ระยะเวลาพิตช์ $P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0 จะมีค่า f มากกว่าแผ่นเรียบในช่วง $31.8-36.0, 28.8-33.0,$ และ $24.8-29.3$ เท่าตามลำดับ ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ดังแสดงในรูปที่ 5.11 เช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 5.3.2



รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนกับเลขเรย์โนลด์กรณิตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางตรงกัน (Z-in-phase) บนผนังด้านเดียว

5.4.3 ตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อน (TEF)

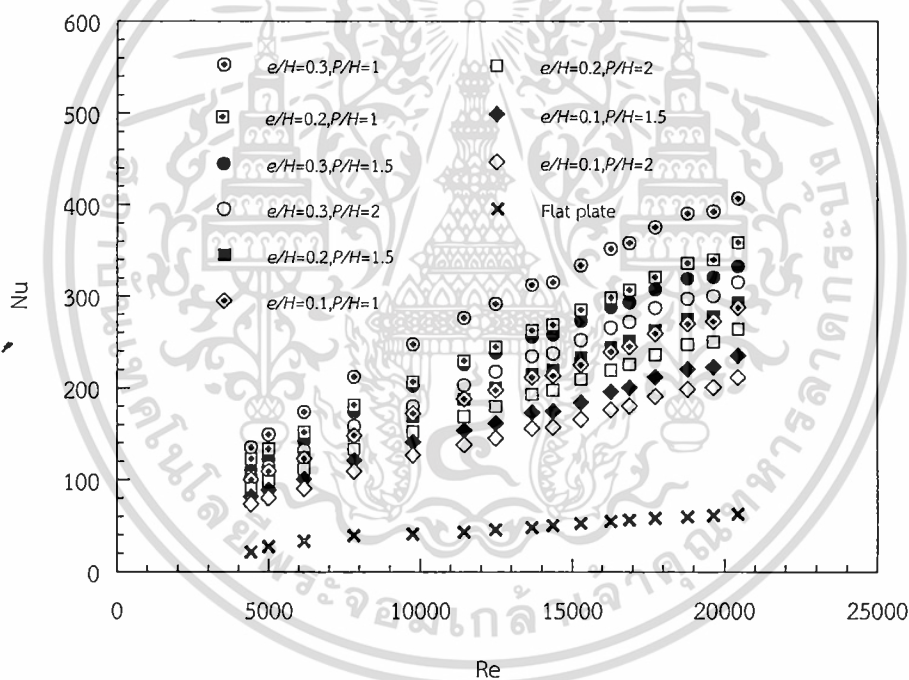
จากรูปกราฟที่ 5.9 และ 5.11 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของสัดส่วน Nu และ f ซึ่งทั้งสองค่านี้นำมาคำนวณเป็นค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อน (thermal performance enhancement factor, TEF) เช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 5.3.3 จากรูปที่ 5.12 แสดงให้เห็นถึงค่า TEF ที่มีค่าลดลงตามค่า Re ที่เพิ่มขึ้น ครีบบนที่มีความสูง 0.3 mm ($e/H = 0.1$) ระยะเวลาพิตช์ 45 mm ($P/H =$

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5) มีค่า TEF สูงมากที่สุดคือมีค่าอยู่ในช่วง 2.15-1.96 ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ซึ่งค่า TEF จะมีค่าสูงที่สุดเมื่อค่า Re มีค่าต่ำที่สุด

5.5 ครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางเยื้องกัน (Z-out-phase)

ในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาถึงลักษณะของครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางเยื้องกัน (Z-out-phase) ดังแสดงในรูปที่ 4.17 ซึ่งในการทดลองได้ทำการทดลองในหลายลักษณะ ประกอบไปด้วย ความสูง (e) ทั้งหมด 3 ความสูงคือ 3, 6 และ 9 mm ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3) และ ระยะพิตช์ (P) ทั้งหมด 3 ระยะคือ 30, 45 และ 60 mm ($P/H = 1, 1.5$ และ 2.0) ในการทดลองส่วนนี้จะเพิ่มการทดลองที่ระยะพิตช์ 30 mm ($P/H = 1$) ซึ่งในการทดลองแบบวางตรงกันจะทำได้เนื่องจากว่าส่วนยอดของมุมครีบบางวางชนกัน แต่ในการทดลองที่วางครีบบางวางเยื้องกันนั้นส่วนยอดของมุมครีบบางวางเยื้องกันทำให้ไม่ชนกันจึงสามารถทำการติดตั้งครีบบางวางเพื่อทำการทดลองได้ โดยจะทำการหาผลของการเปลี่ยนความสูง และระยะพิตช์ต่อครีบบางวางในลักษณะดังกล่าว ซึ่งการที่จะนำเสนอผลการทดลองเพื่อให้เห็นถึงพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนจะแสดงเป็นกราฟของ Nu, f และ TEF

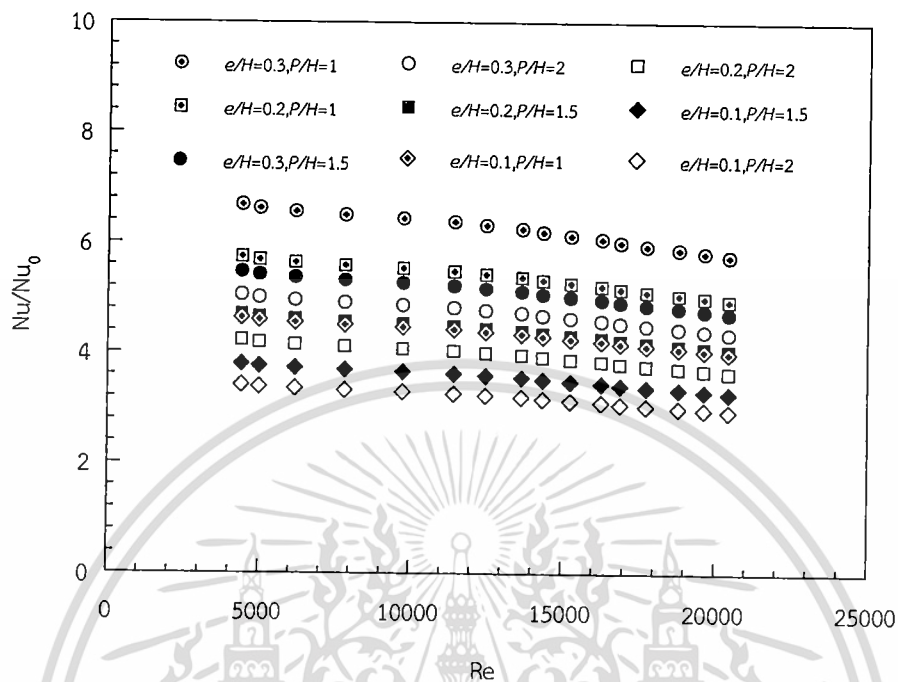


รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ของเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซกแบบวางเยื้องกัน (Z-out-phase) บนผนังด้านเดียว

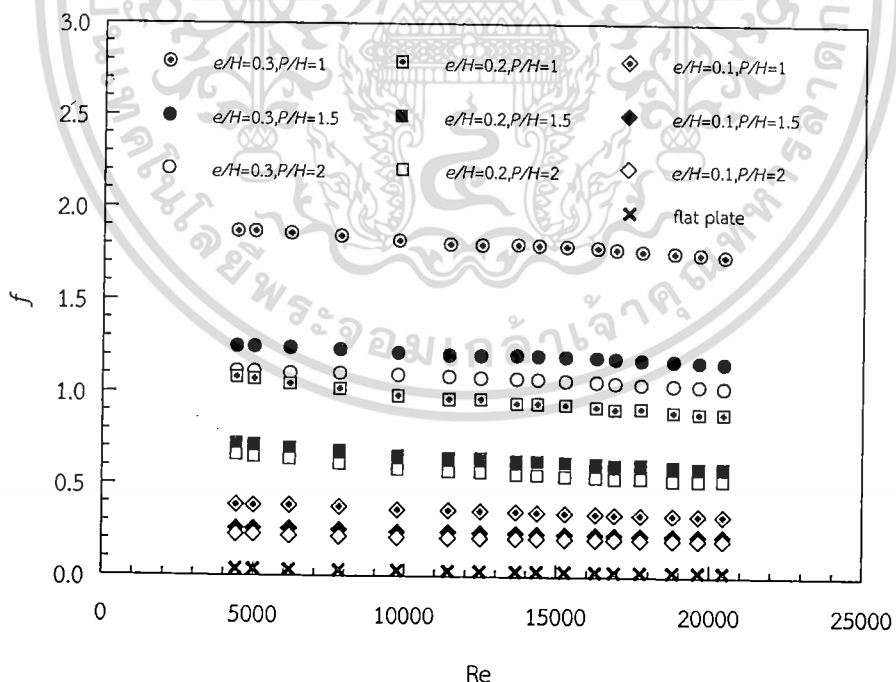
5.5.1 ความสูง ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3)

ผลการทดลองของครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางเยื้องกันทำมุมกับทิศทางการไหล 45° มีความสูงสม่ำเสมอ 3 แบบ $e = 3, 6$ และ 9 mm ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3) Nu ที่ได้จากการทดสอบในช่วงการไหลปั่นป่วน แสดงในรูปที่ 5.13 จากรูปกราฟเราจะเห็นถึงค่า Nu มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามค่า Re ที่เพิ่มขึ้น ในส่วนของความสูงครีบบางวาง ยิ่งมีความสูงมากค่า Nu จะมีค่ามากกว่าความสูงครีบบางวางที่น้อยกว่า เช่นเดียวกับลักษณะครีบบางวางแบบไม่ต่อเนื่องในหัวข้อ 5.3.1 จากกราฟที่ระยะพิตช์ 30 mm ($P/H = 1$) ที่ความสูงครีบบางวาง 9 mm ($e/H = 0.3$) จะมีค่า Nu มากที่สุดเรียงลงมาตามความสูงที่

ลดลง โดยที่ความสูง $e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3 จะมีค่า Nu มากกว่าแผ่นเรียบในช่วง 341-294%, 423-364% และ 492-424% ตามลำดับ ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ดังแสดงในรูปที่ 5.14

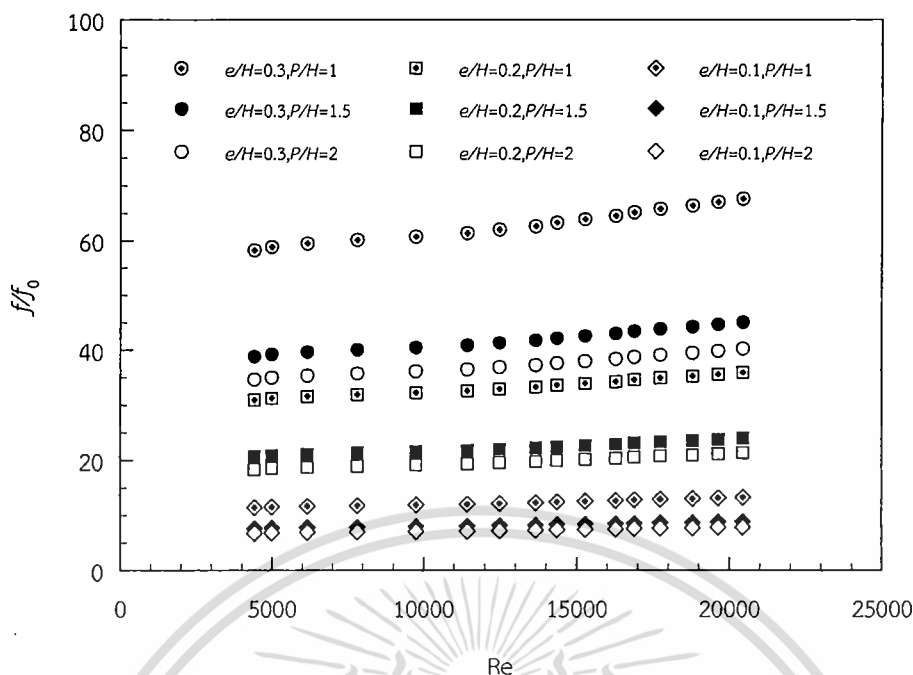


รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางเยื้องกัน (Z-out-phase) บนผนังด้านเดียว



รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางเยื้องกัน (Z-out-phase) บนผนังด้านเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวาง ลักษณะซิกแซก แบบวางเยื้องกัน (Z- out-phase) บนผนังด้านเดียว

ในส่วนของ f จะมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของค่า Re และในส่วนของความสูงครีบบังครีบบังมีความสูงมาก ค่า f จะมีค่าสูงขึ้นเช่นเดียวกับครีบบังในหัวข้อที่ 5.3.1 ตามดังแสดงในรูปที่ 5.15 โดยที่ระยะพิตช์ 30 mm ($P/H = 1$) ที่ความสูงครีบบัง 9 mm ($e/H = 0.3$) จะมีค่า f มากที่สุดเรียงลงมาตามความสูงที่ลดลง โดยที่ความสูง $e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3 จะมีค่า f มากกว่าแผ่นเรียบในช่วง 6.9-8.0, 18.6-21.7 และ 35.1-40.8 เท่าตามลำดับ ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ดังแสดงในรูปที่ 5.16

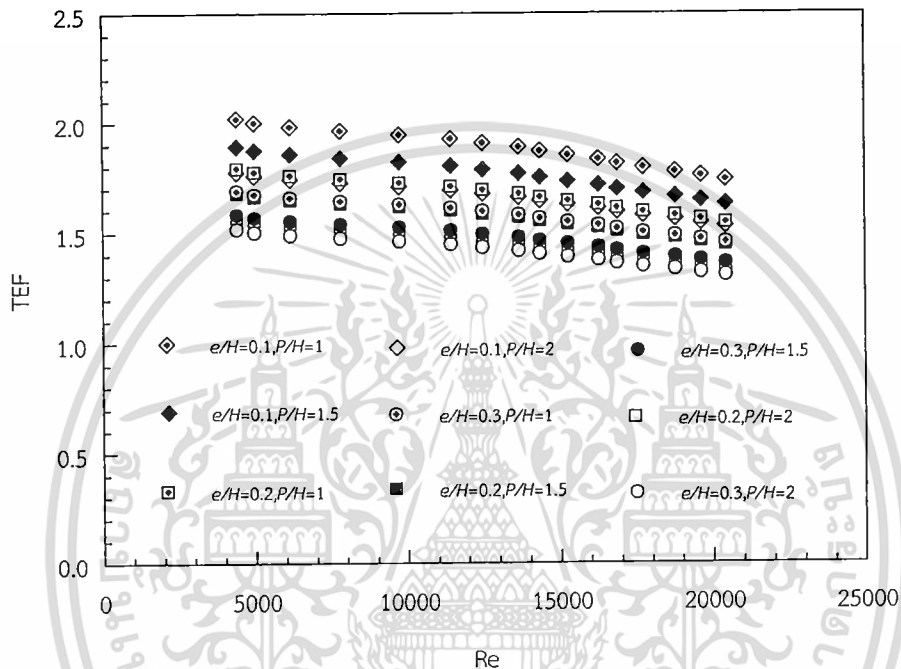
5.5.2 ระยะพิตช์ ($P/H = 1, 1.5$ และ 2.0)

ผลการทดลองของครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางตรงกันทำมุมกับทิศทางการไหล 45° มีระยะพิตช์ 3 แบบ $P = 30, 45$ และ 60 mm ($P/H = 1, 1.5$ และ 2.0) Nu ที่ได้จากการทดสอบในช่วงการไหลปั่นป่วน แสดงในรูปที่ 5.13 จากรูปกราฟเราจะเห็นถึงผลของระยะพิตช์ ยังมีค่าน้อยค่า Nu จะมีค่ามากยิ่งขึ้นเช่นเดียวกับครีบบังในหัวข้อที่ 5.3.2 จากกราฟที่ความสูงครีบบัง 9 mm ($e/H = 0.3$) ที่ระยะพิตช์ 30 mm ($P/H = 1$) จะมีค่า Nu มากที่สุดเรียงลงมาตามระยะพิตช์ที่เพิ่มขึ้น โดยที่ระยะพิตช์ $P/H = 1, 1.5$ และ 2.0 จะมีค่า Nu มากกว่าแผ่นเรียบในช่วง 492-424%, 454-391% และ 388-334% ตามลำดับ ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ดังแสดงในรูปที่ 5.14

ในส่วนของ f ส่วนของระยะพิตช์ยังมีระยะสั้น ค่า f จะมีค่าสูงขึ้นตามดังแสดงในรูปที่ 5.15 โดยที่ความสูงครีบบัง 9 mm ($e/H = 0.3$) ที่ระยะพิตช์ 30 mm ($P/H = 1$) จะมีค่า f มากที่สุดเรียงลงมาตามระยะพิตช์ที่ลดลง ที่ระยะพิตช์ $P/H = 1, 1.5$ และ 2.0 จะมีค่า f มากกว่าแผ่นเรียบในช่วง 35.1-40.8, 31.3-36.3, และ 23.2-27.0 เท่าตามลำดับ ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ดังแสดงในรูปที่ 5.16 เช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 5.3.2

5.5.3 ตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อน (TEF)

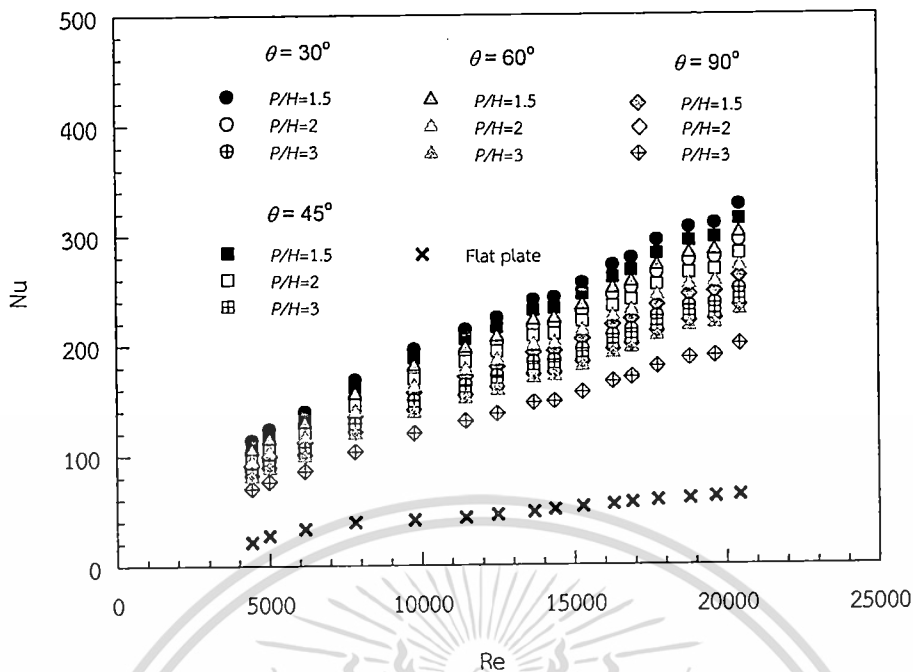
จากรูปกราฟที่ 5.14 และ 5.16 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของสัดส่วน Nu และ f ซึ่งทั้งสองค่านี้นำมาคำนวณเป็นค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อน (thermal performance enhancement factor, TEF) เช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 5.3.3 จากรูปที่ 5.17 แสดงให้เห็นถึงค่า TEF ที่มีค่าลดลงตามค่า Re ที่เพิ่มขึ้น ครีบที่มีความสูง 0.3 mm ($e/H = 0.1$) ระยะพิตช์ 30 mm ($P/H = 1$) มีค่า TEF สูงมากที่สุดคือมีค่าอยู่ในช่วง 1.76-1.52 ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ซึ่งค่า TEF จะมีค่าสูงที่สุดเมื่อค่า Re มีค่าต่ำที่สุด



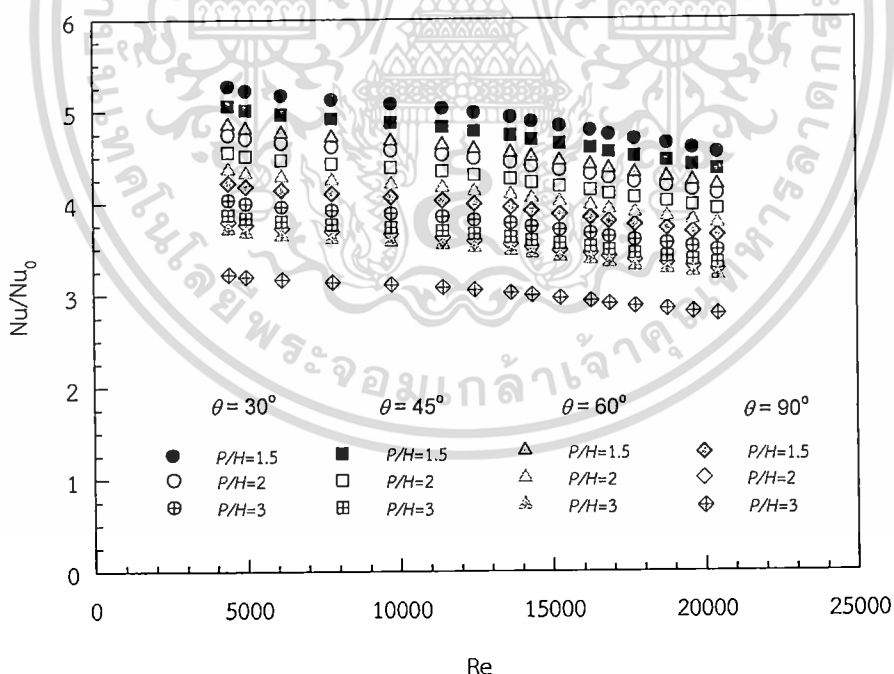
รูปที่ 5.17 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนกับเลขเรย์โนลด์กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางเยื้องกัน (Z- out-phase) บนผนังด้านเดียว

5.6 ครีบบางรูปตัว Z ที่มุมของแถวต่างกัน (θ)

ในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาถึงลักษณะของครีบบางวางลักษณะซิกแซก ที่มีการเปรียบเทียบมุมของแถวที่วางในแผ่นทดสอบ วางแถวทำมุม 30° , 45° , 60° และ 90° ดังแสดงในรูปที่ 4.19 ซึ่งในการทดลองได้ทำการทดลองในหลายลักษณะ ประกอบไปด้วย ระยะพิตช์ (P) ทั้งหมด 3 ระยะคือ 45, 60 และ 90 mm ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0) ที่ความสูง (e) 3 mm ($e/H = 0.1$) และโดยจะทำการหาผลของการเปลี่ยนมุมของแถว และระยะพิตช์ต่อครีบในลักษณะดังกล่าว ซึ่งการที่จะนำเสนอผลการทดลองเพื่อให้เห็นถึงพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนจะแสดงเป็นกราฟของ Nu , f และ TEF

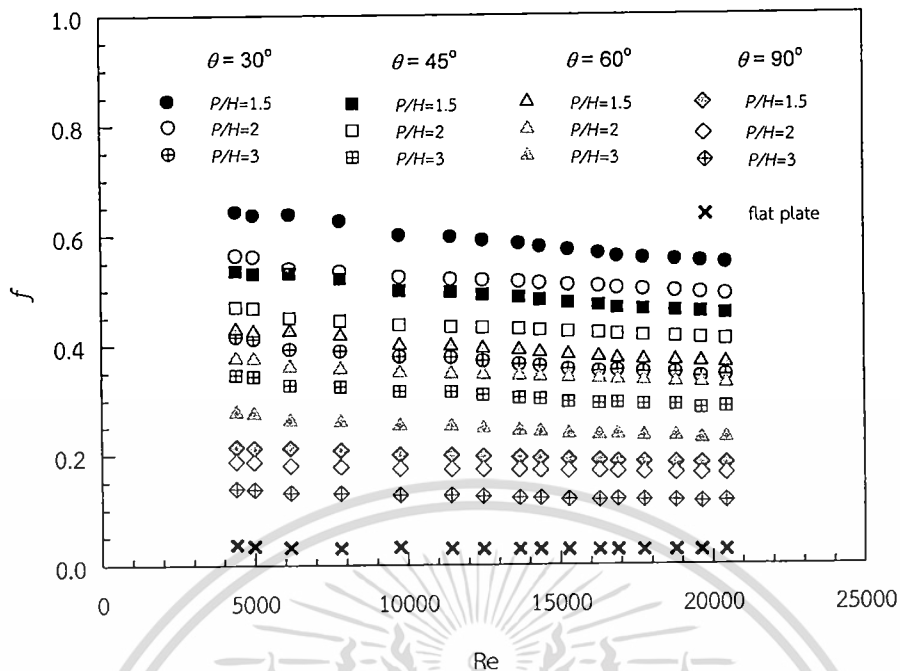


รูปที่ 5.18 ความสัมพันธ์ของเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์กรณีติดตั้งครีบบางวางแถวทำมุม 30°, 45°, 60° และ 90° บนผนังด้านเดียว มีความสูงครีบบ 3 mm ($e/H=0.1$) และระยะพิตช์ 45, 60 และ 90 mm ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0)

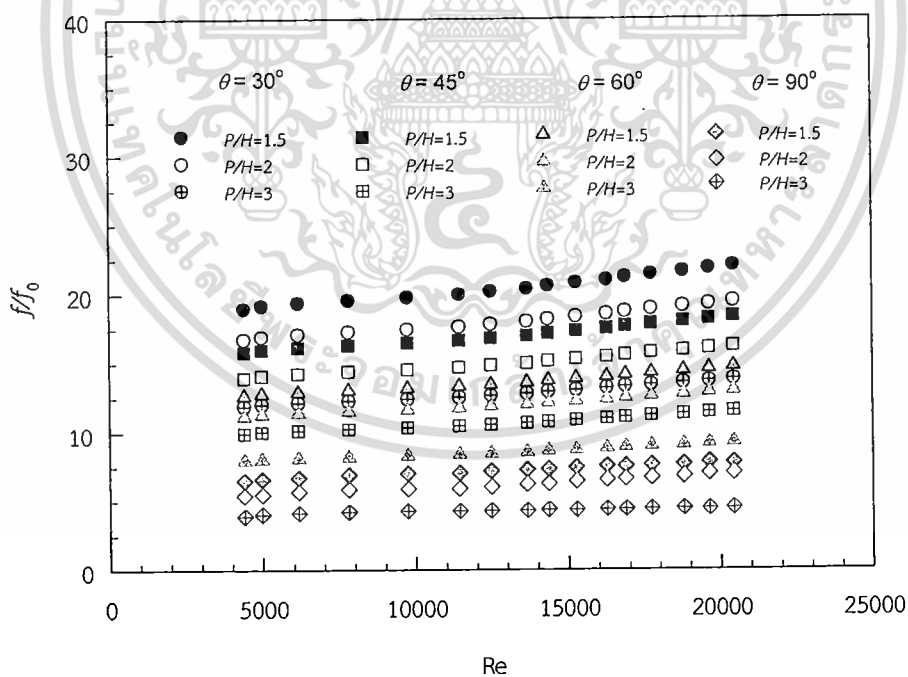


รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์กรณีติดตั้งครีบบางวางแถวทำมุม 30°, 45°, 60° และ 90° บนผนังด้านเดียว มีความสูงครีบบ 3 mm ($e/H=0.1$) และระยะพิตช์ 45, 60 และ 90 mm ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

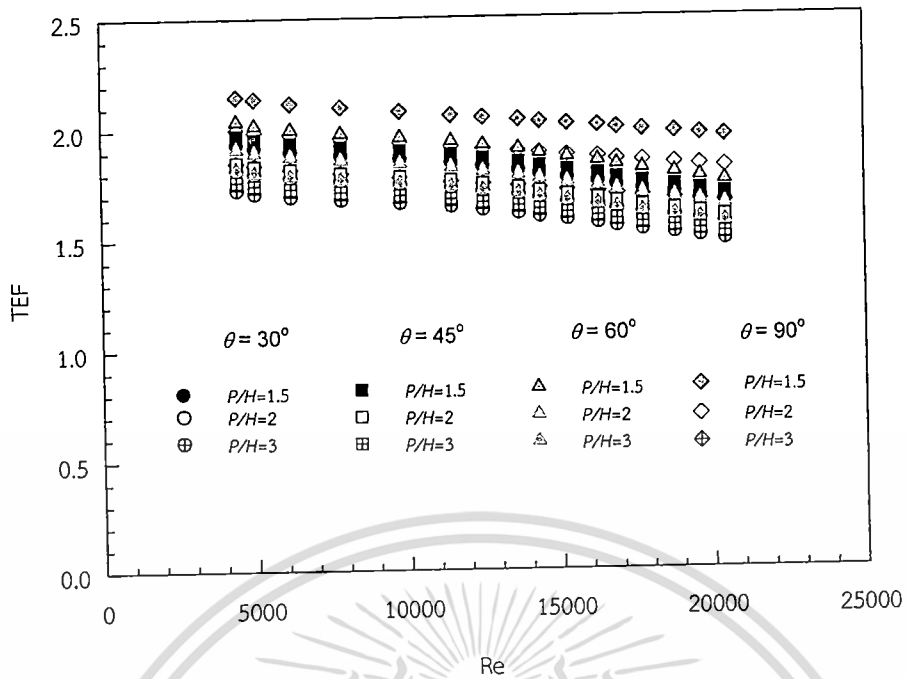


รูปที่ 5.20 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์กรณีติดตั้งครีบบางวางแฉกทำมุม 30° , 45° , 60° และ 90° บนผนังด้านเดียว มีความสูงครีบบาง 3 mm ($e/H=0.1$) และระยะพิตช์ 45, 60 และ 90 mm ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0)



รูปที่ 5.21 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์กรณีติดตั้งครีบบางวางแฉกทำมุม 30° , 45° , 60° และ 90° บนผนังด้านเดียว มีความสูงครีบบาง 3 mm ($e/H=0.1$) และระยะพิตช์ 45, 60 และ 90 mm ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.22 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนกับเลขเรย์โนลด์กรณีติดตั้งครีบบางวางแนวทำมุม 30° , 45° , 60° และ 90° บนผนังด้านเดียว มีความสูงครีบบาง $e/H=0.1$ และระยะพิตช์ 45, 60 และ 90 mm ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0)

ผลของการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลอง แสดงในรูปที่ 5.18-5.22 ที่ความสูงครีบบาง $e/H=0.1$ แสดงอยู่ในกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Nu , f และ TEF กับ Re จากรูปจะเห็นได้ว่าที่ความสูงครีบบางและระยะพิตช์เดียวกัน ครีบบางที่มีมุมของแถวครีบบาง 30° จะมีค่า Nu และ f มากกว่ามุมอื่น แต่ค่า TEF มุมการวางแนว 90° (การวางแนวของครีบบางวางตั้งฉากกับทิศทางการไหล ของของไหล เป็นลักษณะที่ใช้ในงานวิจัยนี้) เนื่องมาจากลักษณะของแถวตั้งแสดงในรูปที่ 4.18 แถวมุม 90° จะมีจำนวนแถวของครีบบางน้อยกว่าของครีบบาง 60° , 45° และ 30° ตามลำดับ เนื่องจากการหมุนมุมของแถวจะใช้การ หมุนที่ปลายของครีบบางที่ติดกับผนังแล้วหมุนให้ได้มุมตามที่ตั้งไว้ จะได้ลักษณะการวางครีบบางตามรูปที่ 4.18 ซึ่งมุมของแถวที่เป็นมุมแหลมกับทิศทางการไหลก็จะมีจำนวนของครีบบางทำให้ค่า Nu และ f มีค่ามาก แต่จากค่า f ที่มีค่าสูงทำให้ค่า TEF มีค่าต่ำ ซึ่งการวางแนวของครีบบางในมุม 90° คือวางแนวของครีบบางวางทิศทางการไหลจะมีสัดส่วนของค่า Nu และ f ที่เหมาะสมทำให้ได้ค่า TEF มีค่าสูง

5.7 การเปรียบเทียบลักษณะครีบบางที่ทำมุม 45° บนผนังด้านเดียว

หัวข้อที่ผ่านมานี้จะเป็นครีบบางทำมุมกับการไหลของของไหล 45° ติดอยู่บนผนังด้านบนของช่วงทดสอบ ซึ่งมีการทดลองลักษณะครีบบางทั้งหมด 39 ลักษณะ โดยจะสรุปค่าเฉลี่ยของสัดส่วนเลขนัสเซิลท์ (Nu/Nu_0) สัดส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) และค่า TEF แสดงในตารางที่ 5.1-5.3 แยกตามลักษณะของครีบบาง และแสดงผลกราฟเปรียบเทียบผลการทดลองของครีบบางในแต่ละลักษณะที่มีระยะพิตช์ 45 mm ($P/H=1.5$) ซึ่งจะแสดงอยู่ในกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Nu , f และ TEF กับ Re ดังแสดงในรูปที่ 5.23 – 5.25 จากตารางจะเห็นได้ว่าครีบบางที่มีความสูงครีบบางและระยะพิตช์ มีผลต่อค่า Nu , f และ TEF โดยที่ครีบบางที่สูง และระยะพิตช์ที่ยังแคบค่า Nu และ f จะยิ่งสูงแต่ในส่วน

เอกซอสมีทั้งการที่... ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของค่า TEF นั้นจะมีค่าสูงที่ครีบบางที่มีความสูงต่ำแต่ระยะพิตซ์แคบ เนื่องจากผลของค่า f ที่มีค่าสูงตามความสูงของครีบบางทำให้ค่า TEF มีค่าต่ำ แต่ระยะพิตซ์ที่แคบช่วยเพิ่มค่า Nu มากกว่าการเพิ่มของค่า f ทำให้ค่า TEF มีค่าสูงที่ลักษณะดังกล่าว ในส่วนของกราฟจะเห็นว่าครีบบางแบบซิกแซกที่วางตรงกันที่มีความสูงครีบบาง 9 mm ระยะพิตซ์ 45 mm (Z-in-phase, $e/H=0.3, P/H=1.5$) มีค่า Nu มากที่สุดจากรูปที่ 5.23 ในส่วนของค่า f จากรูปที่ 5.24 ครีบบางแบบซิกแซกที่วางเอียงกันที่มีความสูงครีบบาง 9 mm ระยะพิตซ์ 45 mm (Z-out-phase, $e/H=0.3, P/H=1.5$) จะมีค่ามากกว่าครีบบางในลักษณะอื่น ซึ่งเมื่อมาพิจารณาที่กราฟ TEF ในรูปที่ 5.25 จะเห็นว่าผลของค่า f ส่งผลต่อค่า TEF คือยิ่งมีค่ามากค่า TEF จะมีค่าต่ำตามสมการที่ 3.50 ที่ได้อธิบายไปในหัวข้อที่ผ่านมา ส่วนค่า TEF ที่มีค่ามากที่สุดคือครีบบางแบบซิกแซกที่วางตรงกันนั้นที่มีความสูงครีบบาง 3 mm ระยะพิตซ์ 45 mm (Z-in-phase, $e/H=0.1, P/H=1.5$) เนื่องจากเป็นครีบบางที่ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่ไม่สูงมากแต่ค่าความเสียดทานต่ำมากทำให้ค่าประสิทธิภาพทางความร้อนที่ได้มีค่าสูง

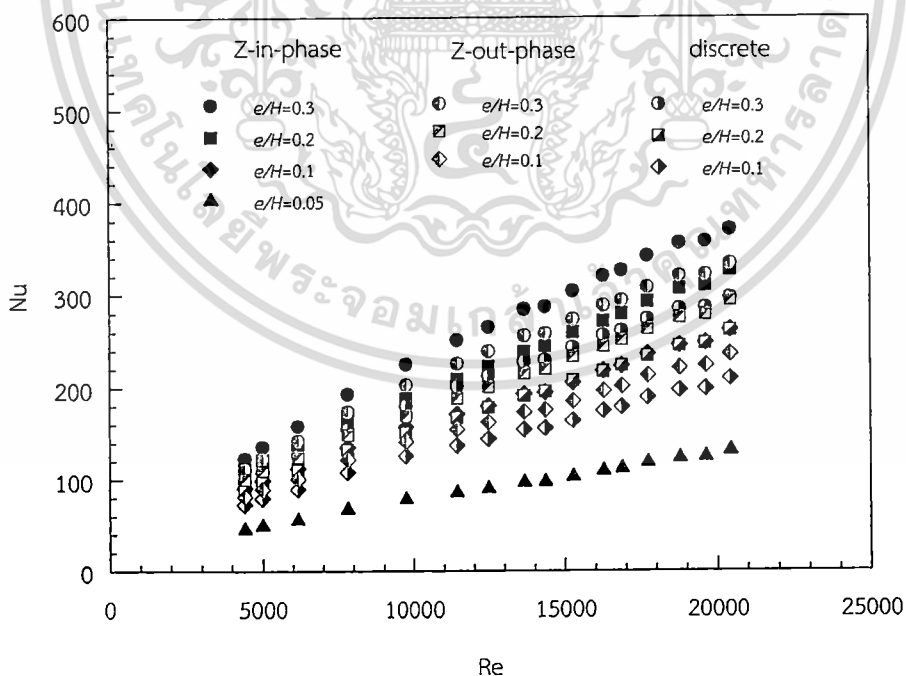
ตารางที่ 5.1 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน และตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อน กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะเอียง แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffles) ที่ทำมุมกับทิศทางการไหล (α) 45°

กรณีที่	e/H	P/H	\overline{Nu}/Nu_0	\overline{f}/f_0	TEF
1	0.1	1.5	3.63	5.74	1.89
2	0.1	2.0	2.82	5.34	1.63
3	0.1	3.0	2.40	4.06	1.51
4	0.2	1.5	4.09	13.02	1.75
5	0.2	2.0	3.46	11.29	1.55
6	0.2	3.0	2.97	9.62	1.41
7	0.3	1.5	4.52	30.53	1.46
8	0.3	2.0	4.17	28.15	1.38
9	0.3	3.0	3.56	26.27	1.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

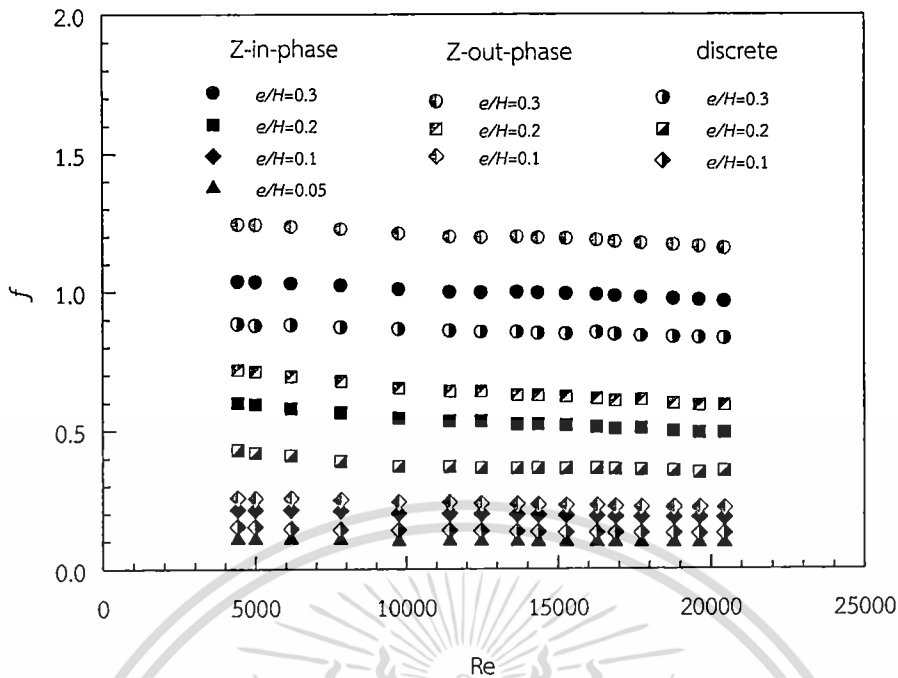
ตารางที่ 5.4 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์ อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน และตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อน กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก ที่ทำมุมกับทิศทางการไหล (α) 45° ความสูงครีบบาง 3 mm ($e/H = 0.1$) มีการวางแนวทำมุม (θ) 30° , 45° , 60° และ 90°

กรณีที่	θ	P/H	\overline{Nu}/Nu_0	\overline{f}/f_0	TEF
1	30°	1.5	4.90	20.50	1.80
2	30°	2.0	4.41	18.11	1.69
3	30°	3.0	3.77	12.87	1.61
4	45°	1.5	4.71	17.09	1.84
5	45°	2.0	4.24	15.09	1.72
6	45°	3.0	3.60	10.72	1.64
7	60°	1.5	4.51	13.67	1.90
8	60°	2.0	4.06	12.07	1.78
9	60°	3.0	3.45	8.58	1.70
10	90°	1.5	3.92	7.24	2.04
11	90°	2.0	3.53	6.24	1.90
12	90°	3.0	3.00	4.29	1.74

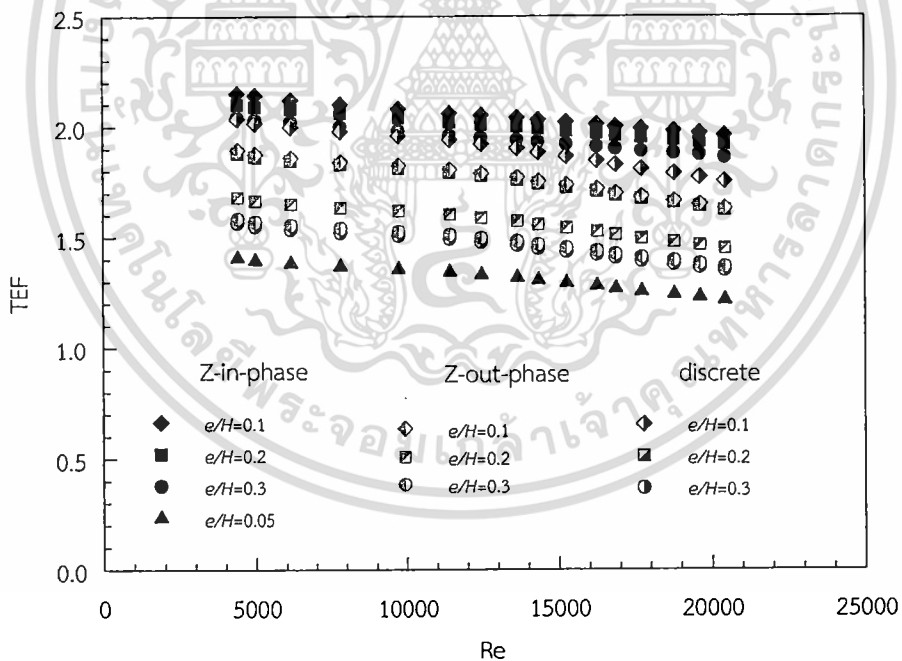


รูปที่ 5.23 ความสัมพันธ์ของเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางมุม 45° มีระยะพิตช์ 45 mm ($P/H=1.5$) บนผนังด้านเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.24 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางมุม 45° มีระยะพิตซ์ 45 mm ($P/H=1.5$) บนผนังด้านเดียว



รูปที่ 5.25 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนกับเลขเรย์โนลด์กรณีติดตั้งครีบบางมุม 45° มีระยะพิตซ์ 45 mm ($P/H=1.5$) บนผนังด้านเดียว

5.8 สรุป

ผลการทดลองในส่วนนี้เป็นการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยใช้ครีบบางวางมุมเอียงกับทิศทางการไหล 45° โดยครีบบางอยู่ด้วยกัน 3 ลักษณะคือ แบบครีบบางเอียงวางไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffle), ครีบบางซิกแซกแบบวางตรงกัน (Z-in-phase) และแบบวางเอียงกัน (Z-out-phase) ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

phase) และมีการวางแนวของครีบทำมุม (θ) 30° , 45° , 60° และ 90° (วางครีบทั้งฉากกับทิศการไหล) จากผลที่ได้เมื่อเปรียบเทียบที่ลักษณะของครีบบนแบบ Z-in-phase จะให้ค่า Nu มากกว่าครีบบนแบบอื่นที่ความสูงครีบ และระยะพิตช์เท่ากันดังแสดงในรูปที่ 5.23 แต่ค่า f ครีบบนแบบ Z-out-phase แสดงในรูปที่ 5.24 จะมีค่าสูงทำให้ค่า TEF แสดงในรูปที่ 5.25 ที่ได้ของครีบลักษณะนี้มีค่าต่ำ โดยที่ครีบลักษณะ Z-in-phase จะมีค่า TEF มากที่สุดเมื่อเทียบที่ความสูงครีบ และระยะพิตช์เดียวกัน ส่วนผลในการเปรียบเทียบมุมการวางแนวของครีบบนมุม 90° คือการวางแนวของครีบทั้งฉากกับทิศทางการไหล ให้ค่า TEF มากที่สุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

ครีบบาง แบบซิกแซก (zigzag, Z) มุม 30° บนผนังด้านเดียว

6.1 บทนำ

ในบทนี้ กล่าวถึงผลการทดลองส่วนที่ 2 จากการทดลองในบทที่ 5 เราทำการทดลองครีบบาง ในลักษณะต่างๆ ที่ทำมุมกับการไหล 45° โดยในบทนี้จะทำการลดขนาดมุมมาเป็น 30° โดยลักษณะของครีบบางจะแสดงในรูปที่ 4.18 เพื่อทำการศึกษาลักษณะของมุมที่ลดลงต่อค่าการถ่ายเทความร้อน ซึ่งจะทำให้การศึกษาอิทธิพลของความสูง, ระยะพิตช์, การจัดวางของครีบบาง และลักษณะของครีบบางเช่นเดียวกับในบทที่ 5 โดยแบ่งการศึกษาในส่วนนี้ออกเป็น

- (1.1) ครีบบางวางลักษณะเอียง แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffles, DB) ที่ทำมุมกับการไหล (α) 30° ลักษณะตามรูปที่ 4.16 บนผนังด้านเดียวเพื่อศึกษาอิทธิพลของลักษณะของครีบบางในรูปแบบดังกล่าว และผลของความสูงครีบบาง 3, 6 และ 9 mm ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3) ระยะพิตช์ 45, 60 และ 90 mm ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0)
- (1.2) ครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางตรงกัน (Z-in-phase) ที่ทำมุมกับการไหล (α) 30° ลักษณะตามรูปที่ 4.17 บนผนังด้านเดียวเพื่อศึกษาอิทธิพลของลักษณะของครีบบางในรูปแบบดังกล่าว และผลของความสูงครีบบาง 3, 6 และ 9 mm ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3) ระยะพิตช์ 45, 60 และ 90 mm ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0)
- (1.3) ครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางเอียงกัน (Z-out-phase) ที่ทำมุมกับการไหล (α) 30° ลักษณะตามรูปที่ 4.17 บนผนังด้านเดียวเพื่อศึกษาอิทธิพลของลักษณะของครีบบางในรูปแบบดังกล่าว และผลของความสูงครีบบาง 3, 6 และ 9 mm ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3) ระยะพิตช์ 30, 45 และ 60 mm ($P/H = 1, 1.5$ และ 2.0)
- (1.4) การเปรียบเทียบลักษณะครีบบางที่ทำมุม 30° บนผนังด้านเดียว จากการทดลองในหัวข้อที่ผ่านมาจะนำเอาลักษณะของครีบบางที่มีค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนที่สูงนำมาเปรียบเทียบกัน
- (1.5) การเปรียบเทียบลักษณะครีบบางที่ทำมุม 30° กับ 45° บนผนังด้านเดียว จะเป็นการเปรียบเทียบผลที่ได้กับการทดลองในบทที่ 5 เพื่อหาผลของมุมครีบบางที่เปลี่ยนไป

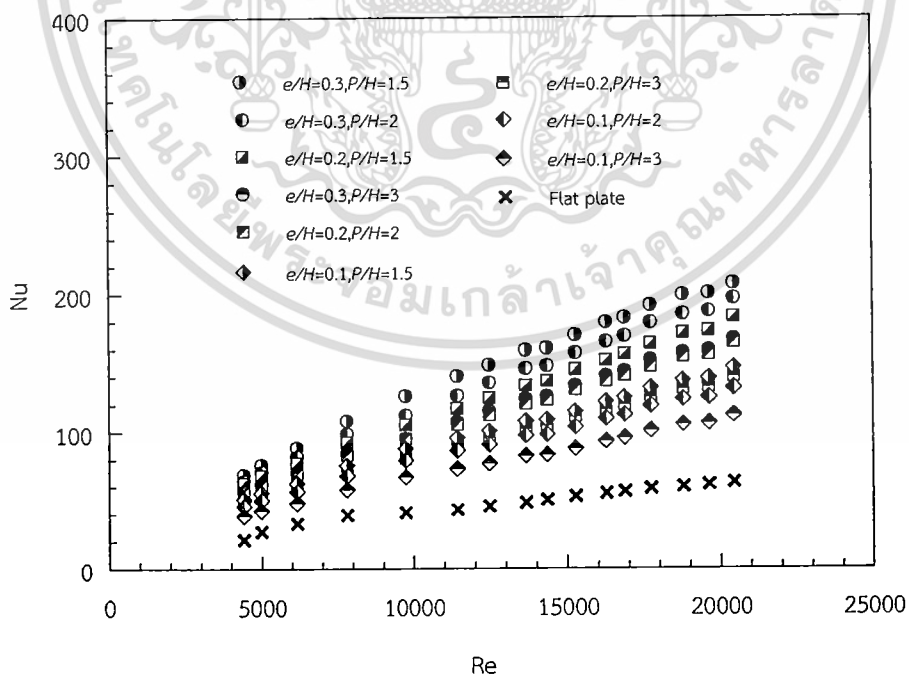
ทำการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนในพจน์ของเลขนัสเซลท์ (Nu) และการสูญเสียความดันในพจน์ของตัวประกอบเสียดทาน (f) จากนั้นก็เปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันกับท่อผนังเรียบ และตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อน (TEF) ซึ่งเป็นข้อมูลที่คำนวณที่กำลังซับซ้อน โดยกำหนดจากค่าเลขเรย์โนลด์ (Re) ของการทดลอง มีผลดังต่อไปนี้

6.2 ครีบบางวางลักษณะเอียง แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffles, DB) บนผนังด้านเดียว

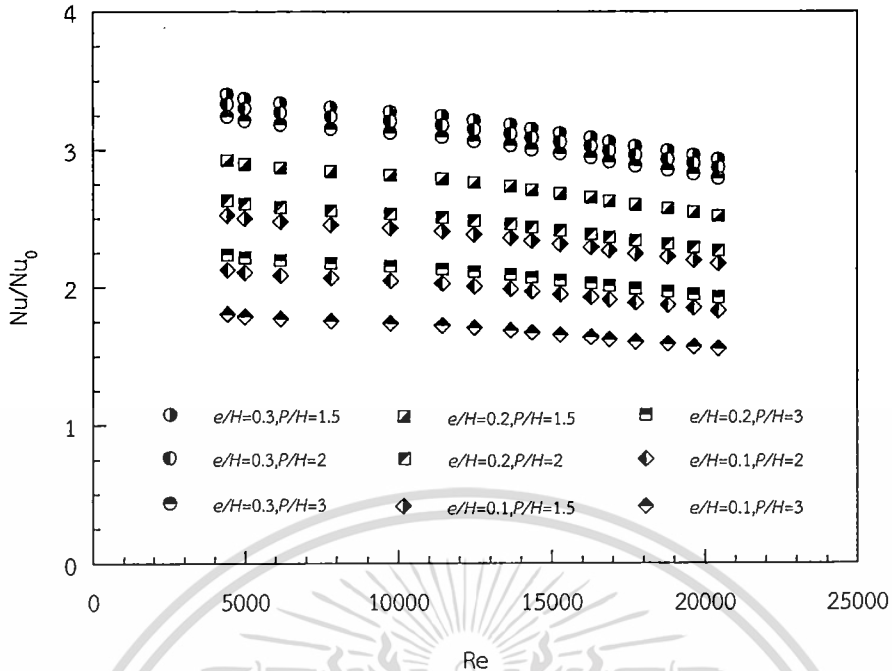
ในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาถึงลักษณะของครีบเอียงแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffles, DB) ดังแสดงในรูปที่ 4.16 ซึ่งในการทดลองได้ทำการทดลองในหลายลักษณะ ประกอบไปด้วย ความสูง (e) ทั้งหมด 3 ความสูงคือ 3, 6 และ 9 mm ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3) และระยะพิตช์ (P) ทั้งหมด 3 ระยะคือ 45, 60 และ 90 mm ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0) โดยจะทำการหาผลของการเปลี่ยนความสูง และระยะพิตช์ต่อครีบในลักษณะดังกล่าว ซึ่งการที่จะนำเสนอผลการทดลองเพื่อให้เห็นถึงพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนจะแสดงเป็นกราฟของ Nu, f และ TEF

6.2.1 ความสูง ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3)

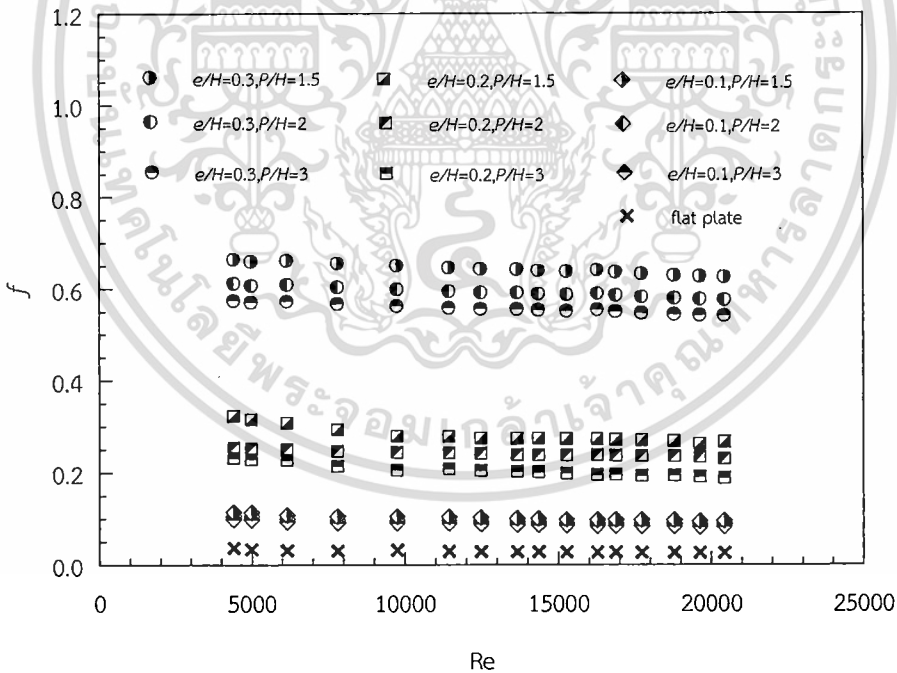
ผลการทดลองของครีบบางวางเอียงแบบไม่ต่อเนื่องทำมุมกับทิศทางการไหล 30° มีความสูงสม่ำเสมอ 3 แบบ $e = 3, 6$ และ 9 mm ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3) Nu ที่ได้จากการทดสอบในช่วงการไหลปั่นป่วน แสดงในรูปที่ 6.1 จากรูปกราฟเราจะเห็นถึงค่า Nu มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามค่า Re ที่เพิ่มขึ้น จากการที่ค่า Re มีค่าสูงการไหลยิ่งปั่นป่วนมาก มีผลทำให้การถ่ายเทความร้อนยิ่งสูงขึ้น โดยในส่วนของความสูงครีบ ยิ่งมีความสูงมากค่า Nu จะมีค่ามากกว่าความสูงครีบที่น้อยกว่า จากกราฟที่ระยะพิตช์ 45 mm ($P/H = 1.5$) ที่ความสูงครีบ 9 mm ($e/H = 0.3$) จะมีค่า Nu มากที่สุดเรียงลงมาตามความสูงที่ลดลง โดยที่ความสูง $e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3 จะมีค่า Nu มากกว่าแผ่นเรียบในช่วง 252-217%, 292-252% และ 340-293% ตามลำดับ ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ดังแสดงในรูปที่ 6.2 เนื่องจากครีบที่สูงจะเป็นตัวที่ทำให้ของไหลที่ไหลผ่านเกิดการไหลแบบปั่นป่วนมากยิ่งขึ้น จะทำให้การถ่ายเทความร้อนยิ่งสูงขึ้นตาม



รูปที่ 6.1 ความสัมพันธ์ของเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะเอียง แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffles) บนผนังด้านเดียว



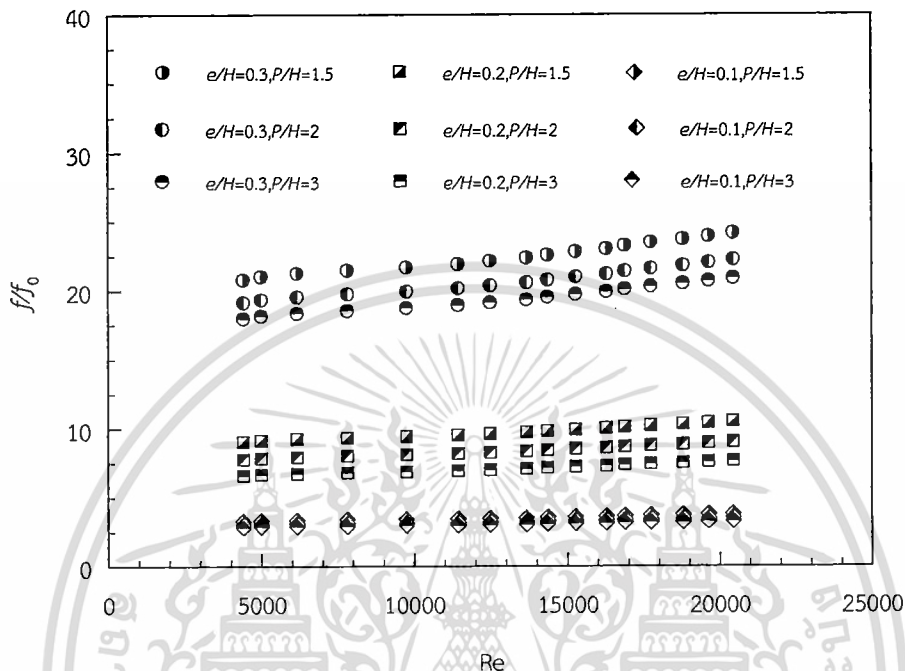
รูปที่ 6.2 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนเลขนีสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะเอียง แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffles) บนผนังด้านเดียว



รูปที่ 6.3 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะเอียง แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffles) บนผนังด้านเดียว

ในส่วนของ f จะมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของค่า Re และในส่วนของความสูงครีบบึงครีบบมี ความสูงมาก ค่า f จะมีค่าสูงขึ้นตามดังแสดงในรูปที่ 6.3 โดยที่ระยะพิตช์ 45 mm ($P/H = 1.5$) ที่ ความสูงครีบบ 9 mm ($e/H = 0.3$) จะมีค่า f มากที่สุดเรียงลงมาตามความสูงที่ลดลง โดยที่ความสูง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3 จะมีค่า f มากกว่าแผ่นเรียบในช่วง $3.3-3.8, 9.0-10.5$ และ $20.8-24.1$ เท่าตามลำดับ ในช่วงค่า $Nu = 4400-20,400$ ดังแสดงในรูปที่ 6.4 เนื่องจากครีบบางวางเอียงที่สูงจะยิ่งขวางการเคลื่อนที่ของของไหลทำให้เกิดผลต่างความดันของของไหลมากกว่าระหว่างทางเข้า กับทางออกจากแผ่นทดสอบซึ่งทำให้ค่า f มีค่าสูงตามสมการที่ 3.2 แสดงในบทที่ 3



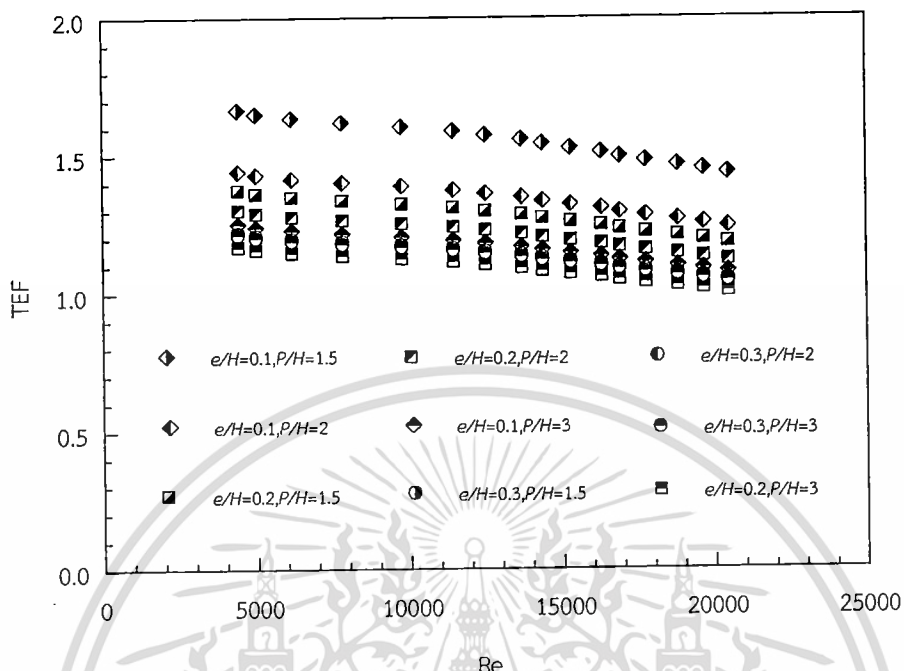
รูปที่ 6.4 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางเอียง แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffles) บนผนังด้านเดียว

6.2.2 ระยะพิตช์ ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0)

ผลการทดลองของครีบบางวางเอียงแบบไม่ต่อเนื่องทำมุมกับทิศทางการไหล 30° มีระยะพิตช์ 3 แบบ $P = 45, 60$ และ 90 mm ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0) Nu ที่ได้จากการทดสอบในช่วงการไหลปั่นป่วน แสดงในรูปที่ 6.1 จากรูปกราฟเราจะเห็นถึงผลของระยะพิตช์ ยังมีค่าน้อยค่าเลขนัสเซิลท์จะมีค่ามากยิ่งขึ้น จากกราฟที่ความสูงครีบบาง 9 mm ($e/H = 0.3$) ที่ระยะพิตช์ 45 mm ($P/H = 1.5$) จะมีค่า Nu มากที่สุดเรียงลงมาตามระยะพิตช์ที่เพิ่มขึ้น โดยที่ระยะพิตช์ $P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0 จะมีค่า Nu มากกว่าแผ่นเรียบในช่วง $340-293\%, 333-287\%$ และ $324-279\%$ ตามลำดับ ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ดังแสดงในรูปที่ 6.2 เนื่องจากครีบบางเป็นตัวที่ทำให้ของไหลที่ไหลผ่านเกิดการไหลแบบปั่นป่วน ทำให้เพิ่มการถ่ายเทความร้อนให้สูงขึ้น เมื่อมีระยะพิตช์สั้นจะทำให้ของไหลจะไหลไปเจอครีบบางมากขึ้น ซึ่งทำให้ของไหลปั่นป่วนมาก และการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นตาม

ในส่วนของ f ส่วนของระยะพิตช์ยังมีระยะสั้น ค่า f จะมีค่าสูงขึ้นตามดังแสดงในรูปที่ 6.3 โดยที่ความสูงครีบบาง 9 mm ($e/H = 0.3$) ที่ระยะพิตช์ 45 mm ($P/H = 1.5$) จะมีค่า f มากที่สุดเรียงลงมาตามระยะพิตช์ที่ลดลง ที่ระยะพิตช์ $P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0 จะมีค่า f มากกว่าแผ่นเรียบในช่วง $20.8-24.1, 19.1-22.2$ และ $18.0-20.9$ เท่าตามลำดับ ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ดังแสดงในรูปที่ 6.4 เนื่องจากระยะพิตช์ที่สั้นจะมีจำนวนแถวของครีบบางเยอะกว่าเมื่อเทียบกับระยะพิตช์ที่

ยาว ในระยะช่วงทดสอบเดียวกัน จะทำให้ของไหลต้องเจอครีบบางการไหลมากแถมกว่าทำให้ความดันตกคร่อมมีค่าสูง ส่งผลให้ค่าความเสียดทานประกอบเพิ่มสูงขึ้นตาม



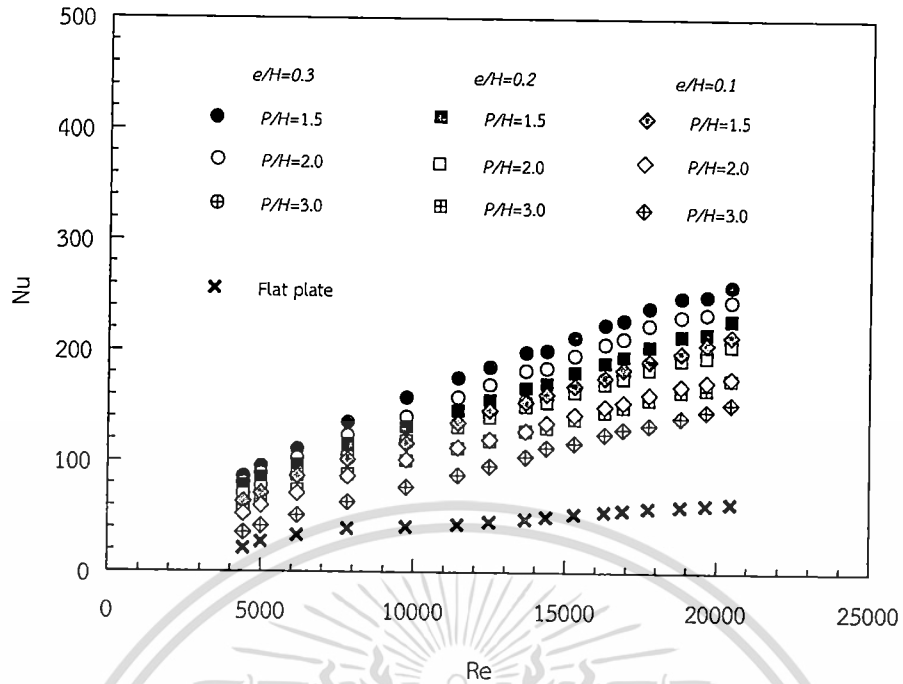
รูปที่ 6.5 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนกับเลขเรย์โนลด์กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะเอียง แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffles) บนผนังด้านเดียว

6.2.3 ตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อน (TEF)

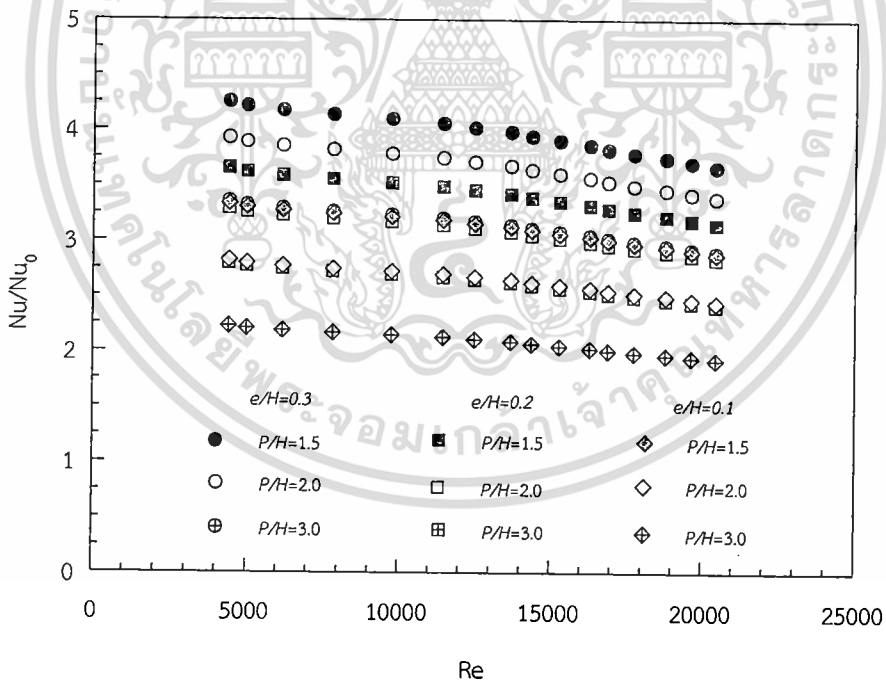
จากรูปกราฟที่ 6.2 และ 6.4 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของสัดส่วน Nu และ f ซึ่งทั้งสองค่านี้นำมาคำนวณเป็นค่า TEF ตามสมการที่ 3.50 ในบทที่ 3 ซึ่งจะเป็นค่าที่แสดงถึงประสิทธิภาพทางความร้อน โดยจะเป็นการคิดถึงพลังงานที่ใช้ในการขับของไหลผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนกับค่าพลังงานที่ได้จากการแลกเปลี่ยนความร้อน จากรูปที่ 6.5 แสดงให้เห็นถึงค่า TEF ที่มีค่าลดลงตามค่า Re ที่เพิ่มขึ้น ครีบบที่มีความสูง 0.3 mm ($e/H = 0.1$) ระยะพิทช์ 45 mm ($P/H = 1.5$) มีค่า TEF สูงมากที่สุดคือมีค่าอยู่ในช่วง 1.67-1.44 ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ซึ่งค่า TEF จะมีค่าสูงที่สุดเมื่อค่า Re มีค่าต่ำที่สุด

6.3 ครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางตรงกัน (Z- in-phase)

ในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาถึงลักษณะของครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางตรงกัน (Z-in-phase) ดังแสดงในรูปที่ 4.17 ซึ่งในการทดลองได้ทำการทดลองในหลายลักษณะ ประกอบไปด้วยความสูง (e) ทั้งหมด 3 ความสูงคือ 3, 6 และ 9 mm ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3) และระยะพิทช์ (P) ทั้งหมด 3 ระยะคือ 45, 60 และ 90 mm ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0) โดยจะทำการหาผลของการเปลี่ยนความสูง และระยะพิทช์ต่อครีบบในลักษณะดังกล่าว ซึ่งการที่จะนำเสนอผลการทดลองเพื่อให้เห็นถึงพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนจะแสดงเป็นกราฟของ Nu, f และ TEF

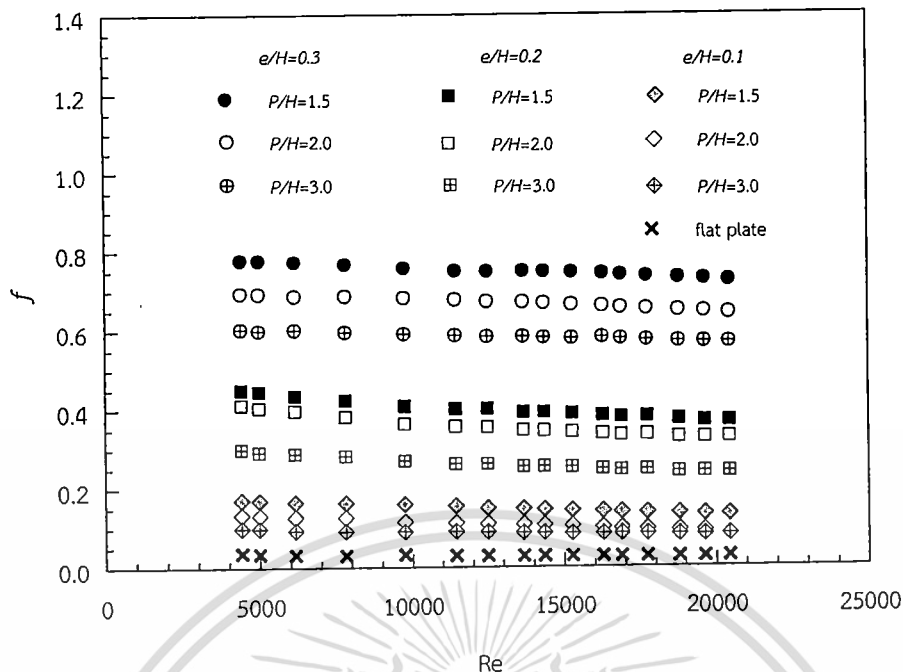


รูปที่ 6.6 ความสัมพันธ์ของเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางตรงกัน (Z- in-phase) บนผนังด้านเดียว

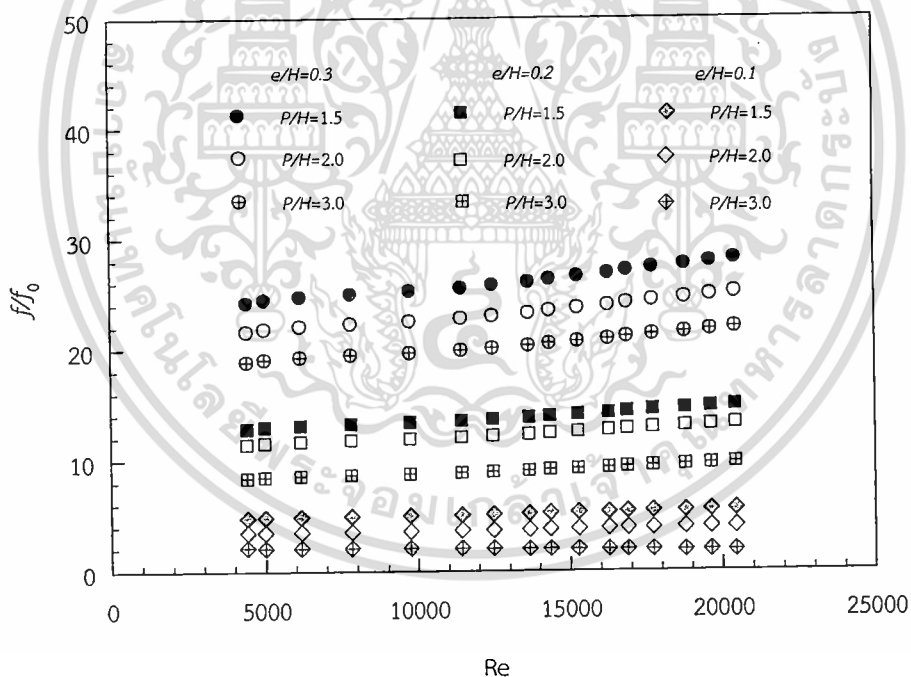


รูปที่ 6.7 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางตรงกัน (Z- in-phase) บนผนังด้านเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.8 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางตรงกัน (Z- in-phase) บนผนังด้านเดียว



รูปที่ 6.9 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางตรงกัน (Z- in-phase) บนผนังด้านเดียว

6.3.1 ความสูง ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3)

ผลการทดลองของครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางตรงกันทำมุมกับทิศทางการไหล 30° มีความสูงสม่ำเสมอ 3 แบบ $e = 3, 6$ และ 9 mm ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3) Nu ที่ได้จากการทดสอบในช่วงการไหลปั่นป่วน แสดงในรูปที่ 6.6 จากรูปกราฟเราจะเห็นถึงค่า Nu มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า Re ที่เพิ่มขึ้น ในส่วนของความสูงครีบ ยิ่งมีความสูงมากค่า Nu จะมีค่ามากกว่าความสูงครีบที่น้อยกว่า เช่นเดียวกับลักษณะครีบเอียงแบบไม่ต่อเนื่องในหัวข้อ 6.2.1 จากกราฟที่ระยะพิตช์ 45 mm ($P/H = 1.5$) ที่ความสูงครีบ 9 mm ($e/H = 0.3$) จะมีค่า Nu มากที่สุดเรียงลงมาตามความสูงที่ลดลง โดยที่ความสูง $e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3 จะมีค่า Nu มากกว่าแผ่นเรียบในช่วง 333-287%, 365-315% และ 425-366% ตามลำดับ ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ดังแสดงในรูปที่ 6.7

ในส่วนของ f จะมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของค่า Re และในส่วนของความสูงครีบยิ่งครีบมีความสูงมาก ค่า f จะมีค่าสูงขึ้นเช่นเดียวกับครีบในหัวข้อที่ 6.2.1 ตามดังแสดงในรูปที่ 6.8 โดยที่ระยะพิตช์ 45 mm ($P/H = 1.5$) ที่ความสูงครีบ 9 mm ($e/H = 0.3$) จะมีค่า f มากที่สุดเรียงลงมาตามความสูงที่ลดลง โดยที่ความสูง $e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3 จะมีค่า f มากกว่าแผ่นเรียบในช่วง 4.8-5.6, 12.9-15.0 และ 24.2-28.2 เท่าตามลำดับ ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ดังแสดงในรูปที่ 6.9

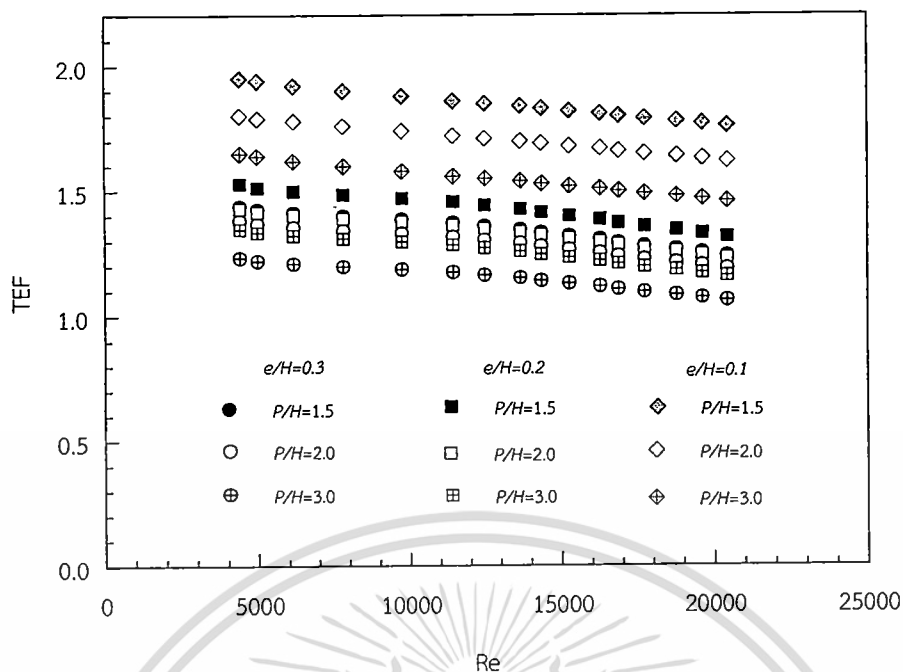
6.3.2 ระยะพิตช์ ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0)

ผลการทดลองของครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางตรงกันทำมุมกับทิศทางการไหล 30° มีระยะพิตช์ 3 แบบ $P = 45, 60$ และ 90 mm ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0) Nu ที่ได้จากการทดสอบในช่วงการไหลปั่นป่วน แสดงในรูปที่ 6.6 จากรูปกราฟเราจะเห็นถึงผลของระยะพิตช์ ยิ่งมีค่าน้อยค่า Nu จะมีค่ามากยิ่งขึ้นเช่นเดียวกับครีบในหัวข้อที่ 6.2.2 จากกราฟที่ความสูงครีบ 9 mm ($e/H = 0.3$) ที่ระยะพิตช์ 45 mm ($P/H = 1.5$) จะมีค่า Nu มากที่สุดเรียงลงมาตามระยะพิตช์ที่เพิ่มขึ้น โดยที่ระยะพิตช์ $P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0 จะมีค่า Nu มากกว่าแผ่นเรียบในช่วง 425-366%, 393-338% และ 335-289% ตามลำดับ ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ดังแสดงในรูปที่ 6.7

ในส่วนของ f ส่วนของระยะพิตช์ยังมีระยะสั้น ค่า f จะมีค่าสูงขึ้นตามดังแสดงในรูปที่ 6.8 โดยที่ความสูงครีบ 9 mm ($e/H = 0.3$) ที่ระยะพิตช์ 45 mm ($P/H = 1.5$) จะมีค่า f มากที่สุดเรียงลงมาตามระยะพิตช์ที่ลดลง ที่ระยะพิตช์ $P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0 จะมีค่า f มากกว่าแผ่นเรียบในช่วง 24.2-28.2, 21.6-25.1, และ 18.9-21.9 เท่าตามลำดับ ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ดังแสดงในรูปที่ 6.9 เช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 6.2.2

6.3.3 ตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อน (TEF)

จากรูปกราฟที่ 6.7 และ 6.9 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของสัดส่วน Nu และ f ซึ่งทั้งสองค่านี้นำมาคำนวณเป็นค่า TEF เช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 6.2.3 จากรูปที่ 6.10 แสดงให้เห็นถึงค่า TEF ที่มีค่าลดลงตามค่า Re ที่เพิ่มขึ้น ครีบที่มีความสูง 0.3 mm ($e/H = 0.1$) ระยะพิตช์ 45 mm ($P/H = 1.5$) มีค่า TEF สูงมากที่สุดคือมีค่าอยู่ในช่วง 1.95-1.76 ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ซึ่งค่า TEF จะมีค่าสูงที่สุดเมื่อค่า Re มีค่าต่ำที่สุด



รูปที่ 6.10 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนกับเลขเรย์โนลด์กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางตรงกัน (Z- in-phase) บนผนังด้านเดียว

6.4 ครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางเยื้องกัน (Z-out-phase)

ในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาถึงลักษณะของครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางเยื้องกัน (Z-out-phase) ดังแสดงในรูปที่ 4.17 ซึ่งในการทดลองได้ทำการทดลองในหลายลักษณะ ประกอบไปด้วย ความสูง (e) ทั้งหมด 3 ความสูงคือ 3, 6 และ 9 mm ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3) และระยะพิตช์ (P) ทั้งหมด 3 ระยะคือ 30, 45 และ 60 mm ($P/H = 1, 1.5$ และ 2.0) ในการทดลองส่วนนี้จะเพิ่มการทดลองที่ระยะพิตช์ 30 mm ($P/H = 1$) ซึ่งในการทดลองแบบวางตรงกันจะทำได้ เนื่องจากว่าส่วนยอดของมุมครีบบางวางจะชนกัน แต่ในการทดลองที่วางครีบบางวางเยื้องกันนั้นส่วนยอดของมุมครีบบางวางจะวางเยื้องกันทำให้ไม่ชนกันจึงสามารถทำการติดตั้งครีบบางวางเพื่อทำการทดลองได้ โดยจะทำการหาผลของการเปลี่ยนความสูง และระยะพิตช์ต่อครีบบางวางในลักษณะดังกล่าว ซึ่งการที่จะนำเสนอผลการทดลองเพื่อให้เห็นถึงพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนจะแสดงเป็นกราฟของ Nu, f และ TEF

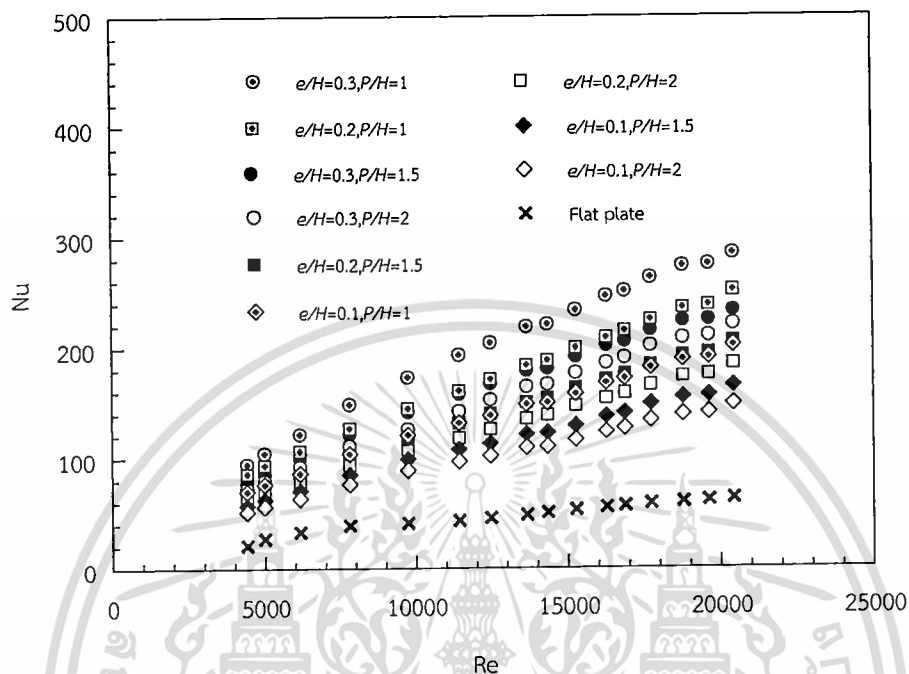
6.4.1 ความสูง ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3)

ผลการทดลองของครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางเยื้องกันทำมุมกับทิศทางการไหล 30° มีความสูงสม่ำเสมอ 3 แบบ $e = 3, 6$ และ 9 mm ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3) Nu ที่ได้จากการทดสอบในช่วงการไหลปั่นป่วน แสดงในรูปที่ 6.11 จากรูปกราฟเราจะเห็นถึงค่า Nu มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามค่า Re ที่เพิ่มขึ้น ในส่วนของความสูงครีบบางวาง ยิ่งมีความสูงมากค่า Nu จะมีค่ามากกว่าความสูงครีบบางวางที่น้อยกว่า เช่นเดียวกับลักษณะครีบบางวางแบบไม่ต่อเนื่องในหัวข้อ 6.2.1 จากกราฟที่ระยะพิตช์ 30 mm ($P/H = 1$) ที่ความสูงครีบบางวาง 9 mm ($e/H = 0.3$) จะมีค่า Nu มากที่สุดเรียงลงมาตามความสูงที่ลดลง โดยที่ความสูง $e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3 จะมีค่า Nu มากกว่าแผ่นเรียบในช่วง 325-279%, 402-346% และ 468-403% ตามลำดับ ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ดังแสดงในรูปที่ 6.12

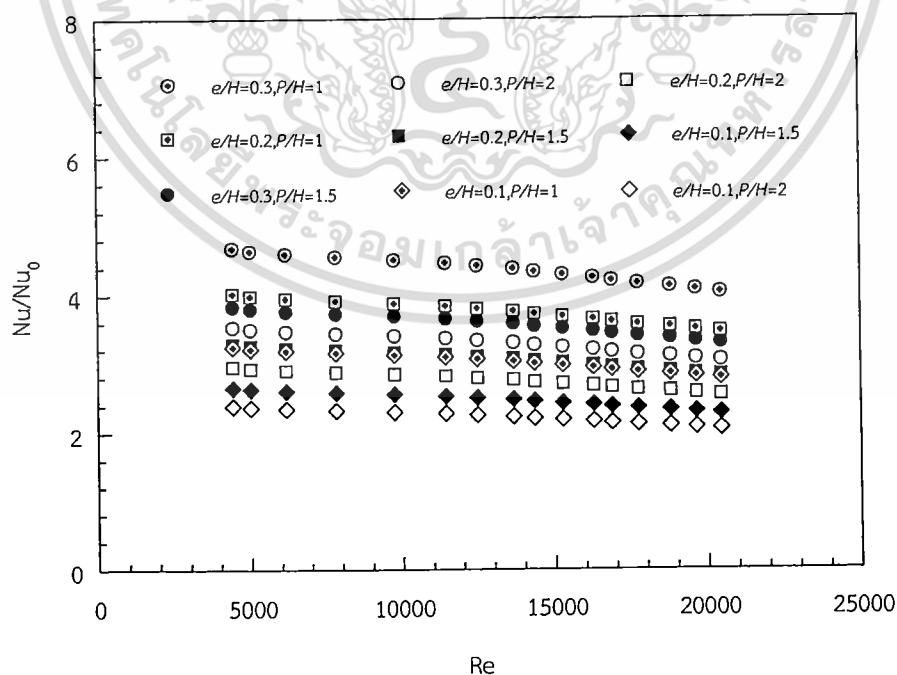
ในส่วนของ f จะมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของค่า Re และในส่วนของความสูงครีบบางวางยิ่งครีบบางวางมีความสูงมาก ค่า f จะมีค่าสูงขึ้นเช่นเดียวกับครีบบางวางในหัวข้อที่ 6.2.1 ตามดังแสดงในรูปที่ 6.13 โดยที่

เอกรัศมีของท่อ f จะมีค่าสูงขึ้นเช่นเดียวกับครีบบางวางในหัวข้อที่ 6.2.1 ตามดังแสดงในรูปที่ 6.13 โดยที่ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะพิตช์ 30 mm ($P/H = 1$) ที่ความสูงครีบ 9 mm ($e/H = 0.3$) จะมีค่า f มากที่สุดเรียงลงมาตามความสูงที่ลดลง โดยที่ความสูง $e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3 จะมีค่า f มากกว่าแผ่นเรียบในช่วง 8.5-9.9, 23.2-26.9 และ 43.6-50.7 เท่าตามลำดับ ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ดังแสดงในรูปที่ 6.14

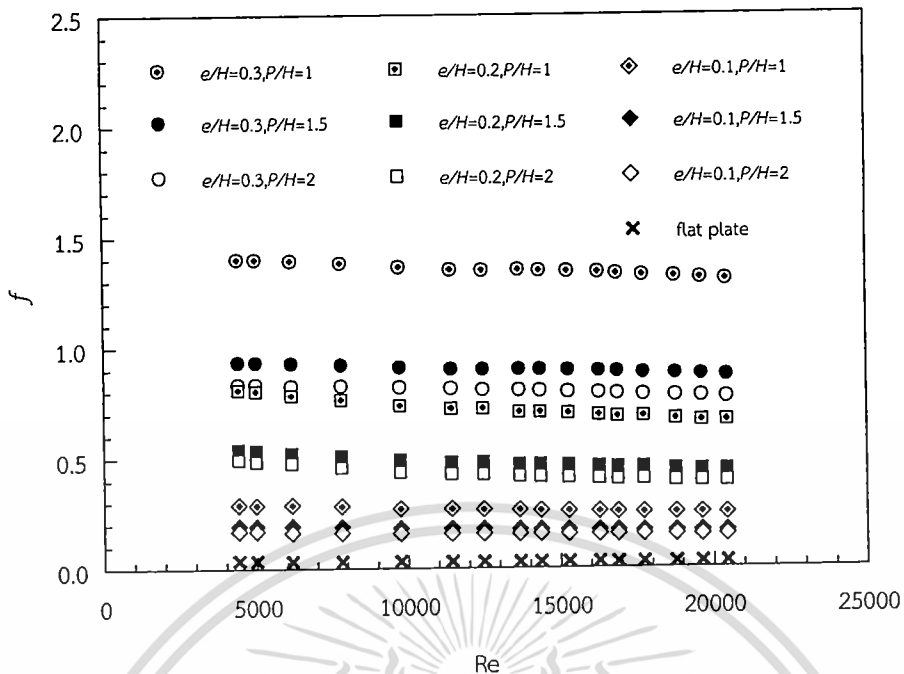


รูปที่ 6.11 ความสัมพันธ์ของเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซกแบบวางเยื้องกัน (Z- out-phase) บนผนังด้านเดียว

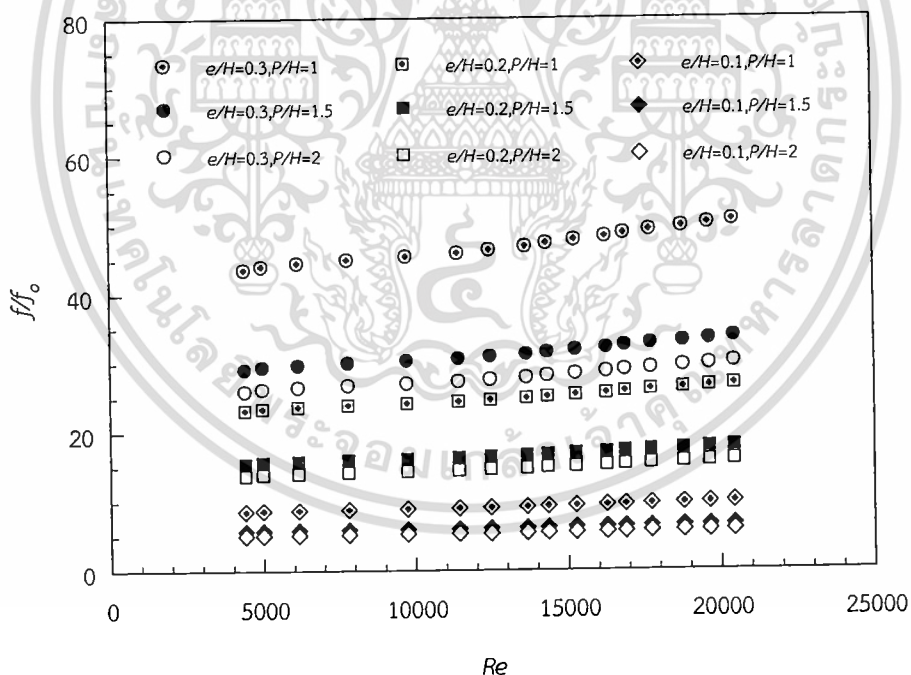


รูปที่ 6.12 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซกแบบวางเยื้องกัน (Z- out-phase) บนผนังด้านเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.13 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางเยื้องกัน (Z- out-phase) บนผนังด้านเดียว



รูปที่ 6.14 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางเยื้องกัน (Z- out-phase) บนผนังด้านเดียว

6.4.2 ระยะพิตช์ ($P/H = 1, 1.5$ และ 2.0)

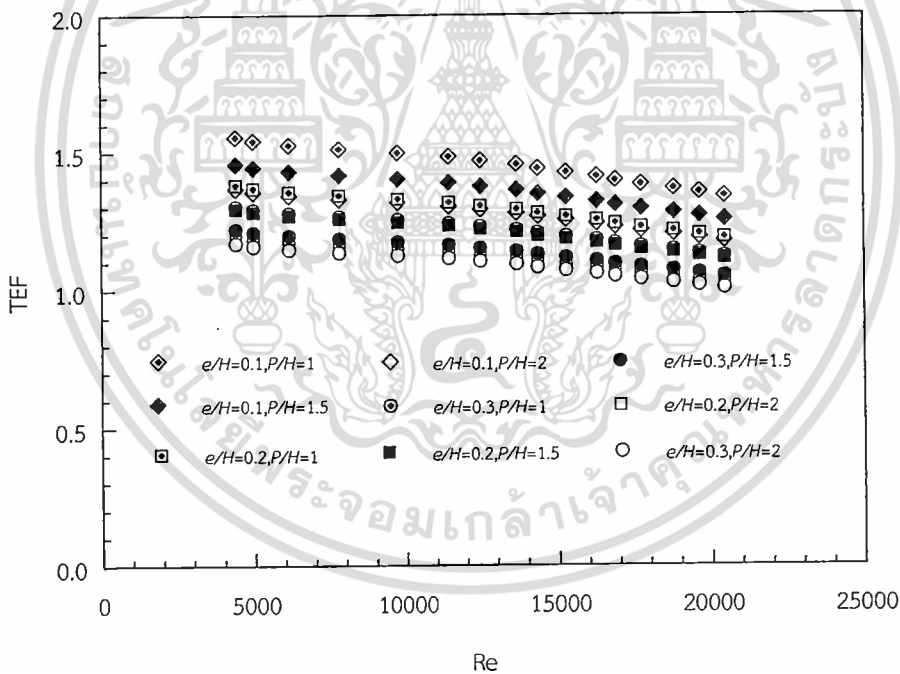
ผลการทดลองของครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางตรงกันทำมุมกับทิศทางการไหล 30° มีระยะพิตช์ 3 แบบ $P = 30, 45$ และ 60 mm ($P/H = 1, 1.5$ และ 2.0) Nu ที่ได้จากการทดสอบเอกสในช่วงการไหลปั่นป่วน แสดงในรูปที่ 6.11 จากรูปกราฟเราจะเห็นถึงผลของระยะพิตช์ ยังมีค่าน้อยกว่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Nu จะมีค่ามากยิ่งขึ้นเช่นเดียวกับครีบบางในหัวข้อที่ 6.2.2 จากกราฟที่ความสูงครีบบาง 9 mm ($e/H = 0.3$) ที่ระยะพิตช์ 30 mm ($P/H = 1$) จะมีค่า Nu มากที่สุดเรียงลงมาตามระยะพิตช์ที่เพิ่มขึ้น โดยที่ระยะพิตช์ $P/H = 1, 1.5$ และ 2.0 จะมีค่า Nu มากกว่าแผ่นเรียบในช่วง 468-403%, 383-330% และ 353-304% ตามลำดับ ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ดังแสดงในรูปที่ 6.12

ในส่วนของ f ส่วนของระยะพิตช์ยังมีระยะสั้น ค่า f จะมีค่าสูงขึ้นตามดังแสดงในรูปที่ 6.13 โดยที่ความสูงครีบบาง 9 mm ($e/H = 0.3$) ที่ระยะพิตช์ 30 mm ($P/H = 1$) จะมีค่า f มากที่สุดเรียงลงมาตามระยะพิตช์ที่ลดลง ที่ระยะพิตช์ $P/H = 1, 1.5$ และ 2.0 จะมีค่า f มากกว่าแผ่นเรียบในช่วง 43.6-50.7, 29.1-33.8, และ 26.0-30.1 เท่าตามลำดับ ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ดังแสดงในรูปที่ 6.14 เช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 6.2.2

6.4.3 ตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อน (TEF)

จากรูปกราฟที่ 6.12 และ 6.14 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของสัดส่วนเลขนัสเซลท์ และตัวประกอบเสียดทานซึ่งทั้งสองค่านี้นำมาคำนวณเป็นค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อน (thermal performance enhancement factor, TEF) เช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 6.2.3 จากรูปที่ 6.15 แสดงให้เห็นถึงค่า TEF ที่มีค่าลดลงตามค่าเลขเรย์โนลด์ที่เพิ่มขึ้น ครีบบางที่มีความสูง 0.3 mm ($e/H = 0.1$) ระยะพิตช์ 30 mm ($P/H = 1$) มีค่า TEF สูงมากที่สุดคือมีค่าอยู่ในช่วง 1.56-1.34 ในช่วงค่าเลขเรย์โนลด์ 4400-20,400 ซึ่งค่า TEF จะมีค่าสูงที่สุดเมื่อค่าเลขเรย์โนลด์มีค่าต่ำที่สุด



รูปที่ 6.15 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนกับเลขเรย์โนลด์กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางเยื้องกัน (Z- out-phase) บนผนังด้านเดียว

6.5 การเปรียบเทียบลักษณะครีบบางที่ทำมุม 30° บนผนังด้านเดียว

หัวข้อที่ผ่านมาในบทนี้จะเป็นครีบบางทำมุมกับการไหลของของไหล 30° ติดอยู่บนผนังด้านบนของช่วงทดสอบ ซึ่งมีการทดลองลักษณะครีบบางทั้งหมด 27 ลักษณะ โดยจะสรุปค่าเฉลี่ยของสัดส่วนเลขนัสเซลท์ (Nu/Nu_0) สัดส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) และค่า TEF แสดงในตารางที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1-6.3 แยกตามลักษณะของครีบบ และแสดงผลกราฟเปรียบเทียบผลการทดลองของครีบบในแต่ละลักษณะที่มีระยะพิตช์ 45 mm ($P/H=1.5$) ซึ่งจะแสดงอยู่ในกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Nu , f และ TEF กับ Re ดังแสดงในรูปที่ 6.16 – 6.18 จากตารางจะเห็นได้ว่าครีบบที่มีความสูงครีบบ และระยะพิตช์ มีผลต่อค่า Nu , f และ TEF โดยที่ครีบบยิ่งสูง และระยะพิตช์ยิ่งแคบค่า Nu และ f จะยิ่งสูงแต่ในส่วน ของค่า TEF นั้นจะมีค่าสูงที่ครีบบมีความสูงต่ำแต่ระยะพิตช์แคบ เนื่องจากผลของค่า f ที่มีค่าสูงตาม ความสูงของครีบบทำให้ค่า TEF มีค่าต่ำ แต่ระยะพิตช์ที่แคบช่วยเพิ่มค่า Nu มากกว่าการเพิ่มของค่า f ทำให้ค่า TEF มีค่าสูงที่ลักษณะดังกล่าว ในส่วนของกราฟจะเห็นว่าครีบบางแบบซิกแซกที่วางตรงกัน ที่มีความสูงครีบบ 9 mm ระยะพิตช์ 45 mm (Z-in-phase, $e/H=0.3$, $P/H=1.5$) มีค่า Nu มากที่สุด จากรูปที่ 6.16 ในส่วนของค่า f จากรูปที่ 6.17 ครีบบางแบบซิกแซกที่วางเอียงกันที่มีความสูงครีบบ 9 mm ระยะพิตช์ 45 mm (Z-out-phase, $e/H=0.3$, $P/H=1.5$) จะมีค่ามากกว่าครีบบในลักษณะอื่น ซึ่งเมื่อมาพิจารณาที่กราฟ TEF ในรูปที่ 6.18 จะเห็นว่าผลของค่า f ส่งผลต่อค่า TEF คือยิ่งมีค่ามาก ค่า TEF จะมีค่าต่ำตามสมการที่ 3.50 ที่ได้อธิบายไปในหัวข้อที่ผ่านมา ส่วนค่า TEF ที่มีค่ามากที่สุด คือครีบบางแบบซิกแซกที่วางตรงกันนั้นที่มีความสูงครีบบ 3 mm ระยะพิตช์ 45 mm (Z-in-phase, $e/H=0.1$, $P/H=1.5$) เนื่องจากเป็นครีบบที่ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่ไม่สูงมากแต่ค่าความเสียดทาน ต่ำมากทำให้ค่าประสิทธิภาพทางความร้อนที่ได้มีค่าสูง

ตารางที่ 6.1 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนเลขนีสเซลท์ อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน และตัวประกอบการ เพิ่มสมรรถนะความร้อน กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะเอียง แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffles) ที่ทำมุมกับทิศทางการไหล (α) 30°

กรณีที่	e/H	P/H	Nu/Nu_0	f/f_0	TEF
1	0.1	1.5	2.3482	3.5346	1.5511
2	0.1	2.0	1.9766	3.2515	1.3425
3	0.1	3.0	1.6801	3.0565	1.1649
4	0.2	1.5	2.7208	9.7733	1.2804
5	0.2	2.0	2.4487	8.3577	1.2121
6	0.2	3.0	2.0814	7.1155	1.0888
7	0.3	1.5	3.1658	22.4663	1.1289
8	0.3	2.0	3.0995	20.6684	1.1364
9	0.3	3.0	3.0178	19.4281	1.1295

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

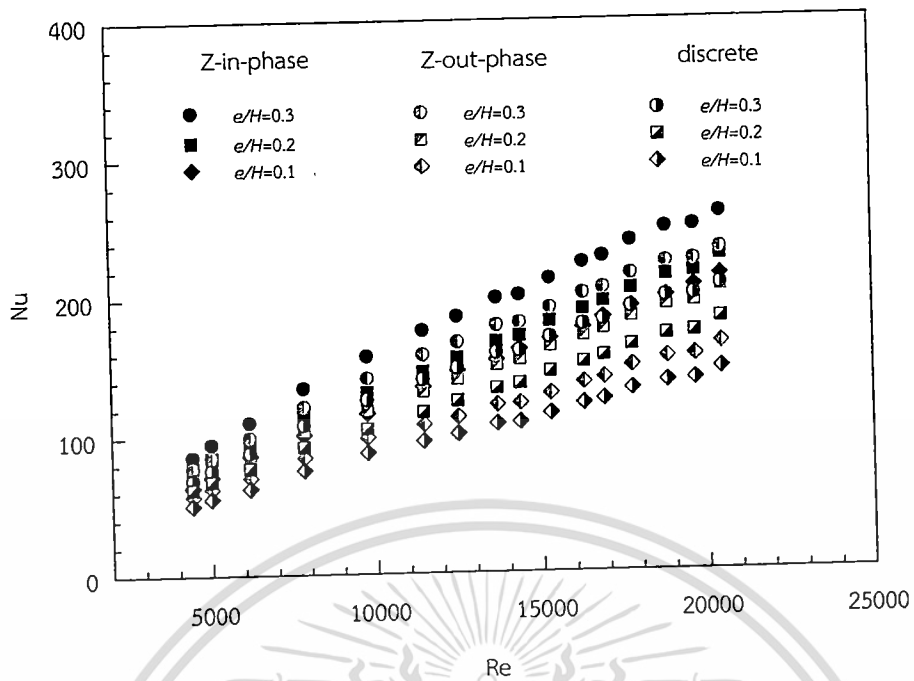
ตารางที่ 6.2 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ต์ อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน และตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อน กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางตรงกัน (Z-in-phase) ที่ทำมุมกับทิศทางการไหล (α) 30°

กรณีที่	e/H	P/H	\overline{Nu}/Nu_0	\overline{f}/f_0	\overline{TEF}
1	0.1	1.5	3.1028	5.1771	1.8438
2	0.1	2.0	2.6018	3.7389	1.7025
3	0.1	3.0	2.0703	1.9795	1.5438
4	0.2	1.5	3.4010	13.9161	1.4227
5	0.2	2.0	3.0609	12.3814	1.3313
6	0.2	3.0	2.6017	9.0459	1.2543
7	0.3	1.5	3.9573	26.2055	1.3405
8	0.3	2.0	3.6526	23.3769	1.2853
9	0.3	3.0	3.1191	20.4234	1.1481

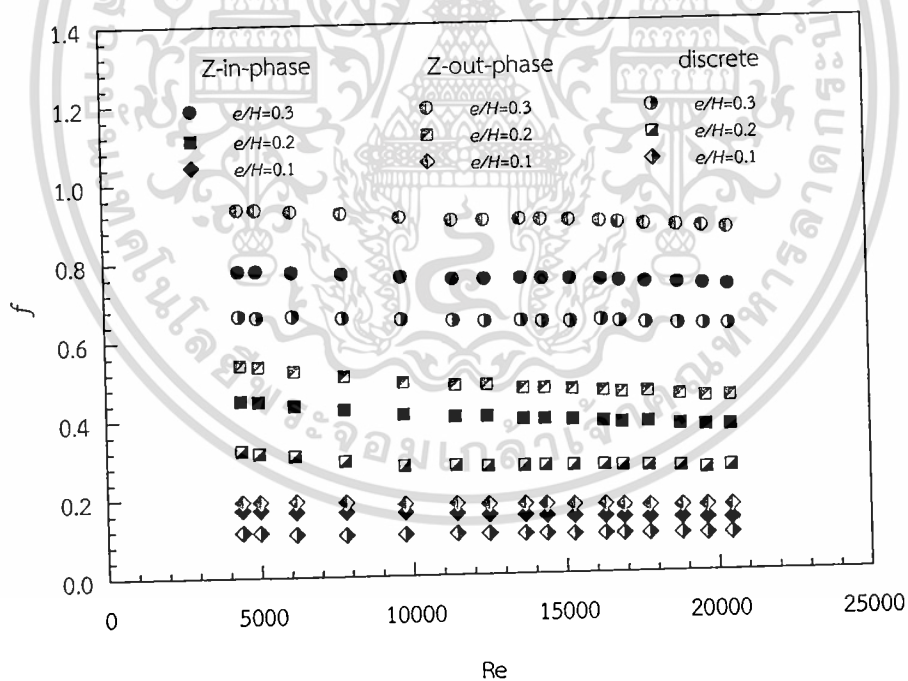
ตารางที่ 6.3 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ต์ อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน และตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อน กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางเยื้องกัน (Z-out-phase) ที่ทำมุมกับทิศทางการไหล (α) 30°

กรณีที่	e/H	P/H	\overline{Nu}/Nu_0	\overline{f}/f_0	\overline{TEF}
1	0.1	1.0	3.0199	9.2268	1.4487
2	0.1	1.5	2.4708	6.1512	1.3568
3	0.1	2.0	2.2237	5.4315	1.2729
4	0.2	1.0	3.7411	25.0489	1.2865
5	0.2	1.5	3.0609	16.6993	1.2049
6	0.2	2.0	2.7548	14.8577	1.1275
7	0.3	1.0	4.3530	47.1700	1.2122
8	0.3	1.5	3.5616	31.4466	1.1353
9	0.3	2.0	3.2873	28.0523	1.0886

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

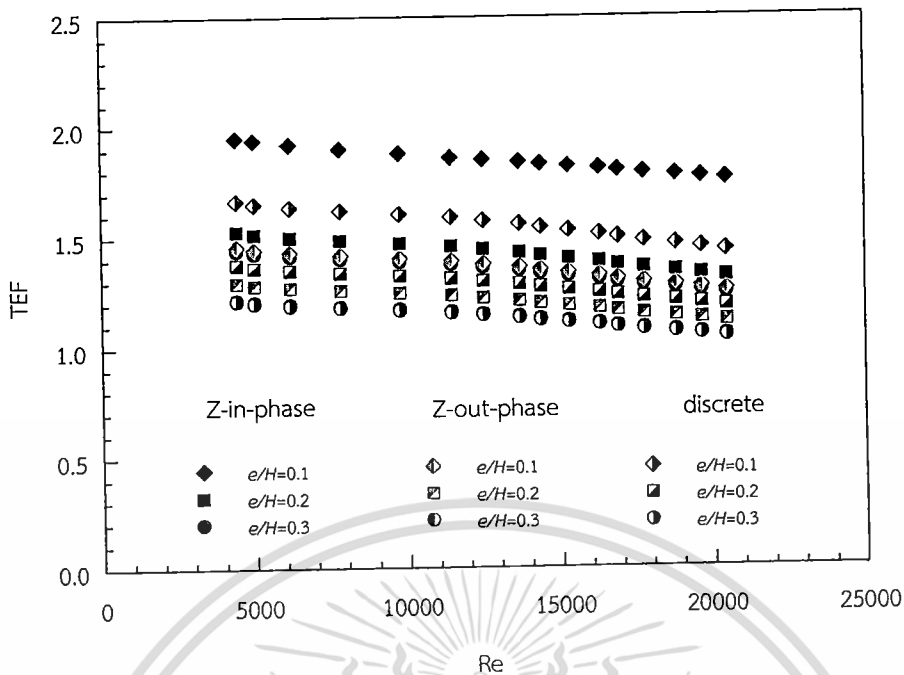


รูปที่ 6.16 ความสัมพันธ์ของเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางมุม 30° มีระยะพิตซ์ 45 mm ($P/H=1.5$) บนผนังด้านเดียว



รูปที่ 6.17 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางมุม 30° มีระยะพิตซ์ 45 mm ($P/H=1.5$) บนผนังด้านเดียว

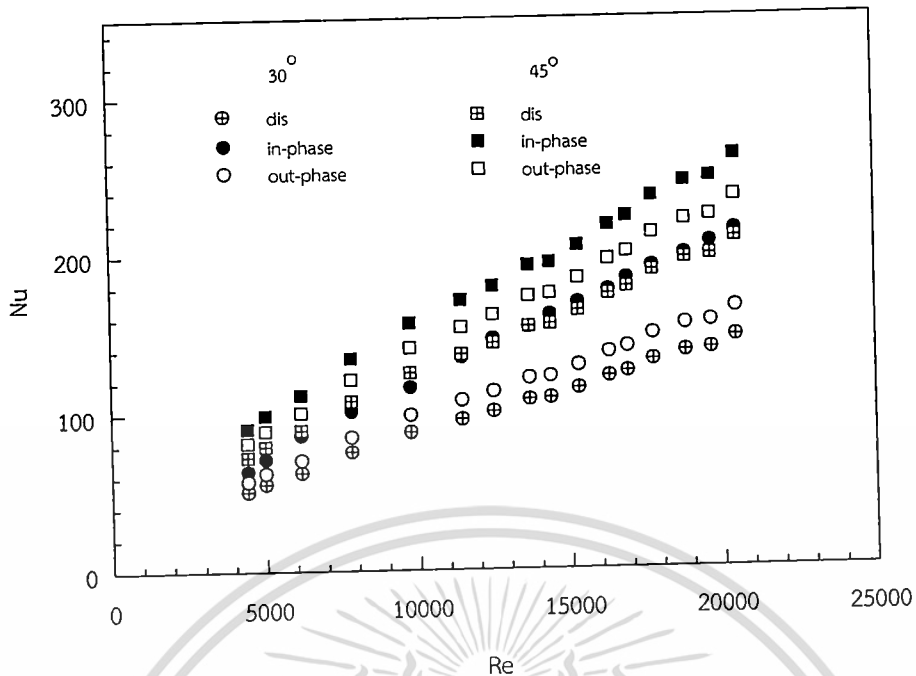
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



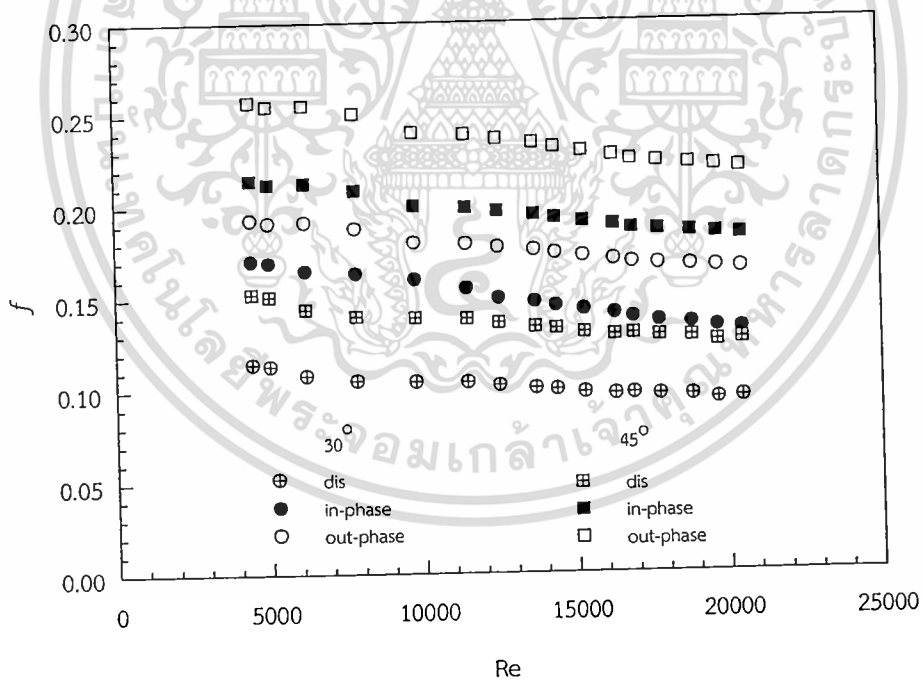
รูปที่ 6.18 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนกับเลขเรย์โนลด์กรณีติดตั้งครีบบางมุม 30° มีระยะพิตช์ 45 mm ($P/H=1.5$) บนผนังด้านเดียว

6.6 การเปรียบเทียบลักษณะครีบบางที่ทำมุม 30° กับ 45° บนผนังด้านเดียว

ในส่วนนี้จะเป็นการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองในบทที่ 5 และ 6 แสดงในรูปที่ 6.19 - 6.21 ที่ความสูงครีบบาง 3 mm ($e/H=0.1$) และระยะพิตช์ 45 mm ($P/H=1.5$) แสดงอยู่ในกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Nu , f และ TEF กับ Re จากรูปจะเห็นว่าที่ความสูงครีบบางและระยะพิตช์เดียวกัน ครีบบางที่มีมุม 30° จะมีค่า Nu , f และ TEF น้อยกว่าครีบบาง 45° ผลเนื่องมาจากลักษณะของครีบบางที่แสดงในรูปที่ 4.18 ครีบบาง 30° จะมีจำนวนแถวของครีบบางน้อยกว่าของครีบบาง 45° เนื่องจากลักษณะของมุมครีบบางที่แหลมทำให้ลักษณะครีบบางมีความยาวมากทำให้ที่ระยะแผ่นทดสอบเท่ากันจำนวนครีบบาง 30° จะมีจำนวนน้อยกว่าทำให้ค่า Nu และ f มีค่าน้อยกว่าครีบบาง 45° ที่มีจำนวนครีบบางมากกว่า

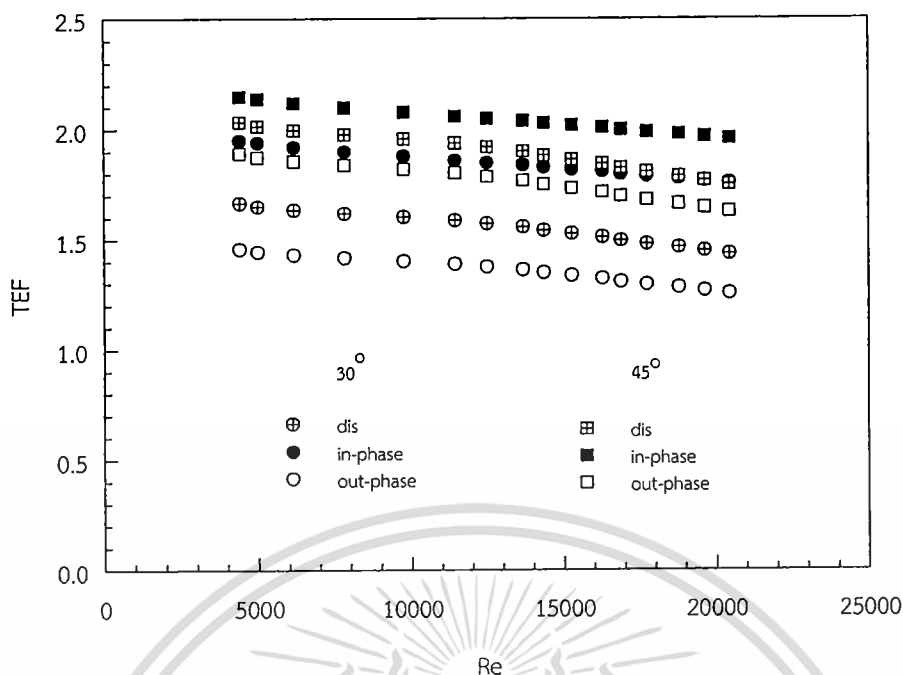


รูปที่ 6.19 ความสัมพันธ์ของเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์ ครีบบางที่ทำมุม 30° กับ 45° บนผนังด้านเดียว มีความสูงครีบบาง $e/H=0.1$ และระยะพิตช์ $P/H=1.5$



รูปที่ 6.20 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ ครีบบางที่ทำมุม 30° กับ 45° บนผนังด้านเดียว มีความสูงครีบบาง $e/H=0.1$ และระยะพิตช์ $P/H=1.5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.21 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ ครีบบางที่มุม 30° กับ 45° บนผนังด้านเดียว มีความสูงครีบบาง 3 mm ($e/H=0.1$) และระยะพิตช์ 45 mm ($P/H=1.5$)

6.7 สรุป

ผลการทดลองในส่วนที่ 2 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยใช้ครีบบางวางมุมเอียงกับทิศทางการไหล 30° โดยครีบบางอยู่ด้วยกัน 3 ลักษณะคือ แบบครีบบางเอียงวางไม่ต่อเนื่อง (discrete Inclined baffle), ครีบบางซิกแซกแบบวางตรงกัน (Z-in-phase) และแบบวางเอียงกัน (Z-out-phase) จากผลที่ได้เมื่อเปรียบเทียบที่ลักษณะของครีบบาง Z-In-phase จะให้ค่า Nu มากกว่าครีบบางอื่นที่ความสูงครีบบาง และระยะพิตช์เท่ากันดังแสดงในรูปที่ 6.16 แต่ค่า f ครีบบาง Z-out-phase จะมีค่าสูงทำให้ค่า TEF ที่ได้ของครีบบางลักษณะนี้มีค่าต่ำ โดยที่ครีบบางลักษณะ Z-in-phase จะมีค่า TEF มากที่สุดเมื่อเทียบที่ความสูงครีบบาง และระยะพิตช์เดียวกัน

ในส่วนของการเปรียบเทียบกับครีบบาง 45° นั้นเนื่องจากครีบบาง 30° ตัวครีบบางจะมีขนาดที่ยาวมากกว่าครีบบาง 45° ทำให้มีจำนวนครีบบางน้อยกว่าในพื้นที่ทดสอบที่เท่ากันดังแสดงในรูปที่ 4.18 ทำให้ค่า Nu, f และ TEF น้อยกว่าครีบบาง 45°

บทที่ 7

ครีบบาง แบบซิกแซก (zigzag, Z) มุม 60° บนผนังด้านเดียว

7.1 บทนำ

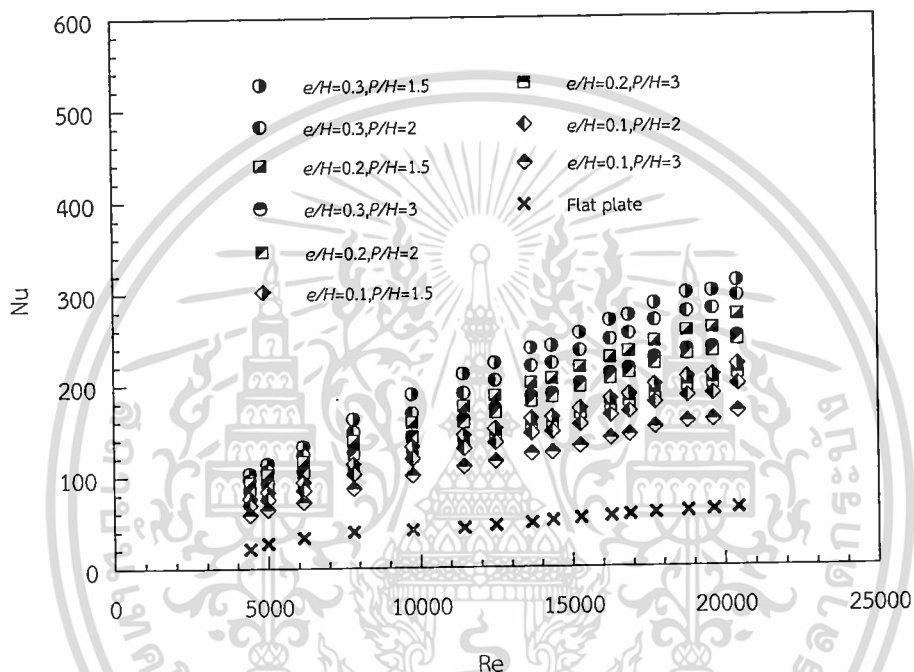
ในบทนี้ กล่าวถึงผลการทดลองส่วนที่ 3 จากการทดลองที่ผ่านในบทที่ 5 และ 6 เราจะได้ว่า ครีบบางแบบซิกแซกมุม 45° มีค่า TEF มากกว่าครีบบางแบบซิกแซกมุม 30° ซึ่งในบทนี้จะทำการทดลองโดยเพิ่มมุมจาก 45° เป็น 60° เพื่อหาลักษณะการถ่ายเทความร้อนว่าเพิ่มมุมจะมีผลอย่างไรบ้าง โดยจะศึกษาอิทธิพลของความสูง, ระยะพิตช์, การจัดวางของครีบ และลักษณะของครีบ เช่นเดียวกับบทที่ผ่านมา โดยแบ่งการศึกษาในส่วนนี้ออกเป็น

- (1.1) ครีบบางวางลักษณะเอียง แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffles) ที่ทำมุมกับทิศทางการไหล (α) 60° ลักษณะตามรูปที่ 4.16 บนผนังด้านเดียวเพื่อศึกษาอิทธิพลของลักษณะของครีบในรูปแบบดังกล่าว และผลของความสูงครีบ 3, 6 และ 9 mm ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3) ระยะพิตช์ 45, 60 และ 90 mm ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0)
- (1.2) ครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางตรงกัน (Z-in-phase) ที่ทำมุมกับทิศทางการไหล (α) 60° ลักษณะตามรูปที่ 4.17 บนผนังด้านเดียวเพื่อศึกษาอิทธิพลของลักษณะของครีบในรูปแบบดังกล่าว และผลของความสูงครีบ 3, 6 และ 9 mm ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3) ระยะพิตช์ 45, 60 และ 90 mm ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0)
- (1.3) ครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางเอียงกัน (Z-out-phase) ที่ทำมุมกับทิศทางการไหล (α) 60° ลักษณะตามรูปที่ 4.17 บนผนังด้านเดียวเพื่อศึกษาอิทธิพลของลักษณะของครีบในรูปแบบดังกล่าว และผลของความสูงครีบ 3, 6 และ 9 mm ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3) ระยะพิตช์ 30, 45 และ 60 mm ($P/H = 1, 1.5$ และ 2.0)
- (1.4) การเปรียบเทียบลักษณะครีบบางที่ทำมุม 60° บนผนังด้านเดียว จากการทดลองในหัวข้อที่ผ่านมาจะนำเอาลักษณะของครีบที่มีค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนที่สูงนำมาเปรียบเทียบกัน
- (1.5) การเปรียบเทียบลักษณะครีบบางที่ทำมุม $30^\circ, 45^\circ$ และ 60° บนผนังด้านเดียว จะเป็นการเปรียบเทียบผลที่ได้กับการทดลองในบทที่ 5 และ 6 เพื่อหาผลของมุมครีบที่เปลี่ยนไป

ทำการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนในพจน์ของ Nu และการสูญเสียความดันในพจน์ของ f จากนั้นก็เปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันกับท่อผนังเรียบ และ TEF ซึ่งเป็นข้อมูลที่คำนวณที่กำลังขับเดียวกัน โดยกำหนดจากค่า Re ของการทดลอง มีผลดังต่อไปนี้

7.2 ครีบบางวางลักษณะเอียง แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffles) บนผนังด้านเดียว

ในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาถึงลักษณะของครีบเอียงแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffles, DB) ดังแสดงในรูปที่ 4.16 ซึ่งในการทดลองได้ทำการทดลองในหลายลักษณะ ประกอบไปด้วย ความสูง (e) ทั้งหมด 3 ความสูงคือ 3, 6 และ 9 mm ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3) และระยะพิตช์ (P) ทั้งหมด 3 ระยะคือ 45, 60 และ 90 mm ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0) โดยจะทำการหาผลของการเปลี่ยนความสูง และระยะพิตช์ต่อครีบในลักษณะดังกล่าว ซึ่งการที่จะนำเสนอผลการทดลองเพื่อให้เห็นถึงพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนจะแสดงเป็นกราฟของ Nu, f และ TEF

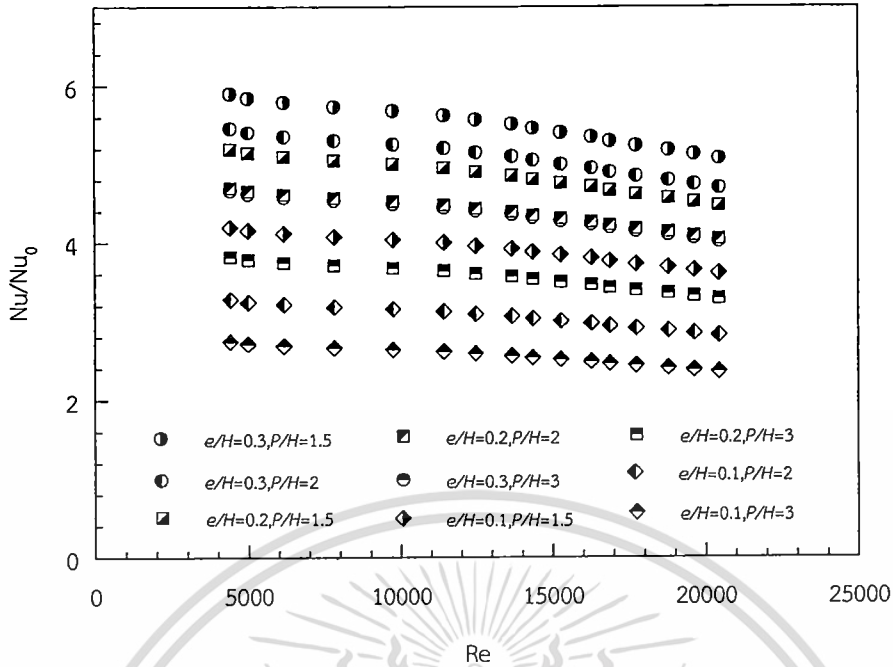


รูปที่ 7.1 ความสัมพันธ์ของเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะเอียง แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffles) บนผนังด้านเดียว

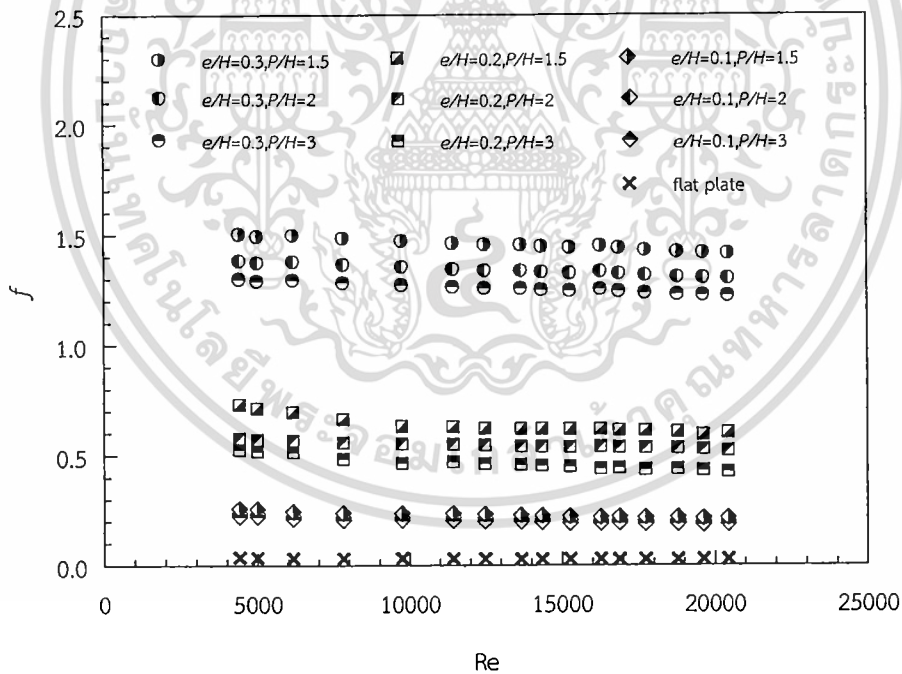
7.2.1 ความสูง ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3)

ผลการทดลองของครีบบางวางเอียงแบบไม่ต่อเนื่องทำมุมกับทิศทางการไหล 60° มีความสูงสม่ำเสมอ 3 แบบ $e = 3, 6$ และ 9 mm ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3) Nu ที่ได้จากการทดสอบในช่วงการไหลปั่นป่วน แสดงในรูปที่ 7.1 จากรูปกราฟเราจะเห็นถึงค่า Nu มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามค่า Re ที่เพิ่มขึ้น จากการที่ค่า Re มีค่าสูงการไหลยิ่งปั่นป่วนมาก มีผลทำให้การถ่ายเทความร้อนยิ่งสูงขึ้น โดยในส่วนของความสูงครีบ ยิ่งมีความสูงมากค่า Nu จะมีค่ามากกว่าความสูงครีบที่น้อยกว่า จากกราฟที่ระยะพิตช์ 45 mm ($P/H = 1.5$) ที่ความสูงครีบ 9 mm ($e/H = 0.3$) จะมีค่า Nu มากที่สุดเรียงลงมาตามความสูงที่ลดลง โดยที่ความสูง $e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3 จะมีค่า Nu มากกว่าแผ่นเรียบในช่วง 419-361%, 520-448% และ 590-508% ตามลำดับ ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ดังแสดงในรูปที่ 7.2 เนื่องจากครีบที่สูงจะเป็นตัวที่ทำให้ของไหลที่ไหลผ่านเกิดการไหลแบบปั่นป่วนมากยิ่งขึ้น จะทำให้การถ่ายเทความร้อนยิ่งสูงขึ้นตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



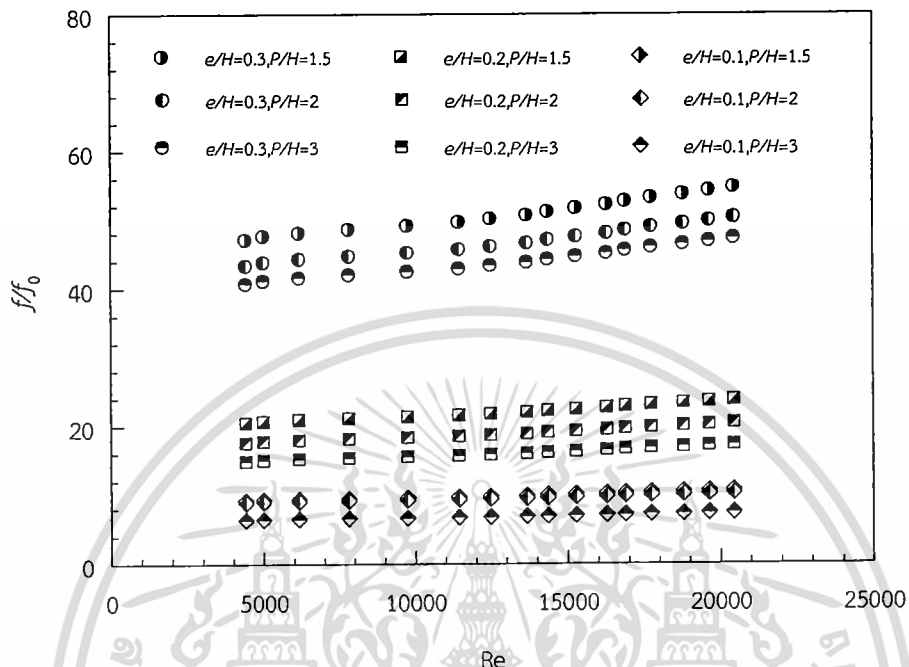
รูปที่ 7.2 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะเอียง แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffles) บนผนังด้านเดียว



รูปที่ 7.3 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะเอียง แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffles) บนผนังด้านเดียว

ในส่วนของ f จะมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของค่า Re และในส่วนของความสูงครีบบึงครีบบึงมีความสูงมาก ค่า f จะมีค่าสูงขึ้นตามดังแสดงในรูปที่ 7.3 โดยที่ระยะพิตช์ 45 mm ($P/H = 1.5$) ที่ความสูงครีบบึง 9 mm ($e/H = 0.3$) จะมีค่า f มากที่สุดเรียงลงมาตามความสูงที่ลดลง โดยที่ความสูง $e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3 จะมีค่า f มากกว่าแผ่นเรียบในช่วง 9.2-10.7, 20.5-23.8 และ 47.1-54.7 การคำนวณค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่าตามลำดับ ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ดังแสดงในรูปที่ 7.4 เนื่องจากครีบบางวางที่สูงจะยิ่งขวางการเคลื่อนที่ของของไหลทำให้เกิดผลต่างความดันของของไหลมากระหว่างทางเข้า กับทางออกจากแผ่นทดสอบซึ่งทำให้ค่า f มีค่าสูงตามสมการที่ 3.2 แสดงในบทที่ 3



รูปที่ 7.4 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะเอียง แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffles) บนผนังด้านเดียว

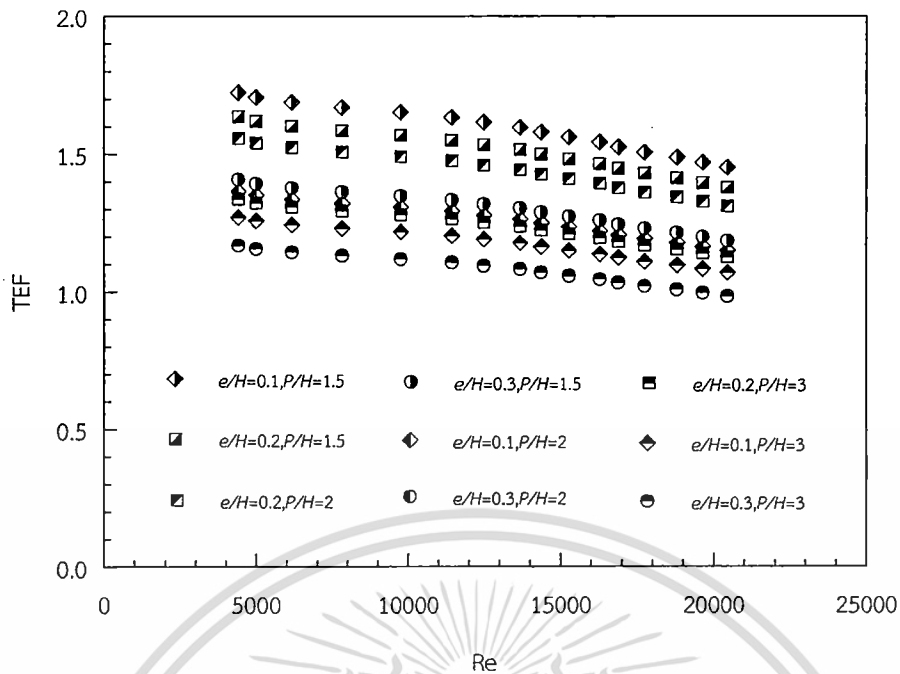
7.2.2 ระยะพิตช์ ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0)

ผลการทดลองของครีบบางวางเอียงแบบไม่ต่อเนื่องทำมุมกับทิศทางการไหล 60° มีระยะพิตช์ 3 แบบ $P = 45, 60$ และ 90 mm ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0) Nu ที่ได้จากการทดสอบในช่วงการไหลปั่นป่วน แสดงในรูปที่ 7.1 จากรูปกราฟเราจะเห็นถึงผลของระยะพิตช์ ยังมีค่าน้อยค่า Nu จะมีค่ามากยิ่งขึ้น จากกราฟที่ความสูงครีบบาง 9 mm ($e/H = 0.3$) ที่ระยะพิตช์ 45 mm ($P/H = 1.5$) จะมีค่า Nu มากที่สุดเรียงลงมาตามระยะพิตช์ที่เพิ่มขึ้น โดยที่ระยะพิตช์ $P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0 จะมีค่า Nu มากกว่าแผ่นเรียบในช่วง $590-508\%$, $546-470\%$ และ $467-402\%$ ตามลำดับ ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ดังแสดงในรูปที่ 7.2 เนื่องจากครีบบางวางเป็นตัวที่ทำให้ของไหลที่ไหลผ่านเกิดการไหลแบบปั่นป่วน ทำให้เพิ่มการถ่ายเทความร้อนให้สูงขึ้น เมื่อมีระยะพิตช์สั้นจะทำให้ของไหลจะไหลไปเจอครีบบางครั้งขึ้น ซึ่งทำให้ของไหลปั่นป่วนมาก และการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นตาม

ในส่วนของตัวประกอบเสียดทานส่วนของระยะพิตช์ยังมีระยะสั้น ค่า f จะมีค่าสูงขึ้นตามดังแสดงในรูปที่ 7.3 โดยที่ความสูงครีบบาง 9 mm ($e/H = 0.3$) ที่ระยะพิตช์ 45 mm ($P/H = 1.5$) จะมีค่าตัวประกอบเสียดทานมากที่สุดเรียงลงมาตามระยะพิตช์ที่ลดลง ที่ระยะพิตช์ $P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0 จะมีค่า f มากกว่าแผ่นเรียบในช่วง $47.1-54.7$, $43.3-46.8$ และ $40.8-47.3$ เท่าตามลำดับ ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ดังแสดงในรูปที่ 7.4 เนื่องจากระยะพิตช์ที่สั้นจะมีจำนวนแถวของครีบบางมากกว่าเมื่อเทียบกับระยะพิตช์ที่ยาว ในระยะช่วงทดสอบเดียวกัน จะทำให้ของไหลต้องเจอครีบบางวางการไหลมากแถวกว่าทำให้ความดันตกคร่อมมีค่าสูง ส่งผลให้ค่า f เพิ่มสูงขึ้นตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



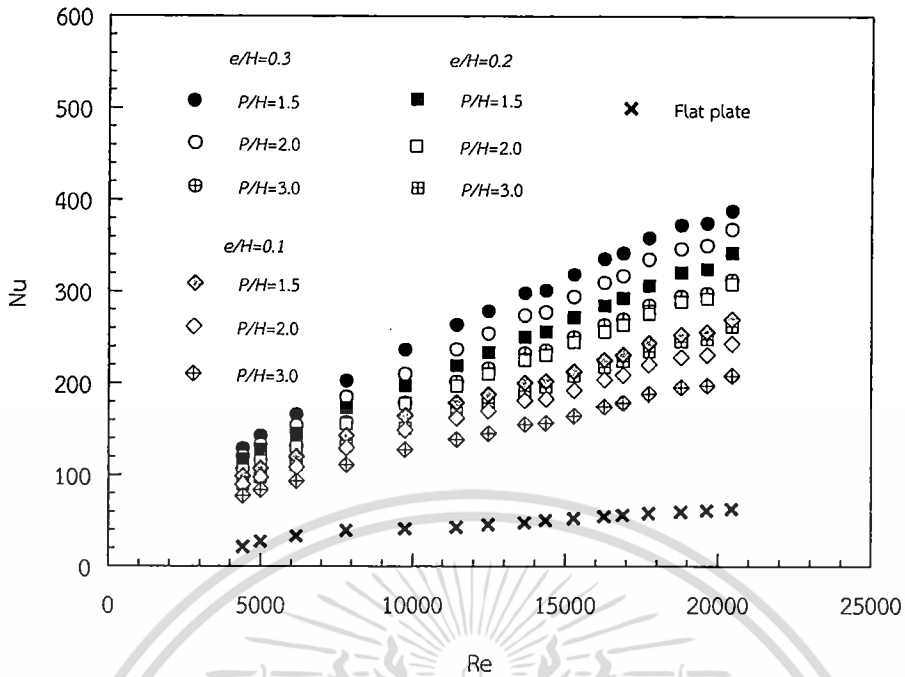
รูปที่ 7.5 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนกับเลขเรย์โนลด์กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะเอียง แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffles) บนผนังด้านเดียว

7.2.3 ตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อน (TEF)

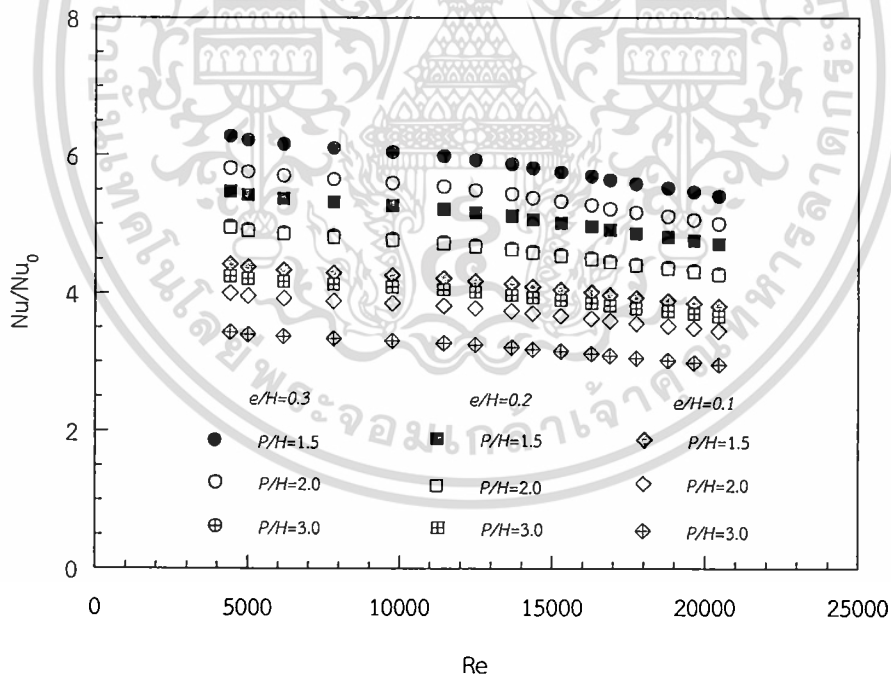
จากรูปกราฟที่ 7.2 และ 7.4 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของสัดส่วน Nu และ f ซึ่งทั้งสองค่านี้นำมาคำนวณเป็นค่า TEF ตามสมการที่ 3.50 ในบทที่ 3 ซึ่งจะเป็นค่าที่แสดงถึงประสิทธิภาพทางความร้อน โดยจะเป็นการคิดถึงพลังงานที่ใช้ในการขับของไหลผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนกับค่าพลังงานที่ได้จากการแลกเปลี่ยนความร้อน จากรูปที่ 7.5 แสดงให้เห็นถึงค่า TEF ที่มีค่าลดลงตามค่า Re ที่เพิ่มขึ้น ครีบบางที่มีความสูง 0.3 mm ($e/H = 0.1$) ระยะพิทช์ 45 mm ($P/H = 1.5$) มีค่า TEF สูงมากที่สุดคือมีค่าอยู่ในช่วง 1.73-1.45 ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ซึ่งค่า TEF จะมีค่าสูงที่สุดเมื่อค่า Re มีค่าต่ำที่สุด

7.3 ครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางตรงกัน (Z-in-phase)

ในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาถึงลักษณะของครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางตรงกัน (Z-In-phase) ดังแสดงในรูปที่ 4.17 ซึ่งในการทดลองได้ทำการทดลองในหลายลักษณะ ประกอบไปด้วยความสูง (e) ทั้งหมด 3 ความสูงคือ 3, 6 และ 9 mm ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3) และระยะพิทช์ (P) ทั้งหมด 3 ระยะคือ 45, 60 และ 90 mm ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0) โดยจะทำการหาผลของการเปลี่ยนความสูง และระยะพิทช์ต่อครีบบางในลักษณะดังกล่าว ซึ่งการที่จะนำเสนอผลการทดลองเพื่อให้เห็นถึงพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนจะแสดงเป็นกราฟของ Nu , f และ TEF



รูปที่ 7.6 ความสัมพันธ์ของเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางตรงกัน (Z-in-phase) บนผนังด้านเดียว

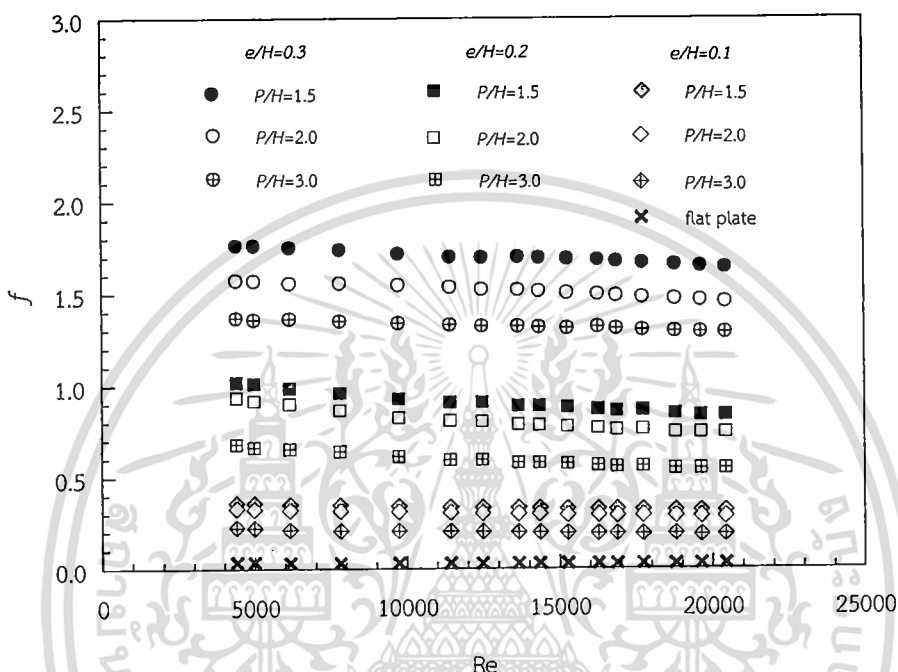


รูปที่ 7.7 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางตรงกัน (Z-in-phase) บนผนังด้านเดียว

7.3.1 ความสูง ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3)

ผลการทดลองของครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางตรงกันทำมุมกับทิศทางการไหล 60° มีความสูงสม่ำเสมอ 3 แบบ $e = 3, 6$ และ 9 mm ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3) Nu ที่ได้จากการเอกซารีนเป็นเอกซารีนทงสวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาติเห็นาเปไซประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดสอบในช่วงการไหลปั่นป่วน แสดงในรูปที่ 7.6 จากรูปกราฟเราจะเห็นถึงค่า Nu มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามค่า Re ที่เพิ่มขึ้น ในส่วนของความสูงครีบบังก็มีความสูงมากค่า Nu จะมีค่ามากกว่าความสูงครีบบังที่น้อยกว่า เช่นเดียวกับลักษณะครีบบังเอียงแบบไม่ต่อเนื่องในหัวข้อ 7.2.1 จากกราฟที่ระยะพิตช์ 45 mm ($P/H = 1.5$) ที่ความสูงครีบบัง 9 mm ($e/H = 0.3$) จะมีค่า Nu มากที่สุดเรียงลงมาตามความสูงที่ลดลง โดยที่ความสูง $e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3 จะมีค่า Nu มากกว่าแผ่นเรียบในช่วง 441-380%, 547-471% และ 627-540% ตามลำดับ ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ดังแสดงในรูปที่ 7.7

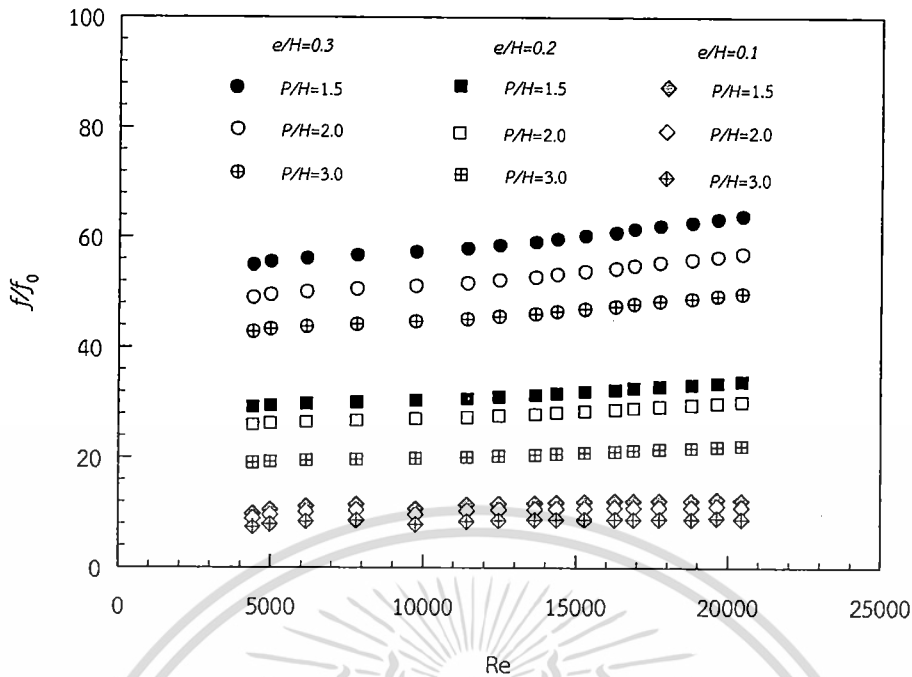


รูปที่ 7.8 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางตรงกัน (Z-in-phase) บนผนังด้านเดียว

ในส่วนของ f จะมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของค่า Re และในส่วนของความสูงครีบบังก็ครีบบังมีความสูงมาก ค่า f จะมีค่าสูงขึ้นเช่นเดียวกับครีบบังในหัวข้อที่ 7.2.1 ตามดังแสดงในรูปที่ 7.8 โดยที่ระยะพิตช์ 45 mm ($P/H = 1.5$) ที่ความสูงครีบบัง 9 mm ($e/H = 0.3$) จะมีค่า f มากที่สุดเรียงลงมาตามความสูงที่ลดลง โดยที่ความสูง $e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3 จะมีค่า f มากกว่าแผ่นเรียบในช่วง 9.8-12.2, 29.2-33.9 และ 55.0-63.8 เท่าตามลำดับ ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ดังแสดงในรูปที่ 7.9

7.3.2 ระยะพิตช์ ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0)

ผลการทดลองของครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางตรงกันทำมุมกับทิศทางการไหล 60° มีระยะพิตช์ 3 แบบ $P = 45, 60$ และ 90 mm ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0) Nu ที่ได้จากการทดสอบในช่วงการไหลปั่นป่วน แสดงในรูปที่ 7.6 จากรูปกราฟเราจะเห็นถึงผลของระยะพิตช์ ยังมีค่าน้อยค่า Nu จะมีค่ามากยิ่งขึ้นเช่นเดียวกับครีบบังในหัวข้อที่ 7.2.2 จากกราฟที่ความสูงครีบบัง 9 mm ($e/H = 0.3$) ที่ระยะพิตช์ 45 mm ($P/H = 1.5$) จะมีค่า Nu มากที่สุดเรียงลงมาตามระยะพิตช์ที่เพิ่มขึ้น โดยที่ระยะพิตช์ $P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0 จะมีค่า Nu มากกว่าแผ่นเรียบในช่วง 627-540%, 581-500% และ 497-428% ตามลำดับ ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ดังแสดงในรูปที่ 7.7

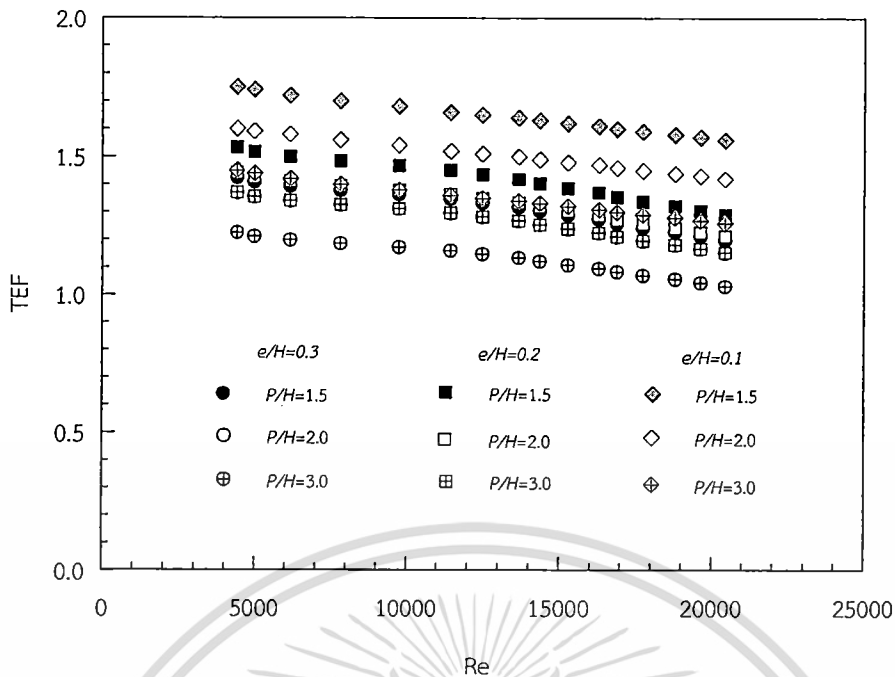


รูปที่ 7.9 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวาง ลักษณะซิกแซก แบบวางตรงกัน (Z-in-phase) บนผนังด้านเดียว

ในส่วนของ f ส่วนของระยะพิตช์ยังมีระยะสั้น ค่า f จะมีค่าสูงขึ้นตามดังแสดงในรูปที่ 7.8 โดยที่ความสูงครีบบาง 9 mm ($e/H = 0.3$) ที่ระยะพิตช์ 45 mm ($P/H = 1.5$) จะมีค่า f มากที่สุดเรียงลงมาตามระยะพิตช์ที่ลดลง ที่ระยะพิตช์ $P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0 จะมีค่า f มากกว่าแผ่นเรียบ ในช่วง 55.0-63.8, 49.0-56.9, และ 42.8-49.7 เท่าตามลำดับ ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ดังแสดงในรูปที่ 7.9 เช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 7.2.2

7.3.3 ตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อน (TEF)

จากรูปกราฟที่ 7.7 และ 7.9 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของสัดส่วน Nu และ f ซึ่งทั้งสองค่านี้นำมาคำนวณเป็นค่า TEF เช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 7.2.3 จากรูปที่ 7.10 แสดงให้เห็นถึงค่า TEF ที่มีค่าลดลงตามค่า Re ที่เพิ่มขึ้น ครีบบางที่มีความสูง 0.3 mm ($e/H = 0.1$) ระยะพิตช์ 45 mm ($P/H = 1.5$) มีค่า TEF สูงมากที่สุดคือมีค่าอยู่ในช่วง 1.75-1.56 ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ซึ่งค่า TEF จะมีค่าสูงที่สุดเมื่อค่า Re มีค่าต่ำที่สุด



รูปที่ 7.10 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนกับเลขเรย์โนลด์กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางตรงกัน (Z-in-phase) บนผนังด้านเดียว

7.4 ครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางเอียงกัน (Z-out-phase)

ในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาถึงลักษณะของครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางเอียงกัน (Z-out-phase) ดังแสดงในรูปที่ 4.17 ซึ่งในการทดลองได้ทำการทดลองในหลายลักษณะ ประกอบไปด้วย ความสูง (e) ทั้งหมด 3 ความสูงคือ 3, 6 และ 9 mm ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3) และ ระยะพิตช์ (P) ทั้งหมด 3 ระยะคือ 30, 45 และ 60 mm ($P/H = 1, 1.5$ และ 2.0) ในการทดลองส่วนนี้จะเพิ่มการทดลองที่ระยะพิตช์ 30 mm ($P/H = 1$) ซึ่งในการทดลองแบบวางตรงกันจะทำได้ เนื่องจากว่าส่วนยอดของมุมครีบบางจะวางชนกัน แต่ในการทดลองที่วางครีบบางเอียงกันนั้นส่วนยอดของมุมครีบบางจะวางเอียงกันทำให้ไม่ชนกันจึงสามารถทำการติดตั้งครีบบางเพื่อทำการทดลองได้ โดยจะทำการหาผลของการเปลี่ยนความสูง และระยะพิตช์ต่อครีบบางในลักษณะดังกล่าว ซึ่งการที่จะนำเสนอผลการทดลองเพื่อให้เห็นถึงพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนจะแสดงเป็นกราฟของ Nu, f และ TEF

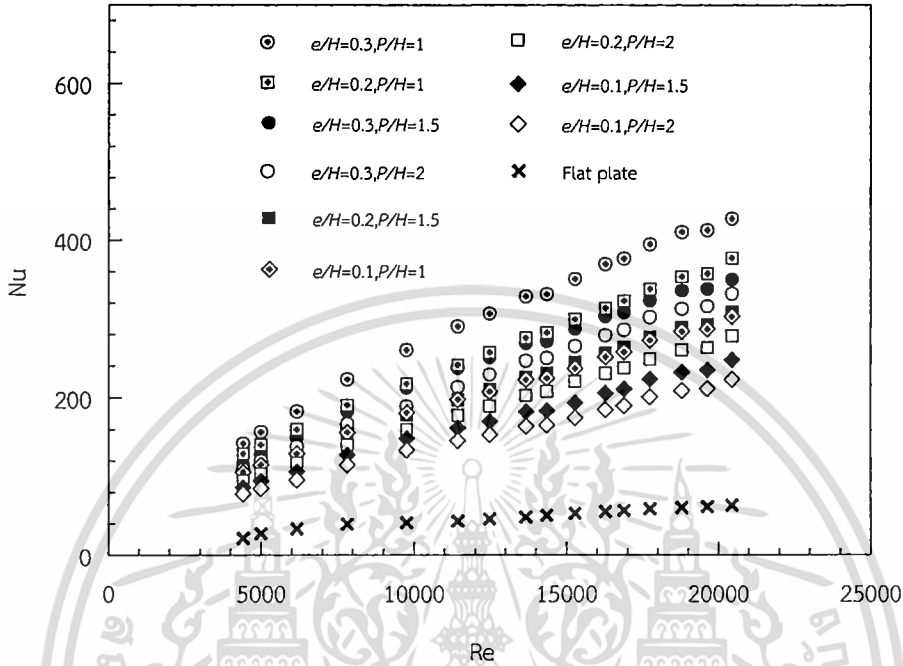
7.4.1 ความสูง ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3)

ผลการทดลองของครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางเอียงกันทำมุมกับทิศทางการไหล 60° มีความสูงสามแบบ $e = 3, 6$ และ 9 mm ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3) Nu ที่ได้จากการทดสอบในช่วงการไหลปั่นป่วน แสดงในรูปที่ 7.11 จากรูปกราฟเราจะเห็นถึงค่า Nu มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามค่า Re ที่เพิ่มขึ้น ในส่วนของความสูงครีบบาง ยิ่งมีความสูงมากค่า Nu จะมีค่ามากกว่าความสูงครีบบางที่น้อยกว่า เช่นเดียวกับลักษณะครีบบางแบบไม่ต่อเนื่องในหัวข้อ 7.2.1 จากกราฟที่ระยะพิตช์ 30 mm ($P/H = 1$) ที่ความสูงครีบบาง 9 mm ($e/H = 0.3$) จะมีความสูงครีบบางมากที่สุดเรียงลงมาตามความสูงที่ลดลง โดยที่ความสูง $e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3 จะมีความสูง Nu มากกว่าแผ่นเรียบในช่วง 358-308%, 443-382% และ 508-438% ตามลำดับ ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ดังแสดงในรูปที่ 7.12

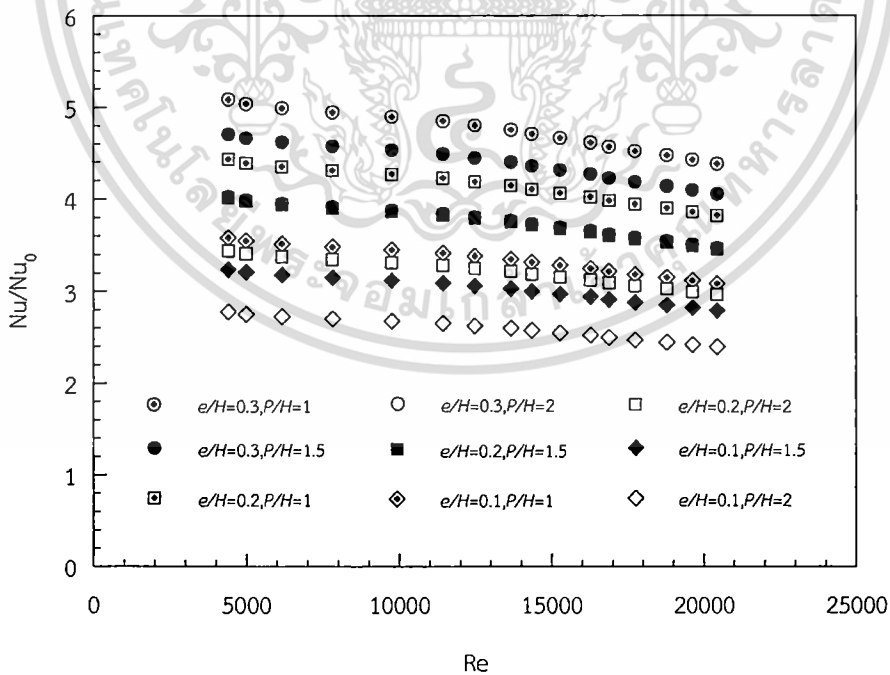
ในส่วนของ f จะมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของค่า Re และในส่วนของความสูงครีบบางยิ่งครีบบางมีความสูงมาก ค่า f จะมีค่าสูงขึ้นเช่นเดียวกับครีบบางในหัวข้อที่ 7.2.1 ตามดังแสดงในรูปที่ 7.13 โดยที่

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะพิตช์ 30 mm ($P/H = 1$) ที่ความสูงครีบ 9 mm ($e/H = 0.3$) จะมีค่า f มากที่สุดเรียงลงมาตามความสูงที่ลดลง โดยที่ความสูง $e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3 จะมีค่า f มากกว่าแผ่นเรียบในช่วง 19.4-22.5, 52.5-61.0 และ 98.9-114.9 เท่าตามลำดับ ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ดังแสดงในรูปที่ 7.14

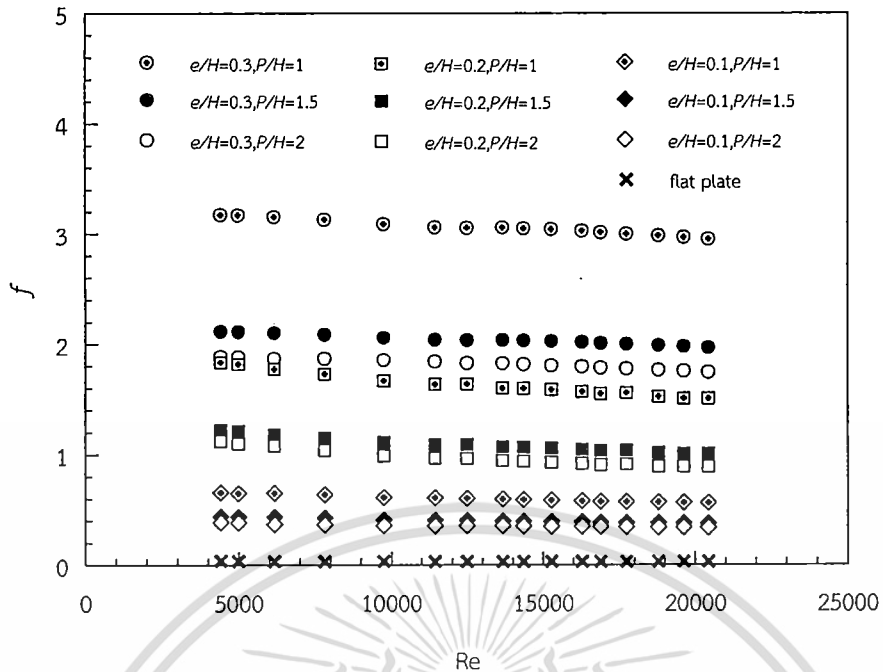


รูปที่ 7.11 ความสัมพันธ์ของเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซกแบบวางเยื้องกัน (Z- out-phase) บนผนังด้านเดียว

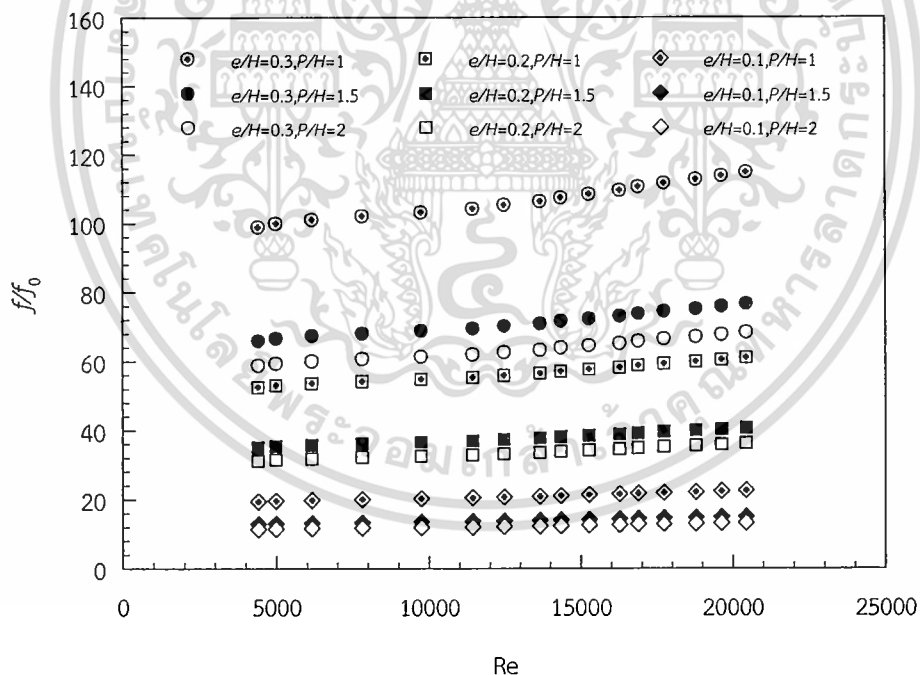


รูปที่ 7.12 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซกแบบวางเยื้องกัน (Z- out-phase) บนผนังด้านเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.13 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางเยื้องกัน (Z- out-phase) บนผนังด้านเดียว



รูปที่ 7.14 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางเยื้องกัน (Z- out-phase) บนผนังด้านเดียว

7.4.2 ระยะเวลาพิตช์ ($P/H = 1, 1.5$ และ 2.0)

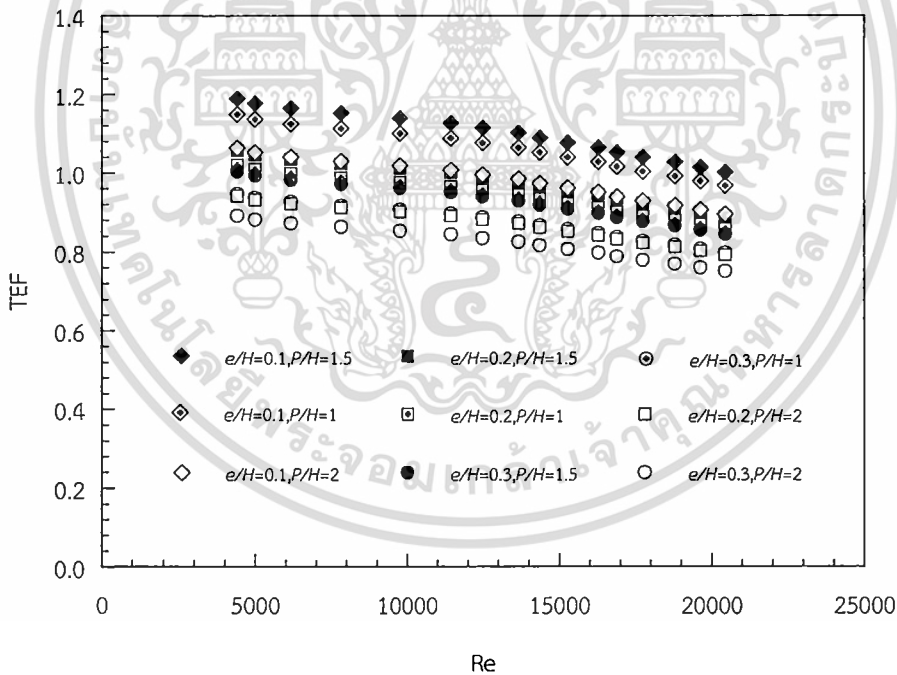
ผลการทดลองของครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางตรงกันทำมุมกับทิศทางการไหล 60° มีระยะเวลาพิตช์ 3 แบบ $P = 30, 45$ และ 60 mm ($P/H = 1, 1.5$ และ 2.0) Nu ที่ได้จากการทดสอบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในช่วงการไหลปั่นป่วน แสดงในรูปที่ 7.11 จากรูปกราฟเราจะเห็นถึงผลของระยะพิตซ์ ยังมีค่าน้อยค่า เลขนี้สเซลท์จะมีค่ามากยิ่งขึ้นเช่นเดียวกับครีบบนหัวข้อที่ 7.2.2 จากกราฟที่ความสูงครีบบน 9 mm ($e/H = 0.3$) ที่ระยะพิตซ์ 30 mm ($P/H = 1$) จะมีค่า Nu มากที่สุดเรียงลงมาตามระยะพิตซ์ที่เพิ่มขึ้น โดยที่ระยะพิตซ์ $P/H = 1, 1.5$ และ 2.0 จะมีค่า Nu มากกว่าแผ่นเรียบในช่วง 508-438%, 470-405% และ 402-346% ตามลำดับ ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ดังแสดงในรูปที่ 7.12

ในส่วนของ f ส่วนของระยะพิตซ์ยังมีระยะสั้น ค่า f จะมีค่าสูงขึ้นตามดังแสดงในรูปที่ 7.13 โดยที่ความสูงครีบบน 9 mm ($e/H = 0.3$) ที่ระยะพิตซ์ 30 mm ($P/H = 1$) จะมีค่า f มากที่สุดเรียงลงมาตามระยะพิตซ์ที่ลดลง ที่ระยะพิตซ์ $P/H = 1, 1.5$ และ 2.0 จะมีค่า f มากกว่าแผ่นเรียบในช่วง 98.9-114.9, 66.0-76.6, และ 58.8-68.3 เท่าตามลำดับ ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ดังแสดงในรูปที่ 7.14 เช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 7.2.2

7.4.3 ตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อน (TEF)

จากรูปกราฟที่ 7.12 และ 7.14 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของสัดส่วน Nu และ f ซึ่งทั้งสองค่านี้นำมาคำนวณเป็นค่า TEF เช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 7.2.3 จากรูปที่ 7.15 แสดงให้เห็นถึงค่า TEF ที่มีค่าลดลงตามค่า Re ที่เพิ่มขึ้น ครีบบนที่มีความสูง 0.3 mm ($e/H = 0.1$) ระยะพิตซ์ 30 mm ($P/H = 1$) มีค่า TEF สูงมากที่สุดคือมีค่าอยู่ในช่วง 1.19-1.00 ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ซึ่งค่า TEF จะมีค่าสูงที่สุดเมื่อค่า Re มีค่าต่ำที่สุด



รูปที่ 7.15 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนกับเลขเรย์โนลด์กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางเยื้องกัน (Z- out-phase) บนผนังด้านเดียว

7.5 การเปรียบเทียบลักษณะครีบบางที่ทำมุม 60° บนผนังด้านเดียว

หัวข้อที่ผ่านมาในบทนี้จะเป็นครีบบางทำมุมกับการไหลของของไหล 60° ติดอยู่บนผนังด้านบนของช่วงทดสอบ ซึ่งมีการทดลองลักษณะครีบบางทั้งหมด 27 ลักษณะ โดยจะสรุปค่าเฉลี่ยของสัดส่วนเลขนัสเซลท์ (Nu/Nu_0) สัดส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) และค่า TEF แสดงในตารางที่

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.1-7.3 แยกตามลักษณะของครีบบ และแสดงผลกราฟเปรียบเทียบผลการทดลองของครีบบในแต่ละลักษณะที่มีระยะพิตซ์ 45 mm ($P/H=1.5$) ซึ่งจะแสดงอยู่ในกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Nu , f และ TEF กับ Re ดังแสดงในรูปที่ 7.16 – 7.18 จากตารางจะเห็นได้ว่าครีบบที่มีความสูงครีบบ และระยะพิตซ์ มีผลต่อค่า Nu , f และ TEF โดยที่ครีบบยิ่งสูง และระยะพิตซ์ยิ่งแคบค่า Nu และ f จะยิ่งสูงแต่ในส่วน ของค่า TEF นั้นจะมีค่าสูงที่ครีบบมีความสูงต่ำแต่ระยะพิตซ์แคบ เนื่องจากผลของค่า f ที่มีค่าสูงตาม ความสูงของครีบบทำให้ค่า TEF มีค่าต่ำ แต่ระยะพิตซ์ที่แคบช่วยเพิ่มค่า Nu มากกว่าการเพิ่มของค่า f ทำให้ค่า TEF มีค่าสูงที่ลักษณะดังกล่าว ในส่วนของกราฟจะเห็นว่าครีบบบางแบบซิกแซกที่วางตรงกัน ที่มีความสูงครีบบ 9 mm ระยะพิตซ์ 45 mm (Z-in-phase, $e/H=0.3, P/H=1.5$) มีค่า Nu มากที่สุด จากรูปที่ 7.16 ในส่วนของค่า f ครีบบบางแบบซิกแซกที่วางเอียงกันที่มีความสูงครีบบ 9 mm ระยะพิตซ์ 45 mm (Z-out-phase, $e/H=0.3, P/H=1.5$) จะมีค่ามากกว่าครีบบในลักษณะอื่น จากรูปที่ 7.17 ซึ่ง เมื่อมาพิจารณาที่กราฟ TEF ในรูปที่ 7.18 จะเห็นว่าผลของค่า f ส่งผลต่อค่า TEF คือยิ่งมีค่ามากค่า TEF จะมีค่าต่ำตามสมการที่ 3.50 ที่ได้อธิบายไปในหัวข้อที่ผ่านมา ส่วนค่า TEF ที่มีค่ามากที่สุดคือ ครีบบบางแบบซิกแซกที่วางตรงกันนั้นที่มีความสูงครีบบ 3 mm ระยะพิตซ์ 45 mm (Z-in-phase, $e/H=0.1, P/H=1.5$) เนื่องจากเป็นครีบบที่ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่ไม่สูงมากแต่ค่าความเสียดทาน ต่ำมากทำให้ค่าประสิทธิภาพทางความร้อนที่ได้มีค่าสูง

ตารางที่ 7.1 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน และตัวประกอบการ เพิ่มสมรรถนะความร้อน กรณีติดตั้งครีบบบางวางลักษณะเอียง แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffles) ที่ทำมุมกับทิศทางการไหล (α) 60°

กรณีที่	e/H	P/H	\overline{Nu}/Nu_0	\overline{f}/f_0	\overline{TEF}
1	0.1	1.5	3.90277	9.955222	1.589286
2	0.1	2.0	3.047081	9.553222	1.258009
3	0.1	3.0	2.549195	6.928016	1.171431
4	0.2	1.5	4.836745	22.1528	1.508667
5	0.2	2.0	4.375185	19.03889	1.435376
6	0.2	3.0	3.554602	16.12856	1.232468
7	0.3	1.5	5.489122	50.92351	1.297318
8	0.3	2.0	5.079918	46.84844	1.234454
9	0.3	3.0	4.344189	44.03703	1.07767

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

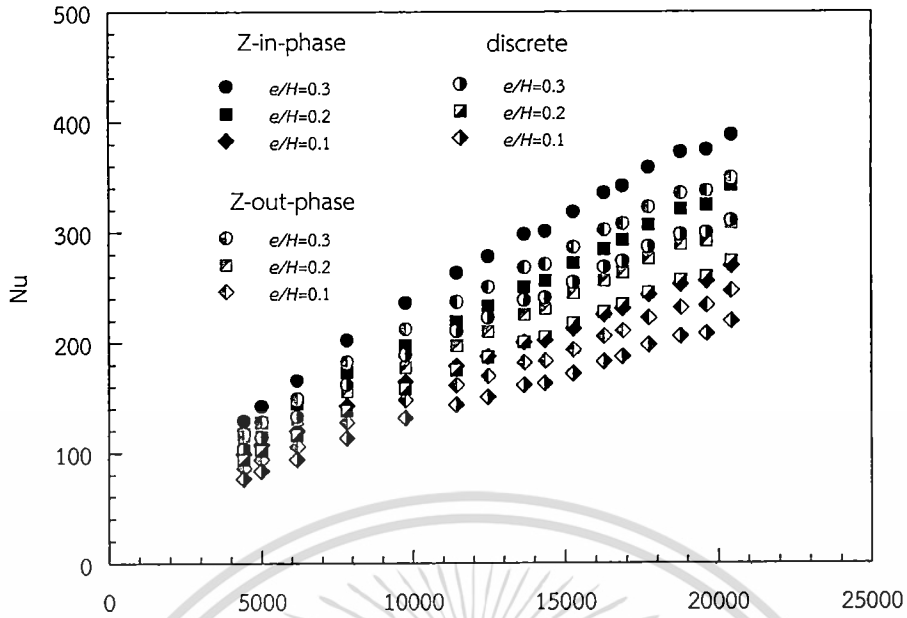
ตารางที่ 7.2 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ต์ อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน และตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อน กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางตรงกัน (Z-in-phase) ที่ทำมุมกับทิศทางการไหล (α) 60°

กรณีที่	e/H	P/H	\overline{Nu}/Nu_0	\overline{f}/f_0	\overline{TEF}
1	0.1	1.5	4.108144	11.55403	1.64375
2	0.1	2.0	3.715952	10.40569	1.5025
3	0.1	3.0	3.186494	8.4793	1.34375
4	0.2	1.5	5.09133	31.54305	1.411605
5	0.2	2.0	4.6029	28.06452	1.326871
6	0.2	3.0	3.949557	20.60648	1.262012
7	0.3	1.5	5.83905	59.39922	1.310987
8	0.3	2.0	5.4069	52.98762	1.261072
9	0.3	3.0	4.623	46.29303	1.127895

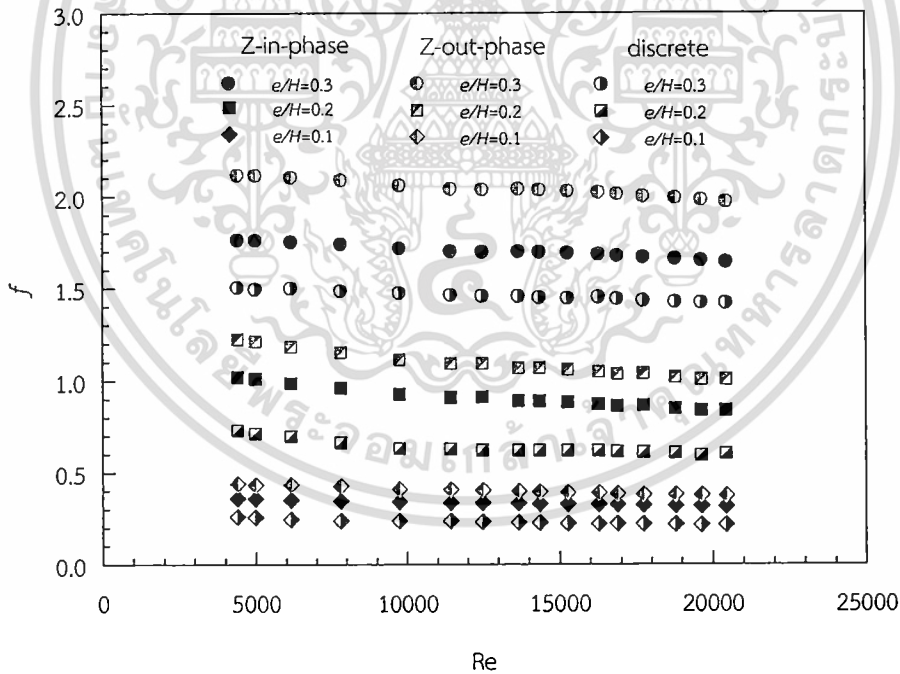
ตารางที่ 7.3 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ต์ อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน และตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อน กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก แบบวางเยื้องกัน (Z-out-phase) ที่ทำมุมกับทิศทางการไหล (α) 60°

กรณีที่	e/H	P/H	\overline{Nu}/Nu_0	\overline{f}/f_0	\overline{TEF}
1	0.1	1.0	3.327597	20.91406	1.058037
2	0.1	1.5	3.009921	13.94271	1.095526
3	0.1	2.0	2.58106	12.31143	0.979216
4	0.2	1.0	4.123962	56.77749	0.939952
5	0.2	1.5	3.730421	37.85166	0.973298
6	0.2	2.0	3.199142	33.67743	0.867835
7	0.3	1.0	4.729988	106.9186	0.873023
8	0.3	1.5	4.377377	71.27906	0.924861
9	0.3	2.0	3.743397	63.58514	0.821606

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

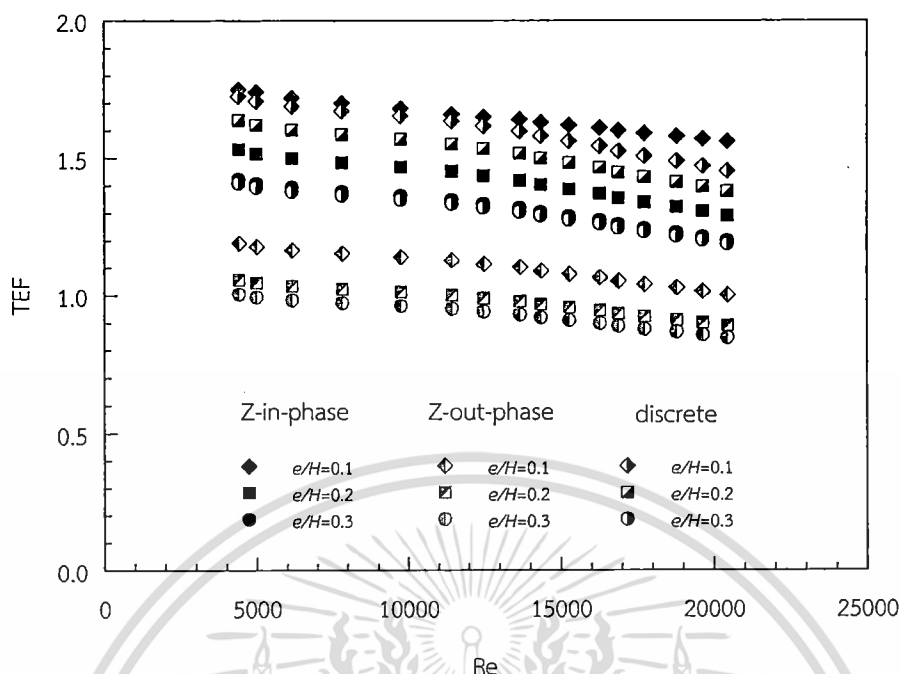


รูปที่ 7.16 ความสัมพันธ์ของเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางมุม 60° มีระยะพิตซ์ 45 mm ($P/H=1.5$) บนผนังด้านเดียว



รูปที่ 7.17 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางมุม 60° มีระยะพิตซ์ 45 mm ($P/H=1.5$) บนผนังด้านเดียว

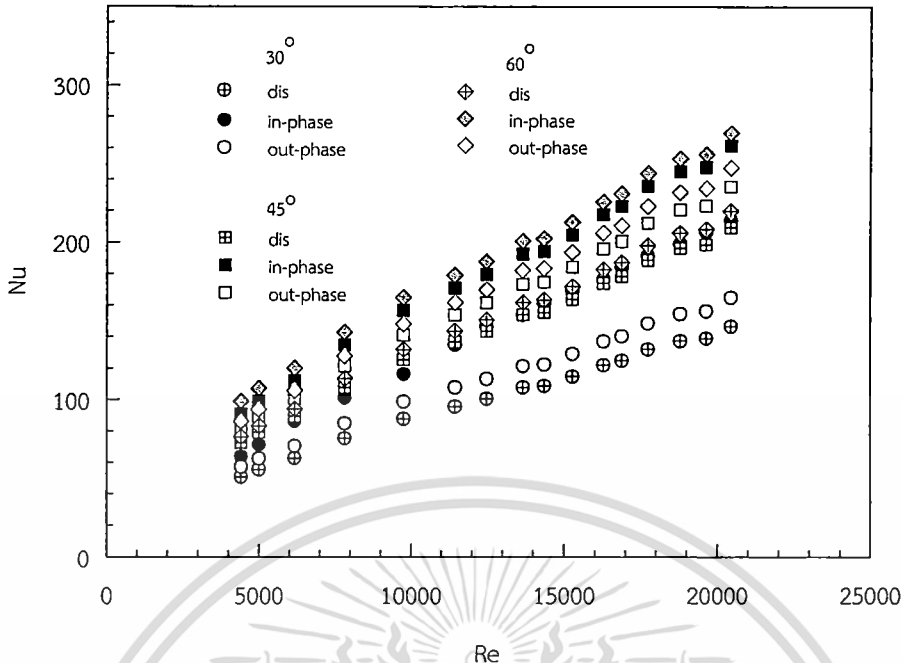
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



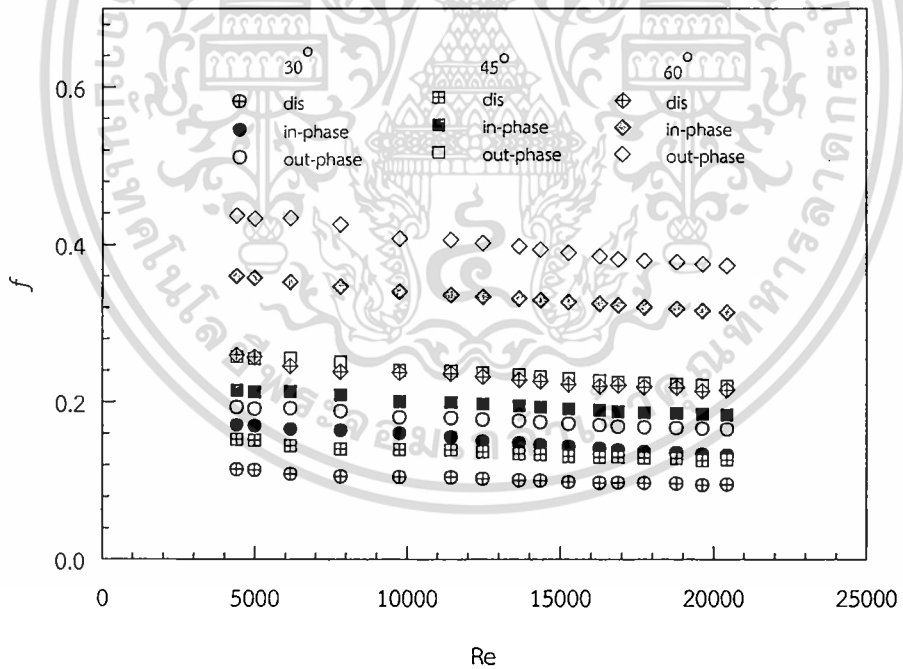
รูปที่ 7.18 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนกับเลขเรย์โนลด์กรณีติดตั้งครีบบางมุม 60° มีระยะพิตซ์ 45 mm ($P/H=1.5$) บนผนังด้านเดียว

7.6 การเปรียบเทียบลักษณะครีบบางที่ทำมุม 30° , 45° และ 60° บนผนังด้านเดียว

ในส่วนนี้จะเป็นการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองในบทที่ 5, 6 และ 7 แสดงในรูปที่ 7.19 – 7.21 แสดงอยู่ในกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Nu , f และ TEF กับ Re จากรูปจะเห็นได้ว่าที่ความสูงครีบบางและระยะพิตซ์เดียวกัน ครีบบางที่มีมุม 30° จะมีค่า Nu และ f น้อยที่สุดจากการที่มีจำนวนครีบบางน้อยที่สุดที่ระยะพิตซ์เดียวกัน และครีบบางที่มีมุม 60° จะมีค่า Nu และ f มากที่สุดจากการที่มีจำนวนครีบบางมากที่สุดที่ระยะพิตซ์เดียวกันดังแสดงในรูปที่ 4.18 แต่ในส่วนของค่า TEF นั้นเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่า Nu และ f ตามสมการในบทที่ 3 ซึ่งครีบบาง 45° จะมีค่ามากที่สุดจากความสัมพันธ์ของค่า Nu และ f ที่ค่า Nu มีค่าสูงแต่ค่า f มีค่าไม่สูงมากทำให้ค่า TEF มีค่าสูงที่สุดที่ลักษณะครีบบาง ความสูง และระยะพิตซ์เดียวกัน

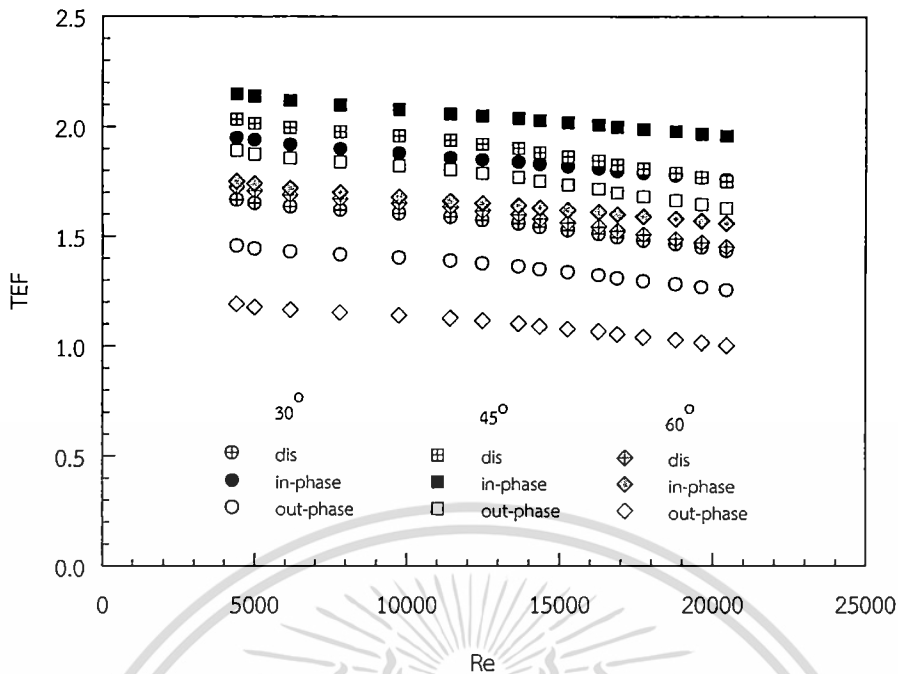


รูปที่ 7.19 ความสัมพันธ์ของเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์ ครีบบางที่ทำมุม 30°, 45° และ 60° บนผนังด้านเดียว มีความสูงครีบ 3 mm ($e/H=0.1$) และระยะพิตช์ 45 mm ($P/H=1.5$)



รูปที่ 7.20 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ ครีบบางที่ทำมุม 30°, 45° และ 60° บนผนังด้านเดียว มีความสูงครีบ 3 mm ($e/H=0.1$) และระยะพิตช์ 45 mm ($P/H=1.5$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



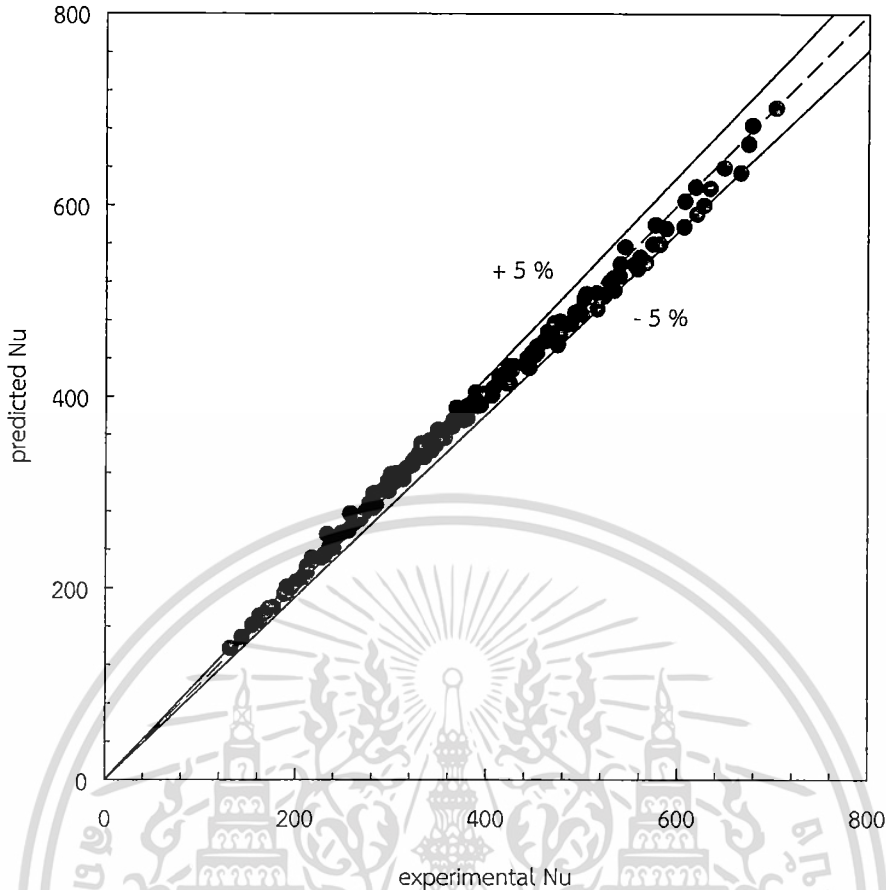
รูปที่ 7.21 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ ครีบบางที่ทำมุม 30° , 45° และ 60° บนผนังด้านเดียว มีความสูงครีบบาง 3 mm ($e/H=0.1$) และระยะพิตช์ 45 mm ($P/H=1.5$)

7.7 การสร้างสมการสหสัมพันธ์ครีบบางที่ทำมุม 45° บนผนังด้านเดียว

ในส่วนนี้จะเป็นการนำเอาค่าที่ได้จากการทดลองมาทำการหาสมการความสัมพันธ์ระหว่าง Nu และ f กับค่า Re ของครีบบางที่ทำมุม 45° บนผนังด้านเดียว แบบวางตรงกัน (Z-in-phase) ที่เลือกแบบนี้เนื่องจากเป็นแบบที่มีค่า TEF สูงที่สุด วิธีการทำสมการอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.4 ในบทที่ 3 สมการสหสัมพันธ์เลขนัสเซิลท์ (Nu)

ความสัมพันธ์ของเลขนัสเซิลท์ (Nu) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) อัตราส่วนระยะพิตช์ครีบบางต่อความสูงท่อ (P/H) ความสูงของครีบบาง (e/H) หาความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$Nu = 0.27860Re^{0.737182} Pr^{0.4} \left(\frac{e}{H} + 1 \right)^{2.81565} \left(\frac{P}{H} + 1 \right)^{-0.594355} \quad (7.1)$$



รูปที่ 7.22 ความสัมพันธ์ของสมการสหสัมพันธ์เลขนัสเซลท์ กับเลขนัสเซลท์จากการทดลอง กรณีติดตั้งครีบ Z-in-phase มุม 45° บนผนังด้านเดียว $e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3 , $P/H = 1, 2$ และ 3

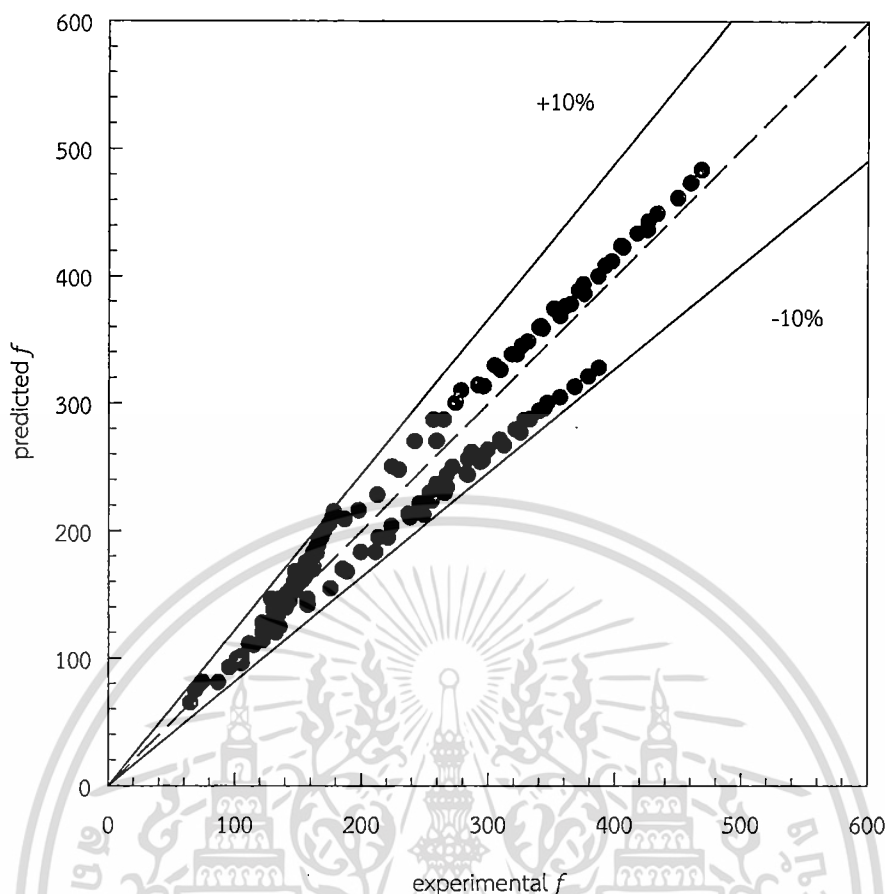
จากสมการสหสัมพันธ์ของเลขนัสเซลท์เรามาทำการหาค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับ Nu จากการทดลอง กรณีติดตั้งครีบบางที่ทำมุม 45° บนผนังด้านเดียว แบบวางตรงกัน (Z-in-phase) อัตราส่วนความสูงครีบต่อความสูงท่อ (e/H) 0.1, 0.2 และ 0.3 อัตราส่วนระยะพิชต์ครีบต่อความสูงท่อ (P/H) 1, 2 และ 3 โดยมีขอบเขตในช่วง $Re = 4400-20,400$ จากการทดลองพบว่าสมการดังกล่าวมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง $\pm 5\%$ ดังแสดงในรูปที่ 7.22

สมการสหสัมพันธ์ตัวประกอบเสียดทาน (f)

ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทาน (f) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) อัตราส่วนความสูงครีบต่อความสูงท่อ (e/H) และอัตราส่วนระยะพิชต์ครีบต่อความสูงท่อ (P/H) ความสูงของครีบ (e/H) หาความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$f = 0.349744Re^{-0.08657} \left(\frac{e}{H} + 1 \right)^{10.102637} \left(\frac{P}{H} + 1 \right)^{-0.8488399} \quad (7.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.23 ความสัมพันธ์ของสมการสหสัมพันธ์ตัวประกอบเสียตทาน กับเลขนัสเชิลท์จากการทดลอง กรณีติดตั้งครีบบางที่ทำมุม 45° บนผนังด้านเดียว $e/H = 0.1, 0.2$ และ $0.3, P/H = 1, 2$ และ 3

จากสมการสหสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียตทานเรามาทำการหาค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับ f จากการทดลอง กรณีติดตั้งครีบบางที่ทำมุม 45° บนผนังด้านเดียว แบบวางตรงกัน (Z-in-phase) อัตราส่วนความสูงครีบบต่อความสูงท่อ (e/H) $0.1, 0.2$ และ 0.3 อัตราส่วนระยะพิชต์ครีบบต่อความสูงท่อ (P/H) $1, 2$ และ 3 โดยมีขอบเขตในช่วง $Re = 4400-20,400$ จากการทดลองพบว่าสมการดังกล่าวมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง $\pm 10\%$ ดังแสดงในรูปที่ 7.23

7.8 สรุป

ผลการทดลองในส่วนที่ 3 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยใช้ครีบบางวางมุมเอียงกับทิศทางการไหล 60° โดยครีบบมีอยู่ด้วยกัน 3 ลักษณะคือ แบบครีบบางเอียงวางไม่ต่อเนื่อง (discrete inclined baffle), ครีบบางซิกแซกแบบวางตรงกัน (Z-in-phase) และแบบวางเอียงกัน (Z-out-phase) จากผลที่ได้เมื่อเปรียบเทียบที่ลักษณะของครีบบแบบ Z-in-phase จะให้ค่า Nu มากกว่าครีบบแบบอื่นที่ความสูงครีบบ และระยะพิชต์เท่ากันดังแสดงในรูปที่ 7.16 แต่ค่า f ครีบบแบบ Z-out-phase จะมีค่าสูงทำให้ค่า TEF ที่ได้ของครีบบลักษณะนี้มีค่าต่ำ โดยที่ครีบบลักษณะ Z-in-phase จะมีค่า TEF มากที่สุดเมื่อเทียบที่ความสูงครีบบ และระยะพิชต์เดียวกัน

ในส่วนของการเปรียบเทียบกับครีบบมุม 30° และ 45° นั้นเนื่องจากครีบบมุม 60° ตัวครีบบจะมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้ได้เห็นว่าเอกสารฉบับนี้มีการนำค่า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดที่สั้นมากกว่าครึ่งมุม 30° และ 45° ทำให้มีจำนวนครึ่งมากกว่าในพื้นที่ทดสอบที่เท่ากันดังแสดงในรูปที่ 4.18 ทำให้ค่า Nu และ f มากกว่าครึ่งมุม 30° และ 45° แต่ในส่วนของค่า TEF นั้นจะมีค่าต่ำกว่าครึ่งที่มุม 45° จากความสัมพันธ์ของสมการหาค่า TEF ในบทที่ 3 สมการที่ 3.50 ดังที่ได้อธิบายมาแล้วในหัวข้อที่ผ่านมา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 8

ครีบบาง แบบซิกแซก (zigzag, Z) มุม 45° บนผนังบน-ล่าง

8.1 บทนำ

ในบทนี้ กล่าวถึงผลการทดลองส่วนที่ 4 จากการทดลองที่ผ่านในบทที่ 5, 6 และ 7 เราได้ทราบว่าครีบบางแบบซิกแซกมุม 45° มีค่า TEF มากกว่าครีบบางแบบซิกแซกมุม 30° และ 60° ซึ่งในบทนี้จะทำการทดลองโดยเพิ่มเติมในส่วนของครีบบางมุม 45° เป็นการทดลองโดยการติดตั้งครีบบางที่ผนังด้านล่างเพื่อหาลักษณะการถ่ายเทความร้อนว่าจะมีผลอย่างไรบ้าง โดยจะศึกษาอิทธิพลของความสูง, ระยะพิตช์ และการจัดวางของครีบบางเช่นเดียวกับบทที่ผ่านมา โดยแบ่งการศึกษาในส่วนนี้ออกเป็น

- (1.1) ครีบบางวางลักษณะซิกแซก ติดครีบบน-ล่างวางกลับกัน (X) ที่ทำมุมกับทิศทางการไหล (α) 45° ลักษณะตามรูปที่ 4.20 ก) เพื่อศึกษาอิทธิพลของลักษณะของครีบบางในรูปแบบดังกล่าว และผลของความสูงครีบบาง 3, 6 และ 9 mm ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3) ระยะพิตช์ 45, 60 และ 90 mm ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0)
- (1.2) ครีบบางวางลักษณะซิกแซก ติดครีบบน-ล่างวางตรงกัน (Z) ที่ทำมุมกับทิศทางการไหล (α) 45° ลักษณะตามรูปที่ 4.20 ข) เพื่อศึกษาอิทธิพลของลักษณะของครีบบางในรูปแบบดังกล่าว และผลของความสูงครีบบาง 3, 6 และ 9 mm ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3) ระยะพิตช์ 45, 60 และ 90 mm ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0)
- (1.3) ครีบบางวางลักษณะซิกแซก ติดครีบบน-ล่างวางกลับกันแต่แถวเอียงกัน (XS) ที่ทำมุมกับทิศทางการไหล (α) 45° ลักษณะตามรูปที่ 4.20 ค) เพื่อศึกษาอิทธิพลของลักษณะของครีบบางในรูปแบบดังกล่าว และผลของความสูงครีบบาง 3, 6 และ 9 mm ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3) ระยะพิตช์ 45, 60 และ 90 mm ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0)
- (1.4) ครีบบางวางลักษณะซิกแซก ติดครีบบน-ล่างเหมือนกันแต่แถวเอียงกัน (ZS) ที่ทำมุมกับทิศทางการไหล (α) 45° ลักษณะตามรูปที่ 4.20 ง) เพื่อศึกษาอิทธิพลของลักษณะของครีบบางในรูปแบบดังกล่าว และผลของความสูงครีบบาง 3, 6 และ 9 mm ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3) ระยะพิตช์ 45, 60 และ 90 mm ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0)
- (1.5) การเปรียบเทียบลักษณะครีบบางที่ทำมุม 45° บนผนังบน-ล่าง จากการทดลองในหัวข้อที่ผ่านมาจะนำเอาลักษณะของครีบบางที่มีค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนที่สูงนำมาเปรียบเทียบกับที่ความสูงครีบบาง และระยะพิตช์เดียวกัน
- (1.6) การเปรียบเทียบลักษณะครีบบางที่ทำมุม 45° ทั้งแบบผนังด้านบน และผนังบนและล่าง ในหัวข้อนี้จะเป็นการเปรียบเทียบครีบบางมุม 45° ผนังด้านเดียวจากในหัวข้อที่ 6 กับครีบบางมุม 45° ผนังสองด้านในหัวข้อนี้ เพื่อเป็นการเทียบหา TEF ที่มีค่าสูงที่สุด

ทำการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนในพจน์ของ Nu และการสูญเสียความดันในพจน์ของ f จากนั้นก็เปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันกับท่อผนังเรียบ และ TEF ซึ่งเป็นข้อมูลที่คำนวณที่กำลังขับเดียวกัน โดยกำหนดจากค่า Re ของการทดลอง มีผลดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

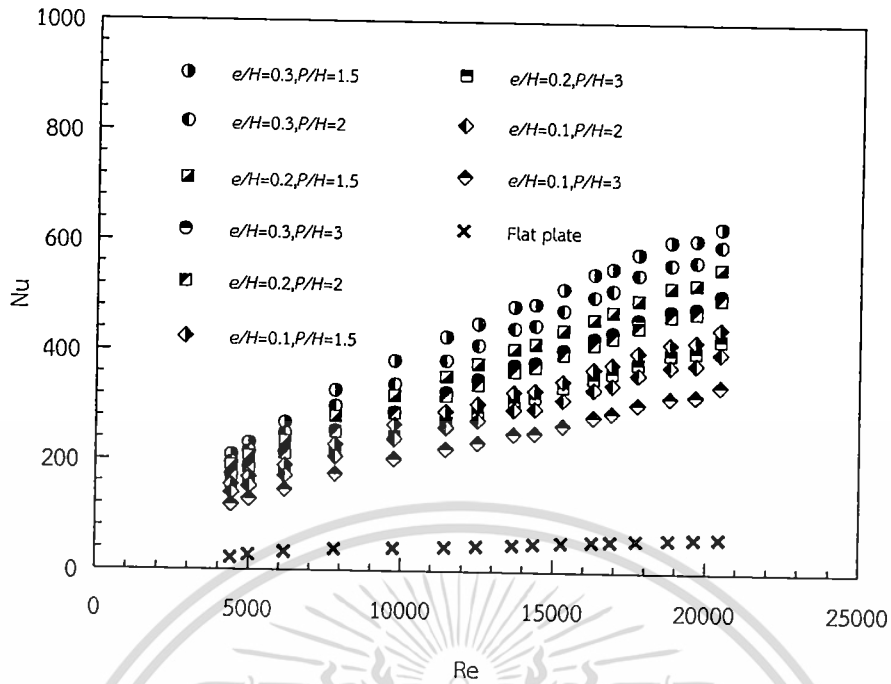
8.2 ครีบบางวางลักษณะซิกแซก ติดครีบบน-ล่างวางกลับกัน (X)

ในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาถึงลักษณะของครีบบางวางลักษณะซิกแซก ติดแบบ X ดังแสดงในรูปที่ 4.20 ก) ซึ่งในการทดลองได้ทำการทดลองในหลายลักษณะ ประกอบไปด้วย ความสูง (e) ทั้งหมด 3 ความสูงคือ 3, 6 และ 9 mm ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3) และระยะพิตช์ (P) ทั้งหมด 3 ระยะคือ 45, 60 และ 90 mm ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0) โดยจะทำการหาผลของการเปลี่ยนความสูง และระยะพิตช์ต่อครีบบนลักษณะดังกล่าว ซึ่งการที่จะนำเสนอผลการทดลองเพื่อให้เห็นถึงพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนจะแสดงเป็นกราฟของ Nu, f และ TEF

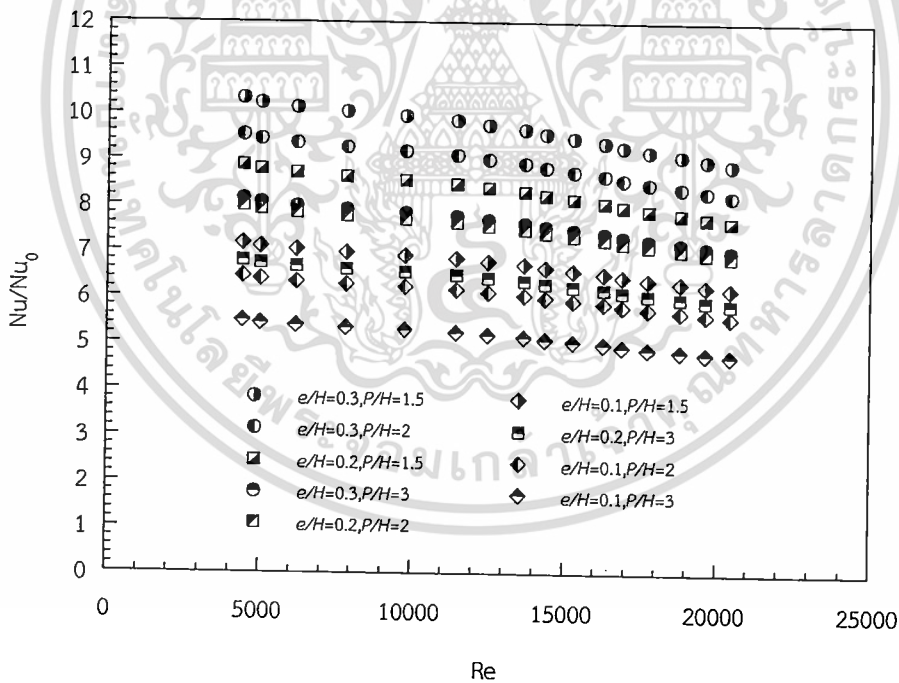
8.2.1 ความสูง ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3)

ผลการทดลองของครีบบางวางลักษณะซิกแซก ติดแบบ X ทำมุมกับทิศทางการไหล 45° มีความสูงสม่ำเสมอ 3 แบบ $e = 3, 6$ และ 9 mm ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3) Nu ที่ได้จากการทดสอบในช่วงการไหลปั่นป่วน แสดงในรูปที่ 8.1 จากรูปกราฟเราจะเห็นถึงค่า Nu มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามค่า Re ที่เพิ่มขึ้น จากการศึกษาที่ค่า Re มีค่าสูงการไหลยิ่งปั่นป่วนมาก มีผลทำให้การถ่ายเทความร้อนยิ่งสูงขึ้น โดยในส่วนของความสูงครีบบน ยังมีค่าสูงมากกว่าค่า Nu จะมีค่ามากกว่าความสูงครีบบนน้อยกว่า จากกราฟที่ระยะพิตช์ 45 mm ($P/H = 1.5$) ที่ความสูงครีบบน 9 mm ($e/H = 0.3$) จะมีค่า Nu มากที่สุดเรียงลงมาตามความสูงที่ลดลง โดยที่ความสูง $e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3 จะมีค่า Nu มากกว่าแผ่นเรียบในช่วง 716-617%, 888-764% และ 1033-889% ตามลำดับ ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ดังแสดงในรูปที่ 8.2 เนื่องจากครีบบนที่สูงจะเป็นตัวที่ทำให้ของไหลที่ไหลผ่านเกิดการไหลแบบปั่นป่วนมากยิ่งขึ้น จะทำให้การถ่ายเทความร้อนยิ่งสูงขึ้นตาม

ในส่วนของ f จะมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของค่า Re และในส่วนของความสูงครีบบนยิ่งครีบบนมีความสูงมาก ค่า f จะมีค่าสูงขึ้นตามดังแสดงในรูปที่ 8.3 โดยที่ระยะพิตช์ 45 mm ($P/H = 1.5$) ที่ความสูงครีบบน 9 mm ($e/H = 0.3$) จะมีค่า f มากที่สุดเรียงลงมาตามความสูงที่ลดลง โดยที่ความสูง $e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3 จะมีค่า f มากกว่าแผ่นเรียบในช่วง 11.4-13.2, 30.9-35.9 และ 58.2-67.6 เท่าตามลำดับ ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ดังแสดงในรูปที่ 8.4 เนื่องจากครีบบนที่สูงจะยิ่งขวางการเคลื่อนที่ของของไหลทำให้เกิดผลต่างความดันของของไหลมากกว่าระหว่างทางเข้า กับทางออกจากแผ่นทดสอบซึ่งทำให้ค่า f มีค่าสูงตามสมการที่ 3.2 แสดงในบทที่ 3

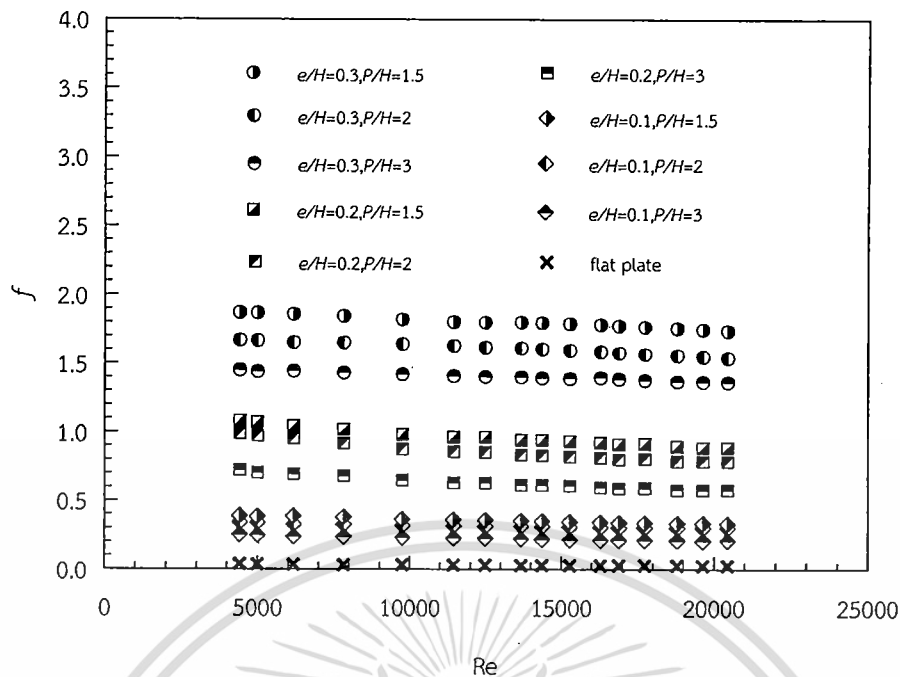


รูปที่ 8.1 ความสัมพันธ์ของเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก ครีบบน-ล่างวางสลับกัน (X)

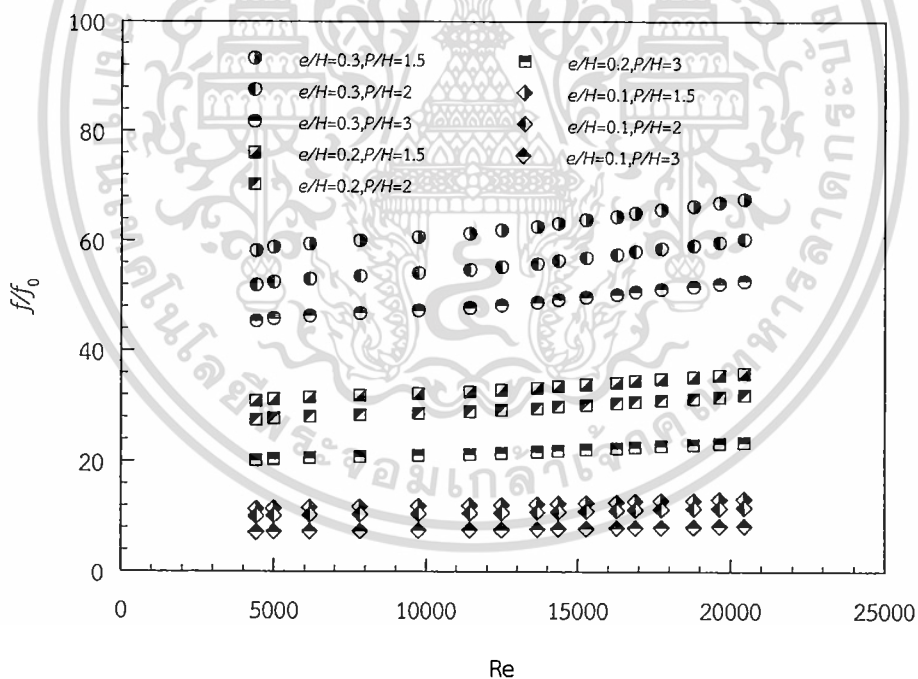


รูปที่ 8.2 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก ครีบบน-ล่างวางสลับกัน (X)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.3 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก ครีบบน-ล่างวางกลับกัน (X)



รูปที่ 8.4 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก ครีบบน-ล่างวางกลับกัน (X)

8.2.2 ระยะพิตช์ ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0)

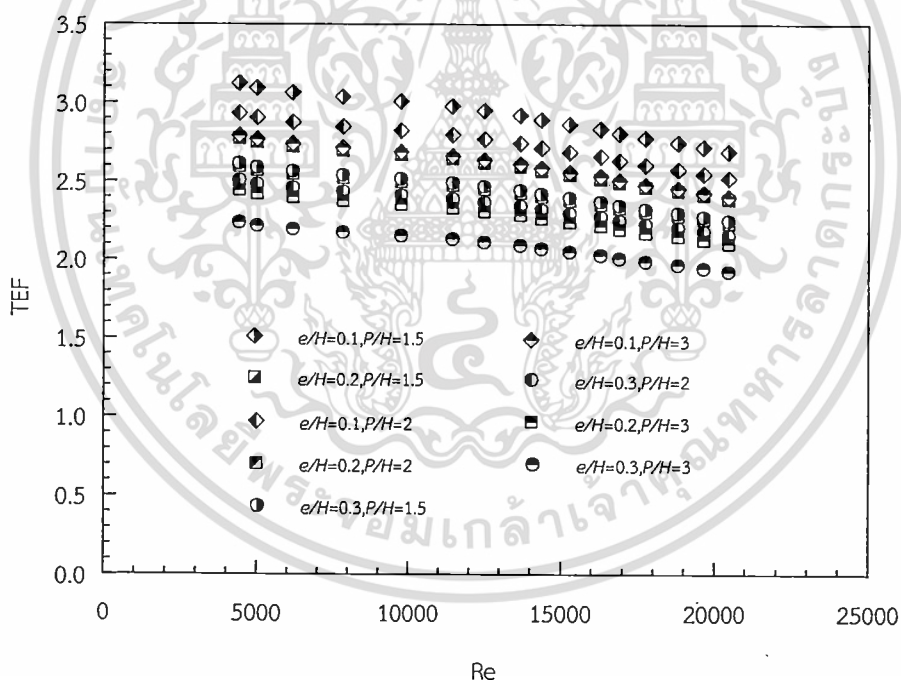
ผลการทดลองของติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก ติดแบบ X ทำมุมกับทิศทางการไหล 45° มีระยะพิตช์ 3 แบบ $P = 45, 60$ และ 90 mm ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0) Nu ที่ได้จากการทดสอบในช่วงการไหลปั่นป่วน แสดงในรูปที่ 8.1 จากรูปกราฟเราจะเห็นถึงผลของระยะพิตช์ ยังมีค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ในเชิงพาณิชย์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้อยค่า Nu จะมีค่ามากยิ่งขึ้น จากกราฟที่ความสูงครีบบน 9 mm ($e/H = 0.3$) ที่ระยะพิตช์ 45 mm ($P/H = 1.5$) จะมีค่า Nu มากที่สุดเรียงลงมาตามระยะพิตช์ที่เพิ่มขึ้น โดยที่ระยะพิตช์ $P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0 จะมีค่า Nu มากกว่าแผ่นเรียบในช่วง 1033-889%, 953-821% และ 814-701% ตามลำดับ ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ดังแสดงในรูปที่ 8.2 เนื่องจากครีบบนเป็นตัวที่ทำให้ของไหลที่ไหลผ่านเกิดการไหลแบบปั่นป่วน ทำให้เพิ่มการถ่ายเทความร้อนให้สูงขึ้น เมื่อมีระยะพิตช์สั้นจะทำให้ของไหลจะไหลไปเจอครีบบนมากขึ้น ซึ่งทำให้ของไหลปั่นป่วนมาก และการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นตาม

ในส่วนของตัวประกอบเสียดทานส่วนของระยะพิตช์ยังมีระยะสั้น ค่า f จะมีค่าสูงขึ้นตามดังแสดงในรูปที่ 8.3 โดยที่ความสูงครีบบน 9 mm ($e/H = 0.3$) ที่ระยะพิตช์ 45 mm ($P/H = 1.5$) จะมีค่า f มากที่สุดเรียงลงมาตามระยะพิตช์ที่ลดลง ที่ระยะพิตช์ $P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0 จะมีค่า f มากกว่าแผ่นเรียบในช่วง 58.2-67.6, 51.9-61.3 และ 45.4-52.7 เท่าตามลำดับ ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ดังแสดงในรูปที่ 8.4 เนื่องจากระยะพิตช์ที่สั้นจะมีจำนวนแถวของครีบบนเยอะกว่าเมื่อเทียบกับระยะพิตช์ที่ยาว ในระยะช่วงทดสอบเดียวกัน จะทำให้ของไหลต้องเจอครีบบนขวางการไหลมากแกว่าทำให้ความดันตกคร่อมมีค่าสูง ส่งผลให้ค่า f ประกอบเพิ่มสูงขึ้นตาม

8.2.3 ตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อน (TEF)



รูปที่ 8.5 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนกับเลขเรย์โนลด์กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก ครีบบน-ล่างวางกลับกัน (X)

จากรูปกราฟที่ 8.2 และ 8.4 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของสัดส่วน Nu และ f ซึ่งทั้งสองค่านี้นำมาคำนวณเป็นค่า TEF ตามสมการที่ 3.50 ในบทที่ 3 ซึ่งจะเป็นค่าที่แสดงถึงประสิทธิภาพทางความร้อน โดยจะเป็นการคิดถึงพลังงานที่ใช้ในการขับของไหลผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนกับค่าพลังงานที่ได้จากการแลกเปลี่ยนความร้อน จากรูปที่ 8.5 แสดงให้เห็นถึงค่า TEF ที่มีค่าลดลงตามค่า Re ที่เพิ่มขึ้น ครีบบนที่มีความสูง 0.3 mm ($e/H = 0.1$) ระยะพิตช์ 45 mm ($P/H = 1.5$) มีค่า TEF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

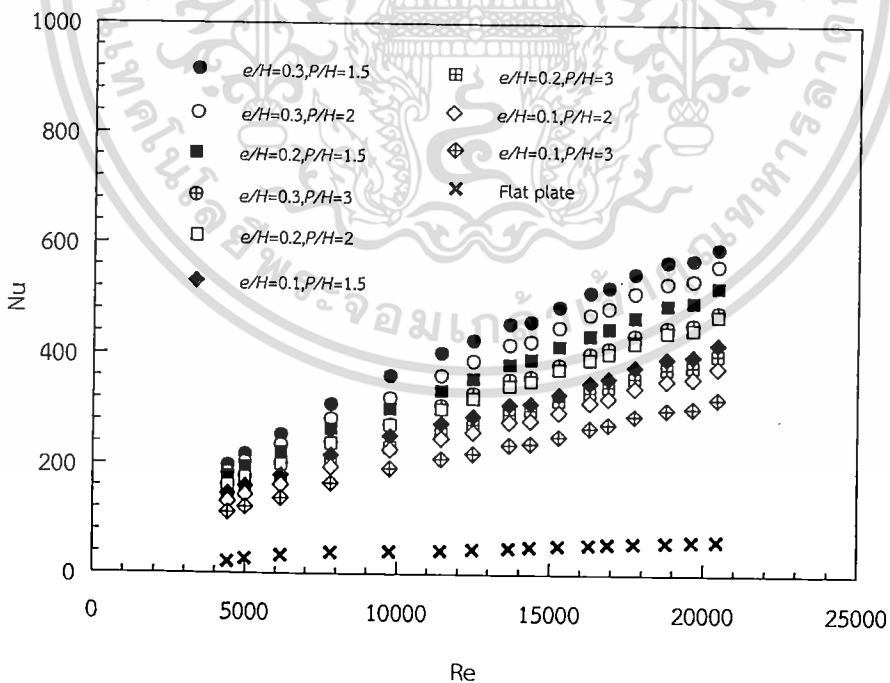
สูงมากที่สุดคือมีค่าอยู่ในช่วง 3.12-2.69 ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ซึ่งค่า TEF จะมีค่าสูงที่สุดเมื่อค่า Re มีค่าต่ำที่สุด

8.3 ครีบบางวางลักษณะซิกแซก ติดครีบบน-ล่างวางตรงกัน (Z)

ในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาถึงลักษณะของครีบบางวางลักษณะซิกแซก ติดแบบ Z ดังแสดงในรูปที่ 4.20 ข) ซึ่งในการทดลองได้ทำการทดลองในหลายลักษณะ ประกอบไปด้วย ความสูง (e) ทั้งหมด 3 ความสูงคือ 3, 6 และ 9 mm ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3) และระยะพิตช์ (P) ทั้งหมด 3 ระยะคือ 45, 60 และ 90 mm ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0) โดยจะทำการหาผลของการเปลี่ยนความสูง และระยะพิตช์ต่อครีบบนลักษณะดังกล่าว ซึ่งการที่จะนำเสนอผลการทดลองเพื่อให้เห็นถึงพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนจะแสดงเป็นกราฟของ Nu, f และ TEF

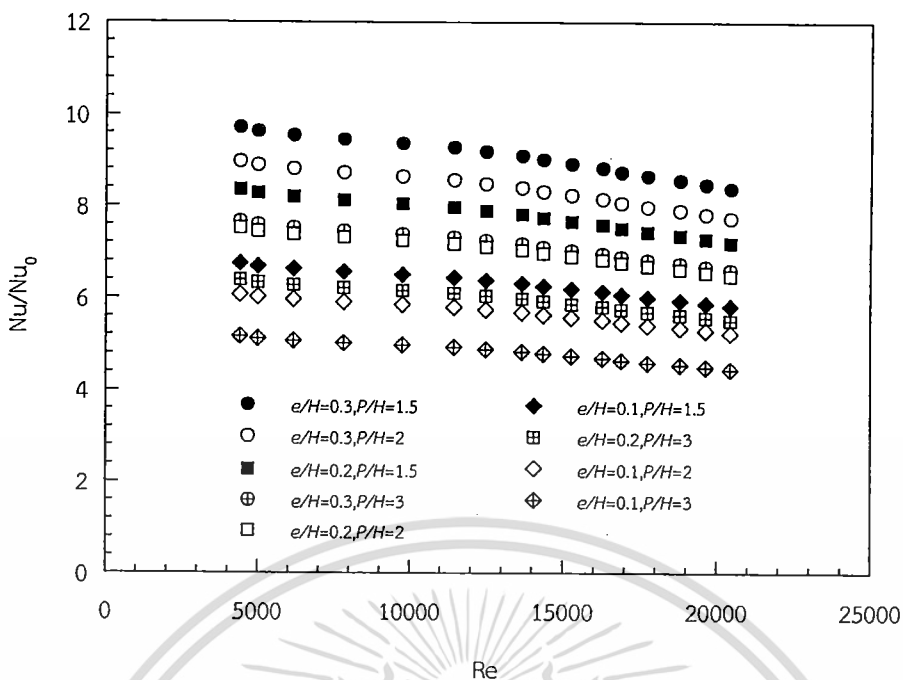
8.3.1 ความสูง ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3)

ผลการทดลองของครีบบางวางลักษณะซิกแซก ติดแบบ Z 45° มีความสูงสม่ำเสมอ 3 แบบ $e = 3, 6$ และ 9 mm ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3) Nu ที่ได้จากการทดสอบในช่วงการไหลปั่นป่วนแสดงในรูปที่ 8.6 จากรูปกราฟเราจะเห็นถึงค่า Nu มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามค่า Re ที่เพิ่มขึ้น ในส่วนของความสูงครีบบน ยังมีความสูงมากค่า Nu จะมีค่ามากกว่าความสูงครีบบนที่น้อยกว่า เช่นเดียวกับลักษณะครีบบนเอียงแบบไม่ต่อเนื่องในหัวข้อ 8.2.1 จากกราฟที่ระยะพิตช์ 45 mm ($P/H = 1.5$) ที่ความสูงครีบบน 9 mm ($e/H = 0.3$) จะมีค่า Nu มากที่สุดเรียงลงมาตามความสูงที่ลดลง โดยที่ความสูง $e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3 จะมีค่า Nu มากกว่าแผ่นเรียบในช่วง 674-580%, 835-719% และ 972-837% ตามลำดับ ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ดังแสดงในรูปที่ 8.7

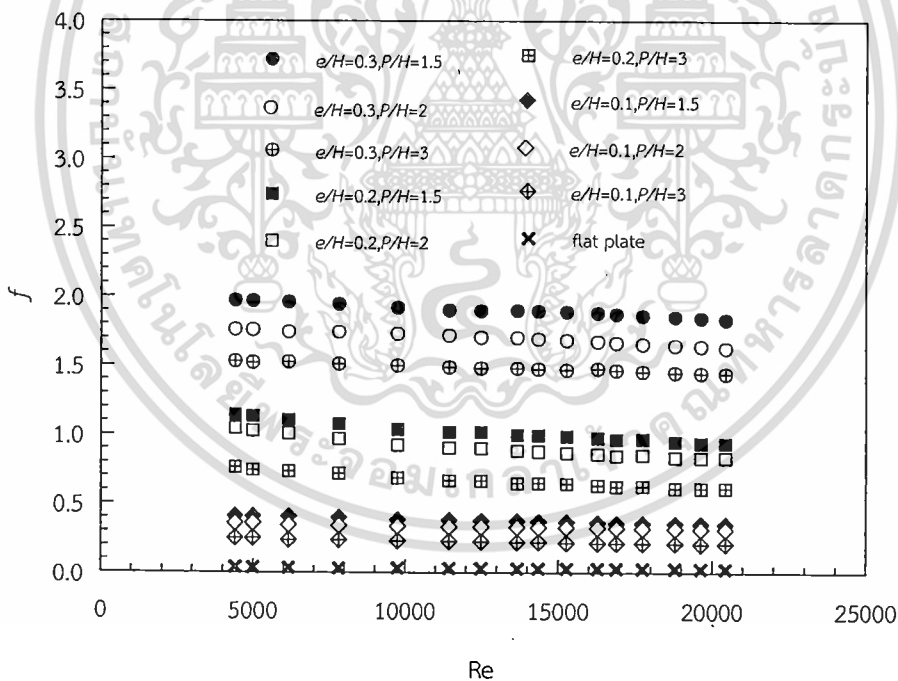


รูปที่ 8.6 ความสัมพันธ์ของเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก ครีบบน-ล่างวางตรงกัน (Z)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

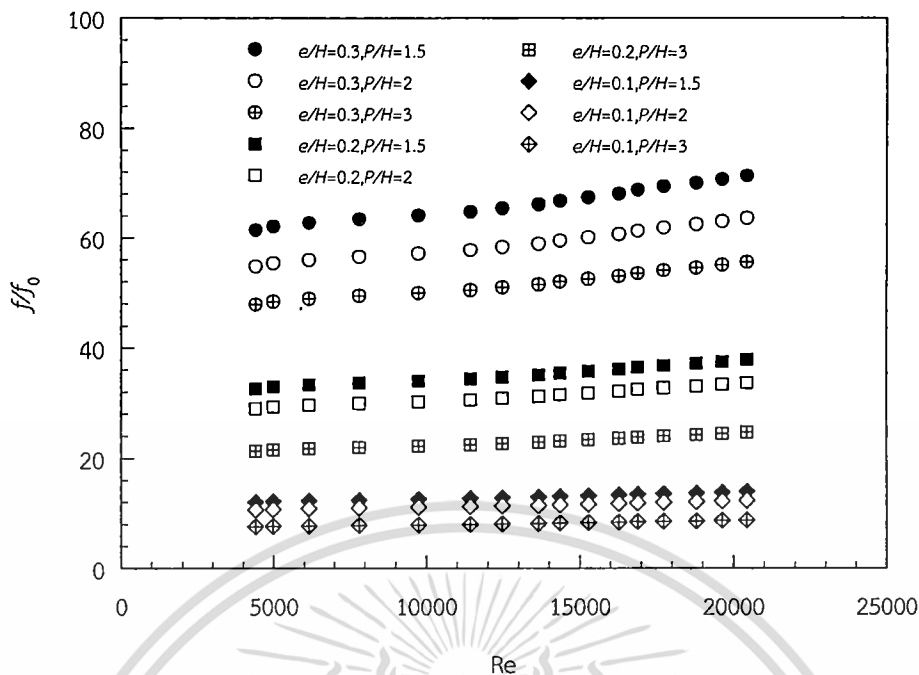


รูปที่ 8.7 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก ครีบบน-ล่างวางตรงกัน (Z)



รูปที่ 8.8 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก ครีบบน-ล่างวางตรงกัน (Z)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.9 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวาง ลักษณะซิกแซก ครีบบน-ล่างวางตรงกัน (Z)

ในส่วนของ f จะมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของค่า Re และในส่วนของความสูงครีบบน-ล่างยิ่งครีบบน-ล่างสูงมาก ค่า f จะมีค่าสูงขึ้นเช่นเดียวกับครีบบน-ล่างในหัวข้อที่ 8.2.1 ตามที่แสดงในรูปที่ 8.8 โดยที่ระยะพิตช์ 45 mm ($P/H = 1.5$) ที่ความสูงครีบบน-ล่าง 9 mm ($e/H = 0.3$) จะมีค่า f มากที่สุดเรียงลงมาตามความสูงที่ลดลง โดยที่ความสูง $e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3 จะมีค่า f มากกว่าแผ่นเรียบในช่วง 12.0-14.0, 32.6-37.9 และ 61.4-71.3 เท่าตามลำดับ ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ดังแสดงในรูปที่ 8.9

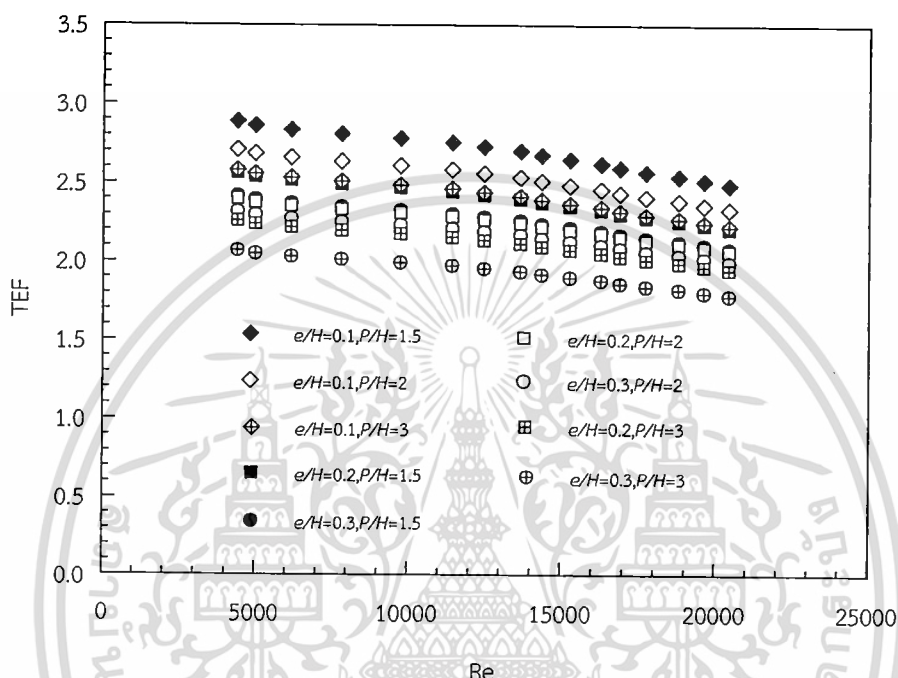
8.3.2 ระยะพิตช์ ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0)

ผลการทดลองของครีบบางวางลักษณะซิกแซก ติดแบบ $Z 45^\circ$ มีระยะพิตช์ 3 แบบ $P = 45, 60$ และ 90 mm ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0) Nu ที่ได้จากการทดสอบในช่วงการไหลปั่นป่วน แสดงในรูปที่ 8.6 จากรูปกราฟเราจะเห็นถึงผลของระยะพิตช์ ยังมีค่าน้อยค่า Nu จะมีค่ามากยิ่งขึ้นเช่นเดียวกับครีบบน-ล่างในหัวข้อที่ 8.2.2 จากกราฟที่ความสูงครีบบน-ล่าง 9 mm ($e/H = 0.3$) ที่ระยะพิตช์ 45 mm ($P/H = 1.5$) จะมีค่า Nu มากที่สุดเรียงลงมาตามระยะพิตช์ที่เพิ่มขึ้น โดยที่ระยะพิตช์ $P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0 จะมีค่า Nu มากกว่าแผ่นเรียบในช่วง 972-837%, 897-773% และ 766-660% ตามลำดับ ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ดังแสดงในรูปที่ 8.7

ในส่วนของ f ส่วนของระยะพิตช์ยังมีระยะสั้น ค่า f จะมีค่าสูงขึ้นตามดังแสดงในรูปที่ 8.8 โดยที่ความสูงครีบบน-ล่าง 9 mm ($e/H = 0.3$) ที่ระยะพิตช์ 45 mm ($P/H = 1.5$) จะมีค่า f มากที่สุดเรียงลงมาตามระยะพิตช์ที่ลดลง ที่ระยะพิตช์ $P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0 จะมีค่า f มากกว่าแผ่นเรียบในช่วง 61.4-71.3, 54.8-63.6, และ 47.9-55.6 เท่าตามลำดับ ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ดังแสดงในรูปที่ 8.9 เช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 8.2.2

8.3.3 ตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อน (TEF)

จากรูปกราฟที่ 8.7 และ 8.9 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของสัดส่วน Nu และ f ซึ่งทั้งสองค่านี้นำมาคำนวณเป็นค่า TEF เช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 8.2.3 จากรูปที่ 8.10 แสดงให้เห็นถึงค่า TEF ที่มีค่าลดลงตามค่า Re ที่เพิ่มขึ้น ครีบบที่มีความสูง 0.3 mm ($e/H = 0.1$) ระยะพิตช์ 45 mm ($P/H = 1.5$) มีค่า TEF สูงมากที่สุดคือมีค่าอยู่ในช่วง 2.89-2.49 ในช่วงค่าเลขเรย์โนลด์ 4400-20,400 ซึ่งค่า TEF จะมีค่าสูงที่สุดเมื่อค่าเลขเรย์โนลด์มีค่าต่ำที่สุด

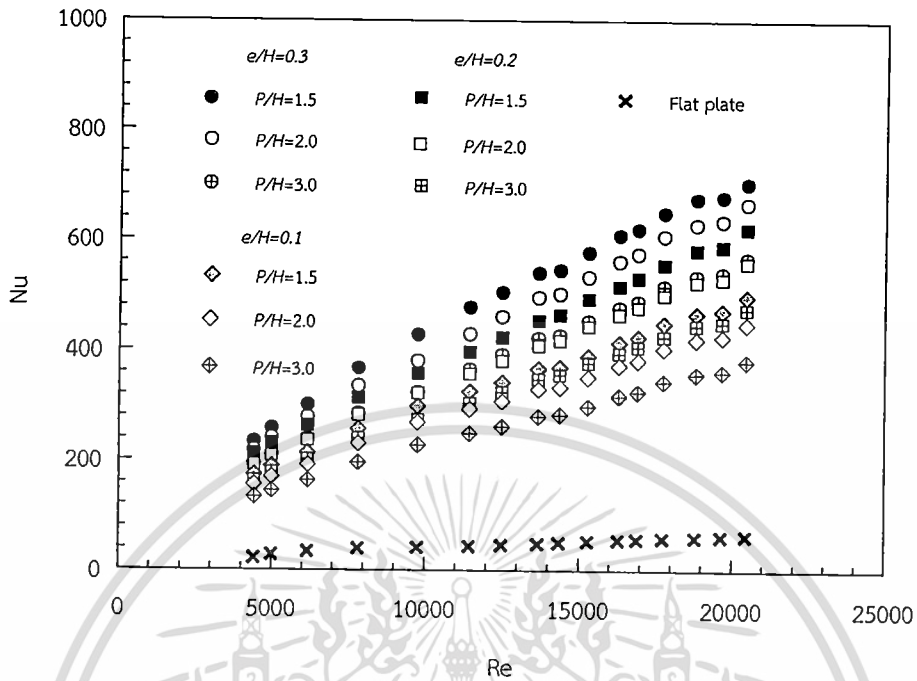


รูปที่ 8.10 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนกับเลขเรย์โนลด์กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก ครีบบน-ล่างวางตรงกัน (Z)

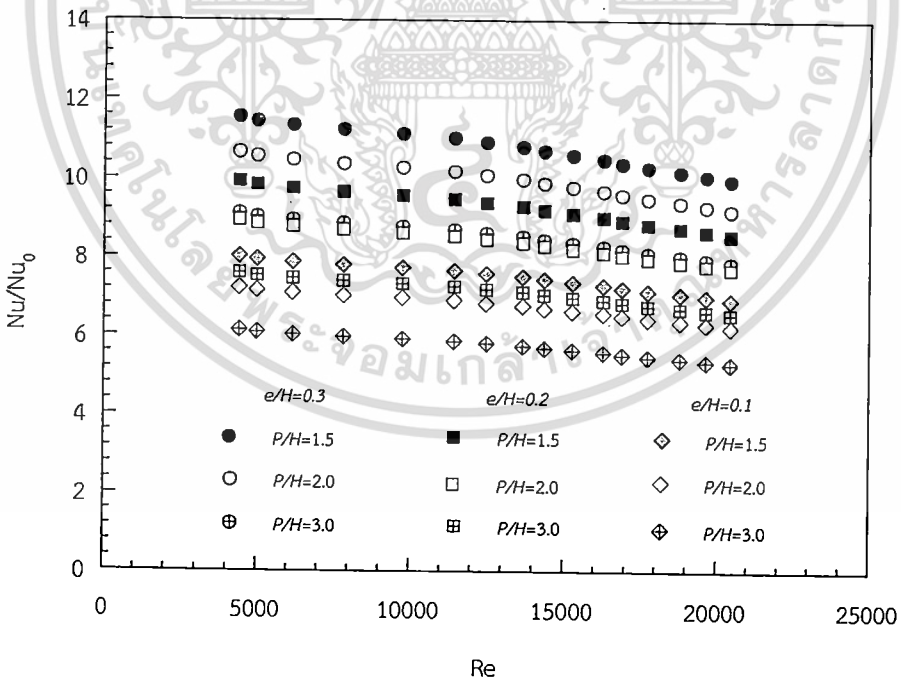
8.4 ครีบบางวางลักษณะซิกแซก ติดครีบบน-ล่างวางกลับกันแต่แถวเอียงกัน (XS)

ในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาถึงลักษณะของครีบบางวางลักษณะซิกแซก ครีบบน-ล่างวางกลับกันและวางแถวเอียงกัน (XS) ดังแสดงในรูปที่ 4.20 ค) ซึ่งในการทดลองได้ทำการทดลองในหลายลักษณะ ประกอบไปด้วย ความสูง (e) ทั้งหมด 3 ความสูงคือ 3, 6 และ 9 mm ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3) และระยะพิตช์ (P) ทั้งหมด 3 ระยะคือ 45, 60 และ 90 mm ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0) ในการทดลองส่วนนี้จะเพิ่มการทดลองที่ระยะพิตช์ 45 mm ($P/H = 1.5$) ซึ่งในการทดลองแบบวางตรงกันจะทำได้เนื่องจากว่าส่วนยอดของมุมครีบบนจะวางชนกัน แต่ในการทดลองที่วางครีบบนเอียงกันนั้นส่วนยอดของมุมครีบบนจะวางเอียงกันทำให้ไม่ชนกันจึงสามารถทำการติดตั้งครีบบนเพื่อทำการทดลองได้ โดยจะทำการหาผลของการเปลี่ยนความสูง และระยะพิตช์ต่อครีบบนในลักษณะดังกล่าว ซึ่งการที่จะนำเสนอผลการทดลองเพื่อให้เห็นถึงพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนจะแสดงเป็นกราฟของ Nu, f และ TEF

8.4.1 ความสูง ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3)

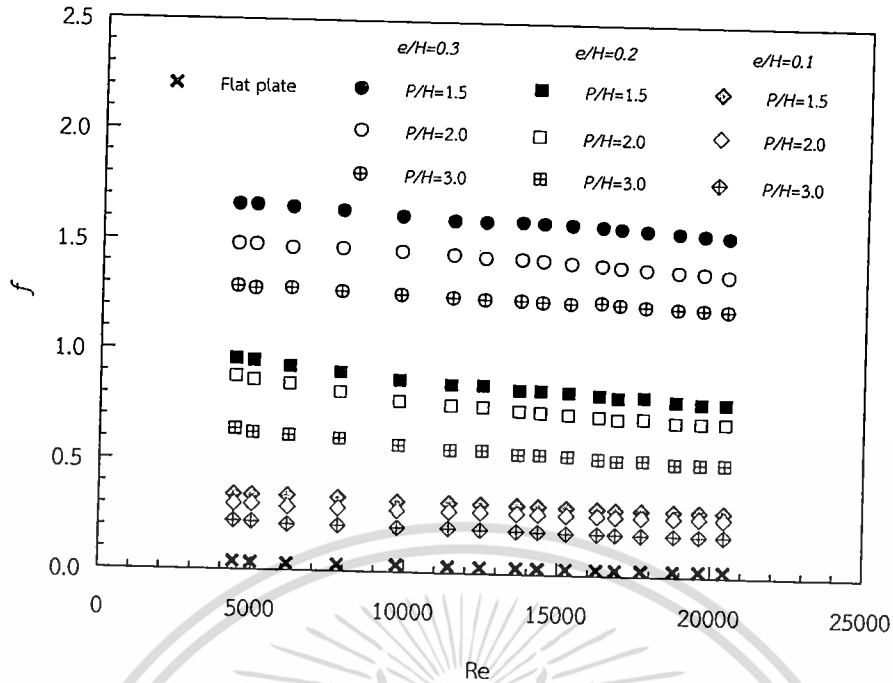


รูปที่ 8.11 ความสัมพันธ์ของเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก ครีบบน-ล่างวางกลับกันแต่แถวเยื้องกัน (XS)

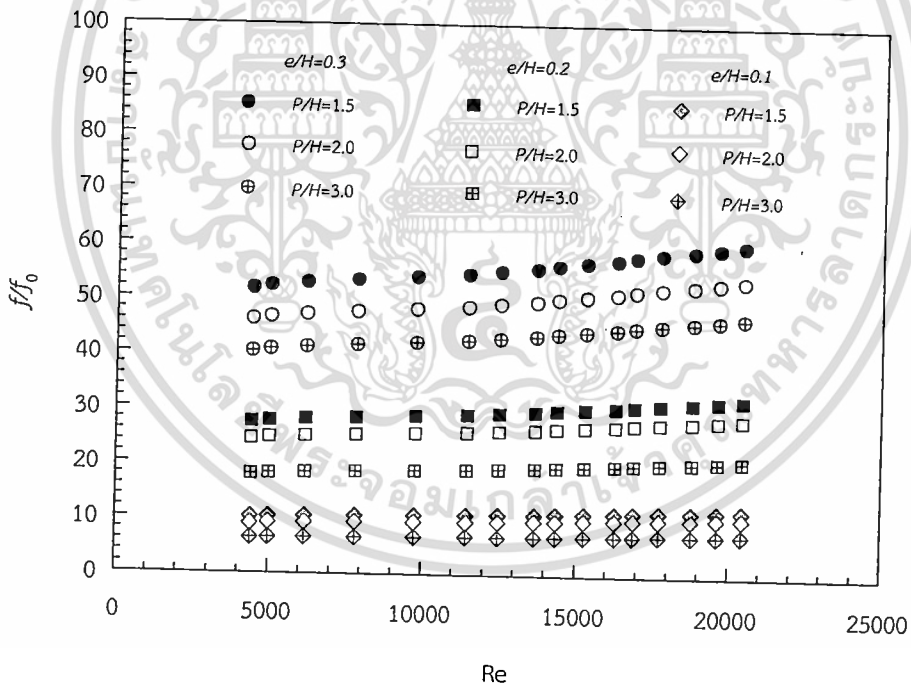


รูปที่ 8.12 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก ครีบบน-ล่างวางกลับกันแต่แถวเยื้องกัน (XS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.13 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก ครีบบน-ล่างวางกลับกันแต่แถวเยื้องกัน (XS)



รูปที่ 8.14 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก ครีบบน-ล่างวางกลับกันแต่แถวเยื้องกัน (XS)

ผลการทดลองของครีบบางวางลักษณะซิกแซก ติดครีบบน XS 45° มีความสูงสม่ำเสมอ 3 แบบ $e = 3, 6$ และ 9 mm ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3) Nu ที่ได้จากการทดสอบในช่วงการไหลปั่นป่วน แสดงในรูปที่ 8.11 จากรูปภาพเราจะเห็นถึงค่า Nu มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามค่า Re ที่เพิ่มขึ้น ในส่วนของความสูงครีบบน ยังมีความสูงมากกว่า Nu จะมีค่ามากกว่าความสูงครีบบนที่น้อยกว่า เช่นเดียวกับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะครีบบี้อย่างแบบไม่ต่อเนื่องในหัวข้อ 8.2.1 จากกราฟที่ระยะพิตช์ 45 mm ($P/H = 1.5$) ที่ความสูงครีบบี 9 mm ($e/H = 0.3$) จะมีค่า Nu มากที่สุดเรียงลงมาตามความสูงที่ลดลง โดยที่ความสูง $e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3 จะมีค่า Nu มากกว่าแผ่นเรียบในช่วง 801-690%, 992-854% และ 1154-994% ตามลำดับ ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ดังแสดงในรูปที่ 8.12

ในส่วนของ f จะมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของค่า Re และในส่วนของความสูงครีบบี้อย่างครีบบีความสูงมาก ค่า f จะมีค่าสูงขึ้นเช่นเดียวกับครีบบีในหัวข้อที่ 8.2.1 ตามดังแสดงในรูปที่ 8.13 โดยที่ระยะพิตช์ 30 mm ($P/H = 1$) ที่ความสูงครีบบี 9 mm ($e/H = 0.3$) จะมีค่า f มากที่สุดเรียงลงมาตามความสูงที่ลดลง โดยที่ความสูง $e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3 จะมีค่า f มากกว่าแผ่นเรียบในช่วง 10.1-11.8, 27.5-31.9 และ 51.7-60.1 เท่าตามลำดับ ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ดังแสดงในรูปที่ 8.14

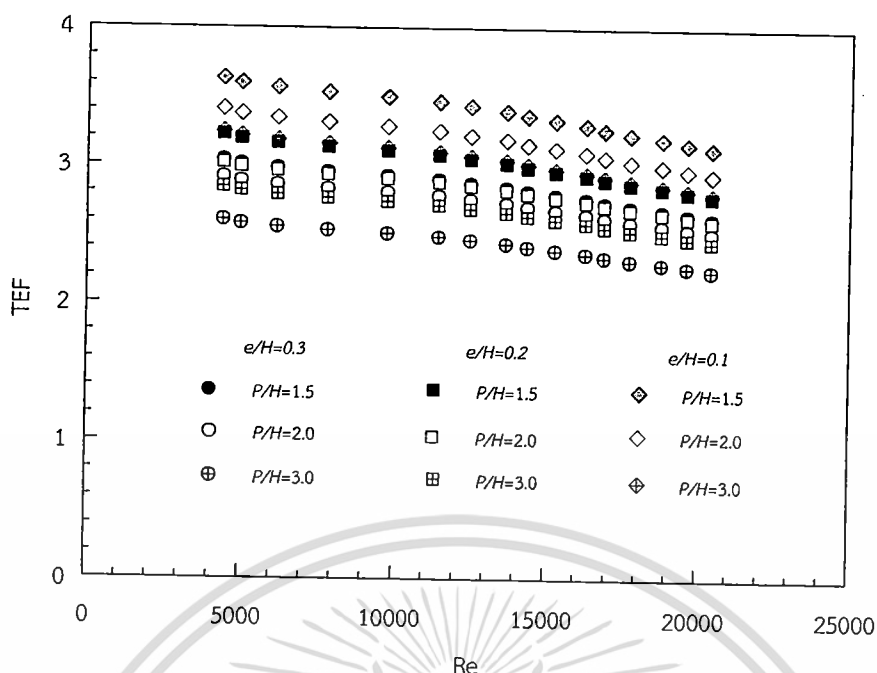
8.4.2 ระยะพิตช์ ($P/H = 1, 1.5$ และ 2.0)

ผลการทดลองของครีบบางวางลักษณะซิกแซก ติดครีบบีแบบ $XS 45^\circ$ มีระยะพิตช์ 3 แบบ $P = 45, 60$ และ 90 mm ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0) Nu ที่ได้จากการทดสอบในช่วงการไหลปั่นป่วนแสดงในรูปที่ 8.11 จากรูปกราฟเราจะเห็นถึงผลของระยะพิตช์ ยังมีค่าน้อยค่า Nu จะมีค่ามากยิ่งขึ้นเช่นเดียวกับครีบบีในหัวข้อที่ 8.2.2 จากกราฟที่ความสูงครีบบี 9 mm ($e/H = 0.3$) ที่ระยะพิตช์ 30 mm ($P/H = 1.5$) จะมีค่า Nu มากที่สุดเรียงลงมาตามระยะพิตช์ที่เพิ่มขึ้น โดยที่ระยะพิตช์ $P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0 จะมีค่า Nu มากกว่าแผ่นเรียบในช่วง 1154-994%, 1065-917% และ 910-783% ตามลำดับ ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ดังแสดงในรูปที่ 8.12

ในส่วนของ f ส่วนของระยะพิตช์ยังมีระยะสั้น ค่า f จะมีค่าสูงขึ้นตามดังแสดงในรูปที่ 8.13 โดยที่ความสูงครีบบี 9 mm ($e/H = 0.3$) ที่ระยะพิตช์ 30 mm ($P/H = 1.5$) จะมีค่า f มากที่สุดเรียงลงมาตามระยะพิตช์ที่ลดลง ที่ระยะพิตช์ $P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0 จะมีค่า f มากกว่าแผ่นเรียบในช่วง 51.7-60.1, 46.1-53.6, และ 40.3-46.8 เท่าตามลำดับ ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ดังแสดงในรูปที่ 8.14 เช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 8.2.2

8.4.3 ตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อน (TEF)

จากรูปกราฟที่ 8.12 และ 8.14 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของสัดส่วน Nu และ f ซึ่งทั้งสองค่านี้นำมาคำนวณเป็นค่า TEF เช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 8.2.3 จากรูปที่ 8.15 แสดงให้เห็นถึงค่า TEF ที่มีค่าลดลงตามค่า Re ที่เพิ่มขึ้น ครีบบีที่มีความสูง 0.3 mm ($e/H = 0.1$) ระยะพิตช์ 45 mm ($P/H = 1.5$) มีค่า TEF สูงมากที่สุดคือมีค่าอยู่ในช่วง 3.63-3.13 ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ซึ่งค่า TEF จะมีค่าสูงที่สุดเมื่อค่า Re มีค่าต่ำที่สุด



รูปที่ 8.15 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนกับเลขเรย์โนลด์กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก ครีบบน-ล่างวางกลับกันแต่แถวเยื้องกัน (XS)

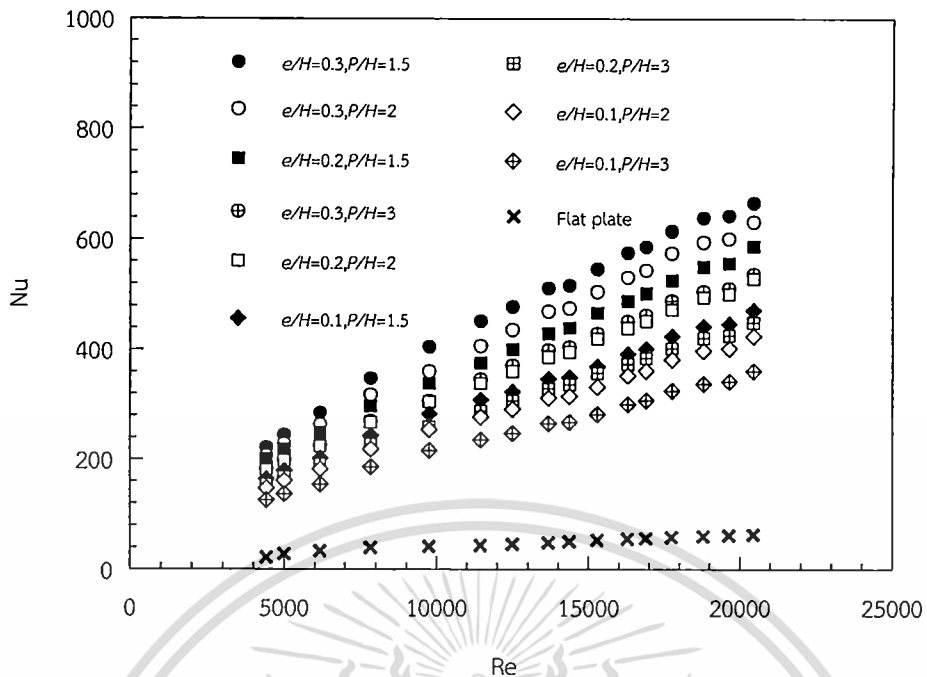
8.5 ครีบบางวางลักษณะซิกแซก ครีบบน-ล่างเหมือนกันแต่แถวเยื้องกัน (ZS)

ในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาถึงลักษณะของครีบบางวางลักษณะซิกแซก ครีบบน-ล่างเหมือนกันแต่แถวเยื้องกัน (ZS) ดังแสดงในรูปที่ 4.20 ง) ซึ่งในการทดลองได้ทำการทดลองในหลายลักษณะประกอบไปด้วย ความสูง (e) ทั้งหมด 3 ความสูงคือ 3, 6 และ 9 mm ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3) และระยะพิตช์ (P) ทั้งหมด 3 ระยะคือ 45, 60 และ 90 mm ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0) ในการทดลองส่วนนี้จะเพิ่มการทดลองที่ระยะพิตช์ 45 mm ($P/H = 1.5$) ซึ่งในการทดลองแบบวางตรงกันจะทำไม่ได้เนื่องจากว่าส่วนยอดของมุมครีบบจะวางชนกัน แต่ในการทดลองที่วางครีบบแบบเยื้องกันนั้น ส่วนยอดของมุมครีบบจะวางเยื้องกันทำให้ไม่ชนกันจึงสามารถทำการติดตั้งครีบบเพื่อทำการทดลองได้ โดยจะทำการหาผลของการเปลี่ยนความสูง และระยะพิตช์ต่อครีบบในลักษณะดังกล่าว ซึ่งการที่จะนำเสนอผลการทดลองเพื่อให้เห็นถึงพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนจะแสดงเป็นกราฟของ Nu, f และ TEF

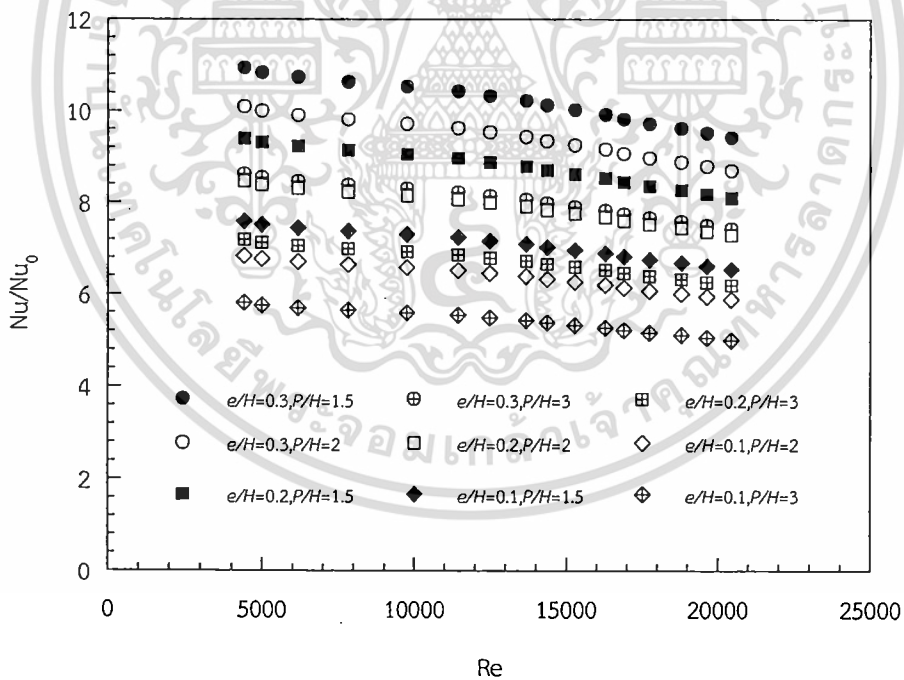
8.5.1 ความสูง ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3)

ผลการทดลองของครีบบางวางลักษณะซิกแซก ติดครีบบแบบ ZS 45° มีความสูงสม่ำเสมอ 3 แบบ $e = 3, 6$ และ 9 mm ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3) Nu ที่ได้จากการทดสอบในช่วงการไหลปั่นป่วน แสดงในรูปที่ 8.16 จากกราฟเราจะเห็นถึงค่า Nu มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามค่า Re ที่เพิ่มขึ้น ในส่วนของความสูงครีบบ ยิ่งมีความสูงมากค่า Nu จะมีค่ามากกว่าความสูงครีบบที่น้อยกว่า เช่นเดียวกับลักษณะครีบบเรียงแบบไม่ต่อเนื่องในหัวข้อ 8.2.1 จากกราฟที่ระยะพิตช์ 45 mm ($P/H = 1.5$) ที่ความสูงครีบบ 9 mm ($e/H = 0.3$) จะมีค่า Nu มากที่สุดเรียงลงมาตามความสูงที่ลดลง โดยที่ความสูง $e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3 จะมีค่า Nu มากกว่าแผ่นเรียบในช่วง 759-653%, 940-809% และ 1094-942% ตามลำดับ ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ดังแสดงในรูปที่ 8.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

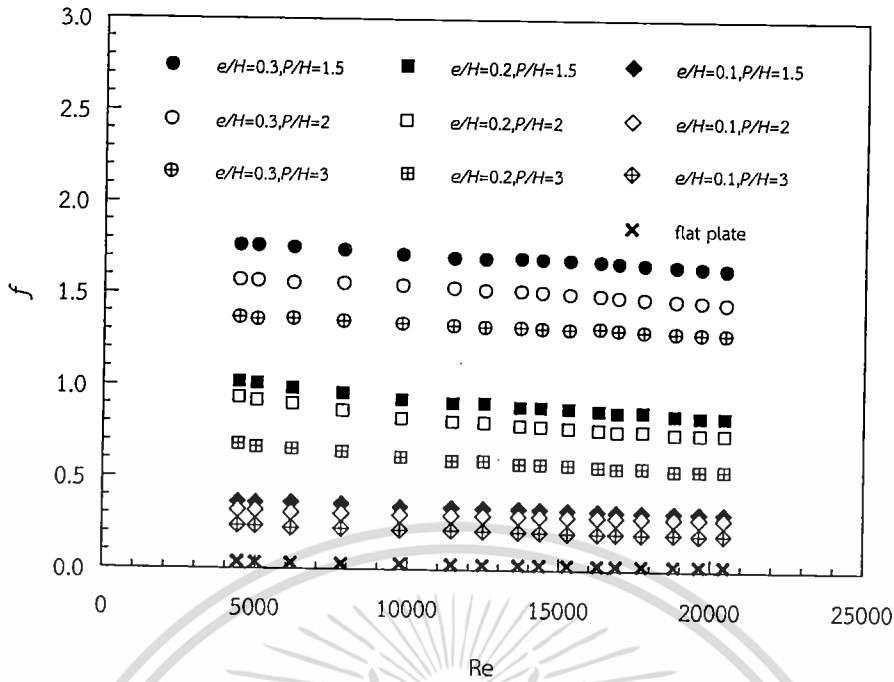


รูปที่ 8.16 ความสัมพันธ์ของเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก ครีบบน-ล่างเหมือนกันแต่แถวเยื้องกัน (ZS)

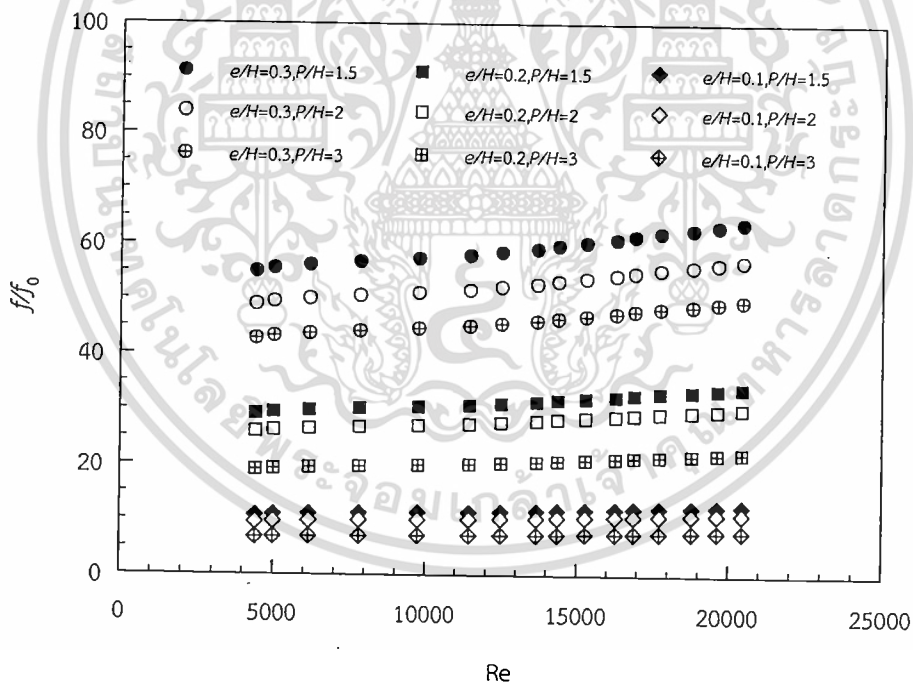


รูปที่ 8.17 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก ครีบบน-ล่างเหมือนกันแต่แถวเยื้องกัน (ZS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.18 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก ครีบบน-ล่างเหมือนกันแต่แฉกเอียงกัน (ZS)



รูปที่ 8.19 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก ครีบบน-ล่างเหมือนกันแต่แฉกเอียงกัน (ZS)

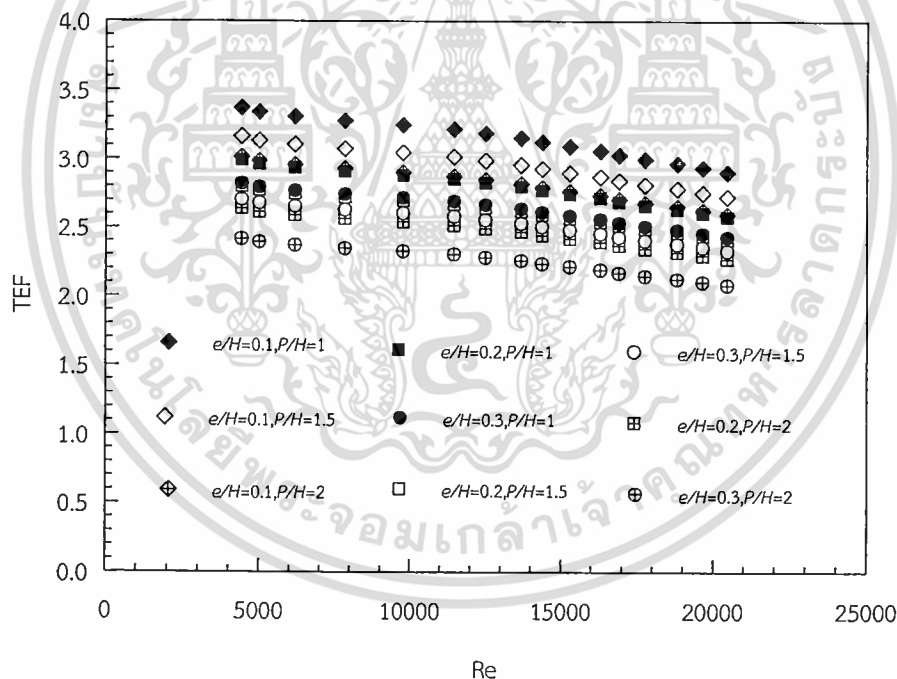
ในส่วนของ f จะมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของค่า Re และในส่วนของความสูงครีบบ้างครีบบีความสูงมาก ค่า f จะมีค่าสูงขึ้นเช่นเดียวกับครีบบนในหัวข้อที่ 8.2.1 ตามดังแสดงในรูปที่ 8.18 โดยที่ระยะพิตซ์ 45 mm ($P/H = 1.5$) ที่ความสูงครีบบี 9 mm ($e/H = 0.3$) จะมีค่า f มากที่สุดเรียงลงมาตามความสูงที่ลดลง โดยที่ความสูง $e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3 จะมีค่า f มากกว่าแผ่นเรียบในช่วงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10.8-12.5, 29.2-33.9 และ 55.0-63.8 เท่าตามลำดับ ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ดังแสดงในรูปที่ 8.19

8.5.2 ระยะเวลาพิตช์ ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0)

ผลการทดลองของครีบบางวางลักษณะซิกแซก ติดครีบบนแบบ ZS 45° มีระยะเวลาพิตช์ 3 แบบ 45, 60 และ 90 mm ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0) Nu ที่ได้จากการทดสอบในช่วงการไหลปั่นป่วน แสดงในรูปที่ 8.16 จากรูปกราฟเราจะเห็นถึงผลของระยะเวลาพิตช์ ยังมีค่าน้อยค่า Nu จะมีค่ามากยิ่งขึ้น เช่นเดียวกับครีบบนในหัวข้อที่ 8.2.2 จากกราฟที่ความสูงครีบบน 9 mm ($e/H = 0.3$) ที่ระยะเวลาพิตช์ 45 mm ($P/H = 1.5$) จะมีค่า Nu มากที่สุดเรียงลงมาตามระยะเวลาพิตช์ที่เพิ่มขึ้น โดยที่ระยะเวลาพิตช์ $P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0 จะมีค่า Nu มากกว่าแผ่นเรียบในช่วง 1094-942%, 1009-869% และ 862-742% ตามลำดับ ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ดังแสดงในรูปที่ 8.17

ในส่วนของ f ส่วนของระยะเวลาพิตช์ยังมีระยะสั้น ค่า f จะมีค่าสูงขึ้นตามดังแสดงในรูปที่ 8.18 โดยที่ความสูงครีบบน 9 mm ($e/H = 0.3$) ที่ระยะเวลาพิตช์ 45 mm ($P/H = 1.5$) จะมีค่า f มากที่สุดเรียงลงมาตามระยะเวลาพิตช์ที่ลดลง ที่ระยะเวลาพิตช์ $P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0 จะมีค่า f มากกว่าแผ่นเรียบ ในช่วง 55.0-63.8, 49.0-56.9, และ 42.8-49.7 เท่าตามลำดับ ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ดังแสดงในรูปที่ 8.19 เช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 8.2.2



รูปที่ 8.20 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนกับเลขเรย์โนลด์กรณิตัดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก ครีบบน-ล่างเหมือนกันแต่แฉวยเอียงกัน (ZS)

8.5.3 ตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อน (TEF)

จากรูปกราฟที่ 8.17 และ 8.19 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของสัดส่วน Nu และ f ซึ่งทั้งสองค่านี้นำมาคำนวณเป็นค่า TEF เช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 8.2.3 จากรูปที่ 8.20 แสดงให้เห็นถึงค่า TEF ที่มีค่าลดลงตามค่า Re ที่เพิ่มขึ้น ครีบบนที่มีความสูง 0.3 mm ($e/H = 0.1$) ระยะเวลาพิตช์ 45 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

($P/H = 1.5$) มีค่า TEF สูงมากที่สุดคือมีค่าอยู่ในช่วง 3.37-2.90 ในช่วงค่า $Re = 4400-20,400$ ซึ่งค่า TEF จะมีค่าสูงที่สุดเมื่อค่า Re มีค่าต่ำที่สุด

8.6 การเปรียบเทียบลักษณะครีบบางที่ทำมุม 45° บนผนังบน-ล่าง

หัวข้อที่ผ่านมาในบทนี้จะเป็นครีบบางทำมุมกับการไหลของของไหล 45° ติดอยู่บนผนังด้านบนของช่วงทดสอบ ซึ่งมีการทดลองลักษณะครีบบางทั้งหมด 27 ลักษณะ โดยจะสรุปค่าเฉลี่ยของสัดส่วนเลขนัสเซลท์ (Nu/Nu_0) สัดส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) และค่า TEF แสดงในตารางที่ 8.1-8.4 แยกตามลักษณะของครีบบาง และแสดงผลกราฟเปรียบเทียบผลการทดลองของครีบบางในแต่ละลักษณะที่มีระยะพิตซ์ 45 mm ($P/H=1.5$) ซึ่งจะแสดงอยู่ในกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Nu , f และ TEF กับ Re ดังแสดงในรูปที่ 8.21 – 8.23 จากตารางจะเห็นได้ว่าครีบบางที่มีความสูงครีบบางและระยะพิตซ์มีผลต่อค่า Nu , f และ TEF โดยที่ครีบบางที่สูง และระยะพิตซ์ที่ยังแคบค่า Nu และ f จะยิ่งสูงแต่ในส่วน of ค่า TEF นั้นจะมีค่าสูงที่ครีบบางที่มีความสูงต่ำแต่ระยะพิตซ์แคบ เนื่องจากผลของค่า f ที่มีค่าสูงตามความสูงของครีบบางทำให้ค่า TEF มีค่าต่ำ แต่ระยะพิตซ์ที่แคบช่วยเพิ่มค่า Nu มากกว่าการเพิ่มของค่า f ทำให้ค่า TEF มีค่าสูงที่ลักษณะดังกล่าว ในส่วนของกราฟจะเห็นว่าครีบบางวางลักษณะซิกแซก ติดครีบบางแบบ XS ที่มีความสูงครีบบาง 9 mm ระยะพิตซ์ 45 mm (XS, $e/H=0.3$, $P/H=1.5$) มีค่า Nu มากที่สุดจากรูปที่ 8.21 ในส่วนของค่า f ครีบบางวางลักษณะซิกแซก ติดครีบบางแบบ Z ที่มีความสูงครีบบาง 9 mm ระยะพิตซ์ 45 mm (Z, $e/H=0.3$, $P/H=1.5$) จะมีค่ามากกว่าครีบบางในลักษณะอื่น จากรูปที่ 8.22 ซึ่งเมื่อมาพิจารณาที่กราฟ TEF ในรูป 8.23 จะเห็นว่าผลของค่า f ส่งผลต่อค่า TEF คือยิ่งมีค่ามากค่า TEF จะมีค่าต่ำตามสมการที่ 3.50 ที่ได้อธิบายไปในหัวข้อที่ผ่านมา ส่วนค่า TEF ที่มีค่ามากที่สุดคือ ครีบบางวางลักษณะซิกแซก ติดครีบบางแบบ XS ที่มีความสูงครีบบาง 3 mm ระยะพิตซ์ 45 mm (XS, $e/H=0.1$, $P/H=1.5$) เนื่องจากเป็นครีบบางที่ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่ไม่สูงมากแต่ค่าความเสียดทานต่ำมากทำให้ค่าประสิทธิภาพทางความร้อนที่ได้มีค่าสูง

ตารางที่ 8.1 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน และตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อน กรณีติดตั้ง ครีบบางวางลักษณะซิกแซก ครีบบางบน-ล่างวางกลับกัน (X) ที่ทำมุมกับการไหล (α) 45°

กรณีที่	e/H	P/H	Nu/Nu_0	f/f_0	TEF
1	0.1	1.5	6.667258	12.30239	2.905975
2	0.1	2.0	6.000532	10.86303	2.726134
3	0.1	3.0	5.100453	7.721275	2.596491
4	0.2	1.5	8.259496	33.39852	2.580589
5	0.2	2.0	7.433546	29.71538	2.414775
6	0.2	3.0	6.318515	21.81863	2.275169
7	0.3	1.5	9.610549	62.89329	2.431576
8	0.3	2.0	8.8705	56.10454	2.331435
9	0.3	3.0	7.574994	49.01615	2.082622

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ใช้โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 8.2 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์ อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน และตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อน กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก ครีบบน-ล่างวางตรงกัน (Z) ที่ทำมุมกับทิศทางการไหล (α) 45°

กรณีที่	e/H	P/H	\overline{Nu}/Nu_0	\overline{f}/f_0	\overline{TEF}
1	0.1	1.5	6.275066	12.98586	2.886647
2	0.1	2.0	5.64756	11.46653	2.519946
3	0.1	3.0	4.800426	8.150235	2.400109
4	0.2	1.5	7.773643	35.254	2.38541
5	0.2	2.0	6.996279	31.36623	2.232137
6	0.2	3.0	5.946837	23.03077	2.103089
7	0.3	1.5	9.045223	66.38736	2.247667
8	0.3	2.0	8.348706	59.22146	2.155099
9	0.3	3.0	7.129406	51.73927	1.925105

ตารางที่ 8.3 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์ อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน และตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อน กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก ครีบบน-ล่างวางกลับกันแต่แถวเยื้องกัน (XS) ที่ทำมุมกับทิศทางการไหล (α) 45°

กรณีที่	e/H	P/H	\overline{Nu}/Nu_0	\overline{f}/f_0	\overline{TEF}
1	0.1	1.0	7.451641	10.93546	3.377905
2	0.1	1.5	6.706477	9.656026	3.168858
3	0.1	2.0	5.700506	6.863356	3.018161
4	0.2	1.0	9.231201	29.68758	2.999677
5	0.2	1.5	8.308081	26.41367	2.806935
6	0.2	2.0	7.061869	19.39434	2.644656
7	0.3	1.0	10.7412	55.90514	2.826464
8	0.3	1.5	9.914088	49.8707	2.710059
9	0.3	2.0	8.46617	43.56991	2.420839

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

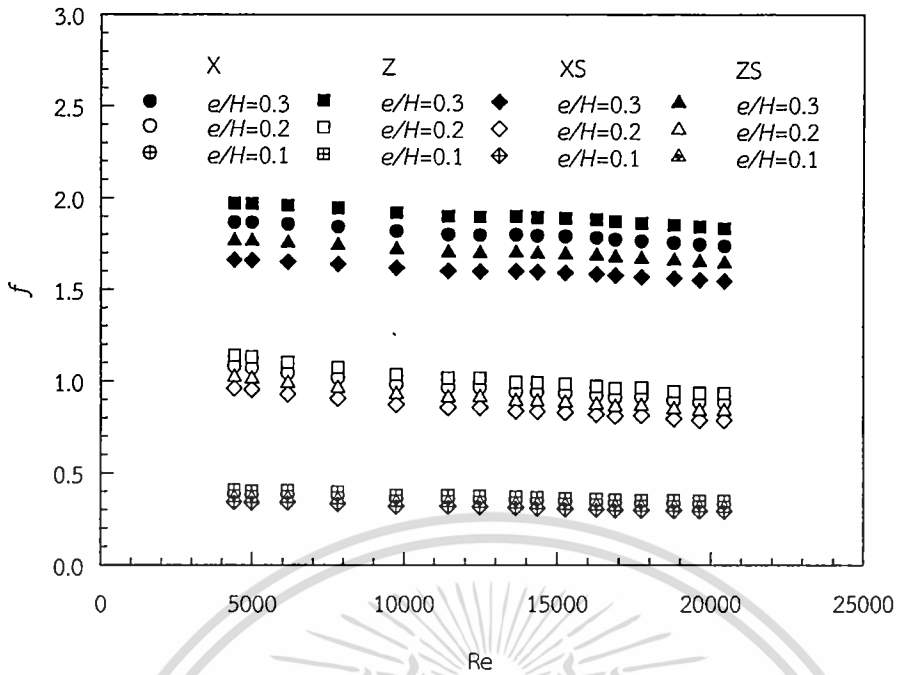
ตารางที่ 8.4 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์ อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน และตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อน กรณีติดตั้งครีบบางวางลักษณะซิกแซก ครีบบน-ล่างเหมือนกันแต่แถวเยื้องกัน (ZS) ที่ทำมุมกับทิศทางการไหล (α) 45°

กรณีที่	e/H	P/H	\overline{Nu}/Nu_0	\overline{f}/f_0	\overline{TEF}
1	0.1	1.0	7.05945	11.61892	3.136101
2	0.1	1.5	6.353505	10.25953	2.942018
3	0.1	2.0	5.400479	7.292315	2.802109
4	0.2	1.0	8.745348	31.54305	2.784948
5	0.2	1.5	7.870813	28.06452	2.606003
6	0.2	2.0	6.690192	20.60648	2.455341
7	0.3	1.0	10.17588	59.39922	2.624134
8	0.3	1.5	9.392294	52.98762	2.516062
9	0.3	2.0	8.020582	46.29303	2.247546

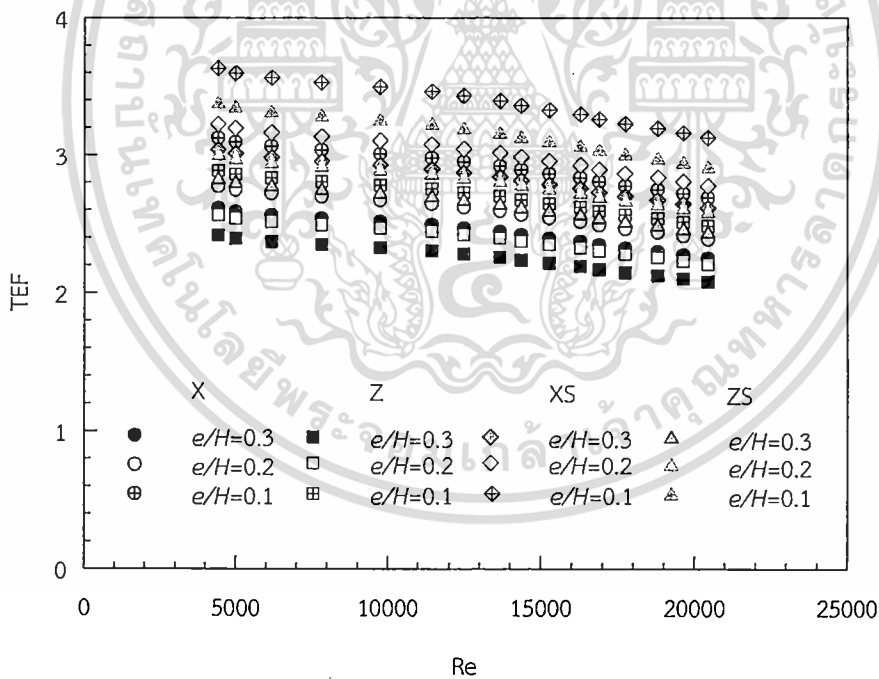


รูปที่ 8.21 ความสัมพันธ์ของเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางที่ทำมุม 45° มีระยะพิตช์ 45. mm ($P/H=1.5$) บนผนังบน-ล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



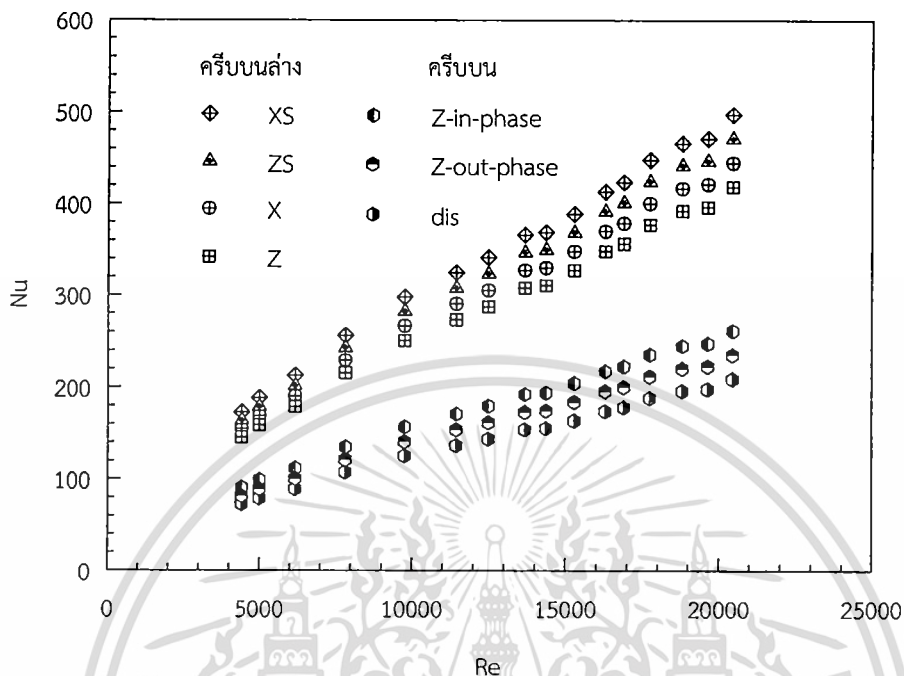
รูปที่ 8.22 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางที่ทำมุม 45° มีระยะพิตช์ 45 mm ($P/H=1.5$) บนผนังบน-ล่าง



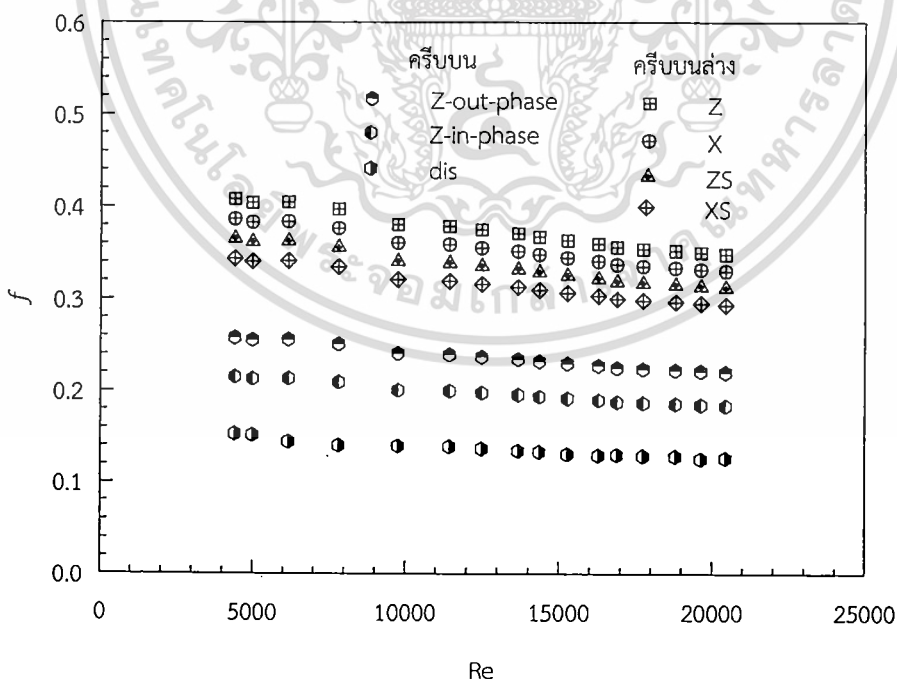
รูปที่ 8.23 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนกับเลขเรย์โนลด์กรณีติดตั้งครีบบางที่ทำมุม 45° มีระยะพิตช์ 45 mm ($P/H=1.5$) บนผนังบน-ล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.7 การเปรียบเทียบลักษณะครีบบางที่ทำมุม 45° บนผนังด้านเดียว และบนผนังบน-ล่าง

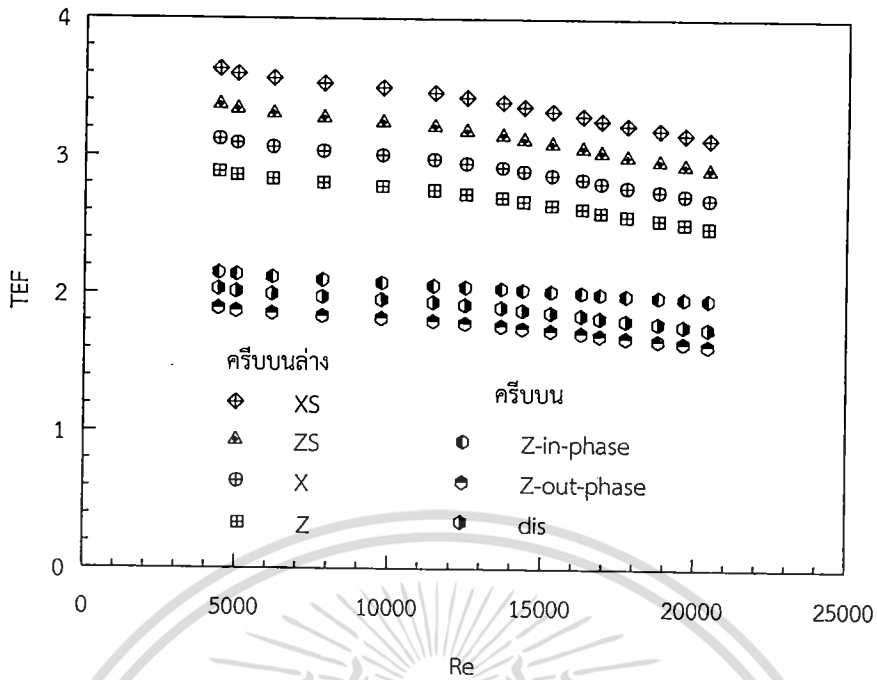


รูปที่ 8.24 ความสัมพันธ์ของเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางที่ทำมุม 45° มีความสูงครีบบน 3 mm ($e/H=0.1$) และระยะพิตช์ 45 mm ($P/H=1.5$)



รูปที่ 8.25 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีติดตั้งครีบบางที่ทำมุม 45° มีความสูงครีบบน 3 mm ($e/H=0.1$) และระยะพิตช์ 45 mm ($P/H=1.5$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.26 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนกับเลขเรย์โนลด์กรณีติดตั้งครีบบางที่ทำมุม 45° มีความสูงครีบบาง 3 mm ($e/H=0.1$) และระยะพิตช์ 45 mm ($P/H=1.5$)

ในส่วนนี้จะเป็นการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองในบทที่ 5, 6, 7 และ 8 แสดงในรูปที่ 8.24 – 8.26 แสดงอยู่ในกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Nu, f และ TEF กับ Re จากรูปจะเห็นได้ว่าที่ความสูงครีบบาง และระยะพิตช์เดียวกัน ครีบบางที่มีมุม 45° ที่ติดตั้งครีบบน-ล่าง (X, Z, XS และ ZS) จะมีค่า Nu, f และ TEF มากกว่าครีบบาง 45° ที่ติดตั้งด้านเดียว (DB, Z-in-phase, Z-out-phase) โดยในส่วนของค่า Nu ครีบบาง XS จะมีค่ามากที่สุด ตามรูปที่ 8.24 แต่ค่า f ครีบบาง Z จะมีค่ามากที่สุด ดังนั้นครีบบางที่มีค่า TEF มากที่สุดคือครีบบาง XS จากการที่ค่า Nu มีค่าสูงที่สุดแต่ค่า f มีค่าต่ำที่สุดในกลุ่มของครีบบางที่ติดบนและล่าง

8.8 การสร้างสมการสหสัมพันธ์ครีบบางที่ทำมุม 45° ครีบบน-ล่างวางกลับกันแต่แถวเอียงกัน (XS)

ในส่วนนี้จะเป็นการนำเอาค่าที่ได้จากการทดลองมาทำการหาสมการความสัมพันธ์ระหว่าง Nu และ f กับค่า Re ของครีบบางที่ทำมุม 45° ติดครีบบน-ล่างวางครีบบาง XS ที่เลือกแบบนี้ เนื่องจากเป็นแบบที่มีค่า TEF สูงที่สุดในกลุ่มครีบบางที่ติดครีบบน-ล่าง วิธีการหาสมการอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.4 ในบทที่ 3

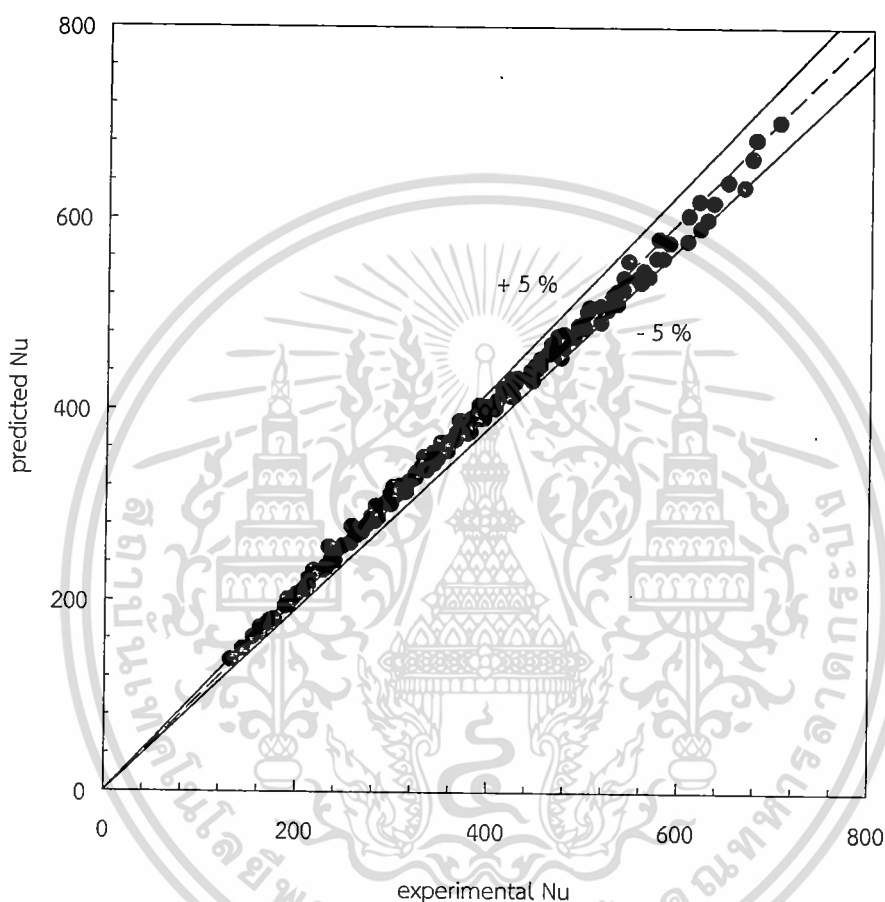
สมการสหสัมพันธ์เลขนัสเซิลท์ (Nu)

ความสัมพันธ์ของเลขนัสเซิลท์ (Nu) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) อัตราส่วนความสูงครีบบางต่อความสูงท่อ (e/H) อัตราส่วนระยะพิตช์ครีบบางต่อความสูงท่อ (P/H) มุมปะทะของครีบบาง (α) หาความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$Nu = 1.114888Re^{0.658325} Pr^{0.4} (e/H+1)^{2.180812} (P/H+1)^{0.557402} \tag{8.1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการสหสัมพันธ์ของเลขนัสเซิลท์เรามาทำการหาค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับ เลขนัสเซิลท์จากการทดลอง กรณีครีบบางที่ทำมุม 45° ติดครีบบนแบบ XS อัตราส่วนความสูงครีบบต่อความสูงท่อ (e/H) 0.1, 0.2 และ 0.3 อัตราส่วนระยะพิตช์ครีบบต่อความสูงท่อ (P/H) 1, 2 และ 3 โดยมีขอบเขตในช่วงเลขเรย์โนลด์ $Re = 4400-20,400$ จากการทดลองพบว่าสมการดังกล่าวมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง $\pm 5\%$ ดังแสดงในรูปที่ 8.27



รูปที่ 8.27 ความสัมพันธ์ของสมการสหสัมพันธ์เลขนัสเซิลท์ กับเลขนัสเซิลท์จากการทดลอง กรณี ติดตั้งครีบบนแบบ XS มุม 45° ติดครีบบนกลาง $e/H = 0.1, 0.2$ และ $0.3, P/H = 1, 2$ และ 3

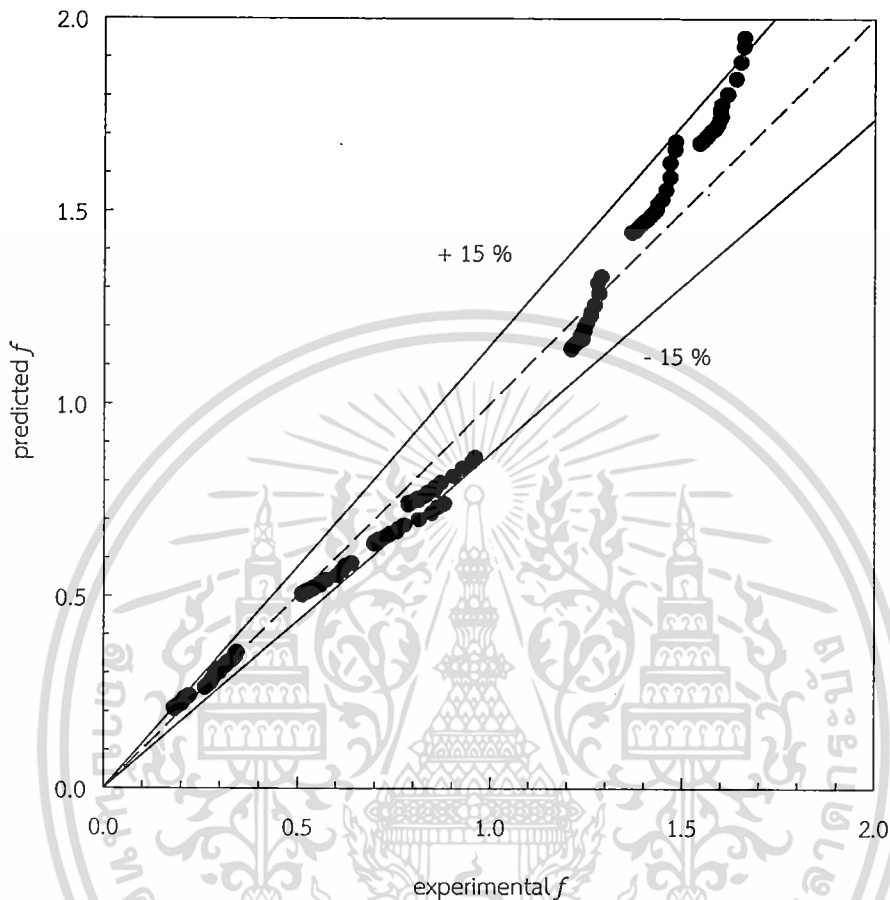
สมการสหสัมพันธ์ตัวประกอบเสียดทาน (f)

ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทาน (f) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) อัตราส่วนความสูงครีบบต่อความสูงท่อ (e/H) และอัตราส่วนระยะพิตช์ครีบบต่อความสูงท่อ (P/H) หาความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$f = 0.6446Re^{0.098624}(e/H+1)^{10.2299}(P/H+1)^{0.8178} \quad (8.2)$$

จากสมการสหสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานเรามาทำการหาค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับเลขนัสเซิลท์จากการทดลอง กรณีครีบบางที่ทำมุม 45° ติดครีบบนกลางวางครีบบต่างทิศทางกัน และวางแถวสลับหว่างกัน (XS) อัตราส่วนความสูงครีบบต่อความสูงท่อ (e/H) 0.1, 0.2 และ 0.3 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วนระยะพิทซ์ครีบบนต่อความสูงท่อ (P/H) 1, 2 และ 3 โดยมีขอบเขตในช่วงเลขเรย์โนลด์ $Re = 4400-20,400$ จากการทดลองพบว่าสมการดังกล่าวมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง $\pm 15\%$ ดังแสดงในรูปที่ 8.28



รูปที่ 8.28 ความสัมพันธ์ของสมการสหสัมพันธ์ตัวประกอบเสียดทาน กับเลขนัสเซลล์ท์จากการทดลอง กรณีติดตั้งครีบบน 45° ติดครีบบน-ล่าง $e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3 , $P/H = 1, 2$ และ 3

8.9 สรุป

ผลการทดลองในส่วนที่ 4 เป็นการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยใช้ครีบบางวางซิกแซกมีมุมเอียงกับทิศทางการไหล 45° ติดครีบบน-ล่างโดยครีบบนอยู่ด้วยกัน 4 ลักษณะคือ ครีบบน-ล่างวางกลับกัน (X), ครีบบน-ล่างวางตรงกัน (Z), ครีบบน-ล่างวางกลับกันแต่แถวเอียงกัน (XS) และครีบบน-ล่างเหมือนกันแต่แถวเอียงกัน (ZS) จากผลที่ได้ครีบบนในแบบ XS จะให้ค่า Nu และ TEF สูงที่สุดเมื่อเทียบกับระยะพิทซ์ ความสูงครีบบน ค่า Re เดียวกัน โดยครีบบน-ล่างแบบ Z จะมีค่า f มากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะของครีบบางวางซิกแซกมีมุมเอียงกับทิศทางการไหล 45° ติดครีบบน-ล่างแบบที่ติดครีบบนและล่างจะให้ค่า Nu , f และ TEF มากกว่าดังแสดงในรูปที่ 8.24 – 8.26

บทที่ 9

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

9.1 บทนำ

ในงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาเชิงทดลองเพื่อหาวิธีการเพิ่มสมรรถนะความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมขนานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยการติดตั้งครีบบางขวางการเคลื่อนที่ของของไหลให้เกิดการไหลในลักษณะปั่นป่วน และหมุนวนบริเวณพื้นผิวที่การแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อเพิ่มค่าของการแลกเปลี่ยนความร้อนที่จะแสดงในรูปตัวแปรเลขนัสเซลท์ (Nu) และประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่จะแสดงในตัวแปร ตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อน (TEF) โดยในการทดลองจำเป็นต้องทำการหาค่า ตัวประกอบเสียดทาน (f) เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่า TEF ผลที่ได้สามารถสรุปได้ ดังต่อไปนี้

9.2 ครีบบางบนผนังด้านเดียว

9.2.1 ลักษณะของครีบบาง

การทดลองในส่วนของครีบบางบนผนังด้านเดียวมีลักษณะครีบบางที่ทำการทดลองอยู่สองลักษณะคือ ในลักษณะครีบบางแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete incline baffles, DB) และครีบบางแบบซิกแซก (zigzag, Z) ซึ่งจากผลการทดลองเมื่อนำมาเปรียบเทียบกัน ผลที่ได้ครีบบางแบบ Z จะมีค่า Nu , f และ TEF มากกว่าครีบบางแบบ DB เนื่องจากในการทำครีบบางเป็นลักษณะเอียงนั้นจะทำให้ของไหลที่ไหลผ่านมีลักษณะการไหลปั่นป่วน เกิดการหมุนวนข้ามครีบบางที่ขวาง แต่เมื่อมีการเพิ่มแผ่นครีบบางในลักษณะทิศทางเดียวกับทิศทางการไหลจะเป็นลักษณะครีบบางรูปตัว Z ช่วยบล็อกกลุ่มก้อนของของไหลที่หมุนวนให้รวมกันในครีบบางแต่ละตัวทำให้ของไหลเกิดการไหลในลักษณะกระแทกลงบนแผ่นทดสอบที่ให้ความร้อน ซึ่งจากเหตุผลนี้ทำให้ครีบบางแบบ Z มีลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่าครีบบางแบบ DB

9.2.2 ครีบบางรูปตัว Z ที่มีลักษณะการวางต่างกัน

การทดลองในส่วนของครีบบางบนผนังด้านเดียวของครีบบางรูปตัว Z มีลักษณะการวางครีบบางอยู่สองลักษณะคือ วางแบบตรงกัน (in-phase) และวางแบบเอียงกัน (out-phase) ซึ่งจากผลการทดลองเมื่อนำมาเปรียบเทียบกัน ผลที่ได้จากกราฟจะเห็นได้ว่าการวางครีบบางในแบบตรงกันนั้นได้ค่า Nu และ TEF มากกว่าโดยในส่วนของการวางครีบบางแบบเอียงกันจะมีค่า f สูงกว่า เนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของของไหลที่ไหลผ่านครีบบางในลักษณะ in-phase จะมีมุมแหลมของครีบบางที่พัวอยู่ในตำแหน่งตรงกันตลอดทุกแถวตามแนวของทิศทางการไหลของของไหล ทำให้ไม่มีการขวางการไหลจากมุมแหลมของครีบบาง แต่ในลักษณะการวางครีบบางแบบ out-phase มุมแหลมของครีบบางจะอยู่เอียงกันในแต่ละแถวทำให้ของไหลที่ไหลผ่านครีบบางจะต้องไหลมากระทบกับมุมแหลมของครีบบาง ทำให้ของไหลที่ไหลผ่านต้องใช้เวลาที่ยาวขึ้นส่งผลให้ค่า f ของของไหลที่ผ่านครีบบางแบบ out-phase มีค่าที่สูงกว่าแบบ in-phase

9.2.3 ครีบบางรูปตัว Z ที่มีมุมปะทะต่างกัน (α)

การทดลองในส่วนของครีบบางบนผนังด้านเดียวของครีบบางรูปตัว Z มีมุมของครีบบางตามทิศทางการไหล 3 มุม 30° , 45° และ 60° ซึ่งจากผลการทดลองเมื่อนำมาเปรียบเทียบกัน ครีบบางมุม 30° เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

60° จะมีค่า Nu และ f มากที่สุด โดยครีบบวม 45° จะมีค่า TEF สูงที่สุด ค่าที่ได้จากการที่มุมของครีบบวมมีผลต่อจำนวนแถวของครีบบวมในแผ่นทดสอบ จากการที่เราทำการทดสอบโดยกำหนดให้ครีบบวมมีความกว้างเท่ากับความสูงของช่องการไหล ทำให้ครีบบวมแคบก็จะมีครีบบวมที่ยาวมากตามทิศทางการไหล และครีบบวมกว้างก็จะเป็นครีบบวมที่มีความยาวสั้นลงในกรณีครีบบวม 60° ก็จะมีครีบบวมที่มีจำนวนแถวมากที่สุดทำให้เป็นครีบบวมที่มีค่า Nu และ f มากที่สุด แต่จากการที่มีค่า f สูงทำให้ค่า TEF ต่ำกว่าในกรณีของครีบบวม 45° ซึ่งมีค่า Nu และ f ในสัดส่วนที่เหมาะสมทำให้ได้ค่า TEF มีค่าสูงที่สุด

9.2.4 ครีบบางรูปตัว Z ที่มีมุมของแถวต่างกัน (θ)

การทดลองในส่วนนี้จะเป็นการเปรียบเทียบมุมของแถวที่วางครีบบวมบนแผ่นทดสอบทำมุม 30° , 45° , 60° และ 90° จากผลที่ได้แถวที่ทำมุม 30° ซึ่งเป็นมุมที่แหลมที่สุดนั้น จะมีค่า Nu และ f มากที่สุด จากจำนวนของครีบบวมที่มากที่สุด แต่จากการที่มีค่า f สูงทำให้ค่า TEF ต่ำกว่าในกรณีของแถวมุม 90° ซึ่งมีค่า Nu และ f ในสัดส่วนที่เหมาะสมทำให้ได้ค่า TEF มีค่าสูงที่สุด โดยในลักษณะการวางแถวของครีบบวม 30° , 45° และ 60° ลักษณะของครีบบวมในส่วนของมุมแหลมจะเหมือนการวางในลักษณะ out-phase คือมุมแหลมที่พับของครีบบวมจะขวางช่องการไหลของครีบบวมที่ไหลผ่านในส่วนของครีบบวมที่วางเอียง จึงทำให้การวางแถวในมุมเหล่านี้มีค่า f ที่สูงกว่าการวางแถวของครีบบวมตั้งฉากกับทิศทางการไหลที่มุมแหลมของครีบบวมไม่ขวางช่องไหลที่ไหลผ่านในส่วนของครีบบวมที่วางเอียง

9.2.5 ครีบบางรูปตัว Z ที่มีความสูง (e) ต่างกัน

การทดลองในส่วนนี้ของครีบบวมบนผนังด้านเดียวของครีบบวมรูปตัว Z ความสูงครีบบวมมีผลต่อค่า Nu , f และ TEF ที่ระยะพิตช์เดียวกันที่ความสูงต่างกันโดยจะมีความสูง 4 ขนาดคือที่ความสูงครีบบวม 1.5, 3, 6 และ 9 mm ($e/H = 0.05, 0.1, 0.2$ และ 0.3) จะได้ว่าที่ความสูงครีบบวมมาก ค่า Nu และ f จะมีค่าสูงตามความสูงของครีบบวมที่ขวางการไหลทำให้ลักษณะการไหลของ ของไหลที่ไหลผ่านมีการไหลที่ปั่นป่วน และการหมุนวนมากยิ่งขึ้น ซึ่งลักษณะการไหลดังกล่าวเป็นลักษณะที่ส่งเสริมให้ค่า Nu และ f มีค่าสูงแต่ในส่วนค่า TEF จะมีค่าต่ำเนื่องจากค่า f ที่มีค่ามาก ซึ่งความสูงครีบบวมที่มีค่า TEF สูงที่สุดคือครีบบวมที่มีความสูง 3 mm ($e/H=0.1$) เป็นความสูงครีบบวมที่มีค่า Nu และ f ที่เหมาะสมทำให้ค่า TEF มีค่าสูงที่สุด และต้องสัมพันธ์กับระยะพิตช์ที่เหมาะสมอธิบายในหัวข้อถัดไป

9.2.6 ครีบบางรูปตัว Z มีระยะพิตช์ (P) ต่างกัน

การทดลองในส่วนนี้ของครีบบวมบนผนังด้านเดียวของครีบบวมรูปตัว Z ระยะพิตช์ของครีบบวมมีผลต่อค่า Nu , f และ TEF ที่มีระยะพิตช์ (P) ทั้งหมด 3 ระยะคือ 45, 60 และ 90 mm ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0) สามารถเปรียบเทียบครีบบวมในลักษณะความสูงครีบบวม และลักษณะครีบบวมแบบเดียวกันได้ ซึ่งระยะพิตช์ครีบบวมมีค่าน้อย Nu และ f จะมีค่าสูงตามระยะพิตช์ของครีบบวมที่สั้น จากการที่ระยะพิตช์ที่สั้นจะทำให้มีจำนวนแถวของครีบบวมมาก ส่งผลทำให้ของไหลต้องไหลผ่านแผ่นครีบบวมที่ขวางการไหลหลายครั้งกว่าครีบบวมที่มีจำนวนแถวของครีบบวมน้อยจากระยะพิตช์ของครีบบวม ทำให้ลักษณะการไหลของ ของไหลที่ไหลผ่านมีการไหลที่ปั่นป่วน และการหมุนวนมากยิ่งขึ้น ซึ่งลักษณะการไหลดังกล่าวเป็นลักษณะที่ส่งเสริมให้ค่า Nu , f และ TEF มีค่ามาก ซึ่งระยะพิตช์ครีบบวมที่มีค่า TEF สูงคือระยะพิตช์ครีบบวมที่ระยะ 4.5 mm ($P/H=1.5$)

9.3 ครีบบางบนผนังสองด้าน

9.3.1 ครีบบางที่มีลักษณะการวางต่างกัน

การทดลองในส่วนของครีบบนผนังสองด้านจะเป็นครีบบางลักษณะซิกแซก ที่มีลักษณะการวางครีบบนอยู่ 4 ลักษณะดังนี้คือ ครีบบน-ล่างวางกลับกัน (X), ครีบบน-ล่างวางตรงกัน (Z), ครีบบน-ล่างวางกลับกันแต่วางแถวเอียงกัน (XS) และครีบบน-ล่างวางเหมือนกันแต่วางแถวเอียงกัน (ZS) ลักษณะการวางครีบบนแบบ XR จะมีค่า Nu และ TEF ที่สูงที่สุด ส่วนค่า f จะสูงที่สุดที่การวางครีบบน Z

9.3.2 ครีบบางรูปตัว Z ที่มีความสูง (e) ต่างกัน

การทดลองในส่วนของครีบบนผนังสองด้านของครีบบางรูปตัว Z ความสูงครีบบนมีผลต่อค่า Nu , f และ TEF เปรียบเทียบครีบบนในลักษณะ และระยะพิตช์เดียวกันที่ความสูงต่างกันโดยจะมีความสูง 3 ขนาดคือที่ความสูงครีบบน 3, 6 และ 9 mm ($e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3) จากรูปจะเห็นว่าที่ความสูงครีบบนมาก ค่า Nu และ f จะมีค่าสูงตามความสูงของครีบบนที่ขวางการไหลทำให้ลักษณะการไหลของ ของไหลที่ไหลผ่านมีการไหลที่ปั่นป่วน และการหมุนวนมากยิ่งขึ้น ซึ่งลักษณะการไหลดังกล่าวเป็นลักษณะที่ส่งเสริมให้ค่า Nu และ f มีค่าสูงแต่ในส่วนของค่า TEF จะมีค่าต่ำเนื่องจากค่า f ที่มีค่ามาก ซึ่งความสูงครีบบนที่มีค่า TEF สูงที่สุดคือครีบบนที่ความสูง 3 mm ($e/H=0.1$) เป็นความสูงครีบบนที่มีค่า Nu และ f ที่เหมาะสมทำให้ค่า TEF มีค่าสูงที่สุด

9.3.3 ครีบบางรูปตัว Z มีระยะพิตช์ (P) ต่างกัน

การทดลองในส่วนของครีบบนผนังสองด้านของครีบบางรูปตัว Z ระยะพิตช์ของครีบบนมีผลต่อค่า Nu , f และ TEF ที่มีระยะพิตช์ (P) ทั้งหมด 3 ระยะคือ 45, 60 และ 90 mm ($P/H = 1.5, 2.0$ และ 3.0) สามารถเปรียบเทียบครีบบนในลักษณะความสูงครีบบน และลักษณะครีบบนเดียวกันได้ จากรูประยะพิตช์ครีบบนมีค่าน้อย Nu และ f จะมีค่าสูงตามระยะพิตช์ของครีบบนที่สั้น จากการที่ระยะพิตช์ที่สั้นจะทำให้มีจำนวนแถวของครีบบนมาก ส่งผลทำให้ของไหลต้องไหลผ่านแผ่นครีบบนที่ขวางการไหลหลายครั้งกว่าครีบบนที่มีจำนวนแถวของครีบบนน้อยจากระยะพิตช์ของครีบบน ทำให้ลักษณะการไหลของ ของไหลที่ไหลผ่านมีการไหลที่ปั่นป่วน และการหมุนวนมากยิ่งขึ้น ซึ่งลักษณะการไหลดังกล่าวเป็นลักษณะที่ส่งเสริมให้ค่า Nu , f และ TEF มีค่ามาก ซึ่งระยะพิตช์ครีบบนที่มีค่า TEF สูงคือระยะพิตช์ครีบบนที่ระยะน้อยที่สุดคือ 4.5 mm ($P/H=1.5$)

9.4 สรุป

จากการทดลองเขียนสรุปค่าที่ได้ในตารางที่ 9.1 แสดงช่วงของค่าอัตราส่วนเลขนีสเซลท์ อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน และสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ของแต่ละหัวข้อในบทที่ 5-8 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในท่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยครีบบนลักษณะต่างๆ ให้สมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสูงสุดของงานวิจัยนี้ เท่ากับ 3.63 เมื่อติดตั้งครีบบนซิกแซก มุม 45° ครีบบน-ล่างวางกลับกันแต่วางแถวเอียงกัน (XS) มีความสูงครีบบน 3 mm ($e/H=0.1$) ระยะพิตช์ 45 mm ($P/H=1.5$) ที่ค่า $Re = 4400$

ในส่วนของการเปรียบเทียบกับผลงานในอดีตในลักษณะอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีลักษณะเช่นเดียวกันคือเป็นท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาน ค่า TEF ที่ได้ที่มีค่ามากที่สุดเป็นของงานวิจัยของ อีร์ฟัฒน์ ชมภูคำ[50] มีค่ามากที่สุดเป็นการวางครีบบนสี่เหลี่ยมคางหมู ที่ $e/H = 0.15$, $P/H = 1.33$ ติดตั้งครีบบนที่ผิวบน-ล่างจัดวางครีบบนตรงกันและปีกสามเหลี่ยม, $e/H = 0.30$, ทิศทางขึ้นตามทิศทางการ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไหล ซึ่งจะมีค่า TEF เฉลี่ยสูงสุด 3.31 ที่ค่า Re ประมาณ 5000 จากเหตุผลของการออกแบบลักษณะครีบริบตัว Z ที่มุ่งเน้นพัฒนาให้การไหลของของไหลมีการไหลในลักษณะที่เป็นการหมุนวนและกระแทกลงไปในแผ่นทดสอบที่มีการให้ความร้อน จากการที่ทำการเป็นครีบริบเอียงเพื่อส่งเสริมการไหลในลักษณะหมุนวน และการวางครีบริบตรงทิศทางเดียวกับทิศทางการไหลเพื่อบีบให้ของไหลเกิดการไหลแบบกระแทกลงบนแผ่นทดสอบที่มีการให้ความร้อน

เมื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในภาคอุตสาหกรรมและเกษตรกรรมจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาและออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ทำให้เกิดเทคโนโลยีใหม่และเป็นแนวทางในการเพิ่มสมรรถนะความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้การแลกเปลี่ยนความร้อนภายในท่อประหยัดพลังงาน ลดขนาดและการใช้วัสดุในการสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนำไปสู่การลดต้นทุนการผลิต เกิดประโยชน์ทั้งในแง่พื้นที่การติดตั้ง สะดวกต่อการปรับเปลี่ยนชิ้นงานและการบำรุงรักษา ส่งผลให้เกิดประสิทธิภาพที่สูงขึ้นและราคาต่ำลง เป็นการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่าและก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด

9.5 ข้อเสนอแนะ

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนด้วยของไหลที่ไหลผ่านครีบริบบางที่วางขวางในลักษณะต่าง ๆ เป็นงานวิจัยซึ่งได้ทำการศึกษาคืออิทธิพลของครีบริบ ในส่วนของรูปแบบ รูปทรง อัตราส่วนความสูงครีบริบต่อความสูงท่อ อัตราส่วนระยะพิตช์ครีบริบต่อความสูงท่อ การติดตั้ง และการจัดวาง อิทธิพลของมุมปะทะครีบริบ และทิศทางการติดตั้ง โดยการศึกษาและพัฒนาต่อไปควรจะศึกษาถึงตัวแปรอื่นๆ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบให้ได้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการเพิ่มสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมากขึ้น เช่น

1. ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนรูปทรง (Aspect ratio, AR) ค่าอื่น ๆ ของท่อทดสอบ
2. ศึกษาอิทธิพลของการใช้ครีบริบรูปทรงอื่น ๆ เช่น รูปคลื่นไซน์ รูปครึ่งวงรี รูปครึ่งวงกลม
3. ศึกษาอิทธิพลของการติดตั้งครีบริบในท่อที่มีร่องแบบต่าง ๆ
4. ศึกษาการไหลในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยการจำลองลักษณะการไหลด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยให้เห็นถึงลักษณะการไหล และการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายในท่อ
5. ทำการทดลองที่ค่า Re ต่ำกว่า 4400 เพื่อหาลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่ค่า Re ต่ำ
6. ในอุปกรณ์ทดลองควรมีการติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิตามแนวขวางการไหลเพิ่มเพื่อทำการหาค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของผิวทดสอบมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

ตารางที่ 9.1 ช่วงของค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน และสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ของแต่ละหัวข้อ

หัวข้อ*	Nu/Nu ₀		f/f ₀		TEF	
	ตั้งแต่	ถึง	ตั้งแต่	ถึง	ตั้งแต่	ถึง
ครีบบาง มุม 45° บนผนังด้านเดียว						
วางลักษณะเอียง แบบไม่ต่อเนื่อง	2.22	4.86	3.57	32.39	1.12	2.03
วางลักษณะซิกแซก แบบวางตรงกัน	1.39	6.08	1.98	36.00	1.08	2.15
วางลักษณะซิกแซก แบบวางเอียงกัน	2.94	6.68	6.70	67.59	1.31	2.02
วางลักษณะซิกแซก เปลี่ยนมุมแถว	3.19	5.27	7.94	22.03	1.49	2.04
ครีบบาง มุม 30° บนผนังด้านเดียว						
วางลักษณะเอียง แบบไม่ต่อเนื่อง	1.55	3.40	2.83	24.14	1.00	1.67
วางลักษณะซิกแซก แบบวางตรงกัน	1.91	4.25	1.83	28.16	1.06	1.95
วางลักษณะซิกแซก แบบวางเอียงกัน	2.05	4.68	5.03	50.69	1.01	1.56
ครีบบาง มุม 60° บนผนังด้านเดียว						
วางลักษณะเอียง แบบไม่ต่อเนื่อง	2.36	5.90	6.41	54.72	0.99	1.73
วางลักษณะซิกแซก แบบวางตรงกัน	2.95	6.27	7.32	63.83	1.03	1.75
วางลักษณะซิกแซก แบบวางเอียงกัน	2.39	5.08	11.39	114.90	0.75	1.19
ครีบบางซิกแซก มุม 45° บนผนังสองด้าน						
ครีบบน-ล่างวางกลับกัน (X)	4.72	10.33	7.15	67.59	1.92	3.12
ครีบบน-ล่างวางตรงกัน (Z)	4.44	9.72	7.54	71.34	1.78	2.89
ครีบบน-ล่างวางกลับกันแต่แถวเอียงกัน (XS)	5.28	11.54	6.35	60.08	2.24	3.63
ครีบบน-ล่างเหมือนกันแต่แถวเอียงกัน (ZS)	5.00	10.94	6.75	63.83	2.08	3.37

บรรณานุกรม

- [1] Han, Glicksman, L.R. and Rohsenow, W.M. 1978. "An investigation of heat transfer and friction for rib-roughened surfaces." *Int. J. Heat Mass Transfer*. 21 : 1143-1156.
- [2] Liou, T.M. and Hwang, J.J. 1992. "Turbulent heat transfers augmentation and friction in periodic fully developed channel flows." *ASME, J. Heat Transfer*. 114 : 56-64.
- [3] Liou, T.M. and Hwang, J.J. 1993. "Effect of ridge shapes on turbulent heat transfer and friction in a rectangular channel." *Int. J. Heat Mass Transfer*. 36 : 931-940.
- [4] Zhang, Y.M., Gu, W.Z. and Han, J.C. 1994. "Heat transfer and friction in rectangular channels with ribbed or ribbed-grooved walls." *ASME J. Heat Transfer*. 116 : 58-65.
- [5] Taslim, M.E., Li, T. and Kercher, D.M. 1996. "Experimental heat transfer and friction in channels roughened with angled, V-shaped, and discrete ribs on two opposite walls." *ASME J. Turbomachinery*. 118 : 20-28.
- [6] Gentry, M.C. and Jacobi, A.M. 1997. "Heat transfer enhancement by delta-wing vortex generators on a flat plate: vortex interactions with the boundary layer." *Exp. Thermal Fluid Science*. 14 : 231-242.
- [7] Olsson, C.O. and Sunden, B. 1998. "Experimental study of flow and heat transfer in rib-roughened rectangular channels." *Exp. Thermal Fluid Science*. 16 : 349-365.
- [8] Olsson, C.O. and Sunden, B. 1998. "Thermal and hydraulic performance of a rectangular duct with multiple V-shaped ribs." *ASME Journal of Heat Transfer*. 120 : 1072-1077.
- [9] Saidi, A. and Sunden, B. 2000. "Numerical simulation of turbulent convection heat transfer in square ribbed ducts." *Numer. Heat Transf. A Appl*, 38 : 67-88.
- [10] Cho, H.H., Wu, S.J. and Kwon, H.J. 2000. "Local heat/mass transfer measurement in a rectangular duct with discrete ribs." *ASME Journal of Turbomachinery*, 122 : 579-586.
- [11] Murata A and Mochizuki S. 2001. "Comparison between laminar and turbulent heat transfer in a stationary square duct with transverse or angled rib turbulators." *Int. J Heat Mass Transf*, 44 : 1127-1141.
- [12] Ahn, S.W. 2001. "The effects of roughness types on friction factors and heat transfer in roughened rectangular duct." *Int. Comm. Heat Mass Transfer*. 28 : 933-942.

เอกสารนี้เป็น 28 : 933-942.ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] Gao, X. and Sunden, B. 2001. "Heat transfer and pressure drop measurements in rib-roughened rectangular ducts." *Int. J. Heat Thermal Fluid.* 24 : 25-34.
- [14] Momin, A.M.E., Saini, J.S. and Solanki, S.C. 2002. "Heat transfer and friction in solar air heater duct with V-shaped rib roughness on absorber plate." *Int. Comm. of Heat and Mass Transfer.* 45 : 3383-3396.
- [15] Bhagoria, J.L., Saini, J.S. and Solanki, S.C. 2002. "Heat transfer coefficient and friction factor correlations for rectangular solar air heater duct having transverse wedge shaped rib roughness on the absorber plate." *Renewable Energy.* 25 : 341-369.
- [16] Chandra PR., Alexander CR. and Han JC. 2003 "Heat transfer and friction behaviour in rectangular channels with varying number of ribbed walls.", *Int. J Heat Mass Transf.* 46 : 481-495.
- [17] Karwa, R. 2003. "Experimental 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.* 30 : 241-250.
- [18] Tanda, G. 2004. "Heat transfer in rectangular channels with transverse and V-shaped broken ribs." *Int. J. Heat Mass Transfer.* 47 : 229-243.
- [19] Jaurker, A.R., Saini, J.S. and Gandhi, B.K. 2005. "Heat transfer and friction characteristics of rectangular solar air heater duct using rib-grooved artificial roughness." *Solar Energy.* 80(8) : 895-907.
- [20] Lu, B. and Jiang, P.X. 2005. "Experimental and numerical investigation of convection heat transfer in a rectangular channel with angled ribs." *Exp. Thermal Fluid Science.* 30 : 513-521.
- [21] Sahu, M.M. and Bhagoria J.L. 2005. "Augmentation of heat transfer coefficient using 90° broken transverse ribs on absorber plate of solar air heater." *Renewable Energy* 30 : 2057-2073.
- [22] ดุสิต บุรณโชคไพศาล. 2549. "การถ่ายความร้อนและการสูญเสียความดันในท่อที่มีการเซาะร่อง." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [23] Mittal, M.K., Varun, R.P. and Saini, S.K. 2007. "Singal, Effective efficiency of solar air heaters having different types of roughness elements on absorber plate." *Energy* 32 : 739-745.
- [24] Varun, Saini, R.P. and Singal, S.K. 2007. "A review on roughness geometry used in solar air heaters." *Solar Energy.* 81 : 1340-1350.
- [25] Hans, V.S., Saini, R.P. and Saini, J.S. 2009. "Performance of artificially roughened solar air heaters-a review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 : 1854-1869.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [26] Promvong, P. and Thianpong, C. 2008. "Thermal performance of turbulent channel flows over different shaped ribs." *Int. Commun. Heat Mass Transfer*. 35 : 1327-1334.
- [27] Eiamsa-ard, S. and Promvong, P. 2009. "Thermal characteristics of turbulent rib-grooved channel flows." *Int. Commun. Heat Mass Transfer*. 36 : 705-711.
- [28] Varun, R.P. Saini, S.K. Singal, 2008. "Investigation of thermal performance of solar air heater having roughness elements as a combination of inclined and transverse ribs on the absorber plate." *Renewable Energy* 33 : 1398-1405.
- [29] สมพล สกุลหลง. 2551. "การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในช่องแผ่นขนานโดยใช้ครีบริบตัววี." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [30] ชานนท์ มะลิกุล. 2551. "การถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วนภายในช่องแผ่นขนานที่มีครีบริบร่อง." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [31] Sripattanapipat, S. and Promvong, P. 2009. "Numerical analysis of laminar heat transfer in a channel with diamond-shaped baffles." *Int. Comm. Heat Mass Transfer*. 36 : 32-38.
- [32] วิษณุ อำไพจิตร. 2552. "การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อแผ่นขนานโดยใช้ครีบริบหยัก." วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [33] Thianpong, C., Chompookham, T., Skullong, S. and Promvong, P. 2009. "Thermal characterization of turbulent flow in a channel with isosceles triangular ribs." *Int. Comm. Heat Mass Transfer*. 36 : 712-717.
- [34] Lee, D.H. and Rhee, D.H. 2009. "Detailed measurement of heat/mass transfer with continuous and multiple V-shaped ribs in rectangular channel." *Energy*. 34 : 1770-1778.
- [35] สมบัติ ทำนา. 2552. "การวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนแบบลามินาร์ในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยใช้แผ่นกั้นวางเอียง." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [36] Promvong, P., Chompookham, T., Kwankaomeng, S. and Thianpong, C. 2010. "Enhanced heat transfer in a triangular ribbed channel with longitudinal vortex generators." *Energy Conversion & Management*. 51 : 1242-1249.
- [37] Chompookham, T., Thianpong, C., Kwankaomeng, S. and Promvong, P. 2010. "Heat transfer augmentation in a wedge-ribbed channel using winglet vortex generators." *Int. Comm. Heat Mass Transfer*. 37 : 163-169.
- [38] จิตรกร กนกนัยการ. 2553. "การศึกษาเชิงทดลองของการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนแบบช่องแผ่นขนานที่มีการติดตั้งครีบริบสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมผืนผ้ารูปตัววี." วิทยานิพนธ์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

- [39] Sripattanapipat, S. 2010. "Laminar flow and heat transfer characteristics in a channel with triangular wavy baffle" Doctor of Engineering thesis in Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.
- [40] Promvongse, P., Sripattanapipat, S., Tamna, S., Kwankaomeng, S. and Thianpong, C. "Numerical investigation of laminar heat transfer in a square channel with 45° inclined baffles." *Int. Comm. Heat Mass Transfer*. 37 : 170-177.
- [41] พงษ์เจต พรหมวงศ์. 2542. การถ่ายเทความร้อน. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล. คณะวิศวกรรมศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. หน้า 167-252.
- [42] Ozisik, M.N. 1985. *Heat Transfer: A Basic Approach*. McGraw-Hill, New York, 281-338.
- [43] Holman, J.P. 1990. *Heat Transfer*. McGraw-Hill, New York, 217-321.
- [44] Munson, B.R., Young, D.F. and Okiishi, T. H. 1990. *Fundamentals of Fluid Mechanics*. John Wiley & Sons, New York, 465-547.
- [45] Webb, R. L. 1992. *Principles of Enhanced Heat Transfer*, John-Wiley & Sons, New York, USA, 166-194.
- [46] Incropera, Frank, P. and David, P.D. 1996. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John Wiley & Sons, New York, 419-461.
- [47] Cengel, Y.A. 1998. *Heat Transfer: A Practical Approach*. McGraw-Hill, New York, 349-394.
- [48] Fox, R.W. and Alan, T.M. 1998. *Introduction to Fluid Mechanics*. Wiley, New York, 332-395.
- [49] ANSI/ASME, *Measurement uncertainty*, PTC 19, 1-1985. Part I, 1986
- [50] อธิพัฒน์ ชมภูคำ. 2554. "การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในช่องขนานมีครีบบัดด้วยตัวสร้างการหมุนควงตามแนวยาว." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-1 คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของอากาศที่ความดันบรรยากาศ

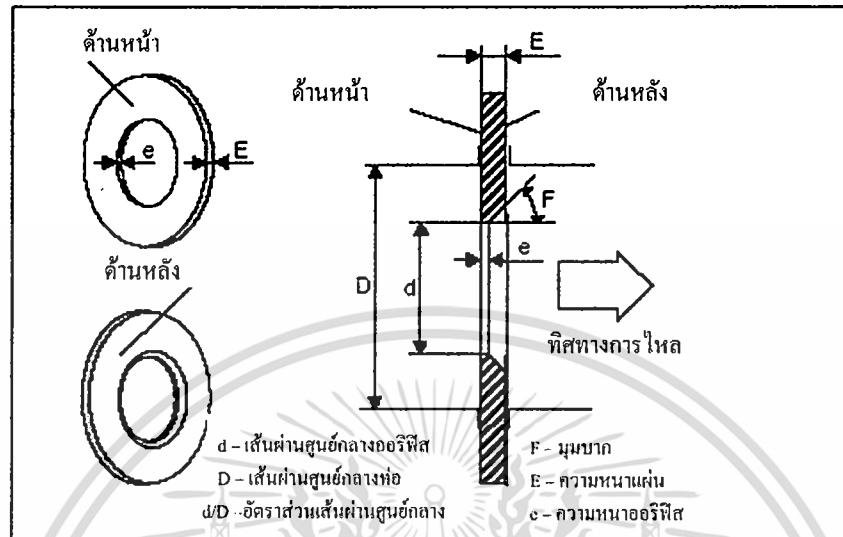
T (K)	ρ (kg/m ³)	C_p (kJ/kg K)	$\mu \times 10^7$ (N s/m ³)	ν (m ² /s)	$k \times 10^6$ (W/m K)	$\alpha \times 10^6$ (m ² /s)	Pr
100	3.25562	1.032	71.1	2.0	9.34	2.54	0.786
150	2.3364	1.012	103.4	4.426	13.8	5.84	0.758
200	1.7458	1.007	132.5	7.59	18.1	10.3	0.737
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	22.5	0.707
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
350	0.990	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	67.7	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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



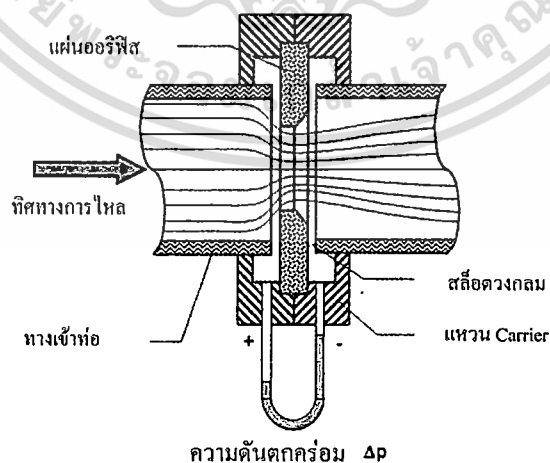
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออริฟิสชนิดต่าง ๆ คล้ายคลึงกัน สามารถอธิบายด้วยกันได้ แต่ละชนิดแตกต่างกันที่ pressure tapping ซึ่ง orifice มาตรฐานกำหนดดังนี้ รูปร่างลักษณะ (description) ออริฟิส (orifice) ได้ แสดงหน้าตัดต่าง ๆ ดังรูปที่ ข-1



รูปที่ ข-1 standard orifice plate

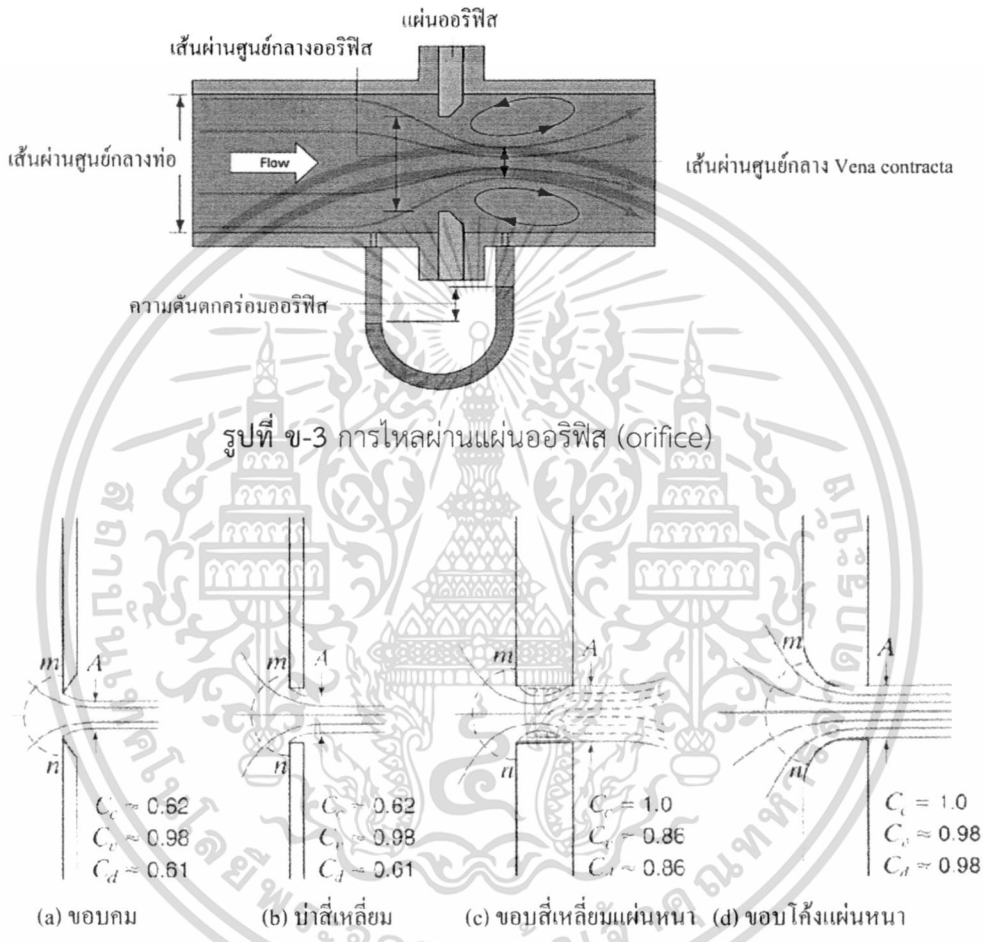
แผ่นออริฟิสเป็นแผ่นบางๆ ที่ถูกจับยึดระหว่างขอบของท่อ เนื่องจากมีรูปทรงเรขาคณิตอย่างง่าย ๆ ดังนั้นจึงมีราคาถูก และง่ายในการติดตั้ง หรือการย้ายตำแหน่ง แต่อย่างไรก็ตามขอบของแผ่น อาจจะมีการสึกกร่อนได้ อันเนื่องจากการชนของอนุภาคเล็ก ๆ ที่กระจายอยู่ในของไหล ข้อเสียอีกประการ คือ เนื่องจากไม่สามารถควบคุมการขยายของด้านล่างของกระแส ทำให้มี head loss ถาวรที่สูงมาก จุดวัดความดันสำหรับออริฟิสนั้น สามารถกำหนดตำแหน่งได้หลายตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ ข-2 เนื่องจากตำแหน่งของจุดวัดความดันมีอิทธิพลต่อการหาสัมประสิทธิ์การไหล



รูปที่ ข-2 โครงสร้างเชิงเรขาคณิตและจุดวัดความดันของออริฟิส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการวัดอัตราการไหลของของไหลภายในท่อ และจัดได้ว่าออริฟิสเป็นเครื่องมือวัดที่เกิด ขวางการไหลของพื้นที่หน้าตัด ให้ของไหลไหลผ่านออริฟิสมีขนาดน้อยกว่าพื้นที่หน้าตัดของท่อ ดัง แสดงในรูปที่ ข-3 ดังนั้นเมื่อน้ำออริฟิสไปติดตั้งกับท่อ ซึ่งมีของไหลไหลผ่านจะทำให้เกิดความดันตก คร่อมออริฟิส ซึ่งความดันตกคร่อมนี้จะแปรเปลี่ยนไปตามอัตราการไหล กล่าวคือ ถ้าอัตราการไหลมี ค่าสูง ความดันตกคร่อมออริฟิสก็จะมีค่าสูง และถ้าอัตราการไหลมีค่าต่ำ ความดันตกคร่อมออริฟิสก็ จะมีค่าต่ำ โดยทั่วไปออริฟิสจะถูกนำไปใช้ในการหาอัตราการไหลที่สภาวะ steady state เท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้วัดอัตราการไหลที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา (dynamic Response)



รูปที่ ข-4 ออริฟิสแบบต่าง ๆ [39]

ในบรรดาเครื่องมือวัดอัตราการไหลทั้งหลาย ออริฟิสถือว่าเป็นเครื่องมือที่มีผู้นำไปใช้อย่าง กว้างขวางมากที่สุด ดังนั้นการทดลองชุดนี้จึงได้มีการนำเอาการวัดอัตราการไหลแบบออริฟิสมาใช้ออ ริฟิสมาตรฐานที่มีขอบคม ดังแสดงในรูปที่ ข-4 (a) หรือเป็นรูปสี่เหลี่ยมดังรูปที่ ข-4 (b) นั้นจะสัมพันธ์ ลำน้ำที่ไหลผ่านในลักษณะที่เป็นการสัมพันธ์แบบเส้น ส่วนออริฟิสดังรูปที่ ข-4 (c) และ ข-4 (d) นั้นไม่ ใช้เป็นออริฟิสมาตรฐาน ทั้งนี้เพราะลำน้ำที่ไหลผ่านรูออริฟิสนั้น ถูกกระทบจากความหนาของแผ่น วัดดู กับความหยาบของผิว และรัศมีของความโค้ง ดังนั้นจึงต้องมีการสอบเทียบเพื่อความถูกต้อง

ข้อดีของออริฟิส คือ มีราคาต่ำกว่าเครื่องมือวัดชนิดอื่น ๆ ที่อาศัยหลักการวัดเดียวกัน และ สะดวกในการสร้างเพราะมีรูปร่างที่ไม่ซับซ้อน รวมทั้งมีข้อมูลของการทำวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมใน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดของไหล ที่มีเงื่อนไขแตกต่างกันอย่างมากมาย ของไหลเมื่อไหลผ่าน square-edged orifice ซึ่ง เป็นออริฟิสที่นำมาใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ จะมีทิศทางการไหลเป็นไปดังรูป สมมติว่าของไหลก่อนเข้า ปะทะกับออริฟิส มีความเร็วคงที่ตลอดหน้าตัดของท่อ (หน้าตัดวงกลม) เท่ากับ V_1 ของไหลที่บริเวณ ด้านหลังของออริฟิส จะมีลักษณะเป็นลำของไหล ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของลำของไหลลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งมีค่าเท่ากับ $D/2$ ณ บริเวณจุดวัดความดันที่ 2 ซึ่งถือได้ว่าเป็นจุดที่มีพื้นที่หน้าตัดของการ ไหล่น้อยที่สุด (vena contracta) ของ Jet ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ jet จะมีขนาดเพิ่มขึ้น เมื่อของไหลเคลื่อนที่ผ่านจุดที่ 2 ไปแล้ว จุดที่ 2 หรือเรียกว่าจุด vena contracta ถือได้ว่าเป็นจุดที่ ของไหลที่มีความเร็วเฉลี่ยสูงสุด หรือมีความดันสถิตย์ต่ำสุด (จากสมการของ Bernoulli)

สมมติฐานเบื้องต้นสำหรับการวัดอัตราการไหลด้วยออริฟิสในการทดลองนี้ คือ ของไหลที่อยู่ ภายในท่อไม่สามารถอัดตัวได้ ความเร็วของของไหลมีค่าคงที่ตลอดหน้าตัด (โดยไม่คิดบริเวณที่ เรียกว่า บริเวณกระแสไหลวน) ของไหลไม่มีความหนืด และการไหลเกิดขึ้นแบบ steady flow (อัตราการไหลมีค่าคงที่เมื่อเทียบกับเวลา)

สมการ Bernoulli สามารถนำมาใช้อธิบายคุณสมบัติในการไหลที่จุดใด ๆ ภายในท่อได้ โดยสมการ Bernoulli สำหรับจุดที่ 1 และจุดที่ 2 ของการไหล แสดงในรูปที่ ข-3 สามารถคำนวณหา ค่าอัตราการไหลเมื่อติดตั้งเครื่องมือวัดอัตราการไหลแบบออริฟิส แสดงในสมการ (ข.1)

$$Q_{ac} = C_d A_o \sqrt{\frac{2g(P_1 - P_2)}{\rho g \left[1 - \left(\frac{d_o}{D} \right)^4 \right]}} \quad (\text{ข.1})$$

- เมื่อ
- A_o คือ พื้นที่หน้าตัดรูออริฟิส (m^2)
 - C_d คือ ค่าสัมประสิทธิ์การจ่าย (discharge coefficient)
 - d_o คือ เส้นผ่านศูนย์กลางรูออริฟิส (m)
 - D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (m)
 - P คือ ความดันสถิตย์ของของไหล (N/m^2)
 - ρ คือ น้ำหนักจำเพาะ (specific weight, N/m^3)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

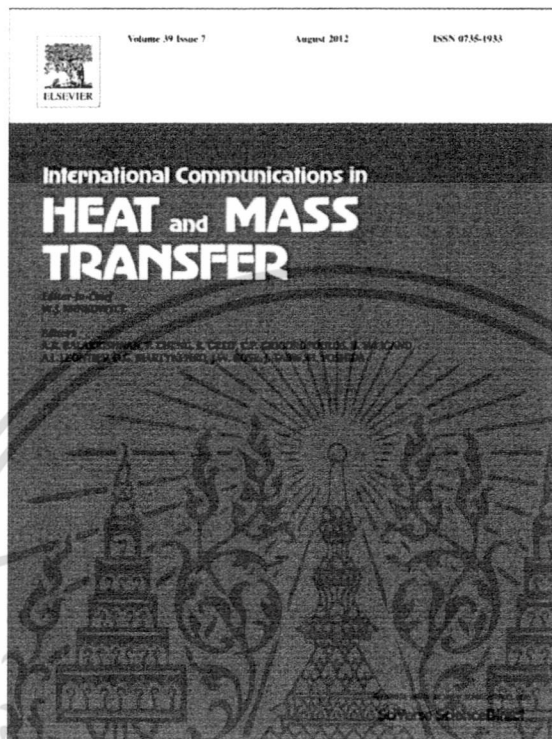
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารนานาชาติ

1. Sriromreun, P., Thianpong, C. and Promvonge, P. 2012. “Experimental and numerical study on heat transfer enhancement in a channel with Z-shaped baffles.” *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 39 : 945-952.

ผลงานวิจัยนำเสนอในที่ประชุมวิชาการนานาชาติ

1. Sriromreun, P. and Promvonge, P. 2011. “Heat transfer augmentation in rectangular duct with different arrangements of 45° Z-shaped baffles.” *International Symposium on Technology for Sustainability (ISTS2011)*, 27–28 January 2012, KMUTL, Bangkok, Thailand.
2. Pimsarn, M., Sriromreun, P. and Promvonge, P. 2010. “Augmented Heat Transfer in Rectangular Duct with Angled Z-Shaped Ribs.” *International Conference on Energy and Sustainable Development (ESD2010)*, 2-4 June 2010, The Empress Hotel, Chiang Mai, Thailand.
3. Sriromreun, P. and Promvonge, P. 2009. “Heat Transfer Augmentation in a Rectangular Duct with Z-Shaped Ribs.” *International Conference on Green and Sustainable Innovation (ICGSI2009)*, 2–4 December 2009, Le Meridien Chiang Rai, Chaing Rai, Thailand.

Provided for non-commercial research and education use.
Not for reproduction, distribution or commercial use.



This article appeared in a journal published by Elsevier. The attached copy is furnished to the author for internal non-commercial research and education use, including for instruction at the authors institution and sharing with colleagues.

Other uses, including reproduction and distribution, or selling or licensing copies, or posting to personal, institutional or third party websites are prohibited.

In most cases authors are permitted to post their version of the article (e.g. in Word or Tex form) to their personal website or institutional repository. Authors requiring further information regarding Elsevier's archiving and manuscript policies are encouraged to visit:

<http://www.elsevier.com/copyright>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Experimental and numerical study on heat transfer enhancement in a channel with Z-shaped baffles[☆]

Parkpoom Sriromreun, Chinarak Thianpong, Pongjet Promvonge^{*}

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

ARTICLE INFO

Available online 2 June 2012

Keywords:

Heat transfer
Turbulent channel flow
Baffle
Vortex generator
Nusselt number

ABSTRACT

The influence of baffle turbulators on heat transfer augmentation in a rectangular channel has been investigated experimentally and numerically. In the experiment, the baffles are placed in a zigzag shape (Z-shaped baffle) aligned in series on the isothermal-fluxed top wall, similar to the absorber plate of a solar air heater channel. The aim at using the Z-baffles is to create co-rotating vortex flows having a significant influence on the flow turbulence intensity leading to higher heat transfer enhancement in the tested channel. Effects of the Z-baffle height and pitch spacing length are examined to find the optimum thermal performance for the Reynolds number from 4400 to 20,400. The Z-baffles inclined to 45° relative to the main flow direction are characterized at three baffle- to channel- height ratios ($e/H=0.1, 0.2$ and 0.3) and baffle pitch ratios ($P/H=1.5, 2$ and 3). The experimental results show a significant effect of the presence of the Z-baffle on the heat transfer rate and friction loss over the smooth channel with no baffle. The Nusselt number, friction factor and thermal performance enhancement factor for the in-phase 45° Z-baffles are found to be considerably higher than those for the out-phase 45° Z-baffle at a similar operating condition. The in-phase 45° Z-baffle with larger e/H provides higher heat transfer and friction loss than the one with smaller e/H while the shorter pitch length yields the higher Nu, f and TEF than the larger one. The numerical work is also conducted to investigate the flow friction and heat transfer behaviors in the channel mounted with the 45° Z-baffles, and the numerical results are found in good agreement with experimental data.

© 2012 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

A high performance heat exchanger is needed in many engineering applications such as chemical engineering, refrigeration, automobile manufacturing and solar air heater to use energy source efficiently leading to the reduction of size and cost of the heat exchanger. Therefore, many engineering techniques have been developed for enhancing the rate of convective heat transfer from the channel surface for decades. Periodic flow interruption generated by ribs [1], baffles [2–4], grooves [5], helical or twisted tape [6,7], propeller [8] and winglets [9] is an extensively used means for augmentation of heat transfer in the heat exchangers. The rib/baffles increase not only the degree of heat transfer coefficients by restarting the thermal boundary layer after flow reattachment between rib/baffles but also the pressure drop due to the decreasing flow area effects. Therefore, the geometry parameters of rib/baffles in the channel are among the most importance in the design of channel heat exchanger. In particular, rib/baffle blockage ratio (e/H), pitch ratio ($PR=P/H$) and orientation/arrangement are all parameters that influence both the heat transfer coefficient and the overall thermal performance.

Several investigations on the effect of those parameters of rib/baffle turbulators on the heat transfer and friction factor for many roughened surface geometry have been conducted widely. Varun et al. [10] and Hans et al. [11] carried out the reviews of roughness surface geometry in solar air heaters. They reported on solar air heaters fitted with different roughness geometries and provided details of the concept of artificial roughness on the flow pattern and also briefly discussed the roughness geometries. Sahu and Bhagoria [12] reported that the roughened absorber plate yields the maximum thermal efficiency is in the range of 51–83.5%. Mittal et al. [13] showed that the channel with inclined ribs and V-shaped ribs performs better heat transfer rate than others. Karwa [14] investigated the effect of using rectangular ribs on heat transfer for various aspect ratio channels with ribs at P/e of 10 and e/D range of 0.0467–0.050 and reported that the heat transfer enhancement was 65–90% while friction factor was 2.68–2.94 times the smooth channel. Varun et al. [15] investigated thermal and friction characteristics by using inclined/transverse ribs on the absorber plate of a solar air heater and found that the best performance is at relative roughness pitch of $P/e=8$.

Momin et al. [16] found that the 60° V-shaped ribs provide the highest Nu and f values at about 2.30 and 2.83 times the smooth channel, respectively. Olsson and Sunden [17,18] conducted measurements on heat transfer coefficients in a channel with V- and A-shaped ribs for different rib height, pitch and angle values at Re ranging from 500

[☆] Communicated by W.J. Minkowycz.

^{*} Corresponding author.

E-mail address: kppongje@kmit.ac.th (P. Promvonge).

Nomenclature

A	heat transfer area, m^2
$C_{p,air}$	specific heat capacity of air, $kJ/kg\ K$
D	hydraulic diameter, m
e	baffle height, m
f	friction factor
h	heat transfer coefficient, W/m^2K
H	channel height, m
k	thermal conductivity of air, W/mK
L	length of test channel, m
\dot{m}	air mass flow rate, kg/s
Nu	Nusselt number (hD/k)
P	pitch length of baffle, m
Δp	pressure drop, N/m^2
Pr	Prandtl number
Q	heat transfer rate, watt
Re	Reynolds number, (UD/ν)
T	temperature, K
TEF	thermal performance enhancement factor
\dot{V}	volumetric flow rate, m^3/s
U	mean velocity, m/s
w	width of Z-baffle, m
W	width of channel, m
WVGs	winglet vortex generators
Greek letters	
α	attack angle of Z-baffle, degree
ρ	density of air, kg/m^3
ν	kinematics viscosity, m^2/s
Subscripts	
b	bulk
o	smooth channel
in	inlet
out	outlet
pp	pumping power
s	channel surface
w	wall
x	local

to 15,000. Gao and Sundén [19] examined the heat transfer and flow characteristics in a rectangular channel of a high aspect ratio with V-shaped ribs using laser Doppler velocimetry and smoke visualization, and reported that A-shaped ribs provides higher heat transfer and thermal performance than V-shaped ribs. Sriromreun and Promvong [20] conducted measurements on heat transfer and f in a channel with Z-shaped ribs for different rib pitches at Re from 4400 to 20,400. Also, the effect of multiple 60° V-baffles in a channel on thermal and friction behaviors was investigated by Promvong [21]. Tanda [22] reported that the 90° ribs yielded the poorer thermal performance while the 60° parallel broken ribs or 60° V-shaped broken ribs gave a higher heat transfer rate than the 45° parallel broken ribs or 45° V-shaped broken ribs. Lee et al. [23] studied the heat/mass transfer in a channel with 60° continuous V-shaped ribs and multiple 45° V-shaped ribs and found the considerable increase in the heat/mass transfer.

Cho et al. [24] investigated the experiment of thermal characteristics in a rectangular duct with 45° and 90° discrete baffles, and they found that the most heat/mass transfer performances at about 1.2. Bhagoria et al. [25] indicated that the Nu and f in a channel with wedge baffles at e/D ratios of 0.015–0.033 and baffle wedge angles of 8–15° increased by 2.4 and 5.3 times over smooth duct. The

wedge baffles performed better than the chamfer baffles for comparison. Thianpong et al. [26] also found that the staggered triangular rib provides the highest TEF. Chompookham et al. [27] reported that the combined wedge ribs and winglet vortex generators (WVGs) performed much better than the ribs or WVGs alone. Promvong et al. [28] numerically studied the heat transfer enhancement in laminar periodic flows through a channel with 45° inclined baffles mounted on one wall. They found that the 45° baffle with $P/H=0.4$ provides the heat transfer to be 2–3 fold above the 90° baffle. Promvong et al. [29] examined thermal behaviors of using ribs and WVGs at various attack angles and found that the compound turbulators provide higher heat transfer than the ribs or WVGs acting alone.

The literature survey cited above indicates that the heat transfer enhancement using the angled or V-shaped ribs/baffles is based on the generation of secondary flow cell due to angling of the ribs/baffles leading to a higher heat transfer region near the leading end. Thus, a much larger region of high heat transfer can be created by splitting the long angled rib/baffles to become a zigzag shape to form several leading and trailing ends. This leads to the formation of multiple secondary flows cells instead of one as in the case of transverse rib/baffles. In view of above experimental results using air as the test fluid for 45° Z-baffles placed periodically on the upper channel wall only are presented in turbulent channel flows for $Re=4400$ to 20,400.

2. Experimental setup

The experimental work was conducted in an open-loop experimental facility as shown in Fig. 1a. The loop consisted of a circular pipe connected a high-pressure blower to a settling tank, and an orifice flow-meter was placed in this pipeline. A channel including a calm section (1.3 m), test section (0.4 m) and exit (0.3 m) was employed after the settling tank. The aluminum tested channel having channel height (H) of 30 mm had a length of $L=380$ mm, with 300 mm width and 6 mm thickness (t) as depicted in Fig. 1b. Each Z-baffle made of a 1.2 mm thick aluminum strip was placed on the upper wall with the angle of attack (α) of 45° relative to the main flow direction and the width (w) of each Z-shape is equal to the channel height ($H=30$ mm). Three baffle pitch ratios ($P/H=1.5, 2$ and 3) and baffle height ratios ($e/H=0.1, 0.2$ and 0.3) were introduced. Two in-phase and out-phase Z-baffle arrangements were used as depicted in Fig. 2. In the former, the baffle arrays were in inline while in the latter, the baffle arrays were in staggered for each other. The tested channel was heated by an electrical heater plate attached on the upper wall to provide a uniform heat flux boundary condition. The electrical output power was controlled by a variac transformer to obtain a constant heat flux along the entire length of the test channel. The outer surface of the tested channel was well insulated to minimize convective heat loss to the surroundings. The inlet and outlet temperatures of the bulk air were measured at certain points with a data logger in conjunction with two RTD-type thermocouples, calibrated within ± 0.2 °C deviation by thermostat before being used. Ten K-type thermocouples were tapped on the upper wall of the channel to measure the temperature variation along the channel surface to obtain the mean wall temperature.

The inlet bulk air at 28 °C from a 1.5 kW blower was directed through the orifice meter to the heat transfer test channel. The air-flow rate was measured by an orifice meter which was calibrated beforehand by using both hot-wire and vane-type anemometers. Manometric fluid was used in inclined/U-tube manometers with specific gravity of 0.826 to ensure reasonably accurate measurement of the low pressure drop encountered at low Reynolds numbers. Also, the pressure drop of the heat transfer test channel was measured with inclined tube and digital manometers at an isothermal condition. The volumetric airflow rates from the blower were adjusted by varying motor speed through an inverter. During the experiment, the bulk air was heated by an adjustable electrical heater plate placed

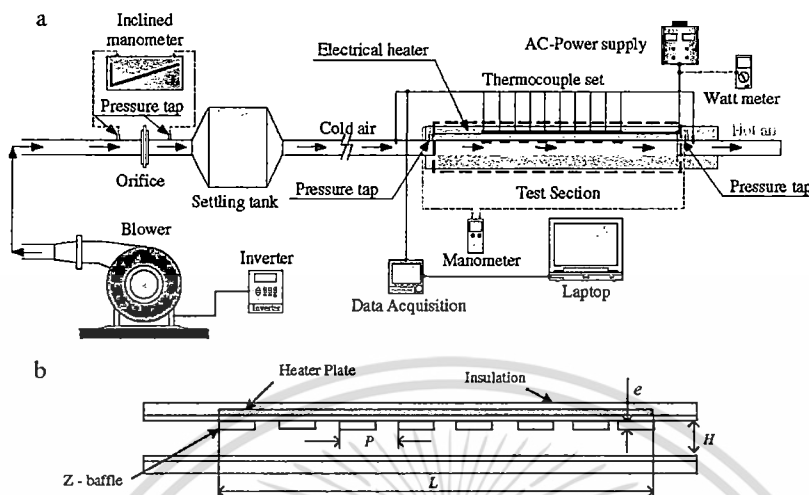


Fig. 1. (a) Schematic diagrams of experimental apparatus (b) test section.

on the top wall of the test channel. For each test run, it was necessary to record the data of temperature, volumetric flow rate and pressure drop of the bulk air at steady state conditions. The Reynolds number of the bulk air was varied from 5000 to 25,000. The characteristics of the flow and the Nusselt number were based on the average of duct wall temperature and inlet–outlet air temperature.

The uncertainty in the data calculation was based on Ref. [30]. The maximum uncertainties of non-dimensional parameters were $\pm 5\%$, $\pm 5\%$ and $\pm 7\%$ for Reynolds number, Nusselt number and friction factor, respectively. The uncertainty in the axial velocity measurement was estimated to be less than $\pm 7\%$, and about $\pm 5\%$ for pressure drop, whereas that in wall temperature measurement was about $\pm 0.5\%$.

3. Data reduction

In the present work, air used is the test fluid. The steady state heat transfer rate is assumed to be equal to the heat loss in the test duct:

$$Q_{air} = Q_{conv} \tag{1}$$

in which

$$Q_{air} = \dot{m} C_{p,air} (T_o - T_i) = VI - \text{heat losses} \tag{2}$$

The heat supplied by electrical heater plates in the test duct is found to be 3% to 5% higher than the heat absorbed by the fluid for thermal equilibrium test due to convection and radiation heat losses from the test duct to surroundings. Thus, only the heat transfer rate absorbed by the fluid is taken for internal convective heat transfer coefficient calculation. The convection heat transfer from the test duct can be written by

$$Q_{conv} = hA(\bar{T}_s - T_b) \tag{3}$$

where

$$T_b = (T_o + T_i)/2 \tag{4}$$

$$\bar{T}_s = \sum T_s/10 \tag{5}$$

where for a constant heat flux, the average surface temperature \bar{T}_s can be calculated from 10 points of the local surface temperatures, T_s , lined equally apart between the inlet and the exit of the test channel. The average heat transfer coefficient, h , and the average Nusselt number, Nu are estimated as follows:

$$h = \dot{m} C_{p,air} (T_o - T_i) / A (\bar{T}_s - T_b) \tag{6}$$

$$Nu = hD/k \tag{7}$$

The Reynolds number is given by

$$Re = UD/\nu \tag{8}$$

Friction factor, f , can be written as

$$f = \frac{\Delta p}{(L/D)\rho U^2/2} \tag{9}$$

in which U is mean air velocity in the channel. All thermo-physical properties of air are determined at the overall bulk air temperature from Eq. (4).

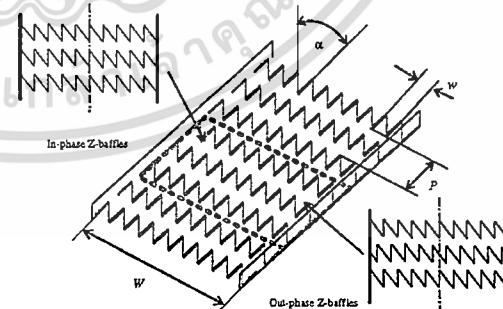


Fig. 2. Test section with in-phase and out-phase Z-baffle arrangements.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

For a constant pumping power,

$$(\dot{V}\Delta p)_0 = (\dot{V}\Delta p)_a \quad (10)$$

and the relationship between friction and Reynolds number can be expressed as follows:

$$\left(\frac{fRe^3}{Re_0}\right)_0 = \left(\frac{fRe^3}{Re_a}\right)_a \quad (11)$$

$$Re_0 = Re_a \left(\frac{f_a}{f_0}\right)^{1/3}$$

The thermal performance enhancement factor, TEF, defined as the ratio of the of an augmented surface, h , to that of a smooth surface, h_0 , at an identical pumping power:

$$TEF = \frac{h}{h_0} \Big|_{pp} = \frac{Nu}{Nu_0} \Big|_{pp} = \left(\frac{Nu}{Nu_0}\right) \left(\frac{f_0}{f}\right)^{1/3} \quad (12)$$

4. Simulation of flow configuration

The flow system is a horizontal rectangular channel with Z-baffles repeatedly placed on one wall (lower wall for ease of observation in the present case) as depicted in Fig. 3a. The duct is divided into 3 sections: entry (0.45 m), test section (0.38 m), and exit (0.09 m). The detail of the full length baffle channel is shown in Fig. 3a whereas a module of the computational domain due to periodical flow along the Z-baffle is displayed in Fig. 3b. The grids used in the module are presented in Fig. 3c.

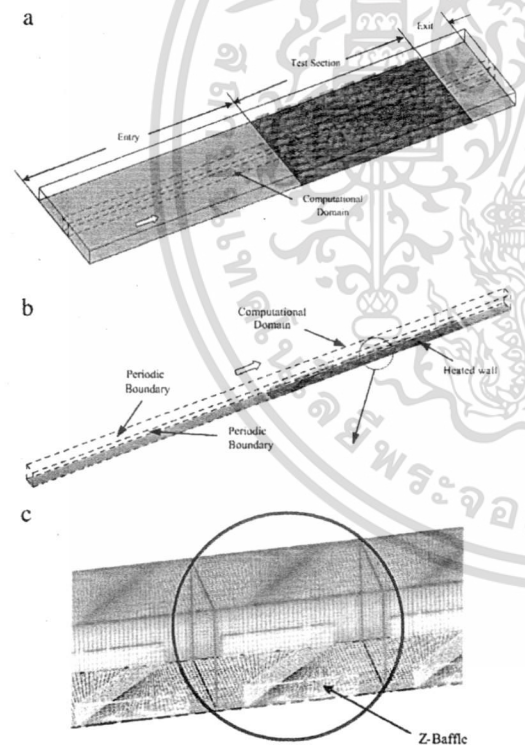


Fig. 3. (a) Duct geometry (b) Computational domain of flow and (c) grid.

For the baffled channel model, a uniform air velocity at 300 K ($Pr=0.707$) is introduced at the inlet while a pressure outlet condition is applied at the exit. The physical properties of air have been assumed to remain constant at initial air temperature. Impermeable boundary and no-slip wall conditions have been implemented over the channel walls as well as the baffle surface apart from the enhanced wall treatment. The upper wall is heated with a constant heat flux (2.5 kW/m^2) while the baffle is assumed at adiabatic wall (high thermal resistance) conditions. The channel height, H , is 30 mm, and the axial pitch or spacing between the baffles is set to P/H is 1.5. To investigate an effect of the baffle height, three height ratios, $e/H=0.1, 0.2$ and 0.3 , including the smooth channel are employed in the current investigation.

The numerical model for fluid flow and heat transfer in the channel is developed under the following assumptions: steady, three-dimensional, turbulent and incompressible flow; constant fluid properties; and ignored body forces, viscous dissipation and radiation heat transfer. Based on the above assumptions, the channel flow model is governed by the Reynolds averaged Navier-Stokes (RANS) equations with the RNG $k-\epsilon$ turbulence model and the energy equation. The details on mathematical modeling and boundary conditions can be found in Ref. [31].

5. Results and discussion

5.1. Verification of smooth channel

The present experimental results on heat transfer and friction characteristics in a smooth wall channel are first validated in terms of Nusselt number and friction factor. The Nusselt number and friction factor obtained from the present smooth channel are, respectively, compared with the correlations of Dittus-Boelter for Nusselt number, and of Blasius for friction factor found in the open literature [32] for turbulent flow in ducts.

Correlation of Dittus-Boelter,

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} \text{ for heating} \quad (13)$$

Correlation of Blasius,

$$f = 0.316Re^{-0.25} \text{ for } 3000 \leq Re \leq 20,000 \quad (14)$$

Fig. 4 shows a comparison of the Nusselt number and friction factor obtained from the present work with those from correlations of Eqs. (13) and (14). In the figure, the present results agree very well within $\pm 6\%$ with published correlations.

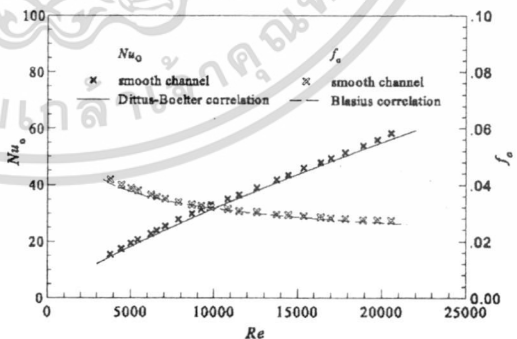


Fig. 4. Verification of Nu and f for smooth channel.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2. Effect of baffle height (e)

The experimental results on heat and flow friction characteristics in a uniform heat flux channel fitted with 45° Z-shaped baffles of three heights, $e = 3, 6$ and 9 mm ($e/H = 0.1, 0.2$ and 0.3), are presented in the form of Nu and f as displayed in Fig. 5. It is found in the figure that the Nu increases with increasing the e/H , apart from the Re values. The higher Nu can be seen at the larger e/H . This is because the larger baffle height causes flow separation and provides better increase in the turbulence intensity of the flow than the lower one. For the in-phase baffle array at $P/H = 1.5$, the increases in Nu with the $e/H = 0.1, 0.2$ and 0.3 are in the range of 430–440%, 530–550% and 640–670% over the smooth channel, respectively. Furthermore, the use of Z-baffles with $e/H = 0.3$ gives higher heat transfer than that with $e/H = 0.2$ and 0.1 around 10% and 30%, respectively.

The effect of the Z-baffles on the isothermal pressure drop across the tested section is depicted in Fig. 6 which displays the variation of the pressure drop in terms of f with Re . In the figure, it is apparent that the use of the Z-baffle leads to a substantial increase in the f over the smooth channel. This can be attributed to the flow blockage, higher surface area and the act caused by the reverse flow due to the presence of Z-baffles. As expected, the obtained f using the Z-baffle with $e/H = 0.3$ is substantially higher than that with smaller e/H values. The mean increase in the f of using the Z-baffle is in a range of 6.5 to 36 times over the smooth channel. The f value of the Z-baffle at $P/H = 1.5$ and $e/H = 0.3$ is found to be around 2 and 5 times higher than that with $e/H = 0.2$ and 0.1 , respectively. The losses mainly are due to high viscous losses near the wall, to the extra forces exerted by reverse flow and to the high flow blockage from the presence of the Z-baffles.

5.3. Effect of baffle pitch (P)

The effects of the baffle pitch with three P/H ratios ($P/H = 1.5, 2$ and 3) for using the 45° Z-baffles on heat transfer rate and friction loss in the form of Nu and f are also depicted in Figs. 5 and 6, respectively. In Fig. 5, it is found that the Nu increases with decreasing the P/H , apart from Re values. This is because the shorter baffle pitch interrupts the development of the boundary layer of the fluid flow and increases the turbulence intensity of the flow. For the in-phase Z-baffle at $e/H = 0.1$, the increases of the Nu for $P/H = 1.5, 2$ and 3 are in a range of 430–440%, 310–380% and 310–330% over the smooth channel, respectively. Importantly, the Z-baffle with $e/H = 0.1$ at $P/H = 1.5$ shows higher heat transfer rate than the one at $P/H = 2$ and 3 around 15% and 30%, respectively.

Furthermore, the f for the Z-baffle at $P/H = 1.5$ is much higher than that for the one at smaller P/H values. The f value for the Z-baffle with

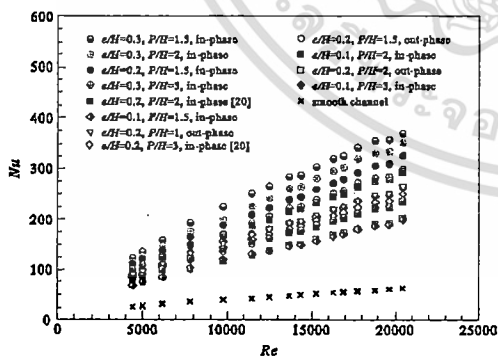


Fig. 5. Variation of Nu with Re for 45° Z-baffle.

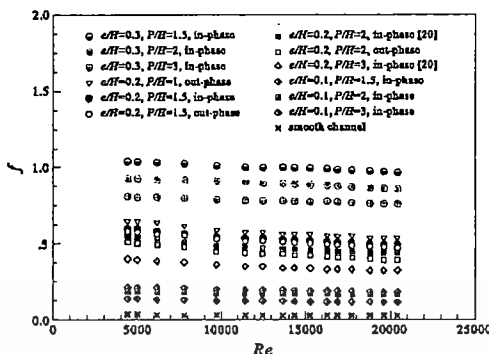


Fig. 6. Variation of f with Re for 45° Z-baffle.

$e/H = 0.1$ at $P/H = 1.5$ is, respectively, found to be around 10% and 90% higher than that of the one at $P/H = 2$ and 3 .

5.4. Effect of baffle arrangement

The influence of two different Z-baffle arrangements, in-phase and out-phase, on the heat transfer rate is also presented in Fig. 5. In the figure, it is visible that the in-phase Z-baffle provides higher heat transfer rate than the out-phase one for all Re values. This can be attributed to the larger flow area behind the Z-baffle tip creating the stronger reverse/recirculation flow from the in-phase array, leading to better flow mixing between the core and the near-wall. The mean increase in the Nu for using the in-phase Z-baffles is found to be about 35% over the out-phase one.

The variation of the isothermal f value with Re for the two different Z-baffle arrays is also depicted in Fig. 6. In the figure, the f value for the in-phase Z-baffle is found to be considerably higher than that for the out-phase one at a similar operating condition. The increase in the f for the Z-baffles with both arrays is much higher than that for the smooth channel.

5.5. Simulation of Z-baffled channel flow

The predicted Nusselt number (Nu) and friction factor (f) of the channel fitted with in-phase 45° Z-baffles at $P/H = 1.5$ is validated by comparison with measurements under similar operating conditions as shown in Fig. 7a and b, respectively. The comparison is made for the Z-baffles at three e/H ratios ($e/H = 0.1, 0.2$ and 0.3). It is worth noting that the numerical results are in good agreement with measurements and found to be slightly under-predicted. The discrepancies for both the Nu and f values are less than $\pm 20\%$.

Fig. 8 displays the streamlines and temperature contours in transverse planes for using the in-phase 45° Z-baffles with $e/H = 0.2$ and $P/H = 1.5$ at $Re = 4400$. It is seen in the figure that the Z-baffles can induce co-vortex flows along the test channel, leading to higher turbulence intensity. The velocity vectors and temperature fields in transverse planes are the most notable characteristics of the effects of the Z-baffle on the mainstream flow. These effects are mainstream flow separation, recirculation/vortex, and secondary flow. The streamline is visible that co-rotating vortices or longitudinal vortex flows caused by the Z-baffle appear on the channel. The appearance of the longitudinal vortex flows can help to increase higher the heat transfer in the channel because of transporting the cold fluid from the core to the near wall regimes which effects on the increasing of the temperature different between the heated wall and the cold fluid. This characteristic results in significant enhancement of the heat transfer rate of the heat exchanger.

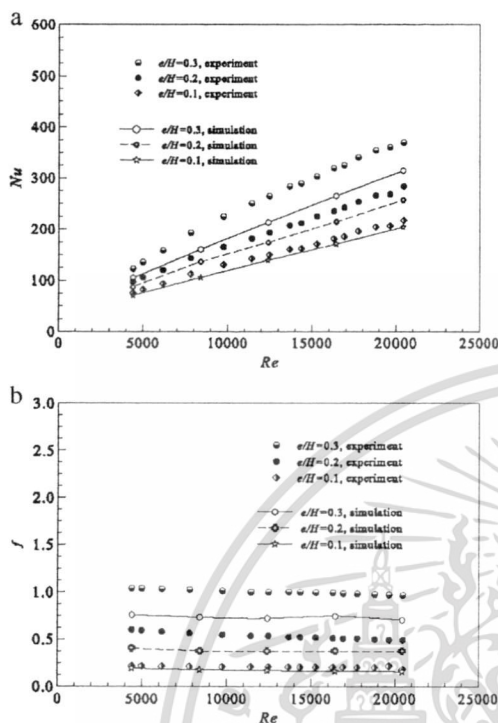


Fig. 7. Variation of (a) Nu and (b) f with Re for in-phase 45° Z-baffle at $P/H = 1.5$.

The local Nusselt number (Nu_x) contours based on $Re = 4400$ for the Z-baffled wall are for the smooth channel, the in-phase 45° Z-baffles with $e/H = 0.1, 0.2,$ and 0.3 are presented in Fig. 9a, b, c, and d, respectively. In the figure, it is apparent that the higher Nu_x value is found in the vicinity of the Z-baffle elements. The highest Nu_x values are

observed at the impingement flow areas on the wall behind the Z-baffle tips. In scrutiny of the Z-baffle with $e/H = 0.3$ (Fig. 9d), it is seen that the higher Nu_x values appear to be in a larger region than those of the one with lower e/H . This is because the Z-baffle with $e/H = 0.3$ can induce larger recirculation or vortex flow appearing behind the Z-baffle than the one with lower e/H and the smooth channel as can be seen from the Nu_x contour plotted in Fig. 9.

5.6. Performance evaluation

The variation of the thermal performance enhancement factor (TEF) with the Re values for all the 45°Z-baffles is depicted in Fig. 10. The data obtained from the Nu and f measurements are compared at an equal pumping power condition. It is observed that the TEFs for the in-phase Z-baffles generally are found to be above unity and to be much higher than those for employing the out-phase Z-baffles at similar baffle and flow conditions. This indicates that the use of the in-phase Z-baffles leads to the advantage over that of the out-phase ones. The TEF tends to decrease with the increase of Re, e/H and P/H for all Z-baffles applied. It is worth noting that the TEF of the in-phase Z-baffle at $P/H = 1.5$ is higher than that at higher P/H and the TEF of the in-phase Z-baffle at $e/H = 0.1$ is higher than that at larger e/H . The optimum TEF is around 2.2 for the in-phase Z-baffle with $e/H = 0.1$ and $P/H = 1.5$ at lower Re values. The present TEF result is found to be much better than that using the ribs as reported in previous investigations [9,26,27,29].

Correlations for the Nu and f of the in-phase 45° Z-baffles with various e/H ratios (0.1, 0.2 and 0.3) and P/H ratios (1.5, 2 and 3) are written as follows:

$$Nu = 0.290236Re^{0.669891}Pr^{0.4}(e/H + 1)^{4.854232}(P/H + 1)^{-0.47904}$$

for $4400 \leq Re \leq 20,400$ (15)

$$f = 0.237223Re^{-0.0726}(e/H + 1)^{9.859262}(P/H + 1)^{-0.86932}$$

for $4400 \leq Re \leq 20,400$ (16)

The correlations for Nu and f of the in-phase 45° Z-baffles from Eqs. (15) and (16) are valid for the above conditions within $\pm 10\%$.

6. Conclusions

An experimental and numerical study has been conducted to examine the heat transfer and flow friction characteristics in a channel of aspect ratio of 10 fitted with the in-phase and out-phase

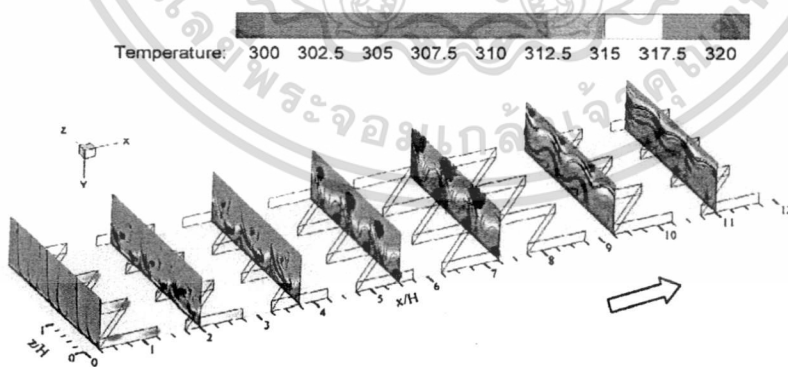


Fig. 8. Streamlines and temperature contours for 45° Z-baffle with $e/H = 0.2, P/H = 1.5$ at $Re = 4400$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

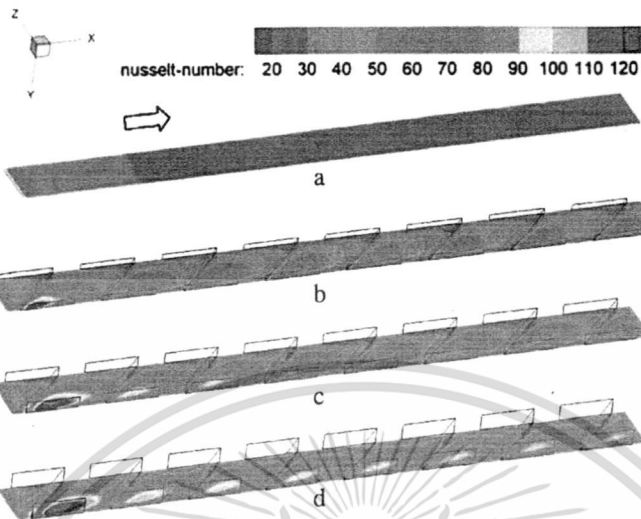


Fig. 9. Nu_x contours at $Re = 4400$ for (a) smooth channel, (b) $e/H = 0.1$, (c) $e/H = 0.2$ and (d) $e/H = 0.3$ Z-baffles with $P/H = 1.5$.

45° Z-baffles in the turbulent regime from $Re = 4400$ to 20,400. For the in-phase Z-baffles, the Nu , f and TEF values are dependent of the baffle height, pitch and Reynolds number. It is interesting to note that the Nu tends to increase with increasing the Re and the baffle height but with decreasing the baffle pitch. The in-phase Z-baffle performs better than the out-phase one. Also, the presence of the Z-baffle leads to a substantial increase in friction loss compared with the smooth channel with no baffle. The TEF of the in-phase Z-baffles tends to decrease with the increase in Re , baffle height and pitch values. The in-phase Z-baffle with $e/H = 0.1$, $P/H = 1.5$ provides the highest TEF at about 2.2 at the lowest Re .

Acknowledgements

The funding of this work is supported by the Commission on Higher Education (CHE) under the CHE-PhD-THA scholarship program and the National Metal and Materials Technology Center, (MTEC), Thailand.

References

- [1] P. Promvong, C. Thianpong, Thermal performance assessment of turbulent channel flow over different shaped ribs, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 35 (2008) 1327-1334.
- [2] S. Sriattanapit, P. Promvong, Numerical analysis of laminar heat transfer in a channel with diamond-shaped baffles, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 36 (1) (2009) 32-38.
- [3] P. Promvong, S. Sriattanapit, S. Kwankaomeng, Laminar periodic flow and heat transfer in square channel with 45° inline baffles on two opposite walls, *International Journal of Thermal Sciences* 49 (6) (2010) 963-975.
- [4] P. Promvong, W. Jedsadaratanachai, S. Kwankaomeng, Numerical study of laminar flow and heat transfer in square channel with 30° inline angled baffle turbulators, *Applied Thermal Engineering* 30 (11-12) (2010) 1292-1303.
- [5] S. Eiamsa-ard, P. Promvong, Thermal characteristics of turbulent rib-grooved channel flows, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 36 (2009) 705-711.
- [6] S. Eiamsa-ard, C. Thianpong, P. Eiamsa-ard, P. Promvong, Thermal characteristics in a heat exchanger tube fitted with dual twisted tape elements in tandem, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 37 (2010) 39-46.
- [7] S. Eiamsa-ard, P. Promvong, Heat transfer characteristics in a tube fitted with helical screw-tape with/without core-rod inserts, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 34 (2007) 176-185.
- [8] S. Eiamsa-ard, S. Rattanaowong, P. Promvong, Turbulent convection in round tube equipped with propeller type swirl generators, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 36 (2009) 357-364.
- [9] P. Promvong, C. Khanokniyakarn, S. Kwankaomeng, C. Thianpong, Thermal behavior in solar air heater channel fitted with combined rib and delta-winglet, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 38 (2011) 749-756.
- [10] Varun, R.P. Saini, S.K. Singal, A review on roughness geometry used in solar air heaters, *Solar Energy* 81 (2007) 1340-1350.
- [11] V.S. Hans, R.P. Saini, J.S. Saini, Performance of artificially roughened solar air heaters - a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009) 1854-1869.
- [12] M.M. Sahu, J.L. Bhagoria, Augmentation of heat transfer coefficient using 90° broken transverse ribs on absorber plate of solar air heater, *Renewable Energy* 30 (13) (2005) 2057-2073.
- [13] M.K. Mittal, Varun, R.P. Saini, S.K. Singal, Effective efficiency of solar air heaters having different types of roughness elements on absorber plate, *Energy* 32 (5) (2007) 739-745.
- [14] R. Karwa, Experimental studies of augmented heat transfer and friction in asymmetrically heated rectangular channels with ribs on the heated wall in transverse, inclined, V-continuous and V-discrete pattern, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 30 (2) (2003) 241-250.
- [15] Varun, R.P. Saini, S.K. Singal, Investigation of thermal performance of solar air heater having roughness elements as a combination of inclined and transverse ribs on the absorber plate, *Renewable Energy* 33 (6) (2008) 1398-1405.
- [16] A.M.E. Momin, J.S. Saini, S.C. Solanki, Heat transfer and friction in solar air heater duct with V-shaped rib roughness on absorber plate, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 45 (2002) 3383-3396.

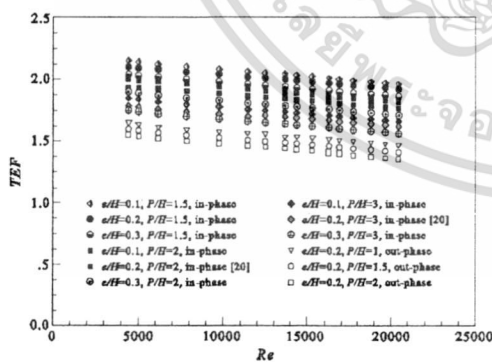


Fig. 10. Variation of TEF with Re for 45° Z-baffles.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [17] C.O. Olsson, B. Sundén, Thermal and hydraulic performance of a rectangular duct with multiple V-shaped ribs, *ASME Journal of Heat Transfer* 120 (4) (1998) 1072–1077.
- [18] C.O. Olsson, B. Sundén, Experimental study of flow and heat transfer in rib roughened rectangular channels, *Experimental Thermal and Fluid Science* 16 (4) (1998) 349–365.
- [19] X. Gao, B. Sundén, PIV measurement of the flow field in rectangular ducts with 60° parallel, cross and V-shaped ribs, *Experimental Thermal and Fluid Science* 28 (6) (2004) 639–653.
- [20] P. Sriromreun, P. Promvong, Heat transfer augmentation in a rectangular duct with Z-shaped ribs, *International Conference on Green and Sustainable Innovation/CGSI*, 2–4 Dec 2009, Chiang Rai Thailand, 2009.
- [21] P. Promvong, Heat transfer and pressure drop in a channel with multiple 60° V-baffles, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 37 (7) (2010) 835–840.
- [22] G. Tanda, Heat transfer in rectangular channels with transverse and V-shaped broken ribs, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 47 (2) (2004) 229–243.
- [23] D.H. Lee, D.-H. Rhee, K.M. Kim, H.H. Cho, H.-K. Moon, Detailed measurement of heat/mass transfer with continuous and multiple V-shaped ribs in rectangular channel, *Energy* 34 (2009) 1770–1778.
- [24] H.H. Cho, S.J. Wu, H.J. Kwon, Local heat/mass transfer measurement in a rectangular duct with discrete ribs, *ASME Journal of Turbomachinery* 122 (2000) 579–586.
- [25] J.L. Bhargava, J.S. Saini, S.C. Solanki, Heat transfer coefficient and friction factor correlations for rectangular solar air heater duct having transverse wedge shaped rib roughness on the absorber plate, *Renewable Energy* 25 (2002) 341–369.
- [26] C. Thianpong, T. Chompoekham, S. Skullong, P. Promvong, Thermal characterization of turbulent flow in a channel with isosceles triangular ribs, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 36 (2009) 712–717.
- [27] T. Chompoekham, C. Thianpong, S. Kwankaomeng, P. Promvong, Heat transfer augmentation in a wedge-ribbed channel using winglet vortex generators, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 37 (2010) 163–169.
- [28] P. Promvong, S. Sripattanapipat, S. Tamna, S. Kwankaomeng, C. Thianpong, Numerical investigation of laminar heat transfer in a square channel with 45° inclined baffles, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 37 (2010) 170–177.
- [29] P. Promvong, T. Chompoekham, S. Kwankaomeng, C. Thianpong, Enhanced heat transfer in a triangular ribbed channel with longitudinal vortex generators, *Energy Conversion and Management* 51 (2010) 1242–1249.
- [30] ANSI/ASME, Measurement uncertainty, *PTC 19 (1986) 1–1985 (Part 1)*.
- [31] P. Promvong, W. Changcharoen, S. Kwankaomeng, C. Thianpong, Numerical heat transfer study of turbulent square-duct flow through inline V-shaped discrete ribs, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 38 (10) (2011) 1382–1398.
- [32] F. Incropera, P.D. Dewitt, *Introduction to Heat Transfer*, Fifth edition John Wiley & Sons Inc, 2006.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



1st International Symposium on Technology for Sustainability

(ISTS2011)

26-29 January 2012, KMITL, Bangkok Thailand



Co-organized by:

***Institute of National Colleges of Technology, Japan
and***

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Heat transfer augmentation in rectangular duct with different arrangements of 45° Z-shaped baffles

Parkpoom Sriromreun* and Pongjet Promvonge

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand
Tel.: +662-3298351; fax: +662-3298352; Email: sriromreun@yahoo.co.th

Abstract— An experiment is carried out to investigate the effect of in-phase and out-phase 45° Z-baffles on heat transfer characteristics in a channel. Reynolds numbers studied ranging from 4400 to 20,400 in the test section. The rectangular duct has aspect ratio 10 and height, $H=30$ mm. with the Z-baffle height (e), $e/H = 0.3$ and the baffle pitch (P), $P/H=1.5, 2$. The baffles were fitted in Z-shape aligned in series on the whole area of the upper plate. The results of the Z-baffles show the significant increase in heat transfer rate and friction loss over the smooth channel. The 45° Z-baffle in-phase at $e/H=3$ and $P/H=1.5$ provides the highest increase in the heat transfer rate and the best thermal performance.

Index Terms - channel flow, enhanced heat transfer, baffle, Nusselt number

I. INTRODUCTION

In the past, the development heat exchangers were used baffles, ribs and fins to expand the surface area for heat exchanger. Baffles were improved to increase heat transfer rate, but it was high friction loss. The thermal performance was low from fluid flow though the heat exchanger with baffles, ribs or fins. Baffles obstructed the fluid flow and increase friction loss. Therefore, the researchers developed characteristics of baffle for decrease friction loss, whereas heat transfer rate was high. These types were create turbulence flow, vortex flow and impinging on heat transfer surface for increasing thermal performance.

Hwang [1] investigated the experiment of heat transfer and friction loss in a slit baffles mounted. It was found that slit baffles showed higher thermal performance, heat transfer (Nusselt number) and friction factor than solid baffles about 48, 32 and 19% respectively. Taslim and Lengkon [2] also found that the 45° out-phase baffles provide higher thermal performance at about 2.2 times of the smooth channel. Cho et al. [3] investigated the effect of rectangular duct with 45° and 90° discrete baffles on thermal characteristics.

They found that the most heat/mass transfer performances about 1.2. Sriromreun and Promvonge [4] reported on Nusselt number, friction factor and thermal enhancement by various characteristics of baffle at Z shape. They demonstrated a 700% improvement in Nusselts number over the smooth channel. Thermal enhancement was about 3 for using the Z-baffle with

0.2H height and 3H pitch at 5000 Reynolds number.

II. EXPERIMENTAL SETUP

The experimental device is shown in Fig. 1 by using air as fluid flow. Blower was used to blow air through the test section. Manometer was used to measure the pressure drop across the orifice and it was converted to the flow rates. Then air was flowed through the expansion tank that leads to obtain smooth fluid flow. The fluid flow was passed though the square duct and it has the same size of the test section to enable the smooth fluid flow. The heater was installed on the top wall of the test section to maintain uniform surface heat flux. 10 thermocouples were used to measure temperature at the top wall of the test section and the other 2 thermocouples for inlet and outlet test section. The manometer was used to measure pressure drop between inlet and outlet test section.

Z-baffle characteristics are shown in Fig. 2 and 3. Fig. 2 shows test section characteristics among Z-baffles. Fig. 3 shows test section side view. The angle of the Z-baffles is 45° (α) and the width (w) is equal to the height of flow field ($H = 30$ mm.). The baffle pitch ratio (P/H) is 1.5 and 2 and the height of baffles ratio (e/H) is 0.3. Each of the baffles was made of 1.2 mm. thick aluminum sheet. The overall length of the channel is 1,500 mm. (L) with the channel width of 300 mm. (W).

The types of baffle arrangement are shown in Fig. 2. The row of in-phase baffles are inline by a baffle-to-baffle but the rows of the out-phase baffles are shifted by a half baffle-to-baffle pitch in the flow direction so that each row and its neighboring rows are staggered. With these arrangements, the total areas covered by the baffles with the same baffle angle on the walls are identical for all types of baffle height and pitch.

III. DATA REDUCTION

Inlet - outlet temperature and pressure drop (Δp) of test section were obtained from the experiment. They were used to calculate in another form because they can be described heat transfer characteristics. Firstly, the friction factor (f) on the test section with baffles was calculated from pressure drop.

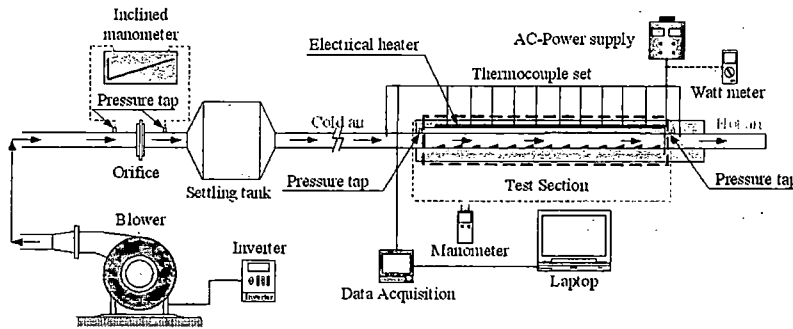


Figure 1. Schematic diagram of experimental apparatus

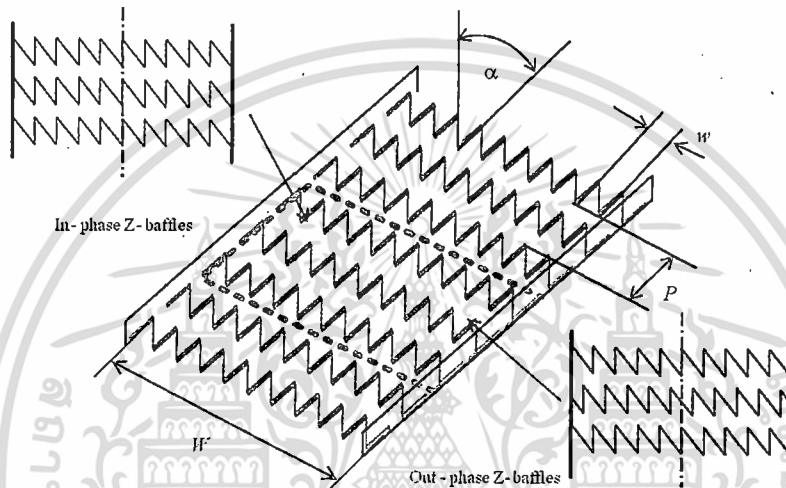


Figure 2. Test section with in-phase and out-phase Z-baffle arrangements

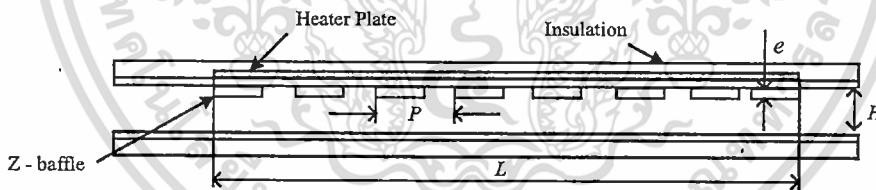


Figure 3. Test section

$$\dot{W}_m = q\Delta p \tag{1}$$

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

Then, the heat transfer coefficient (h) was calculated from temperatures.

$$Q = mC_p(T_{in} - T_{out}) = hA_s(T_s - T_b) \tag{3}$$

The Nusselt number (Nu) was calculated from the heat

transfer coefficients. It is represented for the performance of the heat transfer.

$$Nu = \frac{hD_h}{k} \tag{4}$$

After that the thermal enhancement factor (TEF) was calculated from the ratio of heat transfer coefficient with baffles (h) and smooth channel (h_s) or ratio of Nusselt number [5] at the same pumping power (pp).

$$TEF = \left[\frac{h}{h_s} \right]_{pp} = \left[\frac{Nu}{Nu_s} \right]_{pp} \quad (5)$$

$$TEF = \left(\frac{Nu}{Nu_s} \right) \left(\frac{f}{f_s} \right)^{-1/3} \quad (6)$$

IV. RESULTS AND DISCUSSION

From the data reduction, the results from experiment were used to plot with Reynolds number (*Re*).

A. Verification of smooth channel

The aim of this work is to find the heat transfer characteristics and friction of smooth channel compared with Dittus-Bolter and Blasius equations [6]. Then the precision of the test system and experimental devices were obtained. The equations of validation are as follows:

Correlation of Dittus-Bolter,
 $Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}$ for heating (7)

Correlation of Blasius,
 $f = 0.316 Re^{-0.25}$ for $3000 \leq Re \leq 20,000$ (8)

The experimental results are shown in Fig. 4. The discrepancies from correlations of equations (7) and (8) are less than ±6%.

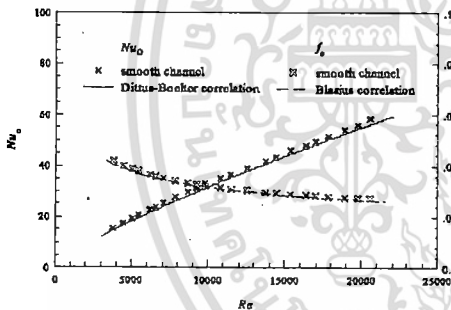


Figure 4. Verification of Nusselt number and friction factor for smooth channel

B. Effect of baffle arrangement

The present results are reported for using two different baffle arrangements: in-phase and out-phase. Figure 5 and 6 also display the comparison of heat transfer and friction loss in the channel fitted with in-phase and out-phase baffle arrays, respectively. It is visible in Fig. 5 that the channel with the in-phase array provides higher heat transfer rate than that with the out-phase one for all Reynolds numbers. This can be attributed to the higher flow blockage creating the stronger reverse/recirculation flow from the in-phase array, leading to better mixing between the core and the wall flows. The mean increase in Nusselt number from using the in-phase baffles is found to be about 37% over the out-phase one.

The variation of isothermal friction factor value with Reynolds number for two different baffle arrays is also depicted in Fig. 6. In the figure, the friction factor value for the in-phase array is found to be considerably higher than that for the out-phase array. The increase in friction factor for using baffles with both arrays is much larger than the smooth channel. This can be attributed to the dissipation of dynamic pressure of the fluid due to higher flow blockage and surface area.

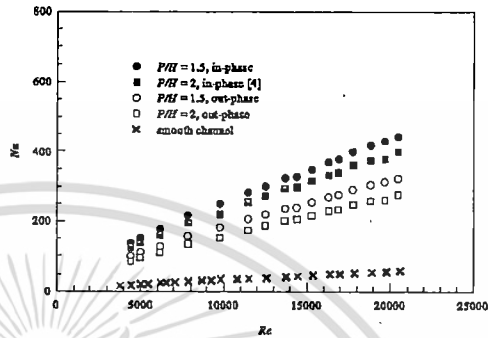


Figure 5. Variation of Nusselt number with Reynolds number

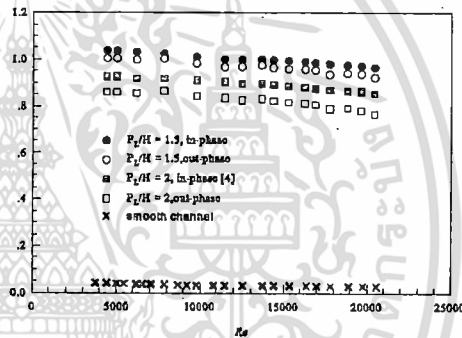


Figure 6. Variation of friction factor with Reynolds number

C. Performance evaluation

The variation of the thermal enhancement factor (*TEF*) with the Reynolds number values for all 45°Z-baffle is depicted in Fig. 7. For all, the data obtained by measured Nusselt number and friction factor values are compared at an equal pumping power. It is visible in the figure that the enhancement factors for the in-phase baffles generally are found to be above unity and to be much higher than those for employing the out-phase baffles in the same height and pitch of baffle. This indicates that the use of the in-phase baffles leads to the advantage over that of the out-phase baffle. The enhancement factor tends to decrease with the rise of *Re* for all baffles applied. For the out-phase Z-baffle with *e/H*=0.3 and *P/H*=2 yields the enhancement factor below unity only at higher Reynolds number regime. This is because of the low Nusselts number from using a large value of the baffle pitch (*P/H*=2). It is worth noting that the enhancement factors of the in-phase baffles with *P/H*=1.5 higher than those with the baffle for all pitches. The enhancement factor of the in-phase Z-baffle with *e/H*=0.3

and $P/H=1.5$ is found to be the best among all Z-baffles used and is about 2 at the lowest value of Reynolds number.

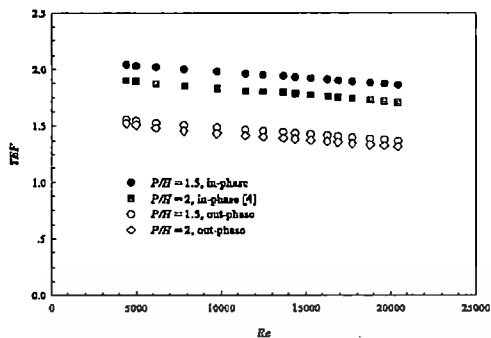


Figure 7. Variation of thermal enhancement factor with Reynolds number

V. CONCLUSION

From the experimental data, it can be concluded that the in-phase Z-baffles can increase heat transfer rate (Nu) and thermal enhancement factor (TEF) which are more than that of out-phase Z-baffles and smooth channel for the turbulent region at $Re=4400$ to $20,400$. For the in-phase Z-baffles, Nusselt number and thermal enhancement factor value depending on arrangement, baffle pitch and Reynolds number. They are interesting to note that the Nusselt number tends to increase with increase the Reynolds number and decrease baffle pitch.

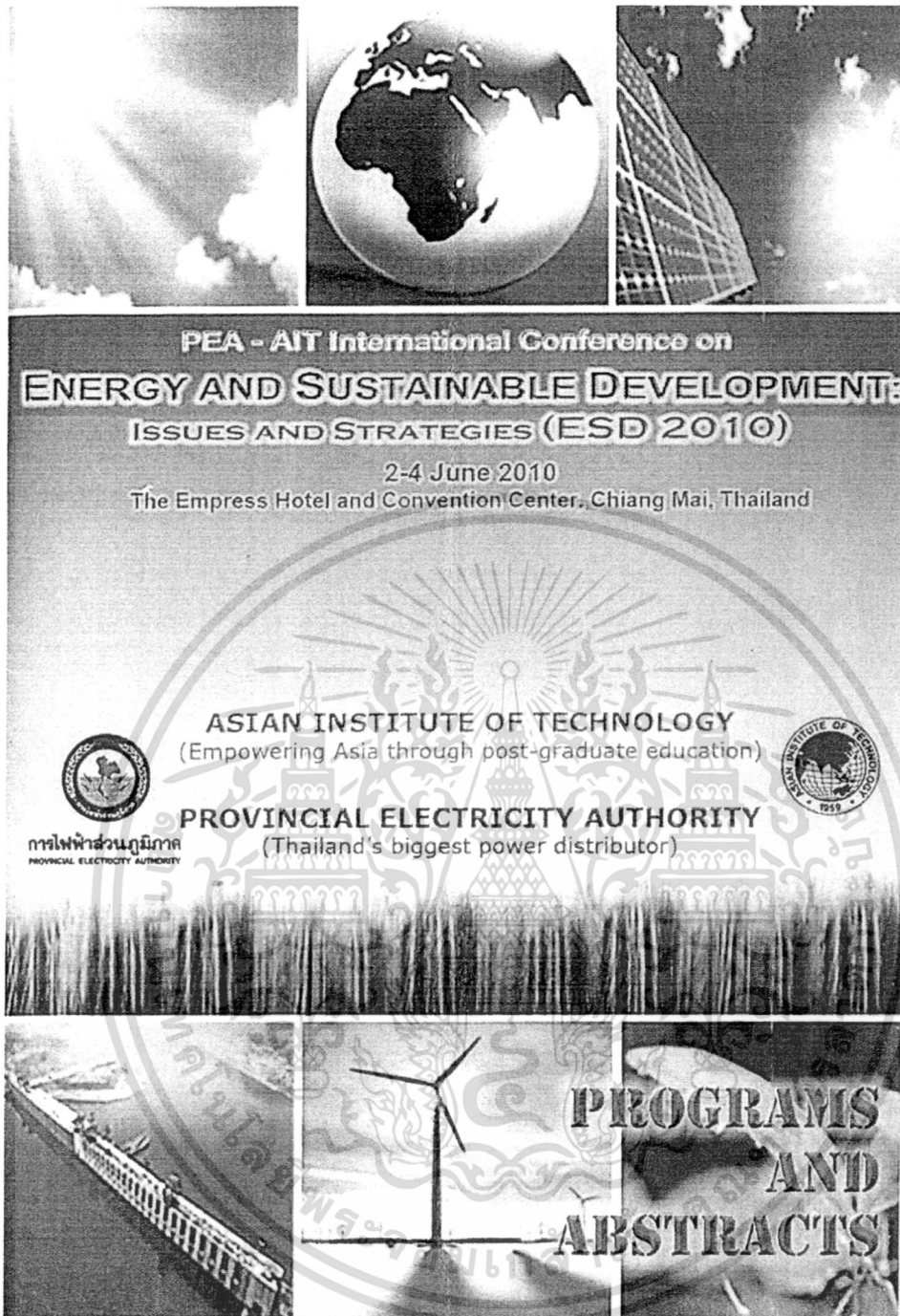
The thermal enhancement factor of the in-phase Z-baffles tends to decrease with increase the Reynolds number, baffle pitch. The in-phase 45° Z-baffle at $e/H=0.3$ and $P/H=1.5$ shows the highest TEF about 2 at $Re=4400$.

VI. ACKNOWLEDGEMENT

This study was supported by Commission on Higher Education and National Metal and Materials Technology Center of Thailand.

VII. REFERENCES

- [1] Hwang, J.J. 1998. Heat Transfer-Friction Characteristic Comparison in Rectangular Ducts With Slit and Solid Ribs Mounted on One Wall, ASME J Heat Transfer 120: 709-716.
- [2] Taslim, M.E. and Lengkong, A. 1998. 45 deg Staggered Rib Heat Transfer Coefficient Measurements in a Square Channel, ASME J Turbomachinery 120: 571-580.
- [3] Cho, H.H., Wu, S.J. and Kwon, H.J. 2000. Local heat/mass transfer measurement in a rectangular duct with discrete ribs, ASME J Turbomachinery 122: 579-586.
- [4] Srirongreun, P. and Promvong, P. 2009. Heat transfer augmentation in a rectangular duct with Z-shaped ribs, Int. Conf. on Green and Sustainable Innovation, Dec 2-4.
- [5] Webb, R. L. 1992. Principles of Enhanced Heat Transfer, John-Wiley & Sons Inc.
- [6] Incropera, F. and Dewitt, P.D. 1996. Introduction to Heat Transfer, 3rd edition John Wiley & Sons Inc.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Augmented Heat Transfer in Rectangular Duct with Angled Z-Shaped Ribs

Monsak Pimsam, Parkpoom Sriromreun and Pongjet Promvong*



Abstract – An experiment is focused on the design of the suitable ribs used for enhancing heat transfer in a rectangular duct heat exchanger by using wall heat transfer (Nusselt number), friction loss (friction factor) and thermal performance (thermal enhancement factor) data. The Z-shaped ribs were set on the rectangular duct at 30°, 45° and 60° and flat rib was set at 90° relative to the air flow direction. Reynolds numbers studied ranging from 5000 to 25,000 in the test section. The rectangular duct has aspect ratio, $AR = 10$ and height, $H = 30$ mm with the Z-rib height (e), $e/H = 0.2$ and the rib pitch (P), $P/H = 3$. The ribs were fitted in Z-shape (Z-rib) aligned in series on the whole area of the upper plate. The results of the Z-ribs show the significant increase in heat transfer rate and friction loss over the smooth channel. The 45° Z-rib provides the highest increase in the heat transfer rate and the best thermal performance.

Keywords – channel flow, enhanced heat transfer, rib, angle rib, Nusselt number

1. INTRODUCTION

In the past, the development heat exchangers were used ribs and fins to expand the surface area for heat exchanger. Ribs and fins were improved to increase heat transfer rate, but it was high friction loss. The thermal performance was low from fluid flow through the heat exchanger with ribs or fins. Ribs and fins obstructed the fluid flow and increase friction loss. Therefore, the researchers developed characteristics of rib and fin for decrease friction loss, whereas heat transfer rate was high. These types were create turbulence flow, vortex flow and impinging on heat transfer surface for increasing thermal performance.

Hwang [1] investigated the experiment of heat transfer and friction loss in a slit ribs mounted. It was found that slit ribs showed higher thermal performance, heat transfer (Nusselt number) and friction factor than solid ribs about 48, 32 and 19% respectively. Taslim and Lengkon [2] also found that the 45° out-phase ribs provide higher thermal performance at about 2.2 times of the smooth channel. Cho et al. [3] investigated the effect of rectangular duct with 45° and 90° discrete ribs on thermal characteristics. They found that the most heat/mass transfer performances about 1.2. Sriromreun and Promvong [4] reported on Nusselt number, friction factor and thermal enhancement by various characteristics of rib at Z-shaped rib. They demonstrated a 700% improvement in Nusselt number over the smooth channel. Thermal enhancement was about 3 for using the Z-rib with 0.2H height and 3H pitch at 5000 Reynolds number.

Consequently, this research is focused on the development of Z-rib for varying angle with 3 values ($\alpha = 30^\circ, 45^\circ$ and 60°). The trial showed Nusselt number, friction factor and thermal enhancement behaviors for airflow through a constant heat flux channel fitted with Z-ribs. Experimental results are presented in turbulent channel flows in a range of Reynolds number from 5000 – 23,000.

2. EXPERIMENTAL SETUP

Z-rib characteristics are shown in Fig. 1 and 2. Fig. 1 shows test section characteristics among Z-ribs while Fig. 2 depicts the test section side view. The angle of the Z-ribs is 30°, 45° and 60° (□) and the width (w) is equal to the height of the channel ($H = 30$ mm). The rib pitch ratio (P/H) is 3 and the height of ribs ratio (e/H) is 0.2. Each of the ribs was made of 1.2 mm thick aluminum sheet. The channel width of 300 mm (U) and the overall length of the channel is 1500 mm (L) which included 5 pitches of the test section.

A schematic diagram of the experimental apparatus is presented in Fig. 3 by using air as fluid flow. Blower was used to supply air through the test section. Manometer was used to measure the pressure drop across the orifice and it was converted to the flow rates. Then air was flowed through the expansion tank that leads to obtain smooth fluid flow. The fluid flow was passed through the square duct and it has the same size of the test section to enable the smooth fluid flow. The AC power supply was the source of power for the plate-type heater, used for heating the upper plate of the test section only to maintain uniform surface heat flux. 10 thermocouples were used to measure temperature at the top wall of the test section and the other 2 thermocouples for inlet and outlet test section. The thermocouples were attached in holes drilled from the rear face and centered of the wall with the respective junctions positioned within 2 mm of the inside wall and axial separation was 40 mm apart.

*School of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

Tel: +662-3264197, fax: +662-3264198

Corresponding author, E-mail: kppongje@kmitl.ac.th

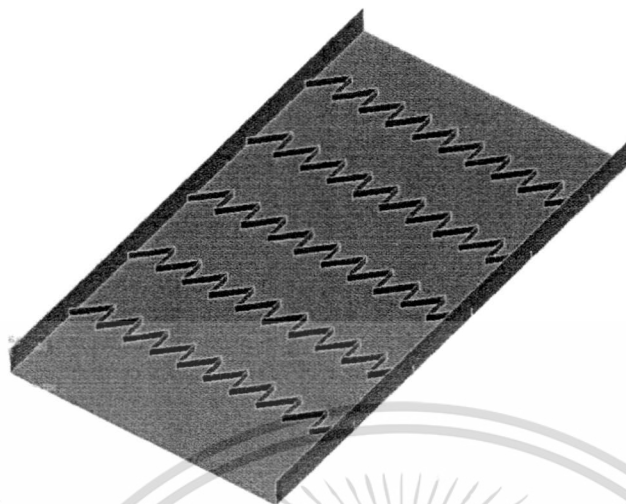


Fig. 1. Test section.

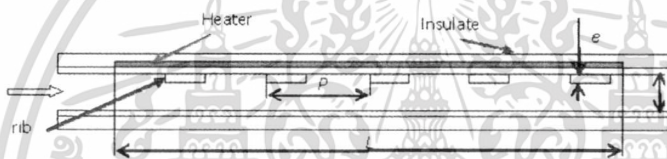


Fig. 2. Test section side view.

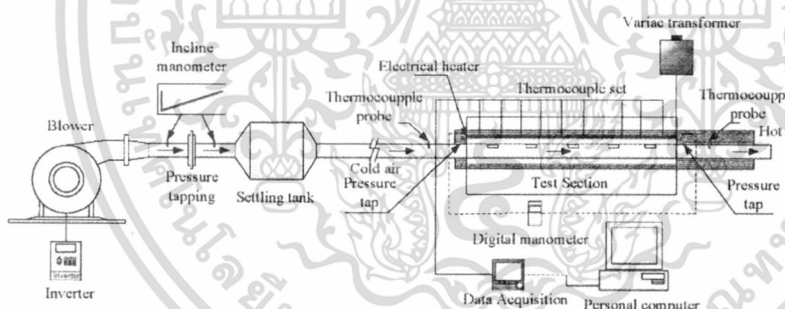


Fig. 3. Schematic diagram of experimental apparatus.

3. DATA REDUCTION

Inlet - outlet temperature and pressure drop of test section were obtained from the experiment. They were used to calculate in another form because they can be described heat transfer characteristics. Firstly, the heat transfer coefficient (h) was calculated from temperatures.

$$Q = mC_p(T_{in} - T_{out}) = hA_s(T_w - T_b) \quad (1)$$

The Nusselt number (Nu) was calculated from the heat transfer coefficients. It is represented for the

performance of the heat transfer.

$$Nu = \frac{hD_h}{k} \quad (2)$$

Then, the friction factor (f) on the test section with ribs was calculated from pressure drop.

$$\dot{W}_{in} = q\Delta p \quad (3)$$

$$\Delta p = f \frac{\rho L \bar{V}^2}{2D_h} \quad (4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

After that the thermal enhancement factor (η) was calculated from the ratio of heat transfer coefficient with ribs (h) and smooth channel (h_o) or ratio of Nusselt number [5] and friction factor with ribs (f) and smooth channel (f_o) or ratio of friction factor ratio at the same pumping power

$$\eta = \left[\frac{h}{h_o} \right]_{pp} = \left[\frac{Nu}{Nu_o} \right]_{pp} \quad (5)$$

$$\eta = \left(\frac{Nu}{Nu_o} \right) \left(\frac{f}{f_o} \right)^{-1/3} \quad (6)$$

4. RESULT AND DISCUSSION

From the data reduction, the results from experiment were used to plot with Reynolds number (Re).

4.1 Verification of smooth channel

The aim of this work is to find the heat transfer characteristics and friction of smooth channel compared with Dittus-Boelter and Blasius equations [6]. Then the precision of the test system and experimental devices were obtained. The equations of validation are as follows:

Correlation of Dittus-Boelter,

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \text{ for heating} \quad (7)$$

Correlation of Blasius,

$$f = 0.316 Re^{-0.25} \text{ for } 3000 \leq Re \leq 20,000 \quad (8)$$

Figures 4 and 5 show, respectively, the comparison of Nusselt number and friction factor obtained from the present work with those from correlations of Eqs. (7) and (8). In the figures, the present results reasonably agree well within $\pm 6\%$ for both friction factor correlation of Blasius and Nusselt number correlation of Dittus-Boelter.

4.2 Effect of attack angle

This section shows the comparison among the results of Z-ribs with $\alpha = 30^\circ, 45^\circ$ and 60° , flat rib with the same rib height and pitch ratio, ($e/H = 0.2$ and $P/H = 3$) and smooth channel. Figs. 6 and 7 show the heat transfer (Nusselt number) and friction loss (friction factor). The Z-ribs 60° are higher heat transfer rate than that the Z-ribs 45° and 30° , the flat ribs and smooth channel for all Reynolds numbers as shown in Fig. 6. The heat transfer rates obtained from the Z-ribs with $\alpha = 60^\circ, 45^\circ$ and 30° are, respectively, around 485%, 465% and 435% over the smooth channel as can be seen in Fig. 8. It is interesting to note that the Nusselt number tends to increase with increase the Reynolds number.

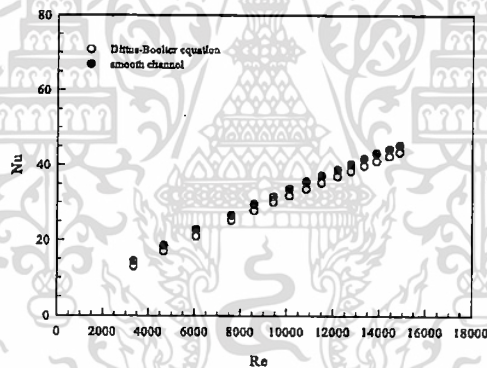


Fig. 4. Verification of Nusselt number for smooth channel

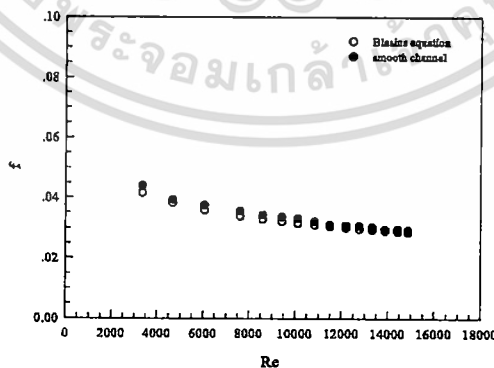


Fig. 5. Verification of friction factor for smooth channel.

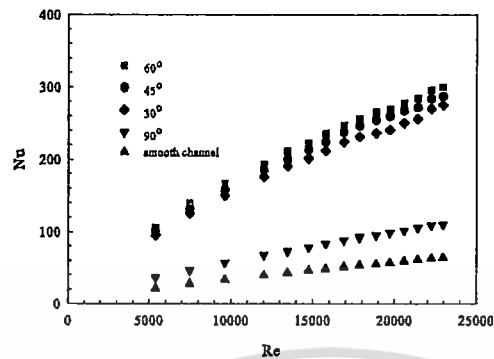


Fig. 6. Variation of Nusselt number with Reynolds number.

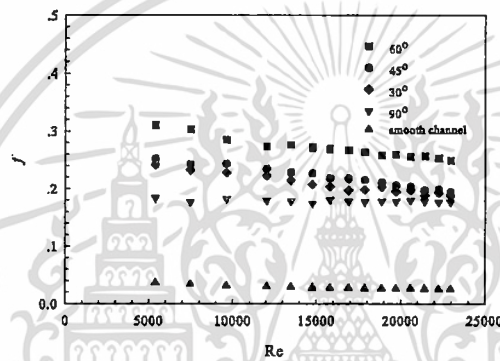


Fig. 7. Variation of friction factor with Reynolds number.

Effects of the Z-ribs on the pressure loss across the tested channel are depicted in Fig. 7. The variations of the pressure drop are presented in friction factor terms with Reynolds number. It was found that using of the Z-ribs increased the friction factor values which were higher than that of the flat ribs and the smooth channel. The average increases in the friction factor for the Z-ribs with $\alpha = 60^\circ$, 45° and 30° are, respectively, about 9.2, 7.4 and 7.1 times for smooth channel as can be seen in Fig. 9. However the friction factor increases with the increase of the rib angle.

4.3 Performance evaluation

This section shows variation of the thermal enhancement factor with the Reynolds number in Fig. 10. In the figure,

the thermal enhancement factors of all Z-ribs are higher than the flat rib, due to the low heat transfer rate from the flat rib. The Z-rib with 45° shows the highest thermal enhancement factor. It is interesting to note that the thermal enhancement factor of the Z-rib with 45° is higher than those of the angle in the same rib pitch distance and rib height. This is because the Nusselt number at 45° is very high when compare with the other angle ribs shown in Figs. 6 and 8. The thermal enhancement factor tends to decrease with the rise of Reynolds number values. The 45° Z-rib shows the highest thermal enhancement factor of about 2.55 at $Re = 5000$ and the average thermal enhancement factor is around 2.4.

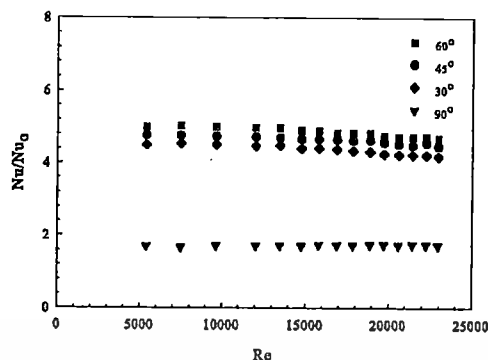


Fig. 8. Variation of Nusselt number ratio, Nu/Nu_0 with Reynolds number.

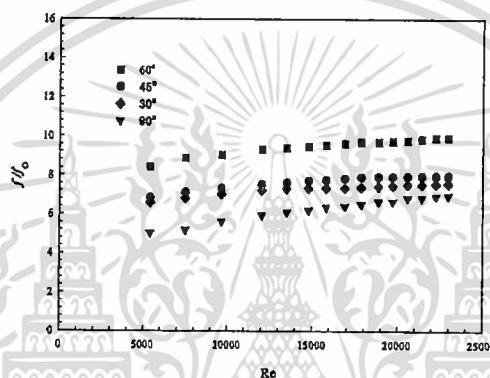


Fig. 9. Variation of friction factor ratio, f/f_0 with Reynolds number.

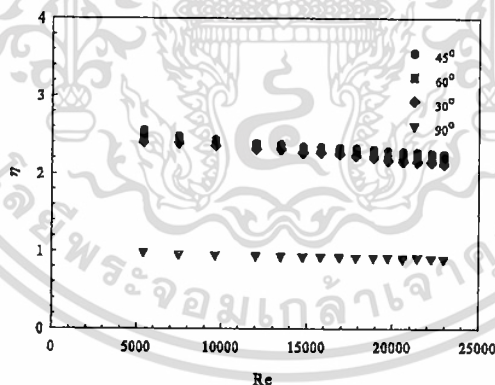


Fig. 10. Variation of thermal enhancement factor with Reynolds number.

5. CONCLUSION

From the experimental data, it can be concluded that the 45° Z-ribs can increase thermal efficiency (thermal enhancement factor) which are more than that of smooth channel, flat rib, 30° and 60° Z-ribs with $e/H = 0.2$ and $P/H = 3$ for the turbulent region at $Re = 5000$ to $23,000$. For the 45° Z-ribs, an average Nusselt number value

depending on Reynolds number are 450 - 480% and 165 - 180% higher than the smooth channel and flat rib, respectively. It is noted that the Nusselt number tends to increase with increasing Reynolds number.

The thermal enhancement factors obtained from the 45° Z-rib are around 150 - 160% over the flat ribs and 225 - 255% over the smooth channel. The thermal enhancement factor tends to decrease with increasing

Reynolds number.

ACKNOWLEDGEMENT

This study was supported by the Commission on Higher Education and the National Metal and Materials Technology Center of Thailand.

NOMENCLATURE

A	area, m^2
C_p	specific heat capacity of air, kJ/kgK
D_h	hydraulic diameter, m
e	rib height, m
\square	friction factor
h	heat transfer coefficient, W/m^2K
H	channel height, m
k	thermal conductivity of air, W/mK
L	length of test channel, m
m	air mass flow rate, kg/s
Nu	Nusselt number (hD_h/k)
P	pitch of Z-rib, m
ΔP	pressure drop, N/m^2
Pr	Prandtl number
Q	heat transfer, Watt
q	volumetric flow rate, m^3/s
Re	Reynolds number, ($\bar{V} D/\nu$)
T	temperature, K
U	width of channel, m
\bar{V}	mean velocity, m/s
w	width of Z-rib, m
\dot{W}_{in}	power input, Watt

Greek letters

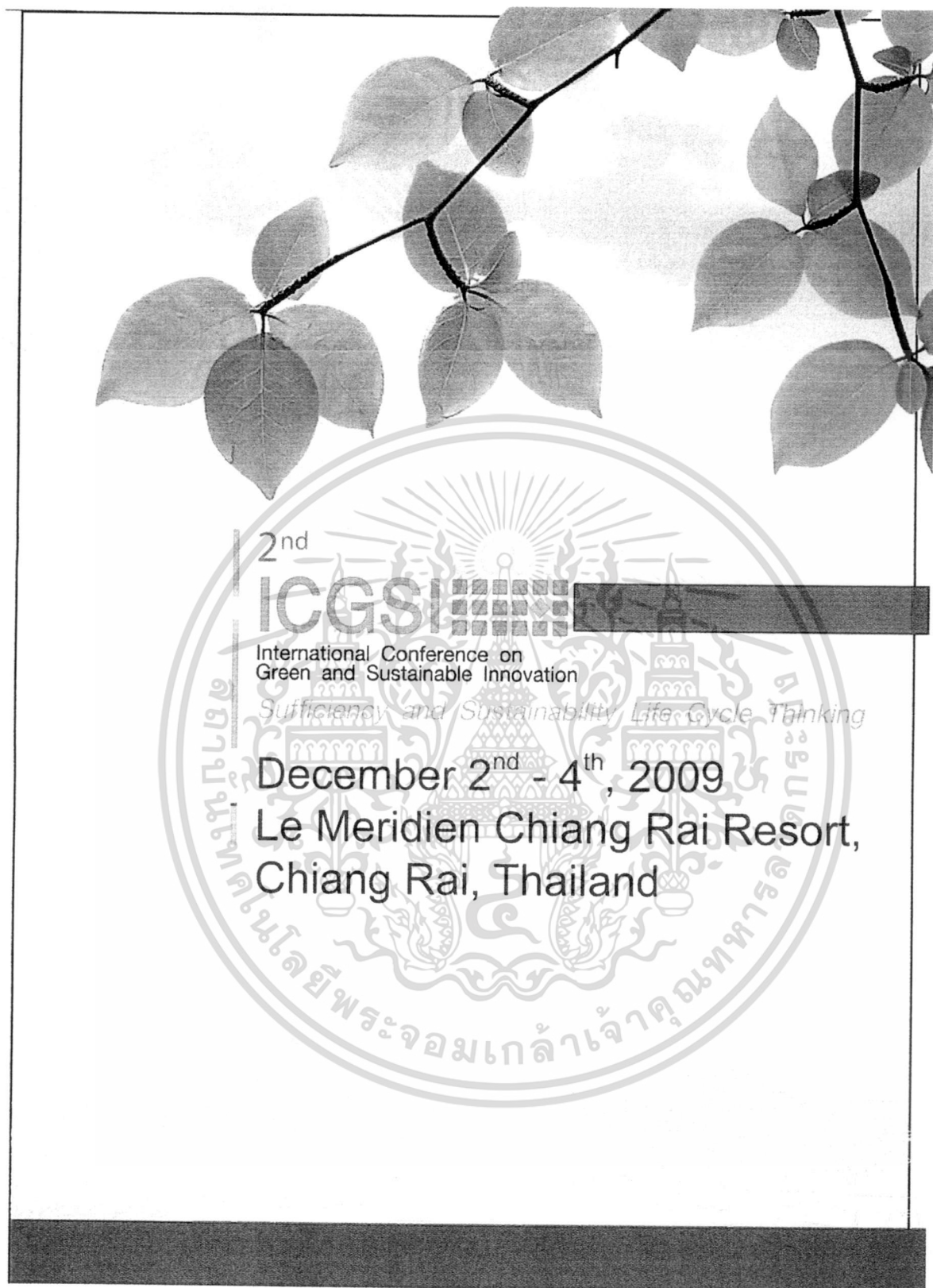
α	attack angle of Z-rib, degree
ρ	density of air, kg/m^3
θ	thermal enhancement factor
ν	kinematics viscosity, m^2/s

Subscripts

b	bulk
o	smooth channel
in	inlet
out	out
pp	pumping power
s	channel surface
w	wall

REFERENCES

- [1] Hwang, J.J. 1998. Heat Transfer-Friction Characteristic Comparison in Rectangular Ducts With Slit and Solid Ribs Mounted on One Wall, *ASME J Heat Transfer* 120: 709-716.
- [2] Taslim, M.E., and Lengkon, A. 1998. 45 deg Staggered Rib Heat Transfer Coefficient Measurements in a Square Channel, *ASME J Turbomachinery* 120: 571-580.
- [3] Cho, H.H., Wu, S.J., and Kwon, H.J. 2000. Local heat/mass transfer measurement in a rectangular duct with discrete ribs, *ASME J Turbomachinery* 122: 579-586.
- [4] Sriromreun, P., and Promvong, P. 2009. *Heat transfer augmentation in a rectangular duct with Z-shaped ribs*, Int. Conf. on Green and Sustainable Innovation, Dec 2-4.
- [5] Webb, R. L. 1992. *Principles of Enhanced Heat Transfer*, John-Wiley & Sons Inc.
- [6] Incropera, F. and Dewitt, P.D. 1996. *Introduction to Heat Transfer*, 3rd



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Heat Transfer Augmentation in a Rectangular Duct with Z-Shaped Ribs

Parkoom Srironreun and Pongjet Promvonge*

Department of mechanical Engineering, Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand.

*Corresponding Author: kppongje@kmitl.ac.th, Tel.: +662-3264197; Fax: +662-3264198

Abstract

The work is focused on the design of suitable ribs used for enhancing heat transfer in a channel heat exchanger. In the experiment, the ribs were fitted in Z-shape aligned in series on the whole area of the upper plate. It is expected that the ribs can significantly disturb the bulk flow. The fluid was lifted and directly impacted to the heat transfer area. In addition, the rotating fluid motion was then appeared which provided the high efficiency of heat transfer. Therefore, the height and pitch spacing of the ribs were studied for finding an optimum heat transfer efficiency of the system. The experiments were carried out by varying airflow rate for Reynolds number ranging from 5,000 to 25,000 in the tested channel with a constant surface heat flux on the upper plate only. The Z-rib was set to 45° relative to the flow direction with the rib height of 0.2 and 0.3 times of channel height (0.2H and 0.3H respectively) and the distance between the ribs are 2 and 3 times of the channel height (2H and 3H). For using the rib height and pitch of 0.2H and 3H, it provided the maximum thermal enhancement factor of about 3.

Keywords: channel flow, enhanced heat transfer, rib, wedge rib, Nusselt number

1. Introduction

In order to increase the efficiency of heat transfer in ducts, researchers have developed various types of surface characteristics, such as ribs or fins [1,2] mounted on the heating surface area to create turbulence flow of the fluid for the high rate of heat transfer [3,4]. Nevertheless, the consequence was pressure drop on a heat exchanger unit that caused power loss on fluid in the heat exchanger. Due to this problem, dimple [5] or roughness [6] surface was developed to

reduce the pressure drop. However, the efficiency of heat transfer was simultaneously decreased.

All of the aforementioned surfaces provide higher Nu number than flat plate channel for 2-4.5 times. In addition, the combination [7] of both characteristics to increase the efficiency of heat transfer and to lower the pressure drop enable the Nu number to be higher than flat plate channel for 5-7.8 times.

In the case of impinging jet on the surface, the heat transfer will be higher than any other cases of flow. However, it is very

complicated to adapt to the heat exchange unit. The installation of ribs or fins can cause the impinging flow. Nevertheless, previous works have never placed an emphasis on this part as they have generally focused more on rotation of the fluid. Therefore, this research will primarily emphasize on the idea of mounting Z shaped rib to create the rotation of fluid when the fluid flows through the rib. The fluid is lifted and impinged on to the surface. The ribs are attached on heating surfaces in rows which are subsequently placed together to increase the area of fluid impinging flow in order to rise the efficiency of heat transfer.

2. Experimental setup

In this research, the test is undertaken by using air as the test fluid flowing through flat plate that is attached by Z-shaped ribs in row as shown in Fig. 1.

Fig. 1 shows the typical characteristic of the rib. The main variables used in the research were the Z shape which has 45° (∞) and the width (W) of Z is equal to the height of the flow field (H) at 3cm. Pitch distance (P) was adjusted to the value of 2 and 3 times of channel flow height. Heights of the rib were changed as the value was 0.2 and 0.3H and speed of air to flow in Reynolds number (Re) was ranging from 5,300 to 24,000. The values were adjusted to make the results of the performance of heat transfer. Fig. 2 shows the experimental device was used as a Bower to blow air into test section. Flow rate was controlled by the inverter. Flow rates from the Manometer were measured in form of pressure drop across the orifice and converted to the flow rates form. Subsequently, the air flows through the settling tank for smoothness and the test section where it is heated by the heater. Thermocouples were used for measuring surface

and flow temperatures and also drilling the holes on the upper wall was made for measuring pressure drop across the test section.

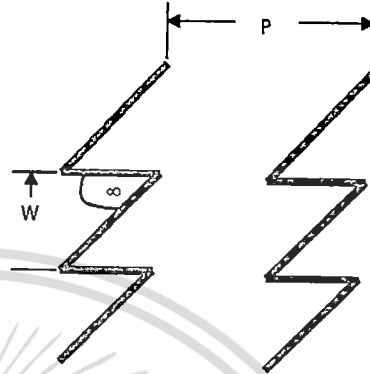


Fig. 1 Test section with Z-shaped ribs (top view)



Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

From the experimental apparatus as depicted in Fig. 2, measurements were conducted to measure the pressure drop and temperatures on the wall surfaces and inlet–outlet flows. The measured data were used to calculate the heat transfer efficiency (thermal enhancement factor, η).

3. Data reduction

The tested results show the pressure drop and the surface temperatures with the rib and inlet–outlet flows. Then, the measurement was calculated as follows:

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

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

The above equation was for finding friction factor (f) on the test section with ribs. The equation for finding of heat transfer coefficient (h) was in the following.

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

$$Nu_D = \frac{hD_h}{k} \quad (4)$$

Then, the evaluation of the efficiency of heat transfer, from the heat transfer coefficient with ribs (h) and the heat transfer coefficient in smooth channel (h₀). Alternatively, the calculation can be done by using Nusselt number with ribs (Nu) and Nusselt number of smooth channel (Nu₀) [8].

$$\eta = \left[\frac{h}{h_0} \right]_{pp} = \left[\frac{Nu}{Nu_0} \right]_{pp} \quad (5)$$

$$\eta = \left(\frac{Nu}{Nu_0} \right) \left(\frac{f}{f_0} \right)^{-1/3} \quad (6)$$

4. Results and Discussion

4.1 Comparison between data of smooth plate and previous works.

The present experimental work was to find a heat exchanger characteristics and the friction factor of the smooth channel with the published Dittus-Boelter and Blasius equations in order to verify the accuracy of systems and equipment. The equations of validation are as follows:

Dittus-Boelter equation,

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (7)$$

Blasius equation,

$$f = 0.316 Re^{-0.25} \quad (8)$$

The validated results are shown in Fig. 3. A discrepancy from the two equations is less than 8% which is in an acceptable level.

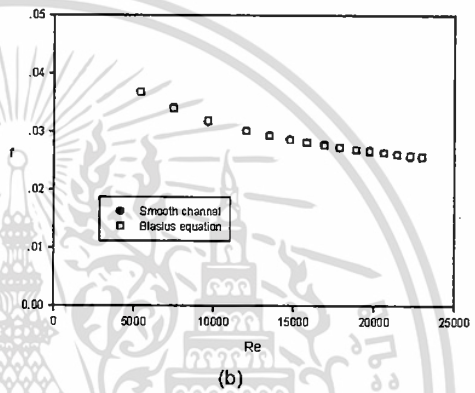
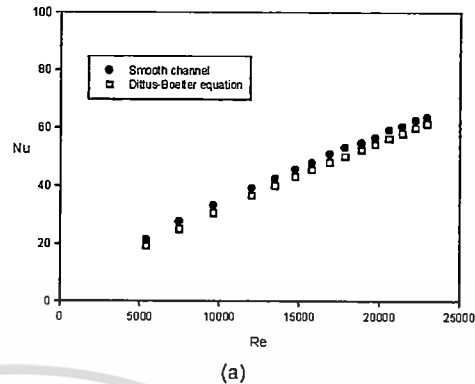


Fig. 3 Verification of (a) Nusselt number and (b) friction factor for smooth channel.

4.2 Comparison of Z ribs

This section is to find the characteristics of the ribs with the best heat transfer performance from the trial. The characteristics of the ribs from all trials are shown in Table 1. The test results are shown in Figs. 4-8. The rib height of 0.3H gives the best heat transfer rate (Nu). The less pitch length (2H) provides higher heat transfer as well. The rib with 0.3H height and 2H pitch length (0.3H – 2H) yields the highest Nu values. At Re of about 24,000, Nu is found to be some 450, as shown in Fig. 4. When compared to the smooth plate channel, Nu obtained by the ribs is higher than 700%, as shown in Fig. 6.

Table 1 characteristics of Z shaped rib

Angle (°)	High (h)	Pitch (P)	Name
45	0.3H	3H	0.3H - 3H
45	0.3H	2H	0.3H - 2H
45	0.2H	3H	0.2H - 3H
45	0.2H	2H	0.2H - 2H

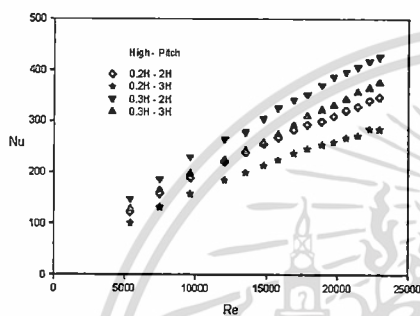


Fig. 4 Variation of Nusselt number with Reynolds number for various ribs

The friction factor (f) is in line with Nu . The increase in rib height and the decrease in pitch length lead to the rise in friction factor values. The rib height and pitch of 0.3H-2H features the highest value of approximately 0.6, as shown in Fig. 5, more than 20 times of the smooth channel as seen in Fig. 7. When the two variables accounted for the heat transfer performance (η), one can see that the rib height of 0.2H and pitch length of 3H provides higher η than that of the smooth channel by about 300% at lower Re, as shown in Fig. 8.

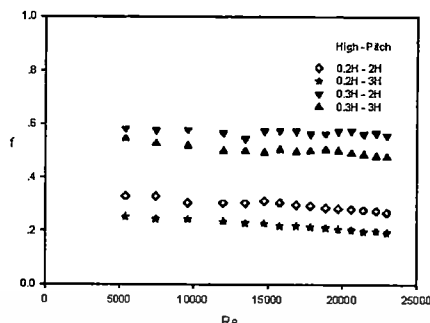


Fig. 5 Variation of friction factor with Reynolds number for various ribs.

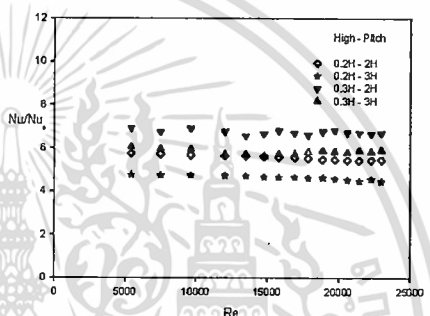


Fig. 6 Variation of Nusselt number ratio, Nu/Nu_0 , with Reynolds number.

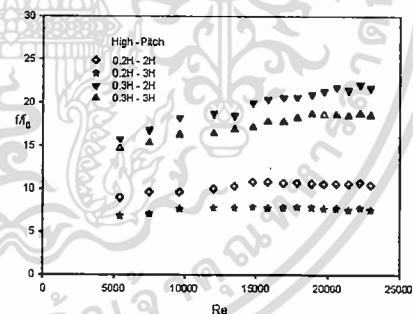


Fig. 7 Variation of friction factor ratio, f/f_0 , with Reynolds number.

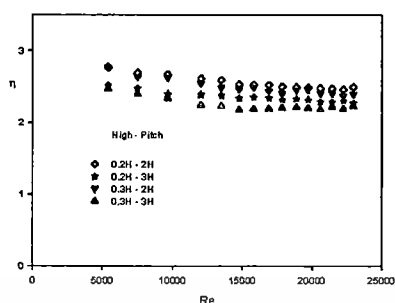


Fig. 8 Variation of thermal enhancement factor with Reynolds number.

5. Conclusions

Experimental work has been conducted to investigate heat transfer and friction characteristics in a channel of height, H by using the Z rib with an angle of 45° , rib height of $0.2H$ and $0.3H$ and rib pitches of $2H$ and $3H$. It is found that the rib helps to considerably increase the heat transfer rate in turbulent channel flows. The Z-rib with $0.3H$ height and $2H$ pitch yields higher Nu than the smooth channel by about 700%. However, its friction factor (f) was higher than the smooth channel around 20 times. The maximum enhancement factor was found to be about 3 for using the rib with $0.2H$ height and $3H$ pitch at low Re values.

6. Acknowledgement

This research work is financial supported by National Metal and Material Technology Center (MTEC).

7. Nomenclature

A	=	area, m^2
C_p	=	specific heat capacity of air, kJ/kgK
D_h	=	hydraulic diameter, m.
f	=	friction factor
h	=	heat transfer coefficient, W/m^2K
k	=	thermal conductivity of air, W/mK

L = length of test channel, m.

m = air mass flow rate, kg/s

Nu = Nusselt number (hD_h/k)

ΔP = pressure drop, N/m^2

Q = heat transfer, Watt

q = volumetric flow rate, m^3/s

T = temperature, K

\bar{v} = mean velocity, m/s

\dot{W}_m = power input, Watt

Greek symbols

ρ = density of air, kg/m^3

η = thermal enhancement factor

Subscripts

0 = smooth channel

b = bulk

i = inlet

o = outlet

s = channel surface

w = wall

8. References

- [1] X. Gao and B. Sundén (2004). PIV measurement of the flow field in rectangular ducts with 60° parallel, crossed and V-shaped ribs, *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 28, pp.639–653.
- [2] S.Y. Won, G.I. Mahmood and P.M. Ligrani (2004). Spatially-resolved heat transfer and flow structure in a rectangular channel with pin fins, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 47, pp.1731–1743.
- [3] S.W. Chang, T.-M. Liou, W.-H. Yeh and J.-H. Hung (2007). Heat transfer in a radially rotating square-sectioned duct with two opposite walls roughened by 45 degree staggered ribs at high rotation numbers, *ASME J. Heat Transfer*, vol. 129, pp.188–199.

- [4] K.M. Kim, Y.Y. Kim, D.H. Lee, D.H. Rhee and H.H. Cho (2007). Influence of duct aspect ratio on heat/mass transfer in coolant passages with rotation, *Int. J. Heat Fluid Flow*, vol. 28, pp.357–373.
- [5] G.I. Mahmood and P.M. Ligrani (2002), Heat transfer in a dimpled channel: Combined influences of aspect ratio, temperature ratio, Reynolds number, and flow structure, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 45, pp.2011–2020.
- [6] S.W. Chang, T.-M. Liou and M.H. Lu (2005). Heat transfer of rectangular narrow channel with two opposite scale-roughened walls, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 48, pp.3921–3931.
- [7] S.W. Chang, T.-M. Liou, M.H. Lu, and G.F. Hong (2008). Heat transfer of rotating rectangular duct with compound scaled roughness and V-ribs at high rotation numbers, *Int. J. Thermal Sci.*
- [8] Webb R. L. (1992). *Principles of Enhanced Heat Transfer*, John-Wiley & Sons, New York.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล นาย ภาคภูมิ ศรีธรรมรินทร์

วัน เดือน ปีเกิด 16 พฤศจิกายน 2518

ประวัติการศึกษา 2539 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
2545 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ประสบการณ์วิจัย/สาขาที่ชำนาญ: Applied Heat Transfer, Fluid Mechanics, CFD, Energy Management, ISO50001

หัวข้อวิทยานิพนธ์ (ป.ตรี)

ชื่อเรื่องไทย : การวัดแรงด้วยสเตรนเกจ

ชื่ออังกฤษ : Force measurement with strain gauge

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผศ.ดร. วิชิต บัวแก้ว

หัวข้อวิทยานิพนธ์ (ป.โท)

ชื่อไทย : การเปรียบเทียบ k-ε model การไหลปั่นป่วนแบบ low Reynolds number สำหรับการถ่ายเทความร้อนของการไหลในท่อ

ชื่ออังกฤษ : Comparison of k-ε model for turbulence flow in low Reynolds number with heat transfer in the duct

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ศ.ดร.สมชาย วงษ์วิเศษ

ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่

การเผยแพร่ผลงานวิจัยระหว่างศึกษาปริญญาเอก

การตีพิมพ์ผลงานวิจัย

1. Sriromreun, P., Thianpong, C. and Promvong, P. 2012. "Experimental and numerical study on heat transfer enhancement in a channel with Z-shaped baffles." *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 39 : 945-952. impact factor = 1.892.

การเสนอผลงานวิจัยในที่ประชุม

1. Sriromreun, P. and Promvong, P. 2011. "Heat transfer augmentation in rectangular duct with different arrangements of 45° Z-shaped baffles."

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- International Symposium on Technology for Sustainability (ISTS2012), 27–28 January 2012, KMITL, Bangkok, Thailand.
2. Pimsarn, M., Sriromreun, P. and Promvong, P. 2010. “Augmented Heat Transfer in Rectangular Duct with Angled Z-Shaped Ribs.” **International Conference on Energy and Sustainable Development (ESD2010)**, 2-4 June 2010, The Empress Hotel, Chiang Mai, Thailand.
 3. Sriromreun, P. and Promvong, P. 2009. “Heat Transfer Augmentation in a Rectangular Duct with Z-Shaped Ribs.” **International Conference on Green and Sustainable Innovation (ICGSI2009)**, 2–4 December 2009, Le Meridien Chiang Rai, Chaing Rai, Thailand.
 4. Sriromreun, P., Promvong, P. and Kraipech Evans, W. 2007. “Design of manifold passages in a plate-fin microdevice with steps using CFD.” **International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST2007)**, 21-23 November 2007, Swissotel Le Concorde, Bangkok, Thailand

การเผยแพร่ผลงานวิจัยระหว่างศึกษาปริญญาโท
การตีพิมพ์ผลงานวิจัย

1. ภาคภูมิ ศรีธรรมรินทร์ และ สมชาย วงศ์วิเศษ “การทำนายคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของการไหลปั่นป่วนในท่อในช่วงเลขเรย์โนลด์ต่ำโดยใช้ k-ε model”, **วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนา**, ปีที่ 15 ฉบับที่ 1 พ.ศ. 2547