

การศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลและการถ่ายเทความร้อนสำหรับผิวครีบทัก
ชนิดต่าง ๆ ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ fin-and-tube

Numerical investigation on flow and heat transfer for various wavy fin
surface of fin-and-tube heat exchanger

พงศกร สมัยชูเกียรติ
สัตยา ที่รักดี
ธรรมทีศ ธนินท์วานิชกุล

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

การศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลและการถ่ายเทความร้อนสำหรับผิวครีบก้น
ชนิดต่าง ๆ ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ fin-and-tube

Numerical investigation on flow and heat transfer for various wavy fin
surface of fin-and-tube heat exchanger

พงศกร สมัยชูเกียรติ

สัตยา ที่ภักดี

ธรรมทศ ธนินท์วานิชกุล

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

Numerical investigation on flow and heat transfer for various wavy fin
surface of fin-and-tube heat exchanger

Pongsakorn Samaichukiat

Sattaya Thiphakdi

Thamatis Thninvanichkul

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

2017

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2560

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลและการถ่ายเทความร้อนสำหรับผิวครีบก้นชนิดต่าง ๆ ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ fin-and-tube

Numerical investigation on flow and heat transfer for various wavy fin surface of fin-and-tube heat exchanger

ผู้จัดทำ

1. นาย พงศกร สมัยชูเกียรติ รหัสประจำตัว 57010803
2. นาย สัตยา ที่ภักดี รหัสประจำตัว 57011334
3. นาย ธรรมทิศ ธนินท์วานิชกุล รหัสประจำตัว 57011572

วิฑิตา เจษฎารัตนชัย

อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร.วิฑิตา เจษฎารัตนชัย)

การศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลและการถ่ายเทความร้อนสำหรับผิวครีบก้นชนิดต่าง ๆ ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ fin-and-tube

นาย พงศกร สมัยชูเกียรติ	57010803
นาย สัตยา ที่รักดี	57011334
นาย ธรรมทศ ธนินท์วานิชกุล	57011572
ผศ.ดร. วิชาติดา เจษฎารัตนชัย	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2560	

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการศึกษาเชิงตัวเลขของโครงสร้างการไหลและลักษณะการถ่ายเทความร้อนของแผ่นครีบก้นที่มีลักษณะแตกต่างกันในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ fin-and-tube โดยใช้การศึกษาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มและอัลกอริทึมแบบ SIMPLE มีการพิจารณาการไหลในช่วงการไหลราบเรียบที่ค่าเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 500 – 880 ทำการศึกษาตัวแปรของแผ่นครีบก้นแบบผิวคลื่น เช่น มุมปะทะการไหล, รูปร่าง, ความสูงคลื่น เป็นต้น มีการทดสอบเทียบความถูกต้องของแบบจำลองเชิงตัวเลขกับงานที่ได้รับการตีพิมพ์ทั้งการไหลและการถ่ายเทความร้อนซึ่งแสดงในรูปของตัวประกอบเสียดทานและเลขนัสเซิลท์ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาการแปรเปลี่ยนของจำนวนกริตสำหรับแบบจำลองเชิงตัวเลขทั้งด้านการไหลและการถ่ายเทความร้อนอีกด้วย การผลการทดลองในเบื้องต้น พบว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดีกับค่าที่ได้จากบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่มาก่อนหน้านี้ทั้งค่าเลขนัสเซิลท์และตัวประกอบเสียดทานจากการศึกษาพบว่าครีบก้นให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและความดันตกคร่อมสูงขึ้นเมื่อเทียบกับคลื่นแบบราบเรียบ มุมคลื่น 60 องศา จะให้ค่าของเลขนัสเซิลท์สูงสุด ตามด้วย 45 และ 30 องศา น้อยลงตามลำดับ แต่ตัวประกอบความเสียดทานก็เพิ่มขึ้นด้วย โดยมุมปะทะการไหลจะช่วยให้ค่าตัวประกอบความเสียดทานลดลง ซึ่งมุมปะทะการไหล 60 จะให้ค่าตัวประกอบความเสียดทานน้อยที่สุด ตามด้วย 45 และ 30 องศา ตามลำดับ ดังนั้นที่โมเดลรีคว่า มุมปะทะการไหล 60 องศา มุมคลื่น 30 องศา จึงให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุด จะเห็นได้ว่า ครีบก้นสามารถช่วยเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนได้เป็นอย่างดี

Numerical investigation on flow and heat transfer for various wavy fin surface of fin-and-tube heat exchanger

Pongsakorn Samaichukiat	57010803
Sattaya Thiphakdi	57011334
Thamatis Thninvanichkul	57011572
Assist.Prof.Dr. Withada Jedsadaratanachai	Advisor
year 2560	

Abstract

The flow configurations and heat transfer characteristics for various wavy fin profiles of fin-and-tube heat exchanger are investigated numerically. The present problem is solved by finite volume method with SIMPLE algorithm. The laminar regime with $Re = 500 - 880$ is considered. The parameters of the wavy fin such as flow attack angle, profile, amplitude, etc., are varied. The computational domain is validated with the previous work for both flow and heat transfer in terms of friction factor and Nusselt number, respectively. The variations of grid number for the computational domain on flow and heat transfer are also reported. As the preliminary test, the present results are in agree well with the previous results on both Nusselt number and friction factor. From the study, it was found that the wavy fin gives higher heat transfer and pressure drop than the flat fin. The 60 degree wavy angle gives the highest Nusselt number, followed by 45 and 30 degrees respectively but the friction factor is also increased. The increased flow attack angle will reduce the friction factor which 60 degree flow attack angle has the smallest friction coefficient. So the highest thermal performance is founded in down stream V-Shape model at 60 degree flow attack angle and 30 degree wavy angle. it can be inferred that wavy fin has potential in increasing heat transfer.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ก็เพราะด้วยความเอาใจใส่ แนะนำ และช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ เสมอมาจาก ผศ.ดร.วิฑาดา เจษฎารัตนชัย อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมาในทุก ๆ ด้าน อันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณและขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นาย พงศกร สมัยชูเกียรติ

นาย สัตยา ที่รักดี

นาย ธรรมทิศ ธนินท์วานิชกุล

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
บทที่ 3 สมการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	12
3.1 สมมติฐานการไหล, สมการควบคุมและสภาวะขอบเขต	12
3.2 สภาวะขอบเขต.....	13
3.2.1 พื้นที่เหนือของไหล.....	13
3.2.2 พื้นที่ใต้ของไหล	13
3.2.3 ในพื้นที่ขดครีป	14
3.3 นิยามของตัวแปรเสริมต่างๆ.....	14
3.3.1 สภาวะการไหล	14
3.3.2 เลขนัทเชลท์	15
3.3.3 ตัวประกอบความเสียดทาน.....	15
3.3.4 สมรรถนะเชิงความร้อน.....	15
บทที่ 4 การกำหนดปัญหาและตรวจสอบผลการคำนวณ	17
4.1 บทนำ	17

สารบัญ(ต่อ)

4.2	การกำหนดลักษณะของปัญหาที่ใช้ในการวิจัย.....	17
4.3	ค่าเงื่อนไขขอบเขตในการคำนวณการไหลสามมิติ.....	20
4.4	การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม.....	21
4.5	การตรวจสอบความเป็นอิสระของผลเฉลยจากจำนวนกริดเซลล์.....	22
บทที่ 5	ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและอภิปราย.....	23
5.1	บทนำ.....	23
5.2	อิทธิพลของมุมปะทะการไหล (flow attack angle).....	23
5.2.1	กรณีลักษณะของผิวครีบหยักเป็นแบบเอียง.....	24
5.2.1.1	โครงสร้างการไหล.....	24
5.2.1.2	ลักษณะการถ่ายเทความร้อน.....	24
5.2.1.3	การวิเคราะห์สมรรถนะเชิงความร้อน.....	25
5.2.2	กรณีลักษณะของผิวครีบหยักเป็นแบบ V-Shape Downstream.....	27
5.2.2.1	โครงสร้างการไหล.....	27
5.2.2.2	ลักษณะการถ่ายเทความร้อน.....	27
5.2.2.3	การวิเคราะห์สมรรถนะเชิงความร้อน.....	28
5.2.3	กรณีลักษณะของผิวครีบหยักเป็นแบบ V-Shape upstream.....	30
5.2.3.1	โครงสร้างการไหล.....	30
5.2.3.2	ลักษณะการถ่ายเทความร้อน.....	30
5.2.3.3	การวิเคราะห์สมรรถนะเชิงความร้อน.....	31
5.3	อิทธิพลของมุมคลื่น (wavy angle).....	33
5.3.1	กรณีลักษณะของผิวครีบหยักเป็นแบบเอียง.....	33
5.3.1.1	โครงสร้างการไหล.....	33
5.3.1.2	ลักษณะการถ่ายเทความร้อน.....	34
5.3.1.3	การวิเคราะห์สมรรถนะเชิงความร้อน.....	35
5.3.2	กรณีลักษณะของผิวครีบหยักเป็นแบบ V-Shape Downstream.....	36
5.3.2.1	โครงสร้างการไหล.....	36
5.3.2.2	ลักษณะการถ่ายเทความร้อน.....	37

สารบัญ(ต่อ)

5.3.2.3 การวิเคราะห์สมรรถนะเชิงความร้อน.....	38
5.3.3 กรณีลักษณะของผิวคืบหยักเป็นแบบ V-Shape upstream.....	39
5.3.3.1 โครงสร้างการไหล.....	39
5.3.3.2 ลักษณะการถ่ายเทความร้อน.....	40
5.3.3.3 การวิเคราะห์สมรรถนะเชิงความร้อน.....	41
5.4 อิทธิพลของเลขเรย์โนลด์.....	42
บทที่ 6 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	44
6.1 สรุปผลการจำลอง.....	44
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	45
บรรณานุกรม.....	46
ภาคผนวก ก.....	48

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ลักษณะของกรณีศึกษาครีบทฤษฎีรูปแบบต่างๆที่มุมปะทะและมุมคลื่นเปลี่ยนไป.....	18
4.2 จำนวนของกริดเซลล์ที่มีผลต่อค่า Nu และ f	22

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ผลของจำนวนแถวของท่อต่อลักษณะการถ่ายเทความร้อนและแรงเสียดทาน กรณีท่อวางตัวในแนวเดียวกัน.....	3
2.2 ภาพจำลองโมเดลของครีบบั๊กในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ fin-and-tube	4
2.3 ผลของมุมคลื่นต่อเลขนัสเซิลท์และตัวประกอบความเสียดทาน.....	5
2.4 เปรียบเทียบการกระจายของอุณหภูมิบนผิวของครีบบั๊กที่ติดและไม่ติดเครื่องช่วยสร้างการไหล....	6
2.5 การเจาะติดปีกช่วยสร้างการไหลลงบนผิวครีบบั๊กอย่างง่าย.....	7
2.6 อิทธิพลการติดปีกช่วยสร้างการไหลต่อความดันลดลง.....	7
2.7 โมเดลของครีบบั๊กท่อแบน	9
2.8 การกระจายตัวของอุณหภูมิเมื่อความเร็วของอากาศเปลี่ยนไป.....	9
2.9 แบบจำลองของครีบบั๊ก.....	10
2.10 ผลของเลขนัสเซิลท์.....	10
2.11 เส้นการเคลื่อนที่และโปรไฟล์ความเร็วที่สัดส่วนของช่องว่างครีบบั๊กและความคลื่นเปลี่ยนไป.....	11
4.1 แสดงแบบจำลองกรณีศึกษา ก.ครีบบั๊กแบบเอียง ข.ครีบบั๊กแบบ V-shape ค.มุมปะทะการไหล ง.มุมคลื่น.....	17
4.2 แสดงผลการตรวจสอบค่าเลขนัสเซิลท์ของการถ่ายเทความร้อนของครีบบั๊กแบบราบเรียบ.....	21
4.3 แสดงผลการตรวจสอบค่าตัวประกอบความเสียดทานของการถ่ายเทความร้อน ของครีบบั๊กแบบราบเรียบ.....	21
4.4 อิทธิพลของกริดเซลล์ต่อค่า Nu และ f ที่ $Re=880$	22
5.1 แสดงสตรีมไลน์ของช่องทางการไหล กรณีที่ครีบบั๊กเป็นแบบเอียง ที่เลขเรย์โนลด์ 880 ก.มุมปะทะการไหล 45 องศา และมุมคลื่น 45 องศา ข.มุมปะทะการไหล 60 องศา และมุมคลื่น 45 องศา.....	24
5.2 แสดงคอนทัวร์ของอุณหภูมิมิบริเวณกึ่งกลางของช่องทางการไหล กรณีที่ครีบบั๊กเป็นแบบเอียง ที่เลขเรย์โนลด์ 880 ก.มุมปะทะการไหล 45 องศา และมุมคลื่น 45 องศา ข.มุมปะทะการไหล 60 องศา และมุมคลื่น 45 องศา.....	24

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.3 แสดงคอนทัวร์ของเลขนัสเซลล์ท์บริเวณผิวท่อ กรณีที่ crib hook เป็นแบบเอียง เลขเรย์โนลด์ 880 ก.มุมปะทะการไหล 45 องศา และมุมคลื่น 45 องศา ข.มุมปะทะการไหล 60 องศา และมุมคลื่น 45 องศา.....	25
5.4 อิทธิพลของมุมปะทะการไหลต่อเลขนัสเซลล์ท์เฉลี่ย กรณีที่ crib hook เป็นแบบเอียงโดยมีมุมคลื่น 45 องศา.....	25
5.5 อิทธิพลของมุมปะทะการไหลต่อค่าตัวประกอบความเสียดทาน กรณีที่ crib hook เป็นแบบเอียงโดยมีมุมคลื่น 45 องศา.....	26
5.6 อิทธิพลของมุมปะทะการไหลต่อสมรรถนะเชิงความร้อน กรณีที่ crib hook เป็นแบบเอียงโดยมีมุมคลื่น 45 องศา.....	26
5.7 แสดงสตริมไลน์ของช่องทางการไหล กรณีที่ crib hook เป็นแบบ V-Shape Downstream ที่เลขเรย์โนลด์ 880 ก.มุมปะทะการไหล 45 องศา และมุมคลื่น 30 องศา ข.มุมปะทะการไหล 60 องศา และมุมคลื่น 30 องศา.....	27
5.8 แสดงคอนทัวร์ของอุณหภูมิบริเวณกึ่งกลางของช่องทางการไหล กรณีที่ crib hook เป็นแบบ V-shape downstream ที่เลขเรย์โนลด์ 880 ก.มุมปะทะการไหล 45 องศา และมุมคลื่น 30 องศา ข.มุมปะทะการไหล 60 องศาและมุมคลื่น 30 องศา.....	27
5.9 แสดงคอนทัวร์ของเลขนัสเซลล์ท์บริเวณผิวท่อกรณีที่ crib hook เป็นแบบ V-shape downstream ที่เลขเรย์โนลด์ 880 ก.มุมปะทะการไหล 45 องศาและมุมคลื่น 30 องศา ข.มุมปะทะการไหล 60 องศาและมุมคลื่น 30 องศา.....	28
5.10 อิทธิพลของมุมปะทะการไหลต่อเลขนัสเซลล์ท์เฉลี่ย กรณีที่ crib hook เป็นแบบ V-shape downstreamโดยมีมุมคลื่น 45 องศา.....	28
5.11 อิทธิพลของมุมปะทะการไหลต่อค่าตัวประกอบความเสียดทาน กรณีที่ crib hook เป็นแบบ V-shape downstreamโดยมีมุมคลื่น 45 องศา.....	29
5.12 อิทธิพลของมุมปะทะการไหลต่อสมรรถนะเชิงความร้อน กรณีที่ crib hook เป็นแบบ V-shape downstream โดยมีมุมคลื่น 45 องศา.....	29
5.13 แสดงสตริมไลน์ของช่องทางการไหล กรณีที่ crib hook เป็นแบบ V-Shape Upstream ที่เลขเรย์โนลด์ 880 ก.มุมปะทะการไหล 45 องศา และมุมคลื่น 30 องศา ข.มุมปะทะการไหล 60 องศา และมุมคลื่น 30 องศา.....	30

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.14 แสดงคอนทัวร์ของอุณหภูมิบริเวณกึ่งกลางของช่องทางการไหล กรณีที่ cribhัยกเป็นแบบ V-shape upstream ที่เลขเรย์โนลด์ 880 ก.มุมปะทะการไหล 45 องศาและมุมคลีน 30 องศา ข.มุมปะทะการไหล 60 องศาและมุมคลีน 30 องศา.....	30
5.15 แสดงคอนทัวร์ของเลขนัสเซลล์ต์บริเวณผิวท่อกรณี que cribhัยกเป็นแบบ V-shape upstream มุม ที่เลขเรย์โนลด์ 880 ก.ปะทะการไหล 45 องศาและมุมคลีน 30 องศา ข.มุมปะทะ การไหล 60 องศาและมุมคลีน 30 องศา.....	31
5.16 อิทธิพลของมุมปะทะการไหลต่อเลขนัสเซลล์ต์เฉลี่ย กรณี que cribhัยกเป็นแบบ V-shape upstream โดยมีมุมคลีน 45 องศา.....	31
5.17 อิทธิพลของมุมปะทะการไหลต่อค่าตัวประกอบความเสียดทาน กรณี que cribhัยกเป็นแบบ V-shape upstream โดยมีมุมคลีน 45 องศา.....	32
5.18 อิทธิพลของมุมปะทะการไหลต่อสมรรถนะเชิงความร้อน กรณี que cribhัยกเป็นแบบ V-shape upstream โดยมีมุมคลีน 45 องศา.....	32
5.19 แสดงสตรีมไลน์ของช่องทางการไหล กรณี que cribhัยกเป็นแบบเอียง ที่เลขเรย์โนลด์ 880 ก.มุมปะทะการไหล 60 องศา และมุมคลีน 45 องศา ข.มุมปะทะการไหล 60 องศา และมุมคลีน 60 องศา.....	33
5.20 แสดงคอนทัวร์ของอุณหภูมิบริเวณกึ่งกลางของช่องทางการไหล กรณี que cribhัยกเป็นแบบเอียง ที่เลขเรย์โนลด์ 880 ก.มุมปะทะการไหล 60 องศา และมุมคลีน 45 องศา ข.มุมปะทะการไหล 60 องศา และมุมคลีน 60 องศา.....	34
5.21 แสดงคอนทัวร์ของเลขนัสเซลล์ต์บริเวณผิวท่อ กรณี que cribhัยกเป็นแบบเอียง ที่เลขเรย์โนลด์ 880 ก.มุมปะทะการไหล 60 องศา และมุมคลีน 45 องศา ข.มุมปะทะการไหล 60 องศา และมุมคลีน 60 องศา.....	34
5.22 อิทธิพลของมุมคลีนต่อเลขนัสเซลล์ต์เฉลี่ย กรณี que cribhัยกเป็นแบบเอียง โดยมีมุมปะทะการไหล 60 องศา.....	35
5.23 อิทธิพลของมุมคลีนต่อค่าตัวประกอบความเสียดทาน กรณี que cribhัยกเป็นแบบเอียง โดยมี มุมปะทะการไหล 60 องศา.....	35
5.24 อิทธิพลของมุมคลีนต่อสมรรถนะเชิงความร้อน กรณี que cribhัยกเป็นแบบเอียง โดยมี มุมปะทะการไหล 60 องศา.....	36

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.25 แสดงสตรีมไลน์ของช่องทางการไหล กรณีที่ crib หักเป็นแบบ V-Shape Downstream ที่เลขเรย์โนลด์ 880 ก.มุมปะทะการไหล 60 องศา และมุมคลื่น 30 องศา ข.มุมปะทะการไหล 60 องศา และมุมคลื่น 45 องศา.....	36
5.26 แสดงคอนทัวร์ของอุณหภูมิบริเวณกึ่งกลางของช่องทางการไหล กรณีที่ crib หักเป็นแบบ V-shape downstream ที่เลขเรย์โนลด์ 880 ก.มุมปะทะการไหล 60 องศาและ มุมคลื่น 30 องศา ข.มุมปะทะการไหล 60 องศาและมุมคลื่น 45 องศา.....	37
5.27 แสดงคอนทัวร์ของเลขนัสเซลล์ท์บริเวณผิวท่อ กรณีที่ crib หักเป็นแบบ V-shape upstream ที่เลขเรย์โนลด์ 880 ก.มุมปะทะการไหล 60 องศาและมุมคลื่น 30 องศา ข.มุมปะทะการไหล 60 องศาและมุมคลื่น 45 องศา.....	37
5.28 อิทธิพลของมุมคลื่นต่อเลขนัสเซลล์ท์เฉลี่ย กรณีที่ crib หักเป็นแบบ V-shape downstream โดยมีมุมปะทะการไหล 60 องศา.....	38
5.29 อิทธิพลของมุมคลื่นต่อค่าตัวประกอบความเสียดทาน กรณีที่ crib หักเป็นแบบ V-shape downstream โดยมีมุมปะทะการไหล 60 องศา.....	38
5.30 อิทธิพลของมุมคลื่นต่อสมรรถนะเชิงความร้อน กรณีที่ crib หักเป็นแบบ V-shape downstream โดยมีมุมปะทะการไหล 60 องศา.....	39
5.31 แสดงสตรีมไลน์ของช่องทางการไหล กรณีที่ crib หักเป็นแบบ V-Shape Upstream ที่เลขเรย์โนลด์ 880 ก.มุมปะทะการไหล 60 องศา และมุมคลื่น 30 องศา ข. Upstream มุมปะทะการไหล 60 องศา และมุมคลื่น 45 องศา.....	39
5.32 แสดงคอนทัวร์ของอุณหภูมิบริเวณกึ่งกลางของช่องทางการไหล กรณีที่ crib หักเป็นแบบ V-shape upstream ที่เลขเรย์โนลด์ 880 ก.มุมปะทะการไหล 60 องศาและมุมคลื่น 30 องศา ข.มุมปะทะการไหล 60 องศาและมุมคลื่น 45 องศา.....	40
5.33 แสดงคอนทัวร์ของเลขนัสเซลล์ท์บริเวณผิวท่อ กรณีที่ crib หักเป็นแบบ V-shape upstream ที่เลขเรย์โนลด์ 880 ก.มุมปะทะการไหล 60 องศาและมุมคลื่น 30 องศา ข.มุมปะทะการไหล 60 องศาและมุมคลื่น 45 องศา.....	40

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.34 อิทธิพลของมุมคลื่นต่อเลขน้สเซลล์ท์เฉลี่ย กรณีที่ cribhัยกเป็นแบบ V-shape upstream โดยมีมุมปะทะการไหล 60 องศา.....	41
5.35 อิทธิพลของมุมคลื่นต่อค่าตัวประกอบความเสียดทาน กรณีที่ cribhัยกเป็นแบบ V-shape upstream โดยมีมุมปะทะการไหล 60 องศา.....	41
5.36 อิทธิพลของมุมคลื่นต่อสมรรถนะเชิงความร้อน กรณีที่ cribhัยกเป็นแบบ V-shape downstream โดยมีมุมปะทะการไหล 60 องศา.....	42
5.37 อิทธิพลของเลขเรย์โนลด์ต่อเลขน้สเซลล์ท์เฉลี่ยที่มุมปะทะต่าง ๆ โดยมีมุมคลื่นคือ 60 องศา และเป็น cribhัยกแบบ V-shape downstream.....	42
5.38 อิทธิพลของเลขเรย์โนลด์ต่อค่าตัวประกอบความเสียดทานที่มุมปะทะต่าง ๆ โดยมีมุมคลื่นคือ 60 องศา และเป็น cribhัยกแบบ V-shape downstream.....	43
5.39 แสดงคอนทัวร์ของเลขน้สเซลล์ท์บริเวณผิวท่อ กรณีที่ cribhัยกเป็นแบบ V-shape downstream ที่เลขเรย์โนลด์ 880 ก.มุมปะทะการไหล 30 องศาและมุมคลื่น 60 องศา ข.มุมปะทะการไหล 30 องศาและมุมคลื่น 60 องศา.....	43

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันนี้เทคโนโลยีทางด้านพลังงานมีความต้องการสูงมาก เพราะยังประเทศมีความเจริญมากเท่าไรก็ยิ่งต้องใช้พลังงานมากเท่านั้น สำหรับเทคโนโลยีด้านพลังงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนถือว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญอย่างหนึ่ง ทั้งในระบบอุตสาหกรรมทั่วไป หรือแม้แต่อุตสาหกรรมขนาดใหญ่ โดยที่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีการใช้งานหลายรูปแบบ และมีการใช้งานอย่างกว้างขวางและแพร่หลายโดยมีตั้งแต่ขนาดเล็กไปจนถึงขนาดใหญ่ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยส่วนใหญ่จะทำหน้าที่ให้ความสะดวกแก่การถ่ายเทความร้อนของของไหล 2 ชนิดที่อุณหภูมิต่างกัน โดยในการถ่ายเทความร้อนของของไหลที่ร้อนอุณหภูมิจะลดลงและของไหลที่เย็นจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น กล่าวได้ว่าความแตกต่างของอุณหภูมิของของไหลทั้งสองจะเป็นตัวขับเคลื่อนให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนตามกฎของเทอร์โมไดนามิกส์โดยที่ความร้อนจะไหลจากที่ร้อนไปที่เย็น โดยทั่วไปสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนจะสัมพันธ์กับความดันลด (Pressure Drop) เนื่องจากแรงเสียดทานและการปรับปรุงสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนในบางครั้งจะทำให้สูญเสียแรงดันจึงทำให้ไม่คุ้มค่าเนื่องจาก อินพุตทางกลมีค่ามากแต่ อินพุตด้านพลังงานได้ค่าน้อย

เนื่องจากว่าในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน fin and tube นั้นเมื่อเกิดการถ่ายเทความร้อนที่มากขึ้นจะทำให้เกิด Friction ที่ไม่จำเป็นเพิ่มขึ้นมาด้วยจึงอาจจะกล่าวได้ว่าค่า Friction จะแปรผันตามการถ่ายเทความร้อนแต่ในทางปฏิบัติที่ต้องนำไปใช้งานจริงนั้นเราต้องการให้มีค่าการถ่ายเทความร้อนมากแต่ให้ Friction มีค่าน้อย

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการคำนวณด้านกลศาสตร์ของไหลและการถ่ายเทความร้อน ศึกษาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของครีบก้นชนิดต่างๆ ที่มีมุมคลื่นและมุมปะทะการไหลที่แตกต่างกันไป เพื่อค้นหาครีบก้นที่ได้ประสิทธิภาพดีที่สุด สำหรับผลการวิจัยที่ได้ยังสามารถนำไปเป็นแนวทางในการออกแบบและปรับปรุงครีบก้นให้มีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้นในอนาคตได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- (1) ศึกษาการวิเคราะห์เชิงตัวเลขพฤติกรรมการไหลค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบต่างๆที่มีอิทธิพลต่อการเพิ่มทางความร้อน
- (2) ศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของครีบบนราบเรียบและครีบบนที่ผ่านการปรับปรุงเป็นคลื่นรูปแบบต่างๆ

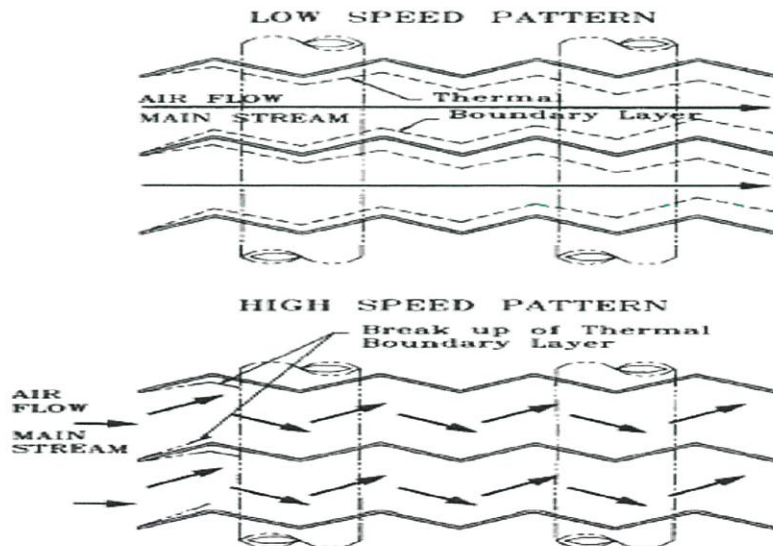
1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- (1) ใช้วิธีการคำนวณทางด้านกลศาสตร์ของไหล, การถ่ายเทความร้อนและวิธี finite Volume method
- (2) การศึกษาจะอยู่ในช่วงค่า Reynolds number ที่ 500 - 880
- (3) อากาศที่อุณหภูมิ 310 K ไหลผ่านท่อที่มีอุณหภูมิผิว 300 K โดยเป็นอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดทั้งผิวของท่อ
- (4) มุมของคลื่นที่ใช้ศึกษากำหนดให้ $\alpha = 30^\circ, 45^\circ$ และ 60°
- (5) มุมของปะทะที่เกิดจากการวางตัวในแนวต่างๆ $\beta = 30^\circ, 45^\circ$ และ 60°

บทที่ 2 (งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง)

บทนี้จะกล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการไหลและการถ่ายเทความร้อนของครีบบทที่มีการปรับปรุงรวมไปถึงการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ ผลงานของนักวิจัยในอดีต จะใช้วิธีการทดลอง การคำนวณเชิงตัวเลข หรือในบางครั้งก็ใช้ทั้ง 2 วิธีร่วมกัน โดยจะเน้นถึงงานวิจัยที่เกี่ยวกับพฤติกรรมของการถ่ายเททางความร้อนและค่าตัวประกอบความเสียหายเพื่อเป็นแนวทางในการนำไปวิเคราะห์การไหลและการถ่ายเทความร้อนของครีบบทอีกต่อไป

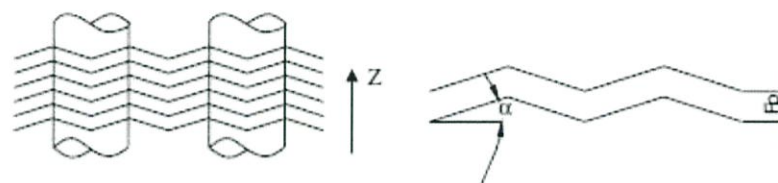
(Fu and Chang)[1] ได้ศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนและแรงเสียดทานของครีบบทในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ fin-and-tube โดยมีขอบเขตการศึกษาประกอบด้วย โมเดลของครีบบทแบบต่างๆ จำนวนแถวของท่อและช่องว่างของครีบบท โดยใช้อากาศเป็นตัวทดสอบซึ่งจะอยู่ในช่วงของเลขเรย์โนลด์ 400 ถึง 8000 โดยผลลัพธ์จะแสดงในรูปของค่าตัวประกอบความเสียหายและตัวประกอบของโคลเบิร์ต พวกเขาได้สรุปว่า ลักษณะการถ่ายเทความร้อนของครีบบททั้งแบบการวางท่อแนวเดียวกันและแนวเอียงจะมีผลกับช่องว่างครีบบท จำนวนแถวของท่อจะส่งผลกับค่าตัวประกอบความเสียหายทั้งการวางท่อแนวเดียวกันและแนวเอียง และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของครีบบทจะเพิ่มขึ้น 55% ถึง 70% เมื่อเทียบกับครีบบทเปล่า



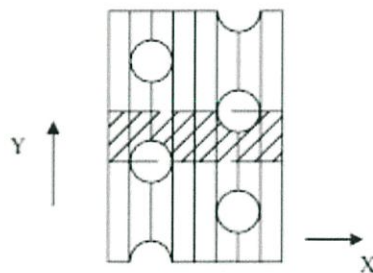
รูปที่ 2.1 ผลของจำนวนแถวของท่อต่อลักษณะการถ่ายเทความร้อนและแรงเสียดทานกรณีท่อวางตัวในแนวเดียวกัน (Fu and Chang)[1]

(Wongwises and Chokeman)[2] ได้ทำการทดลองและศึกษาผลของช่องว่างครีบ จำนวนแถวของท่อและความหนาของครีบต่อประสิทธิภาพของครีบหัยักโดยกำหนดขอบเขตการศึกษาที่เลขเรย์โนลด์มากกว่า 2500 แต่น้อยกว่า 4000 พวกเขาได้สรุปว่า 1.ตัวประกอบความเสียดทานจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อช่องว่างของครีบเพิ่มขึ้นโดยที่เลขเรย์โนลด์ต้องมากกว่า 2500 2.ตัวประกอบความเสียดทานจะลดลงเมื่อจำนวนแถวของท่อเพิ่มขึ้นโดยเลขเรย์โนลด์ต้องน้อยกว่า 4000 3.ตัวประกอบความเสียดทานจะเปลี่ยนไปเมื่อความหนาเปลี่ยนไปในช่วง 0.115 ถึง 0.250 mm

(Tao et al.)[3] ได้ศึกษาวิธีเชิงตัวเลขแบบ 3 มิติของครีบหัยักประกอบด้วย 4 ตัวแปรที่มีผลต่อการทดลองคือเลขเรย์โนลด์ในช่วงของการไหลแบบราบเรียบ ช่องว่างของครีบมีค่าระหว่าง 0.4 ถึง 5.2 mm มุมของคลื่นมีค่าระหว่าง 0° ถึง 50° และจำนวนแถวของท่อตั้งแต่ 1 ถึง 4 แถว พวกเขาสรุปว่า 1.เมื่อค่าเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้นจะทำให้เลขนัสเซิลท์และค่าตัวประกอบความเสียดทานเพิ่มขึ้น 2.ที่ช่องว่างของครีบมีค่าสูงที่สุดเลขนัสเซิลท์จะมีค่ามากที่สุดแต่ค่าตัวประกอบความเสียดทานจะลดลงเมื่อช่องว่างของครีบมีค่าเพิ่มขึ้น 3.ทั้งเลขนัสเซิลท์และตัวประกอบความเสียดทานจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมุมของคลื่นมีค่าเพิ่มขึ้น 4.เลขนัสเซิลท์และตัวประกอบความเสียดทานเฉลี่ยจะมีค่าลดลงเมื่อจำนวนแถวของท่อมีค่าเพิ่มขึ้น



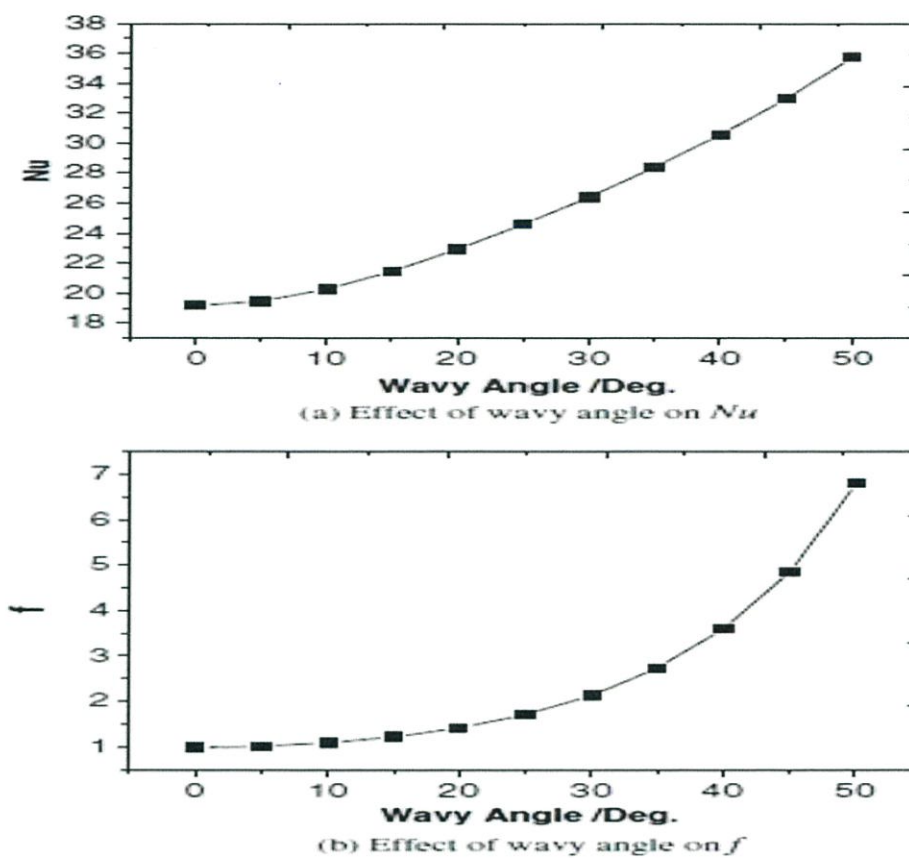
(a) Schematic of wavy fin-and-tube heat exchanger



(b) Schematic of computational domain

รูปที่ 2.2 ภาพจำลองโมเดลของครีบหัยักในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ fin-and-tube

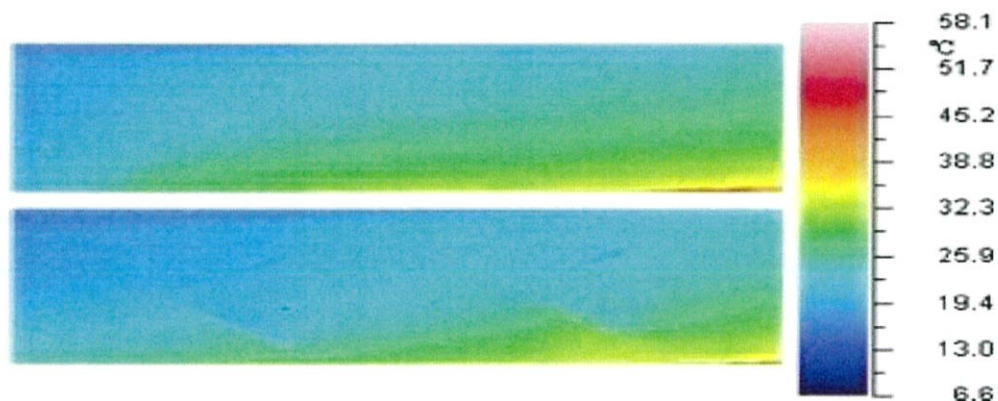
(Tao et al.)[3]



รูปที่ 2.3 ผลของมุมคลื่นต่อเลขนัสเซิลท์และตัวประกอบความเสียดทาน (Tao et al.)[3]

(Junqi et al.)[4] ได้ศึกษาความสัมพันธ์ของการถ่ายเทความร้อนและความดันลดลง (pressure drop) ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบก้นที่มีเงื่อนไขการศึกษาคือ ครีบก้นที่อากาศไหลผ่านมีทั้งหมด 11 แผ่น เลขเรย์โนลด์ที่ใช้ศึกษาจะอยู่ในช่วง 800 ถึง 6500 และอากาศที่ใช้ทดสอบมีอัตราการไหลคงที่ $2.5 \text{ m}^3/\text{h}$ พวกเขาได้สรุปเอาไว้ว่า ค่าตัวประกอบโคลเบิร์ตและตัวประกอบความเสียดทานจะลดลงเมื่อเลขเรย์โนลด์มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วง 800 ถึง 6500 และค่าตัวประกอบโคลเบิร์ตและตัวประกอบความเสียดทานจะเพิ่มขึ้นเมื่อช่องว่างของครีบก้นเพิ่มขึ้นในช่วงของเลขเรย์โนลด์เดียวกัน

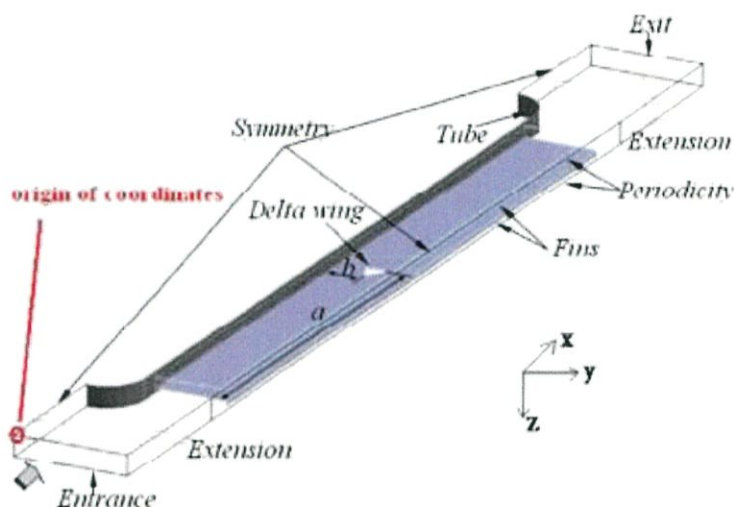
(Feng et al.)[5] ได้ทดลองติดตั้งเครื่องช่วยสร้างการไหลตามแนวราบบนครีบก้นซึ่งการวิจัยนี้ได้กำหนดให้การไหลอยู่ในช่วงของเลขเรย์โนลด์ 500 ถึง 4500 โดยพวกเขาได้สรุปว่า 1. การติดตั้งเครื่องช่วยสร้างการไหลบนครีบก้นจะทำให้เลขนัสเซิลท์เพิ่มขึ้นได้ 21 ถึง 60% โดยที่เลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 1500 ถึง 4500 2. การติดตั้งเครื่องช่วยสร้างการไหลบนครีบก้นทำให้เพิ่มความดันลดลง (pressure drop) จึงเป็นผลให้ค่าตัวประกอบความเสียดทานเพิ่มขึ้น 13 ถึง 83% โดยที่เลขเรย์โนลด์จะมีค่าอยู่ในช่วง 500 ถึง 4500 3. การติดตั้งเครื่องช่วยสร้างการไหล 6 อัน บนครีบก้นจะช่วยให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น 1.31 เท่า



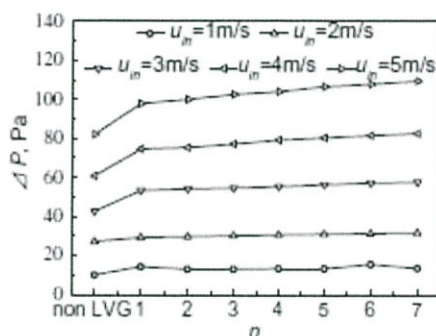
รูปที่ 2.4 เปรียบเทียบการกระจายของอุณหภูมิบนผิวของครีบหยักที่ติดและไม่ติดเครื่องช่วยสร้างการไหล (Feng et al.)[5]

(Ling et al.)[6] ได้ศึกษาพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนและความดัน เมื่อทำการติดปีก (winglet) ชนิดสี่เหลี่ยมมุมฉาก (Rectangular) โดยมีการกำหนดให้อุณหภูมิของของไหลที่ทางเข้าคือ 310.6 K ค่าเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) อยู่ระหว่าง 550 – 880 และอุณหภูมิที่ผิวท่อคือ 291.77 K และในการติดปีก (winglet) มีการกำหนดให้มุมปะทะใช้สัญลักษณ์ α โดยที่มีขนาด 0° (ในกรณีที่ไม่มีการติดปีก เพื่อใช้เปรียบเทียบ) 10° , 20° , 30° , พวกเขาสรุปว่าเมื่อปีก (winglet) มีมุมปะทะมากขึ้นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนก็จะมากขึ้นโดยที่มุม 10° คือ 28.8 - 34.5% , มุม 20° คือ 54.6 - 61.5% , มุม 30° คือ 83.3 - 89.7 % และยังพบว่าเมื่อ จำนวนของ Rectangular winglet pairs เพิ่มขึ้นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะดีขึ้น ในงานวิจัยนี้จำนวนที่ดีที่สุดคือ 7-RWPS แต่เมื่อค่าเลขเรย์โนลด์มีค่ามากกว่า 815 ขึ้นไป single-RWPS และ 3-RWPS จะได้ผลดีที่สุดและยังพบว่าการติดปีก (winglet) ไม่ตรงแถว จะทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเหมือนกับการติดปีก (winglet) ตรงแถว และการติดปีก (winglet) ไม่ตรงแถวยังช่วยลดการสูญเสียความดันที่ทางออกอีกด้วย

(Du et al.)[7] ได้ทำการทดลองการเพิ่มความร้อนให้กับครีบหยักท่อแบนโดยการเจาะติดเครื่องช่วยสร้างการไหล(vortex generators)ตามแนวยาว มีขอบเขตการศึกษาคือ มุมปะทะของปีกเท่ากับ 25° ความเร็วของอากาศที่ใช้ทดสอบจะมีค่าอยู่ในช่วง 1 ถึง 5 m/s จำนวนแถวของท่อจะมีอิทธิพลต่อการศึกษาโดยที่จำนวนแถวของท่อน้อยที่สุดคือ 1 แถว พวกเขาได้สรุปเอาไว้ว่า 1.ปีกช่วยสร้างการไหลจะมีผลต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและปีกช่วยสร้างการไหลที่ดีที่สุดจะมีมุม 25° 2.บริเวณที่ปีกช่วยสร้างการไหลจะมีผลต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนมากที่สุดคือตรงกลางของครีบ 3.ความดันลดลง (pressure drop)จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อติดปีกช่วยสร้างการไหล 1 อัน



รูปที่ 2.5 การเจาะติดปีกช่วยสร้างการไหลลงบนผิวครีบหยักอย่างง่าย (Du et al.)[7]



รูปที่ 2.6 อิทธิพลการติดปีกช่วยสร้างการไหลต่อความดันลดลง (pressure drop) (Du et al.)[7]

(Gholami et al.)[8] ได้ศึกษาหาผลการเพิ่มความร้อนและความดันโดยมีการจำลองการไหลและเปรียบเทียบ 4 อย่างคือ 1.ไม่ติดปีก (Winglet) 2.ติดปีก (Winglet) แบบ Rectangular 3.ติด Rectangular winglet แบบ wavy ในลักษณะคว่ำ 4.ติด Rectangular winglet แบบ wavy ในลักษณะหงาย โดยในการศึกษานี้ค่าเลขเรย์โนลด์จะขึ้นอยู่กับความเร็วที่ทางเข้าจะอยู่ในช่วง 400-800 พวกเขา กล่าวว่า fin and tube compact heat exchanger ที่ติดปีก (winglet) แบบคว่ำและหงาย จะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น

(Jedsadaratanachai and boonloi)[9] ได้ศึกษาด้วยการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการประเมินประสิทธิภาพทางความร้อน เมื่อติดตั้ง ปีก(winglet) ชนิด delta โดยมีขอบเขตการศึกษาคือระยะที่วัดจากศูนย์กลาง tube ถึง ปีก(winglet) โดยมีทั้งหมด 3 ค่าคือ 3.77 mm. , 4.77 mm และ 5.77 mm มุมปะทะที่ศึกษาใช้สัญลักษณ์ มีทั้งหมด 4 ค่าคือ 15° , 30° , 45° และ 60° ลักษณะของการไหลจะอยู่ในช่วงค่าเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 500 - 2500 โดยพวกเขาได้สรุปว่า การติดปีกที่ครีบชนิด delta ไม่เพียงแต่เพิ่ม

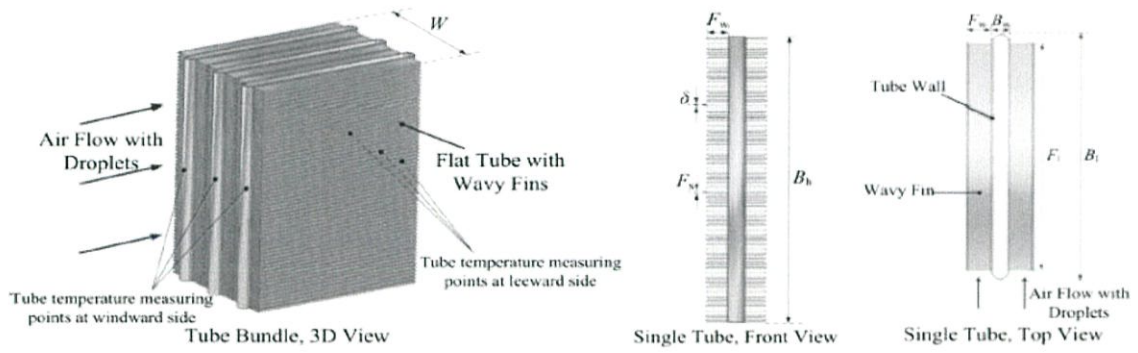
อัตราการถ่ายเทความร้อนเท่านั้น แต่ยังเพิ่มการสูญเสียความดันอีกด้วย และจุดที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนมากที่สุดคือแถวที่ 2 นอกจากนี้การเพิ่มมุมปะทะให้มีค่ามากขึ้นจะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น แต่ก็จะทำให้แรงเสียดทานเพิ่มขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน ที่มุมปะทะ 60° จะทำให้ค่าเลขเรย์โนลด์ และค่า friction factor สูงที่สุดและยังพบอีกว่าความแตกต่างของระยะปีก (winglet) ถึงจุดศูนย์กลางtube จะทำให้ค่าเลขเรย์โนลด์ และ friction factor แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย

(Li et al.)[10] ได้ศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของปีก (winglet) ชนิดสี่เหลี่ยมมุมฉาก (Rectangular) คือ 0° , 10° , 15° , 20° , 25° , 30° , 45° และ 60° และมีการกำหนดให้ความเร็วที่ทางเข้าคือ 1-6 m/s และศึกษาที่เลขเรย์โนลด์ช่วง 450-3000 พวกเขาสรุปว่าค่าเลขนัสเซลท์จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มมุมปะทะ และจะมีค่าได้มากที่สุดถึง 20%

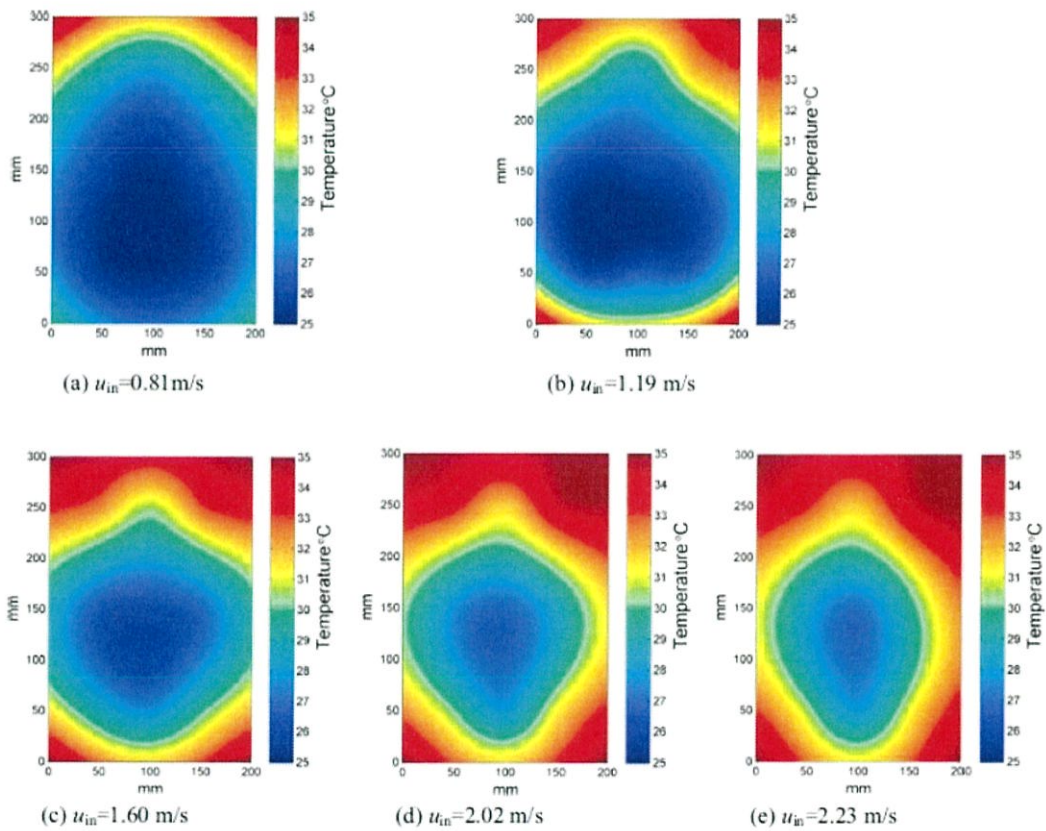
(Zhang et al.)[11] ได้ศึกษาการจำลองและการทดลองของครีบหยักในเครื่องอินเตอร์คูล ซึ่งในงานวิจัยนี้ลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนจะใช้โปรแกรม FLUENT ในการศึกษาพวกเขาได้สรุปว่าการถ่ายเทความร้อนจะสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิของอากาศลดลง

(Sarangi and Mishra)[12] ได้ศึกษาลักษณะของการถ่ายเทความร้อนและตัวแปรทางความร้อนเมื่อติดปีก (winglet) ไว้ที่ตำแหน่งต่างๆ โดยในงานวิจัยนี้กำหนดให้มีท่อ 3 ท่อและติดปีก (winglet) ที่ท่อ 1 และ 2 โดยในการศึกษานี้ไม่มีการกำหนดขอบเขตไว้ชัดเจน คืออุณหภูมิของของไหลที่ทางเข้าคือ 310.6K ค่า Reynolds number คือ 643 และอุณหภูมิที่ผิวของท่อคือ 291.77 K และในการติดปีก (winglet) ได้มีการกำหนดให้มีมุมปะทะเท่ากับ 5° , 10° , 15° , 20° , 25° พวกเขาได้สรุปว่าจากการศึกษาทำให้พบว่าเมื่อมุมปะทะมีองศาเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าเลขนัสเซลท์มีค่ามากขึ้นและพบว่าที่ 3 winglet pair ดีที่สุด จึงจะทำให้การถ่ายเทความร้อนมีประสิทธิภาพมากขึ้นถึง 47 % และปีก (winglet) ในท่อที่ 2 มีการถ่ายเทความร้อนได้มากที่สุดคือ 21% โดยหากใช้ปีก (winglet) คู่ติดใกล้กับท่อที่สองจะทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนสูงสุดถึง 37% เมื่อเทียบกับไม่ติดปีก (winglet) และจากการศึกษานี้ยังทำให้เรารู้จักว่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยโดยการเพิ่มมุมปะทะถึง 20° เมื่อเทียบกับการไม่ติดปีก (winglet) จะทำให้ค่าเลขนัสเซลท์เพิ่มขึ้นได้ถึง 60%

(Xiao et al.)[13] ได้ทำการทดลองการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของครีบหยักท่อแบนโดยการพ่นละอองน้ำเย็นซึ่งจะมีเงื่อนไขของการทดลองคือใช้อากาศเป็นตัวทดสอบ ซึ่งจะมีช่วงของเลขเรย์โนลด์อยู่ที่ 210 ถึง 680 และมีน้ำไหลบนท่อ พวกเขาได้สรุปว่า 1.ประสิทธิภาพการทำความเย็นจะลดลงเมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้นและเมื่อเพิ่มความเร็วของน้ำจะทำให้ประสิทธิภาพการทำความเย็นเพิ่มขึ้น 2.อัตราการพ่นละอองน้ำโดยใช้ของเหลวจะมีผลต่อเลขนัสเซลท์น้อยมากเมื่ออยู่ในช่วงเลขเรย์โนลด์ 210 ถึง 400 แต่ในทางตรงกันข้ามเลขนัสเซลท์จะมีผลอย่างเห็นได้ชัดเมื่ออัตราการพ่นละอองน้ำที่มีค่าเลขเรย์โนลด์มากกว่า 400

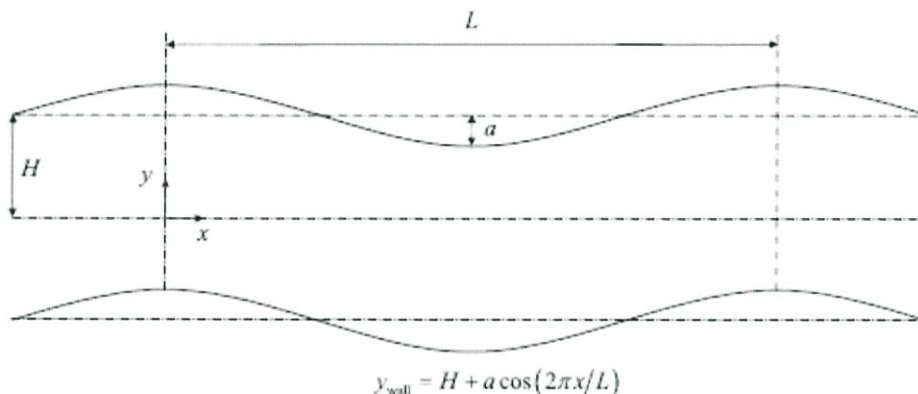


รูปที่ 2.7 โมเดลของครีบหยักท่อแบน (Xiao et al.) [13]

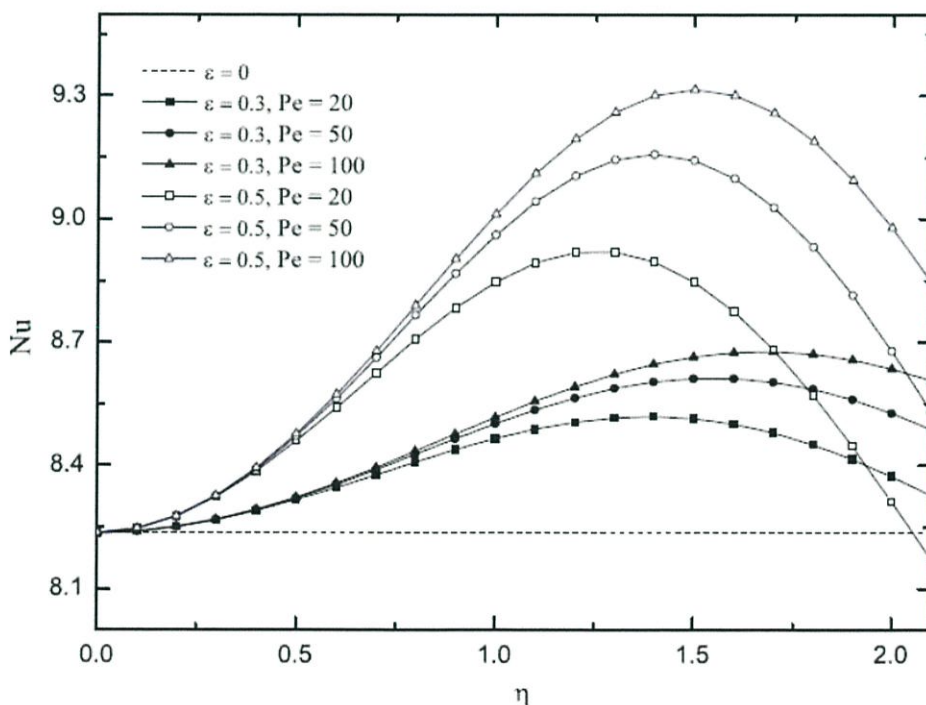


รูปที่ 2.8 การกระจายตัวของอุณหภูมิเมื่อความเร็วของอากาศเปลี่ยนไป (Xiao et al.) [13]

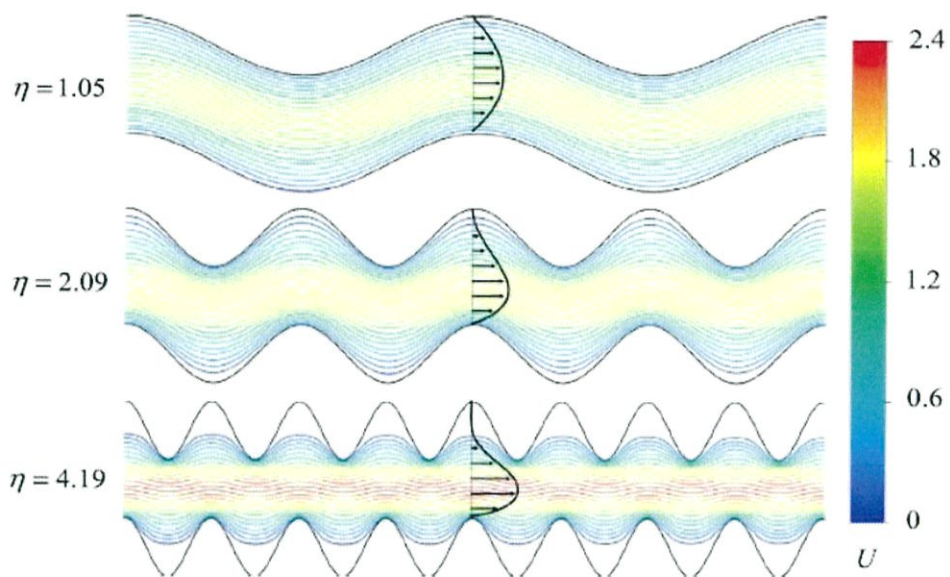
(Yu et al.)[14] ได้ศึกษาการวิเคราะห์ปัญหาของตัวประกอบความเสียดทานและเลขนัสเซลล์ท์ สำหรับการไหลที่มีเลขเรย์โนลด์น้อยๆระหว่างครีบก้น 2 แผ่น โดยการศึกษาจะกำหนดตัวแปรที่สำคัญ 3 อย่างคือ ช่องว่างครีบก้นมีขนาด $2H$, ความสูงของคลื่น a และความยาวของคลื่น L ลักษณะการไหลในที่นี้ได้มีการสมมติให้เป็นการไหลแบบ 2 มิติ โดยพวกเขาได้สรุปว่า ค่าเลขนัสเซลล์ท์ที่ได้จากการเปรียบเทียบเป็นที่ยอมรับได้มีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ $\pm 3.5\%$ เลขนัสเซลล์ท์จะมีค่าเพิ่มขึ้นถึงค่าสูงสุดและลดลงเมื่อสัดส่วนของช่องว่างครีบก้นต่อความยาวคลื่นเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.9 แบบจำลองของครีบก้น (Yu et al.)[14]



รูปที่ 2.10 ผลของเลขนัสเซลล์ท์ (Yu et al.)[14]



รูปที่ 2.11 เส้นการเคลื่อนที่และโปรไฟล์ความเร็วที่ตัดส่วนของช่องว่างครีบและความคลื่นเปลี่ยนไป (Yu et al.)[14]

บทที่ 3

สมการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้เราจะกล่าวถึงแบบจำลองทางฟิสิกส์ ที่ใช้สำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของของไหลผ่านครีป (Fin) ที่ทำการปรับปรุงผิวแล้ว และกล่าวถึงสมการที่ใช้วิเคราะห์ลักษณะการไหลแบบปั่นป่วน โดยจะใช้ซอฟต์แวร์ที่จำหน่ายในระดับสากลและเป็นที่แพร่หลายในปัจจุบันเป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ ซึ่งระเบียบวิธีที่ซอฟต์แวร์เหล่านี้ใช้ในการวิเคราะห์ ถูกเรียกว่าระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite Volume)

3.1 สมมติฐานการไหล, สมการควบคุม (Governing equations) และสภาวะขอบเขต (Boundary conditions)

การไหลและการถ่ายเทความร้อน ของท่อทรงกลมที่มีการติดตั้งครีป มีสมมติฐานของการไหล ดังนี้

- (1) ของไหลถูกพิจารณาให้เป็นของไหลอัดตัวไม่ได้
- (2) คุณสมบัติต่าง ๆ ของของไหลมีค่าคงที่
- (3) การไหลเป็นแบบราบเรียบ (laminar) และสม่ำเสมอ (steady) เนื่องจากมีความเร็วเข้าต่ำและมีระยะห่างครีปน้อย
- (4) ไม่พิจารณาแรงวัตถุและการแพร่เนื่องจากความหนืด
- (5) ไม่พิจารณาการแผ่รังสีความร้อน

สมการควบคุมการไหลประกอบไปด้วยสมการความต่อเนื่อง สมการโมเมนตัม (หรือเรียกว่า สมการนาเวียร์-สโตกส์) และสมการพลังงาน ภายใต้สมมติฐานข้างต้น สมการดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังนี้

สมการความต่อเนื่อง (Continuity equation)

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

สมการโมเมนตัม (Momentum equation)

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_k) = \frac{\partial}{\partial x_i} (u \frac{\partial u_k}{\partial x_i}) - \frac{\partial p}{\partial x_k} \quad (3.2)$$

สมการพลังงาน (Energy equation)

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

เมื่อ Γ คือ สัมประสิทธิ์การแพร่เชิงความร้อน ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้ $\Gamma = \mu/Pr$ (3.4)

3.2 สภาวะขอบเขต (Boundary condition)

สภาวะขอบเขตสำหรับพื้นผิวทั้งหมดถูกกำหนดดังต่อไปนี้

3.2.1 พื้นที่เหนือของไหล

- ที่ทางเข้าของของไหล

$$u = u_{in} = const \quad (3.5)$$

$$v = w = 0 \quad (3.6)$$

$$T = T_{in} = const \quad (3.7)$$

- ที่จุดสูงสุดและจุดต่ำสุด

$$\text{พิจารณาค่าความเร็ว } u_{up} = u_{down} \quad (3.8)$$

$$\text{พิจารณาค่าอุณหภูมิ } T_{up} = T_{down} \quad (3.9)$$

- ที่พื้นที่ด้านข้าง

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial w}{\partial y} = 0 \quad (3.10)$$

$$v = 0 \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (3.12)$$

3.2.2 พื้นที่ใต้ของไหล

- ที่จุดสูงสุดและจุดต่ำสุด

$$\text{พิจารณาค่าความเร็ว } u_{up} = u_{down} \quad (3.13)$$

$$\text{พิจารณาค่าอุณหภูมิ } T_{up} = T_{down} \quad (3.14)$$

- ที่พื้นที่ด้านข้าง

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial w}{\partial y} = 0 \quad (3.15)$$

$$v = 0 \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (3.17)$$

- ที่ทางออก

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (3.18)$$

3.2.3 ในพื้นที่ขดครีบ

- ที่จุดต่ำสุดและจุดสูงสุด

$$\text{พิจารณาความเร็ว } u_{up} = u_{down} \quad (3.19)$$

$$\text{พิจารณาอุณหภูมิ } T_{up} = T_{down} \quad (3.20)$$

- ที่พื้นที่ด้านข้าง

$$\text{บริเวณของไหล : } \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial w}{\partial y} = 0, v = 0, \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (3.21)$$

$$\text{บริเวณผิวครีบ : } u = v = w = 0, \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (3.22)$$

$$\text{บริเวณท่อ : } u = v = w = 0, T = T_w = \text{const} \quad (3.23)$$

3.3 นิยามของตัวแปรเสริมต่างๆ

3.3.1 สภาวะการไหล

การไหลบนผิวครีบนั้น ความหนืดของของไหลจะทำให้อนุภาคเล็กๆ ของของไหลยึดติดอยู่กับผิววัตถุ โดยมีความเร็ว $U = 0$ ทำให้เมื่อของไหลยิ่งเข้าใกล้ผิววัตถุ จะทำให้เกิดชั้นบางๆ ที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหล เรียกว่าชั้นขอบเขตความเร็ว (Velocity Boundary) ส่วนการไหลที่อยู่นอกขอบเขตนี้ เรียกว่าเส้นไหลหลัก (Mainstream)

สำหรับการไหลบนผิวเรียบนั้น เลขเรย์โนลด์สำหรับการไหลกำหนดโดย

$$Re = \frac{\rho v_m D_h}{\mu} \quad (3.24)$$

โดยที่ v_m คือ ความเร็วเฉลี่ยในพื้นที่หน้าตัดการไหลที่น้อยที่สุดในช่องการไหล

μ คือ ค่าความหนืดพลวัตของของไหล

D_h คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก

3.3.2 เลขนัทเชิลท์

เลขนัทเชิลท์ (Nusselt Number : Nu) ถูกกำหนดค่าโดย

$$Nu = \frac{h D_h}{\lambda} \quad (3.25)$$

โดยที่ λ คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน

3.3.3 ตัวประกอบความเสียดทาน

ตัวประกอบความเสียดทาน (Friction Factor : f) ถูกพิจารณาจากการลดลงของความดันของของไหล มีค่าเท่ากับ

$$f = \frac{\Delta P}{\frac{\rho v_m^2}{2} \left(\frac{A_T}{A_{min}} \right)} \quad (3.26)$$

โดยที่ A_T คือ พื้นที่ทั้งหมดที่มีการถ่ายโอนความร้อน

A_{min} คือ พื้นที่หน้าตัดที่น้อยที่สุดของการไหล

3.3.4 สมรรถนะเชิงความร้อน (Thermal enhancement factor)

สมรรถนะเชิงความร้อน (Thermal enhancement factor : TEF) หรือค่าการเพิ่มขึ้นทางความร้อน สามารถคำนวณได้จาก

$$TEF = \frac{(Nu/Nu_0)}{(f/f_0)^{1/3}} \quad (3.27)$$

โดยที่ TEF คือ ค่าสมรรถนะสมรรถนะเชิงความร้อน

Nu คือ เลขนัสเซิลท์เฉลี่ยทั้งผิวท่อของครีบริบผิวหยัก

Nu_0 คือ เลขนัสเซิลท์เฉลี่ยทั้งผิวท่อของครีบริบผิวเรียบ

f คือ ตัวประกอบเสียดทานของครีบริบผิวหยัก

f_0 คือ ตัวประกอบเสียดทานของครีบริบผิวเรียบ

บทที่ 4

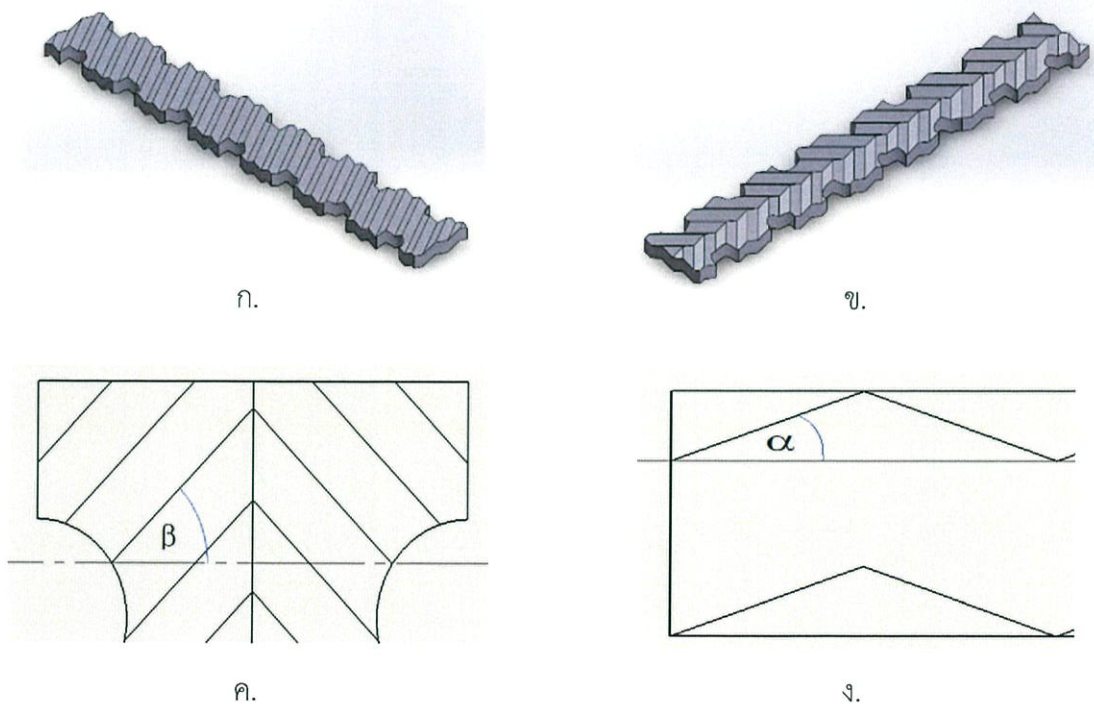
การกำหนดปัญหาและตรวจสอบผลการคำนวณ

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงลักษณะของปัญหาในการทำการวิจัยและตรวจสอบโปรแกรมที่ใช้กับผลเฉลยแม่นยำ(Exact Solution) ซึ่งลักษณะปัญหาที่ใช้ในการจำลองคือการถ่ายเทความร้อนของครีบบนที่ผ่านการปรับปรุงเป็นครีบบนหัก(wavy fin)

4.2 การกำหนดลักษณะของปัญหาที่ใช้ในการวิจัย

งานวิจัยนี้เราศึกษาครีบบนที่ถูกปรับปรุงให้เป็นครีบบนหัก (Wavy fin) โดยครีบบนหักมี 3 แบบคือครีบบนหักที่มีการวางตัวในแนวเฉียง(Incline wavy fin) รูปตัววีแบบคว่ำ(V-shape downstream)และรูปตัววีแบบหงาย(V-shape upstream) ทำมุม β เท่ากับ 30, 45 และ 60 องศา มุมของคลื่น α เท่ากับ 30, 45 และ 60 องศาตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และในกรณีศึกษาต่างๆได้แสดงในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงแบบจำลองกรณีศึกษา ก.ครีบบนหักแบบเฉียง ข.ครีบบนหักแบบ V-shape ค.มุมปะทะการไหล ง.มุมคลื่น

ตารางที่ 4.1 ลักษณะของกรณีศึกษาครีบทรงรีรูปแบบต่างๆที่มุมปะทะและมุมคลื่นเปลี่ยนไป

คลื่นวางตัวในแนวราบ	
กรณีศึกษา	มุมคลื่น 30 °
	มุมปะทะ
กรณีศึกษาที่ 1	30 °
กรณีศึกษาที่ 2	45 °
กรณีศึกษาที่ 3	60 °
	มุมคลื่น 45 °
	มุมปะทะ
กรณีศึกษาที่ 4	30 °
กรณีศึกษาที่ 5	45 °
กรณีศึกษาที่ 6	60 °
	มุม 60 °
	มุมปะทะ
กรณีศึกษาที่ 7	30 °
กรณีศึกษาที่ 8	45 °
กรณีศึกษาที่ 9	60 °
คลื่นวางตัวในแนวเฉียง	
กรณีศึกษา	มุมคลื่น 30 °
	มุมปะทะ
กรณีศึกษาที่ 10	30 °
กรณีศึกษาที่ 11	45 °
กรณีศึกษาที่ 12	60 °
	มุมคลื่น 45 °
	มุมปะทะ
กรณีศึกษาที่ 13	30 °
กรณีศึกษาที่ 14	45 °
กรณีศึกษาที่ 15	60 °
	มุม 60 °
	มุมปะทะ

กรณีศึกษาที่ 16	30 °
กรณีศึกษาที่ 17	45 °
กรณีศึกษาที่ 18	60 °
คลื่นวางตัวรูป V แบบคว่ำ	
กรณีศึกษา	มุม 30°
	มุมปะทะ
กรณีศึกษาที่ 19	30 °
กรณีศึกษาที่ 20	45 °
กรณีศึกษาที่ 21	60 °
	มุม 45 °
	มุมปะทะ
กรณีศึกษาที่ 22	30 °
กรณีศึกษาที่ 23	45 °
กรณีศึกษาที่ 24	60 °
	มุม 60 °
	มุมปะทะ
กรณีศึกษาที่ 25	30 °
กรณีศึกษาที่ 26	45 °
กรณีศึกษาที่ 27	60 °
คลื่นวางตัวรูป V แบบหงาย	
กรณีศึกษา	มุม 30°
	มุมปะทะ
กรณีศึกษาที่ 28	30 °
กรณีศึกษาที่ 29	45 °
กรณีศึกษาที่ 30	60 °
	มุม 45 °
	มุมปะทะ
กรณีศึกษาที่ 31	30 °
กรณีศึกษาที่ 32	45 °
กรณีศึกษาที่ 33	60 °

	มุม 60°
	มุมปะทะ
กรณีศึกษาที่ 34	30°
กรณีศึกษาที่ 35	45°
กรณีศึกษาที่ 36	60°

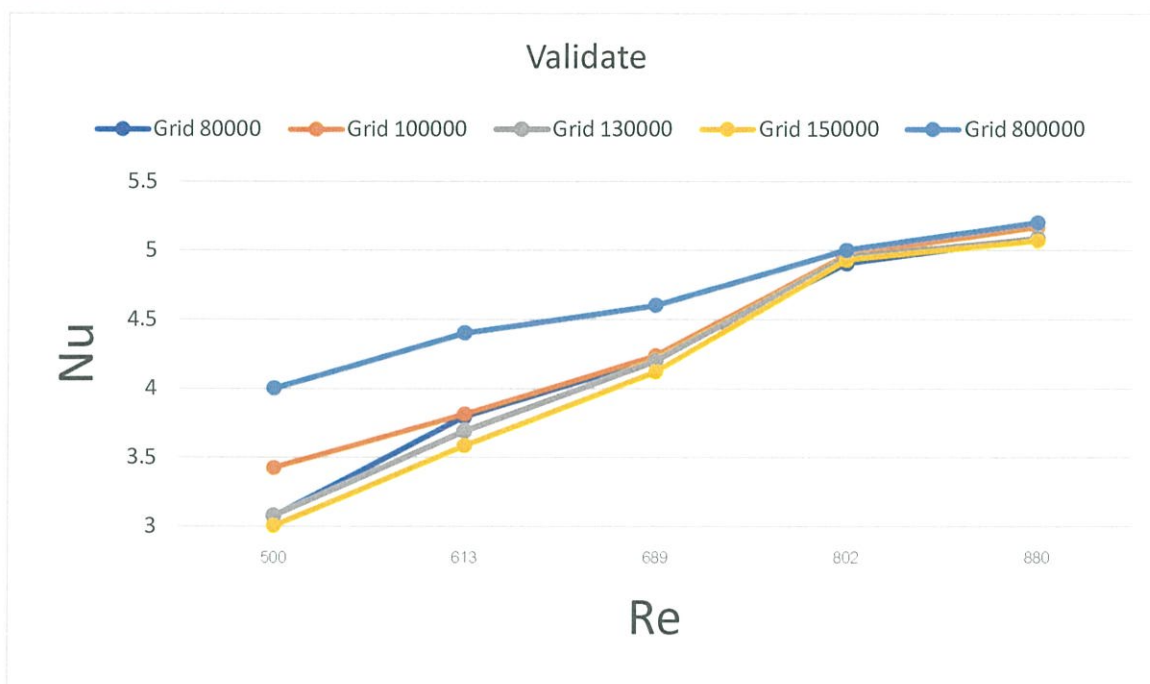
4.3 ค่าเงื่อนไขขอบเขตในการคำนวณการไหลสามมิติ

ในการคำนวณสามมิติได้ใช้เงื่อนไขขอบเขตดังต่อไปนี้

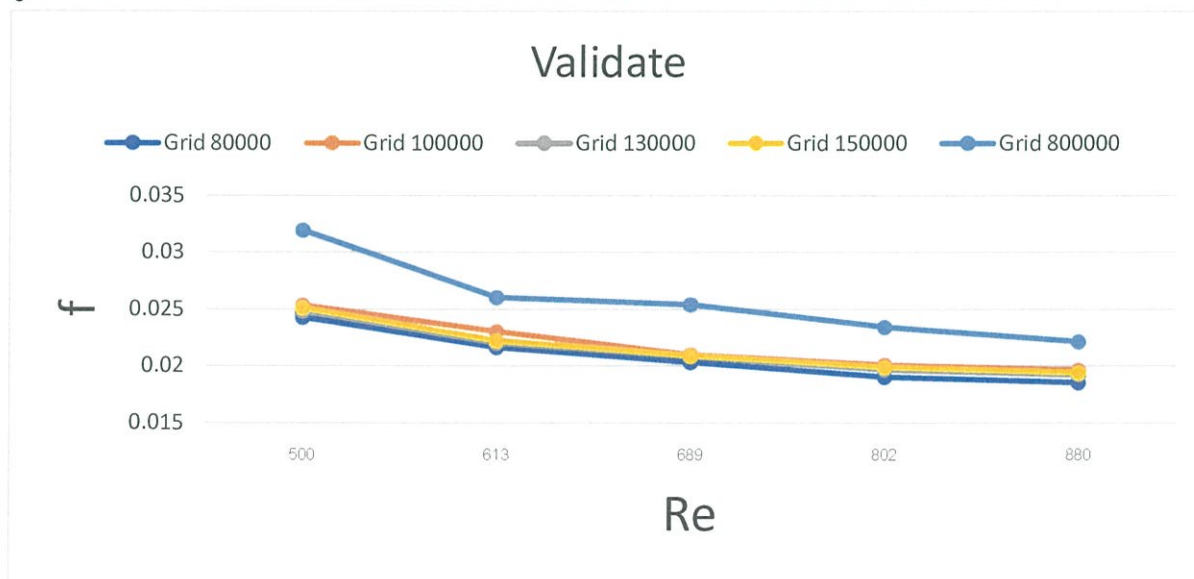
- (1) สภาวะทางเข้าเป็น Mass Flow Inlet และทางออกเป็น Pressure Outlet อากาศไหลเข้าด้วยอัตราการไหลสม่ำเสมอ
- (2) กำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ผนังด้านซ้ายและด้านขวาเป็นแบบสมมาตร (symmetry)
- (3) กำหนดให้อากาศที่ทางเข้าอุณหภูมิคงที่เท่ากับ 310 K
- (4) กำหนดให้ที่ผิวท่อมีอุณหภูมิคงที่เท่ากับ 300 K
- (5) กำหนดให้ที่ผนังด้านบนและด้านล่างมีฟลักซ์ความร้อนเท่ากับ 0 w/m²

4.4 การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม

Ling He, Chu, Quan Tao, Wen Zhang และ Xia, (2012). ได้ศึกษาความถูกต้องของโปรแกรม โดยวิเคราะห์การไหลในช่วงเลขเรย์โนลด์ 500 ถึง 880 เพื่อวิเคราะห์ค่าของเลขนัสเซิลท์ และค่าตัวประกอบความเสียดทาน



รูปที่ 4.2 แสดงผลการตรวจสอบค่าเลขนัสเซิลท์ของการถ่ายเทความร้อนของครีบบรรอบเรียบ



รูปที่ 4.3 แสดงผลการตรวจสอบค่าตัวประกอบความเสียดทานของการถ่ายเทความร้อนของครีบบรรอบเรียบ

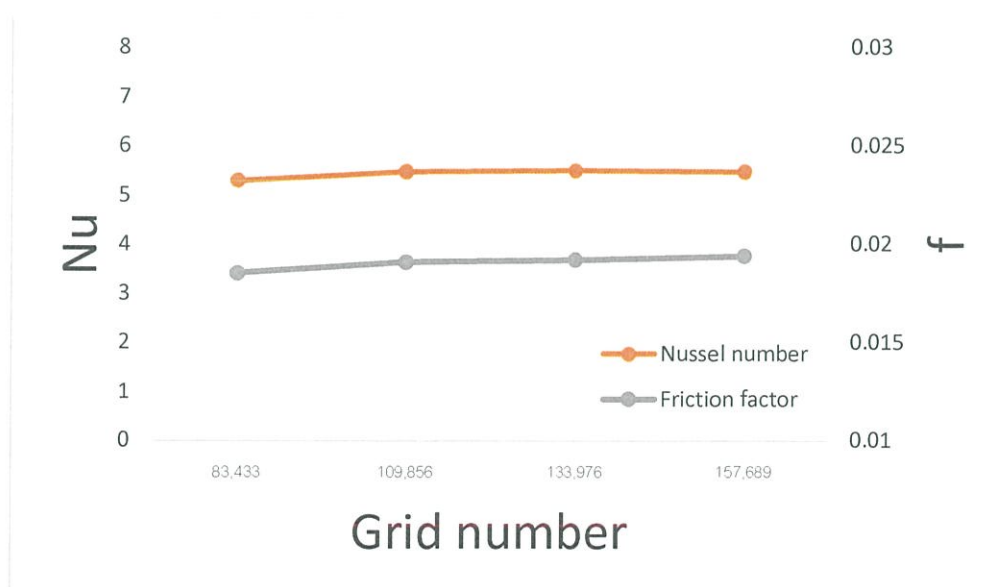
ผลการเปรียบเทียบดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.2 และ 4.3 ซึ่งสังเกตได้ว่าที่เลขเรย์โนลด์ 500 เลขนัสเซิลท์และค่าตัวประกอบความเสียดทานจะมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงที่สุดอยู่ที่ $\pm 14.38\%$ และ $\pm 20.69\%$ ตามลำดับ

4.5 การตรวจสอบความเป็นอิสระของผลเฉลยจากจำนวนกริดเซลล์

กริดที่ใช้สำหรับกรณีแผ่นครีบหยักมีการแบ่งกริดแบบสม่ำเสมอ (Uniform Grid) ส่วนการหาผลกระทบของกริดที่มีผลต่อคำตอบศึกษาโดยใช้กริดที่แตกต่างกันที่จำนวน 80,000 , 100,000 , 130,000 และ 150,000 โดยมีเงื่อนไขขอบเขตตามหัวข้อที่ 4.3 การรู้เข้าหาคำตอบของทุกค่าจะอยู่ที่ 1×10^{-5} ยกเว้นสมการพลังงานโดยจะมีค่าอยู่ที่ 1×10^{-9} จากการทดลองทำให้พบว่าเมื่อจำนวนกริดเพิ่มขึ้นจาก 80,000 ถึง 100,000 ค่านัสเซิลท์จะมีความคลาดเคลื่อนจากผลเฉลยแม่นยำตรง 7.38% และค่าตัวประกอบความเสียดทานจะมีความคลาดเคลื่อนจากผลเฉลยแม่นยำตรง 14.992% ดังนั้นจึงเลือกปริมาณของกริดที่ 100,000 ซึ่งปริมาณกริดนี้จะถูกนำไปใช้ในการศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ต่างๆต่อไป

ตารางที่ 4.2 จำนวนของกริดเซลล์ที่มีผลต่อค่า Nu และ f

Grid Number	80,000	100,000	130,000	150,000
Nu	5.090867	5.1696446	5.086121	5.069804
f	0.01852	0.0196	0.0192	0.0194



รูปที่ 4.4 อิทธิพลของกริดเซลล์ต่อค่า Nu และ f ที่ $Re=880$

บทที่ 5

ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและการอภิปราย

5.1 บทนำ

ในกระบวนการของการเพิ่มสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อน จะต้องพิจารณาถึงการสูญเสียความดันเนื่องจากความเสียดทาน สาเหตุเพราะการสูญเสียความดันที่เกิดขึ้น ทำให้เราต้องเพิ่มพลังงานให้กับระบบมากขึ้นผ่านคอมเพรสเซอร์หรือพัดลมที่ใช้ในการขับเคลื่อนของไหลสำหรับการแลกเปลี่ยนความร้อน เพราะฉะนั้นจึงจำเป็นต้องออกแบบและเลือกใช้อุปกรณ์ในกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนอย่างถี่ถ้วน โดยพิจารณาถึงอัตราการถ่ายเทความร้อนและกำลังทางกลที่ใช้ในการขับเคลื่อนของไหล

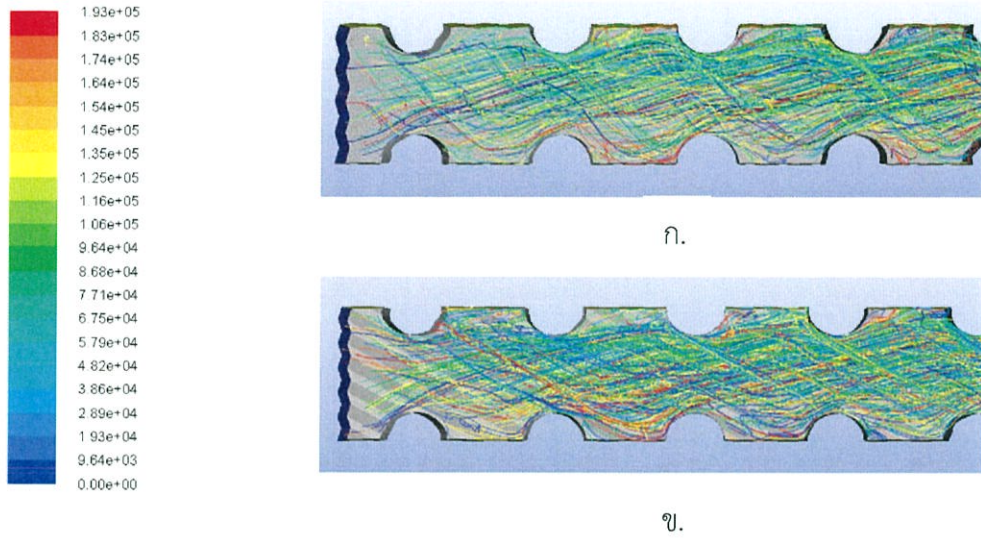
ในบทนี้จะกล่าวถึงการศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวท่อและอากาศโดยการจำลองเชิงตัวเลข ซึ่งการถ่ายเทความร้อนถูกแสดงในเทอมของเลขนัยสเกลาร์ และผลของการสูญเสียความดันจะถูกแสดงในเทอมของตัวประกอบความเสียดทาน จากการพิจารณาตัวแปรทั้งสองจะนำไปสู่การวิเคราะห์สมรรถนะเชิงความร้อนของท่อที่มีอุณหภูมิผิวคงที่ (Constant Surface Temperature) โดยการศึกษาจะพิจารณาถึงสภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์ พฤติกรรมการไหล และลักษณะการถ่ายเทความร้อน อีกทั้งยังได้ทำการศึกษาอิทธิพลของมุมปะทะที่ $\beta = 30^\circ, 45^\circ$ และ 60° ตามลำดับ และอิทธิพลของมุมคลื่นของครีบหยักที่ $\alpha = 30^\circ, 45^\circ$ และ 60° ตามลำดับ ซึ่งทั้งหมดนี้จะพิจารณาที่อัตราส่วนปิดกั้นการไหล เท่ากับ 0.4 โดยทำการศึกษากาการไหลแบบราบเรียบในช่วงเลขเรย์โนลด์ 500 ถึง 880

5.2 อิทธิพลของมุมปะทะการไหล (flow attack angle)

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบความเสียดทานและเลขเรย์โนลด์ในรูปที่ 5.5 จะพบว่าเมื่อมุมปะทะการไหลยิ่งมาก สัดส่วนของตัวประกอบความเสียดทานของครีบหยักต่อตัวประกอบความเสียดทานของครีบเปล่าจะมีค่าลดลงในทุกค่าของเลขเรย์โนลด์ เนื่องจากมุมปะทะการไหลยิ่งน้อยจะยิ่งทำให้มีการต้านการไหลของผิวครีบต่ออากาศมาก ทำให้ความดันตกคร่อมและค่าตัวประกอบความเสียดทานมีค่ามากและจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนและเลขเรย์โนลด์ในรูปที่ 5.6 พบว่าที่มุมปะทะ 60 องศาและมุมคลื่น 45 องศาจะให้สมรรถนะเชิงร้อนสูงที่สุด

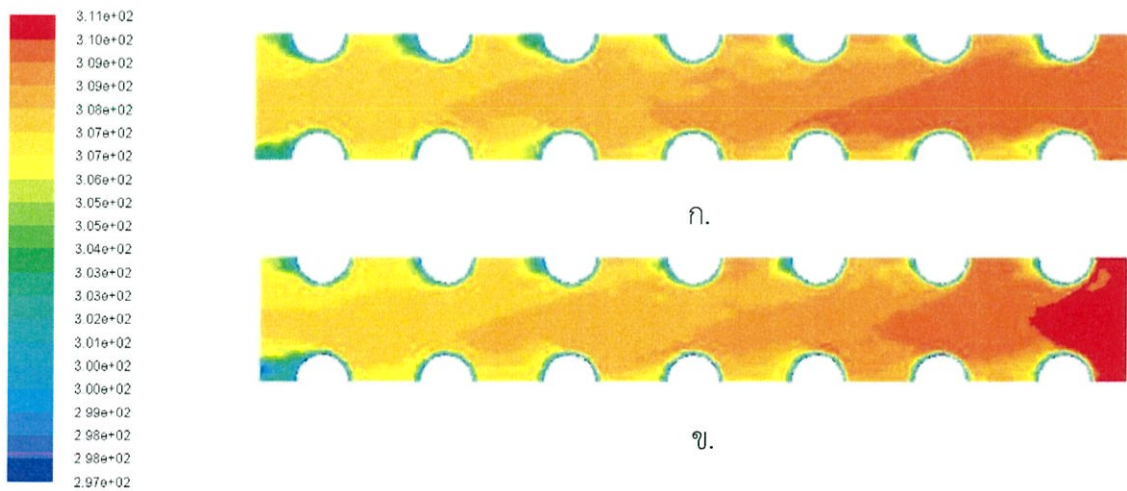
5.2.1 กรณีลักษณะของผิวครีบกักเป็นแบบเอียง

5.2.1.1 โครงสร้างการไหล

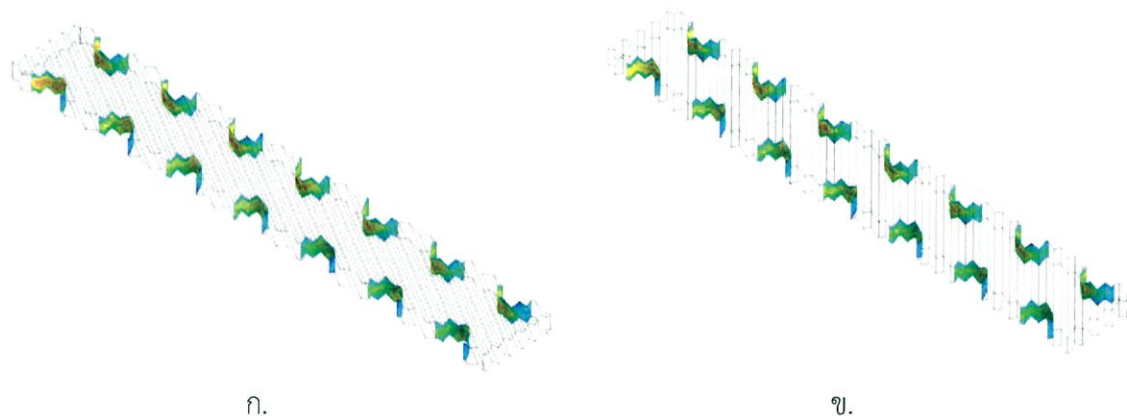


รูปที่ 5.1 แสดงสตรีมไลน์ของช่องทางการไหล กรณีที่ครีบกักเป็นแบบเอียง ที่เลขเรย์โนลด์์ 880 ก.มม
ปะทะการไหล 45 องศา และมุมคลื่น 45 องศา ข.มุมปะทะการไหล 60 องศา และมุมคลื่น 45 องศา

5.2.1.2 ลักษณะการถ่ายเทความร้อน

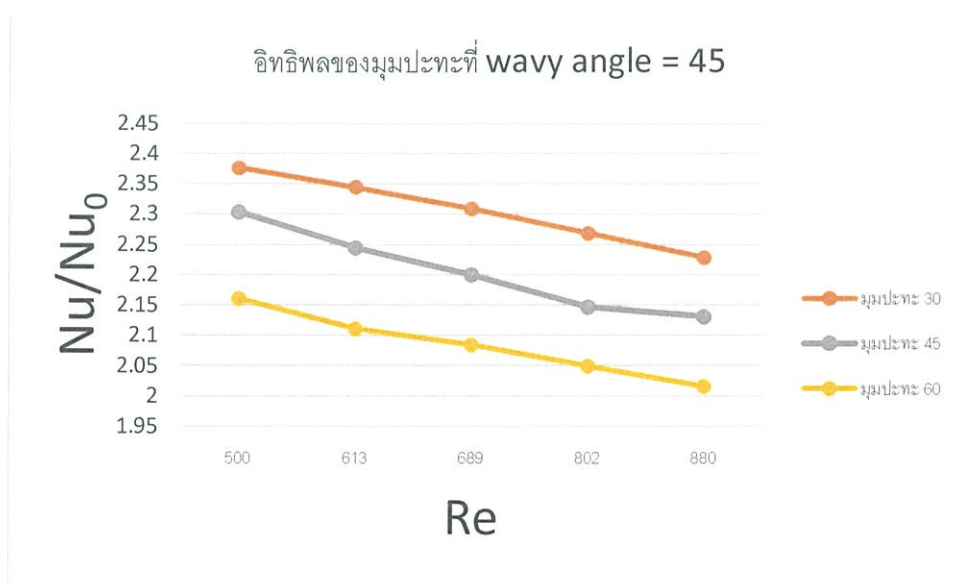


รูปที่ 5.2 แสดงคอนทัวร์ของอุณหภูมิบริเวณกึ่งกลางของช่องทางการไหล กรณีที่ครีบอกเป็นแบบเอียง ที่เลขเรย์โนลด์ 880 ก.มุมปะทะการไหล 45 องศา และมุมคลื่น 45 องศา ข.มุมปะทะการไหล 60 องศา และมุมคลื่น 45 องศา

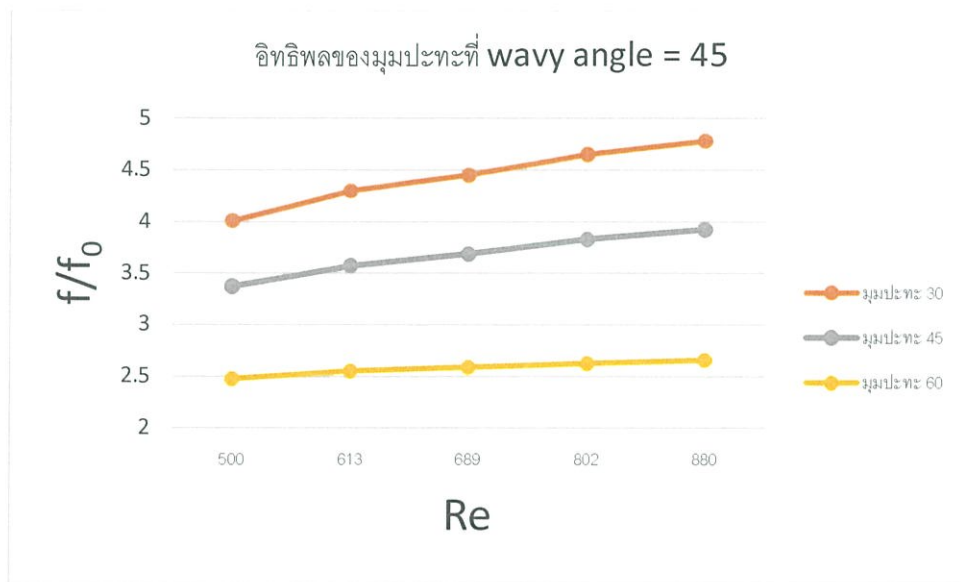


รูปที่ 5.3 แสดงคอนทัวร์ของเลขนัสเซิลต์บริเวณผิวท่อ กรณีที่ครีบอกเป็นแบบเอียง เลขเรย์โนลด์ 880 ก.มุมปะทะการไหล 45 องศา และมุมคลื่น 45 องศา ข.มุมปะทะการไหล 60 องศา และมุมคลื่น 45 องศา

5.2.1.3 การวิเคราะห์สมรรถนะเชิงความร้อน



รูปที่ 5.4 อิทธิพลของมุมปะทะการไหลต่อเลขนัสเซิลต์เฉลี่ย กรณีที่ครีบอกเป็นแบบเอียงโดยมีมุมคลื่น 45 องศา



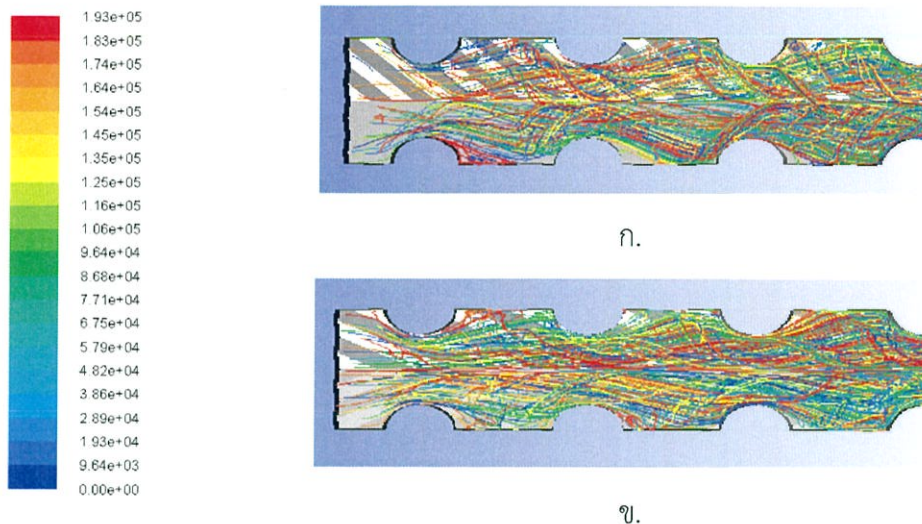
รูปที่ 5.5 อิทธิพลของมุมปะทะการไหลต่อค่าตัวประกอบความเสียดทาน กรณีที่ครีบอกเป็นแบบเอียง โดยมีมุมคลื่น 45 องศา



รูปที่ 5.6 อิทธิพลของมุมปะทะการไหลต่อสมรรถนะเชิงความร้อน กรณีที่ครีบอกเป็นแบบเอียง โดยมีมุมคลื่น 45 องศา

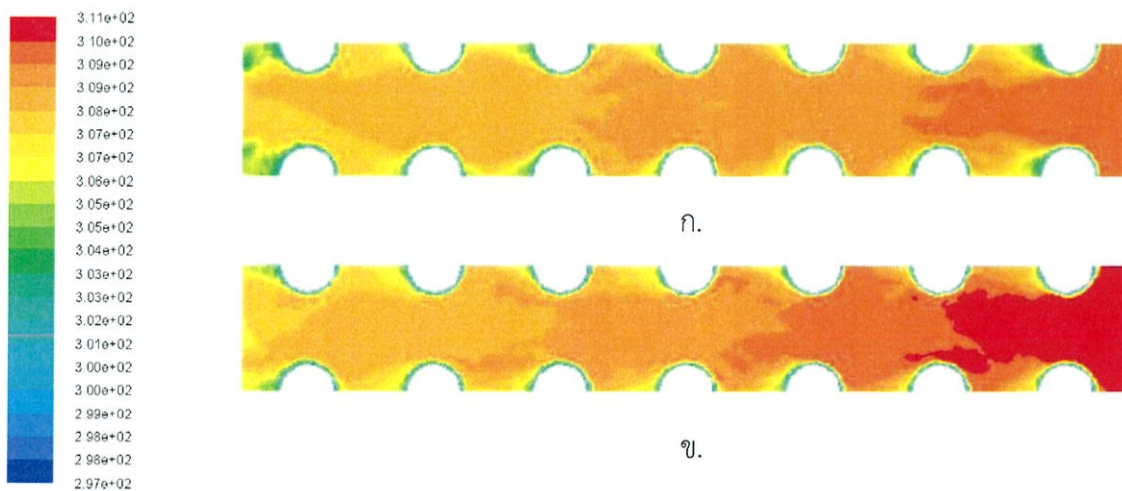
5.2.2 กรณีลักษณะของผิวครีบหยักเป็นแบบ V-Shape Downstream

5.2.2.1 โครงสร้างการไหล

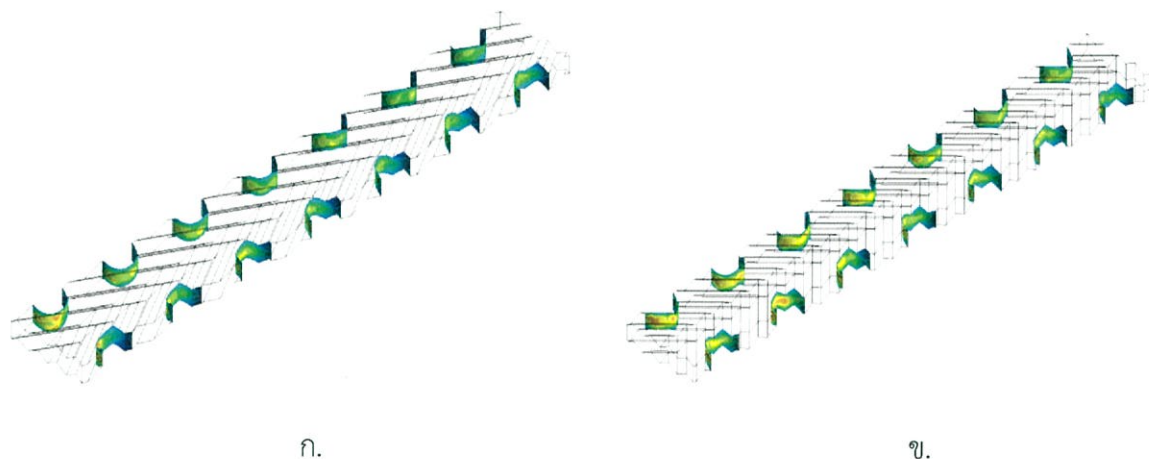


รูปที่ 5.7 แสดงสตรีมไลน์ของช่องทางการไหล กรณีที่ครีบหยักเป็นแบบ V-Shape Downstream ที่เลข เรย์โนลด์ 880 ก.มุมปะทะการไหล 45 องศา และมุมคลื่น 30 องศา ข.มุมปะทะการไหล 60 องศา และมุมคลื่น 30 องศา

5.2.2.2 ลักษณะการถ่ายเทความร้อน

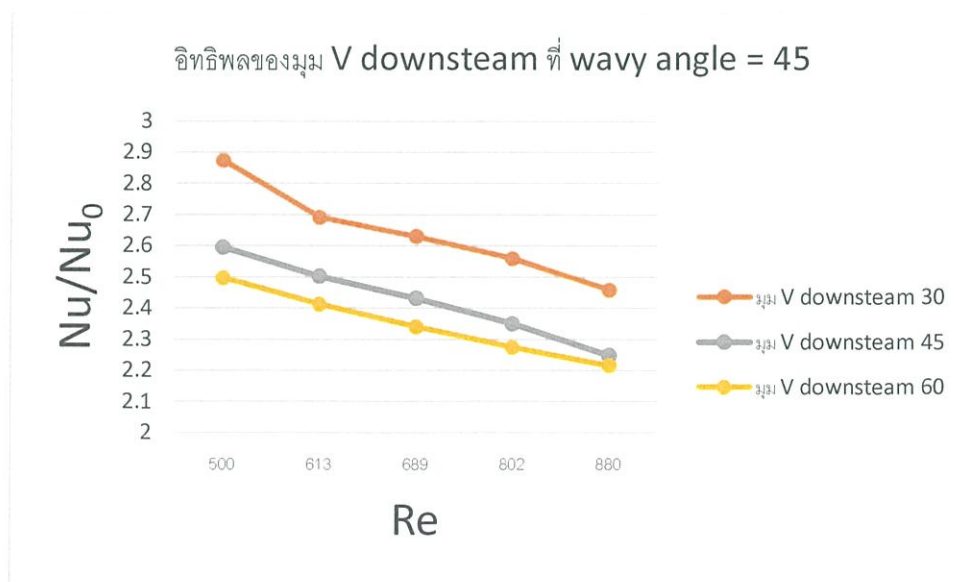


รูปที่ 5.8 แสดงคอนทัวร์ของอุณหภูมิบริเวณกึ่งกลางของช่องทางการไหล กรณีที่ครีบก้นเป็นแบบ V-shape downstream ที่เลขเรย์โนลด์ 880 ก. มุมปะทะการไหล 45 องศาและมุมคลื่น 30 องศา ข. มุมปะทะการไหล 60 องศาและมุมคลื่น 30 องศา

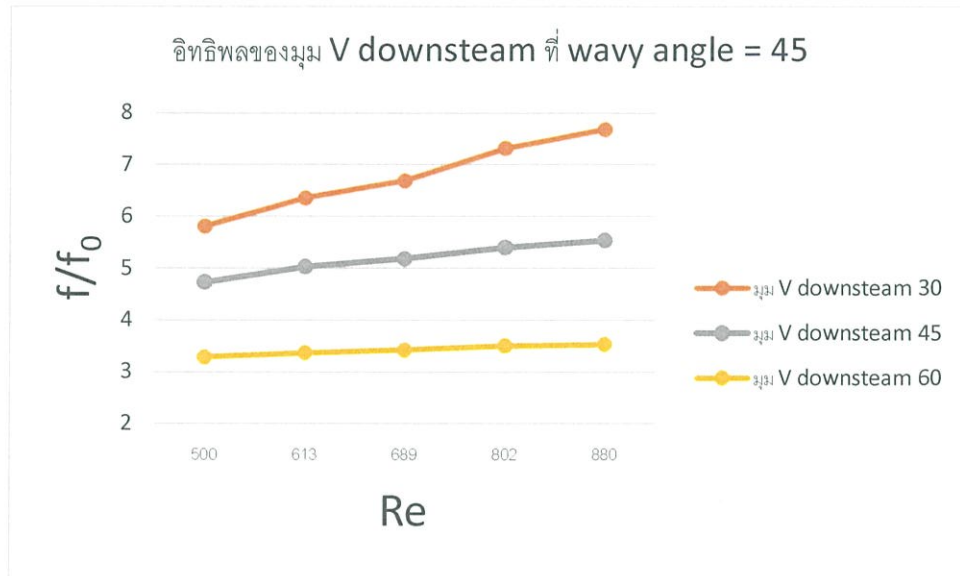


รูปที่ 5.9 แสดงคอนทัวร์ของเลขนัสเซลล์ต์บริเวณผิวท่อกรณีที่ครีบก้นเป็นแบบ V-shape downstream ที่เลขเรย์โนลด์ 880 ก. มุมปะทะการไหล 45 องศาและมุมคลื่น 30 องศา ข. มุมปะทะการไหล 60 องศาและมุมคลื่น 30 องศา

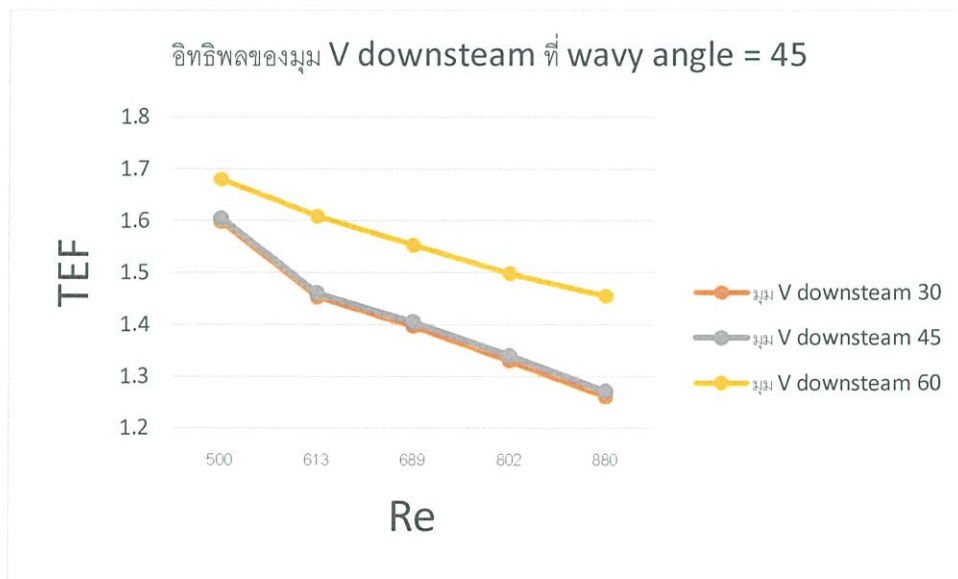
5.2.2.3 การวิเคราะห์สมรรถนะเชิงความร้อน



รูปที่ 5.10 อิทธิพลของมุมปะทะการไหลต่อเลขนัสเซลล์ต์เฉลี่ย กรณีที่ cribhays เป็นแบบ V-shape downstream โดยมีมุมคลื่น 45 องศา



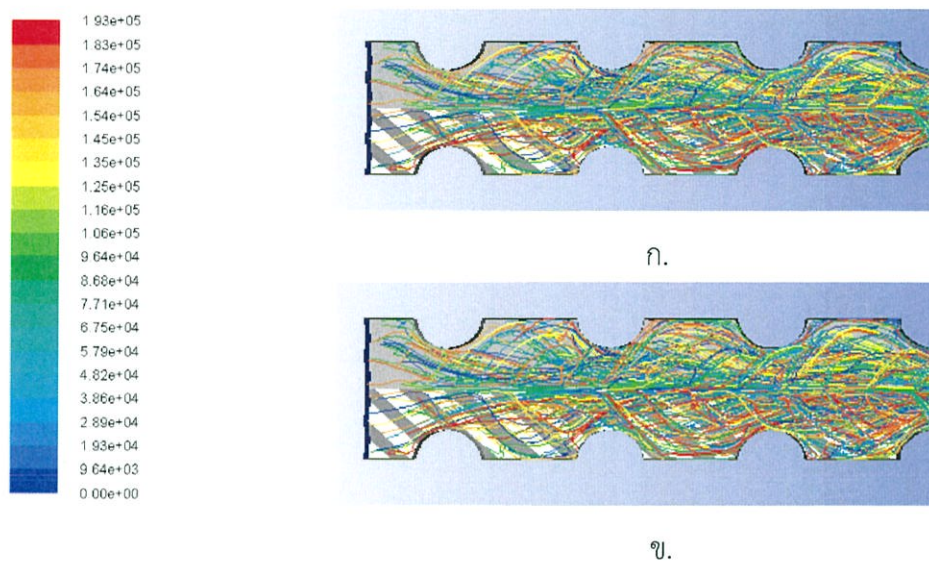
รูปที่ 5.11 อิทธิพลของมุมปะทะการไหลต่อค่าตัวประกอบความเสียดทาน กรณีที่ cribhays เป็นแบบ V-shape downstream โดยมีมุมคลื่น 45 องศา



รูปที่ 5.12 อิทธิพลของมุมปะทะการไหลต่อสมรรถนะเชิงความร้อน กรณีที่ cribhays เป็นแบบ V-shape downstream โดยมีมุมคลื่น 45 องศา

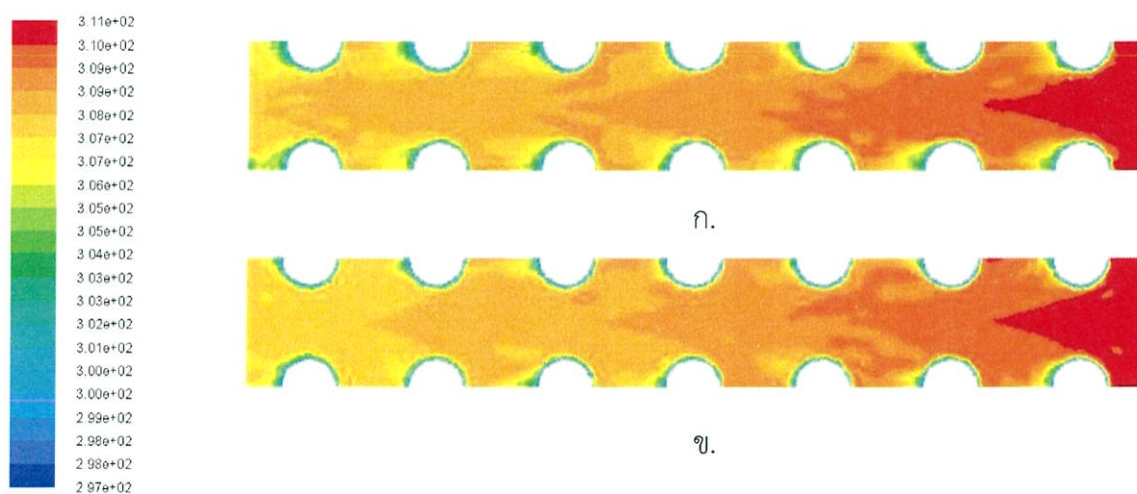
5.2.3 กรณีลักษณะของผิวค้ำยันเป็นแบบ V-Shape upstream

5.2.3.1 โครงสร้างการไหล

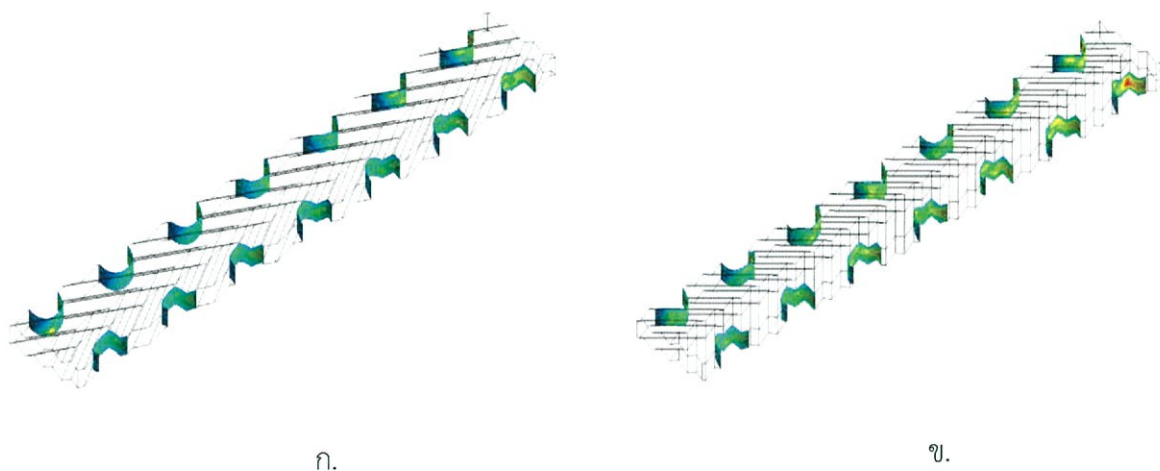


รูปที่ 5.13 แสดงสตรีมไลน์ของช่องทางการไหล กรณีที่ค้ำยันเป็นแบบ V-Shape Upstream ที่เลขเรย์โนลด์ 880 ก.มุมปะทะการไหล 45 องศา และมุมคลื่น 30 องศา ข.มุมปะทะการไหล 60 องศา และมุมคลื่น 30 องศา

5.2.3.2 ลักษณะการถ่ายเทความร้อน

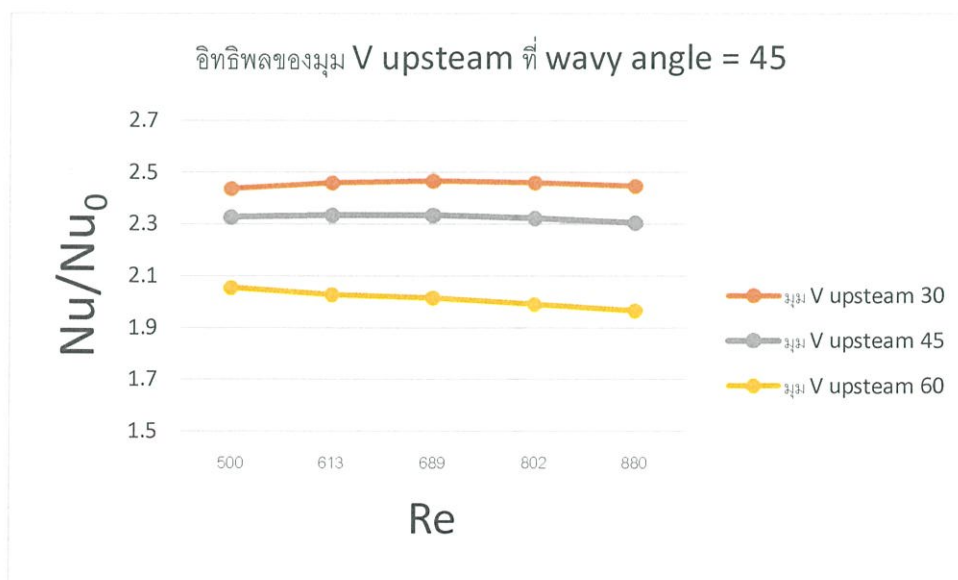


รูปที่ 5.14 แสดงคอนทัวร์ของอุณหภูมิบริเวณกึ่งกลางของช่องทางไหล กรณีที่ครีบอกเป็นแบบ V-shape upstream ที่เลขเรย์โนลด์ 880 ก. มุมปะทะการไหล 45 องศาและมุมคลื่น 30 องศา ข. มุมปะทะการไหล 60 องศาและมุมคลื่น 30 องศา

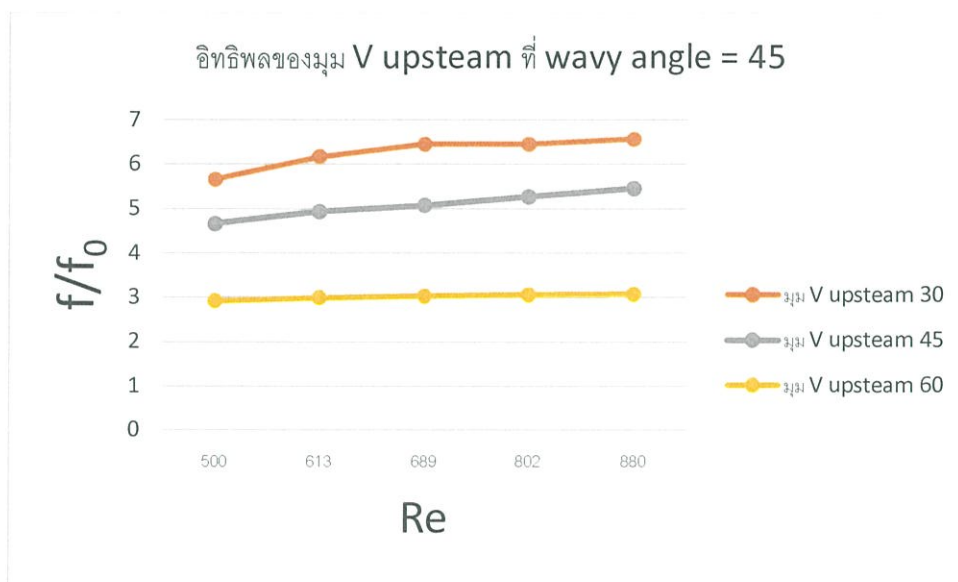


รูปที่ 5.15 แสดงคอนทัวร์ของเลขนัสเซลล์ต์บริเวณผิวท่อกรณีที่มีครีบอกเป็นแบบ V-shape upstream มุม ที่เลขเรย์โนลด์ 880 ก. ปะทะการไหล 45 องศาและมุมคลื่น 30 องศา ข. มุมปะทะการไหล 60 องศาและมุมคลื่น 30 องศา

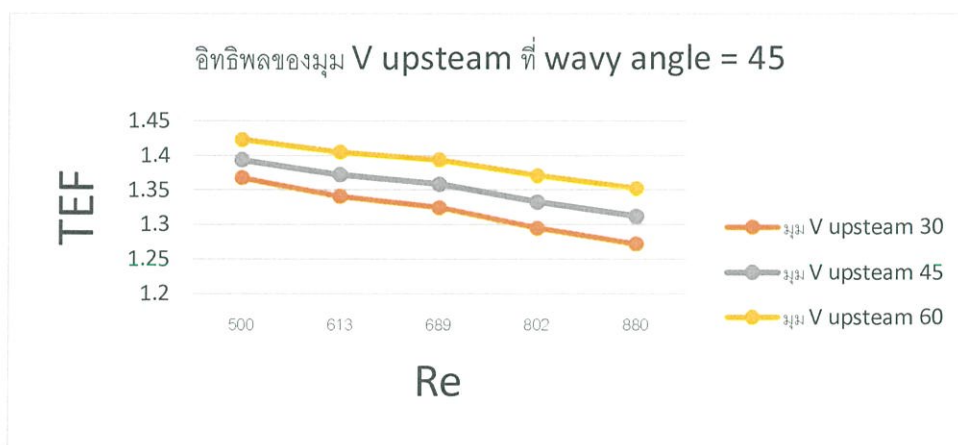
5.2.3.3 การวิเคราะห์สมรรถนะเชิงความร้อน



รูปที่ 5.16 อิทธิพลของมุมปะทะการไหลต่อเลขนัสเซิลท์เฉลี่ย กรณีที่ครีบก้นเป็นแบบ V-shape upstream โดยมีมุมคลื่น 45 องศา



รูปที่ 5.17 อิทธิพลของมุมปะทะการไหลต่อค่าตัวประกอบความเสียดทาน กรณีที่ครีบก้นเป็นแบบ V-shape upstream โดยมีมุมคลื่น 45 องศา



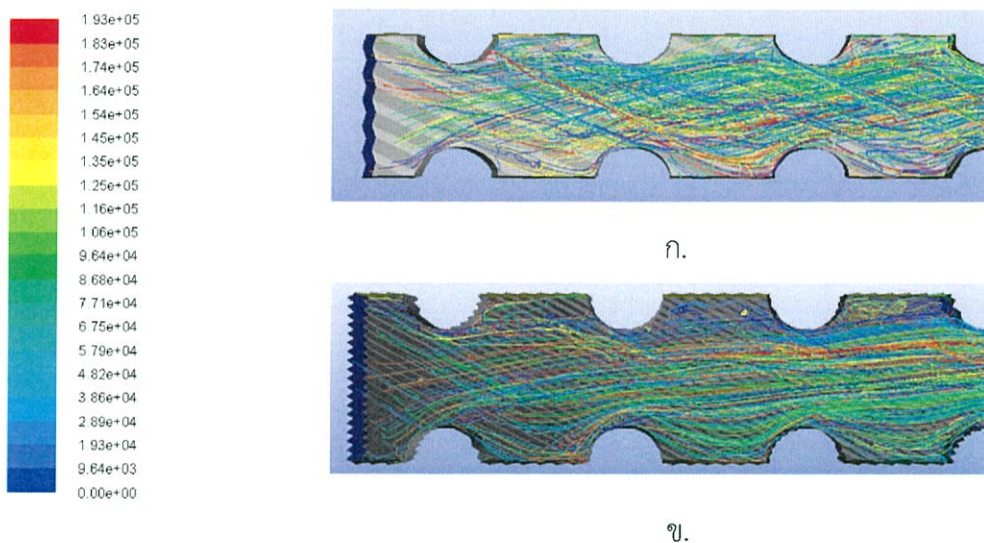
รูปที่ 5.18 อิทธิพลของมุมปะทะการไหลต่อสมรรถนะเชิงความร้อน กรณีที่ครีบก้นเป็นแบบ V-shape upstream โดยมีมุมคลื่น 45 องศา

5.3 อิทธิพลของมุมคลื่น (wavy angle)

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของเลขนัยเซิลท์เฉลี่ยและเลขเรย์โนลด์ในรูปที่ 5.22 จะพบว่า เมื่อมุมคลื่นมีค่ามากขึ้น สัดส่วนของเลขนัยเซิลท์เฉลี่ยจะลดลงในทุกค่าเรย์โนลด์ เนื่องจากมุมคลื่นที่มากขึ้น จะทำให้เกิดการไหลแบบหมุนวน (vortex) ข้างหลังครีบหยักที่รุนแรงมากขึ้น ทำให้เกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิที่หน้าตัดสม่ำเสมอและทำให้อากาศสามารถไหลไปถ่ายเทความร้อนในบริเวณผิวท่อได้มากขึ้นและจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของเลขนัยเซิลท์เฉลี่ยและเลขเรย์โนลด์ในรูปที่ 5.24 พบว่าที่มุมปะทะ 60 องศาและมุมคลื่น 30 องศาจะให้สมรรถนะเชิงร้อนสูงที่สุด

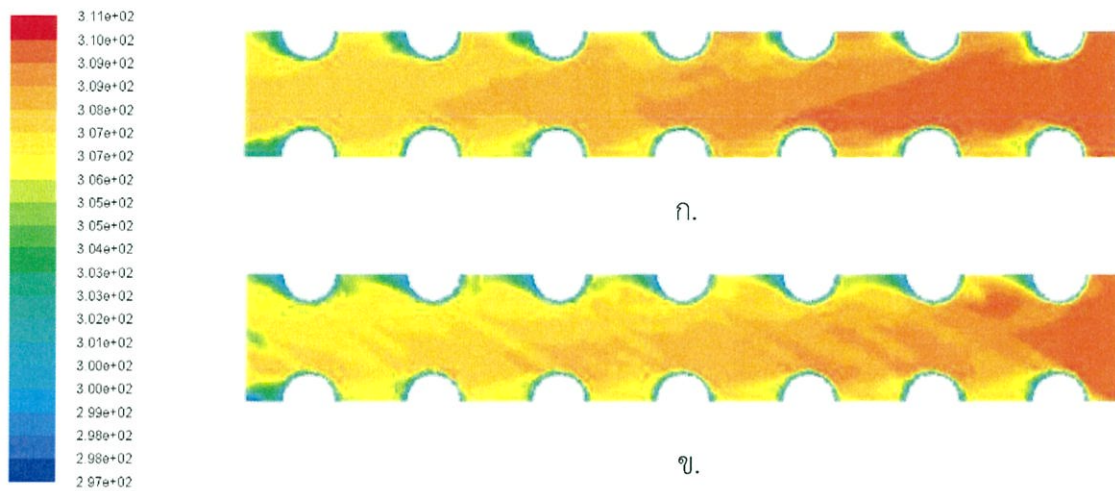
5.3.1 กรณีลักษณะของผิวครีบหยักเป็นแบบเอียง

5.3.1.1 โครงสร้างการไหล

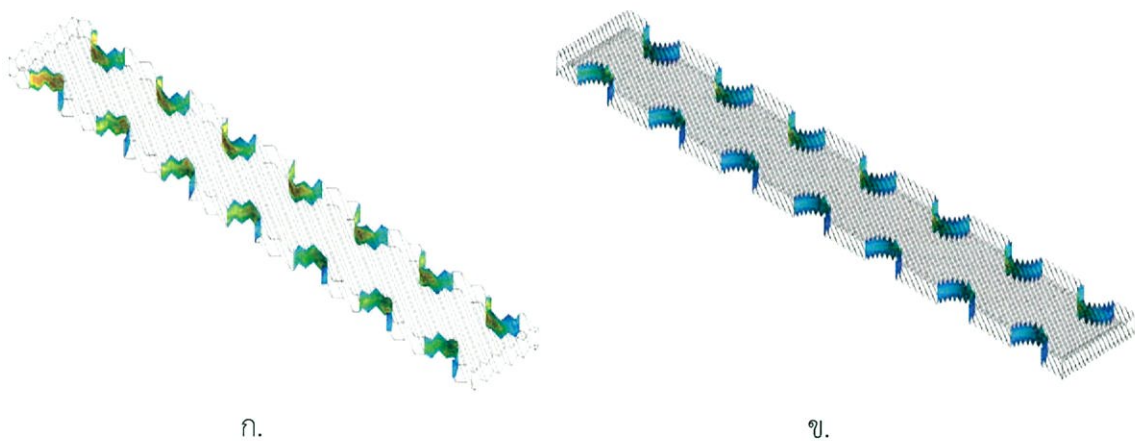


รูปที่ 5.19 แสดงสตรีมไลน์ของช่องทางการไหล กรณีที่ครีบหยักเป็นแบบเอียง ที่เลขเรย์โนลด์ 880 ก.มุมปะทะการไหล 60 องศา และมุมคลื่น 45 องศา ข.มุมปะทะการไหล 60 องศา และมุมคลื่น 60 องศา

5.3.1.2 ลักษณะการถ่ายเทความร้อน



รูปที่ 5.20 แสดงคอนทัวร์ของอุณหภูมิบริเวณกึ่งกลางของช่องทางการไหล กรณีที่ครีบกั้นเป็นแบบเอียง ที่เลขเรย์โนลด์ 880 ก.มุมปะทะการไหล 60 องศา และมุมคลื่น 45 องศา ข.มุมปะทะการไหล 60 องศา และมุมคลื่น 60 องศา



รูปที่ 5.21 แสดงคอนทัวร์ของเลขนัสเซลล์ต์บริเวณผิวท่อ กรณีที่ครีบกั้นเป็นแบบเอียง ที่เลขเรย์โนลด์ 880 ก.มุมปะทะการไหล 60 องศา และมุมคลื่น 45 องศา ข.มุมปะทะการไหล 60 องศา และมุมคลื่น 60 องศา

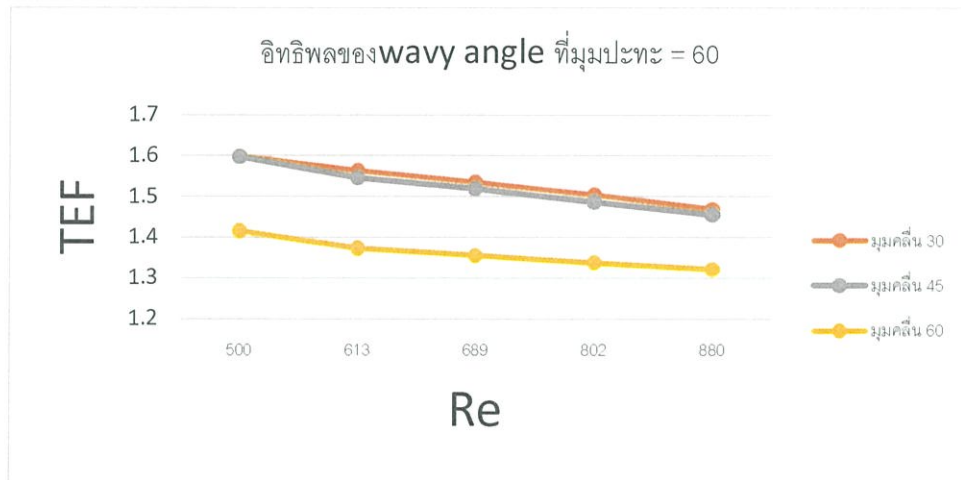
5.3.1.3 การวิเคราะห์สมรรถนะเชิงความร้อน



รูปที่ 5.22 อิทธิพลของมุมคลื่นต่อเลขนัสเซลท์เฉลี่ย กรณีที่cribหัยก็เป็นแบบเอียงโดยมีมุมปะทะการไหล 60 องศา



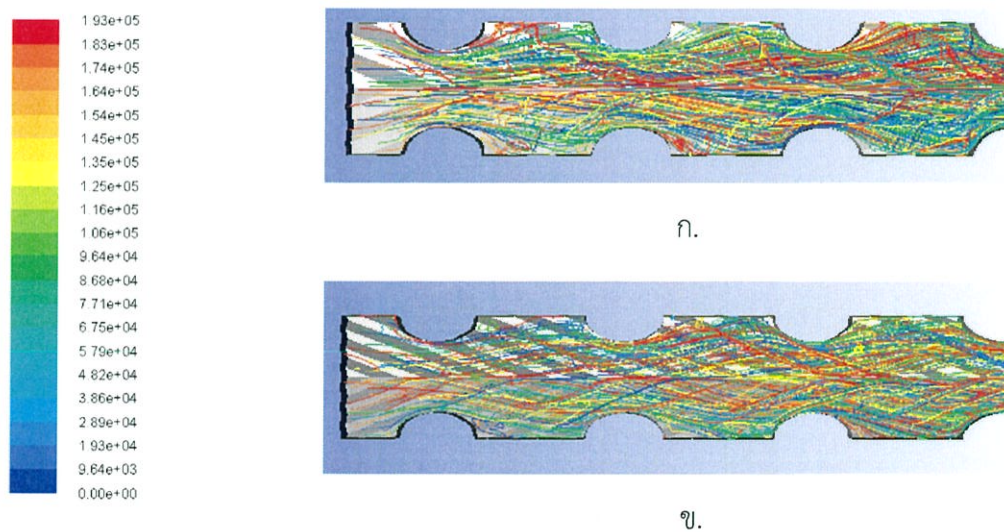
รูปที่ 5.23 อิทธิพลของมุมคลื่นต่อค่าตัวประกอบความเสียดทาน กรณีที่cribหัยก็เป็นแบบเอียงโดยมีมุมปะทะการไหล 60 องศา



รูปที่ 5.24 อิทธิพลของมุมคลื่นต่อสมรรถนะเชิงความร้อน กรณีที่ครีบก้นเป็นแบบเอียงโดยมีมุมปะทะการไหล 60 องศา

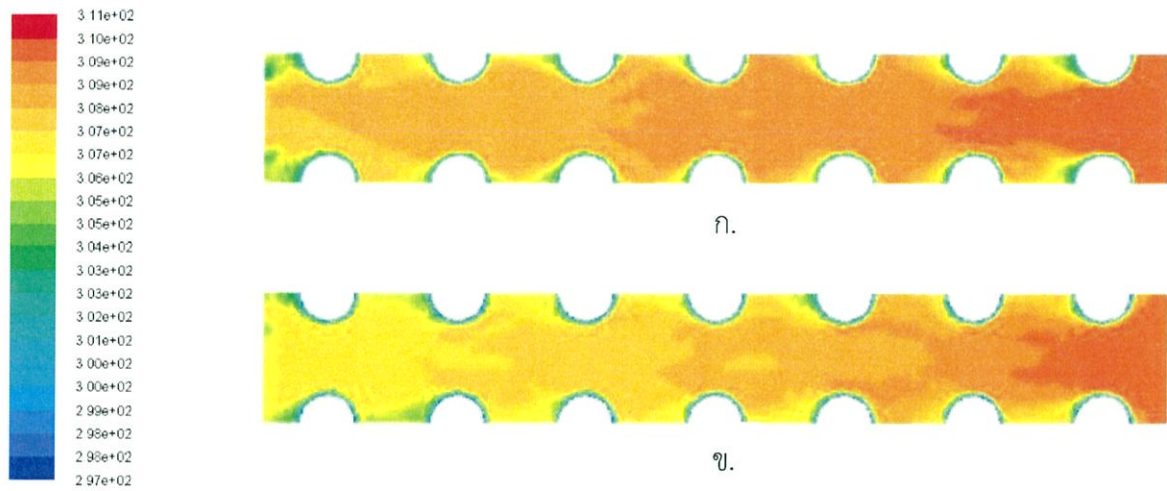
5.3.2 กรณีลักษณะของผิวครีบก้นเป็นแบบ V-Shape Downstream

5.3.2.1 โครงสร้างการไหล

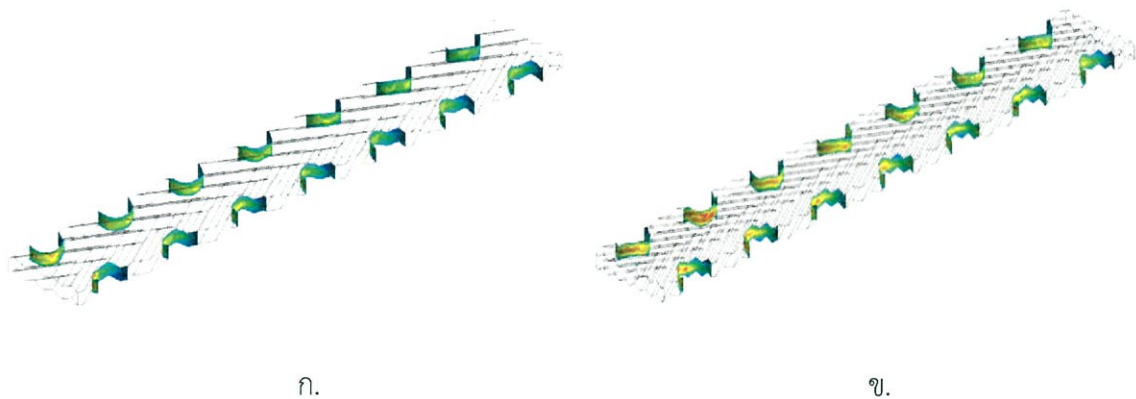


รูปที่ 5.25 แสดงสตรีมไลน์ของช่องทางการไหล กรณีที่ครีบก้นเป็นแบบ V-Shape Downstream ที่เลขเรย์โนลด์ 880 ก.มุมปะทะการไหล 60 องศา และมุมคลื่น 30 องศา ข.มุมปะทะการไหล 60 องศา และมุมคลื่น 45 องศา

5.3.2.2 ลักษณะการถ่ายเทความร้อน

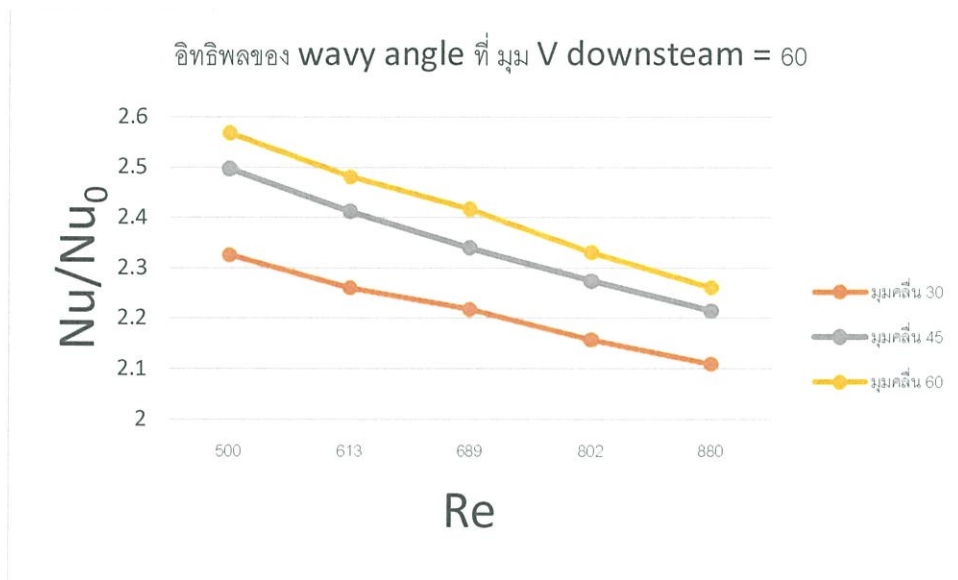


รูปที่ 5.26 แสดงคอนทัวร์ของอุณหภูมิบริเวณกึ่งกลางของช่องทางการไหล กรณีที่ครีบกั้นเป็นแบบ V-shape downstream ที่เลขเรย์โนลด์ 880 ก.มุมปะทะการไหล 60 องศาและมุมคลี่น 30 องศา ข.มุมปะทะการไหล 60 องศาและมุมคลี่น 45 องศา

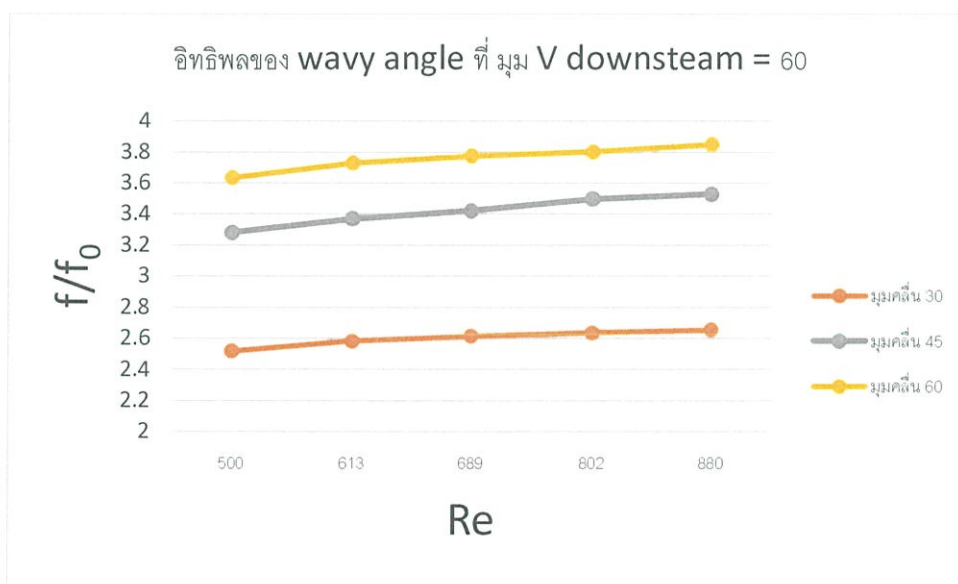


รูปที่ 5.27 แสดงคอนทัวร์ของเลขนัสเซลล์ท์บริเวณผิวท่อ กรณีที่ครีบกั้นเป็นแบบ V-shape upstream ที่เลขเรย์โนลด์ 880 ก.มุมปะทะการไหล 60 องศาและมุมคลี่น 30 องศา ข.มุมปะทะการไหล 60 องศาและมุมคลี่น 45 องศา

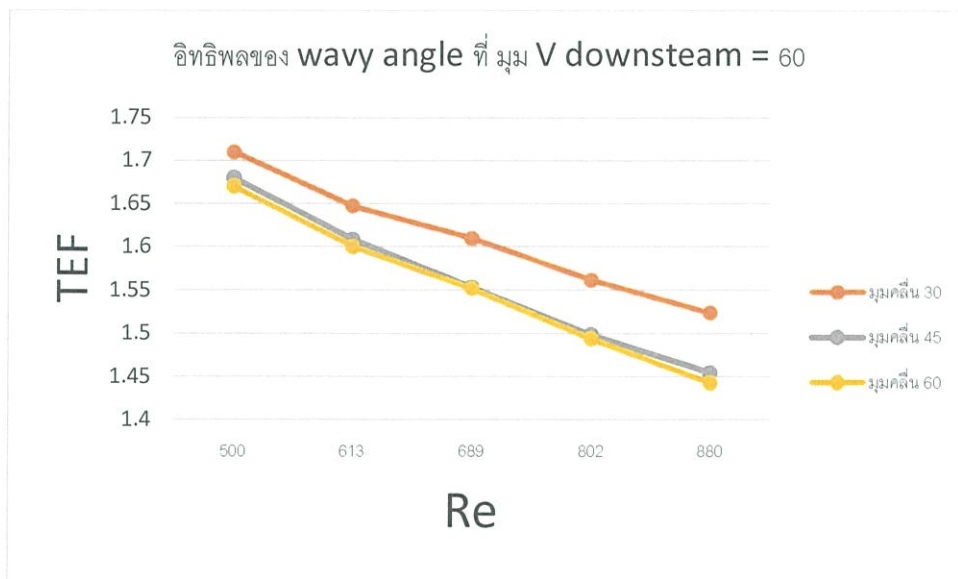
5.3.2.3 การวิเคราะห์สมรรถนะเชิงความร้อน



รูปที่ 5.28 อิทธิพลของมุมคลื่นต่อเลขนัสเซลท์เฉลี่ย กรณีที่ครีบก้นเป็นแบบ V-shape downstream โดยมีมุมปะทะการไหล 60 องศา



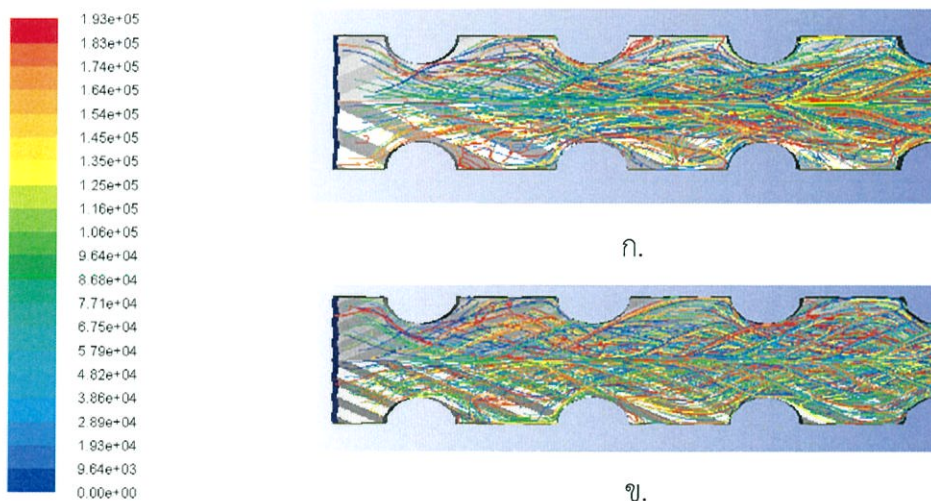
รูปที่ 5.29 อิทธิพลของมุมคลื่นต่อค่าตัวประกอบความเสียดทาน กรณีที่ครีบก้นเป็นแบบ V-shape downstream โดยมีมุมปะทะการไหล 60 องศา



รูปที่ 5.30 อิทธิพลของมุมคลื่นต่อสมรรถนะเชิงความร้อน กรณีที่ครีบก้นเป็นแบบ V-shape downstream โดยมีมุมปะทะการไหล 60 องศา

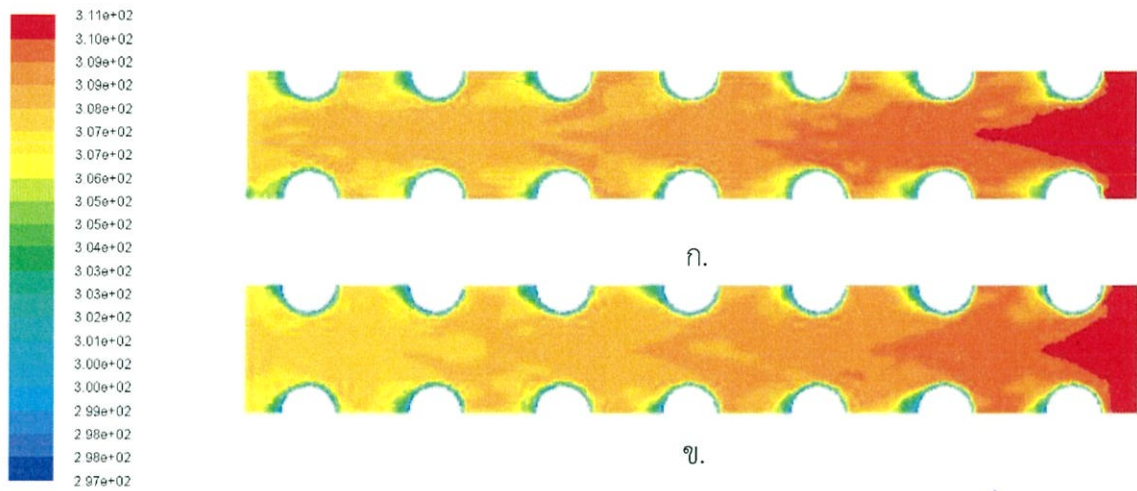
5.3.3 กรณีลักษณะของผิวครีบก้นเป็นแบบ V-Shape upstream

5.3.3.1 โครงสร้างการไหล

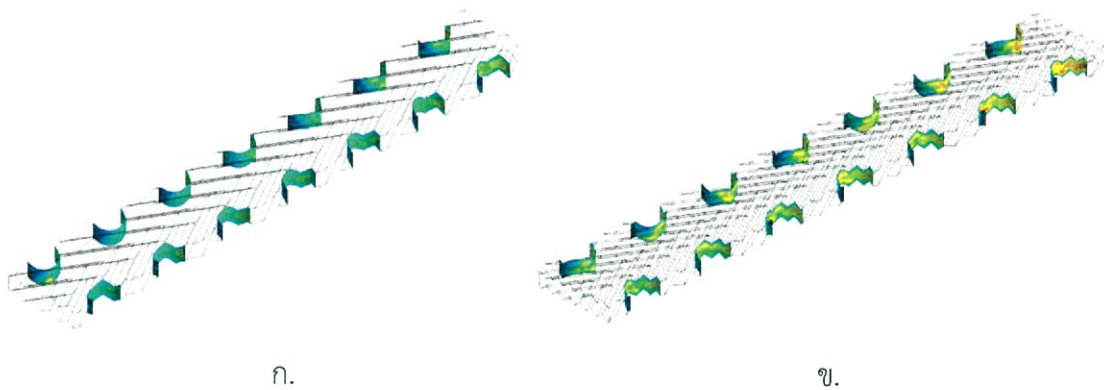


รูปที่ 5.31 แสดงสตรีมไลน์ของช่องทางการไหล กรณีที่ครีบก้นเป็นแบบ V-Shape Upstream ที่เลข เรย์โนลด์ 880 ก.มุมปะทะการไหล 60 องศา และมุมคลื่น 30 องศา ข. Upstream มุมปะทะการไหล 60 องศา และมุมคลื่น 45 องศา

5.3.3.2 ลักษณะการถ่ายเทความร้อน

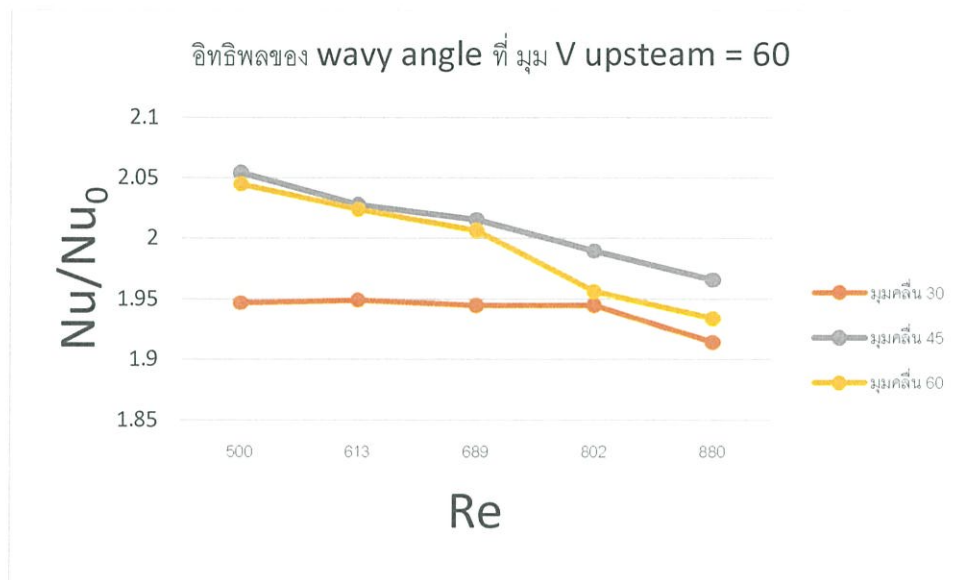


รูปที่ 5.32 แสดงคอนทัวร์ของอุณหภูมิบริเวณกึ่งกลางของช่องทางการไหล กรณีที่ cribback เป็นแบบ V-shape upstream ที่เลขเรย์โนลด์ 880 ก.มุมปะทะการไหล 60 องศาและมุมคลื่น 30 องศา ข.มุมปะทะการไหล 60 องศาและมุมคลื่น 45 องศา

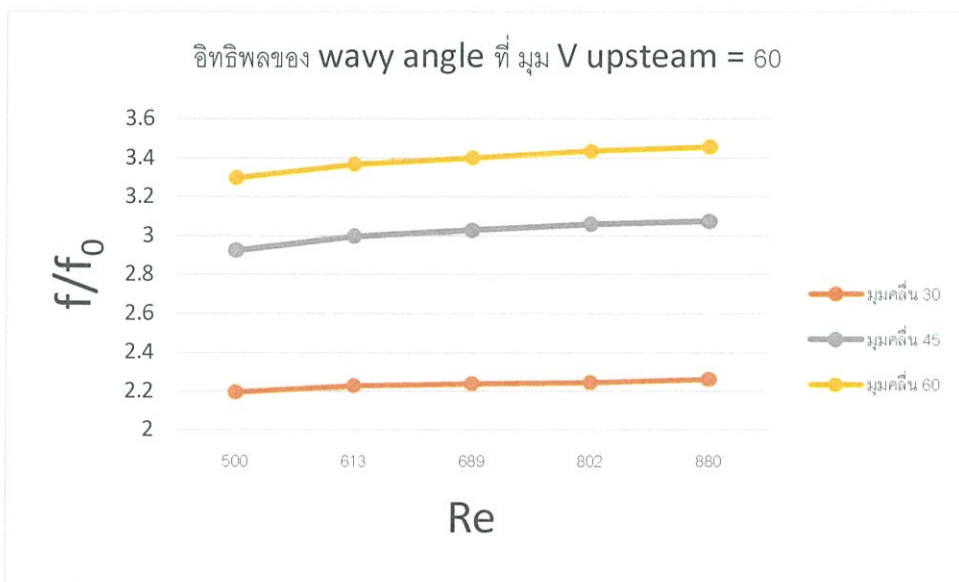


รูปที่ 5.33 แสดงคอนทัวร์ของเลขนัสเซลท์บริเวณผิวท่อ กรณีที่ cribback เป็นแบบ V-shape upstream ที่เลขเรย์โนลด์ 880 ก.มุมปะทะการไหล 60 องศาและมุมคลื่น 30 องศา ข.มุมปะทะการไหล 60 องศาและมุมคลื่น 45 องศา

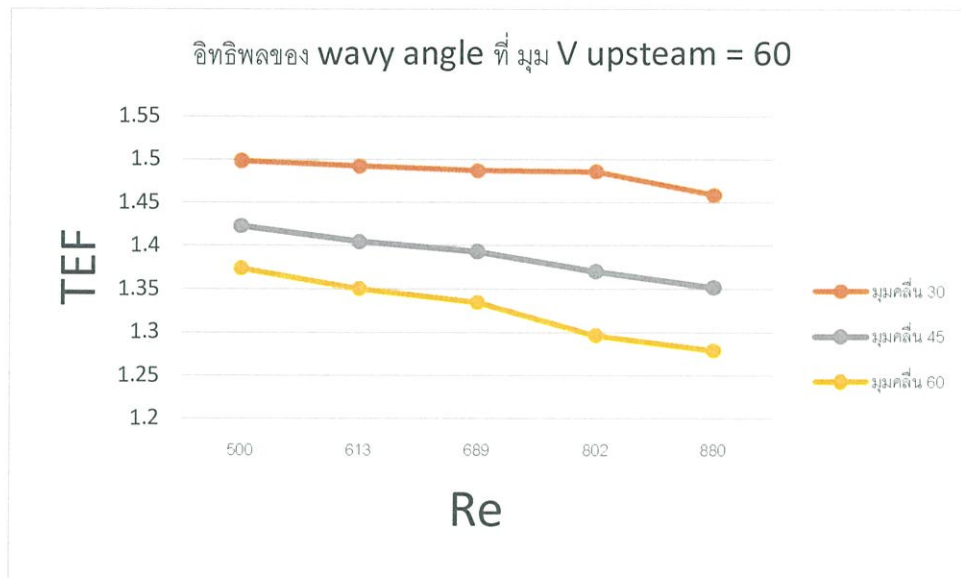
5.3.3.3 การวิเคราะห์สมรรถนะเชิงความร้อน



รูปที่ 5.34 อิทธิพลของมุมคลื่นต่อเลขนัสเซลท์เฉลี่ย กรณีที่ครีบอกเป็นแบบ V-shape upstream โดยมีมุมปะทะการไหล 60 องศา



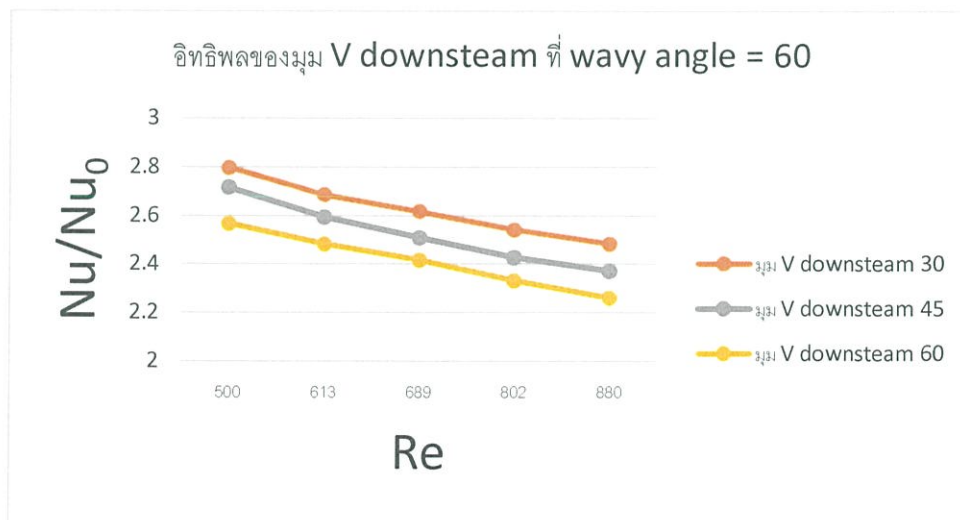
รูปที่ 5.35 อิทธิพลของมุมคลื่นต่อค่าตัวประกอบความเสียดทาน กรณีที่ครีบอกเป็นแบบ V-shape upstream โดยมีมุมปะทะการไหล 60 องศา



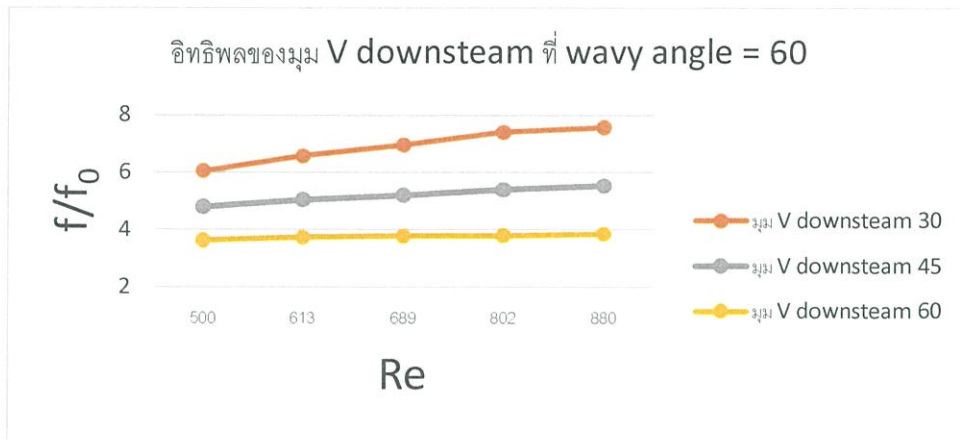
รูปที่ 5.36 อิทธิพลของมุมคลื่นต่อสมรรถนะเชิงความร้อน กรณีที่ครีบหยักเป็นแบบ V-shape downstream โดยมีมุมปะทะการไหล 60 องศา

5.4 อิทธิพลของเลขเรย์โนลด์

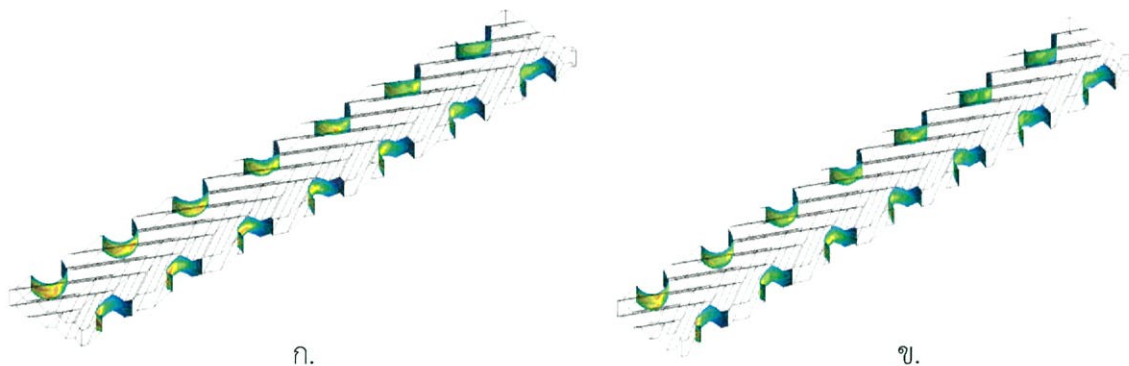
จากกราฟในรูปที่ 5.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์กับสัดส่วนของเลขนัสเซลจะพบว่า เมื่อเลขเรย์โนลด์มีค่าเพิ่มขึ้นสัดส่วนของเลขนัสเซลจะมีค่าลดลงในทุกกรณีศึกษา



รูปที่ 5.37 อิทธิพลของเลขเรย์โนลด์ต่อเลขนัสเซลที่เฉลี่ยที่มุมปะทะต่าง ๆ โดยมีมุมคลื่นคือ 60 องศา และเป็นครีบหยักแบบ V-shape downstream



รูปที่ 5.38 อิทธิพลของเลขเรย์โนลด์ต่อค่าตัวประกอบความเสียหายที่มุมปะทะต่าง ๆ โดยมีมุมคลื่นคือ 60 องศา และเป็นครีบหยักแบบ V-shape downstream



รูปที่ 5.39 แสดงคอนทัวร์ของเลขนัสเซลล์ท์บริเวณผิวท่อ กรณีที่ครีบหยักเป็นแบบ V-shape downstream ที่เลขเรย์โนลด์ 880 ก.มุมปะทะการไหล 30 องศาและมุมคลื่น 60 องศา ข.มุมปะทะการไหล 30 องศาและมุมคลื่น 60 องศา

บทที่ 6

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการจำลอง

ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของผิวครีบหยักชนิดต่าง ๆ ซึ่งถูกติดตั้งภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Fin-Tube โดยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ครีบหยักดังกล่าวส่งผลกระทบต่อสมรรถนะเชิงความร้อน, พลังงานการไหล, ความดันตกคร่อมและการถ่ายเทความร้อน โดยทำการศึกษาผิวครีบหยักในกรณีต่าง ๆ ดังนี้ แบบเอียง, V-Shape upstream และ V-Shape down stream โดยมีมุมปะทะและมุมคลื่น 30, 45, 60 องศา ที่เลขเรย์โนลด์ 500 ถึง 880 พารามิเตอร์ที่สนใจประกอบไปด้วย เลขนัสเซลท์, ค่าตัวประกอบความเสียดทาน และค่าสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) ตามลำดับ ซึ่งจากการศึกษาสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. เมื่ออากาศไหลผ่านครีบหยัก จะทำให้เกิดการไหลหมุนวนของอากาศ โดยทำให้เกิดการผสมกันของอากาศร้อนและอากาศเย็นอย่างสมบูรณ์มากขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้อากาศเข้าไปปะทะกับผนังท่อเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนได้มากกว่าครีบเปล่าที่มีอากาศเพียงส่วนหนึ่ง เข้าไปทำการถ่ายเทความร้อนกับผนังท่อเท่านั้น อิทธิพลของมุมปะทะการไหลและมุมคลื่น จะทำให้อากาศเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีขึ้นอีกด้วย โดยจะส่งผลแตกต่างกันไปแล้วแต่กรณี

2. กรณีที่ติดครีบหยักแบบเอียง 60 องศา อัตราส่วนปิดกั้นการไหลเท่ากับ 0.4 ระยะห่างระหว่างแต่ละครีบเท่ากับ 5 มิลลิเมตร มุมคลื่นเท่ากับ 45 องศา เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 880 มีสมรรถนะเชิงความร้อนมากที่สุด โดยมีเลขนัสเซลท์เฉลี่ยเป็น 2.02 เท่าของกรณีครีบเปล่า

3. กรณีที่ติดครีบหยักแบบ V-Shape downstream 60 องศา อัตราส่วนปิดกั้นการไหลเท่ากับ 0.4 ระยะห่างระหว่างแต่ละครีบเท่ากับ 5 มิลลิเมตร มุมคลื่นเท่ากับ 30 องศา เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 880 มีสมรรถนะเชิงความร้อนมากที่สุด โดยมีเลขนัสเซลท์เฉลี่ยเป็น 2.11 เท่าของกรณีครีบเปล่า

4. กรณีที่ติดครีบหยักแบบ V-Shape upstream 60 องศา อัตราส่วนปิดกั้นการไหลเท่ากับ 0.4 ระยะห่างระหว่างแต่ละครีบเท่ากับ 5 มิลลิเมตร มุมคลื่นเท่ากับ 30 องศา เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 880 มีสมรรถนะเชิงความร้อนมากที่สุด โดยมีเลขนัสเซลท์เฉลี่ยเป็น 1.91 เท่าของกรณีครีบเปล่า

5. สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุดสามารถวัดได้จากกรณีที่มีการถ่ายเทความร้อนมาก โดยในขณะเดียวกันจะต้องไม่เกิดความดันตกคร่อมมากเกินไป โดยความดันตกคร่อมนี้จะแสดงในรูปแบบของค่าตัวประกอบความเสียดทาน ซึ่งกรณีดังกล่าวจะเกิดขึ้นเมื่อการไหลแบบหมุนวนที่เกิดขึ้นจากครีบเป็นการไหลที่ไม่รุนแรงเกินไป หรือไหลอย่างช้า ๆ ละจำนวนน้อย ๆ สำหรับกรณีครีบหยักแบบ V-Shape downstream 60 องศา อัตราส่วนปิดกั้นการไหลเท่ากับ 0.4 ระยะห่างระหว่างแต่ละครีบเท่ากับ 5

มิลลิเมตร มุมคลื่นเท่ากับ 30 องศา เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 500 ซึ่งจะมีค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนเท่ากับ 1.71 โดยในกรณีนี้จะมีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนเมื่อเทียบกับครีปเปล่า 2.33 เท่า และมีอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าตัวประกอบความเสียหาย 2.52 เท่า จึงเป็นกรณีที่มีสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด

6.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษานี้จะเห็นได้ว่าการใช้ระเบียบวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล เพื่อวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนและพฤติกรรมการไหลของอากาศเมื่อไหลผ่านครีปหยัก สามารถใช้ตรวจสอบและวิเคราะห์ผลเบื้องต้น ก่อนนำไปสู่กระบวนการออกแบบจริงได้ ซึ่งวิธีการนี้มีความสะดวกและมีค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่าการสร้างเครื่องทดลองเพื่อใช้ในการทดลอง สำหรับผลจากการศึกษานี้สามารถนำไปเป็นแนวทางในการประยุกต์ในการพัฒนาและออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Fin-Tube เพื่อให้มีสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุด โดยสามารถนำไปเป็นแนวทางในการต่อยอดการวิจัยระดับสูงต่อไป เช่น การศึกษาพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนของอากาศ เมื่อทำการปรับปรุงครีปหยักรูปแบบอื่น ๆ

ในการศึกษาด้วยวิธีการจำลอง ผลที่ได้จะไม่สามารถทราบล่วงหน้าได้ ดังนั้นในการทำการวิจัยจะต้องปรับเปลี่ยนค่าต่าง ๆ อย่างละเอียดมีระบบและมีแบบแผน จะทำให้ได้ค่าการถ่ายเทความร้อน และสมรรถนะเชิงความร้อนที่ดีมีความเหมาะสมกับลักษณะงานที่ใช้ที่สุด

บรรณานุกรม

- [1] Fu, Chang and Wang (1997).,Heat transfer and friction characteristics of typical wavy fin-and-tube heat exchanger., Experimental Thermal and Fluid Science 1997: 14:174-186.
- [2] Wongwises and Chokeman (2004).,Effect of fin pitch and number of tube rows on the air side performance of herringbone wavy fin and tube heat exchangers., Energy Conversion and Management 46 (2005):2216–2231.
- [3] Y.B., Y.L., J., Z.G. and W.Q. (2006).,Three-dimensional numerical study of wavy fin-and-tube heat exchangers and field synergy principle analysis., International Journal of Heat and Mass Transfer 50 (2007):1163–1175.
- [4] Junqi, Jiangping, Zhijiu, Yimin and Wenfeng (2007).,Heat transfer and pressure drop correlations for the wavy fin and flat tube heat exchangers., Applied Thermal Engineering 27 (2007):2066–2073.
- [5] Du, Feng, Yang and Yang (2012).,Experimental study on heat transfer enhancement of wavy finned flat tube with longitudinal vortex generators., Applied Thermal Engineering 50 (2013):55-62.
- [6] He, Chu, Tao, Zhang and Xie (2012).,Analysis of heat transfer and pressure drop for fin-and-tube heat exchangers with rectangular winglet-type vortex generators., Applied Thermal Engineering 61 (2013):770-783.
- [7] Du, Feng, Li, Yang and Yang (2014).,Heat transfer enhancement of wavy finned flat tube by punched longitudinal vortex generators., International Journal of Heat and Mass Transfer 75 (2014):368–380.

- [8] A.A., Mazlan A. and H.A. (2014).,Heat transfer enhancement and pressure drop for fin-and-tube compact heat exchangers with wavy rectangular winglet-type vortex generators., International Communications in Heat and Mass Transfer 54 (2014):132–140.
- [9] Jedsadaratanachai and Boonloi (2014).,Thermal performance assessment in a fin-and-oval-tube heat exchanger with delta winglet vortex generators., Journal of Mechanical Science and Technology 29 (4) (2015):1765-1779.
- [10] Li, Du, Zhang, Yang and Yang (2015).,Numerical simulation on flow and heat transfer of fin-and-tube heat exchanger with longitudinal vortex generators., International Journal of Thermal Sciences 92 (2015):85-96.
- [11] Zhang, Qin and Ma (2016).,Simulation and experimental investigation of the wavy fin-and-tube intercooler., Case Studies in Thermal Engineering 8 (2016):32–40.
- [12] Sarangi and Mishra (2017).,Effect of winglet location on heat transfer of a fin-and-tube heat exchanger., Applied Thermal Engineering 116 (2017):528–540.
- [13] Xiao, Wu, Feng, Du and Yang (2017).,Experimental study on heat transfer enhancement of wavy finned flat tubes by water spray cooling., International Journal of Heat and Mass Transfer 110 (2017):383–392.
- [14] Yu, Jeon and Kim (2017).,Analytic solutions of the friction factor and the Nusselt number for the low-Reynolds number flow between two wavy plate fins., International Journal of Heat and Mass Transfer 115 (2017):307–316.

ภาคผนวก ก.
ตารางบันทึกผลการทดลอง

ตารางที่ ก.1 ผลการทดลองของครีบน้ำที่มีการจัดวางตำแหน่งแบบ Incline

Incline								
Re	มุมปะทะ	มุมคลื่น	ΔP	Nu	f	Nu/Nu ₀	f/f ₀	TEF
500	30	30	23.4458	10.5893	0.0626	2.354643	3.42307	1.5624
		45	29.0066	10.6879	0.0733	2.376566	4.005078	1.4965
		60	16.6728	9.9812	0.0511	2.219428	2.795156	1.5756
	45	30	19.5798	10.0548	0.0558	2.235774	3.052214	1.5413
		45	22.2979	10.3582	0.0616	2.303256	3.369518	1.5363
		60	23.1681	10.7903	0.0618	2.399335	3.380596	1.5987
	60	30	15.8722	9.8134	0.0466	2.182107	2.546603	1.5979
		45	15.2254	9.7171	0.0453	2.16069	2.475204	1.5973
		60	17.8522	9.1827	0.0549	2.041865	3.001632	1.3548
613	30	30	34.6612	11.5973	0.0606	2.331484	3.657541	1.5132
		45	43.0278	11.6618	0.0711	2.344451	4.292112	1.4426
		60	23.5926	10.8307	0.0478	2.177371	2.884966	1.5295
	45	30	28.2799	10.9517	0.053	2.20169	3.199074	1.4942
		45	32.437	11.1611	0.0592	2.2438	3.571729	1.4679
		60	33.7685	11.6552	0.0591	2.343136	3.568007	1.5334
	60	30	22.4249	10.7417	0.0437	2.159476	2.636507	1.5632
		45	21.5046	10.501	0.0423	2.111085	2.549839	1.5453
		60	25.6013	9.998	0.052	2.010117	3.136743	1.3046
689	30	30	43.3822	12.0547	0.0597	2.288409	3.792013	1.4675
		45	53.8709	12.1604	0.07	2.308478	4.448089	1.4037
		60	28.7509	11.3037	0.0461	2.145853	2.928564	1.4998

	45	30	34.9784	11.4175	0.0518	2.167462	3.288749	1.4575
		45	40.2164	11.5892	0.0579	2.200041	3.682442	1.4247
		60	41.8151	12.0888	0.0576	2.294894	3.661968	1.4889
	60	30	27.3456	11.227	0.0421	2.131296	2.674846	1.5354
		45	26.1909	10.9823	0.0407	2.084841	2.585439	1.519
		60	31.6117	10.5409	0.0507	2.001039	3.219947	1.3551
802	30	30	58.0224	12.7106	0.0584	2.238548	3.956596	1.4153
		45	72.4224	12.8794	0.0686	2.268285	4.644805	1.3595
		60	37.1353	11.9161	0.0436	2.098618	2.956258	1.4622
	45	30	46.1745	12.0038	0.05	2.114074	3.38987	1.4073
		45	53.3633	12.1915	0.0565	2.147136	3.825474	1.3729
		60	55.6104	12.7138	0.0561	2.239117	3.799346	1.435
	60	30	35.7817	11.8498	0.0405	2.086945	2.7424	1.5035
		45	33.9447	11.6388	0.0387	2.049795	2.623904	1.4861
		60	41.796	11.3398	0.0491	1.997128	3.326843	1.3378
880	30	30	69.5134	13.0946	0.0575	2.195873	4.05166	1.3774
		45	87.1964	13.287	0.0679	2.228151	4.776354	1.323
		60	43.9139	12.2932	0.0425	2.061486	2.992278	1.4306
	45	30	55.0118	12.3733	0.0491	2.074921	3.456732	1.3723
		45	63.8148	12.7047	0.0557	2.130501	3.919667	1.3512
		60	67.1379	13.084	0.0557	2.194101	3.921969	1.3913
	60	30	41.983	12.2772	0.0392	2.058812	2.758856	1.4679
		45	40.0365	12.0194	0.0491	2.01557	2.657544	1.4551
		60	49.7968	11.8393	0.0482	1.98538	3.391333	1.3214

ตารางที่ ก.2 ผลการทดลองของครีบก้นที่มีการจัดวางตำแหน่งแบบ V-shape downstream

V-Shape down stream								
Re	มุมปะทะ	มุมคลื่น	ΔP	Nu	f	Nu/Nu ₀	f/f ₀	TEF
500	30	30	23.7969	11.2891	0.0736	2.510237	4.025066	1.5781
		45	37.9713	12.9218	0.1063	2.873291	5.808513	1.5984
		60	43.2412	12.5741	0.1107	2.795961	6.051447	1.5343
	45	30	24.4289	11.1042	0.0743	2.469118	4.059596	1.5478
		45	30.6654	12.1191	0.0865	2.594787	4.729007	1.6055
		60	31.7089	12.2209	0.0876	2.717441	4.791369	1.6119
	60	30	14.2251	10.4618	0.0461	2.326274	2.518643	1.7098
		45	19.0714	11.2283	0.06	2.496715	3.281012	1.6802
		60	21.5319	11.5488	0.0665	2.567984	3.63429	1.6703
613	30	30	35.0466	12.1028	0.0717	2.433108	4.328635	1.4929
		45	57.623	13.3832	0.1053	2.690515	6.354711	1.4526
		60	65.6575	13.3572	0.1089	2.685296	6.571125	1.4336
	45	30	35.3358	11.8589	0.0708	2.38409	4.270934	1.4694
		45	45.0465	12.4448	0.0832	2.50187	5.022905	1.4609
		60	46.2805	12.9048	0.0837	2.594346	5.051168	1.512
	60	30	19.8965	11.2442	0.0428	2.260497	2.581727	1.6478
		45	26.8086	11.9966	0.0558	2.411762	3.368767	1.6088
		60	30.2778	12.3423	0.0618	2.481256	3.728725	1.6001
689	30	30	43.6417	12.593	0.0706	2.390603	4.486115	1.4495
		45	73.502	13.8567	0.1053	2.630496	6.688765	1.3961
		60	84.3733	13.7831	0.1095	2.616536	6.956666	1.3706
	45	30	43.3723	12.2629	0.0685	2.327949	4.352262	1.4258
		45	55.9813	12.808	0.0815	2.431414	5.176608	1.4055
		60	57.6855	13.2194	0.0819	2.50952	5.206118	1.4479
60	30	24.1561	11.6836	0.0411	2.217974	2.615003	1.6099	

		45	32.6731	12.3267	0.0538	2.340043	3.421257	1.553
		60	36.8566	12.7311	0.0594	2.416824	3.775124	1.5521
802	30	30	58.6988	13.1518	0.0698	2.316244	4.729201	1.3799
		45	99.8979	14.5283	0.1031	2.558678	7.319583	1.3292
		60	116.2216	14.4226	0.1092	2.540061	7.391465	1.304
	45	30	57.4423	12.7721	0.0665	2.249385	4.500518	1.3624
		45	74.8056	13.3432	0.0797	2.349953	5.396238	1.3398
		60	76.887	13.7818	0.0796	2.427212	5.392458	1.3841
	60	30	31.0381	12.2498	0.0389	2.157395	2.63721	1.5615
		45	42.6796	12.9129	0.0516	2.274179	3.497107	1.4983
		60	47.4548	13.2369	0.0561	2.331231	3.800327	1.4939
880	30	30	70.7403	13.4827	0.0694	2.260956	4.884022	1.3326
		45	120.4457	14.6526	0.1023	2.457147	7.680914	1.2724
		60	140.723	14.8051	0.1074	2.482714	7.556488	1.2652
	45	30	68.4062	13.0787	0.0652	2.193208	4.586286	1.3201
		45	89.3893	13.4045	0.0788	2.247853	5.530762	1.2711
		60	92.3891	14.1353	0.0786	2.370404	5.530638	1.3404
	60	30	36.4278	12.5842	0.0377	2.110284	2.656267	1.5238
		45	50.2176	13.2068	0.0501	2.214695	3.529357	1.4546
		60	56.067	13.4824	0.0547	2.260901	3.849118	1.4426

ตารางที่ ก.3 ผลการทดลองของครีบบั๊กที่มีการจัดวางตำแหน่งแบบ V-shape upstream

V-Shape up stream								
Re	มุมปะทะ	มุมคลื่น	ΔP	Nu	f	Nu/Nu ₀	f/f ₀	TEF
500	30	30	23.1839	9.6227	0.0665	2.139699	3.635832	1.3915
		45	40.2105	10.957	0.1035	2.436393	5.659333	1.3672
		60	48.9157	10.7379	0.1174	2.38768	6.414371	1.2851
	45	30	24.6581	9.9182	0.0666	2.205405	3.640703	1.4336
		45	33.8674	10.4644	0.0852	2.326868	4.657444	1.3933
		60	35.5515	9.7233	0.0904	2.162082	4.941122	1.2694
	60	30	13.7861	8.7553	0.0401	1.946832	2.193626	1.4983
		45	19.3532	9.1487	0.0535	2.054306	2.923156	1.4228
		60	21.9787	9.1973	0.0603	2.045109	3.29697	1.3741
613	30	30	33.9168	10.6085	0.0643	2.132713	3.882624	1.3569
		45	60.2468	12.2315	0.1023	2.458985	6.175427	1.3403
		60	74.2756	11.2646	0.1166	2.264602	7.038612	1.1816
	45	30	35.4319	10.8423	0.0632	2.179705	3.812808	1.3952
		45	49.3816	11.614	0.0817	2.334843	4.929311	1.3719
		60	52.1335	10.6561	0.0872	2.142272	5.263891	1.2315
	60	30	19.1527	9.6951	0.0369	1.949075	2.227033	1.4925
		45	27.1759	10.0731	0.0496	2.02807	2.995601	1.4048
		60	30.8875	10.0678	0.0558	2.024	3.365785	1.3505
689	30	30	42.1781	11.1548	0.0631	2.117586	4.011339	1.3327
		45	75.6558	12.9867	0.1016	2.465344	6.456076	1.324
		60	93.7021	11.8833	0.1158	2.25588	7.358018	1.1598
	45	30	43.582	11.3595	0.0614	2.156432	3.900577	1.3699
		45	61.2427	12.2984	0.0799	2.334686	5.076572	1.3584
		60	64.7663	11.2331	0.0855	2.13244	5.43222	1.2131
	60	30	23.0891	10.2449	0.0352	1.944849	2.237218	1.487

		45	32.9866	10.6184	0.0476	2.015747	3.028036	1.3933
		60	37.5493	10.5711	0.0535	2.006774	3.399961	1.3345
802	30	30	56.3402	11.8908	0.0618	2.094174	4.184755	1.2995
		45	105.8122	13.9669	0.0953	2.459813	6.453086	1.3212
		60	126.4862	12.618	0.1144	2.222236	7.748309	1.123
	45	30	57.2938	12.0156	0.0593	2.126152	4.016806	1.3312
		45	81.4499	13.1827	0.0778	2.3217	5.2714	1.334
		60	86.0984	12.0375	0.0832	2.120013	5.637228	1.1912
	60	30	29.5205	11.0424	0.0331	1.944757	2.242736	1.4857
		45	42.5532	11.2988	0.0452	1.989916	3.059719	1.3707
		60	48.5105	11.1076	0.0507	1.956236	3.434381	1.2966
880	30	30	67.4486	12.265	0.0609	2.056763	4.288612	1.2659
		45	125.2287	14.5862	0.0933	2.44601	6.566372	1.3062
		60	153.0617	13.0692	0.1141	2.19162	8.03082	1.0944
	45	30	67.9822	12.3963	0.058	2.108777	4.084447	1.3004
		45	98.3236	13.7416	0.0775	2.304384	5.457705	1.3088
		60	102.8899	12.4925	0.0819	2.094909	5.765022	1.1683
	60	30	34.7195	11.4152	0.0321	1.914252	2.259921	1.4587
		45	49.8437	11.7234	0.0437	1.965934	3.073972	1.3521
		60	57.0134	11.5328	0.0491	1.933974	3.456329	1.2791