

การศึกษาเชิงตัวเลขของพฤติกรรมการไหลแบบเป็นคาบและการถ่ายเทความร้อนในท่อ
สี่เหลี่ยมจัตุรัสด้วยครีบ double-V

NUMERICAL STUDY OF FULLY DEVELOPED PERIODIC FLOW CHARACTERISTICS AND
HEAT TRANSFER IN SQUARE DUCT WITH DOUBLE-V RIBS



นายกัตัญญ	ประทุมษา
นายเชาว์วัฒน์	มุงเมือง
นายปริญญา	โพธิ์กระเจิน

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

การศึกษาเชิงตัวเลขของพฤติกรรมการไหลแบบเป็นคาบและการถ่ายเทความร้อนในท่อ
สี่เหลี่ยมจัตุรัสด้วยครีบ double-V

NUMERICAL STUDY OF FULLY DEVELOPED PERIODIC FLOW CHARACTERISTICS AND
HEAT TRANSFER IN SQUARE DUCT WITH DOUBLE-V RIBS



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อพ.ศ. 2556 เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NUMERICAL STUDY OF FULLY DEVELOPED PERIODIC FLOW CHARACTERISTICS AND
HEAT TRANSFER IN SQUARE DUCT WITH DOUBLE-V RIBS



KATANYOO PRATUMSA
CHAOWAT MUNGMUANG
PRINYA PHOKEAJANE

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BECHALOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อปี 2013 เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2556

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาเชิงตัวเลขของพฤติกรรมการไหลแบบเป็นคาบและการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส
ด้วยครีบริบ double-V

NUMERICAL STUDY OF FULLY DEVELOPED PERIODIC FLOW CHARACTERISTICS AND
HEAT TRANSFER IN SQUARE DUCT WITH DOUBLE-V RIBS

ผู้จัดทำ

1. นาย กตัญญู ประทุมชา รหัสประจำตัว 53010002
2. นาย เขาว์วัฒน์ มุงเมือง รหัสประจำตัว 53010386
3. นาย ปริญญา โพธิ์กระเจิน รหัสประจำตัว 53010945

วิมล งามรุ่งโรจน์

อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร.วิฑาดา เจษฎารัตนชัย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาเชิงตัวเลขของพฤติกรรมการไหลแบบเป็นคาบและการถ่ายเทความร้อนใน
ท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสด้วยครีบ double-V

นายกตัญญู ประทุมษา รหัสประจำตัว 53010002
นายเชาว์วัฒน์ มุ่งเมือง รหัสประจำตัว 53010386
นายปริญญา โพธิ์กระเจน รหัสประจำตัว 53010945
ดร.วิชาติดา เจษฎารัตนชัย อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2556

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาเชิงตัวเลขสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนสามมิติ ที่มีลักษณะการไหลแบบพัฒนาอย่างสมบูรณ์และช้าเป็นช่วงๆ ของการไหลและการถ่ายเทความร้อน โดยมีการติดตั้งแผ่นกั้นรูปตัววีคู่บนแผ่นบางซึ่งจัดวางในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบทแยงมุม การคำนวณเชิงตัวเลขใช้ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม และใช้กระบวนการวิธีแบบ SIMPLE สำหรับการคำนวณเป็นหลัก การสร้างความปั่นป่วนโดยใช้แผ่นกั้นรูปตัววีคู่ โดยติดตั้งแผ่นกั้นรูปตัววีคู่ทั้งสองด้านบนแผ่นบางซึ่งจัดวางในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบทแยงมุม เลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 3,000 – 20,000 อัตราส่วนความสูงของแผ่นกั้นต่อความสูงของท่อ, (Blockage ratio (e/H), BR) = 0.05 – 0.25, มุมปะทะการไหล ($\alpha = 30^\circ$ และ 45°), อัตราส่วนระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นต่อความสูงของท่อ (Pitch ratio (P/H), PR) = 1.0 ภายใต้การตรวจสอบความถูกต้องโดยใช้การเปรียบเทียบกับข้อมูลจากสมการสหสัมพันธ์ท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบ และเปรียบเทียบกับการศึกษาที่ผ่านมา พบว่าการไหลแบบเป็นคาบและการไหลแบบพัฒนาอย่างสมบูรณ์และช้าเป็นช่วงๆ ของการไหลและการถ่ายเทความร้อน จะปรากฏในโมดูลที่ 2 และโมดูลที่ 7-9 ตามลำดับ นอกจากนี้ ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุด (TEF_{max}) มีค่า 1.52 เท่า สำหรับแผ่นกั้นรูปตัววีคู่ ที่ $BR = 0.1$, $Re = 3,000$ และ $\alpha = 45^\circ$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NUMERICAL STUDY OF FULLY DEVELOPED PERIODIC FLOW
CHARACTERISTICS AND HEAT TRANSFER IN SQUARE DUCT WITH
DOUBLE-V RIBS

Katanyoo Pratumsa 53010002

Chaowat Mungmuang 53010386

Prinya Phokeajane 53010945

Dr. Withada Jedsadaratanachai Advisor

ABSTRACT

This research presents a 3D numerical study on heat transfer characteristics, flow configurations and the fully developed periodic concept for turbulent forced convection in a square channel with double-V inserted diagonally. The finite volume method and the SIMPLE algorithm are used for the computational domain. The double-V turbulators are placed on both two sides of the thin plate which inserting diagonally in the square channel. The Reynolds number based on the hydraulic diameter of the square channel (D_h), $Re = 3,000 - 20,000$, the blockage ratio, e/H , $BR = 0.05 - 0.25$, the flow attack angle ($\alpha = 30^\circ$ and 45°) with single pitch ratio, $PR = 1.0$, are investigated. The results are compare with the smooth square channel and the previous works. It is found that the periodic and the fully developed periodic on both flow structure and heat transfer are appeared around 2^{nd} module and $7^{th} - 9^{th}$ module, respectively. In addition, the maximum (TEF_{max}) is found around 1.52 at $BR = 0.1$, $Re = 3,000$ and $\alpha = 45^\circ$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้คงไม่อาจเสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความช่วยเหลือและความร่วมมือจากหลายๆ ฝ่ายด้วยกัน ได้แก่ ดร.วิฑิตา เจษฎารัตนชัย อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโทที่ให้คำแนะนำ เอาใจใส่ ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือเสมอมา และขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน สำหรับการให้คำปรึกษา ข้อคิดเห็น และคำแนะนำต่างๆ รวมทั้งขอขอบคุณพี่ๆ ปริญญาโททุกท่านที่ได้มีส่วนช่วยเหลือในการทำงานวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี



กตัญญู ประทุมษา
 เชาว์วัฒน์ มุงเมือง
 ปริญญา โพร้กระเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	2
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนด้วยการติดตั้งครีบ.....	3
2.1.1 ครีบบรูปแบบต่างๆ.....	3
2.1.1.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง.....	3
2.1.1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณเชิงตัวเลข.....	12
2.1.2 ครีบบรูปตัววี.....	15
2.1.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง.....	15
2.1.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณเชิงตัวเลข.....	18
บทที่ 3 สมการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	20
3.1 สมมุติฐานของการไหลและสมการควบคุม.....	20
3.1.1 แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG $k-\epsilon$	21
3.2 การไหลแบบภายในและการถ่ายเทความร้อน.....	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.1 สภาวะการไหล.....	21
3.2.2 ตัวประกอบความเสียดทาน.....	22
3.2.3 สภาวะการถ่ายเทความร้อน.....	22
3.2.4 สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์เชิงความร้อน.....	23
3.2.5 สมรรถนะเชิงความร้อน.....	24
บทที่ 4 การกำหนดปัญหาและตรวจสอบผลการคำนวณ	
4.1 บทนำ.....	25
4.2 การกำหนดลักษณะของปัญหาที่ใช้ในการวิจัย.....	25
4.3 ค่าเงื่อนไขขอบเขตในการคำนวณการไหลสามมิติ.....	26
4.4 การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม.....	27
4.5 การตรวจสอบความเป็นอิสระของผลเฉลยจากจำนวนกริดเซลล์.....	28
บทที่ 5 ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและการอภิปราย.....	30
5.1 บทนำ.....	30
5.2 สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วงของการไหล.....	30
5.2.1 พฤติกรรมการไหล.....	30
5.2.2 ลักษณะการถ่ายเทความร้อน.....	32
5.3 แผ่นบางติดครีบริบรูปตัววีคู่.....	35
5.3.1 แบบจำลองทางกายภาพ.....	35
5.3.2 อิทธิพลของเลขเรย์โนลด์.....	36
5.3.2.1 เส้นกระแสการไหลบนระนาบขวางแนวการไหล.....	36
5.3.2.2 การถ่ายเทความร้อน.....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3.3 อิทธิพลของความสูงของแผ่นกัน	41
5.3.3.1 เส้นกระแสการไหลบนระนาบขวางแนวการไหล	41
5.3.3.2 การถ่ายเทความร้อน	42
5.3.4 อิทธิพลของมุมปะทะ	46
5.3.4.1 เส้นกระแสการไหลบนระนาบขวางแนวการไหล	46
5.3.4.2 การถ่ายเทความร้อน	47
บทที่ 6 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	53
6.1 สรุปผลการศึกษา	53
6.1.1 สถานะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และซ้ำเป็นช่วง	53
6.1.2 อิทธิพลของพารามิเตอร์	53
6.1.2.1 อิทธิพลของเลขเรย์โนลด์	53
6.1.2.2 อิทธิพลของความสูงของแผ่นกัน	54
6.1.2.3 อิทธิพลของมุมปะทะการไหล	54
6.2 ข้อเสนอแนะ	54
บรรณานุกรม	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
4.1	ลักษณะของกรณีศึกษา โดยมีทิศทางการไหลเป็นแบบ double V-downstream	26
4.2	จำนวนของกริดเซลล์ที่ส่งผลต่อค่า Nu และ f	29



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	4
2.2	5
2.3	6
2.4	8
4.1	25
4.2	27
4.3	29
5.1	31
5.2	32
5.3	33
5.4	34
5.5	35
5.6	37
5.7	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 (ข) $Re = 8,000$ และ (ค) $Re = 20,000$ 39
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
5.8 การกระจายของเลขน้สเชิลท์ที่ค่า $\alpha = 30^\circ$, $BR = 0.15$ และ double V-downstream สำหรับ (ก) $Re = 3,000$ (ข) $Re = 8,000$ และ (ค) $Re = 20,000$	40
5.9 เส้นกระแสการไหลบนระนาบขวางแนวการไหลที่ค่า $\alpha = 30^\circ$, $Re = 8,000$ และมีทิศทางการไหลแบบ double V-downstream สำหรับ (ก) $BR = 0.05$ (ข) $BR = 0.15$ (ค) $BR = 0.25$	42
5.10 การกระจายอุณหภูมิตั้งในระนาบขวางการไหลที่ค่า $\alpha = 30^\circ$, $Re = 8,000$ และ double V-downstream สำหรับ (ก) $BR = 0.05$ (ข) $BR = 0.15$ และ (ค) $BR = 0.25$	43
5.11 การกระจายของเลขน้สเชิลท์ที่ค่า $\alpha = 30^\circ$, $Re = 8,000$ และ double V-downstream สำหรับ (ก) $BR = 0.05$ (ข) $BR = 0.15$ และ (ค) $BR = 0.25$	45
5.12 เส้นกระแสการไหลบนระนาบขวางแนวการไหลที่ค่า $BR = 0.15$, $Re = 8,000$ และมีทิศทางการไหลแบบ double V-downstream สำหรับ (ก) $\alpha = 30^\circ$ (ข) $\alpha = 45^\circ$	46
5.13 การกระจายอุณหภูมิตั้งในระนาบขวางการไหลที่ค่า $BR = 0.15$, $Re = 20,000$ และ double V-downstream สำหรับ (ก) $\alpha = 30^\circ$ (ข) $\alpha = 45^\circ$	47
5.14 การกระจายของเลขน้สเชิลท์ที่ค่า $BR = 0.15$, $Re = 8,000$ และ double V-downstream สำหรับ (ก) $\alpha = 30^\circ$ (ข) $\alpha = 45^\circ$	48
5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนเลขน้สเชิลท์กับเลขเรย์โนลด์ของแผ่นบางติดครีบริบรูปตัววีคู่ ที่ค่า BR และ α ต่างๆ สำหรับ double V-Downstream.....	49
5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ของแผ่นบาง ติดครีบริบรูปตัววีคู่ที่ค่า BR และ α ต่างๆ สำหรับ double V-Downstream.....	50
5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ของแผ่นบางติดครีบริบรูปตัววีคู่ ที่ค่า BR และ α ต่างๆ สำหรับ double V-Downstream (ก) มุม $\alpha = 30^\circ$ (ข) มุม $\alpha = 45^\circ$	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

A	พื้นที่การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการพา, m^2
A_c	พื้นที่หน้าตัดของท่อ, m^2
A_s	พื้นที่ผิวท่อทั้งหมด, m^2
BR	ค่าอัตราส่วนการบดเคาะการไหล, (e/H)
C_f	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานแผ่นนิ่ง
c_p	ค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่, $J/kg \cdot K$
D	เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส, m
E	พลังงานรวม, J
e	ความสูงของครีป, m
f	ตัวประกอบความเสียดทาน
f_0	ตัวประกอบความเสียดทานของท่อผิวเรียบ
H	ความสูงของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส, m
h	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, $W/m^2 \cdot K$
i	พลังงานภายใน, J/kg
J	ฟลักซ์ของมวล, $kg/m^2 \cdot s$
K	พลังงานจลน์ของกระแสการไหลเฉลี่ยต่อหน่วยมวล, J/kg
k	พลังงานจลน์ของความปั่นป่วนต่อหน่วยมวล, J/kg
k_a	ค่าการนำความร้อนของอากาศ, $W/m \cdot K$
L	ความยาวของท่อ, m
l	ค่าบ่งชี้ลักษณะเชิงขนาด, m
L_e	ความยาวช่วงขาเข้า, m
\dot{m}	อัตราการไหลเชิงมวล, kg/s
Nu	เลขนัสเซิลท์เฉลี่ย
Nu_0	เลขนัสเซิลท์ของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบ
P	เส้นรอบรูป, m
p	ความดันสถิตย, Pa
PR	อัตราส่วนระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นต่อความสูงของท่อ, (P/H)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อให้บริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pr	เลขพรานด์
q_s''	ฟลักซ์ความร้อนระหว่างของไหลกับผิวท่อที่จุดใดๆ, W/m^2
Re	เลขเรย์โนลด์
T	อุณหภูมิ, K
T_0	อุณหภูมิเฉลี่ย, K
T_s	อุณหภูมิผิว, K
TEF	ค่าสมรรถนะของการเพิ่มขึ้นทางความร้อน
t	เวลา, s
U_i	ความเร็วเฉลี่ยในแนวแกน x_i , m/s
u_i	ความเร็วย่อยในแนวแกน x_i , m/s
u_i'	ความเร็วย่อยผันแปรในแนวแกน x_i , m/s
u_0	ความเร็วเฉลี่ย, m/s
X	ระยะทางที่วัดในช่วงการไหลพัฒนาอย่างสมบูรณ์, m
x	พิกัดบอกทิศทางการไหล
y^+	ระยะไร่นวที่ยวัดจากผนัง
สัญลักษณ์กรีก	
ϕ	ค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติใดๆ ของของไหล
Γ	การแพร่ทางความร้อน
α	มุมปะทะการไหล, degree
μ	ความหนืดสัมบูรณ์, $N \cdot s/m^2$
ε	อัตราการสูญเสียของความปั่นป่วน, m^2/s^3
ω	อัตราการสูญเสียจําเพาะ, s^{-1}
ρ	ความหนาแน่น, kg/m^3
τ	ความเค้นเฉือน, N/m^2

ตัวห้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

0 ท่อผิวเรียบ (smooth duct)

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

s พื้นผิว (surface)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันความต้องการด้านพลังงานของประเทศมีแนวโน้มสูงขึ้น เพราะการใช้พลังงานมีมากขึ้นตามความเจริญของประเทศ เพื่อใช้ในการผลิตและสร้างอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในชีวิตประจำวัน การพัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนับเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญอย่างหนึ่ง สำหรับที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไป ทั้งกิจการขนาดใหญ่ ในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีอุปกรณ์การใช้งานประเภทแลกเปลี่ยนความร้อน พบว่าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการใช้งานหลายรูปแบบและมีการใช้งานอย่างกว้างขวางทั้งในงานอุตสาหกรรมและงานพาณิชย์ โดยมีตั้งแต่ขนาดเล็กสุด ได้แก่ ตัวระบายความร้อนในอุปกรณ์สร้างภาพอินฟราเรด ระบบจรวดนำวิถี จนถึงขนาดใหญ่ ได้แก่ หม้อไอน้ำ คอนเดนเซอร์ และชุดระบายความร้อนจากน้ำหล่อเย็น ความหลากหลายของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนครอบคลุมทุกชนิด รูปทรง และการจัดวางทางเรขาคณิตอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยส่วนใหญ่ จะทำหน้าที่ให้ความสะดวกแก่การถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลสองชนิดที่มีอุณหภูมิที่แตกต่างกัน โดยกระบวนการถ่ายเทความร้อนจากของไหลตัวหนึ่งไปสู่ของไหลอีกตัวหนึ่งจะต้องมีผลต่างสุทธิของอุณหภูมิ ในขณะที่เกิดการถ่ายเทความร้อนนั้นของไหลที่ร้อนจะมีอุณหภูมิลดลง ส่วนของไหลเย็นจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามอุณหภูมิสูงสุดของของไหลเย็นสามารถจะขึ้นไปถึงได้นั้นจะต้องต่ำกว่าอุณหภูมิสูงสุดของของไหลร้อนเสมอ ในทำนองเดียวกัน อุณหภูมิต่ำสุดของของไหลร้อนจะต้องต่ำกว่าอุณหภูมิต่ำสุดของของไหลเย็นเสมอ กล่าวคือจะต้องมีความแตกต่างของอุณหภูมิของของไหลทั้งสองเพื่อเป็นตัวขับเคลื่อนการถ่ายเทความร้อนไปสู่ของไหลเย็นซึ่งเป็นไปตามกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ ในทำนองเดียวกันจะต้องมีการใช้พลังงานส่วนหนึ่งในการทำให้ของไหลไหลผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งจะแสดงให้เห็นเป็นผลต่างความดันระหว่างทางเข้าและทางออกของอุปกรณ์

โดยทั่วไปสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนจะสัมพันธ์กับการสูญเสียความดันเนื่องจากแรงเสียดทาน การปรับปรุงสมรรถนะทางความร้อนมักจะทำให้เกิดการสูญเสียแรงดันที่เพิ่มขึ้นสำหรับการสูญเสียแรงดันที่เกิดขึ้นบางครั้งก็อาจไม่คุ้มค่าเนื่องจากพลังงานกลที่ต้องจ่ายไปจะมีมูลค่ามากกว่าการถ่ายเทพลังงานความร้อน

งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีการศึกษาโดยการคำนวณทางด้านพลศาสตร์ของไหลและการถ่ายเท

ความร้อนเป็นเครื่องมือสำหรับศึกษาพารามิเตอร์ ได้แก่ เลขเรย์โนลด์ และรูปแบบของครีบริปตัววี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกร ใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
คู เพื่อค้นหาผลของพารามิเตอร์เหล่านี้ที่สามารถช่วยส่งเสริมให้อากาศถ่ายเทความร้อนจากผิวของท่อ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ติดตั้งครีบริบรูปตัววีคู่ติดตั้งอยู่ภายใน สำหรับผลการวิจัยที่เราได้ สามารถใช้เป็นแนวทางหนึ่งในการออกแบบการจัดวางครีบริบรูปตัววีคู่ให้มีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้นได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- (1) เพื่อศึกษาการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของพฤติกรรมการไหล การถ่ายเทความร้อน ค่าความดันตกคร่อม และค่าตัวประกอบของการเพิ่มทางความร้อน ของการไหลภายในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีครีบริบรูปตัววีคู่
- (2) ศึกษามุมปะทะและสัดส่วนความสูงแผ่นกั้นต่อความสูงท่อของครีบริบรูปตัววีคู่
- (3) ศึกษาค่าของเรย์โนลด์นัมเบอร์ ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบความเสียดทาน
- (4) ศึกษาเงื่อนไขของการใช้ Periodic Concept ในการศึกษาเชิงตัวเลขของพฤติกรรมการไหลแบบเป็นคาบและการถ่ายเทความร้อนภายในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการไหลแบบปั่นป่วน

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- (1) ใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล และการถ่ายเทความร้อนบนพื้นฐานของระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite volume method)
- (2) ทำการศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ ระหว่าง 3,000 ถึง 20,000 โดยมีอากาศเป็นของไหลทดสอบ ซึ่งคุณสมบัติต่างๆของของไหลมีค่าคงที่ และไม่พิจารณาแรงวัตถุ
- (3) การให้ความร้อนที่ผิวเป็นแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ (Constant heat flux) 600W/m^2 โดยให้ที่ผิวทั้งสองด้านของท่อจัตุรัส
- (4) สัดส่วนความสูงแผ่นกั้นต่อความสูงท่อ (Blockage ratio(e/H), BR) = 0.05 , 0.1 , 0.15 , 0.2 และ 0.25 และที่สัดส่วนระยะพิตซ์ต่อความสูงท่อ (Pitch ratio (P/H), PR) = 1
- (5) มีมุมปะทะ $\alpha = 30^\circ$ และ 45° , double V-downstream

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการไหลและการถ่ายเทความร้อนผ่านพื้นผิวให้ความร้อน ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวในรูปแบบต่างๆ เพื่อช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนจากผลงานของนักวิจัยในอดีตที่ผ่านมา ซึ่งได้มีการศึกษาทั้งการทดลองการคำนวณเชิงตัวเลข หรือใช้ทั้งสองวิธีวิเคราะห์ร่วมกัน โดยเน้นถึงงานวิจัยที่ได้ศึกษาและวิเคราะห์เกี่ยวกับพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบความเสียดทานของการไหลผ่านแผ่นกั้นและการไหลผ่านครีบบนรูปแบบต่างๆ เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปวิเคราะห์การไหลและการถ่ายเทความร้อนในช่องทางไหลสี่เหลี่ยมจัตุรัสต่อไป

2.1 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนด้วยการติดตั้งครีบ

มีผู้วิจัยจำนวนมากให้ความสนใจกับการใช้ครีบ ที่มีรูปร่างของหน้าตัดหลากหลายรูปแบบ และมีความสูงไม่มากนักเมื่อเทียบกับความสูงของแผ่นกั้น (โดยทั่วไปจะมีความสูงครีบน้อยกว่า 10% ของช่องทางไหล) มาช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ซึ่งการใช้ครีบที่ติดตั้งตลอดแนวพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนนั้น จะสร้างการไหลรบกวนชั้นขีดยึดผิวในบริเวณระหว่างครีบใกล้พื้นผิวถ่ายเทความร้อน ซึ่งเหมาะสำหรับการถ่ายเทความร้อนที่มีการไหลแบบปั่นป่วน โดยครีบที่ยาวต่อเนื่องและวางตั้งฉากกับทิศทางการไหล จะสร้างการไหลวนที่มีแกนการไหลตั้งฉากกับทิศทางการไหลและรบกวนบริเวณการไหลหลักน้อย ส่วนการไหลผ่านครีบที่ทำมุมปะทะต่างๆ กับทิศทางการไหลนั้น จะสร้างการไหลวนตามยาวไปทางด้านท้ายการไหล และก่อให้เกิดการรบกวนบริเวณการไหลหลัก ซึ่งพฤติกรรมการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนส่วนใหญ่จะเกิดบริเวณใกล้กับผิวความร้อน ข้อดีของครีบคือมีการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยที่ค่าความดันตกคร่อมไม่สูงมากนัก ซึ่งจะส่งผลให้ได้ค่าตัวประกอบทางความร้อนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

2.1.1 ครีบบนรูปแบบต่างๆ

2.1.1.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง

Webb et al. (1971) พวกเขาได้นำเสนอพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อที่มีการติดตั้งครีบที่เรียงตัวซ้ำกัน

Han et al. (1978) ศึกษาพื้นผิวที่มีการเพิ่มครีบ โดยทำการศึกษาอิทธิพลของรูปร่างของครีบ

มุมปะทะ และอัตราส่วนระยะห่างระหว่างแผ่นครีบต่อความสูงของท่อ และแสดงในรูปของค่าความดันตกคร่อมและอัตราการถ่ายเทความร้อนในช่องทางไหลขนาน ศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 3,000 ถึง

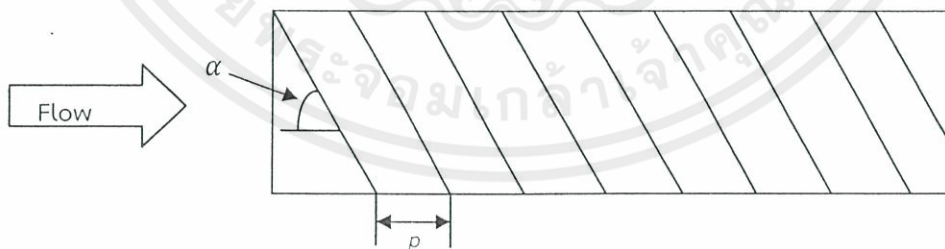
30,000 จากผลการศึกษาพบว่าครีบทำมุมปะทะ 45° ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าครีบทำมุมปะทะ 90° กับทิศทางการไหลโดยให้ค่าความดันตกคร่อมที่น้อยกว่า

Gee and Webb (1980) ศึกษาค่าการถ่ายเทความร้อนและความดันตกคร่อมสำหรับการเพิ่มครีบทำในท่อกลม ในช่วงเลขเรย์โนลด์ 6,000 ถึง 65,000 พวกเขาพบว่ามุมปะทะการไหลที่เหมาะสมที่สุดในการติดตั้งครีบทำคือมุม 45°

Prasad and Saini (1988) ได้แสดงรูปแบบของการไหลที่ทางด้านท้ายครีบทำที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนของระยะห่างระหว่างครีบทำต่อความสูงครีบทำ (p/e) เนื่องจากการไหลแยกตัวทางด้านท้ายครีบทำ ซึ่งพวกเขาพบว่าจุดตกกระหนบของชั้นการไหลเฉือน (shear layer) จะไม่เกิดขึ้นที่ค่า p/e น้อยกว่า 8 และค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเกิดขึ้นที่บริเวณการไหลตกกระหนบพื้นผิว และถ้าค่า p/e มากกว่า 10 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนจะมีค่าลดลง

Han and Zhang (1992) ได้ตรวจสอบการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในช่องทางไหลสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดตั้งครีบทำมุมปะทะ 60° กับทิศทางการไหลทั้งผนังด้านบนและด้านล่างของพื้นผิวให้ความร้อน และสังเกตพบว่าครีบทำที่มีค่า $e/D = 0.0625$ และ $p/e = 10$ ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่าครีบทำยาวต่อเนื่อง

Gupta et al. (1997) ตรวจสอบอิทธิพลของ e/D มุมปะทะ และเลขเรย์โนลด์ ต่อการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบความเสียหายในท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีครีบทำเป็นเส้นลวดหน้าตัดวงกลมติดตั้งบนแผ่นดูดซับความร้อน แสดงดังรูปที่ 2.1 ซึ่งพวกเขาพบว่าอัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงถึง 1.8 และตัวประกอบความเสียหายมีค่าเท่ากับ 2.7 เท่าเมื่อเทียบกับท่อผิวเรียบ และค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบความเสียหายเกิดขึ้นที่มุมปะทะ 60° และ 70° ตามลำดับ นอกจากนี้ค่า TEF สูงที่สุดเกิดขึ้นที่ $e/D = 0.033$ ที่เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 14,000



รูปที่ 2.1 ครีบทำวงเฉียงที่ใช้ในการตรวจสอบการถ่ายเทความร้อนโดย Gupta et al. (1997)

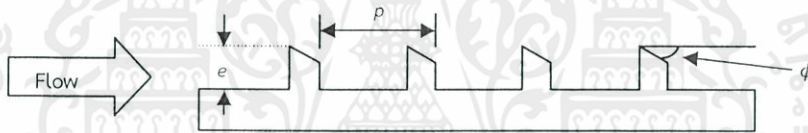
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ผู้วิจัยทำการศึกษาเกี่ยวกับค่าของความร้อนและสมรรถนะของหม้อน้ำในเชิงพาณิชย์ ไม่ว่าจะกรณีใดก็ตาม ผู้วิจัยไม่รับผิดชอบต่อความเสียหายใดๆ ที่เกิดขึ้นจากการใช้ข้อมูลในเอกสารนี้

งานวิจัยที่ทำการศึกษเกี่ยวกับค่าของความร้อนและสมรรถนะของหม้อน้ำในเชิงพาณิชย์ สามารถศึกษาได้จากงานของ Farrell et al. (1991), Olsson and Sunden (1996) พวกเขาได้

ศึกษาถึงอิทธิพลของครีบบนพื้นผิวแบบหลุมระยะห่างของครีบบนท่อ จากผลการศึกษาพบว่าครีบบนท่อให้ค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสูงสุด

Olsson and Sundén (1997) ได้ศึกษาพฤติกรรมการไหลในท่อที่มีการติดตั้งครีบบนลักษณะต่างๆ ด้วยการใช้ควัน (smoke-wire visualization) และ laser Doppler anemometry (LDA) โดยทำการศึกษารูปร่างของครีบบนที่มีลักษณะแตกต่างกันออกไป ซึ่งประกอบด้วยครีบบนแบบขนาน ครีบบนแบบเอียง ครีบบนรูปตัววีแบบขนาน ครีบบนรูปตัววีแบบเอียงและครีบบนรูปตัววีแบบผสม (multiple) ที่ค่าเลขเรย์โนลด์น้อยกว่า 2,000 พบว่าการเกิดการไหลหมุนวนชั้นที่สอง (secondary flow) ในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสจะให้ค่าที่เสถียรมากกว่าการเกิดในท่อขนานหรือท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้า

Liou and Chen (1998) ศึกษาการถ่ายเทความร้อนและพฤติกรรมการไหลในช่วงการไหลปั่นป่วนสำหรับท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการติดตั้งครีบบนแบบเจาะรู พวกเขาได้ทำการศึกษาทั้งครีบบนที่มีการติดตั้งที่พื้นและแบบไม่แนบกับพื้น โดยครีบบนทำจากอลูมิเนียม จากผลการทดลองพบว่าค่าเลขนัสเซลที่เพิ่มมากขึ้นมีค่าเท่ากับ 3 เท่า เมื่อเทียบเท่ากับท่อเปล่าที่ไม่มีการเพิ่มครีบบน



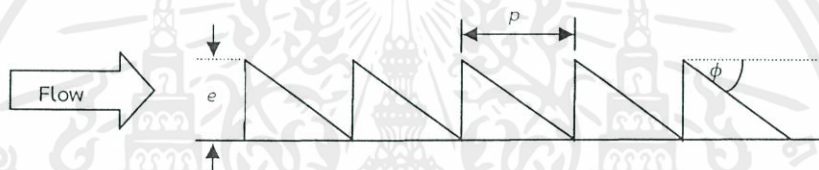
รูปที่ 2.2 ครีบบนตามขวางตัดยอดด้วยมุม (ϕ) ค่าต่างๆ โดย Karwa et al. (1999)

Karwa et al. (1999) ศึกษาด้วยการทดลองเพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของมุมตัดที่ยอดของครีบบน (ϕ) และอัตราส่วนบ่งลักษณะของท่อต่อการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบความเสียดทาน ในท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีครีบบนตามขวางตัดยอดซึ่งติดตั้งที่ผนังด้านล่าง โดยเปรียบเทียบกับท่อผิวเรียบดังแสดงในรูปที่ 2.2 จากการทดลองพบว่าในช่วงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ ครีบบนตัดยอดให้ค่าการเพิ่มของเลขแอสตันตันและตัวประกอบความเสียดทาน เท่ากับ 2 เท่า และ 3 เท่า เมื่อเทียบกับท่อผิวเรียบตามลำดับ โดยการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบความเสียดทานสูงสุดเกิดขึ้นที่ $\phi = 15^\circ$

Ahn (2001) ทำการศึกษาผลกระทบของครีบบนรูปแบบต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทานในท่อสี่เหลี่ยม โดยทำการศึกษารูปร่างครีบบน 5 ชนิด ได้แก่ ครีบบนรูปสี่เหลี่ยม ครีบบนรูปสามเหลี่ยม ครีบบนวงกลม ครีบบนครึ่งวงกลมทรงต่ำ และครีบบนครึ่งวงกลมทรงสูง โดยทำการศึกษาที่ความสูงครีบบนต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก เท่ากับ 0.0476 อัตราส่วนระยะพิชช์ต่อความสูงครีบบน เท่ากับ 8 และอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงเท่ากับ 2.33 จากการทดลองพบว่าแผ่นครีบบนสามเหลี่ยมมีค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนดีที่สุด ตามด้วยครีบบนสี่เหลี่ยม ส่วนครีบบนวงกลมและครีบบนครึ่งวงกลมมีสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนใกล้เคียงกัน โดยที่ค่าเลขเรย์โนลด์ 10,000 แผ่นครีบบน

สามเหลี่ยมมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าแผ่นเรียบ 3 เท่า ในช่วงค่าเลขเรย์โนลด์ 20,000 จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อค่าเลขเรย์โนลด์มีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพโดยรวมพบว่าแผ่นครีบบสามเหลี่ยมมีสมรรถนะเชิงความร้อนโดยรวมมากที่สุด ตามด้วยแผ่นครีบลิ่มเหลี่ยม

Bhagoria et al. (2002) ศึกษาด้วยการทดลองหาความสัมพันธ์ของค่าระยะห่างระหว่างครีบบสามเหลี่ยม (p/e) ความสูงครีบบสามเหลี่ยม และมุมลิ่ม ต่อการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบของความเสียดทานในเครื่องอุทกอากาศด้วยแสงอาทิตย์ที่มีการติดตั้งครีบบสามเหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 2.3 จากผลการทดลองพบว่าในช่วงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์และตัวประกอบความเสียดทานมีค่าสูงสุดเท่ากับ 2.4 และ 5.3 เท่าเมื่อเทียบกับท่อผิวเรียบตามลำดับ ค่าการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสูงสุดได้มาจากค่ามุมลิ่มประมาณ 10° และ $p/e = 7.57$ ซึ่งค่าตัวประกอบความเสียดทานมีค่าลดลงตามระยะห่างระหว่างครีบบที่เพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 2.3 ครีบบสามเหลี่ยมที่ใช้ในงานของ Bhagoria et al. (2002)

Cavallero and Tanda (2002) ตรวจสอบด้วยการทดลองผลของการถ่ายเทความร้อนในช่องทางไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีอัตราส่วนด้านยาวต่อด้านกว้างเท่ากับ 5 ซึ่งมีการติดตั้งครีบบต่อเนื่องและครีบบแยกตัวบนพื้นผิวด้านล่าง โดยวางตั้งฉากกับทิศทางการไหลและให้ความร้อนแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ ทำการศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 8,000 ถึง 35,000 วัดค่าการถ่ายเทความร้อนด้วยการวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวให้ความร้อนโดยใช้ ลิกวิด คริสตอล (liquid crystal thermography) พวกเขาสรุปว่าที่ค่า $p/e = 8$ ให้ค่าอัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงสุดในบริเวณการไหลตกกระทบบนพื้นผิว และในกรณีของครีบบต่อเนื่องและครีบบแยกตัวนั้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมีค่าเป็น 2 เท่าและ 3 เท่าของกรณีไม่มีการติดตั้งครีบบตามลำดับ

Won et al. (2003) ได้ทดลองศึกษาโครงสร้างการไหลโดยใช้เส้นลวดควัน (smoke wires) และการถ่ายเทความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรด ในช่องทางไหลที่มีค่าอัตราส่วนบ่งลักษณะเท่ากับ 4 ซึ่งมีครีบบวางเอียง 45° แบบสลับที่ผนังด้านบนและด้านล่าง ในช่วงเลขเรย์โนลด์ 270 ถึง 48,000 จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้นจะมีคู่ของกระแสวนขนาดเล็กเกิดขึ้นเป็นทวิคูณ และความเข้มขององค์ประกอบการไหลชั้นที่สอง ซึ่งเคลื่อนที่ตรงข้ามจากผนังด้านบนและด้านล่าง ส่งผลต่อ

รูปร่างของกระแสน การเคลื่อนย้ายของความปั่นป่วนแบบ 3 มิติ และพฤติกรรมการไหลซึ่งสัมพันธ์กับค่าของเลขนัสเซลท์เฉพาะที่

Chandra et al.(2003) ศึกษาด้วยการทดลองของการถ่ายเทความร้อน ในช่องทางไหลที่มีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ซึ่งติดตั้งครีบบาวต่อเนื่องและวางตั้งฉากกับทิศทางการไหลบนผนังให้ความร้อนโดยมุ่งศึกษากรณีการติดตั้งครีบที่ผนัง 4 กรณีคือ ติดตั้ง 1 ด้าน, 2 ด้านที่ตรงข้ามกัน, 3 ด้านและ 4 ด้าน โดยกำหนดค่า $p/e = 8$ และ $e/D = 0.0625$ คงที่ตลอดการทดลอง วิเคราะห์ในช่วงเลขเรย์โนลด์ 10,000 ถึง 80,000 พวกเขาสรุปว่าการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบความเสียหายเพิ่มขึ้นกับการเพิ่มจำนวนด้านที่ติดตั้งครีบ และค่า TEF สูงที่สุดเกิดขึ้นกับกรณีการติดตั้งครีบ 2 ด้านที่ตรงข้ามกันซึ่งให้ค่า TEF อยู่ในช่วง 1.2 ถึง 1.7

Won and Ligrani (2004) ได้ศึกษาด้วยการทดลองโดยใช้ภาพรังสีอินฟราเรด ร่วมกับเทอร์โมคัปเปิล วัดการกระจายของอุณหภูมิที่ผิวให้ความร้อน ของการไหลในช่องทางไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างเท่ากับ 4 ซึ่งติดตั้งครีบหน้าตัดสี่เหลี่ยมยาวต่อเนื่องทำมุมปะทะ 45° กับทิศทางการไหล วางที่ผนังด้านบนและด้านล่างโดยที่การเรียงครีบที่ผิวบนและล่างมีลักษณะการเรียงที่แตกต่างกัน 2 ลักษณะคือเรียงแบบขนานกัน และเรียงแบบไขว้กัน โดย $e/D = 0.078$, $p/e = 10$ วิเคราะห์ที่ช่วงเลขเรย์โนลด์ 480 ถึง 18,300 พวกเขาสรุปว่าที่บริเวณการไหลพัฒนาอย่างสมบูรณ์ ครีบที่เรียงแบบขนานกันให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์เฉพาะที่สูงกว่าครีบที่เรียงแบบไขว้กัน

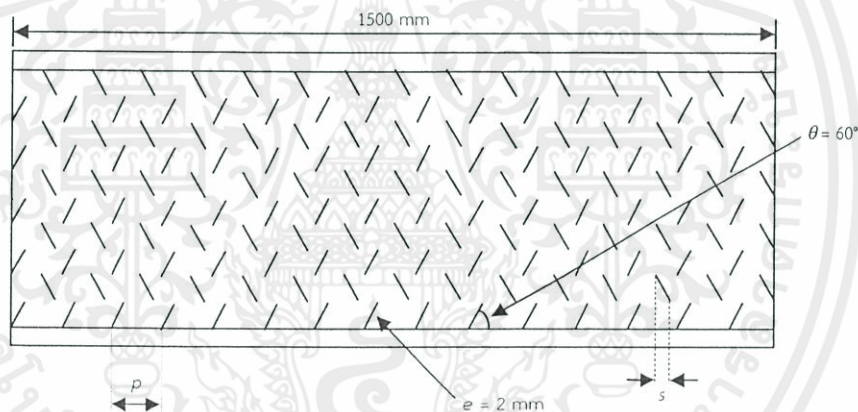
Sahu and Bhagoria (2005) ได้ตรวจสอบด้วยผลการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน โดยใช้ครีบแบบแยกตัววางตั้งฉากกับทิศทางการไหลบนพื้นผิวให้ความร้อนแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ ในท่อหน้าตัดที่มีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างเท่ากับ 8, $D = 44.44$ mm, $e/D = 0.0338$ ใช้ค่า $p/e = 6.67, 13.33$ และ 15 ในช่วงที่เลขเรย์โนลด์ 3,000 ถึง 12,000 และวัดอุณหภูมิบนพื้นผิวร้อน 6 ตำแหน่ง พวกเขาสรุปว่าค่า $p/e = 13.33$ ให้สมรรถนะดีที่สุด และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนอยู่ในช่วง 1.25 ถึง 1.4 เท่า เมื่อเทียบกับท่อผิวเรียบ

Jaurker et al. (2006) ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียหายของแผ่นสี่เหลี่ยมในเครื่องอุณหอากาศด้วยแสงอาทิตย์ชนิดผิวครีบ-ร่อง (rib-grooved) อยู่ในแนวตั้งฉากกับทิศทางการไหลโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล วัดการกระจายของอุณหภูมิที่ผิวให้ความร้อน ศึกษาในช่วงค่าเลขเรย์โนลด์ $Re = 3,000-21,000$ ความสูงครีบต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (e/D) เท่ากับ 0.0181-0.0363 อัตราส่วนระยะห่างระหว่างครีบต่อความสูงครีบ เท่ากับ 4.5-10.0 และระยะร่องต่อระยะห่างระหว่างครีบ เท่ากับ 0.3-0.7 จากการทดลองพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของแผ่นครีบ-ร่อง จะมีค่ามากกว่าแผ่นครีบอย่างเดียว และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนระยะห่างระหว่างครีบต่อ

เอกสารนี้เป็นความสูงครีบมีค่าลดลง และมีค่าสูงสุดที่อัตราส่วนระยะห่างระหว่างครีบต่อความสูงครีบเท่ากับ 6 เมื่อการก้าว
ไม่ว่ากรณีใน ระยะร่องต่อระยะห่างระหว่างครีบ มีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าเลขนัสเซลท์มีค่าสูงสุดเมื่อระยะร่องต่อ

ระยะห่างระหว่างครีบท่อกับ 0.4 ส่วนค่าตัวประกอบเสียดทานมีค่าสูงสุดเมื่อระยะร่องต่อระยะพิทช์เท่ากับ 0.4 และค่า TEF สูงที่สุดเท่ากับ 1.8 ที่เลขเรย์โนลด์ 20,000

Amro et al. (2007) ศึกษาด้วยการทดลองของการไหลในช่องทางไหลหน้าตัดคล้ายสามเหลี่ยมที่มีปลายมน โดยจำลองการไหลที่ช่องหล่อเย็นด้านหน้าของใบกังหันก๊าซ ซึ่งติดตั้งครีบท่อเนื่องทำมุมปะทะ 45° และ 60° กับทิศทางการไหล ครีบบางเรียงสลับกันที่ผนังด้านบนและด้านล่างของพื้นผิวให้ความร้อนโดยใช้ ลิกวิต คริสตอล สำหรับวัดค่าการถ่ายเทความร้อน ทำการศึกษาในช่วงเรย์โนลด์ 50,000 ถึง 200,000 จากผลการทดลองพบว่า ครีบท่อทำมุมปะทะ 60° ให้ค่าการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบความเสียดทานสูงสุด โดยให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์สูงสุดมีค่าประมาณ 3 เท่าของท่อผิวเรียบ และครีบท่อทำมุมปะทะ 45° เหมาะสมที่สุดสำหรับนำไปใช้เพิ่มการถ่ายเทความร้อน ที่เลขเรย์โนลด์ 50,000 ให้ค่า TEF สูงที่สุดซึ่งมีค่าประมาณ 1.1 และมีแนวโน้มลดลงเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.4 รูปแบบการจัดวางครีบท่อของ Karmare and Tikekar (2007)

Karmare and Tikekar (2007) ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบความเสียดทานของแผ่นสี่เหลี่ยมในเครื่องอุณหอากาศด้วยแสงอาทิตย์ ที่มีครีบท่อหน้าตัดวงกลมติดตั้งบนแผ่นให้ความร้อนดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยใช้เทอร์โมคัปเปิล วัดการกระจายของอุณหภูมิที่ผิวให้ความร้อน ศึกษาในช่วงค่าเลขเรย์โนลด์ $Re = 4,000-17,000$ ความสูงครีบท่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (e/D) เท่ากับ 0.035-0.044 อัตราส่วนระยะห่างระหว่างครีบท่อความสูงครีบท่อ (p/e) เท่ากับ 12.5-36 และค่า U/s อยู่ในช่วง 1-1.72 จากการทดลองสรุปพบว่า พารามิเตอร์ที่ศึกษาที่มีค่า $e/D = 0.044$, $p/e = 17.5$ และ $U/s = 1.72$ ให้ค่าสมรรถนะดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้ง Aharwal et al. (2008) ศึกษาด้วยการทดลองโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลจำนวน 16 ตัว วัดการกระจายของอุณหภูมิที่ผิวให้ความร้อนหนึ่งด้านแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ ซึ่งมีครีบท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยม

จัดวัสดุติดตั้งอยู่ในช่องทางไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของช่อง (W/H) เท่ากับ 5.84 ค่า $p/e = 10$ ค่า $e/D = 0.0377$ ครีบริบที่ใช้ศึกษาทำมุมปะทะ 60° กับทิศทางการไหลซึ่งพวกเขาศึกษาอิทธิพลของความกว้างช่องเปิดครีบริบสัมพัทธ์ (g/e) และตำแหน่งของช่องเปิด (d/W) ในช่วง 0.25-2 และ 0.1667-0.667 ตามลำดับ ศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 3,000-18,000 จากผลการทดลองสรุปได้ว่าค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์และตัวประกอบความเสียดทานอยู่ในช่วง 2.59 และ 2.87 เท่าของท่อผิวเรียบตามลำดับ และพบว่าค่า TEF มีค่าสูงที่สุดที่ $g/e = 1.0$ และ $d/W = 0.25$

Varun et al. (2008) ศึกษาด้วยการทดลองโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล จำนวน 15 ตัว วัดการกระจายของอุณหภูมิที่ผิวให้ความร้อนหนึ่งด้านแบบพลักซ์ความร้อนคงที่ ของแผ่นในเครื่องให้ความร้อนสู่อากาศด้วยแสงอาทิตย์ ซึ่งมีครีบริบเอียงสั้นซึ่งวางในลักษณะขนานกันไปและทำมุมปะทะ 60° ติดตั้งอยู่ในช่องทางไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า อัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของช่อง (W/H) เท่ากับ 10 ค่า p/e อยู่ในช่วง 3-8 ค่า $e/D = 0.030$ ศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 2,000-14,000 จากผลการทดลองสรุปได้ว่า $p/e = 8$ ให้ค่า TEF สูงที่สุด

Promvong and Thianpong (2008) ศึกษาด้วยการทดลองเกี่ยวกับอิทธิพลของการไหลผ่านครีบริบที่มีหน้าตัดรูปทรงต่างๆ ที่วางตั้งฉากกับทิศทางการไหลในช่องทางไหลต่อการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทาน โดยครีบริบที่ใช้ศึกษามีการจัดเรียงทั้งแบบตรงกันและแบบเยื้องกันซึ่งประกอบไปด้วยครีบริบสามเหลี่ยมด้านเท่า ครีบริบรูปสี่เหลี่ยมที่หันไปทางด้านท้ายการไหล และครีบริบรูปสี่เหลี่ยม ซึ่งถูกติดตั้งบนผิวให้ความร้อนแบบพลักซ์ความร้อนคงที่ที่ผนังด้านบนและด้านล่าง ช่องทางไหลมีอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของช่อง (W/H) เท่ากับ 15 ค่า $p/H = 2$ และค่า $e/H = 0.15$ ศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 4,000-16,000 จากผลการทดลองสรุปได้ว่า ที่เงื่อนไขการไหลเดียวกันการจัดวางครีบริบแบบตรงกัน ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบความเสียดทานสูงกว่าการจัดวางครีบริบแบบเยื้องกัน และครีบริบรูปสี่เหลี่ยมที่หันไปทางด้านท้ายการไหลให้ค่าเลขนัสเซลท์และค่าตัวประกอบความเสียดทานสูงที่สุด ในขณะที่ครีบริบสามเหลี่ยมวางเยื้องกันให้ค่า TEF สูงที่สุด

Aharwal et al. (2009) ศึกษาด้วยการทดลองต่อเนื่องจากงานเก่าโดยศึกษาให้ละเอียดยิ่งขึ้นสำหรับการไหลและการถ่ายเทความร้อนในช่องทางไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า อัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของช่อง (W/H) เท่ากับ 5.83 ค่า p/e อยู่ในช่วง 4-10 ค่า e/D อยู่ในช่วง 0.018-0.037 ครีบริบที่ใช้ศึกษาทำมุมปะทะในช่วง 30° - 90° กับทิศทางการไหลซึ่งพวกเขาศึกษาอิทธิพลของครีบริบสัมพัทธ์ (g/e) และตำแหน่งของช่องเปิด (d/W) ในช่วง 0.5-2 และ 0.16-0.5 ตามลำดับ ศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 3,000-18,000 จากผลการทดลองเพื่อวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ซึ่งพบว่าค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์และตัวประกอบความเสียดทานสูงสุดอยู่ในช่วง 2.83 และ 3.60 เท่าของท่อผิวเรียบตามลำดับ และพบว่าค่า TEF มีค่าสูงที่สุดที่ $g/e = 1.0$, $d/W = 0.25$, $p/e = 8.0$ ที่มุมปะทะ

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น Bopche and Tandale (2009) ศึกษาการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทานของแผ่นสี่เหลี่ยมในเครื่องอุ่นอากาศด้วยแสงอาทิตย์ ที่มีครีบริบสร้างความเป็นป่วนติดตั้งบนแผ่นให้ความ

ร้อน โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลวัดการกระจายของอุณหภูมิที่ผิวให้ความร้อน ศึกษาในช่วงค่าเลขเรย์โนลด์ $Re = 3,000-18,000$ ความสูงครีบต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (e/D) เท่ากับ $0.0186-0.03986$ อัตราส่วนระยะพิชต์ต่อความสูงครีบ (p/e) เท่ากับ $6.67-57.14$ และค่ามุมปะทะครีบเท่ากับ 90° จากการทดลองพวกเขาสรุปว่า อัตราส่วนเลขนัสเซลท์และตัวประกอบความเสียหายอยู่ในช่วง 2.82 และ 3.72 เท่าของท่อผิวเรียบตามลำดับ

Kumar et al. (2009) ทำการศึกษาด้วยการทดลองโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลจำนวน 17 ตัว วัดการกระจายของอุณหภูมิที่ผิวให้ความร้อนหนึ่งด้านแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ของแผ่นให้ความร้อนสู่อากาศด้วยแสงอาทิตย์ ซึ่งมีครีบบรูปตัว W ติดตั้งอยู่ในช่องทางไหลหน้าดัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า อัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของช่อง (W/H) เท่ากับ 8 ค่า $p/e = 10$ ค่า e/D อยู่ในช่วง $0.0168-0.0338$ ครีบที่ใช้ศึกษาทำมุมปะทะในช่วง $30^\circ-75^\circ$ กับทิศทางการไหล ศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ $3,000-15,000$ จากผลการทดลองพวกเขาสรุปว่า ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์และตัวประกอบความเสียหายสูงสุดอยู่ในช่วง 2.16 และ 2.75 เท่าของท่อผิวเรียบตามลำดับ ซึ่งเกิดที่มุมปะทะ 60°

Eiamsa-ard and Promvong (2009) ได้ศึกษาเชิงทดลองของตัวสร้างความปั่นป่วนแบบครีบ-ร่อง ยาวต่อเนื่องวางตั้งฉากกับทิศทางการไหล ซึ่งติดตั้งบนพื้นผิวให้ความร้อนในช่องทางไหลหน้าดัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า อัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของช่อง (W/H) เท่ากับ 10 ค่า p/e อยู่ในช่วง $6.6-13.3$ ศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ $3,000-10,000$ ซึ่งครีบ-ร่อง ที่ใช้ศึกษามี 3 กรณีคือ ครีบสี่เหลี่ยม ร่องสามเหลี่ยม ครีบสามเหลี่ยม-ร่องสี่เหลี่ยม และครีบสามเหลี่ยม-ร่องสามเหลี่ยม จากผลการทดลองพวกเขาสรุปว่า ครีบสามเหลี่ยม-ร่องสามเหลี่ยม ที่ค่า $p/e = 6.6$ ให้ค่า TEF สูงที่สุดซึ่งที่เลขเรย์โนลด์ $3,000$ ให้ค่า TEF สูงที่สุดที่ค่าประมาณ 1.1

Thianpong et al. (2009) ศึกษาด้วยการทดลองเกี่ยวกับอิทธิพลของการไหลผ่านครีบบรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า ที่วางตั้งฉากกับทิศทางการไหลในช่องทางไหลต่อการถ่ายเทความร้อนและความเสียหาย ซึ่งเป็นงานที่พัฒนามาจากงานของ Promvong and Thianpong (2008) โดยครีบที่ใช้ศึกษามีการจัดเรียงทั้งแบบตรงกันและแบบเยื้องกัน และถูกติดตั้งบนผิวให้ความร้อนแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ ที่ผนังด้านบนและด้านล่าง ช่องทางไหลมีอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของช่อง (W/H) เท่ากับ 10 ค่า $p/e = 1.33$ และค่า e/H อยู่ในช่วง $0.13-0.26$ ศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ $5,000-22,000$ จากผลการทดลองพวกเขาสรุปว่า ครีบที่ศึกษาให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์อยู่ในช่วง $1.8-4.0$ เท่าของท่อผิวเรียบ แต่การจัดวางครีบแบบเยื้องกันที่ค่า $e/H = 0.13$ ให้ค่า TEF สูงที่สุด ซึ่งค่าสูงสุดของ TEF เกิดที่เลขเรย์โนลด์เท่ากับ $5,000$ ซึ่งมีค่าประมาณ 1.34

Promvong et al. (2010c) ศึกษาด้วยการทดลองเกี่ยวกับอิทธิพลของการไหลผ่านปีกเล็ก (winglets) รูปสามเหลี่ยม 2 คู่ โดยทำมุมปะทะ 30° , 45° และ 60° เพื่อสร้างการไหลหมุนวนตามเอกสารนี้เป็นความยาวผ่านครีบบรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าที่วางตั้งฉากกับทิศทางการไหลในช่องทางไหล ต่อการถ่ายเทความร้อนและค่า TEF สูงที่สุด ซึ่งค่าสูงสุดของ TEF เกิดที่เลขเรย์โนลด์เท่ากับ $5,000$ ซึ่งมีค่าประมาณ 1.34

ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม การศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของการไหลผ่านปีกเล็ก (winglets) รูปสามเหลี่ยม 2 คู่ โดยทำมุมปะทะ 30° , 45° และ 60° เพื่อสร้างการไหลหมุนวนตามเอกสารนี้เป็นความยาวผ่านครีบบรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าที่วางตั้งฉากกับทิศทางการไหลในช่องทางไหล ต่อการถ่ายเทความร้อนและค่า TEF สูงที่สุด ซึ่งค่าสูงสุดของ TEF เกิดที่เลขเรย์โนลด์เท่ากับ $5,000$ ซึ่งมีค่าประมาณ 1.34

Thianpong et al. (2009) โดยครีบที่ใช้ศึกษามีการจัดเรียงทั้งแบบตรงกันและแบบเยื้องกัน และถูกติดตั้งบนผิวให้ความร้อนแบบฟลักซ์

ความร้อนคงที่ที่ผนังด้านบนและด้านล่าง ช่องทางไหลมีอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของช่อง (W/H) เท่ากับ 10 ค่า $p/H = 1.33$ และค่า $e/H = 0.13$ ศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 5,000-22,000 จากผลการทดลองพวกเขาสรุปว่า อัตราส่วนตัวประกอบความเสียหายและเลขเรย์โนลด์ และการเรียงครีบบนแบบสลับร่วมกับปีกเล็กที่มีมุมปะทะ 30° ให้ค่า TEF สูงที่สุด

Chompookham et al. (2010) ศึกษาด้วยการทดลองเกี่ยวกับอิทธิพลของการไหลผ่านปีกเล็ก (winglets) รูปสามเหลี่ยม 2 คู่ โดยทำมุมปะทะ 60° เพื่อสร้างการไหลหมุนวนตามยาวผ่านครีบบลูมที่ชี้ไปทางท้ายการไหลและสวนทางการไหล วางตั้งฉากกับทิศทางการไหลในช่องทางไหลที่ผนังด้านบนและด้านล่าง จัดเรียงทั้งแบบตรงกันและแบบเยื้องกัน ต่อการถ่ายเทความร้อนและความเสียหายซึ่งคล้ายกับงานของ Promvongse et al. (2010) โดยครีบบลูมที่ใช้ศึกษามีการจัดเรียงทั้งแบบตรงกันและแบบเยื้องกัน และถูกติดตั้งบนผิวให้ความร้อนแบบพลักซ์ความร้อนคงที่ที่ผนังด้านบนและด้านล่าง ช่องทางไหลมีอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของช่อง (W/H) เท่ากับ 10 ค่า $p/H = 1.33$ และค่า $e/H = 0.2$ ศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 5,000-22,000 จากผลการทดลองพวกเขาสรุปว่า ลูมที่ชี้ไปทางด้านท้ายการไหลและวางแบบตรงกัน ให้ค่าเลขนัสเซลท์และตัวประกอบความเสียหายสูงที่สุด ในขณะที่ลูมที่ชี้ไปทางด้านท้ายการไหลและวางแบบเยื้องกันให้ค่า TEF ดีที่สุด

Hans et al. (2010) ศึกษาด้วยการทดลองการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและความเสียหายในเครื่องอุ่นอากาศด้วยแสงอาทิตย์ ซึ่งมีครีบบลูมตัววีติดตั้งบนแผ่นดูดซับความร้อน ค่าพารามิเตอร์ที่ศึกษาคือ ช่องทางไหลมีอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของช่อง (W/H) เท่ากับ 8 ค่า $p/e = 6-12$ และค่า $e/D = 0.019-0.043$ มุมปะทะอยู่ในช่วง $30^\circ-75^\circ$ ศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 2,000-20,000 โดยครีบบลูมที่ใช้ศึกษามีค่า W/w ในช่วง 1-10 จากผลการทดลองสรุปได้ว่าค่าการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดเกิดขึ้นที่ $W/w = 6$ ค่าตัวประกอบความเสียหายสูงสุดเกิดขึ้นที่ $W/w = 10$ และมุมปะทะครีบบลูมที่ให้ค่าเลขนัสเซลท์และตัวประกอบความเสียหายสูงที่สุดคือ 60° และที่ $p/e = 8$

Tanda (2011) ได้ตรวจสอบด้วยการทดลองผลของการถ่ายเทความร้อนในช่องทางไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีอัตราส่วนด้านยาวต่อด้านกว้างเท่ากับ 5 ซึ่งมีการติดตั้งครีบบลูมเยื้องยาวต่อเนื่องทำมุมปะทะ 45° ศึกษาทั้งกรณีติดตั้งบนพื้นผิวด้านล่าง และติดตั้งบนพื้นผิวทั้งด้านบนและด้านล่าง ให้ความร้อนแบบพลักซ์ความร้อนคงที่ โดยมีการปรับเปลี่ยนค่า p/e ในช่วง 6.66-20 เพื่อหาค่าที่เหมาะสม ค่า $e/D = 0.09$ ทำการศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 9,000 ถึง 35,500 วัดค่าการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้ ลิควิด คริสตอล ซึ่งเป็นการแสดงค่าด้วยแผนภาพการกระจายค่าเลขนัสเซลท์บนพื้นผิวให้ความร้อนที่ค่อนข้างละเอียด เขาสรุปว่าการติดตั้งครีบบลูมที่ผนังให้ความร้อนเพียงด้านเดียวที่ค่า $p/e = 13.33$ ให้ค่า TEF กว่าติดตั้งครีบบลูมทั้งสองด้าน ซึ่งให้ค่า TEF อยู่ในช่วง 1.25-1.45 และสำหรับกรณีการติดตั้งครีบบลูมทั้งสองด้านค่า $p/e = 10$ ให้ค่า TEF สูงสุดซึ่งอยู่ในช่วง 1.02-1.20

Lanjewar et al. (2011a) ศึกษาด้วยการทดลองการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและค่าของความเสียหายในเครื่องอุ่นอากาศด้วยแสงอาทิตย์ ซึ่งมีครีบบลูม W ติดตั้งบนแผ่นดูดซับความร้อน ซึ่งศึกษาทั้งกรณีครีบบลูม W หันตามการไหลและสวนทางการไหล ค่าพารามิเตอร์ที่ศึกษาคือช่องทางไหลมี

อัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของช่อง (W/H) เท่ากับ 8 ค่า $p/e = 10$ และค่า $e/D = 0.03375$ มุมปะทะอยู่ในช่วง 30° - 75° ศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 2,300-14,000 จากผลการทดลองสรุปได้ว่าครีบริปูรูป W ที่ไปหันตามการไหลและมีมุมปะทะ 60° ให้ค่า TEF ดีที่สุด ซึ่งที่เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 6,000 มีค่า $TEF = 1.98$

Lanjewar et al. (2011b) ศึกษาด้วยการทดลองการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและความเสียหายในเครื่องอุณหอากาศด้วยแสงอาทิตย์ ซึ่งมีครีบริปู W ติดตั้งบนแผ่นดูดซับความร้อน ซึ่งศึกษารณณครีบริปู W หันตามการไหล ค่าพารามิเตอร์ที่ศึกษาคือช่องทางไหลมีอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของช่อง (W/H) เท่ากับ 8 ค่า $p/e = 10$ และค่า $e/D = 0.018$ - 0.03375 มุมปะทะอยู่ในช่วง 30° - 75° ศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 2,300-14,000 จากผลการทดลองสรุปได้ว่าครีบริปู W มีมุมปะทะ 60° ให้ค่า TEF ดีที่สุด และมีค่าสูงสุดของอัตราส่วนเลขนัสเซลท์และตัวประกอบความเสียหายแทนเท่ากับ 2.36 และ 2.01 เท่าของท่อผิวเรียบตามลำดับ

2.1.1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณเชิงตัวเลข

Liou et al. (2002) ได้ศึกษาด้วยการวิเคราะห์เชิงตัวเลขโดยใช้แบบจำลองความเค้นเรย์โนลด์ (Reynolds stress model) ร่วมกับฟังก์ชันของผนัง (wall function) วิเคราะห์การไหลและการถ่ายเทความร้อนในช่องทางการไหลที่มีครีบริปูแยกตัวเรียงเป็นชั้นๆ ในช่องทางไหล 2 มิติ โดยมีอัตราส่วนของความสูงครีบริปูต่อความสูงของช่องทางไหล (e/H) เท่ากับ 0.17 ความกว้างต่อความสูงครีบริปู (s/e) เท่ากับ 0.76, $p/e = 10$ และมีอัตราส่วนของช่องเปิดของครีบริปูที่แยกตัวเป็นชั้นๆ เท่ากับ 0%, 10%, 22%, 32% และ 44% ที่เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 20,000 จากการวิเคราะห์พวกเขาพบว่าครีบริปูที่มีช่องเปิด 44% มีค่า TEF สูงที่สุด

Ooi et al. (2002) ได้ศึกษาด้วยการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของสนามการไหลและการถ่ายเทความร้อนในช่องทางไหล 2 มิติ โดยเปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองความปั่นป่วน 2 -layer k - ϵ , S - A และ v^2 - f ซึ่งเขาได้สรุปว่าแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ k - ϵ ได้ค่าการถ่ายเทความร้อนไม่สอดคล้องกับค่าที่ได้จากการทดลอง ในขณะที่ S - A ให้ค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่า และแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ v^2 - f ให้ค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด แต่มีจุดอ่อนคือ ให้ค่าเลขนัสเซลท์ที่ไม่สอดคล้องกับค่าที่ได้จากการทดลอง ที่บริเวณใกล้ๆ ครีบริปูซึ่งมีการไหลชั้นที่สองเกิดขึ้น

Wong et al. (2003) ได้ศึกษาด้วยการทดลองโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล วัดการกระจายของอุณหภูมิที่ผิวเปรียบเทียบกับค่าการวิเคราะห์เชิงตัวเลข โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ zonal k - ϵ ของการถ่ายเทความร้อนในช่องทางการไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่ติดตั้งครีบริปูหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสยาวต่อเนื่องวางไขว้กันและทำมุมปะทะต่างๆ กับทิศทางการไหล บนผนังด้านล่างซึ่งให้ความร้อนแบบพลักซ์ความร้อนคงที่ โดย $e/D = 0.127$ วิเคราะห์ที่เลขเรย์โนลด์ 12,380 พวกเขาสรุปว่าค่าความเร็วในสนามการไหลที่ได้จากเครื่องมือวัดและจากการคำนวณเชิงตัวเลขมีความสอดคล้องกัน แต่

ค่าการถ่ายเทความร้อนที่ผนังนั้นค่าที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลข สูงกว่าอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองโดยเฉพาะในบริเวณด้านที่เลยกึ่งกลางระหว่างครีบ

Yang and Hwang (2004) ได้ตรวจสอบด้วยการคำนวณเชิงตัวเลขของลักษณะการถ่ายเทความร้อนในท่อหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีครีบยาวต่อเนื่องและครีบบนแยกตัวติดตั้งบนผนังให้ความร้อนเพียงหนึ่งด้าน และพวกเขาสรุปได้ว่าครีบบนแยกตัวให้ลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่าครีบบนต่อเนื่อง

Chaube et al. (2006) ได้ศึกษาด้วยการคำนวณเชิงตัวเลขโดยใช้โปรแกรม *FLUENT 6.1* และเปรียบเทียบผลที่ได้กับการทดลองของ Tanda (2004) ที่มีการไหลผ่านแถวครีบเรียงตัวตามขวางมีค่า $p/e = 13.3$, $p/H = 2$ ที่ $Re = 8,900$ โดยเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ SST $k-\omega$ ซึ่งเหมาะสมกว่าแบบจำลองการไหลแบบอื่นๆ พวกเขาสรุปว่า การวิเคราะห์ด้วยการไหลแบบ 2 มิติ เข้ากับได้ดีกับผลการทดลองเนื่องจากสามารถสะท้อนถึงผลของการไหลชั้นที่สองได้ และในบริเวณระหว่างครีบ ค่าสูงสุดของการถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่และความเข้มของความปั่นป่วนเกิดขึ้นที่จุดตกกระหนาบ และค่าการถ่ายเทความร้อนเริ่มเกิดขึ้นช้าเป็นช่วงทางความร้อนระหว่างครีบตัวที่ 3 และ 4 ซึ่งสอดคล้องกับผลของการทดลอง

Lu and Jiang (2006) ศึกษาการเปรียบเทียบผลการคำนวณเชิงตัวเลขกับการทดลอง ของการไหลและการถ่ายเทความร้อนในช่องทางไหล $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ โดยมีครีบจัดรูปหน้าตัด $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ ยาวต่อเนื่องวางเอียงทำมุมปะทะ 45° บนพื้นผิวให้ความร้อนแบบพลักซ์ความร้อนคงที่บนผนังด้านล่าง ซึ่งในส่วนของทดลองนั้นทำการวัดอุณหภูมิบนพื้นผิวให้ความร้อนโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล โดยมีจุดวัด 8 ตำแหน่ง ดังแสดงรายละเอียดของครีบและจุดวัดอุณหภูมิ และใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ SST $k-\omega$ และ RNG $k-\epsilon$ สำหรับการทำนายผลเชิงตัวเลขพวกเขาพบว่าแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ SST $k-\omega$ มีความสอดคล้องกันดีกับผลการทดลองมากกว่าแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG $k-\epsilon$ และนอกจากนี้พวกเขายังได้วิเคราะห์ด้วยการคำนวณเชิงตัวเลขของการไหลผ่านครีบที่ยาวต่อเนื่องโดยศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงมุมปะทะและระยะห่างระหว่างครีบ ซึ่งพวกเขาได้สรุปว่าครีบที่ทำมุมปะทะ 60° ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดในขณะที่ครีบซึ่งทำมุมปะทะ 0° ให้ค่าความเสียดทานต่ำที่สุด และครีบที่ทำมุมปะทะ 20° ให้ค่า TEF สูงที่สุดในระยะห่างระหว่างครีบ 1-2 mm โดยที่เลขเรย์โนลด์ 5,500 มีค่า TEF สูงที่สุดเท่ากับ 1.55

Ryu et al. (2007) ศึกษาด้วยการคำนวณเชิงตัวเลข โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ $k-\omega$ มีสิ่งที่น่าสนใจคือ สำหรับการวิเคราะห์การไหล 2 มิติ ในเบื้องต้นพวกเขาได้เปรียบเทียบผลการคำนวณเชิงตัวเลขกับค่าที่ได้จากการทดลองจากเอกสารที่พวกเขาใช้อ้างอิง ซึ่งพบว่าสอดคล้องกันดีทั้งสนามการไหลและการถ่ายเทความร้อน และนอกจากนี้พวกเขาได้ศึกษาผลของการไหลและการถ่ายเทความร้อนสำหรับการไหลผ่านครีบที่วางบนผนังด้านล่าง 4 รูปแบบคือ ครีบสี่เหลี่ยมจัตุรัส ครีบสามเหลี่ยมหน้าจั่ว ครีบบรูปครึ่งวงกลม และครีบบรูปไข่ โดยมีความสูงครีบ 20% ของความสูงช่องทาง

ไหล และเปลี่ยนค่า p/e หลายค่า ซึ่งพบว่าที่ค่า $p/e = 10$ ครีบสี่เหลี่ยมจัตุรัสให้ค่าเลขนัสเซลล์ท์และตัวประกอบความเสียดทานสูงที่สุด

Kamali and Binesh (2008) ศึกษาการไหลและการถ่ายเทความร้อนโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ SST $k-\omega$ วิเคราะห์การไหลในท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ซึ่งมีครีบยาวต่อเนื่องวางตั้งฉากกับทิศทางการไหลและมีหน้าตัด 4 รูปทรงคือ สี่เหลี่ยม สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยมคางหมูที่มีด้านสั้นหันไปทางการไหลและตรงข้ามทิศทางการไหล ซึ่งติดตั้งบนพื้นผิวให้ความร้อนเพียงหนึ่งด้านศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 8,000-20,000 จากผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขพวกเขาสังเกตได้ว่าการเปรียบเทียบอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์ที่เกิดจากครีบสี่เหลี่ยมคางหมูที่ด้านสั้นหันไปทางการไหลกับผลการทดลองจากเอกสารที่พวกเขาใช้อ้างอิงนั้นสอดคล้องกันดี ซึ่งกริดเซลล์ที่ใช้มีลักษณะเป็นรูปทรงสามเหลี่ยม และครีบรูปทรงดังกล่าวให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์และค่าตัวประกอบความเสียดทานสูงกว่าครีบรูปทรงอื่น

Sripattanapit and Promvong (2009) แสดงการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนที่มีการไหลแบบราบเรียบ 2 มิติ ในช่องขนานที่ติดตั้งกันรูปเพชรที่ผนังด้านบนและด้านล่างในแนวเอียง มีลักษณะการไหลแบบซ้ำเป็นช่วงโดยใช้เงื่อนไขอุณหภูมิที่ผนังคงที่ ในช่วงเลขเรย์โนลด์ 100-600 พบว่าเมื่อลดมุมที่ยอดรูปเพชรจะทำให้ค่าเลขนัสเซลล์ท์และตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้น และยังพบว่าทุกค่าเลขเรย์โนลด์ที่ใช้มุมยอดเพชรที่ 5° และ 10° ให้ค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะการความร้อนสูงกว่ามุมยอดเพชรที่ 0° (แผ่นกันแบน)

Tian et al. (2009) ศึกษาด้วยการคำนวณเชิงตัวเลขของการไหลและการถ่ายเทความร้อนของการไหลผ่านครีบแบบปีกเล็กรูปสามเหลี่ยมที่ติดตั้งบนพื้นผิวแบบลอนคลื่น ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบ-ท่อ ครีบที่ใช้มีการเรียงของครีบเป็น 3 แถว โดยศึกษาทั้งการเรียงครีบแบบวางตรงกันและเรียงแบบสลับซึ่งแสดง โดยการจำลองการไหลแบบปั่นป่วน 3 มิติและใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG $k-\epsilon$ โดยในเบื้องต้นเข้าได้เปรียบเทียบแบบจำลองการไหล 3 แบบจำลองได้แก่แบบจำลองการไหลแบบราบเรียบ แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ $k-\epsilon$ มาตรฐาน และแบบ RNG $k-\epsilon$ วิเคราะห์การไหลในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบ-ท่อ ที่มีพื้นผิวเป็นลอนคลื่นโดยเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Xin (1994) ซึ่งพวกเขาพบว่าแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG $k-\epsilon$ ให้ผลการทำนายที่ดีที่สุด และจากผลการคำนวณได้แสดงให้เห็นถึงกระแสนวนหลักซึ่งเป็นกระแสนวนตามยาว และกระแสนวนที่มุม (corner vortex) ที่เกิดจากการไหลผ่านปีกเล็ก นอกจากนี้การจัดวางปีกเล็กแบบตรงกันให้ค่าการเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่สูงกว่าวางแบบเอียง

Kumar and Saini (2009) ศึกษาด้วยการคำนวณเชิงตัวเลขของการไหลและการถ่ายเทความร้อน ของการไหลผ่านครีบแบบเส้นลวดโค้งที่วางบนแผ่นให้ความร้อนของเครื่องอุ่นอากาศด้วยแสงอาทิตย์ โดยวิเคราะห์เรขาคณิตของครีบต่อการถ่ายเทความร้อน ค่าตัวประกอบความเสียดทาน และค่า TEF ที่ e/D อยู่ในช่วง 0.0299 ถึง 0.0426 และอัตราส่วนของมุมปะทะ ($\alpha = 90^\circ$) อยู่ในช่วง

0.33 ถึง 0.666 และเลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 6,000 ถึง 18,000 โดยเปรียบเทียบแบบจำลองความปั่นป่วนหลายแบบจำลองกับค่าเลขนัสเซลล์ท์ของท่อผิวเรียบ จากสมการสหพันธ์ของ Dittus-Boelter ซึ่งพบว่าแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG $k-\epsilon$ ให้ค่าใกล้เคียงมากที่สุด และจากผลการคำนวณเชิงตัวเลขพวกเขาสรุปว่า ค่า TEF สูงที่สุดได้เท่ากับ 1.7 สำหรับช่วงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการตรวจสอบ

Karmare and Tikekar (2010) ศึกษาการไหลและการถ่ายเทความร้อนโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ $k-\epsilon$ โดยเทียบกับเงื่อนไขจากการทดลองเดิมของพวกเขาซึ่งได้ทดลองไว้ (Karmare and Tikekar (2007)) พวกเขาพบว่าผลการคำนวณเชิงตัวเลขและผลการทดลองสอดคล้องกันดี และนอกจากนี้พวกเขายังได้วิเคราะห์ด้วยการคำนวณเชิงตัวเลข ของการไหลผ่านครีบนาน้ำตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส หน้าตัดวงกลม และหน้าตัดสามเหลี่ยม และสรุปว่าครีบนาน้ำตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ซึ่งทำมุมปะทะ 58° ให้ค่าสมรรถนะดีที่สุดในที่มีการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน 30%

2.1.2 ครีบริปูตัววี

2.1.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง

Han et al. (1991) พวกเขาได้ศึกษาความดันตกคร่อมและการถ่ายเทความร้อนในช่องทางไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ที่มีการติดตั้งครีบริปูตัววีหลากหลายรูปแบบทั้งผนังด้านบนล่างของพื้นผิวให้ความร้อน ที่มีค่า $p/e = 10$ และอัตราส่วนความสูงครีบริปูตัววีต่อความยาวบ่งลักษณะของท่อ (e/D) เท่ากับ 0.0625 โดยทำการศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 15,000 ถึง 90,000 ซึ่งพบว่าครีบริปูตัววีที่มีมุมปะทะ 45° และ 60° กับทิศทางการไหล ให้การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าครีบริปูตัววีที่ติดตั้งฉากกับทิศทางการไหล

Lau et al. (1991) ตรวจสอบลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่มีการไหลปั่นป่วนในช่องทางไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดตั้งครีบริปูตัววีหลากหลายรูปแบบ และได้แสดงว่าครีบริปูตัววีที่มีมุมปะทะ 60° กับทิศทางการไหลและมีค่า $p/e = 10$ ให้ค่าสมรรถนะทางความร้อนสูงที่สุด

Taslim et al. (1996) ศึกษาพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนจากชุดทดลองจริงโดยใช้ลิควิด คริสตอล เพื่อวิเคราะห์ค่าเลขนัสเซลล์ท์ในแต่ละจุดในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการเพิ่มครีบริปูตัววีและครีบริปูแบบไม่ต่อเนื่อง ที่มีการติดตั้งที่ผนังทั้งสองด้านที่ตรงข้ามกัน ค่าการกระจายตัวของเลขนัสเซลล์ท์ที่ค่าเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 15,500 ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นเนื่องจากการเกิดการไหลชั้นที่สอง (secondary flow) ขณะที่ช่องไหลกระทบกับผนังให้ความร้อน และค่าการถ่ายเทความร้อนลดลงเมื่อเกิดการสลายของการไหลชั้นที่สองที่ผนังของท่อ

Olsson and Sunden (1998) ทำการศึกษาแบบการไหล ความดันตกคร่อม และการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมที่มีครีบริปู ค่าเลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 500-15,000 ค่าอัตราส่วนบ่งลักษณะของท่อสี่เหลี่ยม คือ 1:8 และครีบริปูถูกติดตั้งกับผิวท่อที่อยู่ตรงข้ามกัน พวกเขาทดสอบครีบริปูแบบต่างๆ ซึ่งไม่ว่ากรณีใ้่างบนผิวท่อที่อยู่ตรงข้ามกันคือ ครีบริปูเฉียงวางสลับกัน ครีบริปูเฉียงวางขนานกัน ครีบริปูตัววีวางสลับกัน ครีบริปูตัววีวางขนานกัน และครีบริปูตัววีแบบต่อสลับทิศทางกัน การถ่ายเทความร้อนและความดัน

ตกคร่อม ถูกแสดงด้วยตัวประกอบของการถ่ายเทความร้อนโคลเบิร์น (Colburn) และตัวประกอบความเสียดทานแพนนิ่ง (fanning) จากการทดลองพบว่าครีบริบรูปตัววีวางสลับกันให้ค่าตัวประกอบของการถ่ายเทความร้อนโคลเบิร์น และค่าตัวประกอบความเสียดทานแพนนิ่งมากกว่าครีบริบอื่นๆ ในช่วงเลขเรย์โนลด์ 1,000-2,000

Momin et al (2002) ตรวจสอบด้วยผลการทดลองของการไหลผ่านครีบริบรูปตัววี ต่อการถ่ายเทความร้อนและลักษณะการไหลในท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าของเครื่องอุณหอากาศด้วยแสงอาทิตย์ ศึกษาในช่วงค่าเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 2,500 ถึง 18,000 ค่า e/D อยู่ในช่วง 0.02 ถึง 0.034 มุมปะทะอยู่ในช่วง 30° ถึง 90° และค่า $p/e = 10$ จากผลการทดลองพบว่าค่าสูงสุดของอัตราส่วนตัวเลขนัสเซิลท์ และตัวประกอบเสียดทานเท่ากับ 2.3 และ 2.83 เท่าของท่อผิวเรียบตามลำดับ และเกิดขึ้นที่มุมปะทะ 60° และพวกเขาสรุปว่าครีบริบรูปตัววีให้ค่าสมรรถนะทางความร้อนสูงกว่าครีบริบเอียงที่มีเงื่อนไขการไหลเดียวกัน

Buchlin (2002) ศึกษาด้วยการทดลองการพาความร้อนโดยเน้นศึกษาไปที่ครีบริบแบบเจาะรูเป็นรูปตัววีซึ่งวางบนพื้นผิวให้ความร้อนแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ และใช้ ลิกวิด คริสตอล (thermochromic liquid crystals) กับพื้นผิวทดสอบโดยเปรียบเทียบค่าการถ่ายเทความร้อนกับครีบริบเนื้อที่วางตั้งฉากกับทิศทางการไหล ในช่วงเลขเรย์โนลด์ 30,000 ถึง 60,000 เขาพบว่าครีบริบแบบเจาะรูไม่เกิดจุดร้อน (hot spot) ที่บริเวณด้านหลังครีบริบ ส่งผลให้มีค่าตัวประกอบของการเพิ่มทางความร้อนเฉพาะที่มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 3 และเกิดการไหลพัฒนาอย่างสมบูรณ์ (fully developed flow) หลังจากครีบริบตัวที่ 5 ถึง 6

Ebrahim Momin et al. (2002) ได้ศึกษาด้วยผลการทดลองของการถ่ายเทความร้อนในช่องทางไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีการติดตั้งครีบริบเนื้อที่วางตั้งฉากกับพื้นผิวซึ่งมีฟลักซ์ความร้อนคงที่ พวกเขาทำการทดสอบในช่วงเลขเรย์โนลด์ 2,500-18,000 ซึ่งสอดคล้องกับช่วงทำงานของเครื่องอุณหอากาศด้วยแสงอาทิตย์ ค่า e/D อยู่ในช่วง 0.02-0.034 ค่า $p/e = 10$ และมีมุมปะทะของครีบริบอยู่ในช่วง 30° - 90° โดยใช้เทอร์โมคัปเปิล (thermocouples) สำหรับวัดอุณหภูมิบนพื้นผิวให้ความร้อนซึ่งมีทั้งหมด 10 ตำแหน่ง จากการทดลองพวกเขาสรุปว่าค่าสูงสุดของอัตราส่วนตัวเลขนัสเซิลท์ และค่าตัวประกอบความเสียดทานสูงสุด เกิดขึ้นที่มุมปะทะ 60° ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.30 และ 2.83 เท่าของท่อผิวเรียบตามลำดับ และค่า TEF สูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 1.8 ซึ่งเกิดขึ้นที่ค่า $e/D = 0.034$ และมีมุมปะทะ 60°

Karwa (2003) ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานที่เกิดขึ้นภายในท่อสี่เหลี่ยมที่มีติดตั้งครีบริบด้านเดียว โดยครีบริบที่ทดสอบมีลักษณะเป็นครีบริบตรง ครีบริบเอียง ครีบริบรูปตัววีทั้งในลักษณะยาวต่อเนื่อง และแบบแยกตัว โดยท่อที่ทดสอบมีอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงเท่ากับ 7.19 ถึง 7.75 อัตราส่วนความสูงครีบริบต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก เท่ากับ 0.0476 และ 0.050 โดยการคำนวณค่าตัวประกอบการถ่ายเทความร้อนและอัตราส่วนระยะห่างระหว่างครีบริบต่อความสูงครีบริบเท่ากับ 10 โดยครีบริบรูปตัววีที่ทดสอบเป็นครีบริบรูปตัววีทำมุม 60° และครีบริบเอียง โดยทำการทดลองในช่วงค่าเลขเรย์โนลด์ $Re = 2,800$ - $15,000$ และ

ความร้อนที่ให้กับท่อสี่เหลี่ยมเป็นแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ รูปแบบครีบบนภายในท่อสี่เหลี่ยม จากผลการทดลองพบว่า แผ่นครีบบรูปตัววียาวต่อเนื่องทำให้เกิดค่าตัวประกอบเสียดทานมากที่สุด และมีค่ามากกว่าแผ่นเรียบประมาณ 3.40 ถึง 3.92 เท่า ส่วนแผ่นครีบบรูปตัววีชนิดยาวไม่ต่อเนื่องมีค่าตัวประกอบความเสียดทานน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับแผ่นครีบลักษณะต่างๆ และมีค่ามากกว่าแผ่นเรียบประมาณ 2.35 ถึง 2.47 เท่า ในขณะที่ค่าเลขสแตนตัน (Stanton number, St) สำหรับแผ่นครีบบรูปตัววีมีทิศทางการไหลตรงข้ามกับการไหล จะมีแนวโน้มมากที่สุดคือ 2.10 ถึง 2.47 เท่า เมื่อเทียบกับแผ่นเรียบและครีบบรูปตัววีที่วางตั้งฉากกับการไหลมีค่า St น้อยที่สุด

Tanda (2004) ได้ตรวจสอบด้วยการทดลองผลของการถ่ายเทความร้อน ในช่องทางไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีอัตราส่วนด้านยาวต่อด้านกว้างเท่ากับ 5 ซึ่งมีการติดตั้งครีบบที่มีลักษณะการวางที่แตกต่างกันคือ ครีบบต่อเนื่องและครีบบแบบแยกตัวที่วางตั้งฉากกับทิศทางการไหล ครีบบรูปตัววีแบบแยกตัวที่ทำมุมปะทะ 45° และ 60° บนพื้นผิวด้านล่างและให้ความร้อนแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่โดยมีค่า $p/e = 8$ และ 13 ทำการศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 8,900 ถึง 36,000 วัดค่าการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้ ลิควิด คริสตอล ซึ่งเป็นการแสดงค่าด้วยแผนภาพการกระจายเลขนัสเซลที่บนพื้นผิวให้ความร้อนที่ค่อนข้างละเอียด เขาสรุปว่าการกระจายตัวของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างครีบบ สัมพันธ์กันอย่างมากกับรูปร่าง และเรขาคณิตของครีบบ ค่าสูงสุดสัมพัทธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนอยู่ที่ด้านท้ายกระแสน้ำของแต่ละครีบบ ในบริเวณการไหลตกกลับสู่พื้นผิว โดยภาพรวมแล้วรูปแบบครีบบที่ใช้ศึกษาให้ค่าสมรรถนะทางความร้อน (TEF) อยู่ในช่วง 1.0 ถึง 1.6 และครีบบรูปตัววีแบบแยกตัวให้ค่าสมรรถนะทางความร้อนสูงกว่าครีบบแบบต่อเนื่อง

Wang et al. (2007) ทำการทดลองเพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนและความดันตกคร่อมของการไหลในช่องทางไหลหน้าตัดแคบขนาด $40 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$ และยาว 940 mm ซึ่งมีตัวสร้างการไหลหมุนวนตามยาวมีลักษณะเป็นครีบบขนาด $10 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 1.1 \text{ mm}$ วางเป็นรูปตัววีแยกตัวและทำมุมปะทะ 50° กับทิศทางการไหล ซึ่งศึกษาอิทธิพลของการจัดวางครีบบบนผนังให้ความร้อนเพียงด้านเดียว และ 2 ด้าน ศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 3,000 ถึง 20,000 จากการทดลองพวกเขาสรุปว่าการวางครีบบบนผนังให้ความร้อนทั้ง 2 ด้าน ให้ค่าสมรรถนะของการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าการจัดวางครีบบเพียงด้านเดียว

Gupta et al. (2008) ได้ศึกษาเชิงทดลองของการวัดการกระจายค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉพาะที่ ที่มีกรไหลในช่องทางไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสซึ่งติดตั้งครีบบที่ทำจากแผ่นกระจกทนความร้อน (Plexiglas) หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสติดตั้งที่ผนังด้านบนและด้านล่าง มีการให้ความร้อนแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ ซึ่งจำลองเป็นช่องหล่อเย็นของใบกังหันก๊าซ ศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 10,000-30,000 ลักษณะครีบบที่ใช้ศึกษาประกอบด้วย ครีบบยาวต่อเนื่องและรูปพื้นเลื่อยทำมุมปะทะ 90° กับทิศทางการไหล และครีบบรูปตัววีแบบแยกตัวทำมุมปะทะ 60° กับทิศทางการไหล ซึ่งมีการคำนวณค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ที่ใช้ศึกษา โดยใช้วิธีการถ่ายภาพรังสีอินฟราเรด (infrared thermography technique) วัดค่าการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวให้ความร้อนและแสดงในรูปแบบ

เส้นชั้น (contour plots) ซึ่งให้ค่าที่ค่อนข้างละเอียด จากผลการทดลองพวกเขาสรุปว่าการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนจากครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัวให้ค่าสูงกว่าครีบริบยาวต่อเนื่องและรูปพื้นเลื้อย

Lee and Rhee (2009) ศึกษาด้วยการทดลองเกี่ยวกับรูปแบบการไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมที่มีครีบริบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสรูปตัววีติดตั้งที่ผิวทำมุมปะทะ 60° แบบครีบริบเดี่ยวต่อเนื่อง และครีบริบรูปตัววีทำมุม 45° หลายครีบริบวางสลับแถว รูปแบบครีบริบ โดยเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (D) เท่ากับ 75, 50, 38.4 ค่าอัตราส่วนบังคับลักษณะของช่องทางไหลเท่ากับ 3, 5, 6.8 ค่า e/D เท่ากับ 0.04, 0.06, 0.078 และค่า $p/e = 10$ โดยใช้เนฟธาซีนบริสุทธ์ (naphthalene sublimation) สำหรับวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและแสดงในรูปแบบของเส้นชั้น ผลการทดลองพบว่าครีบริบรูปตัววีทำมุม 60° แบบครีบริบเดี่ยวต่อเนื่องให้การถ่ายเทความร้อนมากกว่าครีบริบรูปตัววีทำมุม 45° แบบหลายครีบริบวางสลับแถว และการใช้กำลังงานของปั๊มสำหรับการไหลผ่านครีบริบรูปตัววีมุม 45° แบบหลายครีบริบวางสลับแถวจะใช้น้อยกว่าครีบริบรูปตัววีมุม 60° แบบครีบริบเดี่ยวต่อเนื่อง

SriHarsha et al. (2009) ได้ศึกษาเชิงทดลองซึ่งเป็นงานที่ต่อเนื่องจากงานของ Gupta et al. (2008) โดยศึกษาอิทธิพลของ e/D ที่มีผลต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ซึ่งลักษณะครีบริบที่ใช้ทดลองประกอบด้วย ครีบริบยาวต่อเนื่องทำมุมปะทะ 90° กับทิศทางการไหลและครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัวทำมุมปะทะ 60° กับทิศทางการไหลที่มีการยกตัวและติดกับผนัง ที่ค่า $p/e = 10$ จากผลการทดลองพวกเขาสรุปว่า สำหรับครีบริบยาวต่อเนื่องทำมุมปะทะ 90° กับทิศทางการไหล การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามค่า e/D และการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนจากครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัวให้ค่าสูงกว่าครีบริบยาวต่อเนื่อง ในขณะที่ครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัวและมีการยกตัว ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนซึ่งสังเกตได้ว่าไม่แตกต่างกันกับกรณีไม่ยกตัว

Singh et al. (2011) ศึกษาด้วยการทดลองการถ่ายเทความร้อนที่ผิวให้ความร้อนหนึ่งด้านแบบปลั๊กความร้อนคงที่ ซึ่งมีครีบริบหน้าตัดวงกลมติดตั้งอยู่ในช่องทางไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยมีการจัดเรียง ค่า p/e อยู่ในช่วง 4-12 ค่า e/D อยู่ในช่วง 0.015-0.043 ครีบริบที่ใช้ศึกษาทำมุมปะทะ (α) 30° - 75° กับทิศทางการไหลซึ่งพวกเขาศึกษาอิทธิพลของความกว้างช่องเปิดครีบริบสัมพันธ์ (g/e) และตำแหน่งของช่องเปิด (d/w) ในช่วง 0.5-2 และ 0.2-0.8 ตามลำดับ ศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 3,000-18,000 จากผลการทดลองสรุปได้ว่าค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์และตัวประกอบความเสียหายอยู่ในช่วง 3.04 และ 3.11 เท่าของท่อผิวเรียบตามลำดับ และค่าพารามิเตอร์ที่ให้ค่าตัวเลขนัสเซิลท์และตัวประกอบความเสียหายสูงสุดคือ $d/w = 0.65$, $g/e = 1.0$, $p/e = 8$, $\alpha = 60^\circ$, และ $e/D = 0.043$

2.1.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณเชิงตัวเลข

เอกสารนี้เป็นเอกสาร Kim and Lee (2007) ได้นำเสนอด้วยผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการไหลแบบปั่นป่วนและการถ่ายเทความร้อนเพื่อวิเคราะห์เพื่อวิเคราะห์ค่าที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการออกแบบช่องทางไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ที่มีการติดตั้งครีบริบรูปตัววีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ผนังด้านบนและด้านล่าง

Peng et al. (2011) ศึกษาเปรียบเทียบผลการคำนวณเชิงตัวเลขกับการทดลองของการไหล และการถ่ายเทความร้อนในช่องทางไหลขนาด $150 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 11 \text{ mm}$ โดยมีครีบบสูง 1 mm และระยะห่างระหว่างครีบบ 10 mm วางบนพื้นผิวให้ความร้อนแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่บนผนังด้านล่าง ซึ่งครีบบที่ใช้ศึกษาประกอบด้วย ครีบบทำมุมปะทะ 90° กับทิศทางการไหลทั้งแบบต่อเนื่องและแบบแยกตัว ครีบบรูปตัววีทำมุมปะทะ 45° ทั้งแบบต่อเนื่องและแบบแยกตัว และครีบบรูปตัววีทำมุมปะทะ 60° ทั้งแบบต่อเนื่องและแบบแยกตัว ซึ่งในส่วนของ การทดลองนั้นทำการวัดการอุณหภูมิบนพื้นผิวให้ความร้อนโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล เปรียบเทียบกับภาพถ่ายจากกล้องอินฟราเรด สำหรับการคำนวณผลเชิงตัวเลขใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ SST $k-\omega$ จากการวิเคราะห์พบว่าค่าตัวเลขนี้สเกลที่ได้จากการแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ SST $k-\omega$ มีความสอดคล้องกันดีกับผลการทดลองที่ให้ค่า TEF สูงกว่าครีบบยาวต่อเนื่องทำมุมปะทะ 90° ซึ่งครีบบรูปตัววียาวต่อเนื่องทำมุมปะทะ 45° ให้ค่า TEF สูงที่สุดซึ่งให้ค่ามากที่สุดประมาณ 1.5 ในช่วงเลขเรย์โนลด์ $10,000-40,000$

จะเห็นว่ามีความวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาเกี่ยวข้องกับ การไหล และการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของการไหลผ่านครีบบซึ่งมีการจัดวางในรูปแบบต่างๆ โดยให้ความสนใจกับลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากอิทธิพลของความสูงครีบบ มุมปะทะ และอัตราส่วนระยะห่างระหว่างครีบบ ซึ่งมีทั้งกรณีครีบบยาวต่อเนื่องและตั้งฉากกับทิศทางการไหล ครีบบยาวต่อเนื่องวางเอียง ครีบบรูปตัววีซึ่งมีทั้งกรณีครีบบยาวต่อเนื่องและแบบแยกตัว ซึ่งมีทั้งในส่วนของ การทดลองและการวิเคราะห์เชิงตัวเลขโดยภาพรวม นั้นสังเกตเห็นว่าครีบบรูปตัววีทั้งแบบต่อเนื่องและแบบแยกตัว ที่ทำมุมปะทะค่าต่างๆ กับทิศทางการไหลและติดตั้งบนพื้นผิวให้ความร้อนนั้น ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบของการเพิ่มทางความร้อนสูงกว่าครีบบรูปแบบอื่น และนอกจากนี้ในส่วนของ การวิเคราะห์เชิงตัวเลขที่มีการไหลแบบปั่นป่วนนั้น แบบจำลองความปั่นป่วนที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์การไหลและการถ่ายเทความร้อน มี 2 แบบจำลองที่เป็นที่นิยมกันในปัจจุบันคือ RNG $k-\epsilon$ และ SST $k-\omega$

แต่สำหรับการศึกษาเพิ่มการถ่ายเทความร้อน และการไหลปั่นป่วนผ่านครีบบางรูปตัววีแบบแยกตัว ซึ่งติดตั้งที่ผนังด้านบนและด้านล่างของพื้นผิวให้ความร้อนแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ในช่องทางไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ของกรณีการไหลแบบเข้าเป็นช่วงของความเร็วมืดและการถ่ายเทความร้อน ซึ่งเกิดขึ้นในบริเวณการไหลที่พัฒนาอย่างสมบูรณ์ ยังพบว่ามี การศึกษาน้อยมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งกับการใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นที่การนำครีบบรูปตัววีมาช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในช่องทางไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วนที่เหมาะสม เพื่อทำความเข้าใจถึงกลไกการไหลจากสนามการไหลที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อน และความดันตกคร่อม ซึ่งได้รับอิทธิพลจากตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ศึกษา ได้แก่ รูปทรงของครีบบ ระยะห่างระหว่างครีบบ มุมปะทะ และลักษณะการจัดเรียงครีบบ เพื่อนำไปสู่การหาค่า TEF ที่มีค่าสูงสุด และเหมาะสม และในท้ายที่สุดสามารถนำไปออกแบบสำหรับการใช้งานจริงได้ต่อไป

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

สมการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับการควบคุมการเคลื่อนที่ของของไหล และสมการพลังงานเพื่อวิเคราะห์ปัญหาของการไหลแบบปั่นป่วน โดยใช้ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม หรือไฟไนต์วอลุ่ม ซึ่งเป็นระเบียบวิธีที่มีอยู่ในซอฟต์แวร์ที่จำหน่ายกันอยู่ในระดับสากลและเป็นที่ยอมรับใช้กันมากในปัจจุบัน โดยสามารถนำมาใช้วิเคราะห์ปัญหาการไหลผ่านรูปทรงที่มีความซับซ้อนได้ดี

3.1 สมมุติฐานของการไหลและสมการควบคุม

การคำนวณเชิงตัวเลขของการไหลและการถ่ายเทความร้อน ที่มีการติดตั้งครีบบนพื้นผิวให้ความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีสมมุติฐานของการไหลดังนี้

- (1) เป็นการไหลแบบปั่นป่วนและอัดตัวไม่ได้
- (2) การไหลและการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบคงตัว 3 มิติ
- (3) สมบัติต่างๆ ของของไหลมีค่าคงที่
- (4) ไม่พิจารณาแรงวัตถุและการแพร่เนื่องจากความหนืด
- (5) ไม่พิจารณาการแผ่รังสีความร้อน

ภายใต้สมมุติฐานดังกล่าว สมการควบคุมการไหลประกอบไปด้วยสมการความต่อเนื่อง สมการโมเมนตัม (หรือเรียกว่า สมการนาเวียร์-สโตกส์) และสมการพลังงาน เมื่อพิจารณาภายใต้สมมุติฐานข้างต้น สมการดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังนี้

สมการความต่อเนื่อง (Continuity equation)

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (3.1)$$

สมการโมเมนตัม (Momentum equation)

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (3.2)$$

สมการพลังงาน (Energy equation)

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (3.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ เมื่อ Γ คือ สัมประสิทธิ์การแพร่เชิงความร้อน ซึ่งกำหนดโดย $\Gamma = \mu/Pr$ เอกสารทุกครั้งที่มีการแก้ไข (3.4)

กลุ่มสมการควบคุมการไหลข้างต้นเมื่อใช้ร่วมกับเงื่อนไขของที่เหมาะสม สามารถนำไปวิเคราะห์การไหลแบบราบเรียบได้ แต่ถ้านำสมการควบคุมดังกล่าวมาวิเคราะห์ปัญหาที่มีการไหลแบบปั่นป่วนจะก่อให้เกิดความยุ่งยากในการวิเคราะห์ เนื่องจากลักษณะเฉพาะตัวของการไหลแบบปั่นป่วนนั้นมีความซับซ้อนอย่างสูง ดังนั้นในส่วนถัดไปจะนำเสนอสมการของแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG $k - \varepsilon$ ซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีความเหมาะสมสำหรับการนำมาใช้คำนวณเชิงตัวเลข

3.1.1 แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG $k - \varepsilon$

แบบจำลองความปั่นป่วนสำหรับการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการไหลผ่านครีบริบตัววี ได้แก่ Renormalization group (RNG) $k - \varepsilon$ model ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \mu_t S^2 - \rho \varepsilon \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \mu_t S^2 - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon \quad (3.6)$$

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta / \eta_0) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \quad (3.7)$$

$$\text{เมื่อ } \eta = \frac{Sk}{\varepsilon}, \eta_0 = 4.38, C_{1\varepsilon} = 1.42, C_{2\varepsilon} = 1.68$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, C_\mu = 0.0845, \alpha_k \approx \alpha_\varepsilon \approx 1.393$$

3.2 การไหลแบบภายในและการถ่ายเทความร้อน

การไหลแบบภายใน เช่น การไหลในช่องทางไหล หรือการไหลในท่อที่มีหน้าตัดรูปแบบต่างๆ มีเนื้อหาพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการไหลแบบปั่นป่วนและการถ่ายเทความร้อนดังนี้

3.2.1 สภาวะการไหล

การไหลแบบภายในเช่น การไหลในท่อ มีขอบเขตจำกัดโดยที่ความหนาของชั้นขีดผิวไม่สามารถเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ได้ เนื่องจากเมื่อไหลไปได้ระยะหนึ่งชั้นขีดผิวจะก่อตัวเต็มหน้าตัดการไหลรูปร่างของความเร็วมักจะมีลักษณะชัดเจนแน่นอนไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งเรียกว่าการไหลพัฒนาอย่างสมบูรณ์ (fully developed flow) สำหรับช่วงการไหลก่อนหน้านั้นเรียกว่าการไหลที่กำลังปรับตัว (developing flow) และเรียกระยะการไหลที่กำลังปรับตัวว่าความยาวขาเข้า, L_e (hydrodynamic entrance length)

สำหรับการไหลภายในนั้น เลขเรย์โนลด์สำหรับการไหลกำหนดโดย

$$Re = \frac{\rho u_0 D}{\mu} \quad (3.8)$$

เมื่อ u_0 เป็นความเร็วเฉลี่ยภายในท่อ และ D คือความยาวบ่งลักษณะของช่องทางไหลหรือเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (hydraulic diameter) มีนิยามเป็น

$$D = \frac{4A_c}{P} \quad (3.9)$$

เมื่อ A_c และ P เป็นพื้นที่หน้าตัดและเส้นรอบรูปของหน้าตัด ตามลำดับ

โดยทั่วไปสำหรับการไหลในท่อผิวเรียบ เลขเรย์โนลด์วิกฤติของการเปลี่ยนแปลงไปเป็นการไหลแบบปั่นป่วน เริ่มต้นจาก $Re_D > 4000$ และความยาวของช่วงบริเวณทางเข้าสำหรับการปรับตัวหาได้จากสมการ

$$\left(\frac{L_e}{D}\right)_{\text{turb}} \approx 4.4 Re_D^{1/6} \quad (3.10)$$

3.2.2 ตัวประกอบความเสียดทาน

ตัวประกอบความเสียดทาน (Friction Factor : f) จะพิจารณาจากความดันลดลงของของไหลที่ไหลภายใน โดยเราจะใช้ ตัวประกอบความเสียดทานของ Moody (หรือ Darcy) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ไร้มิติ โดยมีนิยามดังนี้

$$f = \frac{\Delta P D}{L \rho u_m^2 / 2} \quad (3.11)$$

3.2.3 สภาวะการถ่ายเทความร้อน

ถ้าของไหลที่มีอุณหภูมิสม่ำเสมอไหลเข้าไปในท่อโดยมีอุณหภูมิแตกต่างจากอุณหภูมิที่ผิวแล้ว การพาความร้อนจะเกิดขึ้นและชั้นขีดผิวของความร้อนจะเริ่มก่อตัวขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าสภาวะที่ผิวของท่อคงที่โดยอาจเป็นอุณหภูมิผิว, T_s คงที่ หรือฟลักซ์ความร้อนที่ผิว, q_s คงที่ สภาวะพัฒนาอย่างสมบูรณ์เชิงความร้อน (thermally fully developed condition)

เอกสารนี้เป็นเอกสารสำหรับการไหลแบบราบเรียบ ถ้า $Pr > 1$ การพัฒนาชั้นขีดผิวเชิงความร้อนจะช้ากว่าการถ่ายเทความร้อนที่ผิว และกลับกันถ้า $Pr < 1$ และสำหรับอากาศการพัฒนาชั้นขีดผิวเชิงความร้อนจะเร็วกว่าการถ่ายเทความร้อนที่ผิว

และชั้นขีดผิวเชิงความร้อนจะใกล้เคียงกัน และจากการทดลองสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนเงื่อนไขทั้งสองเกือบจะเป็นอิสระไม่ขึ้นกับ Pr ซึ่งอาจจะประมาณได้ว่า $L_{e,th}/D \approx 10$

ฟลักซ์ความร้อน (q_s'') ระหว่างของไหลกับผิวท่อที่จุดใดๆ หาได้จากกฎเย็นตัวของนิวตัน

$$q_s'' = h(T_s - T_m) \quad (3.12)$$

โดยที่ T_s คืออุณหภูมิพื้นผิว

T_m คืออุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลที่หน้าตัดของช่องทางไหล

ฟลักซ์ความร้อนนี้จะสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่แตกต่างรวมทั้งหดรระหว่างผนังกับของไหล ซึ่งคือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้วยการพาบางครั้งเรียกว่าการนำผ่านฟิล์ม เพราะความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นกระบวนการนำความร้อนในชั้นบางๆ ของของไหลที่บริเวณผิวของผนัง ค่า T_m จะเปลี่ยนแปลงไปตามทิศทางการไหลนั่นคือ dT_m/dx จะไม่เป็นศูนย์ถ้ามีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้น ค่าของ T_m จะเพิ่มขึ้นไปตามระยะทางการไหล, x ถ้ามีการถ่ายเทความร้อนจากผิวสู่ของไหล

3.2.4 สถานะการพัฒนารูปแบบสมบูรณ์เชิงความร้อน

เนื่องจากการพาความร้อนเกิดขึ้นจริงระหว่างผิวและของไหล นั่นคืออุณหภูมิของของไหลต้องเปลี่ยนแปลงตามระยะ x ซึ่งสถานะการปรับตัวอย่างสมบูรณ์แล้วของอุณหภูมิจะไม่เคยเกิดขึ้นเลย ปรัชญาการนี้จะต้องจัดรูปใหม่ให้อยู่ในรูปไร้มิติของอุณหภูมิ เพื่อให้ได้เงื่อนไขของสถานะการพัฒนารูปแบบสมบูรณ์เชิงความร้อน

เมื่อกำหนดค่าความแตกต่างอุณหภูมิไร้มิติในรูป $(T_s - T)/(T_s - T_m)$ ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่มีอยู่จริง อัตราส่วนนี้จะเป็นอิสระกับ x นั่นคือถึงแม้ว่า T ยังคงเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องกับ x แต่ค่าสมบูรณ์เชิงความร้อน (thermally fully developed) และจะได้ว่า

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{T_s - T}{T_s - T_m} \right] = 0 \quad (3.13)$$

โดยที่ T คืออุณหภูมิของไหลที่ตำแหน่งใดๆ

เงื่อนไขที่กำหนดให้สำหรับสมการ (3.13) ซึ่งจะเกิดขึ้นในช่องทางไหลอาจจะเป็นกรณี q_s'' คงที่ ส่วนกรณี T_s คงที่ก็ได้ เงื่อนไขที่ผิวแบบนี้เกิดขึ้นมากในทางวิศวกรรม เช่น ผนังท่อซึ่งได้รับความร้อนจากไฟฟ้าหรือผิวภายนอกที่ได้รับจากการแผ่รังสีอย่างสม่ำเสมอจะเป็นกรณีของ q_s'' คงที่ ส่วนกรณี T_s คงที่จะเกิดขึ้นถ้ามีการเปลี่ยนสถานะ (เนื่องจากการเดือดหรือควบแน่น) เกิดขึ้นที่ผิวภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานเพื่อการศึกษาร่วมกันโดยไม่เอารัดเอาเปรียบในเชิงพาณิชย์ การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.5 สมรรถนะเชิงความร้อน (Thermal enhancement factor)

สมรรถนะเชิงความร้อนหรือค่าสมรรถนะของการเพิ่มขึ้นทางความร้อน, TEF ซึ่งคำนวณได้จาก

$$TEF = \frac{(Nu/Nu_0)}{(f/f_0)^{1/3}} \quad (3.14)$$

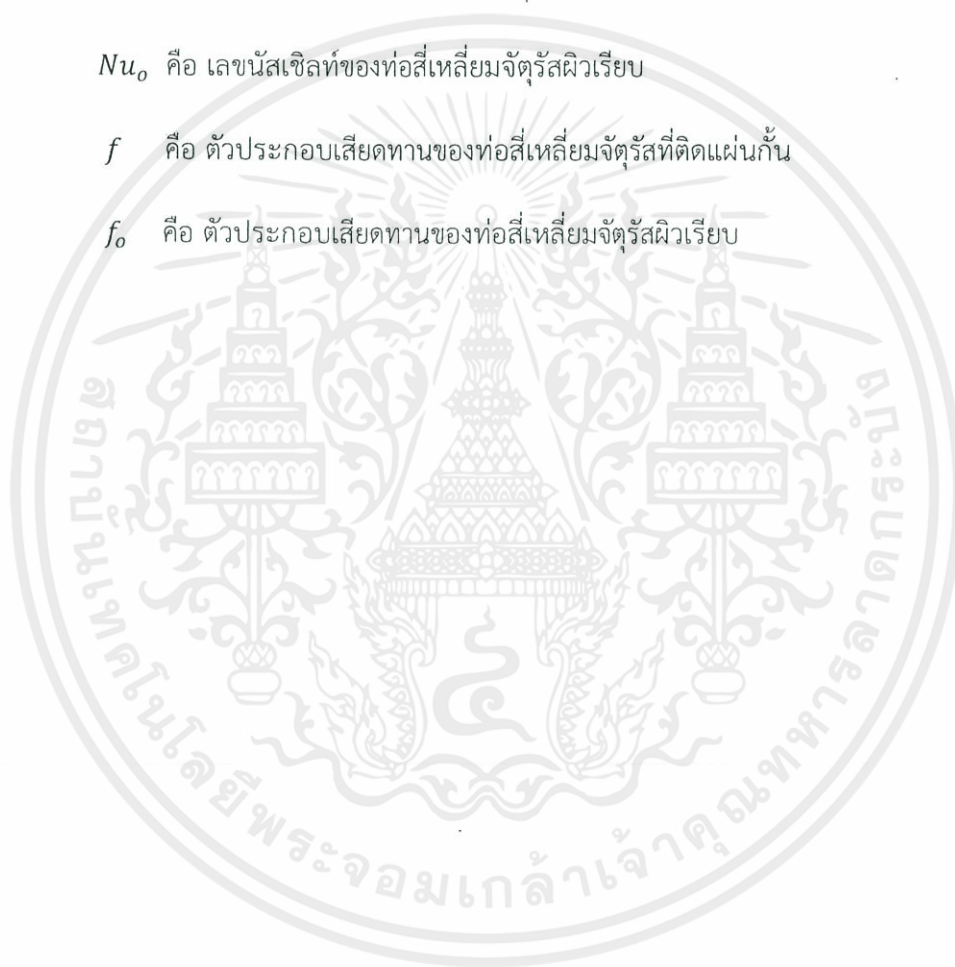
โดยที่ TEF คือ ค่าสมรรถนะของการเพิ่มขึ้นทางความร้อน

Nu คือ เลขนัสเซิลท์ของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ติดแผ่นกัน

Nu_0 คือ เลขนัสเซิลท์ของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบ

f คือ ตัวประกอบเสียดทานของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ติดแผ่นกัน

f_0 คือ ตัวประกอบเสียดทานของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

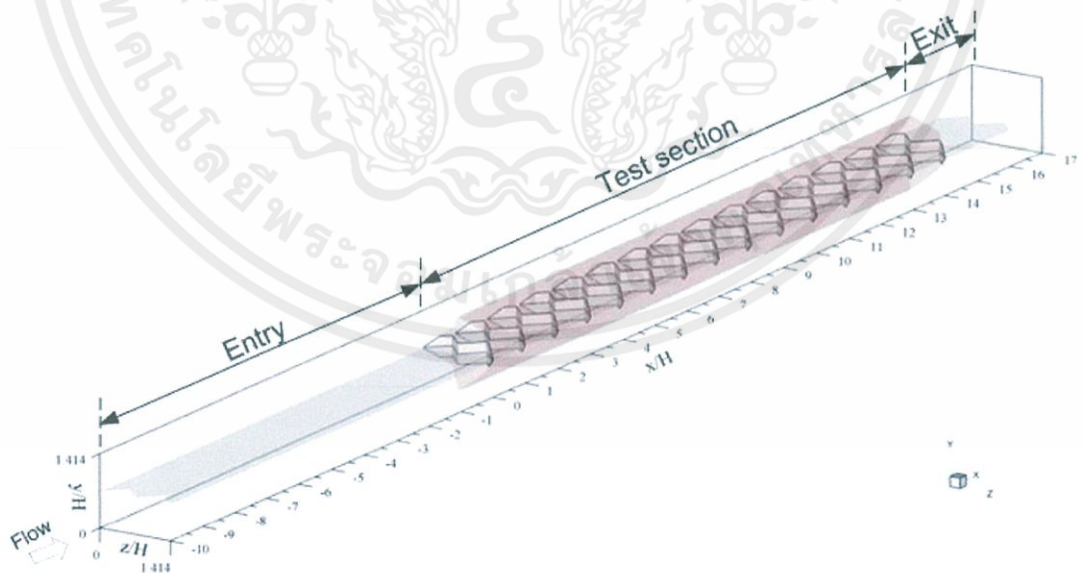
การกำหนดปัญหาและตรวจสอบผลการคำนวณ

4.1 บทนำ

ในบทนี้เป็นการกำหนดลักษณะของปัญหาที่ใช้สำหรับทำการวิจัยรวมทั้งทำการตรวจสอบโปรแกรมที่ใช้กับผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact Solution) ซึ่งมีลักษณะของปัญหาที่ใช้ในการจำลองการถ่ายเทความร้อน ที่เป็นท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใส่แผ่นบางติดครีบริบรูปตัววีคู่

4.2 การกำหนดลักษณะของปัญหาที่ใช้ในการวิจัย

งานวิจัยนี้เราศึกษาแผ่นบางติดครีบริบรูปตัววีคู่ภายในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยใส่แผ่นบางติดครีบริบรูปตัววีคู่ โดยทำมุมปะทะ $\alpha = 45^\circ$ และ 60° ตามลำดับ ขนาดความสูงของครีบริบรูปตัววีคู่มีค่า $BR = 0.05, 0.10, 0.15, 0.20$ และ 0.25 ตามลำดับ ระยะห่างของครีบริบรูปตัววีคู่ $PR = 1$ ขนาดความสูงของท่อหน้าตัดจัตุรัสที่ใช้ในการจำลองนี้มีค่า $H = 0.05$ m และมี 26 module ซึ่งแบ่งเป็น ท่อเปล่าที่ทางเข้า 10 module และ แผ่นบางติดครีบริบรูปตัววีคู่ 14 module และสุดท้ายทางออก 2 module ซึ่งพิจารณาการไหลเป็นแบบ periodic ที่ทางเข้าและทางออก โดยแบ่งทิศทางการไหลเป็นแบบ double V-downstream ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ ในกรณีศึกษาต่างๆ ได้แสดงในตารางที่ 4.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น รูปที่ 4.1 แบบจำลองสามมิติของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใส่แผ่นบางติดครีบริบรูปตัววีคู่

ตารางที่ 4.1 ลักษณะของกรณีศึกษา โดยมีทิศทางการไหลเป็นแบบ double V-downstream แสดงได้ดังนี้

แบบปลายตัววีชี้ตามกระแสการไหล double V-downstream	
กรณีศึกษา	มุม $\alpha = 30^\circ$
	$e/H, BR$
กรณีที่ 1	0.05
กรณีที่ 2	0.10
กรณีที่ 3	0.15
กรณีที่ 4	0.20
กรณีที่ 5	0.25
มุม $\alpha = 45^\circ$	
$e/H, BR$	
กรณีที่ 6	0.05
กรณีที่ 7	0.10
กรณีที่ 8	0.15
กรณีที่ 9	0.20
กรณีที่ 10	0.25

4.3 ค่าเงื่อนไขขอบเขตในการคำนวณการไหลสามมิติ

สำหรับการคำนวณในสามมิติ ได้ใช้ค่าเงื่อนไขขอบเขตดังต่อไปนี้

- (1) สภาวะทางเข้าและทางออกเป็นแบบ Periodic Translation โดยทางเข้าเป็น mass flow inlet และทางออกเป็น pressure outlet อากาศไหลเข้าด้วยอัตราการไหลเชิงมวลอย่างสม่ำเสมอ และมีค่าเลขพลาตัน นัมเบอร์ (Prandtl number, Pr) คงที่เท่ากับ 0.707
- (2) กำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ผนังความเร็วมีค่าเท่ากับศูนย์ (No slip condition) เป็นผนังที่อยู่กับที่ (Stationary wall)
- (3) กำหนดให้ที่ผิวของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่เท่ากับ 600 w/m^2
- (4) กำหนดให้ครีปที่ไซในการทดลองเป็นผนังไม่มีการถ่ายเทความร้อน
- (5) กำหนดให้ที่ผนังทุกด้านของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีอุณหภูมิที่ผิวคงที่ 310 K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม

Promvong and Changcharoen, (2011). ได้ศึกษาความถูกต้องของโปรแกรมโดยวิเคราะห์การไหลในช่วงเลขเรย์โนลด์ 10,000 ถึง 25,000 และนำผลการคำนวณมาเปรียบเทียบกับสมการสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter และ Blasius ซึ่งมีแสดงไว้ใน Incropera and Dewitt (1996) เพื่อวิเคราะห์ค่าของเลขนัสเซิลท์ และค่าตัวประกอบความเสียดทาน

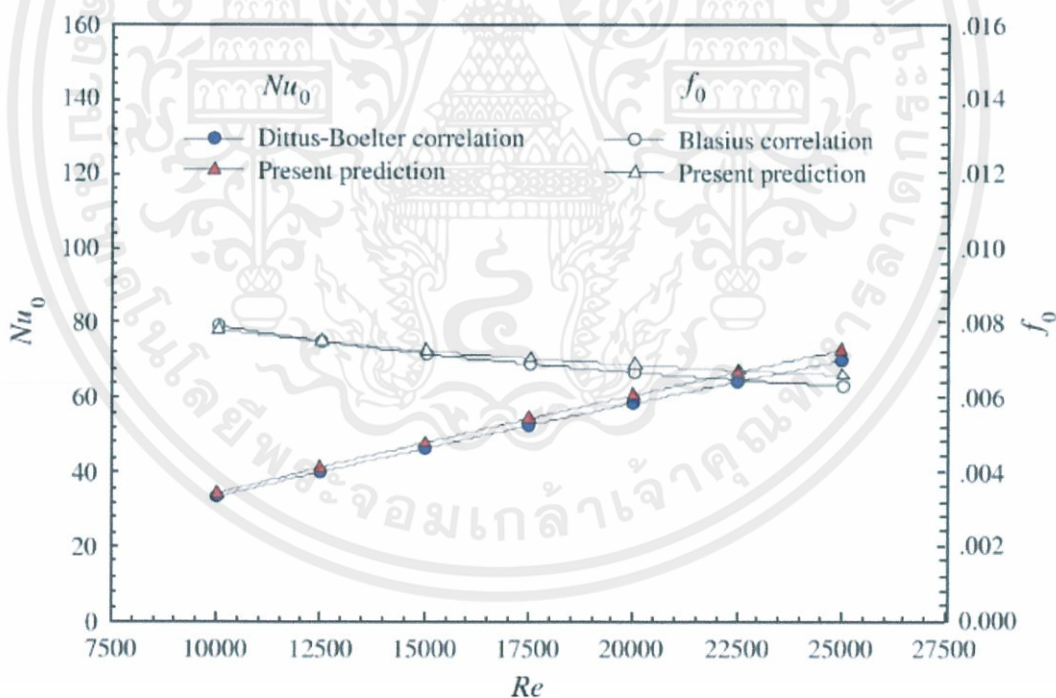
สมการสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter แสดงได้ดังนี้

$$Nu_0 = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} \quad \text{สำหรับ } Re \geq 10,000 \quad (4.1)$$

สมการสหสัมพันธ์ของ Blasius แสดงได้ดังนี้

$$f_0 = 0.079Re^{-0.25} \quad \text{เมื่อ } Re \leq 20,000 \quad (4.2)$$

$$f_0 = 0.046Re^{-0.20} \quad \text{เมื่อ } Re > 20,000 \quad (4.3)$$



รูปที่ 4.2 ค่าเลขนัสเซิลท์เฉลี่ยและตัวประกอบความเสียดทานของการถ่ายเทความร้อนในท่อผิวเรียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ผลการเปรียบเทียบดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.2 ซึ่งสังเกตได้ว่าแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG $k-\epsilon$ สอดคล้องกันดีกับสมการสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter และของ Blasius ที่เลขเรย์โนลด์

25,000 ค่าของเลขนัยเชิงตัวเลขและตัวประกอบความเสียดทาน ซึ่งให้ค่าคลาดเคลื่อนสูงสุดเท่ากับ $\pm 4.8\%$ และ $\pm 5.3\%$ ตามลำดับ

4.5 การตรวจสอบความเป็นอิสระของผลเฉลยจากจำนวนกริดเซลล์

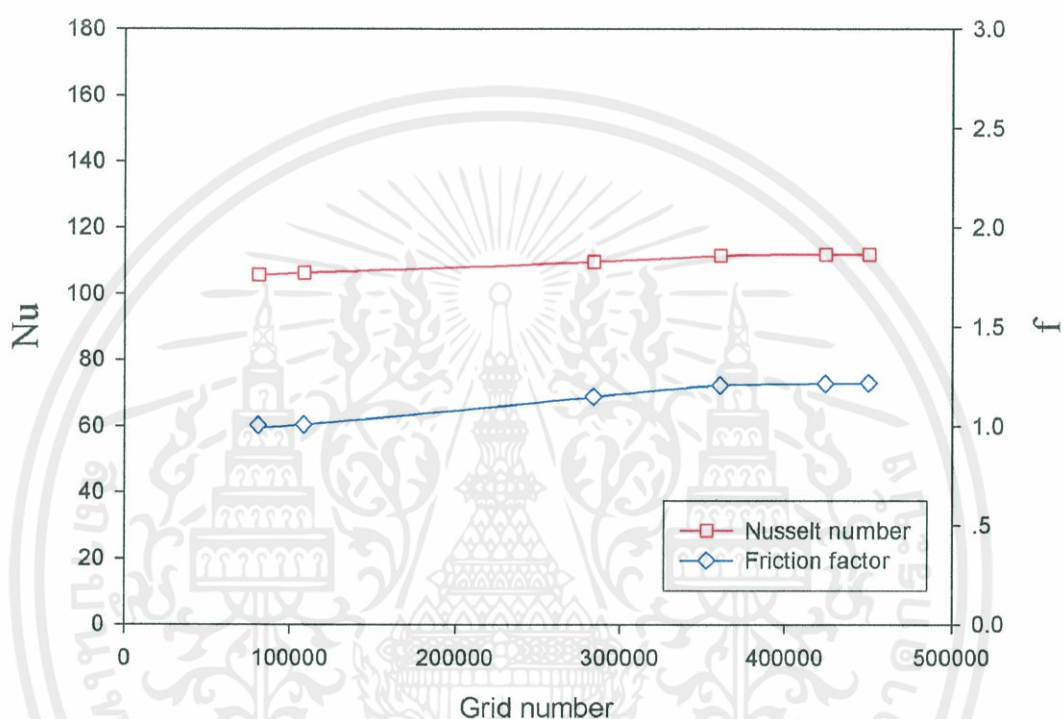
การตรวจสอบความเป็นอิสระของผลเฉลยจากจำนวนกริดเซลล์โดยมีช่องทางการไหลทดสอบที่มีแผ่นกั้นรูปตัววีคู้ติดอยู่บนแผ่นบางซึ่งจัดวางในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบทแยงมุม โดยช่องทางการไหลทดสอบนั้นมีอัตราส่วนระหว่างระยะห่างแผ่นกั้นต่อความสูงของท่อ (PR) หรือระยะพิตช์เท่ากับ 1.0 โดยแผ่นกั้นทำมุมปะทะการไหล $\alpha = 45^\circ$ และมีอัตราส่วนระหว่างความสูงของท่อ (BR) หรือค่าอัตราส่วนการบล็อกการไหลเท่ากับ 0.15 ความสูงของท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใช้ในการจำลองมีค่า $H = 0.05\text{m}$ โดยพิจารณาการไหลแบบเป็นคาบ (Periodic) ซึ่งคำนวณการไหลในช่วงการพัฒนาอย่างสมบูรณ์และซ้ำเป็นช่วง หรืออาจเรียกว่าการคำนวณแบบเป็นโมดูล มีโดเมนการไหลแบบสมมาตร (symmetry planes) และมีการจัดวางแผ่นกั้นแบบปลายวีคู้ซึ่งติดตามการแตกการไหล

กริดที่ใช้สำหรับกรณีแผ่นกั้นรูปตัววีคู้ ติดอยู่บนแผ่นบางซึ่งจัดวางในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบทแยงมุม เป็นแบบสี่เหลี่ยม แบ่งกริดแบบไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform Grid) ซึ่งจะพิจารณาบริเวณที่ติดตั้งให้มีจำนวนกริดหนาแน่นและบริเวณที่ห่างออกไปจากผนังก็มีจำนวนกริดเบาบางลง ส่วนการหาผลกระทบของกริดที่มีผลต่อคำตอบ ได้ทำการศึกษาโดยใช้ปริมาณของกริดที่แตกต่างกัน ที่จำนวน 88,460, 108,400, 284,090, 360,000, 424,700 และ 450,000 ใช้ลำดับวิธีการคำนวณผลเฉลยแบบ SIMPLE และใช้แบบแผนการคำนวณแบบ QUICK โดยมีเงื่อนไขขอบเขตดังหัวข้อ 4.3 เงื่อนไขการลู่ออกหาคำตอบของทุกค่าอยู่ที่ 10^{-5} ยกเว้นสมการพลังงานซึ่งอยู่ที่ 10^{-9} พบว่าเมื่อจำนวนกริดเพิ่มขึ้นจาก 360,000 ถึง 424,700 ค่านัยเชิงตัวเลขมีความคลาดเคลื่อนจากผลเฉลยแม่นยำตรง 0.3% ส่วนค่าตัวประกอบความเสียดทานมีความคลาดเคลื่อนจากผลเฉลยแม่นยำตรง 0.7% ดังนั้น จึงเลือกปริมาณของกริดที่ประมาณ 400,000 ซึ่งปริมาณกริดนี้จะถูกนำไปใช้ในการศึกษาอิทธิของพารามิเตอร์ต่างๆ ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 จำนวนของกริดเซลล์ที่ส่งผลต่อค่า Nu และ f

Grid Number	88,460	108,400	284,090	360,000	424,700	450,000
Nu	106.1666	106.3053	109.5994	111.4646	111.7965	111.8183
f	1.0044605	1.0075141	1.1473507	1.2044859	1.2133225	1.2151358



รูปที่ 4.3 อิทธิพลของจำนวนกริดเซลล์ที่ส่งผลต่อค่า Nu และ f ที่ $Re=8,000$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและการอภิปราย

5.1 บทนำ

โดยทั่วไปสมรรถนะเชิงความร้อนจะสัมพันธ์กับการสูญเสียความดันเนื่องจากความเสียดทาน การเพิ่มสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนมักจะได้มาพร้อมกับการสูญเสียความดันที่เพิ่มมากขึ้น สำหรับของไหลที่มีความหนาแน่นต่ำ (ก๊าซ) การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนมักจะนำไปสู่ความสิ้นเปลืองกำลังทางกลในรูปของพลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนคอมเพรสเซอร์หรือพัดลม เพราะฉะนั้นการออกแบบและการเลือกใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจึงจะต้องมีการพิจารณาอย่างถี่ถ้วนในอัตรา การถ่ายเทความร้อนและกำลังทางกลที่ใช้ในการขับเคลื่อนของไหล

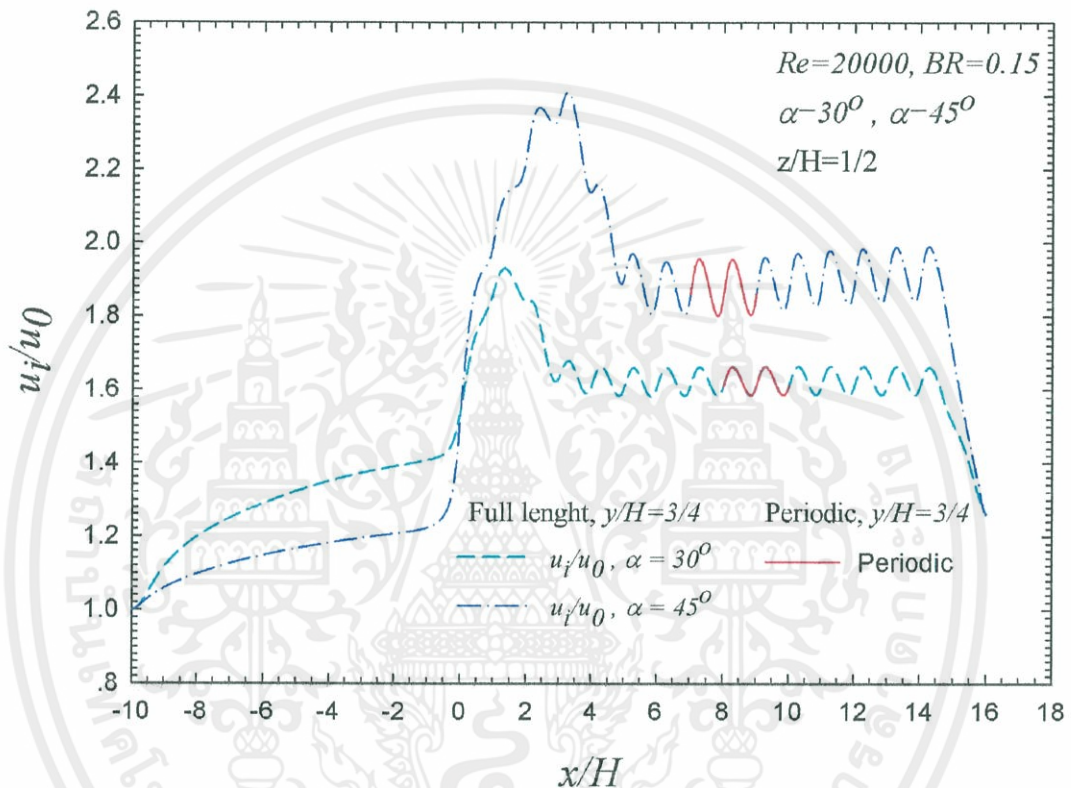
ในบทนี้จะศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสจากการจำลองเชิงตัวเลข ซึ่งการถ่ายเทความร้อนได้แสดงในเทอมของนัสเซลท์ และผลของการสูญเสียความดันจะแสดงในเทอมของตัวประกอบความเสียดทาน จากพารามิเตอร์ทั้งสองนำมาสู่การวิเคราะห์สมรรถนะเชิงความร้อนของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีอุณหภูมิผิวคงที่ (Constant Surface Temperature) โดยการศึกษาจะพิจารณาถึงสภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วงของการไหล พฤติกรรมการไหลและลักษณะการถ่ายเทความร้อน อีกทั้งยังได้ทำการศึกษาอิทธิพลของมุมปะทะที่ $\alpha = 30^\circ$ และ 45° ตามลำดับ และอิทธิพลของความสูงของครีบริบตัววีคูล์ซึ่งจะอธิบายในรูปของอัตราส่วนการบล็อค (Blockage ratio, BR) โดยมีค่าเท่ากับ 0.05, 0.10, 0.15, 0.20 และ 0.25 ตามลำดับ โดยทำการศึกษาการไหลแบบปั่นป่วนในช่วงเลขเรย์โนลด์ 3,000 ถึง 20,000

5.2 สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วงของการไหล

เพื่อก่อให้เกิดความเข้าใจถึงสภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์ ซึ่งมีรูปร่างของการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบเข้าเป็นช่วงภายในท่อที่ติดตั้งครีบริบตัววีคูล์นั้น พิจารณาการไหลในท่อที่ติดตั้งครีบริบตัววีคูล์ทำมุมปะทะ 30° และ 45° กับทิศทางการไหลและเรียงตัวซ้ำกันอย่างต่อเนื่อง บนพื้นผิวให้ความร้อนที่ผนังด้านบนและด้านล่าง ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้จากกราฟการกระจายค่า Nu_x/Nu_0 และ u_i/u_0 ตามแนวทิศทางการไหล โดยเป็นการแสดงค่า Nu_x/Nu_0 และ u_i/u_0 ของกรณีการคำนวณการไหลแบบเต็มความยาวช่องทางไหลร่วมกับแบบเป็นโมดูล และในทุกกรณีวัดค่าที่ตำแหน่ง $z/H = 1/2$ ที่ $PR = 1$ และ $Re = 3,000 - 20,000$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 5.2.1 พฤติกรรมการไหลเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น การศึกษาสภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วงเชิงความเร็ว พิจารณาในรูปที่ 5.1 ซึ่งแสดงรูปร่างของค่า u_i/u_0 ซึ่งวัดค่าอย่างต่อเนื่องไปตามทิศทางการไหลในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสภายใน

ติดตั้งแผ่นบางติดครีบริบรูปตัววีคู่ โดยที่ u_i แสดงถึงความเร็วย่อยในแต่ละแกน จากการศึกษาโดยรวมพบว่า สำหรับค่าอัตราส่วนความเร็วย่อยในแนวแกน x ที่ตำแหน่งกึ่งกลางท่อ ($y/H = 0.5$) มีแนวโน้มเข้าสู่สภาวะการพัฒนาอย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วงเชิงความเร็ว (fully developed periodic flow) ที่ประมาณโมดูลที่ 8 หรือตำแหน่งที่ $x/H \approx 8$ ที่มุมปะทะ $\alpha = 30^\circ$ และ โมดูลที่ 9 ($x/H \approx 9$) ที่มุมปะทะ $\alpha = 45^\circ$

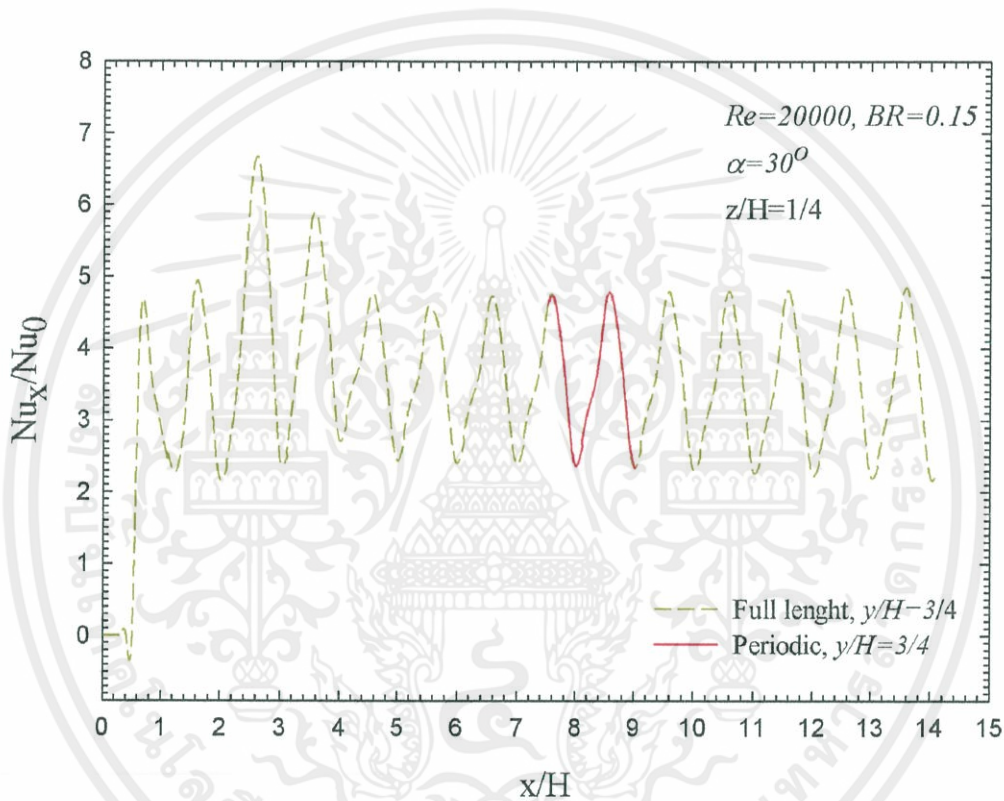


รูปที่ 5.1 การกระจายค่า u_i/u_0 ที่ $z/H = 1/2, y/H = 3/4$ ของแผ่นกั้นรูปตัววีคู่ที่ $\alpha = 30^\circ$ และ $\alpha = 45^\circ, BR=0.15$ สำหรับการไหลแบบเต็มความยาวท่อและแบบเป็นโมดูลที่ $Re = 20,000$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

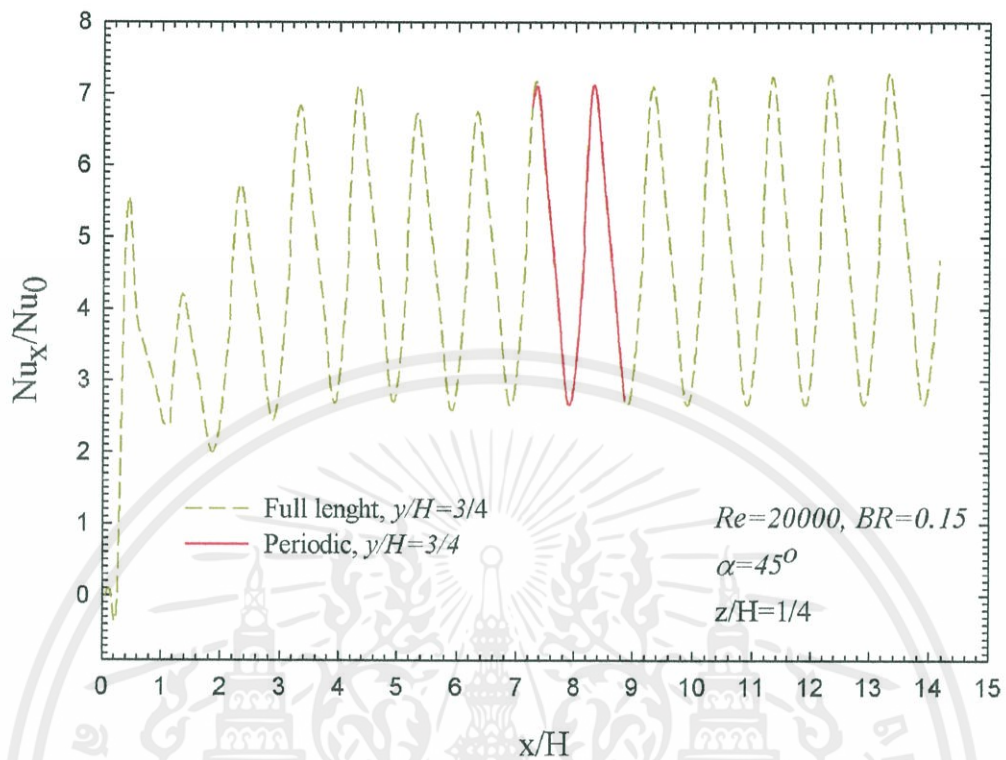
5.2.2 ลักษณะการถ่ายเทความร้อน

เมื่อพิจารณารูปที่ 5.2 แสดงการกระจายค่าเลขนัสเซิลท์เฉพาะที่ (Nu_x/Nu_0) ไปตามทิศทางการไหล ที่ $z/H = 1/4$ และ $y/H = 3/4$ ของแผ่นกั้นตัววีคูที่มีมุมปะทะ $\alpha = 30^\circ$ และ $\alpha = 45^\circ$, $BR = 0.15$ และ $PR = 1.0$ ที่ $Re = 20,000$ ซึ่งเห็นได้ว่า รูปร่างของค่า Nu_x/Nu_0 เริ่มปรากฏซ้ำเป็นช่วงที่โมดูลที่ 3 หลังจากนั้นจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นและลดลงเล็กน้อยจนกระทั่งเข้าสู่สู่ภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และซ้ำเป็นช่วงเชิงความร้อนที่โมดูลที่ 9 หรือตำแหน่งที่ $x/H \approx 9$ ที่มุมปะทะ $\alpha = 30^\circ$ และ โมดูลที่ 8 ($x/H \approx 8$) ที่มุมปะทะ $\alpha = 45^\circ$ (รูปที่ 5.3)



รูปที่ 5.2 การกระจายค่า Nu_x/Nu_0 ที่ $z/H = 1/4$, $y/H = 3/4$ ของแผ่นกั้นรูปตัววีคูที่ $\alpha = 30^\circ$, $BR = 0.15$ สำหรับการไหลแบบเต็มความยาวท่อและแบบเป็นโมดูลที่ $Re = 20,000$

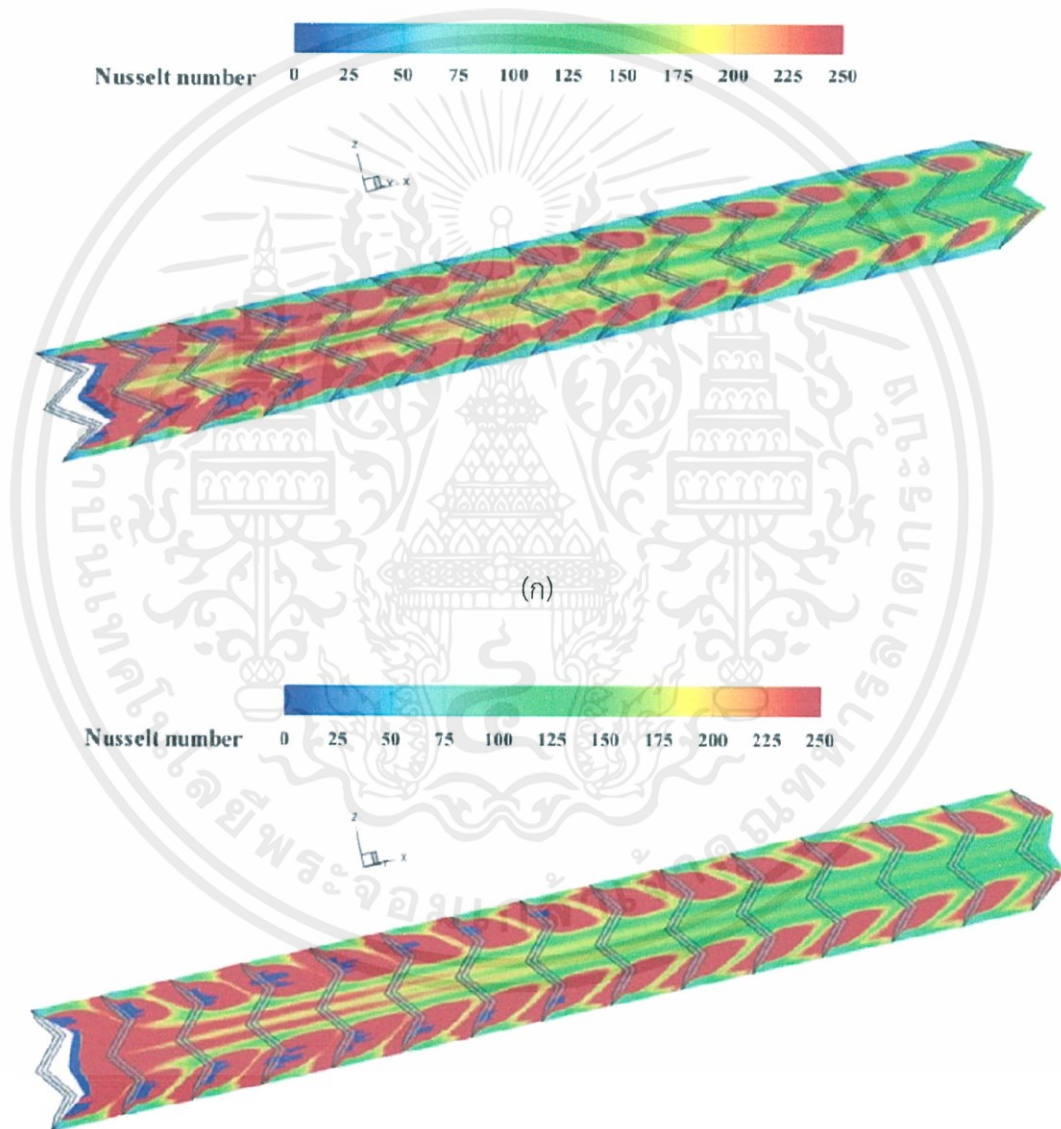
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 การกระจายค่า Nu_x/Nu_0 ที่ $z/H = 1/4, y/H = 3/4$ ของแผ่นกั้นรูปตัววีคู่ที่ $\alpha = 45^\circ$, $BR = 0.15$ สำหรับการไหลแบบเต็มความยาวท่อและแบบเป็นโมดูลที่ $Re = 20,000$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าการถ่ายเทความร้อนแสดงดังรูปที่ 5.4 ของการกระจาย Nu_x ที่บริเวณผิวท่อทั้งสองด้าน สำหรับทั้งในส่วนของท่อยาวและท่อเป็นโมดูล ซึ่งจากรูปพบว่าค่าการกระจาย Nu_x ที่บริเวณผิวท่อ สำหรับทั้งสองกรณีมีลักษณะการกระจายที่เหมือนกันคือ มีแถบสีแดงแสดงค่าการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มสูงที่บริเวณผนังท่อ ดังนั้นจากรูปจึงสามารถสรุปได้ว่า ค่าการไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นรูปตัววีคู่ เข้าสู่พฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบ fully developed periodic แล้วพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนทั้งในส่วนของท่อยาวและท่อแบบโมดูลจะมีลักษณะหรือพฤติกรรมที่เหมือนกัน



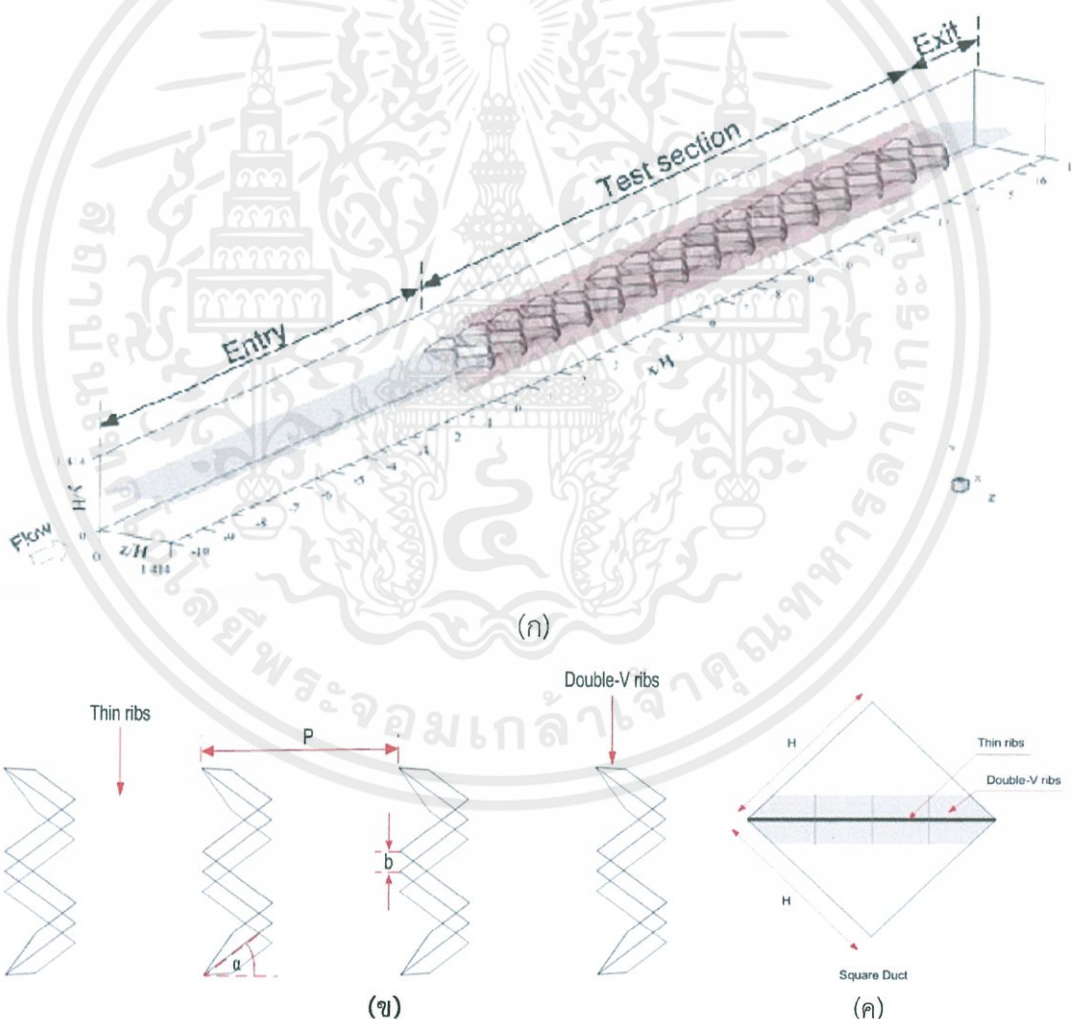
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 5.4 การกระจายค่าเลขนัสเซลท์เฉพาะที่
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 (ก) มุม $\alpha = 30^\circ$ (ข) $\alpha = 45^\circ$ ที่ $BR = 0.15$, $Re = 20,000$

5.3 แผ่นบางติดครีบริบตัววีคู่

ในส่วนของหัวข้อนี้เราพิจารณาท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใส่แผ่นบางติดครีบริบตัววีคู่ อยู่ในท่อในการจำลองนี้ได้ทำการปรับเปลี่ยนความสูงของครีบริบตัววีคู่ที่อัตราส่วนการบล็อก $BR = 0.05, 0.10, 0.15, 0.20$ และ 0.25 ตามลำดับ และมุมปะทะที่ $\alpha = 30^\circ$ และ 45° ตามลำดับ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนและความเสียหายจากการไหลในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส

5.3.1 แบบจำลองทางกายภาพ

ระบบที่ทำให้ความสนใจเป็นแผ่นกั้นรูปตัววีคู่ ติดอยู่บนแผ่นบางซึ่งจัดวางในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบทแยงมุม โดยทำมุมปะทะการไหล $\alpha = 30^\circ$ และ 45° ตามลำดับ มีอัตราส่วนระหว่างความสูงของแผ่นกั้นต่อความสูงของท่อ (BR) หรือค่าอัตราส่วนการบล็อก $BR = 0.05, 0.10, 0.15, 0.20$ และ 0.25 ตามลำดับ ความสูงของท่อหน้าตัดจัตุรัสที่ใช้ในการจำลองนี้มีค่า $H = 0.05\text{m}$ โดยพิจารณาการไหลแบบเป็นคาบ (Periodic) ดังแสดงในรูป 5.5



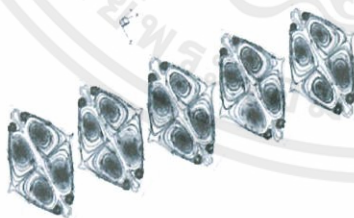
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 รูปที่ 5.5 รูปทรงของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นรูปตัววีคู่ ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีก (ก) แบบจำลองเต็มความยาวท่อ, (ข) ภาพตัดจากมุมด้านบน (Top View), การนำไปใช้
 (ค) ภาพตัดจากมุมด้านหน้า (Front View)

5.3.2 อิทธิพลของเลขเรย์โนลด์

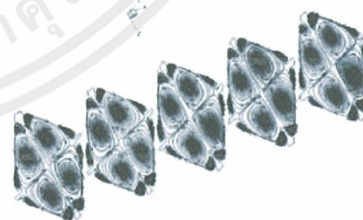
ในส่วนอิทธิพลของ Re ได้นำเสนอกรณีแผ่นกั้นรูปตัววีคู่ สำหรับมุม $\alpha = 30^\circ$ และ $BR = 0.15$ ที่ค่า Re ต่างๆ และมีทิศทางการไหลแบบ double V-downstream โดยการนำเสนอผลจากอิทธิพลของ Re จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ประกอบด้วย ส่วนที่ 1 นำเสนอเส้นกระแสการไหลหรือพฤติกรรม การไหลบนระนาบขวางแนวการไหล เพื่อให้สามารถทำความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรม การไหลผ่านแผ่นกั้นรูปตัววีคู่ ส่วนที่ 2 นำเสนอการถ่ายเทความร้อนหรือพฤติกรรม การถ่ายเทความร้อนซึ่งแสดง ในรูปของคอนทัวร์หรือการกระจายตัวของอุณหภูมิและ Nu ที่ค่า Re ต่างๆ

5.3.2.1 เส้นกระแสการไหลบนระนาบขวางแนวการไหล

สำหรับเส้นกระแสการไหลบนระนาบขวางแนวการไหลแสดงไว้ในรูปที่ 5.6 ซึ่งตำแหน่งของ ระนาบทั้ง 5 ระนาบของทุก Re เป็นตำแหน่งเดียวกัน พบว่าเส้นกระแสการไหลมีลักษณะคล้ายกันทุก Re คือเมื่ออากาศไหลผ่านแผ่นกั้นตัววีคู่จะทำให้เกิดแกนการหมุนวนหลัก 4 แกน และแกนการหมุนวนย่อยๆ ที่บริเวณขอบท่อทั้ง 4 มุม เมื่อทำการพิจารณาตั้งแต่ระยะขอบของแผ่นกั้น (baffle leading edges, BLE) จนถึง BLE ของโมดูลถัดไป โดยระนาบที่ 1 เป็นตำแหน่งขอบของแผ่นกั้นรูป ตัววีคู่ ซึ่งเกิดการหมุนวนหลัก 4 แกน และแกนการหมุนวนย่อยๆ ที่บริเวณขอบท่อทั้ง 4 มุม หลังจากนั้นเมื่อของไหลไหลผ่านแผ่นกั้นเป็นระยะ $\frac{1}{4}$ ของโมดูลหรือระนาบที่ 2 แกนการหมุนวนที่เกิดขึ้นใน ระนาบที่ 1 เริ่มเคลื่อนที่ออกห่างจากกัน จนถึงระนาบที่ 3 ซึ่งเป็นระยะเท่ากับ $\frac{1}{2}$ ของโมดูล ซึ่งแกน การหมุนวนจากระนาบที่ 2 ได้เคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณมุมของท่อ และเคลื่อนที่กลับเข้ามายังบริเวณ กลางท่ออีกครั้ง ซึ่งปรากฏในระนาบที่ 4 ซึ่งเป็นระยะเท่ากับ $\frac{3}{4}$ ของโมดูล และจะเห็นได้ว่าระนาบที่ 5 จะมีลักษณะของแกนการหมุนวนเหมือนกับระนาบที่ 1 เนื่องจากเป็นตำแหน่งของขอบแผ่นกั้นรูป ตัววีคู่เหมือนกัน



(ก) $Re = 3,000$



(ข) $Re = 8,000$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) $Re = 20,000$

รูปที่ 5.6 เส้นกระแสการไหลบนระนาบขวางแนวการไหลที่ค่า $\alpha = 30^\circ$, $BR = 0.15$ และมีทิศทางการไหลแบบ double V-downstream (ก) $Re = 3,000$ (ข) $Re = 8,000$ (ค) $Re = 20,000$



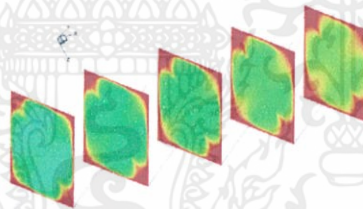
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.2.2 การถ่ายเทความร้อน

ค่าการถ่ายเทความร้อนหรือพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนพิจารณาในรูปของการกระจายของอุณหภูมิในระนาบขวางการไหล ดังรูปที่ 5.7 และการกระจายเลขนัสเซลล์ที่บริเวณผิวท่อ ดังรูปที่ 5.8 ที่ค่า Re ต่างๆ

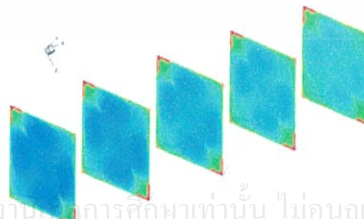
รูปที่ 5.7 แสดงถึงการกระจายอุณหภูมิในระนาบขวางการไหลที่ค่า $\alpha = 30^\circ$, $BR = 0.15$ และ double V-downstream สำหรับ (ก) $Re = 3,000$ (ข) $Re = 8,000$ และ (ค) $Re = 20,000$ เมื่อพิจารณาการกระจายอุณหภูมิที่ระนาบขวางการไหลสำหรับ $Re = 3,000$ จะเห็นได้ว่าที่บริเวณใกล้ผนังท่อทั้ง 4 ด้าน อากาศยังคงมีอุณหภูมิสูงเมื่อเทียบกับบริเวณกลางท่อโดยลักษณะของการกระจายอุณหภูมิจะแยกเป็นชั้นๆ อย่างเห็นได้ชัดเจน จึงสามารถสรุปได้ว่าที่ $Re = 3,000$ ค่าการถ่ายเทความร้อนระหว่างอุณหภูมิของอากาศที่อยู่กลางท่อกับผิวท่อยังไม่ค่อยดีมากนัก เมื่อเทียบกับค่า Re อื่นๆ ซึ่งเป็นผลมาจากการปั่นป่วนของ $Re = 3,000$ มีความรุนแรงน้อยกว่าที่ค่า Re อื่นๆ เมื่อพิจารณาที่ $Re = 8,000$ และ $20,000$ ที่ BR เดียวกัน จะเห็นได้ว่า เกิดการผสมผสานระหว่างอุณหภูมิของอากาศที่บริเวณใกล้ผิวท่อและบริเวณกลางท่อได้เป็นอย่างดี ซึ่งเป็นผลมาจากการปั่นป่วนที่รุนแรงมากขึ้น ช่วยทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้น และเมื่อ Re มีค่าเพิ่มมากขึ้น การผสมผสานระหว่างอุณหภูมิของอากาศที่บริเวณใกล้ผิวท่อและบริเวณกลางท่อ ก็มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นด้วย

Temperature: 300 303 306 309 312 315 318 321 324 327 330



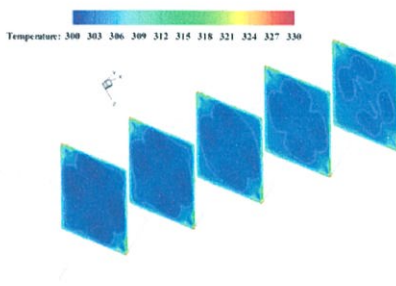
(ก) $Re = 3,000$

Temperature: 300 303 306 309 312 315 318 321 324 327 330



(ข) $Re = 8,000$

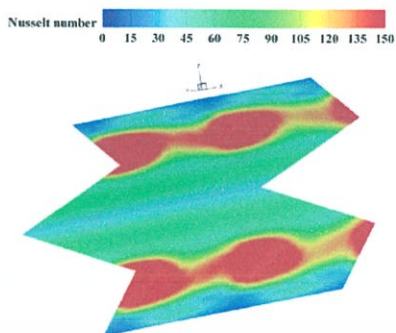
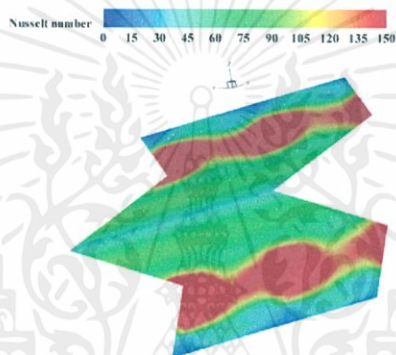
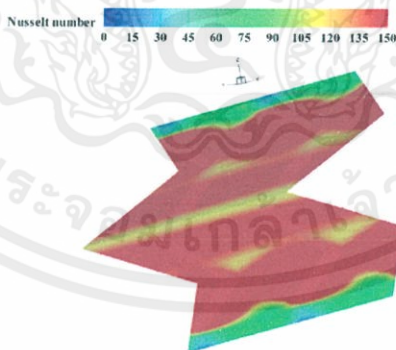
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานทางการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ค) $Re = 20,000$

รูปที่ 5.7 การกระจายอุณหภูมิในระนาบขวางการไหลที่ค่า $\alpha = 30^\circ$, $BR = 0.15$ และ double V-downstream สำหรับ (ก) $Re = 3,000$ (ข) $Re = 8,000$ และ (ค) $Re = 20,000$

รูปที่ 5.8 แสดงการกระจายของเลขนัสเซลท์ที่ค่า $\alpha = 30^\circ$, $BR = 0.15$ และ double V-downstream สำหรับ (ก) $Re = 3,000$ (ข) $Re = 8,000$ และ (ค) $Re = 20,000$ พบว่า เมื่อติดแผ่นกันรูปตัววีคู่ แล้วส่งผลให้เกิดการปั่นป่วนของกระแสการไหล และความปั่นป่วนของกระแสการไหลจะช่วยกระจายอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำไปยังบริเวณใกล้กับผนังท่อ ทำให้การถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศและผนังท่อที่มีค่าที่สูงขึ้น โดยสังเกตจากคอนทัวร์สีแดงบริเวณผนังท่อ ซึ่งหมายถึงบริเวณมีการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด จะเห็นว่าที่ $Re = 3,000$ จะเกิดผิวแสดงแถบสีฟ้าและสีเขียวเป็นส่วนใหญ่ และเกิดค่าการถ่ายเทความร้อนน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับ $Re = 8,000$ และ $20,000$ เมื่อพิจารณาที่ $Re = 8,000$ ซึ่งให้แถบสีฟ้าและสีเขียว ที่บริเวณผนังด้านหลังของแผ่นกันและบริเวณมุมของท่อ ส่วนผนังด้านข้างจะให้สีแดงเป็นส่วนใหญ่และมีสีส้มเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าที่ $Re = 8,000$ จะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนมากกว่าที่ $Re = 3,000$ และเมื่อพิจารณา $Re = 20,000$ ซึ่งเกิดแถบสีแดงเป็นส่วนใหญ่และมีสีเขียวบริเวณด้านหลังของแผ่นกันเพียงเล็กน้อย จึงสามารถสรุปได้ว่าเมื่อค่า Re เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้น โดยพิจารณาได้จากการกระจายของเลขนัสเซลท์บริเวณผิวท่อ แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อค่า Re เพิ่มมากขึ้นกลับพบว่าที่บริเวณด้านหลังของแผ่นกันยังคงให้แถบสีฟ้าและสีเขียว ซึ่งแสดงค่าการถ่ายเทความร้อนที่น้อยกว่าส่วนอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก) $Re = 3,000$ (ข) $Re = 8,000$ (ค) $Re = 20,000$

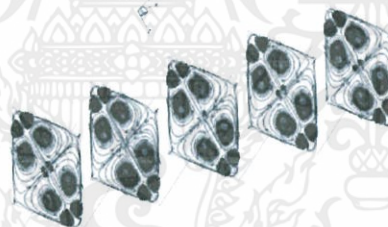
เอกสารนี้เป็นรูปที่ 5.8 การกระจายของเลขนัสเซลท์ที่ค่า $\alpha = 30^\circ$, $BR = 0.15$ และ double V-downstream การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งสำหรับ (ก) $Re = 3,000$ (ข) $Re = 8,000$ และ (ค) $Re = 20,000$ ที่มีการนำไปใช้

5.3.3 อิทธิพลของความสูงของแผ่นกั้น (ค่าอัตราส่วนการบดอัดการไหล, BR)

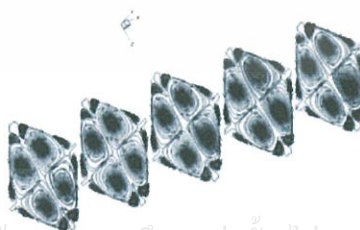
ในส่วนอิทธิพลของ BR ได้นำเสนอกรณีแผ่นกั้นรูปตัววีคู่ สำหรับมุม $\alpha = 30^\circ$ และ $Re = 8,000$ ที่ค่า $BR = 0.05, 0.15$ และ 0.25 และมีทิศทางการไหลแบบ double V-downstream โดยการนำเสนอผลจากอิทธิพลของ BR จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ประกอบด้วย ส่วนที่ 1 นำเสนอเส้นกระแสการไหลหรือพฤติกรรมการไหลบนระนาบขวางแนวการไหล เพื่อให้สามารถทำความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมการไหลผ่านแผ่นกั้นรูปตัววีคู่ ส่วนที่ 2 นำเสนอการถ่ายเทความร้อนหรือพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนซึ่งแสดงในรูปของคอนทัวร์หรือการกระจายตัวของอุณหภูมิและ Nu ที่ค่า BR ต่างๆ

5.3.3.1 เส้นกระแสการไหลบนระนาบขวางแนวการไหล

สำหรับเส้นกระแสการไหลบนระนาบขวางแนวการไหลแสดงไว้ในรูปที่ 5.9 ที่ค่า $\alpha = 30^\circ$, $Re = 8,000$ และมีทิศทางการไหลแบบ double V-downstream สำหรับ (ก) $BR = 0.05$ (ข) $BR = 0.15$ (ค) $BR = 0.25$ พบว่า เมื่ออากาศไหลผ่านแผ่นกั้นรูปตัววีคู่ จะก่อให้เกิดการปั่นป่วนขึ้น ซึ่งจากรูป 5.9 พบว่าที่ค่า $BR = 0.05$ จะมีการกระจายตัวของเส้นกระแสการไหลน้อยที่สุด และเมื่อค่า BR เพิ่มขึ้น ส่งผลให้การกระจายตัวของเส้นกระแสการไหลมีมากยิ่งขึ้น โดยที่ค่า $BR = 0.25$ พบว่าเกิดการกระจายตัวของเส้นกระแสการไหลที่มากที่สุด



(ก) $BR = 0.05$



(ข) $BR = 0.15$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ค) $BR = 0.25$

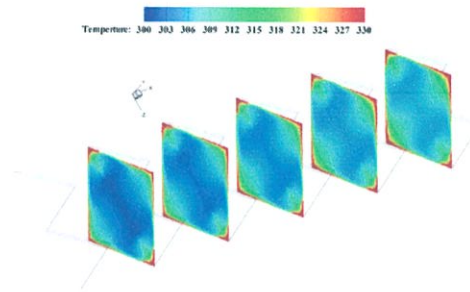
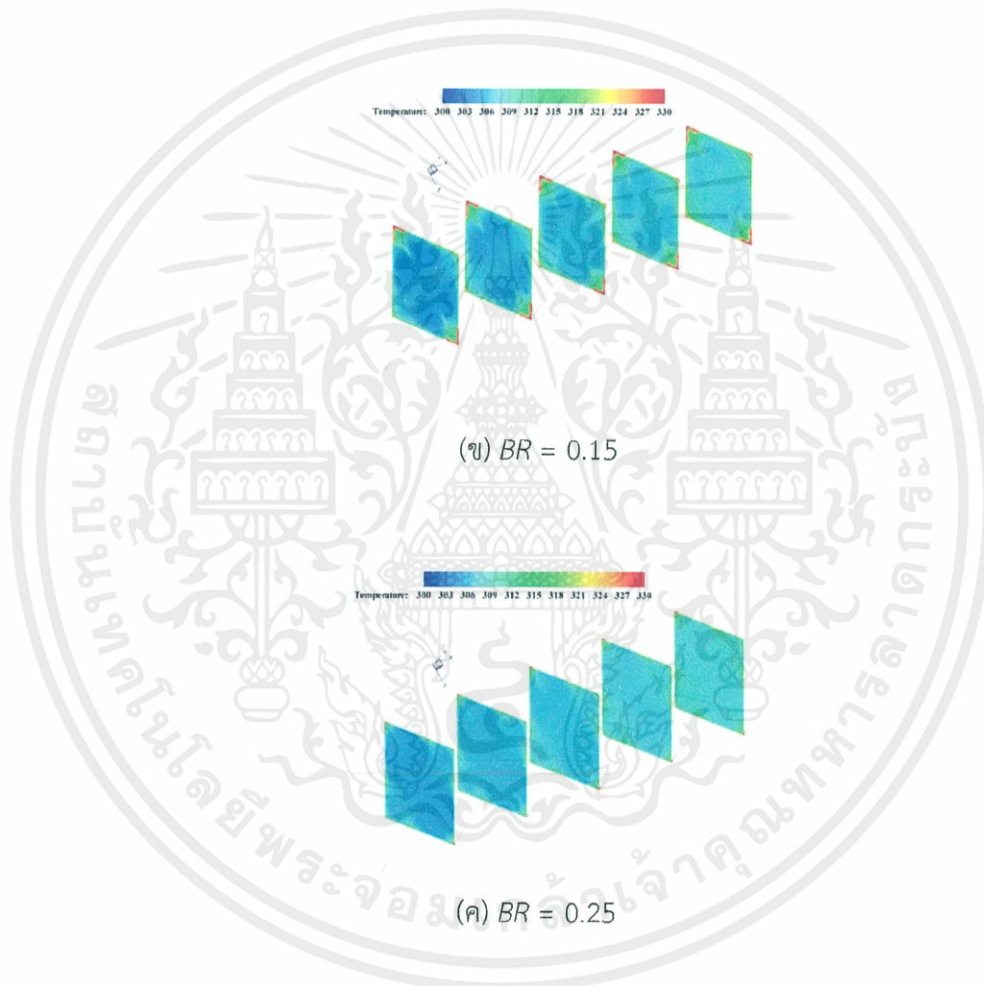
รูปที่ 5.9 เส้นกระแสการไหลบนระนาบขวางแนวการไหลที่ค่า $\alpha = 30^\circ$, $Re = 8,000$ และมีทิศทางการไหลแบบ double V-downstream สำหรับ (ก) $BR = 0.05$ (ข) $BR = 0.15$ (ค) $BR = 0.25$

5.3.3.2 การถ่ายเทความร้อน

ค่าการถ่ายเทความร้อนหรือพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนพิจารณาในรูปของการกระจายของอุณหภูมิในระนาบขวางการไหล ดังรูปที่ 5.10 และการกระจายเลขนัสเซิลท์ที่บริเวณผิวท่อ ดังรูปที่ 5.11 ที่ค่า $BR = 0.05, 0.15$ และ 0.25

รูปที่ 5.10 แสดงถึงการกระจายอุณหภูมิในระนาบขวางการไหลที่ค่า $\alpha = 30^\circ$, $Re = 8,000$ และ double V-downstream สำหรับ (ก) $BR = 0.05$ (ข) $BR = 0.15$ และ (ค) $BR = 0.25$ เมื่อพิจารณาการกระจายอุณหภูมิที่ระนาบขวางการไหลสำหรับ $BR = 0.05$ จะเห็นได้ว่าที่บริเวณใกล้ผนังท่อทั้ง 4 ด้าน อากาศยังคงมีอุณหภูมิสูงซึ่งจะสังเกตได้จากคอนทัวร์สีแดง ซึ่งเป็นผลมาจากการปั่นป่วนที่มีความรุนแรงน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับค่า BR อื่นๆ แต่เมื่อพิจารณาที่ $BR = 0.15$ พบว่าอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำหรือคอนทัวร์สีฟ้าและสีน้ำเงินเริ่มมีการกระจายไปบริเวณใกล้ผิวท่อมากขึ้นอันเป็นผลมาจากการปั่นป่วนที่มีความรุนแรงมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามยังปรากฏอากาศที่มีอุณหภูมิสูงหรือคอนทัวร์สีแดงอยู่บริเวณมุมของท่อ และพบว่าที่ค่า $BR = 0.25$ คอนทัวร์สีแดงเริ่มลดน้อยลงและอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำหรือคอนทัวร์สีฟ้าและสีน้ำเงินได้กระจายไปยังบริเวณใกล้ผิวท่อมากขึ้น โดยเฉพาะที่ค่า $BR = 0.25$ เกิดการกระจายตัวของอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำหรือคอนทัวร์สีฟ้าและสีน้ำเงินไปยังบริเวณใกล้ผิวท่อมากที่สุด และมีคอนทัวร์สีแดงเกิดขึ้นน้อยที่สุดอันเนื่องมาจากการปั่นป่วนหรือการกระจายตัวของเส้นกระแสการไหลที่รุนแรงที่สุดนั่นเอง

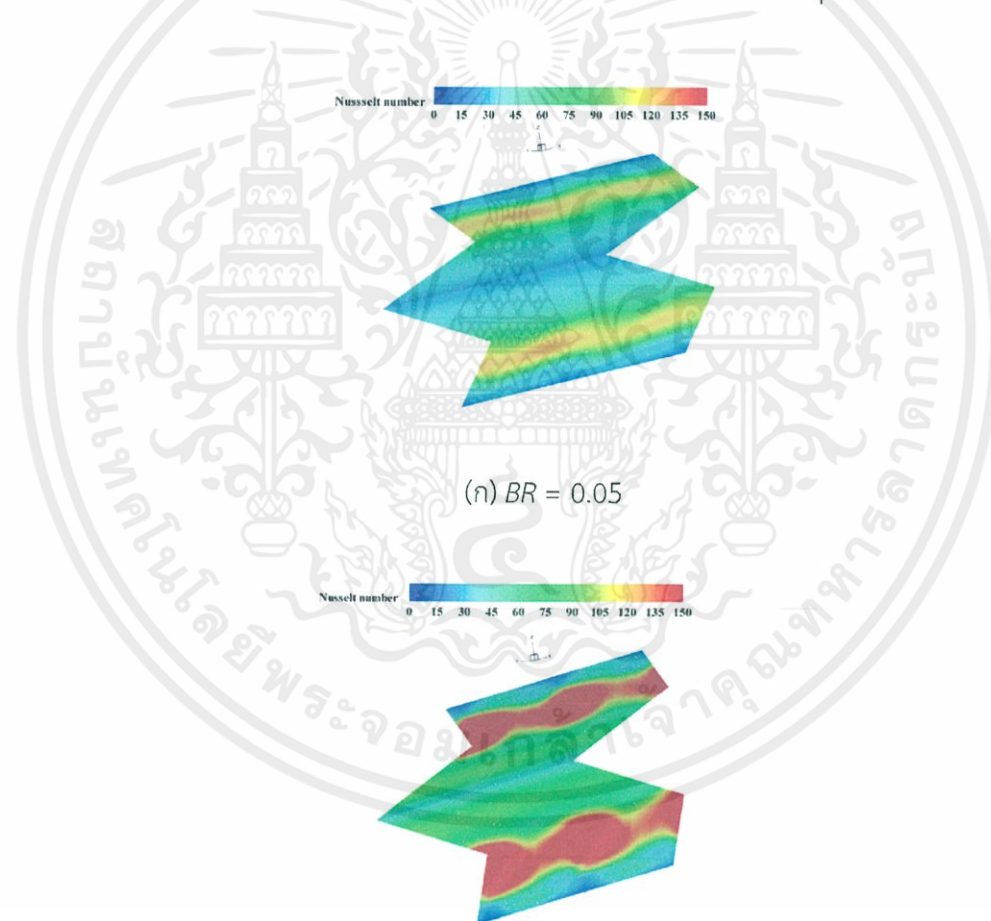
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก) $BR = 0.05$ 

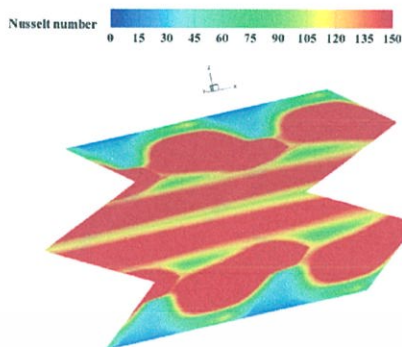
รูปที่ 5.10 การกระจายอุณหภูมิในระนาบขวางการไหลที่ค่า $\alpha = 30^\circ$, $Re = 8,000$ และ double V-downstream สำหรับ (ก) $BR = 0.05$ (ข) $BR = 0.15$ และ (ค) $BR = 0.25$

รูปที่ 5.11 แสดงการกระจายของเลขนัสเซลล์ที่ค่า $\alpha = 30^\circ$, $Re = 8,000$ และ double V-downstream สำหรับ (ก) $BR = 0.05$ (ข) $BR = 0.15$ และ (ค) $BR = 0.25$ พบว่า เมื่อติดตั้งรูปตัววีคู่ แล้วส่งผลให้เกิดการปั่นป่วนของกระแสการไหล และความปั่นป่วนของกระแสการไหลจะช่วยกระจายอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำไปยังบริเวณใกล้กับผนังท่อ ทำให้การถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศ

และผนังท่อที่มีค่าที่สูงขึ้น โดยสังเกตจากคอนทัวร์สีแดงบริเวณผนังท่อ ซึ่งหมายถึงบริเวณมีการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด จะเห็นว่าที่ $Re = 3,000$ จะเกิดผิวแสดงแถบสีฟ้าและสีเขียวเป็นส่วนใหญ่ และเกิดค่าการถ่ายเทความร้อนน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับ $Re = 8,000$ และ $20,000$ เมื่อพิจารณาที่ $Re = 8,000$ ซึ่งให้แถบสีฟ้าและสีเขียว ที่บริเวณผนังด้านหลังของแผ่นกั้นและบริเวณมุมของท่อ ส่วนผนังด้านข้างจะให้สีแดงเป็นส่วนใหญ่และมีสีส้มเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าที่ $Re = 8,000$ จะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนมากกว่าที่ $BR = 0.05$ จะเกิดผิวแสดงแถบสีเขียวเป็นส่วนใหญ่ และเกิดค่าการถ่ายเทความร้อนน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับ BR อื่นๆ และพบว่าที่ $BR = 0.25$ จะมีการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด ซึ่งสังเกตได้จากคอนทัวร์สีแดงที่มีพื้นที่มากที่สุด จึงสามารถสรุปได้ว่าเมื่อค่า BR เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้น โดยพิจารณาได้จากการกระจายของเลขนัสเซิลท์บริเวณผิวท่อ แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อค่า BR เพิ่มมากขึ้น กลับพบว่าที่บริเวณด้านหลังของแผ่นกั้นยังคงให้แถบคอนทัวร์สีฟ้าและสีเขียว ซึ่งแสดงค่าการถ่ายเทความร้อนที่น้อยกว่าส่วนอื่นๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) $BR = 0.25$

รูปที่ 5.11 การกระจายของเลขนัสเซิลต์ที่ค่า $\alpha = 30^\circ$, $Re = 8,000$ และ double V-downstream สำหรับ (ก) $BR = 0.05$ (ข) $BR = 0.15$ และ (ค) $BR = 0.25$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.4 อิทธิพลของมุมปะทะ (α)

ในส่วนอิทธิพลของ α ได้นำเสนอกรณีแผ่นกั้นรูปตัววีคู่ สำหรับ $BR = 0.15$, $Re = 8,000$ ที่ค่า $\alpha = 30^\circ$ และ 45° และมีทิศทางการไหลแบบ double V-downstream โดยการนำเสนอผลจากอิทธิพลของ α จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ประกอบด้วย ส่วนที่ 1 นำเสนอเส้นกระแสการไหลหรือพฤติกรรมการไหลบนระนาบขวางแนวการไหล เพื่อให้สามารถทำความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมการไหลผ่านแผ่นกั้นรูปตัววีคู่ ส่วนที่ 2 นำเสนอการถ่ายเทความร้อนหรือพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน ซึ่งแสดงในรูปของคอนทัวร์หรือการกระจายตัวของอุณหภูมิและ Nu ที่ค่า $\alpha = 30^\circ$ และ 45°

5.3.4.1 เส้นกระแสการไหลบนระนาบขวางแนวการไหล

สำหรับเส้นกระแสการไหลบนระนาบขวางแนวการไหลแสดงไว้ในรูปที่ 5.12 ที่ค่า $BR = 0.15$, $Re = 8,000$ และมีทิศทางการไหลแบบ double V-downstream สำหรับ (ก) $\alpha = 30^\circ$ (ข) $\alpha = 45^\circ$ พบว่า เมื่ออากาศไหลผ่านแผ่นกั้นรูปตัววีคู่ จะก่อให้เกิดการปั่นป่วนขึ้น ซึ่งจากรูป 5.12 พบว่าที่มุมปะทะการไหล $\alpha = 30^\circ$ จะมีการกระจายตัวของเส้นกระแสการไหลน้อย และเมื่อมุมปะทะการไหล α เพิ่มขึ้น ส่งผลให้การกระจายตัวของเส้นกระแสการไหลมีมากยิ่งขึ้น โดยที่มุมปะทะการไหล $\alpha = 45^\circ$ พบว่าเกิดการกระจายตัวของเส้นกระแสการไหลที่รุนแรงกว่ามุมปะทะการไหล 30°



(ก) $\alpha = 30^\circ$

(ข) $\alpha = 45^\circ$

รูปที่ 5.12 เส้นกระแสการไหลบนระนาบขวางแนวการไหลที่ค่า $BR = 0.15$, $Re = 8,000$ และมีทิศทางการไหลแบบ double V-downstream สำหรับ (ก) $\alpha = 30^\circ$ (ข) $\alpha = 45^\circ$

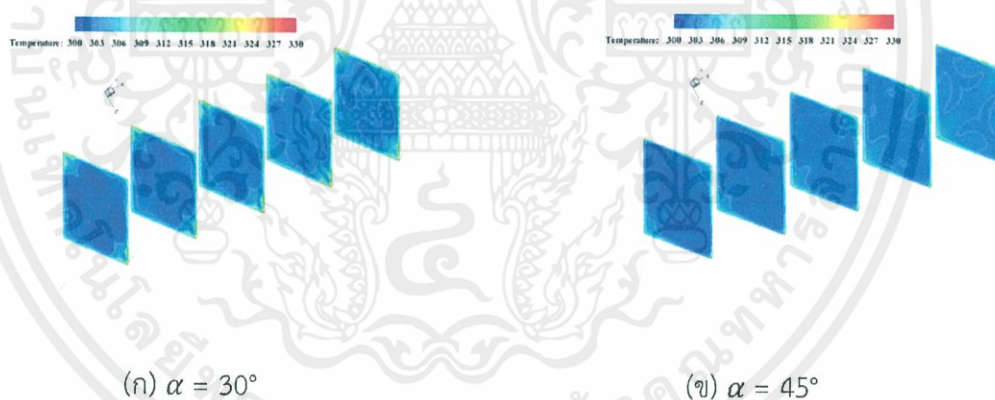
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.4.2 การถ่ายเทความร้อน

ค่าการถ่ายเทความร้อนหรือพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนพิจารณาในรูปของการกระจายของอุณหภูมิในระนาบขวางการไหล ดังรูปที่ 5.13 และการกระจายเลขนัสเซิลท์ที่บริเวณผิวท่อ ดังรูปที่ 5.14 ที่ค่า $BR = 0.05, 0.15$ และ 0.25

รูปที่ 5.13 แสดงถึงการกระจายอุณหภูมิในระนาบขวางการไหลที่ค่า $BR = 0.15$, $Re = 20,000$ และ double V-downstream สำหรับ (ก) $\alpha = 30^\circ$ (ข) $\alpha = 45^\circ$ ซึ่งตำแหน่งของระนาบทั้ง 5 ระนาบของ $\alpha = 30^\circ$ และ 45° เป็นตำแหน่งเดียวกัน จะเห็นได้ว่าการกระจายอุณหภูมิในระนาบขวางการไหลของ $\alpha = 30^\circ$ และ 45° มีลักษณะคล้ายกัน

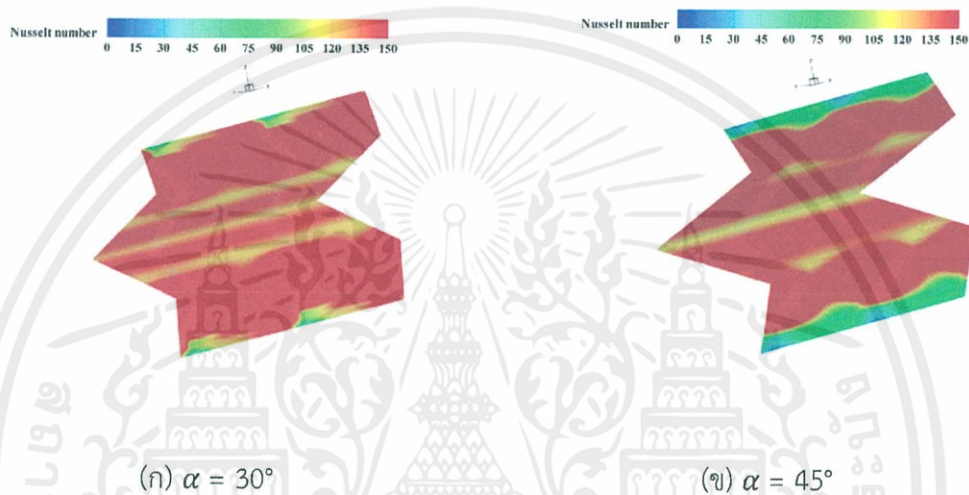
เมื่อพิจารณาการกระจายอุณหภูมิที่ระนาบขวางการไหลสำหรับมุมปะทะการไหล $\alpha = 30^\circ$ จะเห็นได้ว่าที่บริเวณใกล้ผนังท่อทั้ง 4 ด้าน อากาศยังคงมีอุณหภูมิสูงซึ่งจะสังเกตได้จากคอนทัวร์สีแดง ซึ่งเป็นผลมาจากการปั่นป่วนที่มีความรุนแรงน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับมุมปะทะการไหล $\alpha = 30^\circ$ แต่เมื่อพิจารณาที่ $\alpha = 45^\circ$ พบว่าเกิดการผสมผสานกันของอากาศบริเวณกลางท่อและบริเวณผิวท่อได้ดีกว่า $\alpha = 30^\circ$ ซึ่งเป็นผลมาจากการปั่นป่วนหรือการกระจายตัวของเส้นกระแสการไหลที่รุนแรงกว่านั่นเอง



รูปที่ 5.13 การกระจายอุณหภูมิในระนาบขวางการไหลที่ค่า $BR = 0.15$, $Re = 20,000$ และ double V-downstream สำหรับ (ก) $\alpha = 30^\circ$ (ข) $\alpha = 45^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

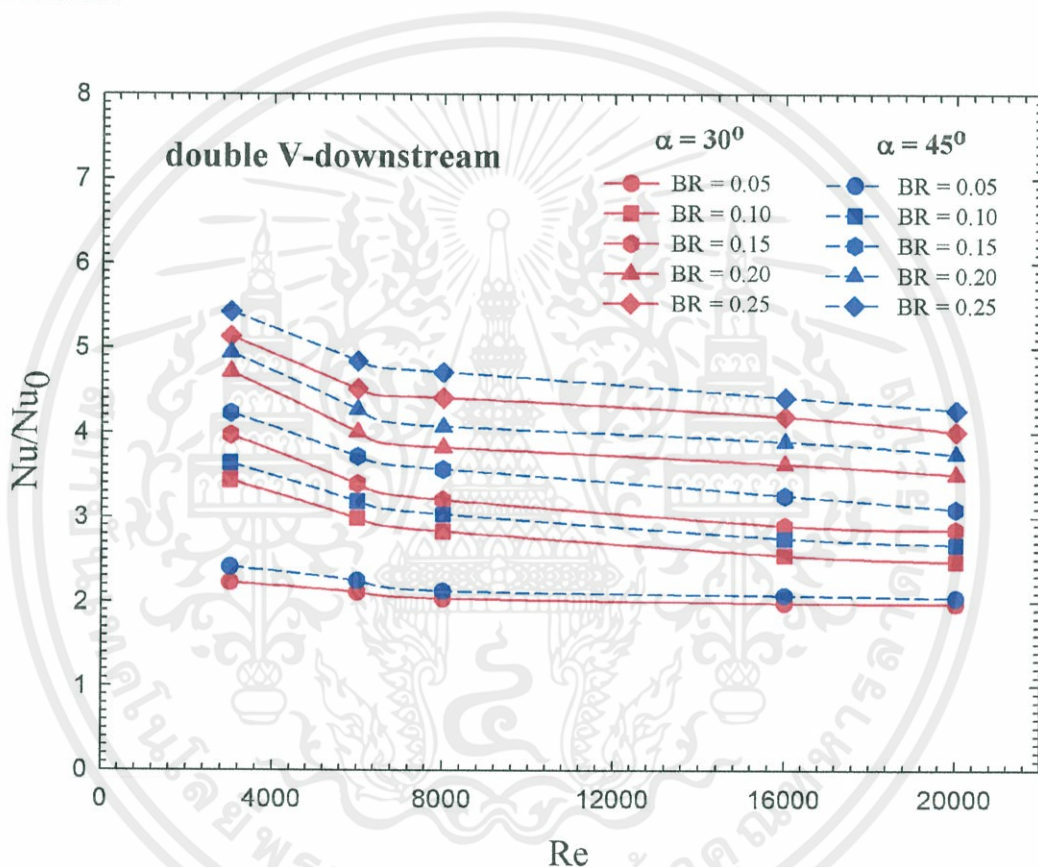
รูปที่ 5.14 แสดงการกระจายของเลขนัสเซิลท์ที่ค่า $BR = 0.15$, $Re = 8,000$ และ double V-downstream สำหรับ (ก) $\alpha = 30^\circ$ (ข) $\alpha = 45^\circ$ พบว่า การกระจายของเลขนัสเซิลท์ของ $\alpha = 30^\circ$ และ 45° มีลักษณะคล้ายกัน แต่เนื่องจากที่ $\alpha = 45^\circ$ มีการปั่นป่วนของกระแสการไหลที่รุนแรงมากกว่า $\alpha = 30^\circ$ ส่งผลให้เกิดการกระจายอุณหภูมิเย็นของอากาศไปยังบริเวณใกล้เคียงมากกว่า $\alpha = 30^\circ$ จึงทำให้ที่ $\alpha = 45^\circ$ มีการถ่ายเทความร้อนมากกว่า $\alpha = 30^\circ$ ซึ่งจะเห็นได้จากพื้นที่คอนทราสต์แดงที่มีพื้นที่มากกว่า



รูปที่ 5.14 การกระจายของเลขนัสเซิลท์ที่ค่า $BR = 0.15$, $Re = 8,000$ และ double V-downstream สำหรับ (ก) $\alpha = 30^\circ$ (ข) $\alpha = 45^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

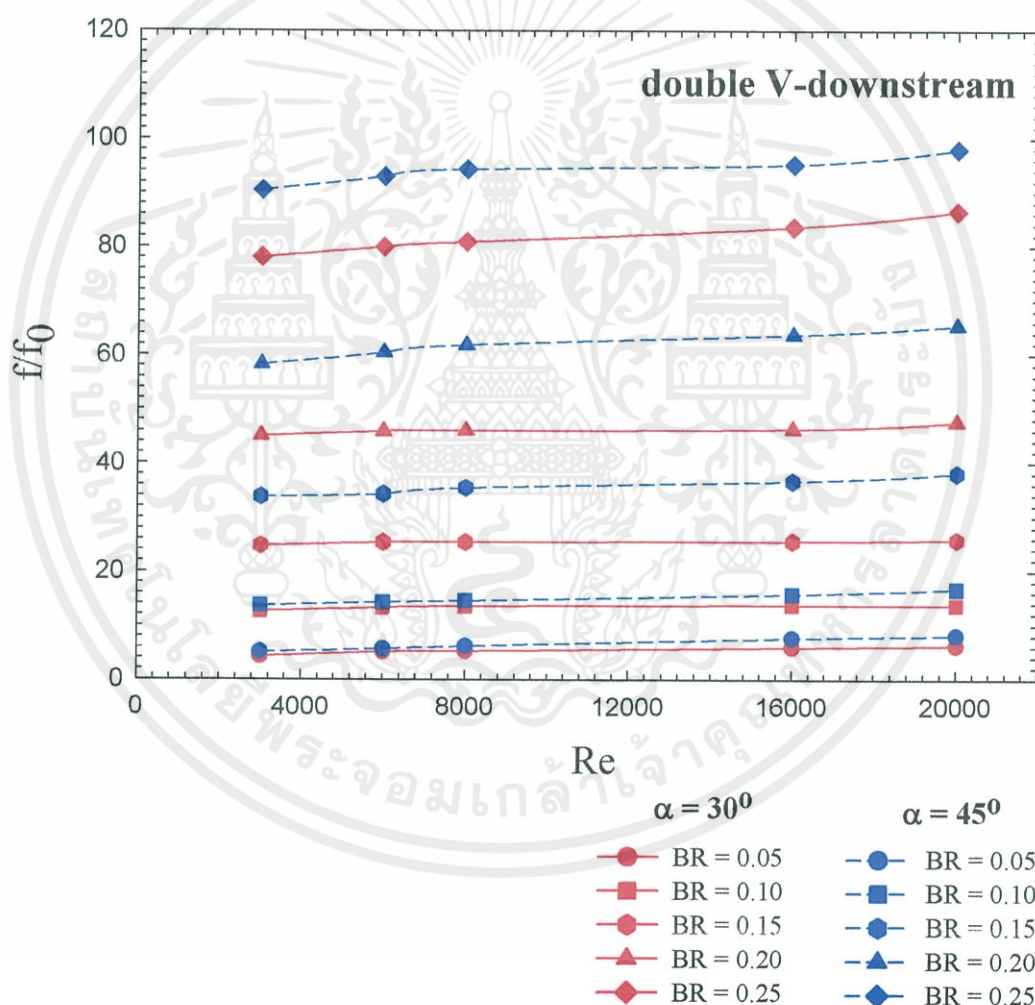
รูปที่ 5.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์กับเลขเรย์โนลด์ของแผ่นบางติดครีบริบรูปตัววีคู่ที่ค่า BR และ α ต่างๆ สำหรับ double V-Downstream เมื่อวิเคราะห์กรณี double V-Downstream พบว่าเมื่อ BR เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์เพิ่มมากขึ้น และเมื่อ Re เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ลดลง และพบว่าที่มุมปะทะ 45° จะมีค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์มากกว่ามุมปะทะ 30° ทุกๆ ค่า BR สำหรับค่า $BR = 0.05$, $\alpha = 30^\circ$ ที่ค่า $Re = 20,000$ ให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์น้อยที่สุด คือ 1.97 เท่า เมื่อเทียบกับท่อเปล่า และค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 5.13 เท่า ที่ค่า $\alpha = 30^\circ$, $BR = 0.05$ และ $Re = 3,000$ เมื่อเทียบกับท่อเปล่า



รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์กับเลขเรย์โนลด์ของแผ่นบางติดครีบริบรูปตัววีคู่ที่ค่า BR และ α ต่างๆ สำหรับ double V-Downstream

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

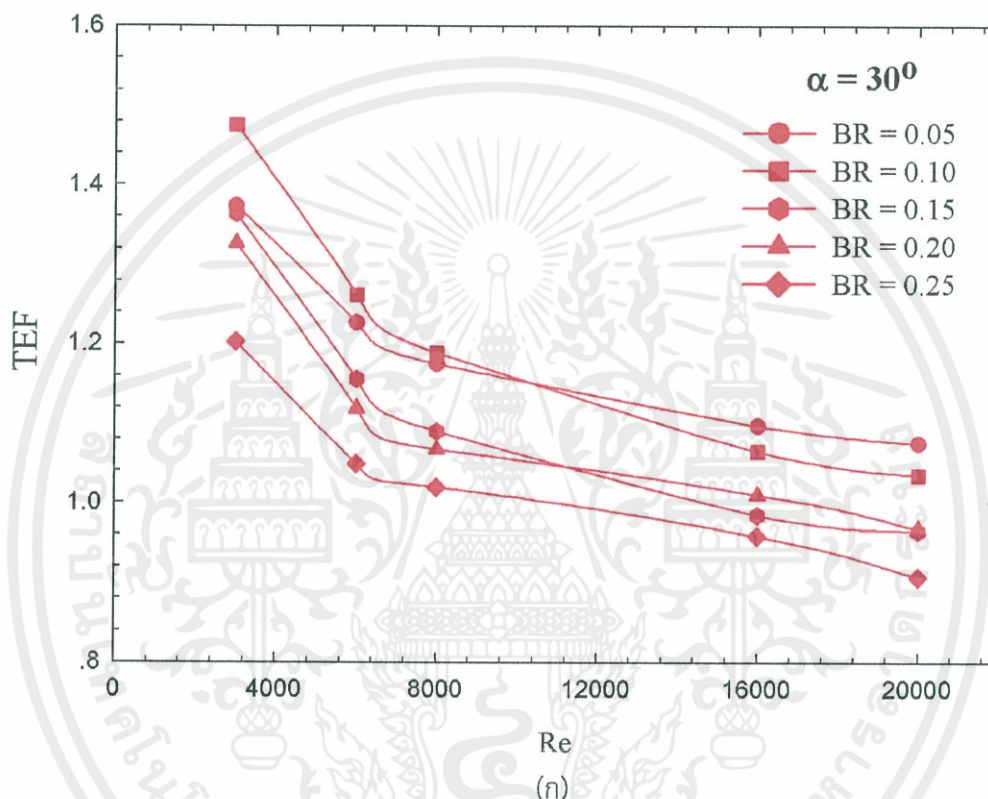
รูปที่ 5.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ของแผ่นบางติดครีบริบรูปตัววีคู่ที่ค่า BR และ α ต่างๆ สำหรับ double V-Downstream เมื่อวิเคราะห์กรณี double V-Downstream พบว่าเมื่อ BR เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานเพิ่มมากขึ้น และ เมื่อ Re เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน และพบว่าที่มุมปะทะ 45° จะมีค่าอัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานมากกว่ามุมปะทะ 30° ทุกๆ ค่า BR สำหรับค่า $BR = 0.05$, $\alpha = 30^\circ$ ที่ค่า $Re = 3,000$ ให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานน้อยที่สุด คือ 4.26 เท่า เมื่อเทียบกับท่อเปล่า และค่าอัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 97.98 เท่า ที่ค่า $\alpha = 45^\circ$, $BR = 0.25$ และ $Re = 20,000$ เมื่อเทียบกับท่อเปล่า



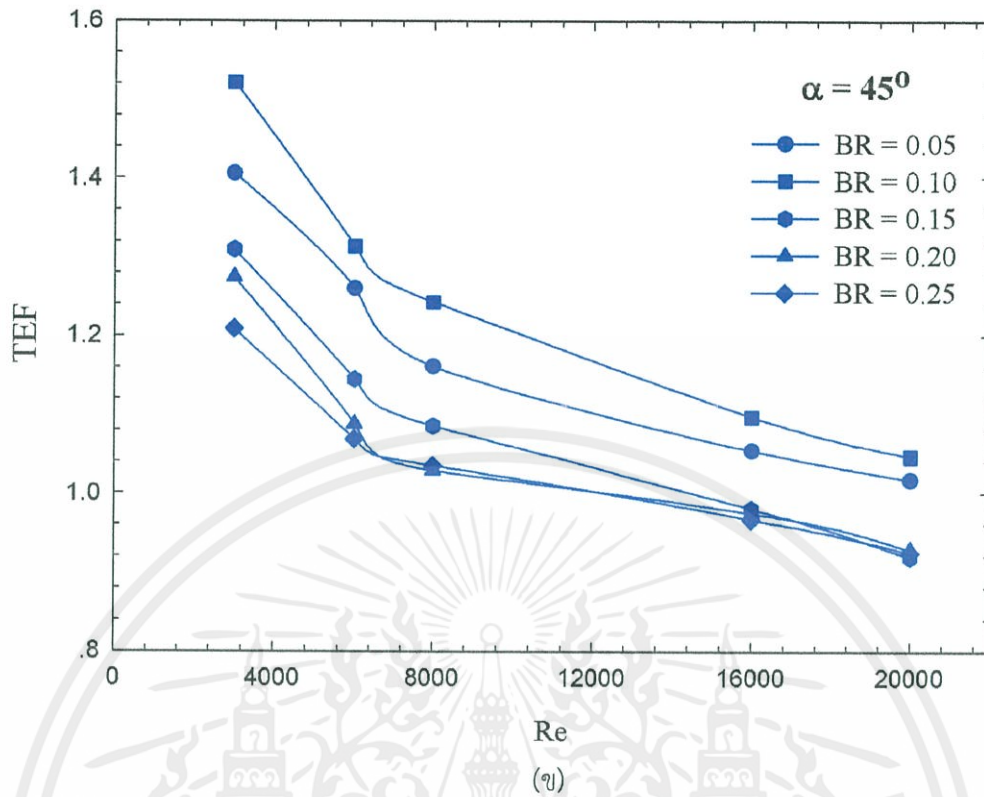
รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ของแผ่น

บางติดครีบริบรูปตัววีคู่ที่ค่า BR และ α ต่างๆ สำหรับ double V-Downstream โฆษณาด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ของแผ่นบาง ติดครีปรูปตัววีคู่ที่ค่า BR และ α ต่างๆ สำหรับ double V-Downstream เมื่อวิเคราะห์กรณี double V-Downstream พบว่าเมื่อ Re เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนลดลง และพบว่าที่มุมปะทะ $\alpha = 30^\circ$ ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงที่สุดคือ 1.47 เท่า ที่ค่า $BR = 0.10$ และ $Re = 3,000$ และที่มุมปะทะ $\alpha = 45^\circ$ ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงที่สุดคือ 1.52 เท่า ที่ค่า $BR = 0.10$ และ $Re = 3,000$ เช่นเดียวกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ของแผ่นบางติด
 ครีบริบตัววีคู้ที่ค่า BR และ α ต่างๆ สำหรับ double V-Downstream
 (ก) มุม $\alpha = 30^\circ$ (ข) มุม $\alpha = 45^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการศึกษา

6.1.1 สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วง (Fully developed periodic)

การศึกษาสภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วงเชิงการไหลและการถ่ายเทความร้อนพบว่า จะเข้าสู่สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วง ที่ตำแหน่ง $x/H = 7-9$ หรือ ประมาณ โมดูลที่ 7-9 และจากการศึกษาพบว่า ที่มุม 45° จะมีการเข้าสู่สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วง ได้เร็วกว่ามุม 30°

6.1.2 อิทธิพลของพารามิเตอร์

จากผลการศึกษาอิทธิพลของแผ่นกั้นรูปตัววีคู่ที่มีการติดตั้งบนแผ่นบางแล้วใส่ในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบทแยงมุมที่มีผลต่อพฤติกรรมการไหล, ลักษณะการถ่ายเทความร้อนและความดันตกคร่อม โดยศึกษาอิทธิพลของ Re , BR , α ซึ่งทำการศึกษาในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ในช่วง $Re = 3,000 - 20,000$ ที่มีค่า $BR = 0.05, 0.10, 0.15, 0.20$ และ 0.25 ตามลำดับ แผ่นกั้นมีลักษณะเป็นรูปตัววีคู่ ทำมุมปะทะการไหล $\alpha = 30^\circ$ และ 45° ลักษณะการหมุนวนและการกระแทกของกระแสการไหล ขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ทำการศึกษาดังนี้

6.1.2.1 อิทธิพลของเลขเรย์โนลด์

เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของค่า Re พบว่าเมื่อค่า Re เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า Nu/Nu_0 และ f/f_0 มีแนวโน้มลดลงและเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ สำหรับทุกกรณีที่ศึกษา ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าเมื่อค่า Re เพิ่มขึ้นทำให้เกิดค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังส่งผลถึงค่าอัตราของความดันตกคร่อมที่เพิ่มมากขึ้นด้วย สำหรับกรณีที่น่ามาศึกษา พบว่าที่ $Re = 20,000$ จะให้ค่า Nu/Nu_0 และ f/f_0 ลดลงและสูงขึ้นตามลำดับ นอกจากค่า Re จะมีผลต่อ Nu/Nu_0 และ f/f_0 แล้ว ค่า Re ยังมีผลต่อเกลียวการไหลของของไหลก่อนการกระแทกและหลังการกระแทกที่บริเวณผนังท่ออีกด้วย ทั้งนี้ความยาวของเกลียวยังขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ตัวอื่นๆ อีก แต่สำหรับอิทธิพลจากค่า Re จะเห็นได้ว่า เมื่อค่า Re เพิ่มมากขึ้นเกลียวของการหมุนวนก่อนการกระแทกและหลังการกระแทกจะสั้นลง นอกจากนี้ยังมีผลต่อระดับความรุนแรงในการกระแทกอีกด้วย เมื่อค่า Re เพิ่มมากขึ้น ความรุนแรงในการกระแทกก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนระหว่างผนังท่อ และของไหลในท่อ ได้ดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามความดันตกคร่อมก็จะเพิ่มสูงขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับค่า Nu/Nu_0 และ f/f_0 ที่ลดลงและเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ เมื่อ Re เพิ่มมากขึ้น

6.1.2.2 อิทธิพลของความสูงของแผ่นกัน (ค่าอัตราส่วนการบดอัดการไหล, BR)

อิทธิพลของ BR พบว่า เมื่อค่า BR เพิ่มมากขึ้น ค่า Nu/Nu_0 และ ff_0 ก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าเมื่อค่า BR เพิ่มมากขึ้น ค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อมก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วย สำหรับทุกกรณี ที่ทำการศึกษา ที่ค่า $BR = 0.25$ จะให้ค่า Nu/Nu_0 และ ff_0 มากที่สุดและค่า $BR = 0.05$ จะให้ค่า Nu/Nu_0 และ ff_0 ที่น้อยที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมกรไหลเมื่อค่า BR เพิ่มขึ้น ระยะเกลียวของการไหลจะมีระยะสั้นลง และความรุนแรงในการปั่นป่วนเพิ่มมากขึ้นด้วย

6.1.2.3 อิทธิพลของมุมปะทะการไหล (α)

อิทธิพลของมุมปะทะการไหล พบว่า ที่ $\alpha = 45^\circ$ ให้ค่าการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด เมื่อพิจารณาจากค่า Nu/Nu_0 ซึ่งให้ค่ามากกว่า $\alpha = 30^\circ$ แต่อย่างไรก็ตามค่าการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่มากขึ้น นำไปสู่การเพิ่มของค่าความดันตกคร่อมหรือค่าความดันสูญเสียที่เพิ่มสูงขึ้นด้วย พบว่าที่ $\alpha = 45^\circ$ ให้ค่าความดันตกคร่อมมากที่สุด และพบว่า เมื่อค่า α เพิ่มขึ้นระยะเกลียวของของไหลจะมีระยะสั้นลง และมีความรุนแรงในการปั่นป่วนเพิ่มมากขึ้นด้วย

6.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลงานวิจัยที่ได้นำเสนอทำให้ทราบถึงข้อดีของการใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับพฤติกรรมการไหล ลักษณะการถ่ายเทความร้อน และค่าความดันตกคร่อม เนื่องจากสามารถประหยัดเวลาที่ใช้ในการจำลองการไหล นอกจากนี้ ยังสามารถลดต้นทุนสำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองอีกด้วย อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเป็นเพียงการทำนายถึงผลการจำลองที่มีความเป็นไปได้ สำหรับการนำผลการวิเคราะห์ที่ได้ศึกษาไปใช้งานจริงนั้นค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ได้ยังขึ้นอยู่กับความถูกต้องและความแม่นยำของเครื่องมือวัดอีกด้วย นอกจากนี้ จะเห็นได้ว่างานวิจัยนี้ได้นำเสนอในส่วนของการไหลแบบเป็นซ้ำเป็นช่วง เนื่องจากช่องทางการไหลในเชิงอุตสาหกรรมมีความยาวเพียงพอที่จะเกิดการไหลซ้ำเป็นช่วงได้

สำหรับแนวทางการพัฒนางานวิจัยต่อไปนั้น เมื่อพิจารณาแผ่นกันรูปตัววีคู่ซึ่งติดตั้งบนแผ่นบางแล้วจัดวางใส่ในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบทแยงมุม พบว่าสามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ เมื่อเทียบกับท่อเปล่า แต่อย่างไรก็ตามก็ยังส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าตัวประกอบความเสียหาย ดังนั้นการเจาะรูของแผ่นบางก็เป็นอีกแนวทางหนึ่ง ซึ่งสามารถลดค่าตัวประกอบความเสียหายได้ จึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจต่อการนำไปศึกษาในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- Aharwal, K.R. Gandhib, B.K. and sainib, J.S. 2008. "Experimental investigation on heat-transfer enhancement due to a gap in an inclined continuous rib arrangement in a rectangular duct of solar air heater." *Renewable Energy*. 33: 585-596.
- Aharwal, K.R. Gandhib, Bhupendra K. and sainib, J.S. 2009. "Heat transfer and Friction Characteristics of Solar Air Heater Ducts Having Integral Inclined Discrete Ribs on Absorber Plate." *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 52: 5970-5977.
- Ahn, S.W. 2001. "The Effect of Roughness Types on Friction Factors and Heat Transfer in Roughened Rectangular Duct." *Int. Comm. Heat Mass Transfer*. 28: 933-942.
- Anderson, J.D. Degroote, J. Degrez, G. Dick, E. Grundmann, R. and Vierendeels, J. 1992. "Introduction of computation Fluid Dynamics." Edited by Wendt, John F. New York: Springer-Verlag.
- Amro, M. Weiganda, B.Porser, R. and Schnieder, M. 2007. "An Experimental Investigation of the Heat transfer in a Ribbin Triangular Cooling Channel." *International Journal of Thermal Sciences*. 46: 491-500.
- Bazdid-Tehrani, F. and Naderi-Abadi, M. 2004. "Numerical Analysis of Laminar Heat Transfer in Entrance Region of a Horizontal Channel with Transverse Fins." *Int. Commun. Heat Mass Transfer*. 31(2): 211-220.
- Berner, C, Durst, F. and McEligot, D.M. 1984. "Streamwise-periodic Flow around Baffles." In : *Proceeding of the 2th International conference on Applications of Laser Anemometry To Fluid Mechanics*. Lisbon, Portugal.
- Bhagoria, J.L Sainai, J.S. and Solanki, S.C. 2002 "Heat Transfer Coefficient and Friction Factor Correlations for Rectangular Solar Air Heat Duct Having Transverse Wedge Shaped Ribs Roughness on The Absorber Plate." *Renewable Energy*. 25: 341- 369.
- Bopche, S.B. and Tandale, M.S. 2009. "Tandale Experimental investigation on heat transfer and Frictions Correlation for Rectangular solar air heat duct." *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 52: 2834-2848.

- Buchlin, J.-M. 2002. "Convective Heat Transfer in a channel with Perforated Ribs," *Int. J. Therm. Sci.* 41: 322- 340.
- Cavellero, D. and Tanda G. 2002. "An Experimental Investigation of Forced Convection Heat Transfer in Channel with Ribs Turbulators by means of Liquid Crystal Thermography" *Experimental Thermal and Fluid Science.* 26: 115-121.
- Chandra, P.R. Alexander, C.R. and Han, J.C. 2003. "Heat Transfer and Friction Behaviors in Rectangular Channels with Varying Number of Ribbed Walls." *International Journal of Heat and Mass Transfer.* 46 : 481-495.
- Chapra, Steven C. and Canale, Raymond P. 1988. *Numerical Methods for engineers.* Singapore : McGraw-Hill.
- Chaube, A sahu, P.K. and Solanki, S.C. 2006. "Analysis of Heat Transfer Augmentation and Flow Characteristics due to Rib Roughness over Absorber Plate of a Solar Air Heater." *Renewable Energy.* 31: 317-331.
- Chen, H.C. and Patel, V.C. 1988 "Near-wall Turbulence Model for Complex Flows Including Separation." *AIAA Journal.* 26(6): 641-648.
- Cheng, C.H. and Huang W.H. 1991 "Laminar Force Convection Flows in Horizontal Channel with Transverse Fins Placed in Entrance Regions." *Numerical Heat Transfer. Part A.* 16: 77-100.
- Cheng, C.H. and Huang W.H. 1991. "Numerical Prediction for Laminar Force Convection in Parallel-plate Channels with Transvers Fin Arrays." *In. J. Heat Mass transfer.* 34: 2739-2749.
- Chompookham, T. Thianpong, Chinruk. Kwankaomeng, Sutapat and Promvong, pongjet. 2010. "Heat Transfer Augmentation in Wedge-ribbed Channel Using Winglet Vortex Generators." *International Communications in Heat Transfer and Mass Transfer.* 37: 163-169.
- Dutta, S., Dutta, P., Jones, R.E. and Khan, J.A. 1997. "Experimental Study of Heat transfer Coefficient Enhancement with Inclined Solid and Perforate Baffles." *International Mechanical Engineering Congress and Exposition.* Dallas, Texas, ASME Paper No.97-WA/HT-4, November 1621.
- Dutta, P. and Dutta, S. 1998. "Effect of Baffle Size, Perforation and Orientation on Internal Heat Transfer Enhancement." *Int. J. Heat Mass Transfer.* 41(19): 3005-3013.

- Dutta, P. and Hossain, A. 2005. "Internal cooling Augmentation in Rectangular Channel Using Two Inclined Baffles." *Int. J. Heat Fluid Flow.* 26 : 223-232.
- Eaimsa-ard, S. and Promvong, P. 2009. "Thermal Characteristic of Turbulent Ribsgrooved Channel Flows." *International Communications in Heat and Mass transfer.* 36: 705-711.
- Ebrahim Momin, A.-M. Saini, J.-S. and Soalnki, S.C. 2002. "Heat Transfer and Friction in Solar Air Heat Duct With V-shaped Rib Roughness on Absorber Plate." *International Journal of Heat and Mass Transfer.* 45 : 3383-3396.
- Farrell, P. Wert, K. and Webb, R.L. 1991. "Heat Transfer and Friction Characteristics of Turbulator Radiator Tubes." *SEA Transactions.* (100): 218-230.
- Ferziger, J. H. and Peric, M. 2002. *Computational Methods for Fluid Dynamics.* Springer.
- FLUENT, Incorporated. 2006. "FLUENT 6.3 User's Guide." Fluent Incorporated Lebanon, NH, USA.
- Founti, M.A. and Whitelaw, J.H. 1981. "Shell Side Flow in a Model Disc and Doughnut Heat Exchanger." *Tech. Report FS/81/31.* Mech. Eng. Dept., Imperial college, London, UK.
- Gee, D.L. and Webb, R.L. 1980. "Forced Convection Heat Transfers in Helically Rib-Roughened Tubes." *Int. J. Heat Mass Transfer.* 23: 1127-1136.
- Guo, Z. and Anand, N.K. 1997. "Three Dimensional Heat Transfer in Channel with a baffle in the Entrance Region." *Numerical Heat transfer. Part A.* 31: 21-35.
- Gupta, A. Srihasha, V. Prabhu, S.V. and Vedula, R.P. 2008. "Local heat transfer distribution in a square channel with 90° continuous, saw tooth profiled and 60° broken ribs." *Experimental Thermal and Fluid Science.* 32: 997-1010.
- Habbib, M.A. Mobarak, A.M. Sallak, M.A. Abdel Hadi, E.A. and Affify, R.I. 1994. "Experimental Investigation of Heat Transfer and Flow over Baffles of Different Heights." *ASME J. Heat Transfer.* 116: 363-368.
- Han, J.C. Glickman, L.R. and Rohsenow, W.M. 1978. "An investigation of Heat Transfer and Friction for Ribs-roughened Surface." *Int. J. Heat Mass Transfer.* 21: 1143-1156.
- Han, J.C. and Zhang, Y.M. 1992. "High performance Heat transfer ducts with parallel broken and V-shaped broken ribs." *International Journal of Heat and Mass transfer.* 35: 513-523.

- Han, J.S. Zhang, Y.M. and Lee, C.P. 1991. "Augmented Heat Transfer in a Square Channels with parallel, Crossed, and V-shaped Angled Ribs." *ASME J. Heat Transfer* 133: 590-596.
- Hans, V.S. Saini, P.R. and Saini, J.S. 2010. "Heat Transfer and Friction Factor Correlation for a Solar Air Heater Duct Roughened Artificially with Multiple V-ribs." *Solar Energy*. 84: 898-911.
- Iacovides, Kelemenins, H. G. and Raisee, M. 2003. "Flow and Heat Transfer in Straight Cooling Passages With Inclined Ribs on Opposite wall: an Experimental and Computational Study." *Experimental Thermal and Fluid Science*. 27: 283-294.
- Incropera, Frank P. and Dewitt, David P. 1996. *Fundamental of Heat and Mass Transfer*. John Wiley & Sons, New York: 419-461.
- Jaurker, A.R. Saini, J.S. and Gandhi, B.K. 2006. "Heat Transfer and Friction Characteristics of Rectangular Solar Air Heater Duct Use Ribs-grooved Artificial Roughness." *Solar Energy*. 80(8): 895-907.
- Jeong, Jinhee . and Hussain, Fazle. 1995. "On the Identification of a Vortex." *J. Fluid Mech*. 285: 69-94.
- Jongen, T. 1992. *Simulation And Modeling of Turbulent Incompressible Flows*. Ph.D. Thesis. EPF Lausanne, Lausanne, Switzerland.
- Kader, B. 1981. "Temperature and Concentration Profiles in fully Turbulent Boundary Layer." *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 24(9) : 1541-1544.
- Kamali, R. and Binesh, A.R. 2008. "The Importance of Rib Shape Effect on the Local Heat Transfer and Flow Friction Characteristic of Square Duct with Ribbed Internal Surfaces." *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 35: 1032-1040.
- Karmare, S. V. and Tikekar, A. N. 2007. "Heat transfer and friction factor correlation for artificially roughened duct with metal grit ribs." *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 50: 4342-4351.
- Karmare, S. V. and Tikekar, A. N. 2010. "Analysis of Fluid Flow and Heat Transfer in a Rib Grit Roughened Surface Solar Air Heat Using CFD." *Solar Energy*. 84: 409-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 417. วนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Liou, Tong-Miin. Chen, Shih-Hui. and Shih-Liou, Kuan-Chen 2002. "Numerical Simulation of Turbulent Flow field and Heat Transfer in a Two-dimensional Channel with Periodic Slit Ribs." *International Journal of heat and Mass Transfer*. 45: 4493-4505.
- Lopez, J.R Anand, N.K and Fletcher, L.S 1996. "heat Transfer in a Three-dimensional Channel with Baffles." *Numerical Heat Transfer A*. 30: 189-205.
- Lu, B. and Jiang, P.-X. 2006. "Experimental and numerical investigation of convection heat transfer in a rectangular channel with angled ribs." *Experimental Thermal and Fluid Science*. 30: 513-521.
- Menter, F. R 1994. "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Application." *AIAA Journal*. 32(8): 1598-1605.
- Momin, A.-M.E. Saini, J.s and Slanki, S.C. 2002. "Heat Transfer and Friction in Solar Air Heater Duct with V-shaped Rib Roughness on Absorber Plate." *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 45: 3383-3396.
- Mousavi, S. S and Hooman, K. 2006. "Heat and Fluid Flow in Entrance Region of a Channel with Staged Baffles," *Energy Conversion and Management*. 4: 2011-2019.
- Olsson, C. O. and Sunden, B. 1996. "Heat Transfer and Pressure Drop Characteristic of ten Radiator Tubes." *Int. J Heat Mass Transfer*. 39: 3211-3220.
- Olsson, C. O. and Sunden, B. 1997. "Heat Transfer and Pressure Drop Characteristic of ten Radiator Tubes." *Int. J Heat Mass Transfer*. 39: 3211-3220.
- Olsson, C. O. and Sunden, B. 1998. "Experimental Study of Flow and Heat Transfer in Rib-Roughness Channels." *Exp. Thermal Fluid Sci*. 16: 349-365.
- Ooi, A. Iaccarino, G Durbin, P. A. and Behnia, M. 2002. "Reynolds Averaged Simulation of Flow and Heat Transfer in Ribbed Ducts." *Int. J. Heat and Fluid Flow*. 23 : 750-757.
- Patankar, S. V. Liu, C. H. and Sparrow, E. M. 1977. "Fully Developed Flow and Heat Transfer in Duct Having Streamwise-Periodic Variations of Cross-Sectional Area." *ASME J. Heat Transfer*. 99: 180-186.
- Peng, W. Jiang, Pei-Xue. Wang, Yang-Ping. and Wei, Bing-Yuan. 2011. "Experimental and Numerical investigation of Convection Heat Transfer in Channels with Different Types of Ribs." *Applied Thermal Engineering*. 31: 2702-2708.

- Prasad BN and Saini JS 1988. "Effect of artificial roughness on heat transfer and friction factor in a solar air Heat." *Solar Energy*. 41: 555-60.
- Promvong, P. jedsadaratanachai W and Kwankaomeng S 2010a. "Numerical study of laminar flow and heat transfer in square channel with 30° inline angle baffle turbulators." *Applied Thermal Engineering*. 30: 1292-1303.
- Promvong, P. and Kwankaomeng s 2010. "periodic laminar flow and heat transfer in a channel with 45° Staggered V-baffles." *International Communications in heat and mass Transfer*. 37: 841-849.
- Promvong, P. Sripattanapipat S. and Kwankaomeng S. 2010b. "laminar periodic Flow and Heat Transfer in Square Channel with 45° inline baffle on two opposite walls." *International Journal of Thermal Science*. 49: 963-975.
- Promvong, P. Chompookham teerapat kwankaomeng, S 2010b. Sutapat and Thanpong Chinarak. 2010c. "Enhanced Heat Transfer in a Triangular Ribbed Channel with Longitudinal Vortex Generators" *Energy conservation and management*. 5: 1242-1249.
- Promvong, P. and Thianpong C 2008. "Thermal performance Assessment of Turbulent Channel Flows over Different Shaped Ribs." *International communications in Heat and Mass Transfer*. 35: 1327-1334.
- Ryu, D.N. Choi, D.H. and Patel, V.C. 2007. "Analysis of Turbulent Flow in Channels Roughened by Two-dimensional Ribs and Three-dimensional Blocks. Part II: Heat Transfer." *Int. J. Heat and Fluid Flow*. 28: 1112-1124.
- Sahu, M.M. and Bhagoria, J.L. 2005. "Augmentation of Heat Transfer Coefficient by Using 90 Broken Transverse Ribs on Absorber Plate of Solar Air Heater." *Renewable Energy* 30: 2057-2063.
- Sigh, S. Chander, Subhash and Saini, J.S. 2011. "Heat Transfer and Fiction Factor Correlations of Solar Air Heater Ducts Artificially Roughened with Discrete V-down Ribs." *Energy*. 36: 5053-5064.
- SriHarsha V. Prabhu, S.V. and Vedula, R.P. 2009. "Influence of Rib Height on the Local Heat Transfer Distribution and Pressure Drop in a Square Channel with 90 Continuous and 60 V-Broken Ribs." *Applied Thermal Engineering*. 29: 2444-2459.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Sripattanapipat, S. and P. Promvonge. 2009. "Numerical Analysis of Laminar Heat Transfer in a Channel with Diamond-shaped Baffles." *Int. Comm. Heat Mass Transfer*. 36: pp. 32-38.
- Tanda, G. 2004. "Heat Transfer in Rectangular Channels with Transverse and V-shaped Broken Ribs." *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 47: 229-243.
- Tanda, G. 2011. Effect of Rib Spacing on Heat Transfer and Friction in a Rectangular Channel with 45 Angled Rib Turbulators on One/Two Walls." *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 54: 1081-1090.
- Taslim, M.E. T. Li, T. and Kercher, D.M. 1996. "Experimental Heat Transfer and Friction in Channels Roughed with Angled, V-shaped, and Discrete Ribs on Two Opposite Walls." *ASME J. Turbo machinery*. 118: 20-28.
- Thianpong, C. Chompookham, T. Skullong, S. and Promvonge, P. 2009 "Thermal Characterization of Turbulent Flow in a Channel with Isosceles Triangular Ribs." *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 36: 712-717.
- Tian, Liting. He, Yaling. Tao, Yubing. And Tao, Wenquan. 2009. "A Comparative Study on the Air-side Performance of Wavy Fin-and-tube Heat Exchanger with Punched Delta Winglets in Staggered and In-line Arrangements." *International Journal of Thermal Science*. 48: 1765-1776.
- Varun. Sainib, R.P. and Singal, S.K. 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.
- Versteeg, H.K. and Malalasekera, W. 2007. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*, Second edition. Pearson Education Limited, Edinburgh Gate, Harlow, Essex, England.
- Wang, Q.W. Chen, Qiuyang. Wang. Ling. Zenga, Min. Huang, Yanping. And Xiao, Zejun. 2007. "Experimental Study of Heat Transfer Enhancement in Narrow Rectangular Channel with Longitudinal Vortex Generators." *Nuclear Engineering and Design*. 237: 686-693.

- Webb, R.L. Eckert, E.R.G Goldstien, R.J. 1971. "Heat Transfer and Friction in Tubes with Repeated-rib Roughness." *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 14: 601-617.
- Webb G.W. and Ramadhyani S. 1985. "Conjugate Heat Transfer in a Channel with Staggered Ribs." *Int. J. Heat Mass Transfer*. 28: 1697-1687.
- Wilcox, D. C. 1998. *Turbulence Modeling for CFD*. DCW Industrial, Inc., La Canada, California.
- Wolfstien, M. 1969. "The Velocity and Temperature Distribution of One-Dimensional Flow with Turbulence Augmentation and Pressure Gradient." *Int. J. Heat Mass Transfer*, 12: 301-318.
- Won, S.Y. and Ligrani, P.M. 2004. "Comparisons of Flow Structure and Local Nusselt Numbers in Channels with Parallel and Crossed-rib Turbulators." *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 47: 1573-1586.
- Won, S.Y. Mahmood, G.I. and Ligrani, P.M. 2003. "Flow Structure and Local Nusselt Number Variations in a Channel with Angled Crossed-rib Turbulators." *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 46 3153-3166.
- Wong, T.T Leung, C.W. Li, Z.Y. and Tao, W.Q. 2003. "Turbulent Convection of Air-cooled Rectangular Duct with Surface-mounted Cross-ribs." *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 46: 4629-4638.
- Yakhot, V. and Orzag, S. A. 1986. "Renormalization Group Analysis of Turbulence: I. Basic Theory." *Journal of Scientific Computing*. 1(1): 1-51.
- Yang Y.T. and Hwang, C.W. 2004. "Numerical Calculations of Heat Transfer and Friction Characteristics in Rectangular Ducts with Slit and Solid Ribs Mounted on One Wall." *Numerical Heat Transfer Part A : Applications*. 45(4): 363-375.
- Yang, Y.t. and Hwang, C.Z. 2003. "Calculation of Turbulent Flow and Heat Transfer in a Porous-baffled Channel." *Int. J. Heat Mass Transfer*. 46(5): 771-780.
- Yilmaz, M. 2003. "The Effect of Inlet Flow Baffles on Heat Transfer." *Int. Comm. Heat Mass Transfer*. 30(8): 1169-1178.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จารุวัตร เจริญสุข. พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล. คณะ
วิศวกรรมศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- พงษ์เจต พรหมวงศ์. 2542. การถ่ายเทความร้อน. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล. คณะ
วิศวกรรมศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. หน้า167-252
- วาโย ช่างเจริญ 2555. การศึกษาการถ่ายเทความร้อนเชิงตัวเลขของการไหลในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส
แบบปั่นป่วนผ่านครีบทัววีแบบแยกตัว, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์ดุษฎี
บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณท
ลาดกระบัง, 2555, หน้า 38 – 41.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้