

การพัฒนาสมรรถนะเชิงความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ
fin-and-tube ที่มีการติดตั้งปีกสร้างการไหลหมุนวน

Thermal performance improvement in fin-and-tube heat exchanger
equipped with winglet vortex generators



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

การพัฒนาสมรรถนะเชิงความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ
fin-and-tube ที่มีการติดตั้งปีกสร้างการไหลหมุนวน

Thermal performance improvement in fin-and-tube heat exchanger
equipped with winglet vortex generators



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thermal performance improvement in fin-and-tube heat exchanger
equipped with winglet vortex generators



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2560

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การพัฒนาสมรรถนะเชิงความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ fin-and-tube ที่มี
การติดตั้งปีกสร้างการไหลหมุนวน

Thermal performance improvement in fin-and-tube heat exchanger equipped
with winglet vortex generators

ผู้จัดทำ

1. นาย กฤตภาส ลายเมฆ รหัสประจำตัว 57010030
2. นาย ปิยะชาติ ไชยพิมล รหัสประจำตัว 57010783
3. นาย สมบูรณ์ เรณูศักดิ์ รหัสประจำตัว 57011300

วิภาดา เจษฎารัตนชัย

(ผศ.ดร.วิภาดา เจษฎารัตนชัย)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนาสมรรถนะเชิงความร้อนแบบ fin-and-tube ที่มีการติดตั้งปีกสร้างการไหลหมุนวน

นายกฤตภาส ลายเมฆ	57010030
นายปิยะชาติ ไชยพิมล	57010783
นายสมบุรณ์ เรณูศักดิ์	57011300
ผศ.ดร.วิฑาดา เจษฎารัตนชัย อาจารย์ที่ปรึกษา ปีการศึกษา 2560	

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการศึกษาเชิงตัวเลขของโครงสร้างการไหลและการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ fin-and-tube ที่มีการติดตั้งปีกสร้างการไหลหมุนวน มีการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มและอัลกอริทึมแบบ SIMPLE ในการแก้ปัญหาแบบจำลอง มีการพิจารณาอิทธิพลของตำแหน่งในการติดตั้ง, ความสูง, ขนาด, ทิศทางการไหลและมุมปะทะการไหล สำหรับการไหลและการถ่ายเทความร้อนในช่วงการไหลราบเรียบ ผลที่ได้จากการศึกษานำเสนอในรูปแบบของการไหลและพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อน นอกจากนี้มีการสรุปค่าผลการศึกษารูปของสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน มีการเปรียบเทียบค่าเลขนัสเซลและค่าตัวประกอบเสียดทานสำหรับแบบจำลองที่มีจำนวนกริดแตกต่างกัน รวมทั้งมีการเปรียบเทียบผลการศึกษากับงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ จากผลการศึกษาในเบื้องต้น พบว่า เมื่อเพิ่มจำนวนกริดจาก 120000 เป็น 180000 ไม่ส่งผลกระทบต่อทั้งการไหลและการถ่ายเทความร้อน ดังนั้นจำนวนกริดประมาณ 120000 จึงถูกใช้ในการสร้างสำหรับทุก ๆ กรณีศึกษา นอกจากนี้ยังพบว่า ผลที่ได้จากการศึกษาแบบจำลองยังมีความสอดคล้องกับผลที่ได้รับการตีพิมพ์เป็นที่เรียบร้อยแล้ว

คำสำคัญ: โครงสร้างการไหล, การถ่ายเทความร้อน, ปีกสร้างการไหล, เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ fin-and-tube, สมรรถนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thermal performance improvement in fin-and-tube heat exchanger equipped with winglet vortex generators

Krittaphat Laimek 57010030
Piyachart Chaipimol 57010783
Somboon Raenoosak 57011300
Asst.Prof. Dr.Withada Jedsadaratanacha Advisor
Year 2017

Abstract

Numerical investigations on flow and heat transfer characteristics in the fin-and-tube heat exchanger placed with winglet vortex generators are presented. The finite volume method with SIMPLE algorithm is selected to solve the present problem. The influences of the winglet location, height of winglet, size of winglet, direction of air flow and flow attack angle on flow and heat transfer are considered for laminar regime. The numerical results are reported in terms of flow pattern and heat transfer behavior. The performance evaluations in the fin-and-tube heat exchanger are also concluded. The Nusselt number and friction factor with various grid numbers are compared. The results are also compared with the previous investigations. As the results, it is found that the increasing grid cell from 120,000 to 180,000 has no effect for both flow and heat transfer. Therefore, the grid around 120,000 is created for all cases of the computational domain. Moreover, the excellent agreement for between the values from the present works and the values of the previous research are detected.

Keywords: flow structure, heat transfer, winglet, fin-and-tube heat exchanger, performance

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เพราะได้รับคำแนะนำ ได้รับความเอาใจใส่ รวมถึงชี้แนวทางไปในทางที่ถูกต้องเสมอให้แก่คณะผู้จัดทำ จากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.วิฑาดา เจษฎารัตนชัย รวมถึงอาจารย์คนอื่นๆที่ให้คำปรึกษาด้วยความเต็มใจ ถึงแม้ว่าจะไม่ใช่อาจารย์ที่ปรึกษาก็ตาม

ขอขอบคุณน้องร่วมสถาบันทุกคนจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง แห่งนี้ ที่ให้ความช่วยเหลือในทุกๆด้านจนทำให้ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

และสุดท้ายนี้ขอขอบคุณบุคคลที่สำคัญที่สุดในชีวิตของข้าพเจ้าก็คือบิดา และมารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ซึ่งได้เลี้ยงดูข้าพเจ้ามาอย่างดี และยังเป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้าเสมอมา ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันหาที่สุดมิได้และขอกราบขอบพระคุณมาในที่นี้

นาย กฤตภาส ลายเมฆ

นาย ปิยะชาติ ไชยพิมล

นาย สมบูรณ์ เรณูศักดิ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VI
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	X

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้จากงานวิจัย.....	2

บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ.....	3
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3

บทที่ 3 สมการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 บทนำ.....	16
3.2 สมมติฐานของการไหลและสมการควบคุม.....	16
3.3 เงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions).....	18
3.3.1 ขอบเขตที่ทางเข้า.....	18
3.3.2 ขอบเขตที่ทางออก.....	18
3.3.3 บริเวณพื้นผิวของครีป.....	19
3.3.4 บริเวณพื้นผิวท่อ.....	19
3.4 การไหลแบบภายในและการถ่ายเทความร้อน.....	19
3.4.1 สภาวะการไหล.....	19
3.4.2 เลขนัสเซิล.....	20
3.4.3 ตัวประกอบความเสียดทาน.....	20
3.4.4 การวิเคราะห์ความร้อนทั่วไป.....	20
3.5 ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method).....	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 การตรวจสอบความถูกต้องของการคำนวณและกรณีศึกษา	
4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของการคำนวณ.....	22
4.2 กรณีศึกษา	23
4.3 ค่าเงื่อนไขขอบเขตในการคำนวณการไหลสามมิติ.....	23
บทที่ 5 ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและการอภิปราย	
5.1 อธิพลของความสูง.....	24
5.1.1 การวิเคราะห์สมรรถนะเชิงความร้อนเนื่องจากอิทธิพลของความสูง.....	24
5.1.2 พฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากอิทธิพลของความสูง.....	27
5.2 อธิพลของมุมปะทะ.....	32
5.2.1 การวิเคราะห์สมรรถนะเชิงความร้อนเนื่องจากอิทธิพลของมุมปะทะ.....	33
5.2.2 พฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากอิทธิพลของมุมปะทะ	35
บทที่ 6 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	
6.1 สรุปผลการจำลอง.....	43
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	44
บรรณานุกรม.....	45

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การกระจายตัวของอนุกรมโรบบริเวณครีบที่อยู่ใกล้ปีกและบริเวณผิวท่อ	3
2.2 ความสัมพันธ์ของจำนวนปีกกับอนุกรมโรบิขาออก	4
2.3 การกระจายความเร็วของพื้นครีบ	4
2.4 ความสัมพันธ์ของจำนวนปีกที่ติดกับเลขนัสเซล	5
2.5 ความสัมพันธ์ของจำนวนปีกกับค่าตัวประกอบความเสียดทาน	5
2.6 ความสัมพันธ์ของมุมปะทะกับเลขนัสเซล	6
2.7 สนามความเร็วรอบผิวครีบ	6
2.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์กับเลขนัสเซลของการวางท่อ	7
2.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์กับค่าเฉลี่ยความดันตกคร่อมของการวางท่อ ในแต่ละกรณี	7
2.10 รูปแบบเส้นทางการไหลของการจัดท่อแบบเรียง	8
2.11 การกระจายตัวของอนุกรมโรบิเพื่อการจัดเรียงในกรณีพื้นฐานและกรณี RVG	9
2.12 เส้นทางการไหลรอบๆปีกรูปทรงสามเหลี่ยม	10
2.13 กราฟความสัมพันธ์ของเลขเรย์โนลด์ต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในแต่ละ กรณีที่มุมปะทะต่างกัน	10
2.14 กราฟความสัมพันธ์ของเลขเรย์โนลด์ต่อค่าความดันตกคร่อมในแต่ละกรณีที่มุม ปะทะต่างๆ	11
2.15 การกระจายตัวของแกนหลัก Vortex ในโดเมนกายภาพของ FTCHE ด้วยครีบ และท่อแบบต่างๆที่ $Re=200$	11
2.16 กราฟเปรียบเทียบการจืดวางของ LVG	12
2.17 กราฟแสดงอิทธิพลของมุมปะทะต่อเลขนัสเซลและค่าตัวประกอบความเสียดทาน	13
2.18 กราฟแสดงอิทธิพลของจำนวนท่อต่อเลขนัสเซลและค่าตัวประกอบความเสียดทาน	14
3.1 ภาพด้านบน (top view) ของบริเวณคำนวณปีกทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า	16
3.2 ภาพด้านบน และภาพด้านข้างของตำแหน่งการติดปีก	17
3.3 ภาพด้านบน และมุมด้านข้างของบริเวณการคำนวณที่มีเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้	18
3.4 การถ่ายเทความร้อนไปยังของไหลที่เข้ามาในท่อเท่ากับการเพิ่มขึ้นของพลังงานของไหล	20
3.5 ภาพตัดแสดงเมชแบบทรงสี่หน้า	21
4.1 แสดงกราฟผลการตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์กับเลขนัสเซล	22
4.2 แสดงกราฟผลการตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์กับตัวประกอบ	22
5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์กับอัตราส่วนเลขนัสเซลของครีบที่ติดปีกรูปทรงสี่เหลี่ยม ที่มุมปะทะ 30° ที่ความสูงปีก 1.82, 2.18, 2.54 มิลลิเมตร	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์กับอัตราส่วนค่าตัวประกอบความเสียดทานของ ครีปที่ติดปีกรูปทรงสี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยม ที่มุมปะทะ 30° ที่ความสูงของปีก 1.82, 2.18, 2.54 มิลลิเมตร	25
5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์กับค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของครีปที่ติดปีกรูปทรง สี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยม ที่มุมปะทะ 30° ที่ความสูงปีก 1.82, 2.18, 2.54 มิลลิเมตร	26
5.4 คอนทัวร์เลขนัสเชิลบริเวณผิวท่อนของปีกรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ความสูง 1.82 มิลลิเมตร มุมปะทะ 30°	27
5.5 คอนทัวร์เลขนัสเชิลบริเวณผิวท่อนของปีกรูปทรงสามเหลี่ยมความสูง 1.82 มิลลิเมตร ที่มุมปะทะ 30°	27
5.6 คอนทัวร์เลขนัสเชิลบริเวณพื้นผิวท่อนของปีกสี่เหลี่ยมที่ความสูง 2.54 มิลลิเมตร มุมปะทะ 30°	28
5.7 คอนทัวร์เลขนัสเชิลบริเวณผิวท่อนของปีกสามเหลี่ยมที่ความสูง 2.54 มิลลิเมตร มุมปะทะ 30°	28
5.8 คอนทัวร์อุณหภูมิของการไหลของอากาศที่มีการติดปีกรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ความสูง 1.82 มิลลิเมตร มุมปะทะ 30°	29
5.9 คอนทัวร์อุณหภูมิของการไหลของอากาศที่มีการติดปีกรูปทรงสามเหลี่ยมที่ความสูง 1.82 มิลลิเมตร มุมปะทะ 30°	29
5.10 คอนทัวร์อุณหภูมิของการไหลของอากาศที่มีการติดปีกรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ความสูง 2.54 มิลลิเมตร มุมปะทะ 30°	30
5.11 พฤติกรรมอุณหภูมิของการไหลของอากาศที่มีการติดปีกแบบสามเหลี่ยมที่ความสูง 2.54 มิลลิเมตร มุมปะทะ 30°	30
5.12 คอนทัวร์ความเร็วของการไหลของอากาศที่มีการติดปีกรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ความสูง 1.82 มิลลิเมตร มุมปะทะ 30°	31
5.13 คอนทัวร์ความเร็วของการไหลของอากาศที่มีการติดปีกรูปทรงสามเหลี่ยมที่ความสูง 1.82 มิลลิเมตร มุมปะทะ 30°	31
5.14 คอนทัวร์ความเร็วของการไหลของอากาศที่มีการติดปีกรูปทรงสี่เหลี่ยม ที่ความสูง 2.54 มิลลิเมตร มุมปะทะ 30°	31
5.15 คอนทัวร์ความเร็วของการไหลของอากาศที่มีการติดปีกรูปทรงสามเหลี่ยม ที่ความสูง 2.54 มิลลิเมตร มุมปะทะ 30°	32

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์กับเลขนัสเซลของครีปที่ติดปีกรูปทรงสี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยมที่ความสูง 2.18 มิลลิเมตร มุมปะทะ 15^0 , 30^0 , 45^0 และ 60^0 ตามลำดับ.....	33
5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์กับค่าความดันตกคร่อมของครีปที่ติดปีกรูปทรงสี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยมที่ความสูง 2.18 มิลลิเมตร มุมปะทะ 15^0 , 30^0 , 45^0 และ 60^0	33
5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์กับค่า TEF ของครีปที่ติดปีกแบบสี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยมที่ความสูง 2.18 มิลลิเมตร มุมปะทะ 15^0 , 30^0 , 45^0 และ 60^0 ตามลำดับ.....	34
5.19 คอนทัวร์เลขนัสเซลบนครีปที่ติดปีกแบบสี่เหลี่ยมที่ความสูง 2.18 มิลลิเมตร มุมปะทะ 15^0 ที่เลขเรย์โนลด์ 551.13.....	35
5.20 คอนทัวร์เลขนัสเซลบนครีปที่ติดปีกรูปทรงสี่เหลี่ยม ที่ความสูง 2.18 มิลลิเมตร มุมปะทะ 30^0 ที่เลขเรย์โนลด์ 551.13	36
5.21 คอนทัวร์เลขนัสเซลบนครีปที่ติดปีกรูปทรงสามเหลี่ยม ที่ความสูง 2.18 มิลลิเมตร มุมปะทะ 15^0 ที่เลขเรย์โนลด์ 551.13.....	36
5.22 คอนทัวร์เลขนัสเซลบนครีปที่ติดปีกรูปทรงสามเหลี่ยม ที่ความสูง 2.18 มิลลิเมตร มุมปะทะ 30^0 ที่เลขเรย์โนลด์ 551.13.....	37
5.23 คอนทัวร์อุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านครีปที่ติดปีกรูปทรงสี่เหลี่ยม ที่ความสูง 2.18 มิลลิเมตร มุมปะทะ 15^0 ที่เลขเรย์โนลด์ 551.13.....	38
5.24 คอนทัวร์อุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านครีปที่ติดปีกรูปทรงสี่เหลี่ยม ที่ความสูง 2.18 มิลลิเมตร มุมปะทะ 30^0 ที่เลขเรย์โนลด์ 551.13.....	38
5.25 คอนทัวร์อุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านครีปที่ติดปีกรูปทรงสี่เหลี่ยม ที่ความสูง 2.18 มิลลิเมตร มุมปะทะ 60^0 ที่เลขเรย์โนลด์ 551.13.....	38
5.26 คอนทัวร์อุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านครีปที่ติดปีกรูปทรงสามเหลี่ยม ที่ความสูง 2.18 มิลลิเมตร มุมปะทะ 15^0 ที่เลขเรย์โนลด์ 551.13	39
5.27 คอนทัวร์อุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านครีปที่ติดปีกแบบสามเหลี่ยม ที่ความสูง 2.18 มิลลิเมตร มุมปะทะ 30^0 ที่เลขเรย์โนลด์ 551.13.....	39
5.28 คอนทัวร์อุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านครีปที่ติดปีกรูปทรงสามเหลี่ยม ที่ความสูง 2.18 มิลลิเมตร มุมปะทะ 60^0 ที่เลขเรย์โนลด์ 551.13.....	39
5.29 คอนทัวร์ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านครีปที่ติดปีกแบบสี่เหลี่ยม ที่ความสูง 2.18 มิลลิเมตร มุมปะทะ 15^0 ที่เลขเรย์โนลด์ 551.13.....	40

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.30 คอนทัวร์ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านครีบบlattที่ติดปีกแบบสี่เหลี่ยม ที่ความสูง 2.18 มิลลิเมตร มุมปะทะ 30^0 ที่เลขเรย์โนลด์ 551.13.....	40
5.31 คอนทัวร์ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านครีบบlattที่ติดปีกแบบสี่เหลี่ยม ที่ความสูง 2.18 มิลลิเมตร มุมปะทะ 60^0 ที่เลขเรย์โนลด์ 551.13.....	41
5.32 คอนทัวร์ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านครีบบlattที่ติดปีกแบบสามเหลี่ยม ที่ความสูง 2.18 มิลลิเมตร มุมปะทะ 15^0 ที่เลขเรย์โนลด์ 551.13.....	41
5.33 คอนทัวร์ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านครีบบlattที่ติดปีกรูปทรงสามเหลี่ยม ที่ความสูง 2.18 มิลลิเมตร มุมปะทะ 30^0 ที่เลขเรย์โนลด์ 551.13.....	41
5.34 คอนทัวร์ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านครีบบlattที่ติดปีกแบบสามเหลี่ยม ที่ความสูง 2.18 มิลลิเมตร มุมปะทะ 60^0 ที่เลขเรย์โนลด์ 551.13.....	42



รายการคำย่อและสัญลักษณ์

<p>A พื้นที่หน้าตัด (m^2)</p> <p>A_T พื้นที่ผิวทั้งหมด (m^2)</p> <p>A_{min} พื้นที่ตัดผ่านของการไหลต่ำที่สุด (m^2)</p> <p>C_p ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ (J/kgK)</p> <p>D_h รัศมีไฮดรอลิก (m)</p> <p>f ตัวประกอบความเสียดทาน</p> <p>u_{in} ความเร็วขาเข้า (m/s)</p> <p>H ระยะห่างครีบ</p> <p>L ความยาวการไหล (m)</p> <p>u_i, u_k เวกเตอร์ความเร็วในทิศทาง i และ k</p> <p>Re เลขเรย์โนลด์</p> <p>\dot{m} อัตราการไหลเชิงมวล (kg/s)</p> <p>Nu เลขนัสเซล</p> <p>p ความดัน (Pa)</p> <p>Q ค่าความร้อนที่ของไหลได้รับ (W)</p>	<p>T อุณหภูมิ (K)</p> <p>T_{in} อุณหภูมิขาเข้า (K)</p> <p>T_o อุณหภูมิขาออก (K)</p> <p>T_w อุณหภูมิผิวท่อ (K)</p> <p>ΔT ผลต่างอุณหภูมิลอคมีน (K)</p> <p>\bar{T} อุณหภูมิเฉลี่ยทั้งหมด (K)</p> <p>h ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/m^2K)</p> <p>k_a ค่าความนำความร้อนของอากาศ (W/mK)</p> <p>x_i, x_k ตัวแปรพื้นที่ในทิศทาง i และ k</p> <p>μ ความหนืดพลวัต (pa s)</p> <p>ρ ความหนาแน่นของอากาศ ($\frac{kg}{m^3}$)</p> <p>α ค่าการกระจายความร้อน ($\frac{m^2}{s}$)</p> <p>ΔP ค่าความดันตกคร่อม (Pa)</p> <p>t เวลา (s)</p>
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) เป็นเครื่องมือที่สำคัญมากอย่างหนึ่ง เพราะเป็นเครื่องมือที่ถูกนำมาใช้ในระบบต่างๆทางวิศวกรรมศาสตร์อย่างกว้างขวาง เช่น ระบบเครื่องทำความเย็นและเครื่องปรับอากาศ ระบบความร้อน การระบายอากาศและอุตสาหกรรมด้านปิโตรเคมี เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะทำหน้าที่ให้ความสะดวกแก่การถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลสองชนิดที่มีอุณหภูมิที่แตกต่างกัน โดยที่ของไหลไม่จำเป็นต้องผสมกัน โดยกระบวนการถ่ายเทความร้อนจากของไหลตัวหนึ่งไปสู่ของไหลอีกตัวหนึ่งจะต้องมีผลต่างสุทธิของอุณหภูมิ ในขณะที่เกิดการถ่ายเทความร้อนนั้นของไหลที่ร้อนจะมีอุณหภูมิลดลง ส่วนของไหลเย็นจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น ความแตกต่างของอุณหภูมิของของไหลทั้งสองเป็นตัวขับเคลื่อนการถ่ายเทความร้อนไปสู่ของไหลเย็นซึ่งเป็นไปตามกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ในการทำให้ของไหลไหลผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งจะแสดงให้เห็นผลต่างความดันระหว่างทางเข้าและทางออกของอุปกรณ์

การพัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีจุดมุ่งหมายที่จะเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนให้มีค่าสูงขึ้นสามารถทำได้โดยการเพิ่มพื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อนโดยการติดครีบ การติดครีบเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อนและเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดให้แก่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ครีบมีรูปร่างตามเรขาคณิตหลากหลายแบบ รูปร่างเรขาคณิตของครีบจะช่วยเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเมื่อเทียบกับครีบบนเรียบ การพิจารณาตำแหน่งของการติดปีก ขนาดของปีก มุมปะทะ และเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) คือปัจจัยที่ส่งผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนโดยตำแหน่งของการติดปีกในช่องทางการไหลของของไหลทำให้ความแรงในการไหลผ่านผิวท่อมีค่าเพิ่มขึ้นและทำให้เกิดความไม่เสถียรของการไหล ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น การเพิ่มมุมปะทะส่งผลให้เลขนัสเซล (Nusselt number) มีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น เลขเรย์โนลด์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เลขนัสเซลและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น

งานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการศึกษาโดยการคำนวณทางด้านพลศาสตร์ของไหลและการถ่ายเทความร้อนเป็นเครื่องมือสำหรับการศึกษาพารามิเตอร์ ได้แก่ เลขเรย์โนลด์ ตำแหน่งของปีก ขนาดของปีก และมุมปะทะ เพื่อค้นหาผลของพารามิเตอร์เหล่านี้ที่สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของเครื่องถ่ายเทความร้อนแบบท่อและครีบ ที่ติดตั้งปีก 2 แบบคือ ปีกรูปทรงสี่เหลี่ยม (rectangular winglet) และ ปีกรูปทรงสามเหลี่ยม (triangular winglet)

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1. เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนและการไหล ค่าความดันตกคร่อม (pressure drop) โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข
2. เพื่อศึกษาถึงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อน ได้แก่ มุมปะทะของครีบบนปีก ตำแหน่งการจัดวางปีก ขนาดของปีก และเลขเรย์โนลด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล และการถ่ายเทความร้อนบนพื้นฐานของระเบียบวิธีปริมาตรสับเนื่อง (Finite volume method)
2. พิจารณาการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของปีก ขนาดของปีก และทิศทางการไหลของอากาศ
3. มีมุมปะทะการไหล 15° - 60° และใช้ปีก 2 แบบ ได้แก่ ปีกรูปทรงสี่เหลี่ยมกับปีกรูปทรงสามเหลี่ยม
4. ทำการศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ ระหว่าง 183-716 และสมมุติให้การไหลของอากาศเป็นการไหลแบบราบเรียบ (laminar flow)

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและวางแผนการดำเนินงานเพื่อออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อและครีบ เพื่อให้มีสมรรถนะที่ดีขึ้น
2. รวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อนำมาศึกษาและเป็นข้อมูลในการออกแบบ
3. ศึกษาการใช้งานโปรแกรมวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหล เพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน
4. ทำการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อและครีบ ตามนักวิจัยท่านอื่นที่ได้ทำมาแล้วโดยใช้โปรแกรมเขียนแบบ ในการวาดแบบ และใช้โปรแกรมวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลในการจำลองและวิเคราะห์ นำผลที่ได้มานำมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่อ้างอิงว่ามีความใกล้เคียงกันหรือไม่
5. ทำการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อและครีบ ที่ต้องการศึกษาเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพโดยทำการจำลองและวิเคราะห์หาผลเฉลย
6. ทำการคำนวณเชิงตัวเลขจากแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนที่ต้องการศึกษาโดยการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆตามที่ระบุในวัตถุประสงค์ได้แก่ เลขเรย์โนลด์ ตำแหน่งปีก ขนาดปีก และค่ามุมปะทะ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อสมรรถนะในการถ่ายเทความร้อนของครีบที่มีการติดปีกรูปทรงสี่เหลี่ยม และปีกรูปทรงสามเหลี่ยม
2. เพื่อเป็นการเปรียบเทียบว่าการติดปีกแบบใดให้ประสิทธิภาพดีกว่ากัน เพื่อนำมาใช้ในการเพิ่มสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
3. เป็นองค์ความรู้เพื่อการวิจัยและพัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่อไป

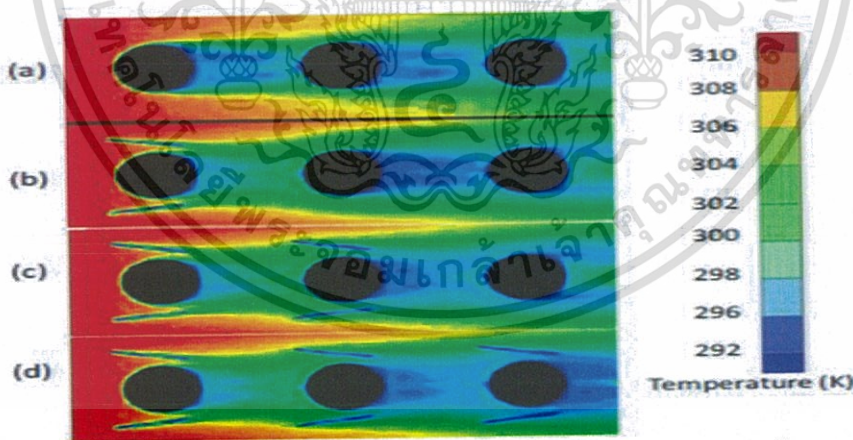
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

บทนี้กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการไหลและการถ่ายเทความร้อนผ่านครีบบที่มีการติดปีกในรูปแบบต่างๆ เพื่อช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อน โดยเน้นถึงงานวิจัยที่ได้ศึกษาถึงผลของการติดครีบบแบบปีกต่อการเพิ่มขึ้นของอัตราการถ่ายเทความร้อน โดยจำแนกตามปัจจัยต่างๆของการติดปีก สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้เสนอในหัวข้อ 2.2 มีดังนี้

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Sarangi and Mishra (2017) ได้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความร้อนของตัวหมุนวน (vortex generator) ตามแนวยาว ที่มีการติดปีกรูปทรงสามเหลี่ยม และ รูปทรงสี่เหลี่ยม โดยมีตัวแปรต่างๆ ได้แก่ มุมปะทะ การจัดวางปีก จำนวนปีก ทำการศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 350-2100 พบว่า การเพิ่มจำนวนปีกจะลดอุณหภูมิขาออกของของไหล และเพิ่มเลขนัสเซิล ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน ค่าความดันมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากการติดปีกเป็นการขัดขวางเส้นทางการไหลของของไหล ส่งผลให้ค่า ตัวประกอบความเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้น การจัดวางปีกใกล้ๆ ท่ออันที่ 2 จะให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเมื่อเทียบกับการวางปีกที่ท่อแรก และท่ออันสุดท้าย, การเพิ่มมุมปะทะให้ถึง 20° จะเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน โดยเพิ่มขึ้นสูงสุด 60%



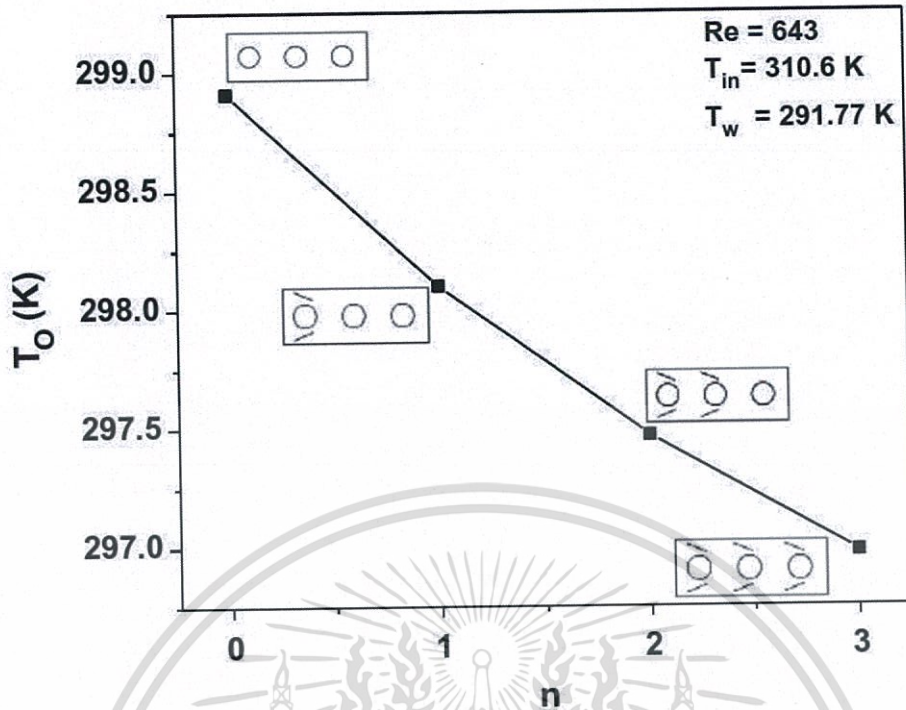
รูปที่ 2.1 การกระจายตัวของอุณหภูมิรอบบริเวณครีบบที่อยู่ใกล้กับปีกและบริเวณพื้นผิวท่อสำหรับกรณี

(a) ไม่มีการติดปีก

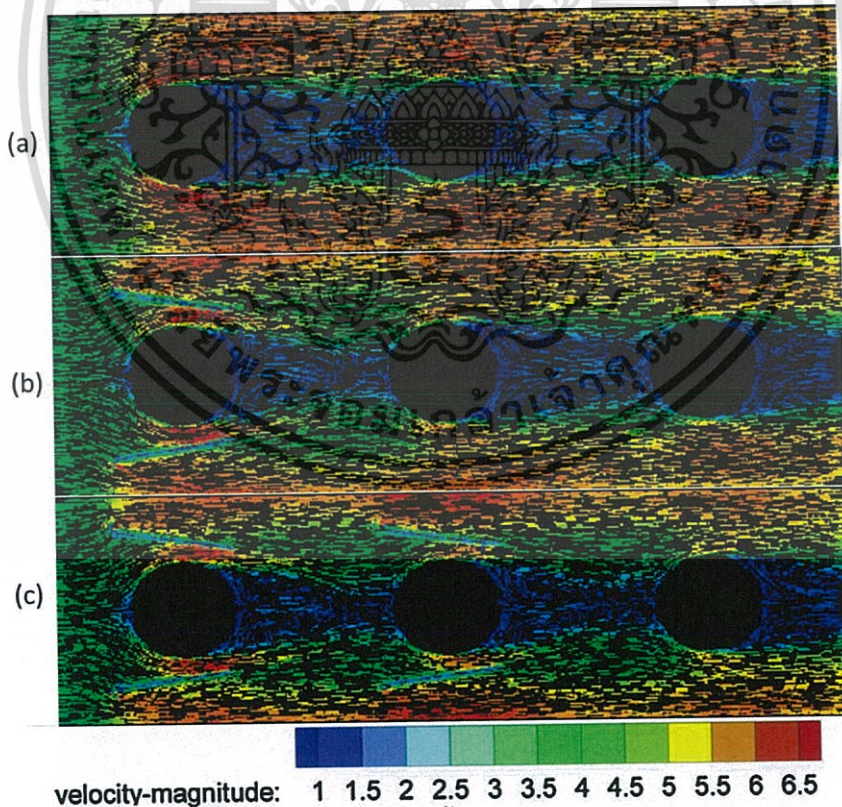
(b) มีการติดปีก 1 คู่

(c) มีการติดปีก 2 คู่

(d) มีการติดปีก 3 คู่



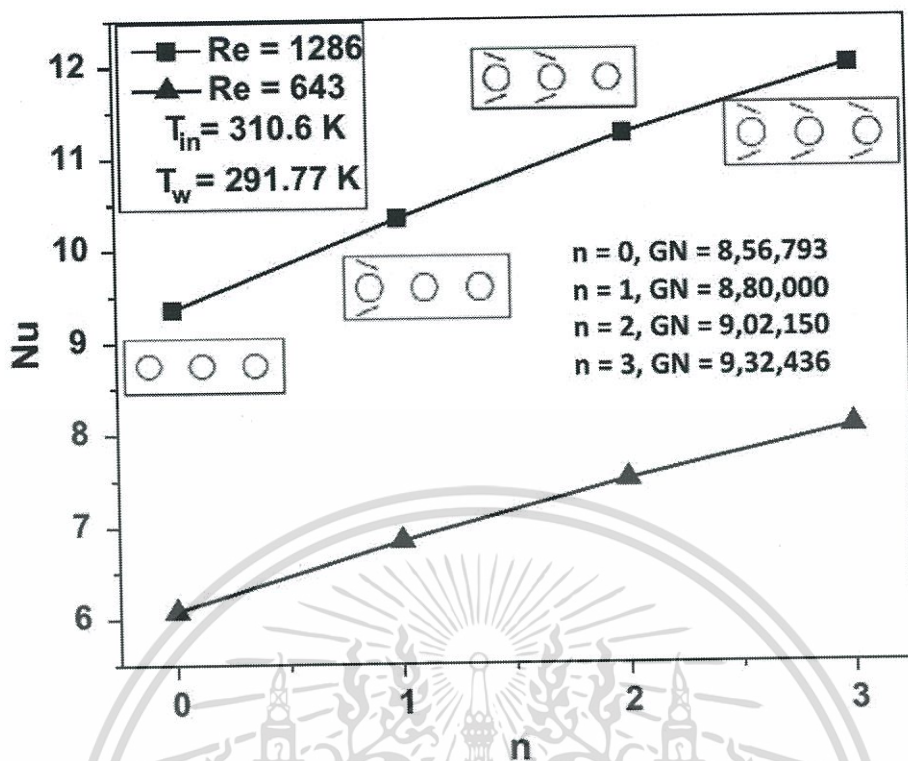
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของจำนวนปีกกับอุณหภูมิขาออก



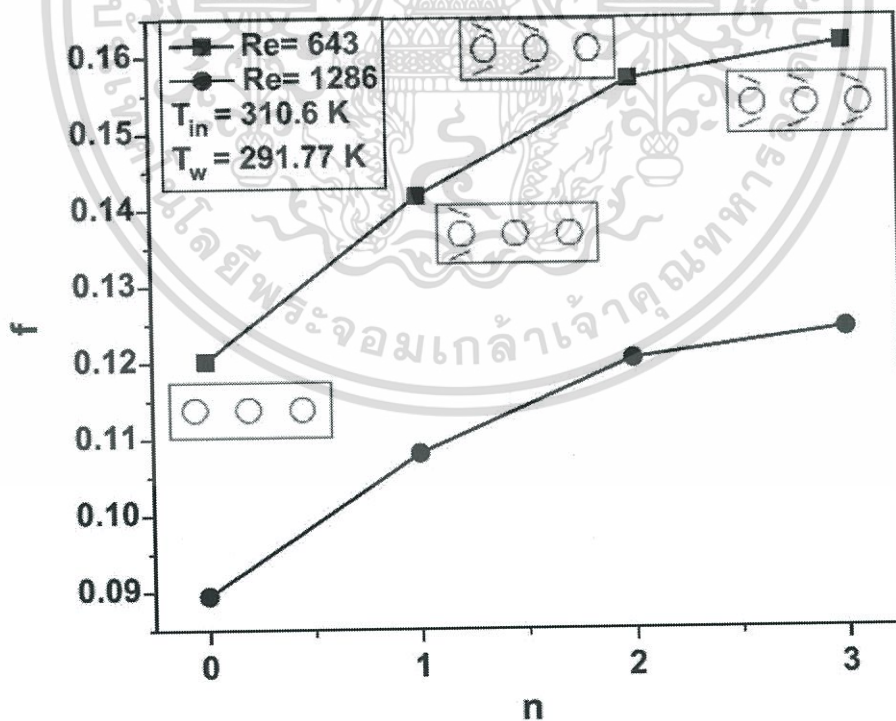
รูปที่ 2.3 การกระจายความเร็วของพื้นผิวครีบสำหรับกรณี (หน่วย m/s)

(a) กรณีไม่ติดปีก, (b) กรณีติดปีก 1 คู่, (c) กรณีติดปีก 2 คู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

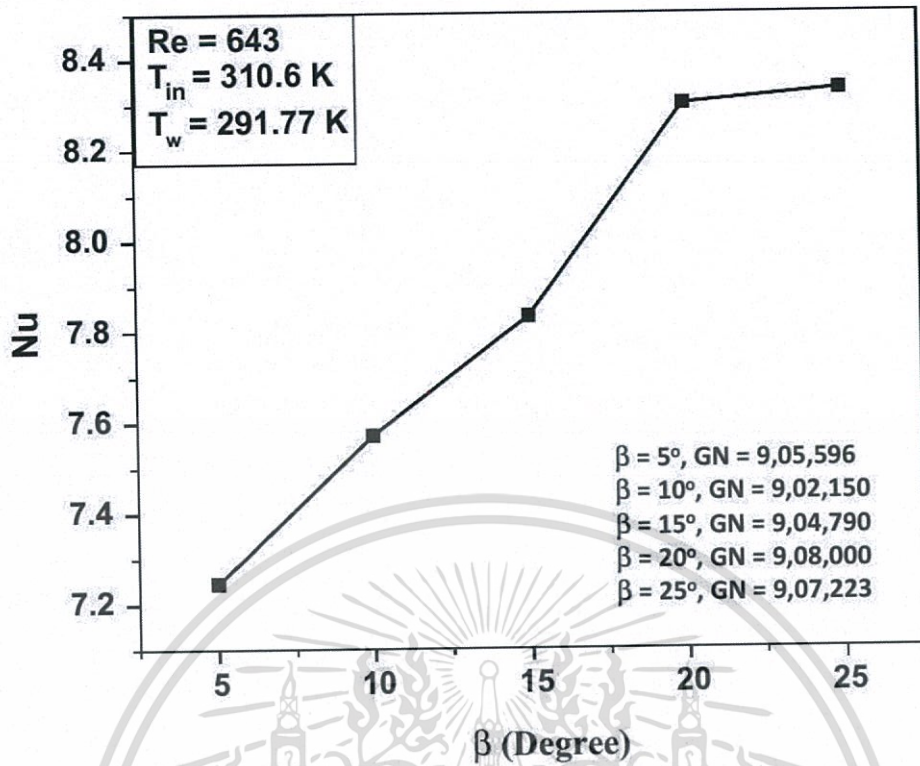


รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ของจำนวนปีกที่ติดกับเลขนัสเซล

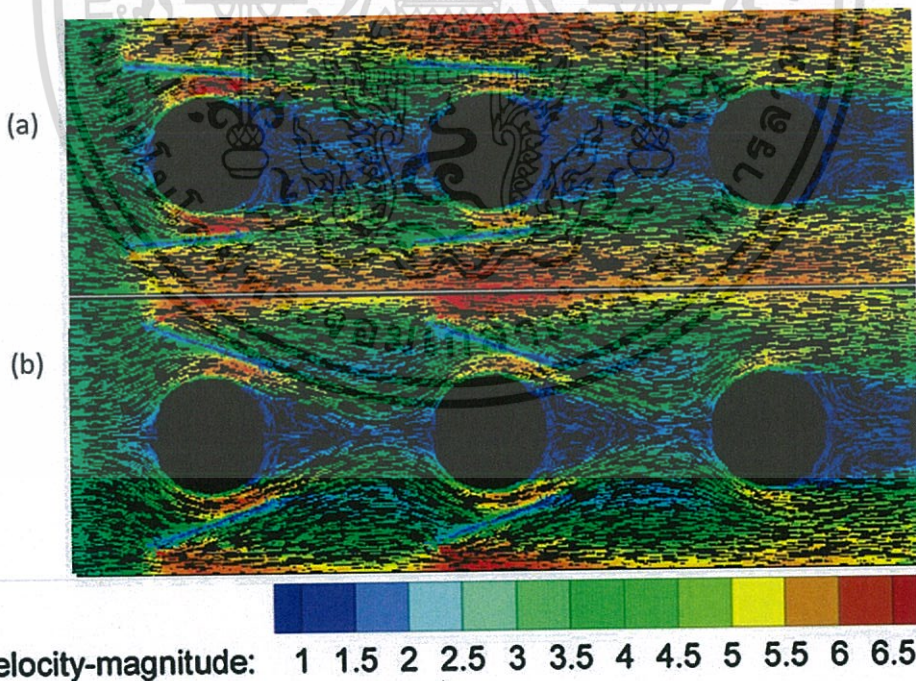


รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ของจำนวนปีกกับค่าตัวประกอบความเสียดทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



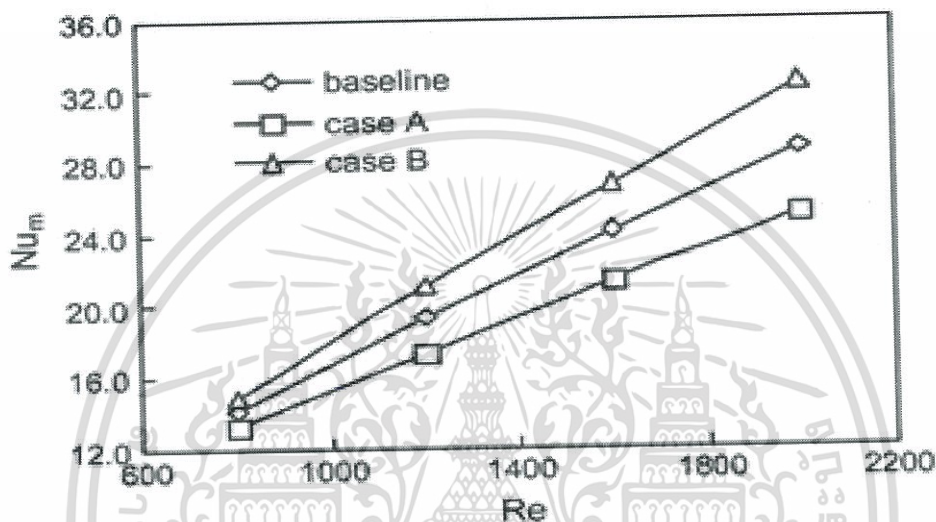
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ของมุมปะทะกับเลขนัสเซล



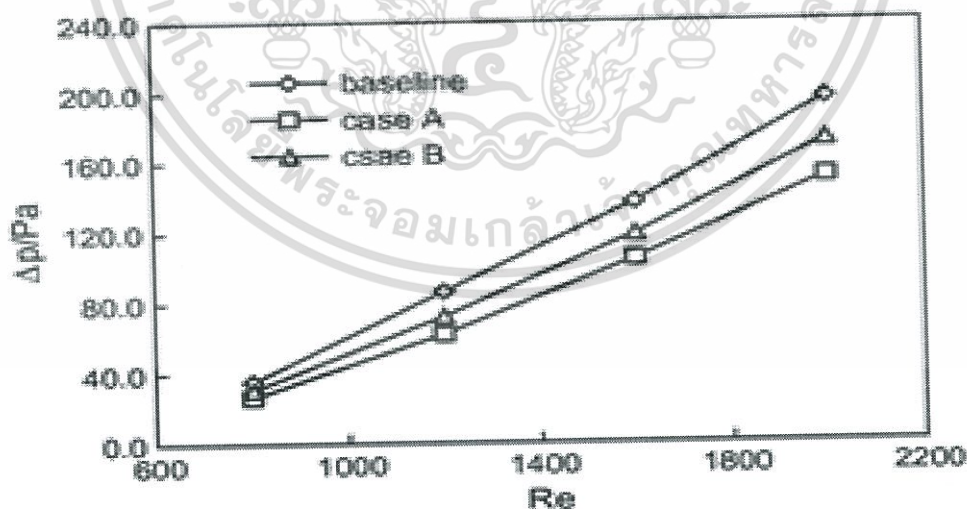
รูปที่ 2.7 สนามความเร็วรอบผิวครีที่ (a) $\beta = 5$ (b) $\beta = 20$ (หน่วย: m/s).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Wu and Tao (2011) ได้ศึกษาผลของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อและการติดปีกรูปทรงสามเหลี่ยม ต่อการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อม โดยทำการศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 800-2100 ช่วงความเร็วอากาศอยู่ที่ 2.5-5.5 m/s โดยพิจารณา 2 กรณี ได้แก่ case A ให้เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ แถวแรกและแถวที่สองเป็น 13.2 mm และ 6 mm ตามลำดับ และ case B ให้เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ แถวแรกและแถวที่สองเป็น 6 mm และ 13.2 mm ตามลำดับ พบว่า case B ช่วยเพิ่มการถ่ายเท ความร้อนเพราะลดค่าความดันตกเฉลี่ยมากกว่า case A ส่วนการติดปีกรูปทรงสามเหลี่ยมนั้น การเพิ่มมุมปะทะจะทำให้เลขนัสเซิลมีค่าเพิ่มขึ้น และเป็นการเพิ่มค่าความดันตกคร่อมเฉลี่ย



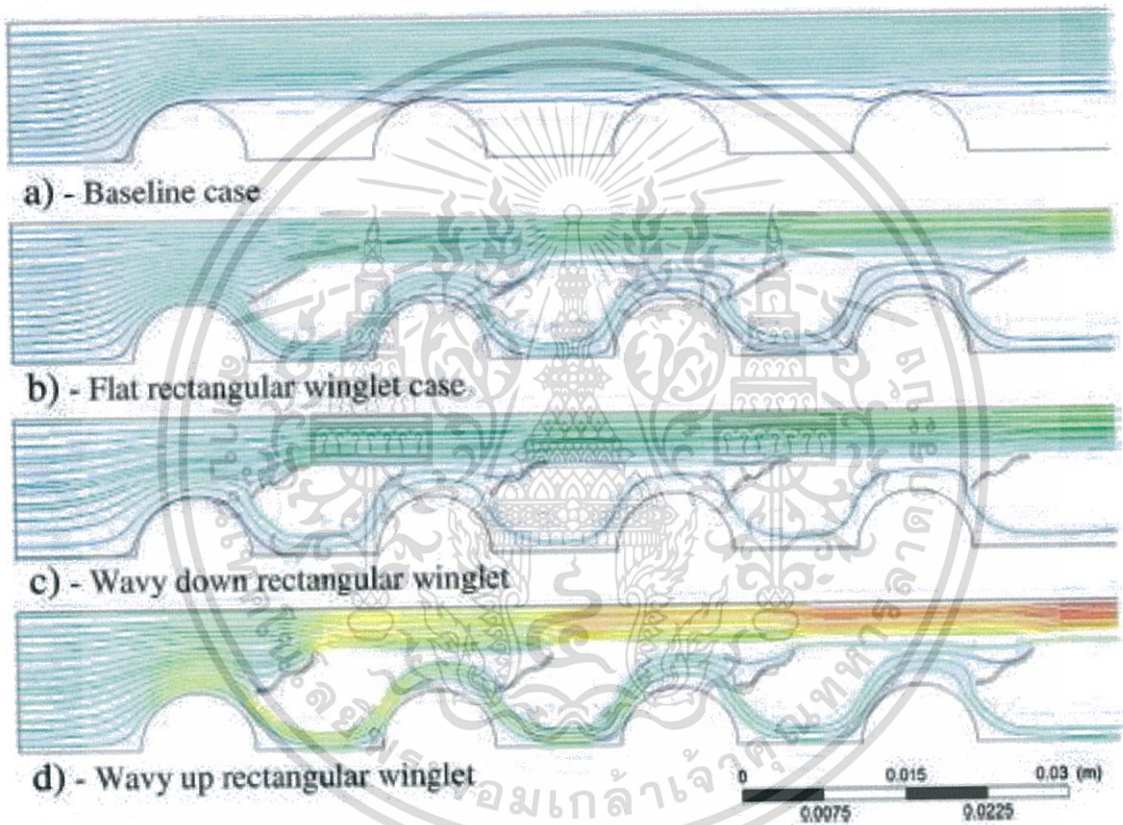
รูปที่ 2.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์กับเลขนัสเซิลของการวางท่อในแต่ละกรณี



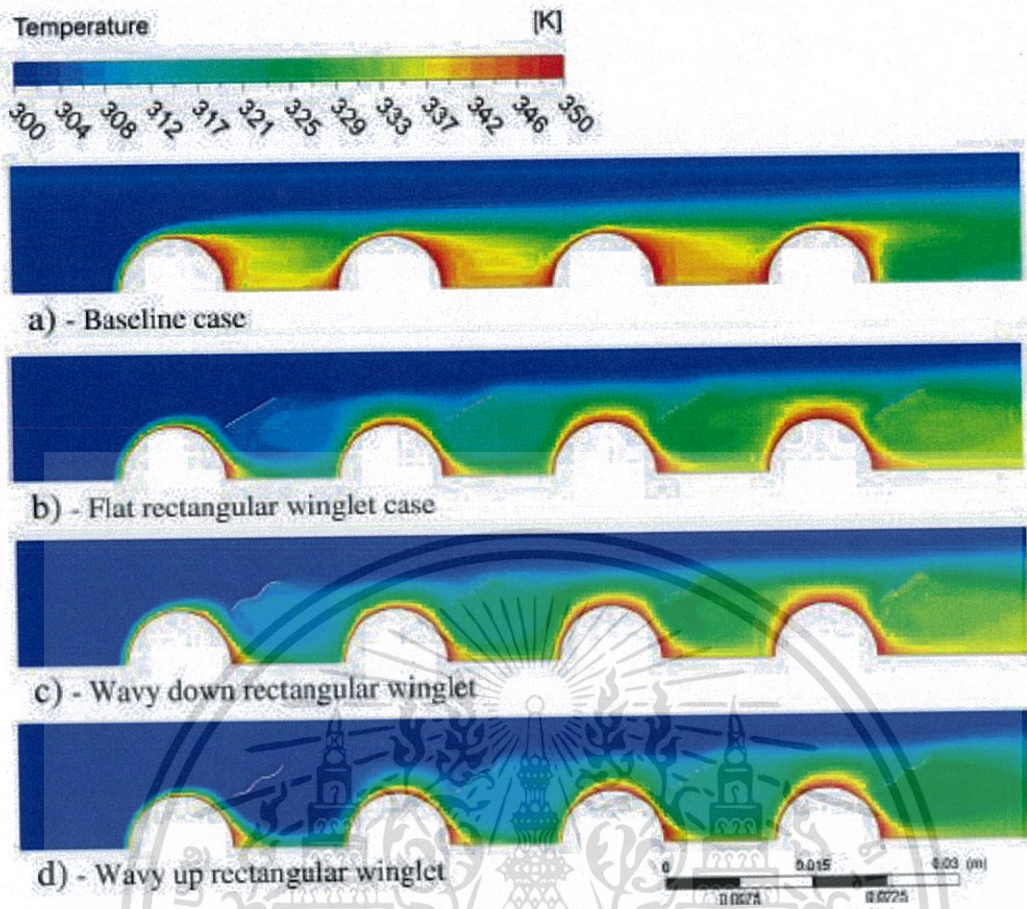
รูปที่ 2.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์กับค่าเฉลี่ยความดันตกคร่อมของการวางท่อในแต่ละกรณี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Gholami et al. (2014) ได้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการติดตั้งครีบทัง 3 แบบ ได้แก่ ปีกทรงสี่เหลี่ยม (flat rectangular winglet), ปีกแบบพื้นผิวหยักด้านบน (wavy up rectangular winglet) และ ปีกแบบพื้นผิวหยักด้านล่าง (wavy down rectangular winglet) โดยศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 400-800 และมุมปะทะของปีกแบบหยักเท่ากับ 30° ผลการศึกษาสรุปได้ว่าการติดปีกแบบพื้นผิวหยักด้านบนหรือปีกแบบพื้นผิวหยักด้านล่าง จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน และจากผลการทดลองพบว่า การติดปีกแบบพื้นผิวหยักด้านบนให้ประสิทธิภาพดีที่สุด เพราะมีค่า ความดันตกคร่อมสูงกว่าแบบการติดปีกแบบพื้นผิวหยักด้านล่าง และเลขนัสเซล มีค่ามากกว่า การติดปีกแบบพื้นผิวหยักด้านล่าง



รูปที่ 2.10 รูปแบบเส้นทางการไหลของการจัดท่อแบบเรียงสำหรับกรณี
 (a) ไม่มีการติดปีก (b) ติดปีกทรงสี่เหลี่ยม
 (c) ติดปีกแบบพื้นผิวหยักด้านบน (d) ติดปีกแบบพื้นผิวหยักด้านล่าง



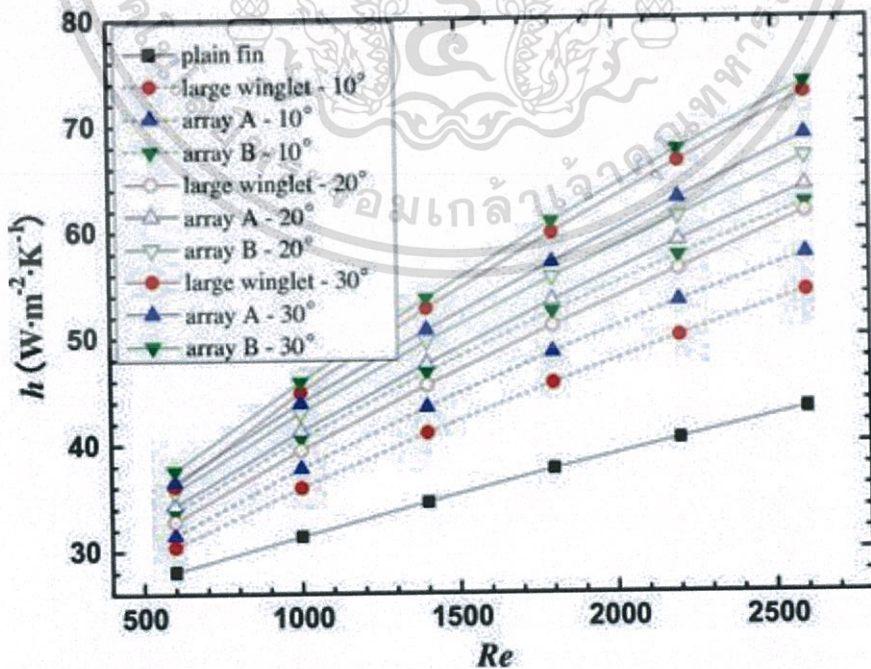
รูปที่ 2.11 การกระจายตัวของอุณหภูมิในท่อสำหรับการจัดเรียงแบบเรียงในกรณีพื้นฐานและกรณี RVG (ติดปีกทรงสี่เหลี่ยม, ติดปีกแบบพื้นผิวหยักด้านบน, ติดปีกแบบ พื้นผิวหยักด้านล่าง) ที่ $Re = 400$

Singh et al. (2017) ได้ศึกษาระบบการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบและแบบท่อที่มีการไหลในลักษณะตัดกัน (Cross flow) สำหรับประยุกต์ใช้ในการกักเก็บความร้อน โดยสนใจถึงลักษณะทางเรขาคณิตของครีบที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถระบุได้ด้วยตัวแปรไร้มิติชื่อว่า aspect ratio (α) คืออัตราส่วนความสูงและความกว้างของท่อ โดยศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 5000-13000 และแบ่งเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่มีความหนาของครีบที่ กับ กรณีที่ความหนาของฐานมีการเปลี่ยนแปลง ผลการศึกษาสรุปได้ว่า ในกรณีที่ 1 ครีบที่มี $\alpha=1$ เช่น ครีบหน้าตัดสี่เหลี่ยม จะให้เลขนัสเซิลและเลขออยเลอร์ (Euler number) ที่สูง เกินช่วงเลขเรย์โนลด์ ส่วนครีบที่มี $\alpha=0.1$ จะช่วยลดน้ำหนักของครีบบนสูงสุด 27.58% และในกรณีที่ 2 ครีบที่มี $\alpha < 1.0$ จะให้ประสิทธิภาพดีกว่า ครีบหน้าตัดสี่เหลี่ยม ประสิทธิภาพสูงสุดจะเกิดขึ้นกับครีบที่มีค่า $\alpha=0.1$ ซึ่งให้ค่าดัชนีประสิทธิภาพ (efficiency index) มากกว่าถึง 17.33% และช่วยลดน้ำหนักของครีบเพิ่มขึ้นถึง 6.82% จึงสรุปได้ว่าการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้ครีบหน้าตัดสี่เหลี่ยม สามารถนำครีบที่มีค่า $\alpha < 1.0$ มาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนและช่วยลดน้ำหนักของอุปกรณ์ลง

He et al. (2012) ได้ศึกษาผลของระยะห่างของตัวหมุนวน ศึกษาผลของการติดปีกรูปทรงสามเหลี่ยมกับตัวหมุนวน โดยศึกษาที่ความเร็วลม 0.54 - 2.3 เมตรต่อวินาที มุมของปีกกำหนดไว้ที่ 10° , 20° และ 30° ช่วงของเลขเรย์โนลด์อยู่ที่ 600-2000 ผลของการศึกษาพบว่า การติดปีกที่ไม่ต่อเนื่อง(discontinuous winglet) กำหนดให้เป็น array-B ที่ 30° นั้น สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน เพิ่มขึ้น 33.8%-70.6% และความดันลดลง 43.4%-97.2% ส่วนผลของการติดปีกแบบต่อเนื่อง(continuous winglet) กำหนดให้เป็น array-A สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น 36.7%-81.2% ความดันลดลง 60.7%-135.6%

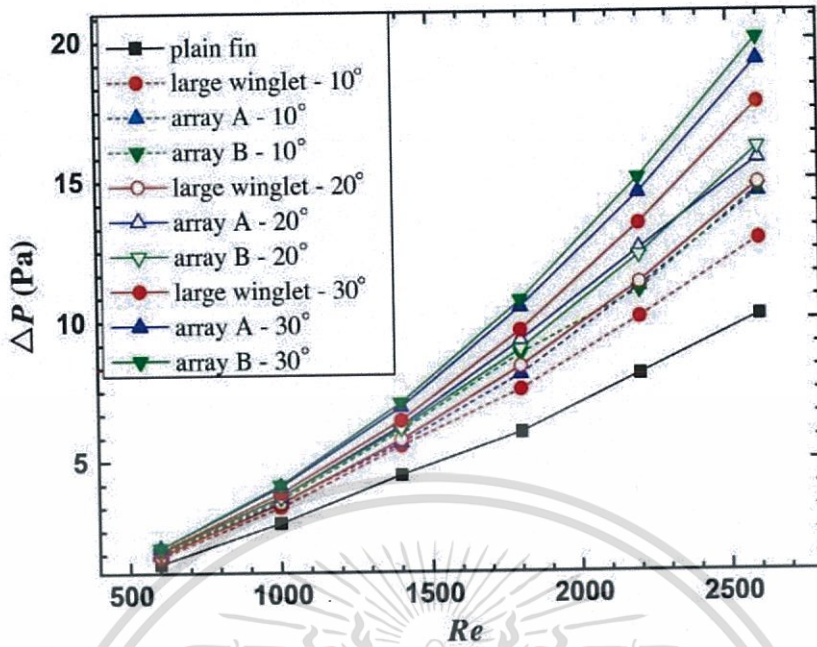


รูปที่ 2.12 เส้นทางการไหลรอบๆปีกรูปทรงสามเหลี่ยม



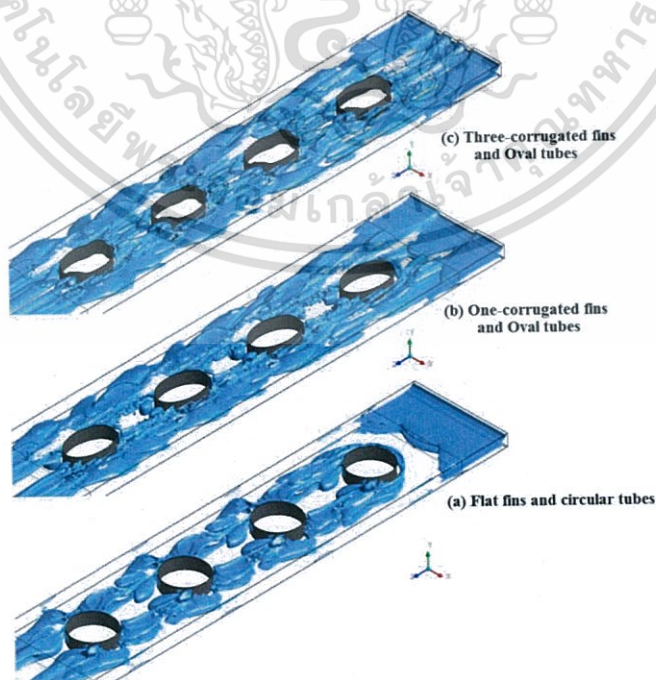
รูปที่ 2.13 กราฟความสัมพันธ์ของเลขเรย์โนลด์ต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในแต่ละกรณีที่มี

มุมปะทะต่างกัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 กราฟความสัมพันธ์ของเลขเรย์โนลด์ต่อค่าความดันตกคร่อมในแต่ละกรณีที่มีมุมปะทะต่างๆ

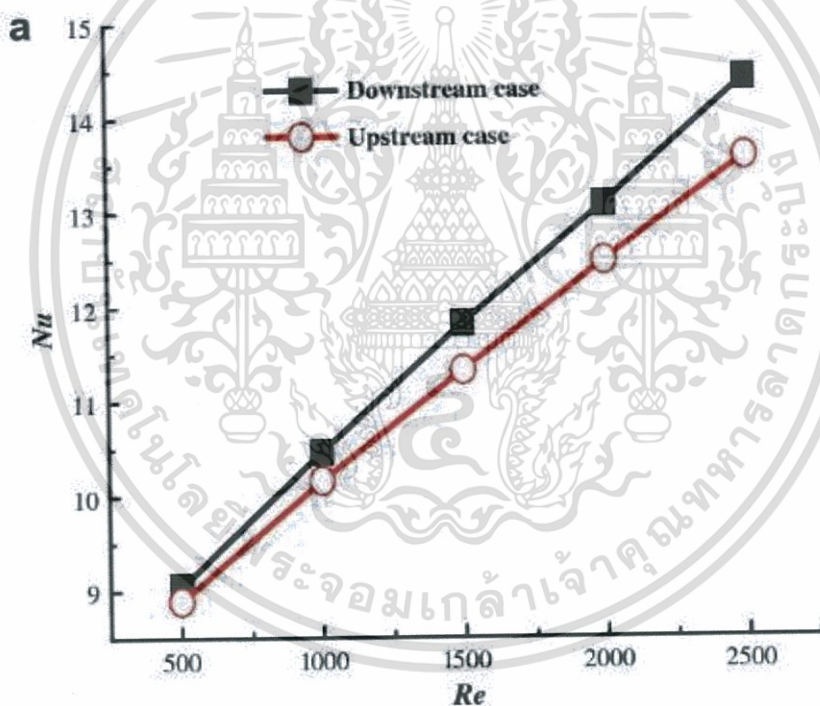
Gholami et al. (2017) ได้ศึกษาการออกแบบครีบและท่อใหม่ โดยใช้ครีบ 1 ลอน และ 3 ลอน แล้วคำนวณโดยพลศาสตร์ของไหล (fluid dynamics) กำหนดช่วงของเลขเรย์โนลด์ไว้ที่ 200-900 การศึกษาพบว่า ความไม่เรียบมีผลอย่างมากต่อกลศาสตร์ของไหล (fluid mechanics), ครีบมีลอนสามารถเพิ่มค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนได้มาก ความแตกต่างของความดันลดลงได้ถึง 19%, ค่าเฉลี่ยของสมรรถนะในครีบ 1 ลอน และ 3 ลอน มากถึง 5% และ 15% เมื่อเทียบกับกรณีพื้นฐาน



รูปที่ 2.15 การกระจายตัวของแกนหลัก Vortex ในโดเมนกายภาพของ FTCHE ด้วยครีบและท่อ

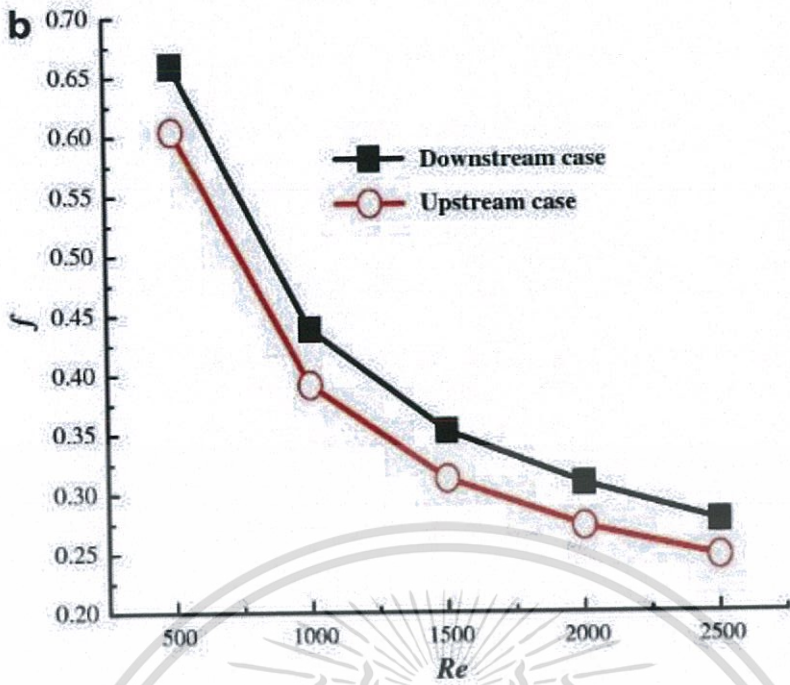
เอกสารนี้เป็นเอกสารแบบต่างๆที่ Re=200 การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Chu et al. (2009) ศึกษาถึงการวิเคราะห์เชิงตัวเลขแบบ 3 มิติของลักษณะการถ่ายเทความร้อนและโครงสร้างการไหลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ LVGs (Longitudinal Vortex Generators) ทำการศึกษาโดยกำหนดช่วงของเลขเรย์โนลด์ไว้ที่ 500-2500 , การจัดวางของ LVGs จัดวางแบบทวนการไหล (Upstream) และตามการไหล (Downstream) ของของไหล , มุมปะทะกำหนดไว้ที่ 15° , 30° , 45° และ 60° และจำนวนแถวของท่อ (n) กำหนดไว้ที่ $n=2,3,4$ และ 5 ผลการศึกษาสรุปได้ว่า การจัดวาง LVGs การวางตามแนวการไหล จะมีประสิทธิภาพมากกว่าการวางทวนการไหล เนื่องจากการวางตามแนวน้อยมาก , การเพิ่มมุมปะทะเมื่อ $\alpha < 30^\circ$ ทำให้เพิ่มการปั่นป่วนของของไหลทำให้เลขนัสเซลมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ถ้า $\alpha > 30^\circ$ การปั่นป่วนของของไหลจะหยุดลง และทำให้เลขนัสเซลมีค่าลดลง แต่ค่า ตัวประกอบความเสียดทานจะเพิ่มขึ้นเมื่อมุมมากขึ้นไม่ว่ามุมจะเกิน 30° ไปแล้วก็ตาม สามารถสรุปได้ว่า ที่มุม $\alpha = 30^\circ$ จะให้เลขนัสเซลมีค่ามากที่สุด , การเพิ่มจำนวนท่อให้กับเครื่องถ่ายเทความร้อนแบบ LVGs จะทำให้เลขนัสเซลและค่าตัวประกอบความเสียดทานมีค่าลดลง

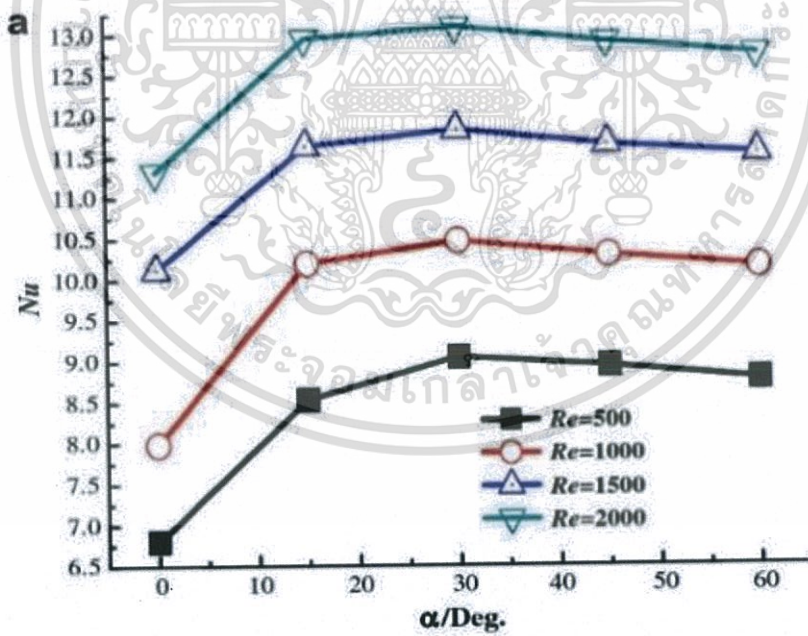


(a) เลขเรย์โนลด์กับเลขนัสเซล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

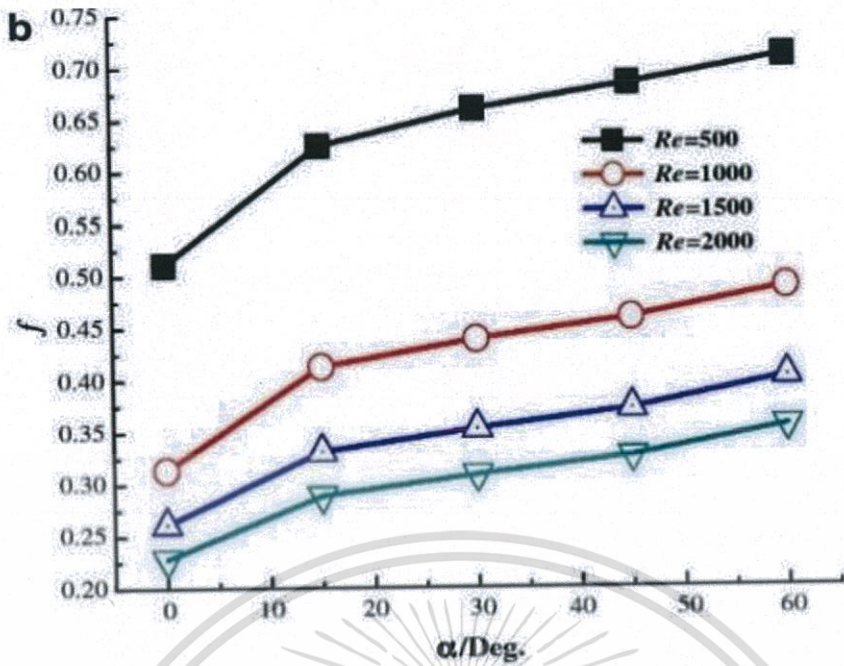


(b) เลขเรย์โนลด์กับตัวประกอบความเสียดทาน
รูปที่ 2.16 กราฟเปรียบเทียบการจัดวางของ LVGs

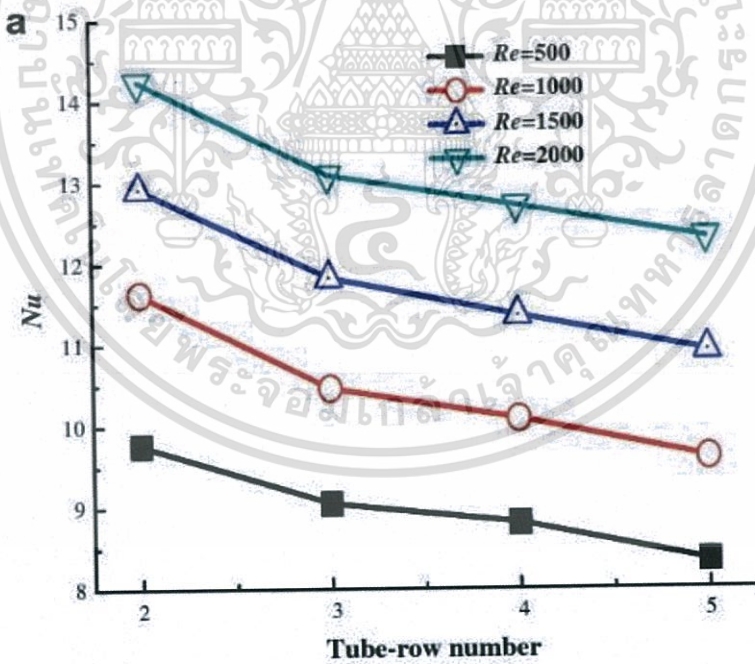


(a) เลขนัสเซลกับมุมปะทะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

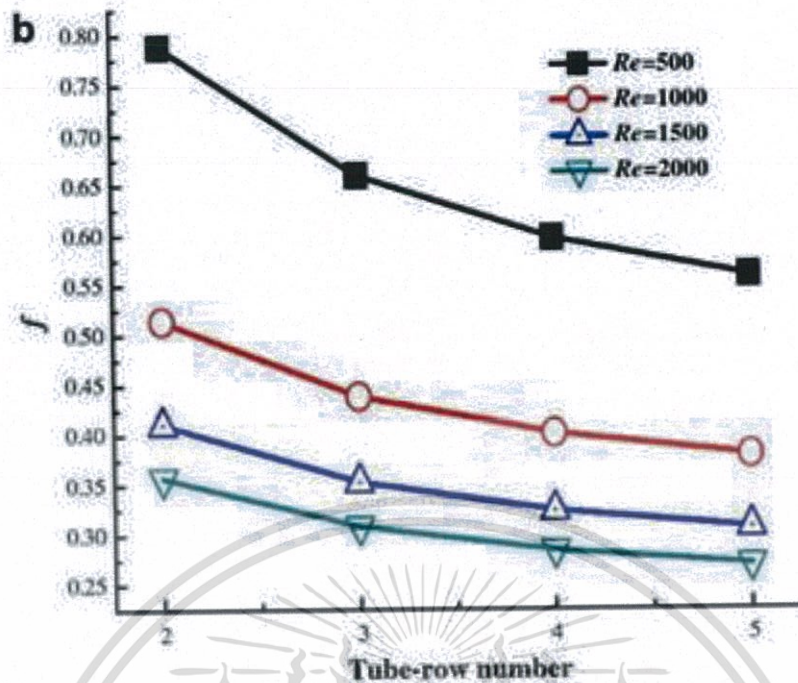


(b) ค่าตัวประกอบความเสียดทานกับมุมปะทะ
รูปที่ 2.17 กราฟแสดงอิทธิพลของมุมปะทะต่อเลขนีสเซิลและค่าตัวประกอบความเสียดทาน



(a) จำนวนท่อกับเลขนีสเซิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b) จำนวนท่อกับค่าตัวประกอบความเสียดทาน

รูปที่ 2.18 กราฟแสดงอิทธิพลของจำนวนท่อต่อเลขนัสเซลและค่าตัวประกอบความเสียดทาน

จะเห็นได้ว่างานวิจัยเกี่ยวข้องข้องเป็นการศึกษาเกี่ยวข้องกับการไหล และการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ของการไหลผ่านครีบซึ่งมีการติดปีกในรูปแบบต่างๆ โดยให้ความสนใจกับลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากการจัดวางปีก มุมปะทะ จำนวนปีก พื้นผิวของครีบและปีก และรูปทรงของปีก สำหรับการวิเคราะห์เชิงตัวเลขโดยภาพรวมนั้นพบว่า ค่าการถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้นก็ต่อเมื่อทำการเพิ่มจำนวนปีก เพิ่มมุมปะทะ จัดวางปีกตามแนวการไหล และรูปทรงของปีกที่เปลี่ยนไป ซึ่งผลจากงานวิจัยเหล่านี้มีประโยชน์ต่อการปรับปรุงพัฒนาเครื่องถ่ายเทความร้อนแบบท่อและครีบในปัจจุบันและอนาคต

สำหรับงานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การนำปีกรูปทรงสามเหลี่ยมกับรูปทรงสี่เหลี่ยมสำหรับสร้างการไหลหมุนวนเพื่อเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนแก่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งได้รับอิทธิพลจากตัวแปรพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ การจัดวางปีก มุมปะทะ ขนาดของปีก และจำนวนปีก เพื่อที่จะเปรียบเทียบความแตกต่างของปีกทั้ง 2 แบบ ว่าให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนต่างกันมากน้อยเพียงใด เพื่อที่จะสรุปหาข้อมูลที่จะนำไปสู่การพัฒนาเครื่องถ่ายเทความร้อนแบบท่อและครีบให้มีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนที่สูงสุด และในท้ายที่สุดเพื่อที่จะสามารถนำไปออกแบบสำหรับการใช้งานจริงได้ในต่อไป

บทที่ 3

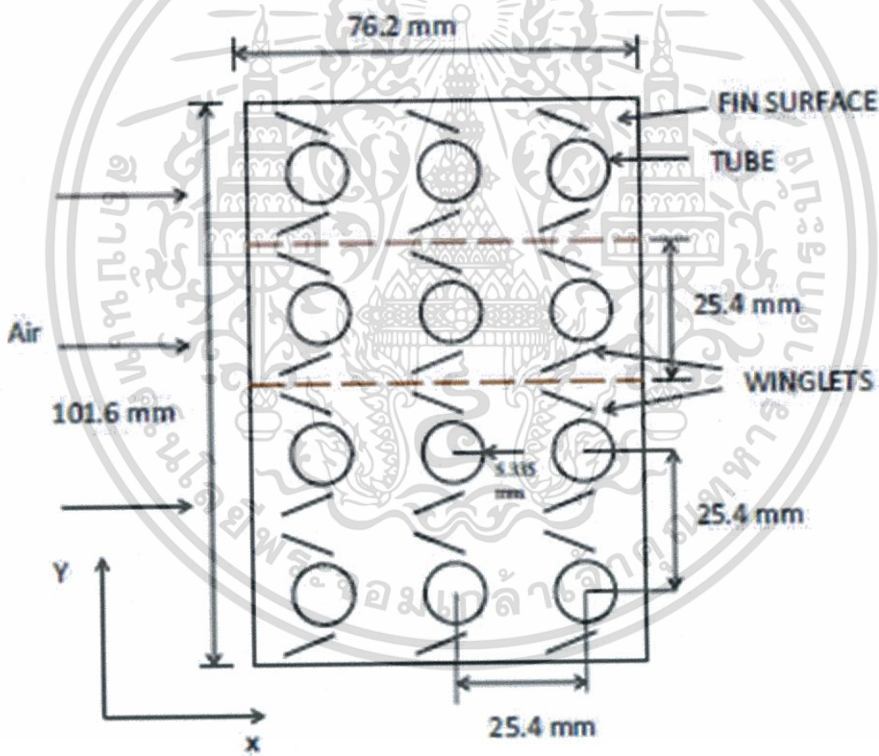
สมการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 บทนำ

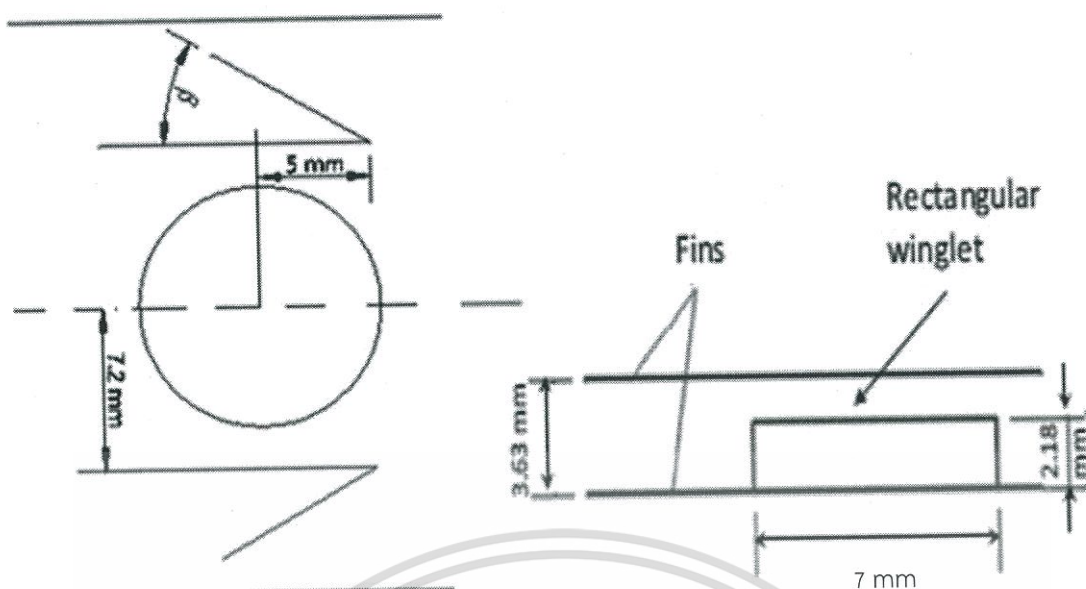
ในบทนี้จะกล่าวถึงสมการพื้นฐานทางคณิตศาสตร์สำหรับการไหลและการถ่ายเทความร้อนที่มีการติดครีบบนพื้นผิวให้ความร้อนในท่อวงกลม

3.2 สมมติฐานของการไหลและสมการควบคุม

ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อและครีบบนท่อที่มีการติดปีกและไม่ติดปีก รูปที่ 3.1 แสดงภาพด้านบน (top view) ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบบนท่อที่มีความยาวการไหล 76.2 mm และความกว้าง 101.6 mm รัศมีของท่อเท่ากับ 5.335 mm วางท่อตามทิศทางการไหล และให้ระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 25.4 mm



รูปที่ 3.1 ภาพด้านบน (top view) ของบริเวณการคำนวณปีกทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีความสูง 2.18 mm, ความยาว 7 mm และมีความหนา 0.18 mm ติดกับท่อตั้งรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงภาพด้านบน และภาพด้านข้าง ของตำแหน่งการติดปีก

ในการคำนวณเชิงตัวเลขของการไหลและการถ่ายเทความร้อน จะพิจารณาสมมติฐานของการไหลดังนี้

1. เป็นการไหลแบบราบเรียบ และอัดตัวไม่ได้
2. สมบัติต่างๆ ของของไหลมีค่าคงที่
3. การไหลและการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบคงตัว 3 มิติ
4. ไม่พิจารณาแรงวัตถุและการแพร่เนื่องจากความหนืด
5. ไม่พิจารณาการแผ่รังสีความร้อน

เมื่อการไหลเป็นการไหลแบบราบเรียบ ($Re=643-1286$) สมการควบคุมการไหลประกอบไปด้วยสมการความต่อเนื่อง สมการโมเมนตัม (หรือเรียกว่า สมการนาเวียร์-สโตกส์) สมการพลังงาน และสมการการนำความร้อน เมื่อพิจารณาภายใต้สมมติฐานข้างต้น สมการดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังนี้

สมการความต่อเนื่อง (Continuity equation)

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

สมการโมเมนตัม (Momentum equation)

$$\frac{D}{Dt} (\rho u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (3.2)$$

สมการพลังงาน (Energy equation)

$$\frac{D}{Dt} (\rho T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{k_a}{C_p} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (3.3)$$

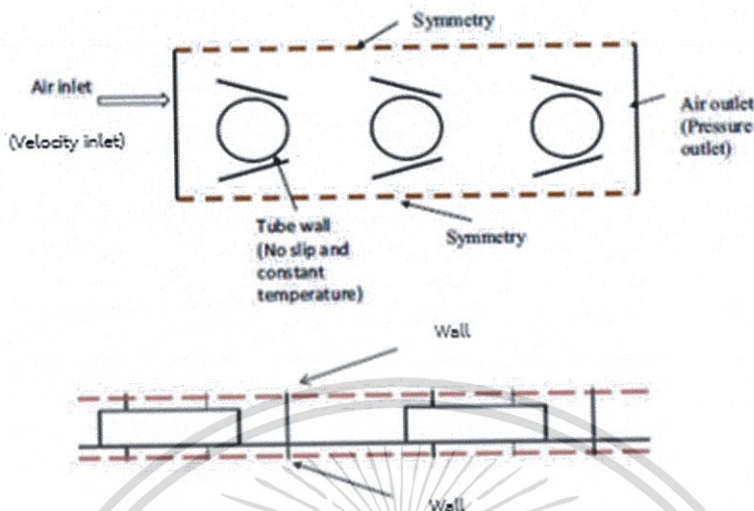
สมการการนำความร้อน (Conduction equation)

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 เงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions)

เงื่อนไขขอบเขตสามารถแสดงได้จากรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.3 แสดงภาพด้านบน และมุมมองภาพด้านข้าง ของบริเวณการคำนวณที่มีเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้

3.3.1 ขอบเขตที่ทางเข้า

- ที่ทางเข้า
พิจารณาให้อากาศมีความเร็วสม่ำเสมอ u_{in} และมีอุณหภูมิสม่ำเสมอ T_{in} ให้องค์ประกอบความเร็วในแกน Y และแกน Z พิจารณาให้มีค่าเป็น 0, $v=w=0$
- ที่ด้านบนและด้านล่าง
พิจารณาให้ $u_{up} = u_{down}$ และ $T_{up} = T_{down}$
- ที่ขอบด้านข้าง
พิจารณาความสมมาตรจะได้ว่า $\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial w}{\partial y} = 0$, $v=0$, $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$

3.3.2 ขอบเขตที่ทางออก

- ที่ด้านบนและด้านล่าง
พิจารณาให้ $u_{up} = u_{down}$ และ $T_{up} = T_{down}$
- ที่ขอบด้านข้าง
พิจารณาความสมมาตรจะได้ว่า $\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial w}{\partial y} = 0$, $v=0$, $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$
- ที่ด้านนอก
พิจารณาให้ความดันที่ภายนอกมีค่าเท่ากับความดันของอากาศ ($p = p_a$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 บริเวณพื้นผิวของครีบ

บริเวณขอบด้านบนและขอบด้านล่างของครีบพิจารณาว่าไม่มีการลื่นไถล (no slip condition)

3.3.4 บริเวณพื้นผิวท่อ

พื้นผิวของท่อถูกกำหนดให้ไม่มีการลื่นไถลและมีอุณหภูมิคงที่

3.4 การไหลแบบภายในและการถ่ายเทความร้อน

การไหลแบบภายใน เช่น การไหลในช่องทางไหล หรือการไหลในท่อที่มีหน้าตัดรูปแบบต่างๆ มีเนื้อหาพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการไหลและการถ่ายเทความร้อนดังนี้

3.4.1 สภาวะการไหล

การไหลแบบภายในเช่น การไหลในท่อ จะมีลักษณะการไหลขึ้นอยู่กับตัวแปรไร้มิติที่เรียกว่า เลขเรย์โนลด์ (Re) โดยที่การไหลที่มีเลขเรย์โนลด์ต่ำๆ ลักษณะของเส้นทางการไหลจะเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ เราเรียกรูปแบบนี้ว่า การไหลแบบราบเรียบ แต่เมื่อเลขเรย์โนลด์มีค่าสูงขึ้น (ในการไหลปกติ ผนังมีความเรียบน้อยเมื่อ $Re > 2300$ ลักษณะการไหลจะเปลี่ยน) ลักษณะการไหลจะเปลี่ยนไปกล่าวคือลักษณะของเส้นทางการไหลมีลักษณะยุ่งเหยิง ซึ่งเรียกรูปแบบนี้ว่าการไหลแบบปั่นป่วน สำหรับการไหลภายในนั้น เลขเรย์โนลด์สำหรับการไหลกำหนดโดย

$$Re = \frac{\rho u_m D_h}{\mu} \quad (3.5)$$

เมื่อ ρ คือความหนาแน่นของของไหล u_m เป็นความเร็วเข้าของของไหลภายในท่อ μ คือค่าความหนืดพลวัต (dynamic viscosity) ของของไหล และ D_h คือความยาวบ่งลักษณะของช่องทางไหล หรือเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (hydraulic diameter) มีนิยามเป็น

$$D_h = \frac{4(A_{min}L)}{A_T} \quad (3.6)$$

เมื่อ L คือความยาวการไหล A_T คือพื้นที่ผิวทั้งหมด(รวมถึงพื้นผิว fin and tube ด้วย) ที่มีการถ่ายเทความร้อน และ A_{min} คือพื้นที่ตัดผ่านของการไหลต่ำที่สุด (Rathore and Kapuno [24])

โดยทั่วไป การไหลในท่อสำหรับการไหลราบเรียบจะเกิดที่ $Re < 2300$ และเกิดการไหลแบบปั่นป่วนแบบสมบูรณ์ที่ $Re > 10000$ ในระหว่างช่วงค่าเลขเรย์โนลด์ทั้ง 2 ช่วงนี้จะเกิดการไหลแบบปรับตัว (transition)

3.4.2 เลขนัสเซิล

สำหรับการพาความร้อน ตัวแปรไร้มิติที่แสดงถึงอัตราการถ่ายเทความร้อนคือ ตัวเลขนัสเซิล (Nu) ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$Nu = \frac{hH}{k_a} \tag{3.7}$$

เมื่อ h คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, H คือ ระยะเวลาสูงช่องของ fin และ k_a คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ

3.4.3 ตัวประกอบความเสียดทาน

ตัวประกอบความเสียดทาน (friction factor : f) จะพิจารณาจากความดันลดลงของของไหลที่ไหลภายใน โดยเราจะใช้ ตัวประกอบความเสียดทานของ Moody (หรือ Darcy) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ไร้มิติ โดยมีนิยามดังนี้

$$f = \frac{\Delta P}{\frac{\rho u_{in}^2 A_T}{2A_{min}}} \tag{3.8}$$

เมื่อ ΔP คือค่า ความดันตกคร่อม ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

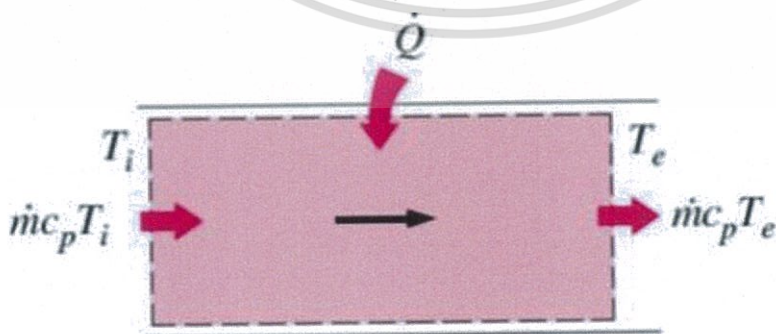
$$\Delta P = \frac{fL\rho V_{avg}^2}{2D} \tag{3.9}$$

โดยที่

$$f = \frac{64\mu}{\rho D V_{avg}} = \frac{64}{Re} \tag{3.10}$$

(สำหรับการไหลแบบราบเรียบ)

3.4.4 การวิเคราะห์ความร้อนทั่วไป



Energy balance:

$$\dot{Q} = \dot{m}c_p(T_e - T_i)$$

เอกสารรูปที่ 3.4 การถ่ายเทความร้อนไปยังของไหลที่ไหลเข้ามาในท่อเท่ากับการเพิ่มขึ้นของพลังงานของไหล
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณารูปที่ 3.4 ซึ่งแสดงการถ่ายเทความร้อนให้กับของไหลที่ไหลผ่านท่อ โดยความร้อนที่ของไหลได้รับจะเท่ากับความร้อนที่ถ่ายเทให้กับของไหล ค่าความร้อนที่ของไหลได้รับสามารถคำนวณได้จาก

$$Q = \dot{m} C_p (T_e - T_i) \quad (3.11)$$

เมื่อ Q คือค่าของความร้อนที่ของไหลได้รับ \dot{m} คืออัตราการไหลเชิงมวล C_p คือค่าความร้อนจำเพาะ และ $T_e - T_i$ คือผลต่างของอุณหภูมิของของไหลที่ทางเข้าและทางออก โดยผลต่างอุณหภูมิลอคมิน (log mean temperature difference), ΔT สามารถหาได้จาก

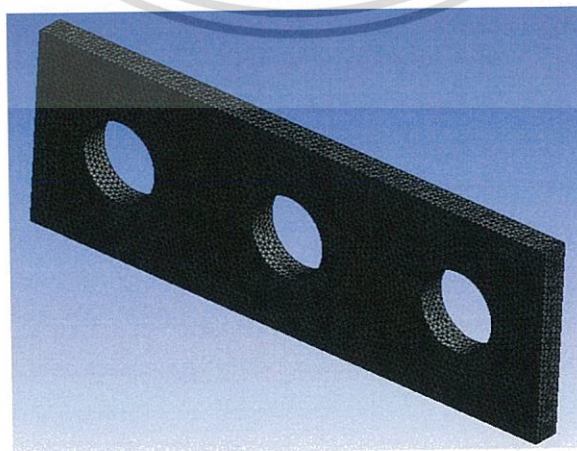
$$\Delta T = \frac{(T_w - \bar{T}_{in}) - (T_w - \bar{T}_o)}{\ln\left(\frac{T_w - \bar{T}_{in}}{T_w - \bar{T}_o}\right)} \quad (3.12)$$

เมื่อ T_w คืออุณหภูมิของผิวท่อ และ \bar{T} สามารถหาได้จาก

$$\bar{T} = \frac{\iint_A \rho u T dA}{\iint_A \rho u dA} \quad (3.13)$$

3.5 ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method)

ในการคำนวณเชิงตัวเลขของสมการควบคุมการไหลได้ใช้โปรแกรมจำลองของไหลในการแก้ปัญหาโดยกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่เหมาะสม โดยกริดและปิกมีเมช (mesh) ที่เป็นโครงสร้างพีระมิดฐานสามเหลี่ยม (tetrahedral) ภาพตัดที่แสดงมุมมองเมชรอบๆ ปีก สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.5 ในส่วนการคำนวณความเร็วและความดันจะใช้ SIMPLE algorithm ภายใต้รีแลกเซชันแฟคเตอร์ (relaxation factors) (0.45 สำหรับความดัน, 0.75 สำหรับโมเมนตัม และ 0.8 สำหรับพลังงาน) ถูกนำมาใช้เพื่อการลู่เข้าของตัวแปรทั้งหมด



รูปที่ 3.5 ภาพตัดแสดงเมชแบบทรงสี่หน้า

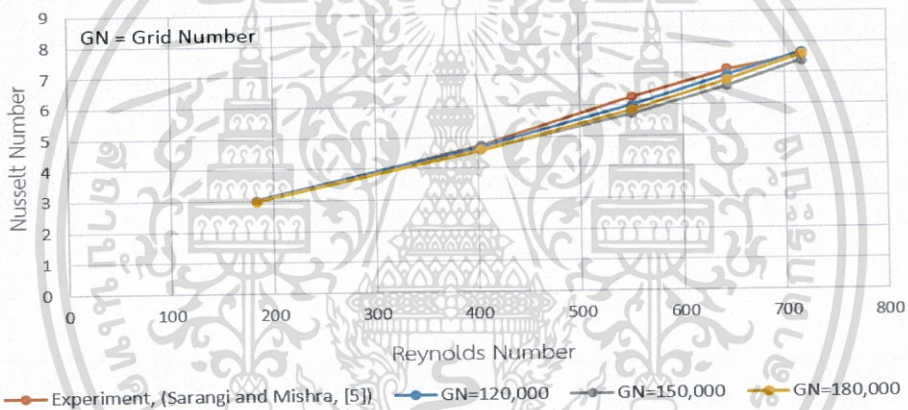
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

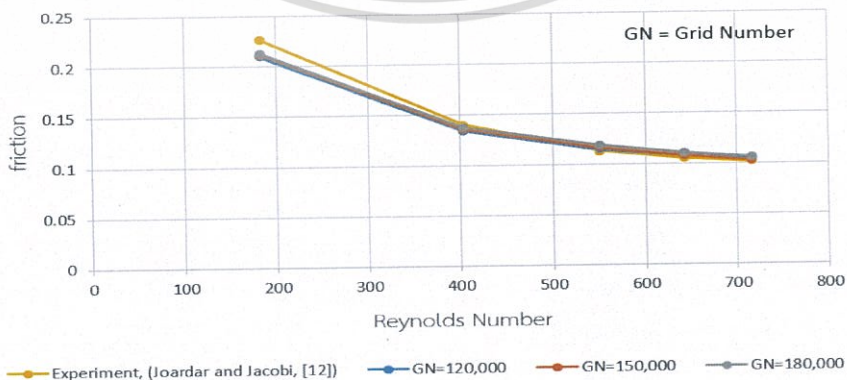
การตรวจสอบความถูกต้องของการคำนวณและกรณีศึกษา

4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของการคำนวณ

การเปรียบเทียบผลการศึกษากับงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ ถือว่าเป็นสิ่งสำคัญ เป็นสิ่งที่บ่งบอกถึงความน่าเชื่อถือของผลที่ได้จากการวิจัย จากผลที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลขแบบจำลอง มีความสอดคล้องกับผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ โดยแบ่งเป็นการเปรียบเทียบเลขนัสเซลและค่าตัวประกอบความเสียดทาน ที่เลขเรย์โนลด์ต่างๆ และที่จำนวนกริด 120,000 150,000 และ 180,000



รูปที่ 4.1 แสดงกราฟผลการตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์กับเลขนัสเซล



รูปที่ 4.2 แสดงกราฟผลการตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์กับตัวประกอบความเสียด

เสียดทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากผลที่ได้จากการศึกษาแบบจำลอง มีความสอดคล้องกับผลที่ได้รับการตีพิมพ์แล้ว ยังพบว่า เมื่อจำนวนกริดของแบบจำลองเพิ่มขึ้นจาก 120,000 เป็น 180,000 นั้นไม่ส่งผลต่อทั้งการไหลของอากาศและการถ่ายเทความร้อน ดังนั้นจำนวนกริดที่ 120,000 จึงถูกใช้ในการสร้างสำหรับทุก ๆ กรณีศึกษา

4.2 กรณีศึกษา

จากบทที่ 2 ได้มีการอ้างอิงงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับการไหลและการถ่ายเทความร้อนผ่านครีบบีบที่มีการติดปีกในรูปแบบต่างๆ เพื่อช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อน โดยเน้นถึงงานวิจัยที่ได้ศึกษาถึงผลของการติดครีบบีบปีกต่อการเพิ่มขึ้นของอัตราการถ่ายเทความร้อน โดยจำแนกตามปัจจัยต่างๆของการติดปีก ซึ่งมีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อการช่วยเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน แต่งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของมุมปะทะของปีก อิทธิพลความสูงของปีก รูปทรงของปีก และความเร็วของไหลที่ทางเข้า โดยจะมีกรณีศึกษา ดังนี้

- 1) ความสูงของปีก 3 ได้แก่ 1.82, 2.18 และ 2.54 มิลลิเมตร
- 2) มุมปะทะของปีก 15° , 30° , 45° และ 60°
- 3) รูปทรงของปีก ปีกรูปทรงสี่เหลี่ยม และสามเหลี่ยม
- 4) ความเร็วของไหลที่ทางเข้า 0.5, 1.1, 1.5 และ 1.75 m/s

4.3 ค่าเงื่อนไขขอบเขตในการคำนวณการไหลสามมิติ

สำหรับการคำนวณในสามมิติ กำหนดเงื่อนไขขอบเขตดังต่อไปนี้

- บริเวณทางเข้าของอากาศมีอุณหภูมิคงที่ 310.6 K
- กำหนดให้คุณสมบัติต่างๆของอากาศที่ไหลเข้าคงที่
- กำหนดให้ไม่มีการสั่นไถลที่ผนัง (No-slip conditions) หรือความเร็วที่ผนังเท่ากับศูนย์
- บริเวณผิวท่อของน้ำมีอุณหภูมิคงที่ 291.77 K
- กำหนดให้ปีกที่ติดบนครีบบีบ ซึ่งความร้อนไม่สามารถผ่านได้ (heat flux = 0)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

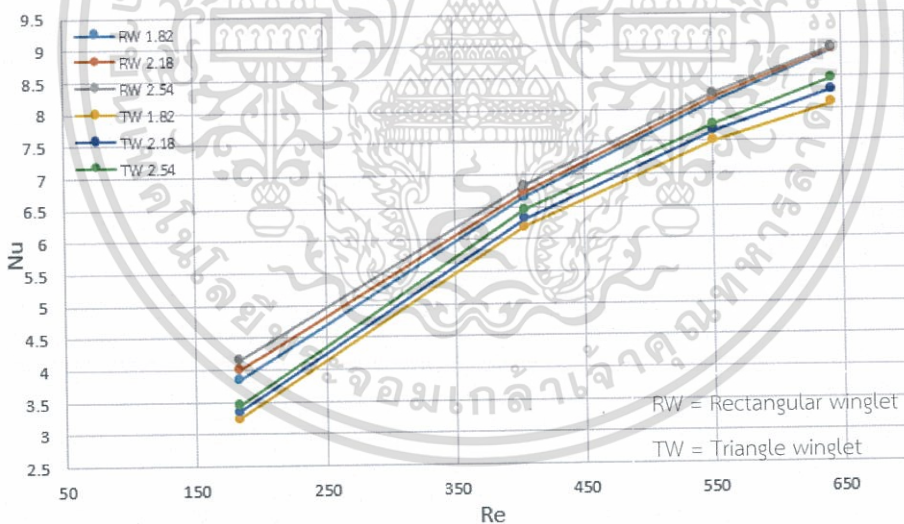
บทที่ 5

ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและการอภิปราย

5.1 อธิธิพลของความสูง

จากผลงานวิจัยได้ศึกษาอิทธิพลของความสูงที่ 1.82, 2.18, 2.54 มิลลิเมตร มุมปะทะที่ 15° , 30° , 45° และ 60° ของปีกแบบรูปทรงสี่เหลี่ยมและปีกแบบรูปทรงสามเหลี่ยม ว่ามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของเลขนัสเซลและค่าตัวประกอบความเสียดทานมากน้อยเพียงใด ซึ่งจะส่งผลต่อค่าสมรรถนะเชิงความร้อน และจากผลที่ได้จากการศึกษา ได้ยกผลวิเคราะห์เชิงตัวเลขจากงานวิจัยที่ความสูง 1.82, 2.18, 2.54 มิลลิเมตร ที่มุมปะทะ 30° มาพิจารณา

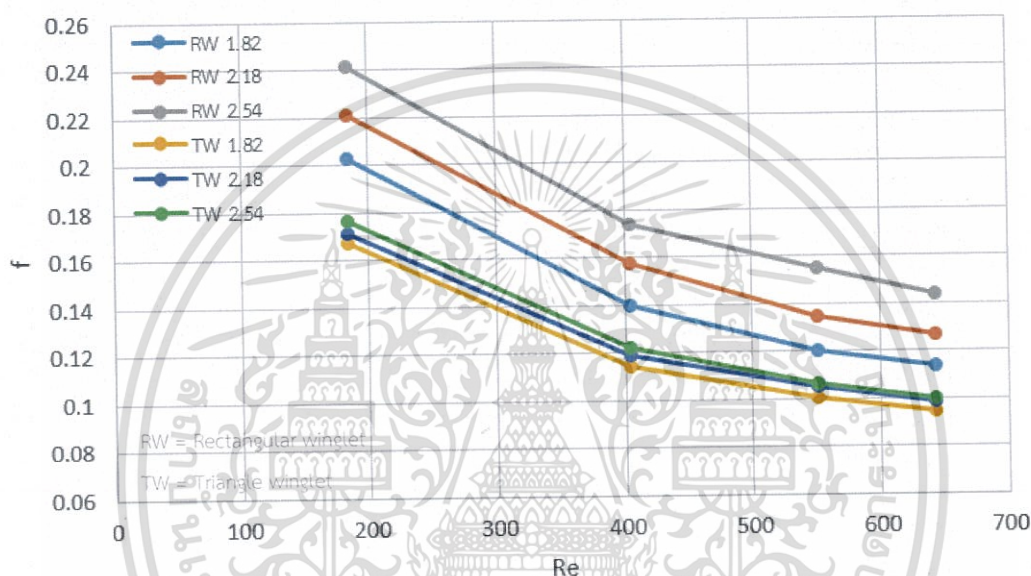
5.1.1 การวิเคราะห์สมรรถนะเชิงความร้อนเนื่องจากอิทธิพลของความสูง



รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์กับเลขนัสเซลของครีบบีที่ติดปีกรูปทรงสี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยม ที่มุมปะทะ 30° ที่ความสูงของปีก 1.82, 2.18, 2.54 มิลลิเมตร

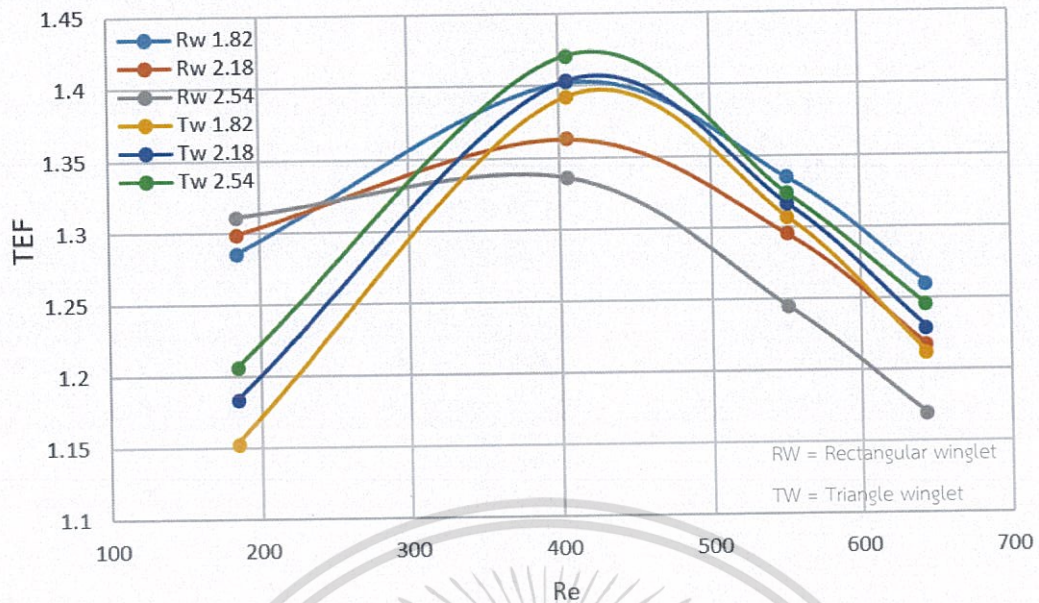
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์กับอัตราส่วนเลขนัสเซล ดังแสดงในรูปที่ 5.1 ซึ่งมีการติดปีกที่ครีบบี ที่ความสูง 1.82, 2.18, 2.54 มิลลิเมตร ที่มุมปะทะ 30° จะพบว่าเมื่อมีการติดปีกในรูปทรงสี่เหลี่ยมบนครีบบีที่ความสูง 2.54 มิลลิเมตร จะให้ค่าเลขนัสเซลมากที่สุดและปีกรูปทรงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สี่เหลี่ยมที่มีความสูง 1.82 มิลลิเมตร จะให้ค่าต่ำสุดเมื่อเทียบกับในกรณีติดปีกรูปทรงสี่เหลี่ยม เนื่องจากความสูงของปีกเพิ่มมากขึ้นจะทำให้พื้นที่ผิวของปีกเพิ่มขึ้นด้วย จึงทำให้เกิดการขัดขวางการไหลของอากาศ หรือเกิดปั่นป่วนของอากาศและเพิ่มแรงปะทะที่หน้าผิวท่อและทำลายชั้นขีดผิวความร้อนบริเวณท่อ ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดีขึ้น ส่วนในการติดปีกรูปทรงสามเหลี่ยมจะเห็นได้ว่า จะมีพฤติกรรมของนัสเซลเหมือนกับปีกรูปทรงสี่เหลี่ยม เมื่อความสูงของปีกเพิ่มขึ้น เลขนัสเซลจะมากขึ้น และจะมีเลขนัสเซลต่ำกว่าการติดปีกรูปทรงสี่เหลี่ยม



รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์กับค่าตัวประกอบความเสียดทานของครีบทัดปีกรูปทรงสี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยม ที่มุมปะทะ 30° ที่ความสูงของปีก 1.82, 2.18, 2.54 มิลลิเมตร

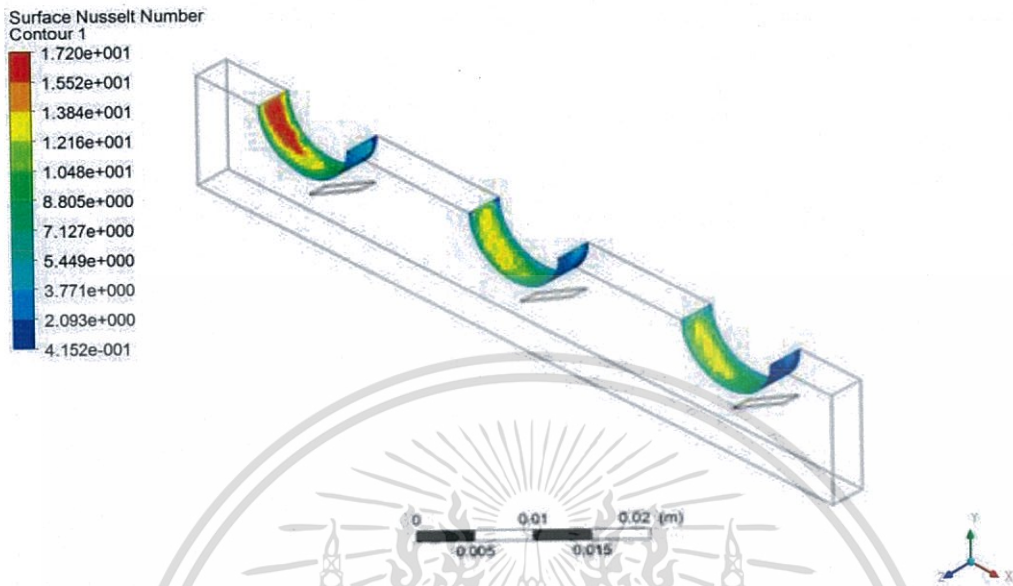
เมื่อพิจารณารูปที่ 5.2 จะพบว่า การติดปีกรูปทรงสี่เหลี่ยมบนครีบทัด เมื่อความสูงมากขึ้นจะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของปีกมากขึ้น และเมื่อพื้นที่ผิวมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าตัวประกอบความเสียดทานมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มพื้นที่ผิวปีกในการต้านทานการไหลของอากาศมากขึ้น ส่วนในการติดตั้งปีกรูปทรงสามเหลี่ยมนั้น ที่ความสูงต่างๆ ค่าตัวประกอบความเสียดทานนั้นจะมีความแตกต่างกันน้อยมากและมีค่าตัวประกอบความเสียดทานน้อยกว่าการติดปีกแบบรูปทรงสี่เหลี่ยม เนื่องจากมีพื้นที่ผิวของปีกที่น้อยกว่า



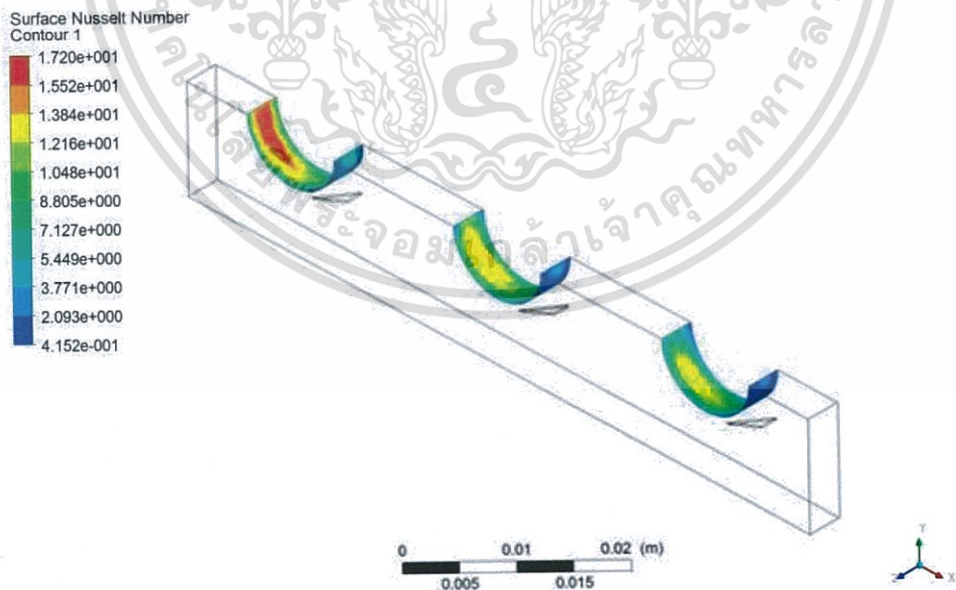
รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์กับค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของครีปที่ติดปีกรูปทรงสี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยม ที่มุมปะทะ 30° ที่ความสูงของปีก 1.82, 2.18, 2.54 มิลลิเมตร

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์กับค่าสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) ดังแสดงในรูปที่ 5.3 ที่ความสูง 1.82, 2.18, 2.54 มิลลิเมตร ที่มุม 30° จะเห็นได้ว่าที่เลขเรย์โนลด์ 183.71 การเพิ่มความสูงของปีกสี่เหลี่ยมและปีกสามเหลี่ยมจะส่งผลให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความสูงของปีกจะเป็นการเพิ่มพื้นที่สัมผัสของปีกทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลและผิวท่อได้ดีขึ้น โดยปีกสี่เหลี่ยมจะให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่มากกว่าปีกสามเหลี่ยม แต่เมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้นถึงจุดที่เหมาะสมคือช่วงเลขเรย์โนลด์ 404 จะให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ดีที่สุด โดยปีกสามเหลี่ยมจะให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนได้ดีกว่าปีกสี่เหลี่ยม เนื่องจากการติดตั้งปีกแบบสี่เหลี่ยมที่มีความสูงมากๆ จะทำให้เกิดค่าตัวประกอบความเสียดทานมากขึ้น ทำให้มีความดันตกคร่อมมากขึ้น ส่งผลให้ต้องใช้กำลังในการอัดอากาศเข้าไปมากกว่าการติดปีกแบบสามเหลี่ยม แม้ว่าจะแลกเปลี่ยนความร้อนได้มากกว่า

5.1.2 พฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากอิทธิพลของความสูง



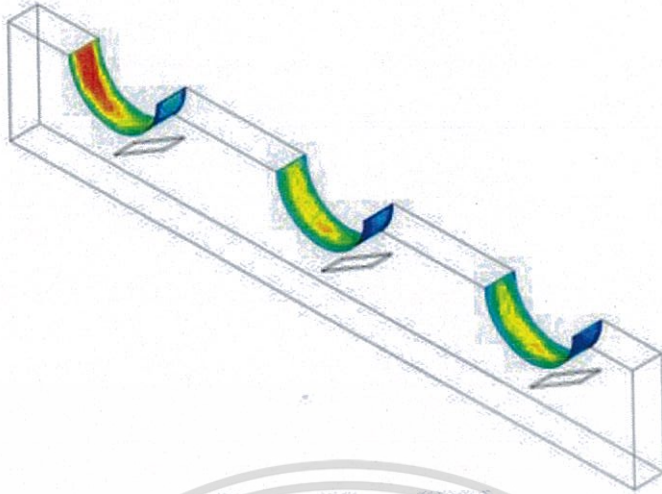
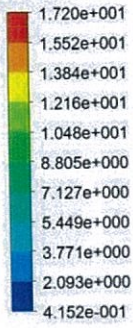
รูปที่ 5.4 คอนทัวร์เลขนัสเซลบริเวณผิวท่อของปีกรูปทรงสี่เหลี่ยมที่มีความสูง 1.82 มิลลิเมตร มุมปะทะ 30° ที่เลขเรย์โนลด์ 551



รูปที่ 5.5 คอนทัวร์เลขนัสเซลบริเวณผิวท่อของปีกรูปทรงสามเหลี่ยมความสูง 1.82 มิลลิเมตร ที่มุมปะทะ 30° ที่เลขเรย์โนลด์ 551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Surface Nusselt Number
Contour 1

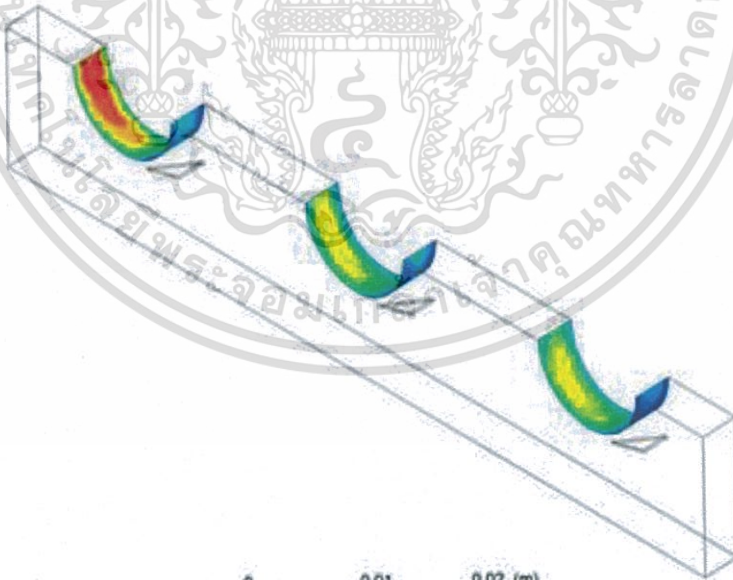
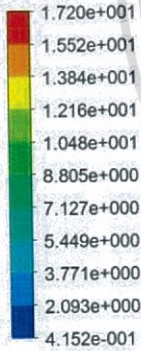


0 0.01 0.02 (m)
0.005 0.015



รูปที่ 5.6 คอนทัวร์เลขนัสเซลบริเวณผิวท่อของปีกรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ความสูง 2.54 มิลลิเมตร มุมปะทะ 30° ที่เลขเรย์โนลด์ 551

Surface Nusselt Number
Contour 1



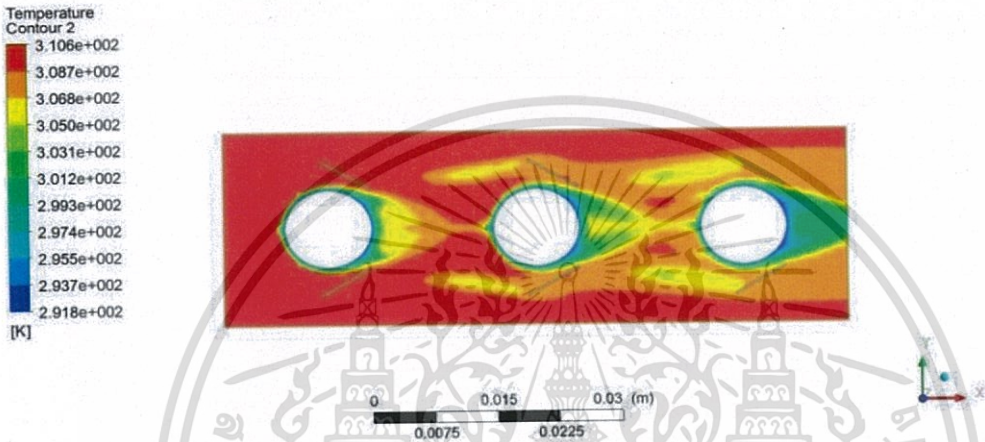
0 0.01 0.02 (m)
0.005 0.015



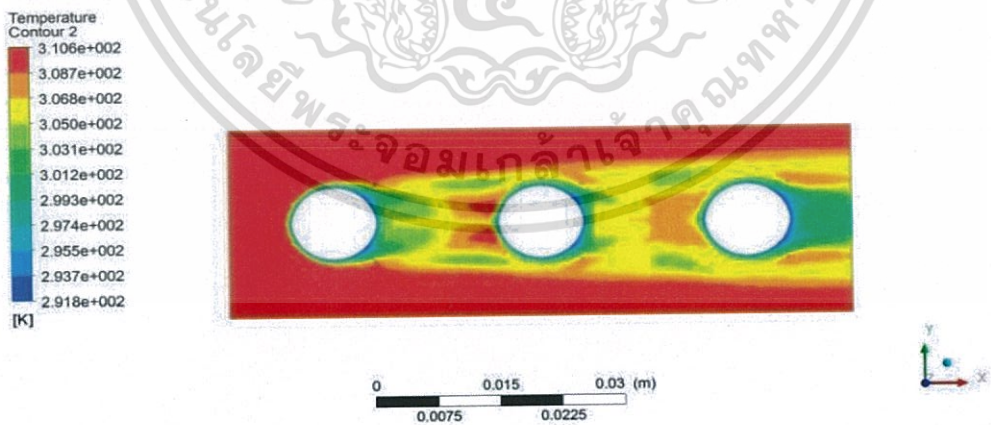
รูปที่ 5.7 คอนทัวร์เลขนัสเซลบริเวณผิวท่อของปีกรูปทรงสามเหลี่ยมที่ความสูง 2.54 มิลลิเมตร มุมปะทะ 30° ที่เลขเรย์โนลด์ 551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณารูปที่ 5.4 - 5.7 แสดงคอนทัวร์บริเวณผิวท่อของความสูงของปีกที่ 1.82 และ 2.54 มิลลิเมตร ที่มุมปะทะ 30° ของปีกรูปทรงสี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยม จะเห็นได้ว่าที่ความสูงเดียวกัน ปีกรูปทรงสี่เหลี่ยมพื้นผิวบริเวณหลังท่อจะมีปริมาณเลขนัสเซลมากกว่าปีกรูปทรงสามเหลี่ยม เนื่องจากพื้นที่ผิวปีกของปีกรูปทรงสี่เหลี่ยมนั้นมากกว่าปีกรูปทรงสามเหลี่ยม จึงส่งผลในการขัดขวางการไหลของอากาศได้ดีกว่าและก่อให้เกิดกระแสหมุนวนบริเวณด้านหลังท่อ ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนของอากาศกับบริเวณด้านหลังผิวท่อได้ดีกว่าการติดปีกแบบสามเหลี่ยม

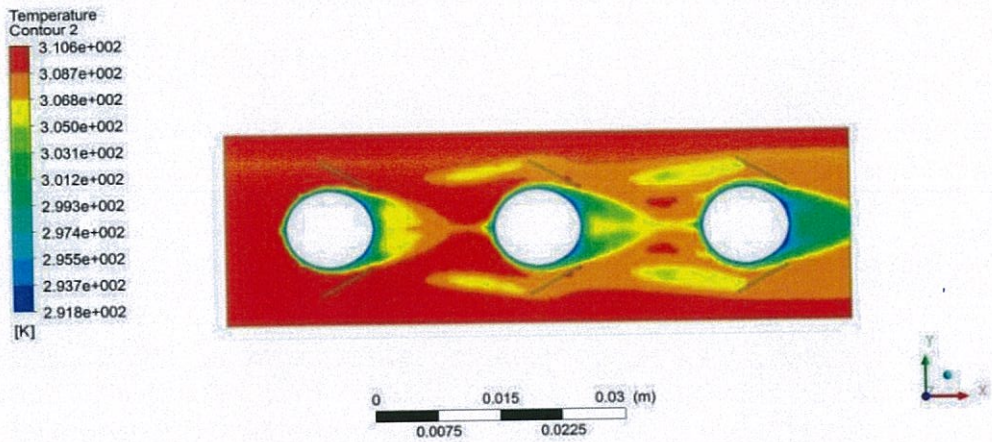


รูปที่ 5.8 คอนทัวร์อุณหภูมิของการไหลของอากาศที่มีการติดปีกรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ความสูง 1.82 มิลลิเมตร มุมปะทะ 30° ที่เลขเรย์โนลด์ 551

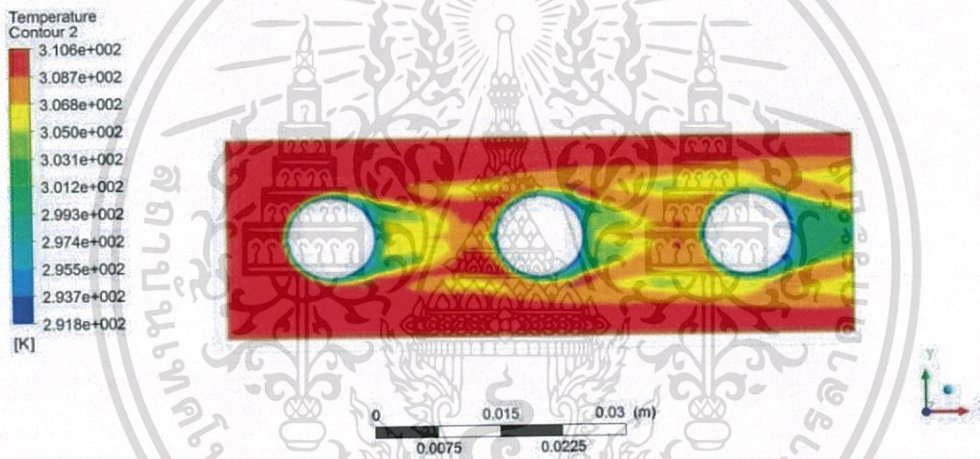


รูปที่ 5.9 คอนทัวร์อุณหภูมิของการไหลของอากาศที่มีการติดปีกรูปทรงสามเหลี่ยมที่ความสูง 1.82 มิลลิเมตร มุมปะทะ 30° ที่เลขเรย์โนลด์ 551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



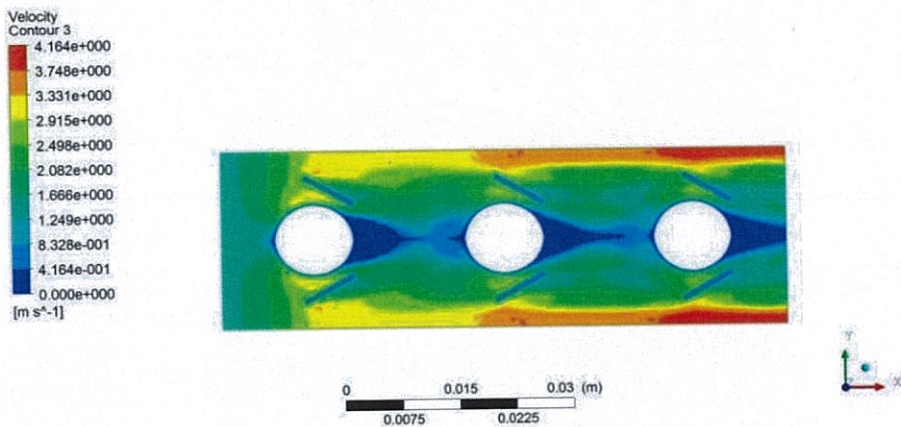
รูปที่ 5.10 คอนทัวร์อุณหภูมิของการไหลของอากาศที่มีการติดปีกรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ความสูง 2.54 มิลลิเมตร มุมปะทะ 30° ที่เลขเรย์โนลด์ 551



รูปที่ 5.11 คอนทัวร์อุณหภูมิของการไหลของอากาศที่มีการติดปีกแบบสามเหลี่ยมที่ความสูง 2.54 มิลลิเมตร มุมปะทะ 30° ที่เลขเรย์โนลด์ 551

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิจากการไหลของอากาศจากการติดปีกรูปทรงสี่เหลี่ยมและปีกรูปทรงสามเหลี่ยม จากรูปที่ 5.8 - 5.11 จะเห็นว่า ปีกรูปทรงสี่เหลี่ยมนั้นมีการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิระหว่างท่ออากาศได้ดีกว่าปีกรูปทรงสามเหลี่ยม เนื่องจากมีการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ดีกว่า ส่วนปีกรูปทรงสามเหลี่ยมนั้น การกระจายตัวของอุณหภูมิจะน้อยกว่าปีกรูปทรงสี่เหลี่ยม ซึ่งมีผลให้อุณหภูมิของอากาศบริเวณหลังท่อของปีกรูปทรงสี่เหลี่ยมนั้นสูงกว่าอุณหภูมิบริเวณหลังท่อของปีกรูปทรงสามเหลี่ยม และความสูงของปีกที่มากขึ้นจะส่งผลให้เกิดกระแสไหลวนบริเวณหลังท่อมากขึ้น ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีขึ้น อุณหภูมิของอากาศบริเวณท่อจึงสูงขึ้น

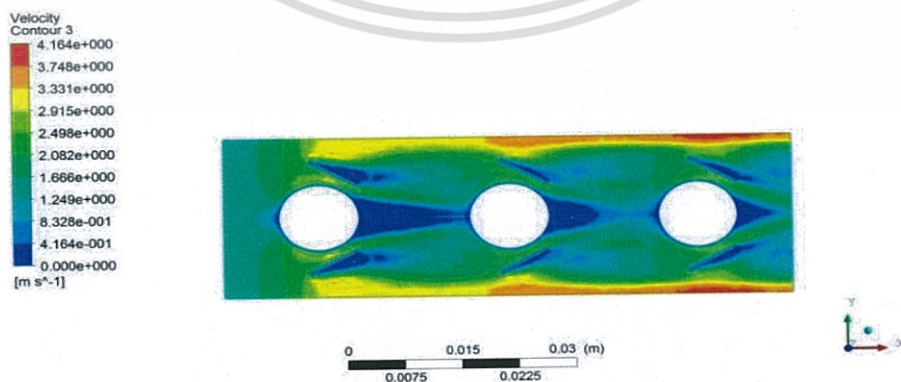
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.12 คอนทัวร์ความเร็วของการไหลของอากาศที่มีการติดปีกรูปทรงสี่เหลี่ยมที่มีความสูง 1.82 มิลลิเมตร มุมปะทะ 30° ที่เลขเรย์โนลด์ 551

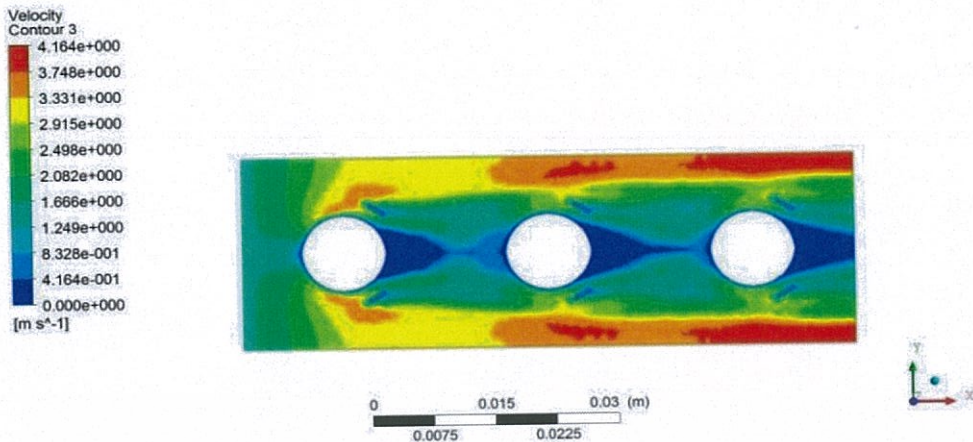


รูปที่ 5.13 คอนทัวร์ความเร็วของการไหลของอากาศที่มีการติดปีกรูปทรงสามเหลี่ยมที่มีความสูง 1.82 มิลลิเมตร มุมปะทะ 30° ที่เลขเรย์โนลด์ 551



รูปที่ 5.14 คอนทัวร์ความเร็วของการไหลของอากาศที่มีการติดปีกรูปทรงสี่เหลี่ยมที่มีความสูง 2.54 มิลลิเมตร มุมปะทะ 30° ที่เลขเรย์โนลด์ 551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



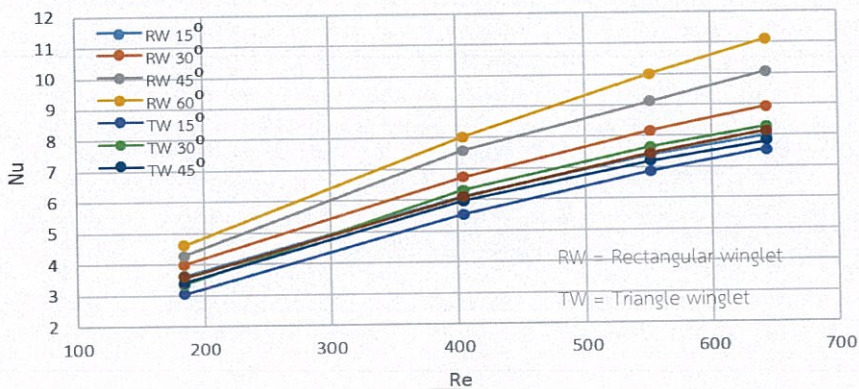
รูปที่ 5.15 คอนทัวร์ความเร็วของการไหลของอากาศที่มีการติดปีกรูปทรงสามเหลี่ยมที่ความสูง 2.54 มิลลิเมตร มุมปะทะ 30° ที่เลขเรย์โนลด์ 551

เมื่อพิจารณาคอนทัวร์ความเร็วของการไหลของอากาศที่มีการติดปีกรูปทรงสี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 5.12 - 5.15 จะเห็นได้ว่าการติดปีกรูปทรงสี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยมบนครีบด้วยความสูงที่เพิ่มขึ้น จะเพิ่มพื้นที่ผิวปีกในการขัดขวางการไหลของอากาศ ทำให้ความดันตกคร่อมของอากาศมากขึ้น จึงส่งผลให้ความเร็วของอากาศลดลง และเมื่อเปรียบเทียบความเร็วของปีกรูปทรงสี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยม ปีกรูปทรงสามเหลี่ยมนั้นจะให้ความเร็วการไหลของอากาศดีกว่าการติดปีกรูปทรงสี่เหลี่ยม เนื่องจากมีพื้นที่ปีกในการขัดขวางการไหลของอากาศน้อยกว่า

5.2 อิทธิพลของมุมปะทะ

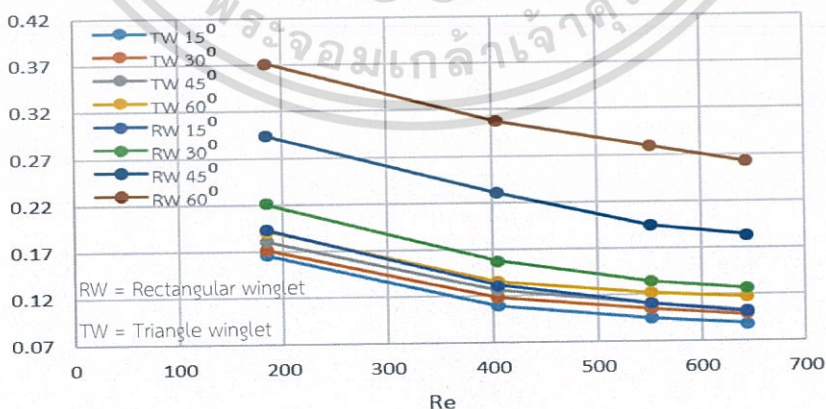
จากผลงานวิจัยได้ศึกษาอิทธิพลของมุมปะทะที่ 15° , 30° , 45° และ 60° ว่ามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของเลขนัสเซลและค่าตัวประกอบความเสียดทานมากน้อยเพียงใด ซึ่งจะส่งผลต่อค่าสมรรถนะเชิงความร้อน และจากผลที่ได้จากการศึกษา ได้ยกผลวิเคราะห์เชิงตัวเลขจากงานวิจัยที่มุมปะทะ 15° , 30° , 45° และ 60° ที่ความสูง 2.18 มิลลิเมตร มาพิจารณาดังนี้

5.2.1 การวิเคราะห์สมรรถนะเชิงความร้อนเนื่องจากอิทธิพลของมุมปะทะ



รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์กับเลขนัสเซลของครีปที่ติดปีกรูปทรงสี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยมที่มีความสูง 2.18 มิลลิเมตร มุมปะทะ 15°, 30°, 45° และ 60° ตามลำดับ

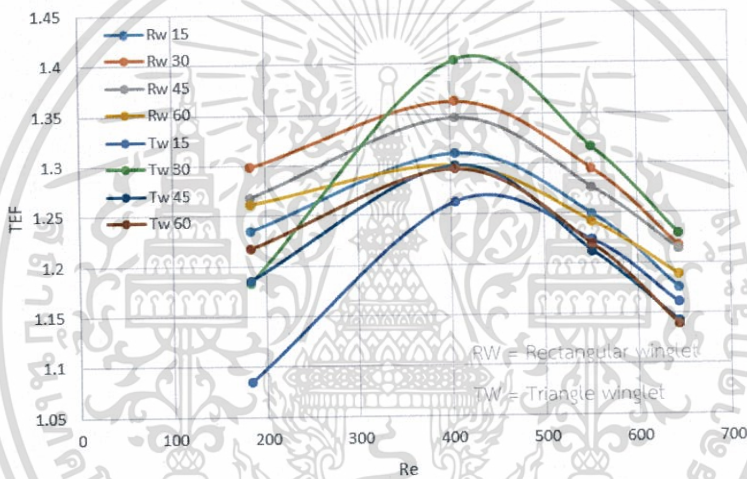
จากรูปที่ 5.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์กับอัตราส่วนเลขนัสเซล ที่มุมปะทะ 15°, 30°, 45° และ 60° ตามลำดับ โดยพิจารณาที่ความสูงของปีก 2.18 มิลลิเมตร ที่ช่วงเลขเรย์โนลด์ 183-716 เมื่อมุมปะทะของปีกทรงสี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยมเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนของอากาศกับท่อได้ดีขึ้น เลขนัสเซลจึงมากขึ้นเมื่อมุมปะทะเพิ่มขึ้น และเลขนัสเซลของปีกรูปทรงสี่เหลี่ยมจะมากกว่าปีกรูปทรงสามเหลี่ยม เนื่องจากมีพื้นที่ผิวของปีกที่มาขัดขวางการไหลของอากาศมากกว่า



รูปที่ 5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์กับค่าความดันตกคร่อมของครีปที่ติดปีกรูปทรงสี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยมที่มีความสูง 2.18 มิลลิเมตร มุมปะทะ 15°, 30°, 45° และ 60°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.17 พิจารณาอิทธิพลของมุมปะทะที่ส่งผลต่อค่าความดันตกคร่อม ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์กับค่าตัวประกอบความเสียดทานของครีปที่ติดปีกรูปทรงสี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยม ที่ความสูง 2.18 มิลลิเมตร มุมปะทะ 15° , 30° , 45° และ 60° ตามลำดับ จะพบว่า การเพิ่มขึ้นของมุมปะทะจะส่งผลให้ค่าความดันตกคร่อมมีค่าเพิ่มขึ้นในทุกๆ เลขเรย์โนลด์ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของมุมปะทะจะเป็นการเพิ่มแรงปฏิกิริยาบนพื้นที่ผิวของปีก ทำให้ค่าตัวประกอบความเสียดทานมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยที่มุมปะทะ 60° จะให้ค่าตัวประกอบความเสียดทานสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับความสูงเดียวกัน และความแตกต่างของค่าตัวประกอบความเสียดทานของปีกรูปทรงสี่เหลี่ยมและปีกรูปทรงสามเหลี่ยมนั้น ปีกรูปทรงสามเหลี่ยมจะให้ค่าตัวประกอบความเสียดทานน้อยกว่า เพราะปีกรูปทรงสามเหลี่ยมจะมีพื้นที่ผิวในการสัมผัสการไหลของอากาศน้อยกว่าปีกรูปทรงสี่เหลี่ยม

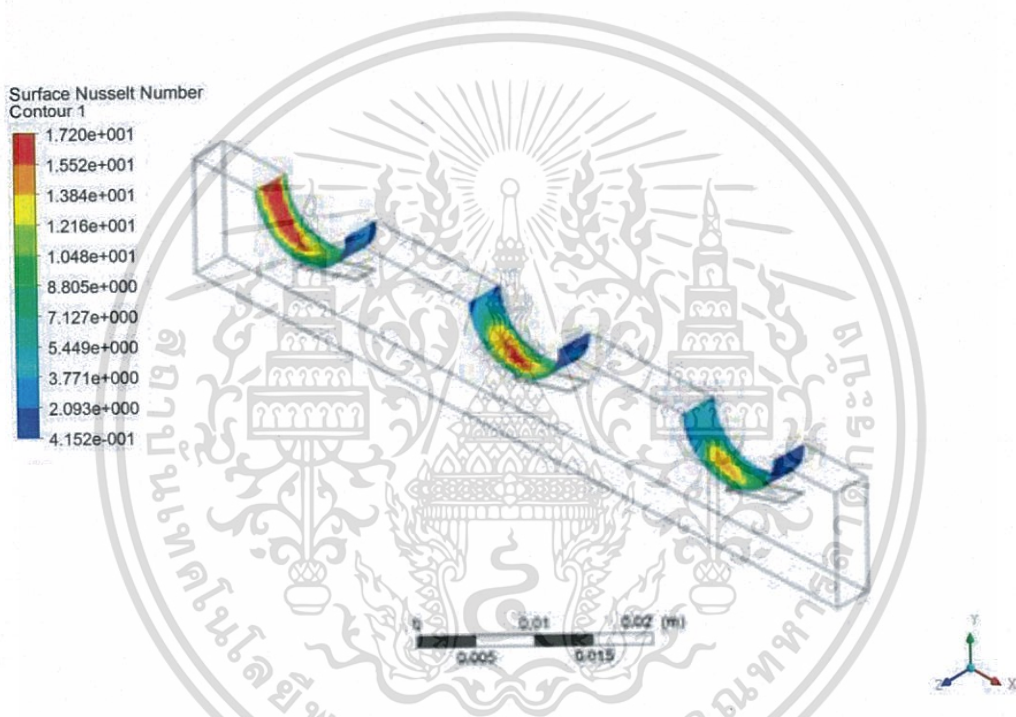


รูปที่ 5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์กับค่า TEf ของครีปที่ติดปีกรูปทรงสี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยม ที่ความสูง 2.18 มิลลิเมตร มุมปะทะ 15° , 30° , 45° และ 60° ตามลำดับ

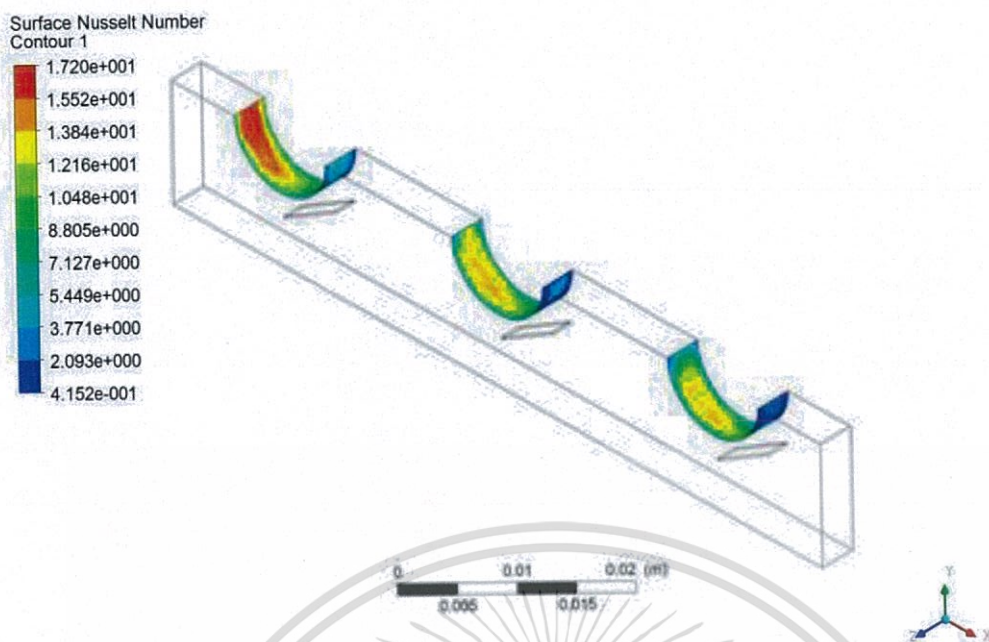
รูปที่ 5.18 แสดงกราฟค่าสมรรถนะเชิงความร้อน (TEf) ที่มุมปะทะ 15° , 30° , 45° และ 60° ตามลำดับ โดยพิจารณาที่ความสูงของปีก 2.18 มิลลิเมตร ที่ช่วงเลขเรย์โนลด์ 183-716 เมื่อพิจารณาที่เลขเรย์โนลด์ เมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้นถึงจุดที่เหมาะสมคือที่เลขเรย์โนลด์ 404 จะให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ดีที่สุดสำหรับปีกสี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยม โดยปีกรูปทรงสามเหลี่ยมที่มุมปะทะ 30° จะให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่มากที่สุด แต่ถ้าเพิ่มเลขเรย์โนลด์ให้มากขึ้นไปอีกจะทำให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมีค่าลดลง จะเห็นได้ว่าเมื่อปีกสี่เหลี่ยมมีมุมปะทะเพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดการกั้นกระแสการไหลหรือขัดขวางกระแสการไหล และทำให้เกิดการไหลหมุนวนของอากาศบริเวณรอบท่อ ทำให้อากาศแลกเปลี่ยนความร้อนกับผิวท่อได้ดีขึ้น แต่การเพิ่มขึ้นของมุมปะทะจะทำให้ความดันตกเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คร่อมของอากาศเพิ่มขึ้น ทำให้มีความเสียดทานที่ผิวปีกมีค่ามากขึ้น ทำให้สมรรถเชิงความร้อนลดลง และเมื่อพิจารณาปีกรูปทรงสามเหลี่ยม เมื่อมุมปะทะเพิ่มขึ้นสมรรถนะทางความร้อนของปีกรูปทรงสามเหลี่ยมจะลดลง เนื่องจากปีกสามเหลี่ยมมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับอากาศน้อย เมื่อมุมปะทะมาก จะเกิดเป็นช่องว่างให้อากาศไหลผ่านไปและจะไม่สามารถบังคับทิศทางการไหลของอากาศบางส่วนให้มาแลกเปลี่ยนความร้อนกับบริเวณผิวท่อ

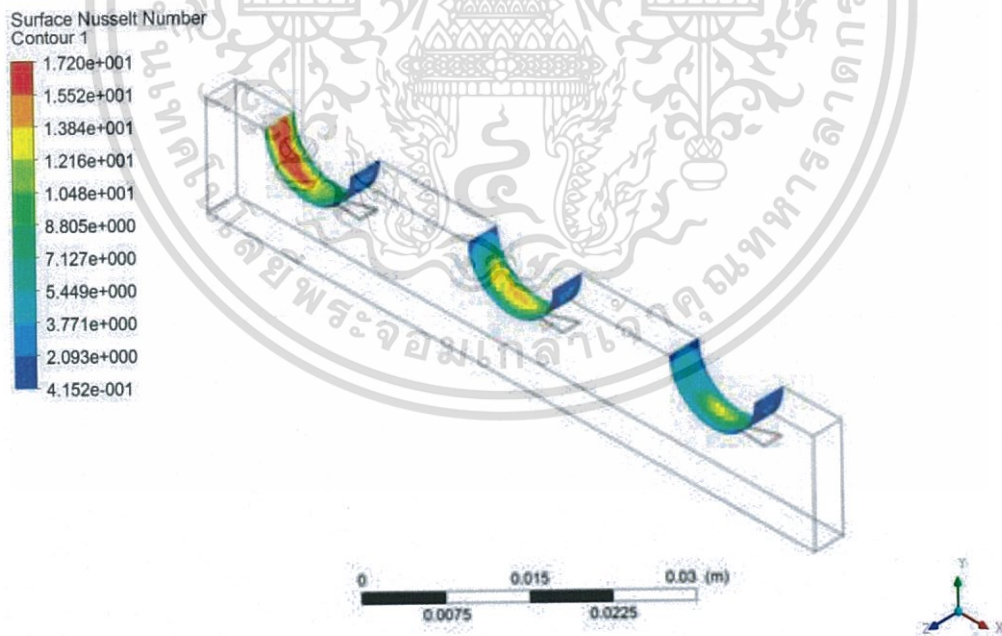
5.2.2 พฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากอิทธิพลของมุมปะทะ



รูปที่ 5.19 คอนทัวร์เลขนัสเซลบนครีบริบที่ติดปีกรูปทรงสี่เหลี่ยม ที่ความสูง 2.18 มิลลิเมตร มุมปะทะ 15° ที่เลขเรย์โนลด์ 551

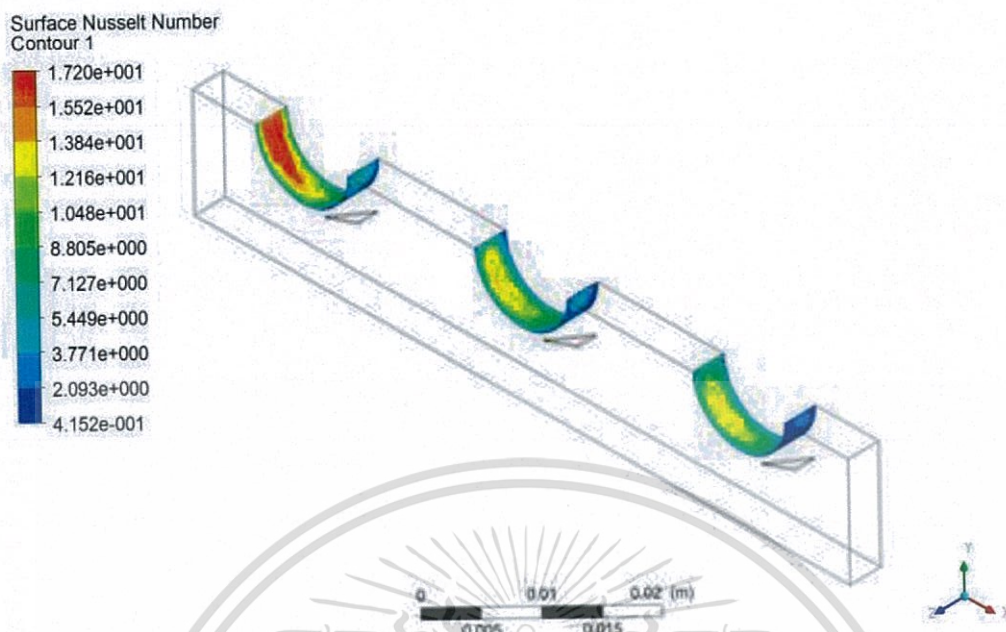


รูปที่ 5.20 คอนทัวร์เลขนัสเซลบนครีบที่ติดปีกรูปทรงสี่เหลี่ยม ที่ความสูง 2.18 มิลลิเมตร มุมปะทะ 30° ที่เลขเรย์โนลด์ 551



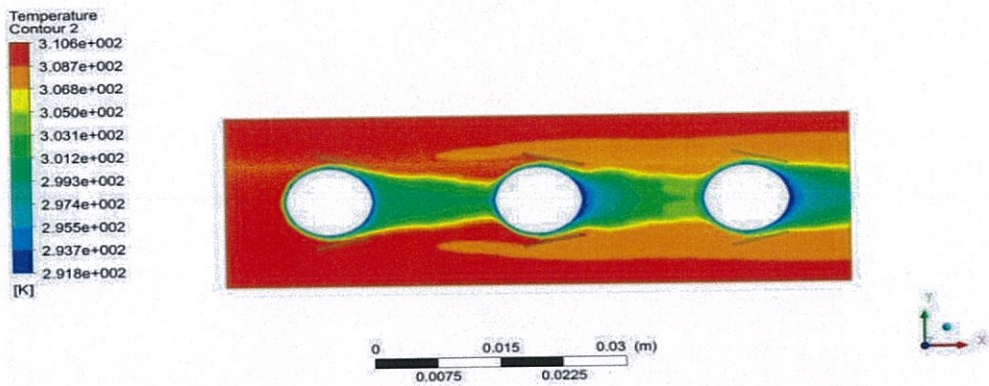
รูปที่ 5.21 คอนทัวร์เลขนัสเซลบนครีบที่ติดปีกรูปทรงสามเหลี่ยม ที่ความสูง 2.18 มิลลิเมตร มุมปะทะ 15° ที่เลขเรย์โนลด์ 551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

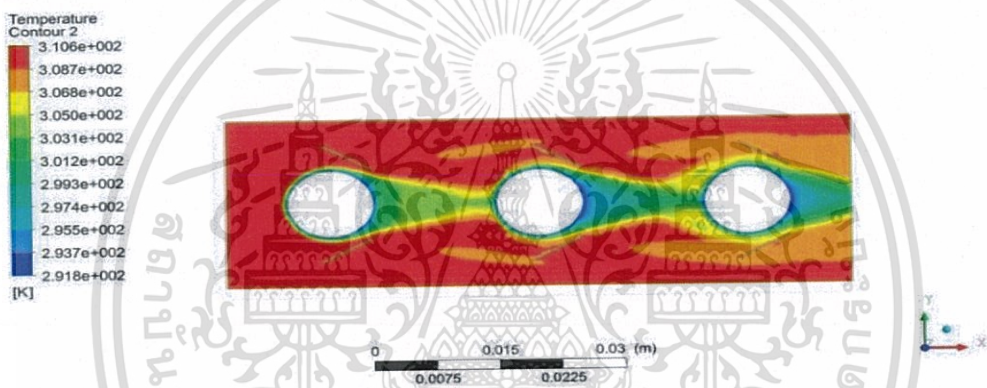


รูปที่ 5.22 คอนทัวร์เลขนัสเซลบนครีปที่ติดปีกรูปทรงสามเหลี่ยม ที่ความสูง 2.18 มิลลิเมตร มุมปะทะ 30° ที่เลขเรย์โนลด์ 551

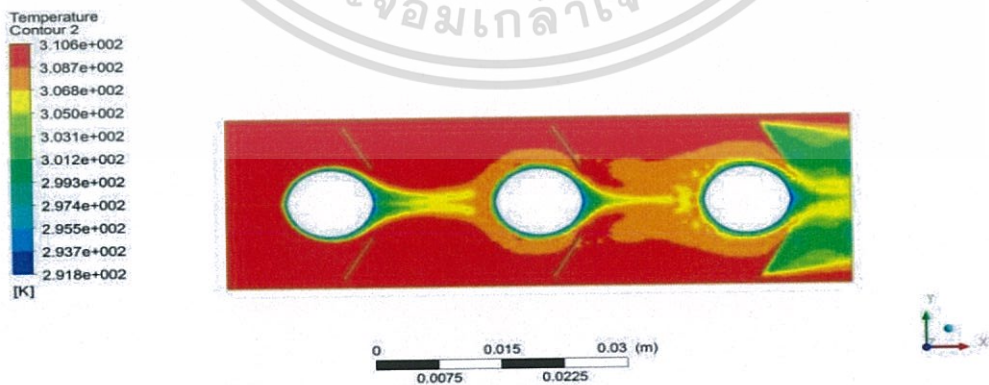
จากรูปที่ 5.19 - 5.22 แสดงคอนทัวร์เลขนัสเซลบนครีปที่ติดปีกรูปทรงสี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยม ที่ความสูง 2.18 มิลลิเมตร มุมปะทะ 15° และ 30° ที่เรย์โนลด์ 551 จะพบว่าปีกรูปทรงสี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยม ที่มุมปะทะ 15° คอนทัวร์เลขนัสเซลจะมีค่าสูงที่บริเวณผิวด้านข้างของท่อเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากมุมปะทะที่น้อยทำให้การไหลของอากาศจะไหลมาปะทะที่บริเวณด้านข้างของท่อ ทำให้บริเวณผิวด้านข้างนั้นเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีกว่าบริเวณผิวด้านหลังท่อ และเมื่อพิจารณาการติดปีกรูปทรงสี่เหลี่ยมที่มุมปะทะ 30° จะแสดงให้เห็นว่า ปีกมีการบังคับทิศทางไหลของอากาศให้อากาศไหลไปปะทะบริเวณด้านหลังท่อมากขึ้น จึงเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนบริเวณหลังท่อที่ดีขึ้น จากรูปแสดงให้เห็นว่ารูปทรงของปีกมีผลเมื่อมุมปะทะมากขึ้น รูปทรงของปีกจะส่งผลให้กระแสการไหลของอากาศไหลไปแลกเปลี่ยนความร้อนบริเวณหลังท่อได้มากขึ้น



รูปที่ 5.23 คอนทัวร์อุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านครีบที่ติดปีกรูปทรงสี่เหลี่ยม ที่ความสูง 2.18 มิลลิเมตร มุมปะทะ 15° ที่เลขเรย์โนลด์ 551

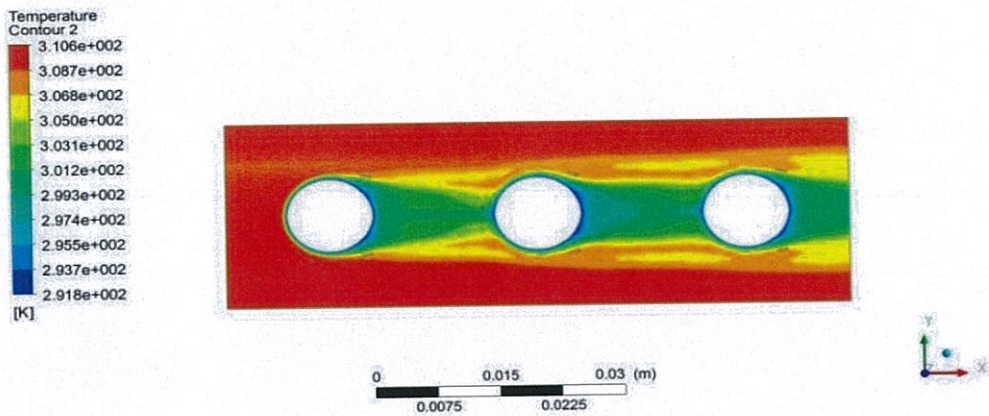


รูปที่ 5.24 คอนทัวร์อุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านครีบที่ติดปีกรูปทรงสี่เหลี่ยม ที่ความสูง 2.18 มิลลิเมตร มุมปะทะ 30° ที่เลขเรย์โนลด์ 551

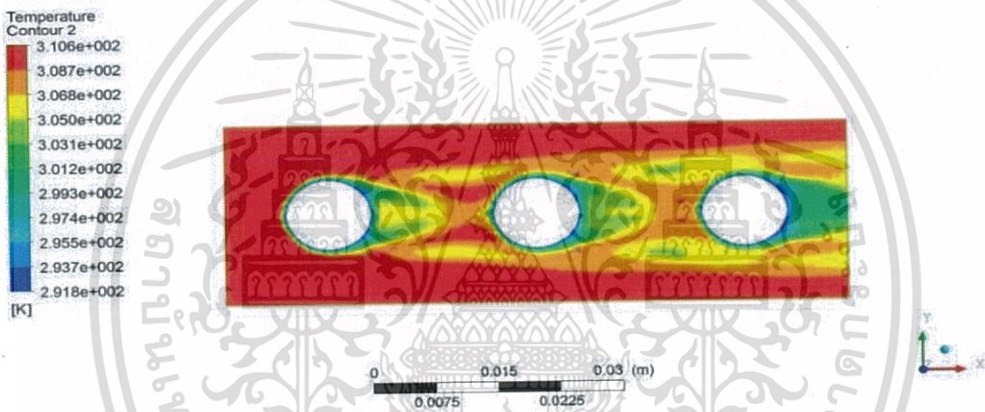


รูปที่ 5.25 คอนทัวร์อุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านครีบที่ติดปีกรูปทรงสี่เหลี่ยม ที่ความสูง 2.18 มิลลิเมตร มุมปะทะ 60° ที่เลขเรย์โนลด์ 551

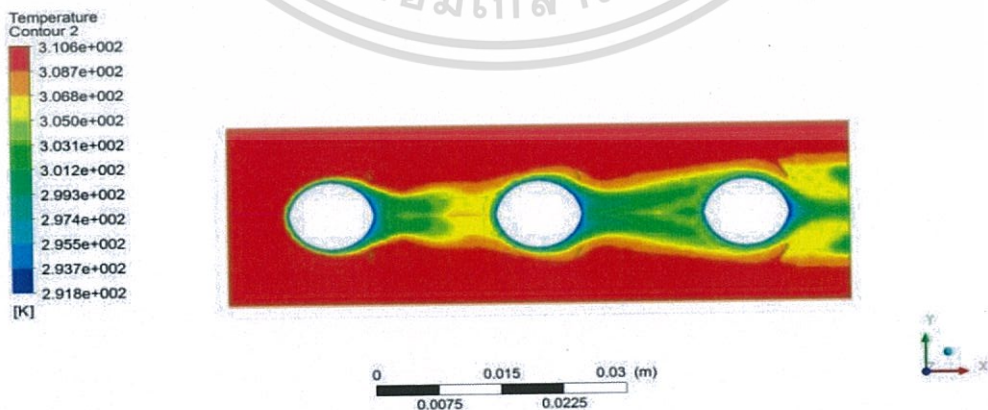
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.26 คอนทัวร์อุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านครีบที่ติดปีกรูปทรงสามเหลี่ยม ที่ความสูง 2.18 มิลลิเมตร มุมปะทะ 15° ที่เลขเรย์โนลด์ 551



รูปที่ 5.27 คอนทัวร์อุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านครีบที่ติดปีกแบบสามเหลี่ยม ที่ความสูง 2.18 มิลลิเมตร มุมปะทะ 30° ที่เลขเรย์โนลด์ 551



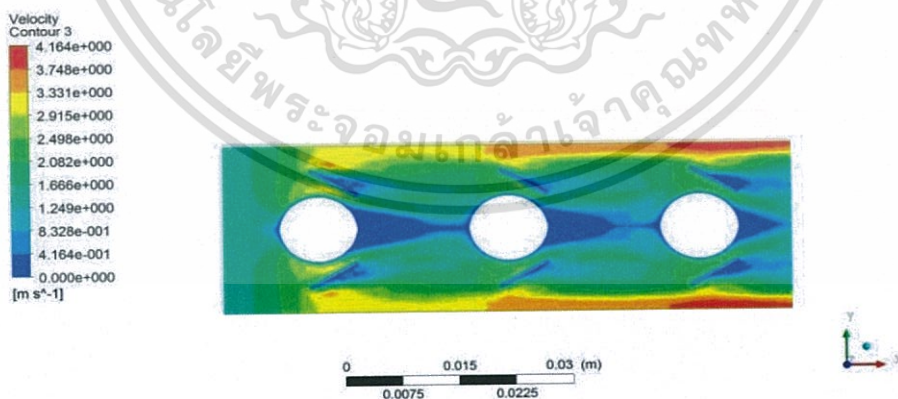
รูปที่ 5.28 คอนทัวร์อุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านครีบที่ติดปีกรูปทรงสามเหลี่ยม ที่ความสูง 2.18 มิลลิเมตร มุมปะทะ 60° ที่เลขเรย์โนลด์ 551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

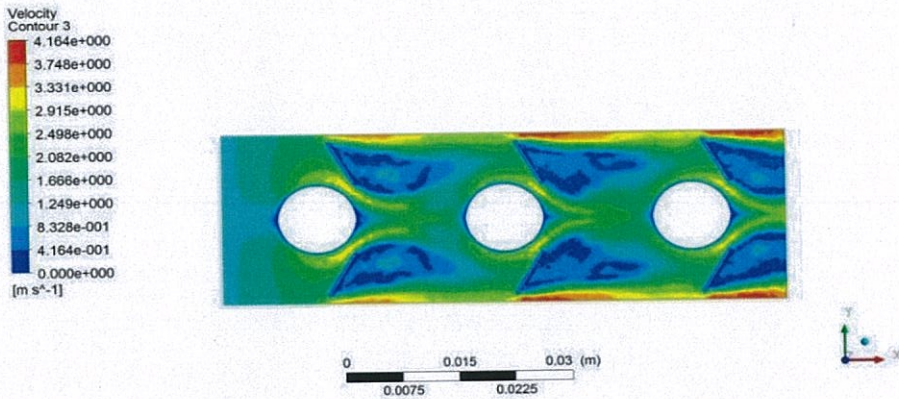
รูปที่ 5.23 - 5.28 แสดงคอนทัวร์อุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านครีบบีบที่ติดปีกรูปทรงสี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยม ที่ความสูง 2.18 มิลลิเมตร มุมปะทะ 15° , 30° และ 60° ที่เรย์โนลด์ 551 พบว่าครีบบีบที่ติดปีกสี่เหลี่ยมรูปทรงสี่เหลี่ยมอุณหภูมิของอากาศที่มุมปะทะ 15° อุณหภูมิของอากาศจะยังไม่กระจายตัว แต่เมื่อมุมปะทะเพิ่มเป็น 30° อุณหภูมิการไหลของอากาศเริ่มเกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิเนื่องจากเกิดกระแสหมุนวนของอากาศ และเมื่อมุมปะทะที่ 60° จะเห็นได้ชัดเจนว่า อุณหภูมิการไหลของอากาศเกิดการกระจายตัวอย่างชัดเจน ส่วนในปีกรูปทรงสามเหลี่ยม ที่มุมปะทะทั้ง 3 มุม แนวโน้มการไหลของอุณหภูมิการไหลของอากาศจะกระจายตัวไม่ต่างกัน



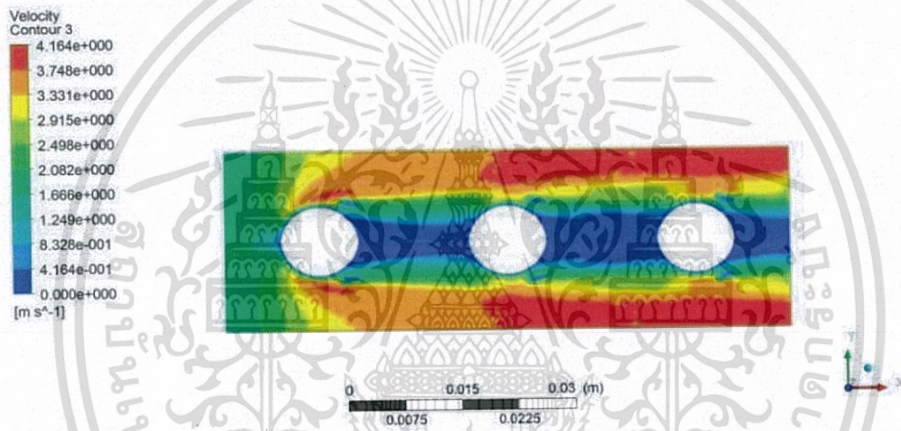
รูปที่ 5.29 คอนทัวร์ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านครีบบีบที่ติดปีกรูปทรงสี่เหลี่ยม ที่ความสูง 2.18 มิลลิเมตร มุมปะทะ 15° ที่เลขเรย์โนลด์ 551.13



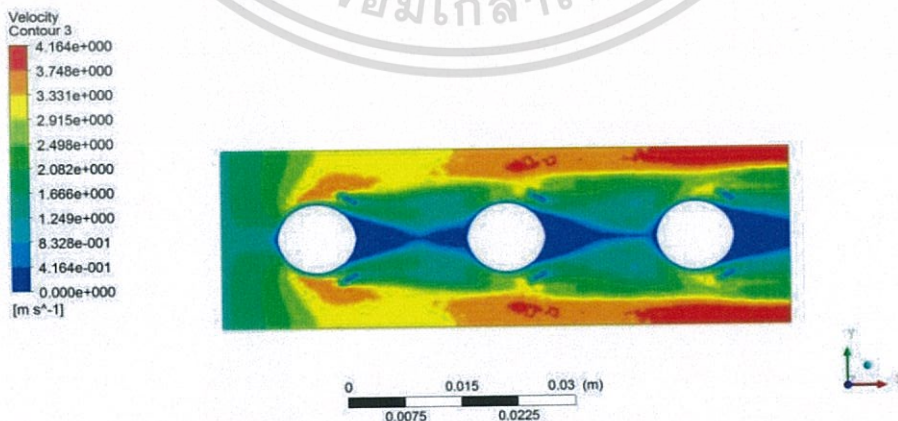
รูปที่ 5.30 คอนทัวร์ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านครีบบีบที่ติดปีกรูปทรงสี่เหลี่ยม ที่ความสูง 2.18 มิลลิเมตร มุมปะทะ 30° ที่เลขเรย์โนลด์ 551



รูปที่ 5.31 คอนทัวร์ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านครีบที่ติดปีกรูปทรงสี่เหลี่ยม ที่ความสูง 2.18 มิลลิเมตร มุมปะทะ 60° ที่เลขเรย์โนลด์ 551

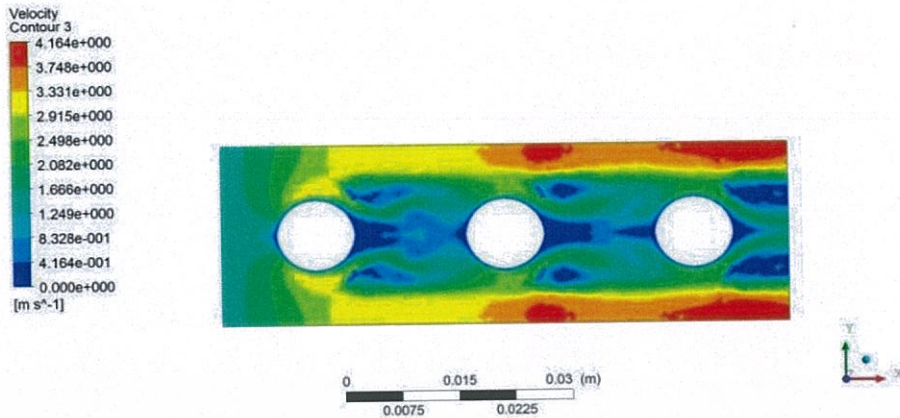


รูปที่ 5.32 คอนทัวร์ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านครีบที่ติดปีกแบบสามเหลี่ยม ที่ความสูง 2.18 มิลลิเมตร มุมปะทะ 15° ที่เลขเรย์โนลด์ 551



รูปที่ 5.33 คอนทัวร์ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านครีบที่ติดปีกรูปทรงสามเหลี่ยม ที่ความสูง 2.18 มิลลิเมตร มุมปะทะ 30° ที่เลขเรย์โนลด์ 551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.34 คอนทัวร์ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านครีบที่ติดปีกรูปทรงสามเหลี่ยม ที่ความสูง 2.18 มิลลิเมตร มุมปะทะ 60° ที่เลขเรย์โนลด์ 551

จากรูปที่ 5.29 – 5.34 แสดงคอนทัวร์ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านครีบที่ติดปีกรูปทรงสี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยม ที่ความสูง 2.18 มิลลิเมตร มุมปะทะ 15° , 30° และ 60° ตามลำดับ ที่เลขเรย์โนลด์ 551 พบว่าที่มุมปะทะที่ 15° ความเร็วของการไหลของอากาศ ของครีบที่ติดปีกรูปทรงสี่เหลี่ยมและ ปีกรูปทรงสามเหลี่ยม ความเร็วบริเวณหลังท่อไม่สูงมาก แต่เมื่อมุมปะทะเพิ่มขึ้นเป็น 30° ความเร็วการไหลของอากาศ บริเวณหลังท่อจะเพิ่มขึ้นชัดเจนและมีผลต่อแรงปะทะที่บริเวณผิวท่อถัดไป ทำให้ทำลายชั้นขีดผิวความร้อนที่ผิวท่อได้ดีขึ้น และเมื่อมุมปะทะเพิ่มขึ้นเป็น 60° ความเร็วที่บริเวณใกล้ผิวท่อด้านหลังสูงขึ้น แต่ความเร็วของอากาศจะลดลงก่อนจะถึงท่อถัดไปอย่างชัดเจน เนื่องจากการสูญเสียความดันจากการขัดขวางการไหลของอากาศของปีก

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการจำลอง

สำหรับปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลความสูง มุมปะทะของปีกรูปทรงสี่เหลี่ยม และปีกรูปทรงสามเหลี่ยมสร้างการไหลหมุนวนที่ติดบนครีบ และความเร็วของอากาศที่ไหลเข้าเครื่อง ถ่ายเทความร้อนแบบครีบและท่อ ว่ามีผลกระทบต่อสมรรถนะเชิงความร้อนอย่างไรบ้าง รวมทั้งศึกษา พฤติกรรมการไหลของอากาศ ค่าความดันตกคร่อม โดยได้ทำการศึกษาความสูงของปีกที่ 1.82, 2.18 และ 2.54 มิลลิเมตร มุมปะทะที่ 15° , 30° , 45° และ 60° การแลกเปลี่ยนความร้อนที่ผิวเป็นแบบ อุณหภูมิคงที่ ในช่วงของเลขเรย์โนลด์ที่ 183 ถึง 716 การถ่ายเทความร้อนในช่วงการไหลแบบ ราบเรียบ โดยค่าที่เราให้ความสนใจ คือ ค่าตัวประกอบความเสียดทาน เลขนัสเซล เลขเรย์โนลด์ โดย ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบค่าที่ได้กับครีบแบบเรียบ (plain fin) แล้วว่าสอดคล้องกับงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ เพื่อให้แน่ใจว่าผลที่ได้จากการจำลอง นั้นมีวิธีการจำลองที่ถูกต้อง เพื่อนำมาใช้ในการ วิเคราะห์ว่าปีกรูปทรงสี่เหลี่ยมกับปีกรูปทรงสามเหลี่ยมที่ความสูงและมุมปะทะที่ได้กำหนดไว้ นั้น กรณีไหนให้สมรรถนะเชิงความร้อนที่ดีกว่ากัน ซึ่งจากการจำลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. เมื่อมีการติดตั้งปีกรูปทรงสี่เหลี่ยมและปีกรูปทรงสามเหลี่ยม จะทำให้เกิดกระแสหมุนวน ส่งผลให้มีการคลุกเคล้าของอากาศอย่างสมบูรณ์ และยังทำให้ชั้นขีดผิวความร้อนบริเวณผิวท่อถูก ทำลายจึงทำให้อากาศสามารถแลกเปลี่ยนความร้อนกับผนังผิวท่อได้มากขึ้น ซึ่งแตกต่างกับกรณีที่ไม่มีการติดปีก กล่าวคือ มีเพียงอากาศจำนวนหนึ่งที่จะแลกเปลี่ยนความร้อนบริเวณผิวท่อ ซึ่งเมื่อติดปีก บนครีบ ที่มุมปะทะและความสูงต่างๆ จะทำการกั้นหรือขัดขวางกระแสการไหลของอากาศให้เกิดการ หมุนวนรอบๆบริเวณท่อ หรือบังคับให้กระแสการไหลของอากาศสามารถเข้าไปปะทะแลกเปลี่ยน ความร้อนกับผิวท่อได้มากขึ้น

2. ในกรณีของอิทธิพลของความสูงของปีกรูปทรงสี่เหลี่ยมและปีกรูปทรงสามเหลี่ยมที่ส่งผล ต่อสมรรถนะเชิงความร้อน จะเห็นได้ว่าที่เลขเรย์โนลด์ต่ำการติดปีกแบบสี่เหลี่ยมจะให้ค่าสมรรถนะ เชิงความร้อนได้ดีกว่าการติดปีกแบบสามเหลี่ยมและหากเพิ่มเลขเรย์โนลด์ให้ถึงจุดที่เหมาะสม จะให้ ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ดีที่สุด ที่มุมปะทะ 30° โดยปีกรูปทรงสามเหลี่ยมจะมีความสูงที่ 2.54 มิลลิเมตร จะให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่มากกว่าปีกสี่เหลี่ยมที่มีความสูง 1.82 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การไหลแบบราบเรียบที่เลขเรย์โนลด์ 183 ถึง 716 เมื่ออากาศไหลผ่านครีบบัที่กรณีต่างๆ พบว่าค่าสมรรถนะเชิงความร้อนจะมีค่าดีที่สุดที่เรย์โนลด์ 404 ในขอบเขตกรณีการศึกษา

4. ค่าตัวประกอบความเสียดทาน นั้นจะมีค่าลดลงเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น ส่วนเลขนัสเซล นั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น ที่การไหลแบบราบเรียบที่ได้ศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 183 ถึง 716

5. อิทธิพลของมุมปะทะ ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของปีกของปีกรูปทรงสี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยม จะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นแต่เมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้นถึงจุดที่เหมาะสมจะให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ดีที่สุด โดยมุมปะทะ 30° ของปีกรูปทรงสี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยมจะให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่มากที่สุด

6. จากผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของปีกรูปทรงสามเหลี่ยมและรูปทรงสามเหลี่ยมนั้น ที่มุมปะทะ 30° จะให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่มากที่สุด โดยค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดของปีกรูปทรงสามเหลี่ยมจะมากกว่าปีกรูปทรงสี่เหลี่ยม มีค่าเท่ากับ 1.420916 และ 1.402067 ตามลำดับ

6.2 ข้อเสนอแนะ

ผลการวิจัยนี้แสดงให้เห็นการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มและอัลกอริทึมแบบ SIMPLE ในการแก้ปัญหาแบบจำลอง สำหรับวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนและพฤติกรรมการไหลของอากาศเมื่อไหลผ่านครีบบั ซึ่งวิธีนี้สามารถใช้เป็นวิธีการวิเคราะห์ผลเบื้องต้น ก่อนเข้าสู่กระบวนการออกแบบและผลิตจริง ซึ่งวิธีการจำลองนี้เป็นวิธีการที่สะดวกและมีค่าใช้จ่ายต่ำ สำหรับผลการศึกษาสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบและพัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบบัและท่อให้มีประสิทธิภาพสูงมากขึ้น หรือนำไปเป็นแนวทางในการวิจัยต่อไปในการจำลองนั้น ในการทำการจำลองนั้นผลที่ได้ไม่สามารถทราบล่วงหน้า ดังนั้นการวางแผนในการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆอย่างละเอียด อย่างเป็นระบบแบบแผน จะทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่ได้เหมาะสมกับลักษณะงานที่เราต้องการที่สุด

บรรณานุกรม

- [1] วิฑาตา เจษฎฐารัตนชัย. 2559. การถ่ายเทความร้อน. กรุงเทพฯ : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [2] Yunus A. Cengel, Afshin J. Ghajar. 2015. **Heat and Mass Transfer Fundamental & Applications**. 5th ed. New York : McGraw-Hill.
- [3] A.A. Gholami, Mazlan A. Wahid, H.A. Mohammed. 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: 132-140.
- [4] Ahmadali Gholami, Mazlan A. Wahid, H.A. Mohammed. 2017. Thermal-hydraulic performance of fin-and-oval tube compact heat exchangers with innovative design of corrugated fin patterns. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. 106: 573-592.
- [5] J.M. Wu, W.Q. Tao. 2011. Impact of delta winglet vortex generators on the performance of a novel fin-tube surfaces with two rows of tubes in different diameters. **Energy Conversion and Management**. 52: 2895-2901.
- [6] P. Chu, Y.L. He, Y.G. Lei, L.T. Tian, R. Li. 2009. Three-dimensional numerical study on fin-and-oval-tube heat exchanger with longitudinal vortex generators. **Applied Thermal Engineering**. 29: 859-876
- [7] Shilesh Kumar Sarangi, Dipti Prasad Mishra. 2017. Effect of winglet location on heat transfer of a fin-and-tube heat exchanger. **Applied Thermal Engineering**. 116: 528-540.
- [8] Shobhana Singh, Kim Sorensen, Anders Schou Simonsen, Thomas J. Condra. Implication of fin profiles on overall performance and weight reduction of fin and tube heat exchanger. **Applied Thermal Engineering**. 115: 962-976.
- [9] Y.L. He, H. Han, W.Q. Tao, Y.W. Zhang. 2012. Numerical study of heat-transfer enhancement by punched winglet-type vortex generator arrays in fin-and tube heat exchangers. **International journal of Heat and Mass Transfer**. 55: 5449-5458.