

การวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
แบบครีบบและท่อที่มีการติดตั้งปีกรูปตัววีและปีกแบบหยัก

NUMERICAL ANALYSIS ON HEAT TRANSFER IN FIN-TUBE HEAT EXCHANGER
INSTALLED WITH V AND WAVY WINGLETS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2566

KMITL-2023-EN-M-030-129

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NUMERICAL ANALYSIS ON HEAT TRANSFER IN FIN-TUBE HEAT EXCHANGER
INSTALLED WITH V AND WAVY WINGLETS

The seal of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang is a circular emblem. It features a central sunburst with rays emanating from a central point. Below the sunburst are three tiered stupas or pagodas, each supported by a decorative base. The entire emblem is surrounded by a circular border containing Thai text. The text at the top reads 'สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง' and the text at the bottom reads 'มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง'.

NATTAKIT KITIWONG

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

2023

KMITL-2023

COPYRIGHT 2023

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อผู้เผยแพร่เห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับการถ่ายเทความร้อน ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบบและท่อที่มีการติดตั้ง ปีกรูปตัววีและปีกแบบหยัก
นักศึกษา	นายณัฐกิตติ์ กิตติวงศ์
รหัสนักศึกษา	60601113
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2566
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. วิฑาตา เจษฎารัตนชัย

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลแบบจำลองเชิงตัวเลขของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบบและท่อที่มีการติดตั้งปีกรูปตัววีและปีกแบบหยักแบบต่อเนื่องบนแผ่นครีบบ ใช้การคำนวณวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมและใช้ลำดับวิธีหาผลเฉลยแบบ SIMPLE โดยนำเสนอผลของพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนพฤติกรรมการไหล สำหรับเลขเรย์โนลด์ส์ในช่วง $Re = 200 - 1,000$ ผลลัพธ์นำเสนอถึงการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อม แสดงในพจน์ของเลขนัสเซิล (Nusselt number) และตัวประกอบเสียดทาน (Friction factor) ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่า เมื่อติดตั้งปีกแบบรูปตัววี และแบบหยักลงบนแผ่นครีบบ ส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นครีบบเรียบที่ไม่ติดตั้งปีก เนื่องจากแผ่นปีกที่ติดตั้งช่วยทำให้เกิดกระแสการไหลแบบหมุนควงหลังปีกและก่อให้เกิดการไหลกระแทกที่แผ่นครีบบและผิวท่อ ขณะเดียวกันก็ทำให้เกิดความดันสูญเสียเพิ่มมากขึ้น โดยการติดตั้งปีกรูปตัววี ลักษณะต่าง ๆ ที่มุมปะทะการไหล 60° จะให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงที่สุด และการติดตั้งปีกแบบหยัก ที่มุมปะทะการไหล 45° จะให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงที่สุดเช่นกัน

Thesis Title	NUMERICAL ANALYSIS ON HEAT TRANSFER IN FIN-TUBE HEAT EXCHANGER INSTALLED WITH V AND WAVY WINGLETS
Student	Mr. Nattakit Kitiwong
Student ID.	60601113
Degree	Master of Engineering
Program	Mechanical Engineering
Year	2023
Thesis Advisor	Assoc.Prof. Dr. Withada Jedsadaratanachai

ABSTRACT

This article presents a numerical model for a fin-tube heat exchanger equipped with v and wavy winglets that feature punched holes on the fins. The computations have been carried out using the finite volume method and the SIMPLE algorithm. The study investigates heat transfer characteristics and fluid flow across the heat exchanger over a range of Reynolds numbers from 200 to 1,000. The results of the investigation are presented in terms of Nusselt number and friction factor. The findings demonstrate that the utilization of v and wavy winglets affixed to the fins yields significantly greater heat transfer rate and friction factor as compared to the base case. This improvement is primarily attributed to the generation of vortex flows induced by the wavy winglets, which facilitate impinging flows. Nonetheless, it is crucial to note that the use of wavy winglets not only enhances heat transfer but also leads to an increased pressure drop across the fins. The maximum thermal performance installed with v winglets at attack angles 60° and the maximum thermal performance installed with wavy winglets at attack angles 45° .

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่องการวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบบและท่อที่มีการติดตั้งปีกรูปตัววีและปีกแบบหยัก สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี โดยการให้คำปรึกษาและความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.วิชาดา เจษฎารัตนชัย ซึ่งผู้วิจัยได้รับความอนุเคราะห์จากท่านและขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง อีกทั้งขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ สำหรับคำแนะนำเพิ่มเติมทำให้วิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้ความช่วยเหลือด้านอุปกรณ์และสถานที่สำหรับใช้ในการวิจัย

ขอขอบคุณ พี่ๆน้องๆร่วมสถาบันทุกท่านจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือข้าพเจ้าในทุกๆ ด้านที่ทำให้วิทยานิพนธ์สำเร็จไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกๆ เรื่อง ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ท้ายที่สุด สำหรับคุณงามความดี อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแต่ผู้มีส่วนพระคุณทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ณัฐกิตติ์ กิตติวงศ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XVII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย.....	3
1.6 คำโครงวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์.....	4
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการติดตั้งแผ่นกั้นในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน.....	4
2.2 งานวิจัยเกี่ยวกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดครีบและท่อ.....	5
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	9
3.1 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	9
3.2 สมการควบคุมการไหลและการถ่ายเทความร้อน.....	11
3.3 หลักการถ่ายเทความร้อน.....	12
3.4 การพาความร้อน.....	13
3.5 ระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข.....	13
3.5.1 ขั้นตอนประมวลผล.....	14
3.5.2 ขั้นตอนประมวลผล.....	14
3.5.3 ขั้นตอนแสดงผล.....	15

5.1.1.1.2.3 การสูญเสียความดัน.....	43
5.1.1.1.2.4 สมรรถนะเชิงความร้อน	44
5.1.1.2 ปีกูรูปตัววี ติดตั้งแบบ 4 แถว (4EA V-Winglet) กึ่งกลางท่อ.....	45
5.1.1.2.1 แบบจำลอง ครีบที่ติดตั้งปีกูรูปตัววี 4 แถว กึ่งกลางท่อ	
ทิศทาง V-Downstream	45
5.1.1.2.1.1 พลังงานการไหล	45
5.1.1.2.1.2 พลังงานการถ่ายเทความร้อน.....	48
5.1.1.2.1.3 การสูญเสียความดัน.....	51
5.1.1.2.1.4 สมรรถนะเชิงความร้อน	52
5.1.1.2.2 แบบจำลอง ครีบที่ติดตั้งปีกูรูปตัววี 4 แถว กึ่งกลางท่อ	
ทิศทาง V-Upstream.....	53
5.1.1.2.2.1 พลังงานการไหล	53
5.1.1.2.2.2 พลังงานการถ่ายเทความร้อน.....	56
5.1.1.2.2.3 การสูญเสียความดัน.....	59
5.1.1.2.2.4 สมรรถนะเชิงความร้อน	60
5.1.2 ปีกูรูปตัววี ติดตั้งแบบ 8 แถว (8EA V-Winglet)	61
5.1.2.1 แบบจำลอง ครีบที่ติดตั้งปีกูรูปตัววี 8 แถว ทิศทาง V-Downstream.....	61
5.1.2.1.1 พลังงานการไหล	61
5.1.2.1.2 พลังงานการถ่ายเทความร้อน.....	64
5.1.2.1.3 การสูญเสียความดัน.....	67
5.1.2.1.4 สมรรถนะเชิงความร้อน	68
5.1.2.2 แบบจำลอง ครีบที่ติดตั้งปีกูรูปตัววี 8 แถว ทิศทาง V-Upstream.....	69
5.1.2.2.1 พลังงานการไหล	69
5.1.2.2.2 พลังงานการถ่ายเทความร้อน.....	72
5.1.2.2.3 การสูญเสียความดัน.....	75
5.1.2.2.4 สมรรถนะเชิงความร้อน	76
5.1.3 ปีกูรูปตัววี แบบเจาะรู.....	77
5.1.3.1 แบบจำลอง ติดตั้งแบบ 4 แถว (4EA V-Winglet) เจาะรู.....	77
5.1.3.1.1 พลังงานการไหล	78
5.1.3.1.2 พลังงานการถ่ายเทความร้อน.....	80
5.1.3.1.3 การสูญเสียความดัน.....	84
5.1.3.1.4 สมรรถนะเชิงความร้อน	85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VI อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ผลแบบจำลองการติดตั้งปีกรูปแบบหยัก.....	86
5.2.1 ปีกรูปแบบหยัก ติดตั้งแบบ 4 แถว (4EA Wavy Winglet)	
ทิศทาง Downstream.....	86
5.2.1.1 พลังการไหล.....	86
5.2.1.2 พลังการถ่ายเทความร้อน.....	89
5.2.1.3 การสูญเสียความดัน.....	92
5.2.1.4 สมรรถนะเชิงความร้อน.....	93
5.2.2 ปีกรูปแบบหยัก ติดตั้งแบบ 4 แถว (4EA Wavy Winglet)	
ทิศทาง Upstream.....	94
5.2.1.1 พลังการไหล.....	94
5.2.1.2 พลังการถ่ายเทความร้อน.....	97
5.2.1.3 การสูญเสียความดัน.....	100
5.2.1.4 สมรรถนะเชิงความร้อน.....	101
5.2.3 ปีกรูปตัวหยัก ติดตั้งแบบ 4 แถว (4EA V-Winglet) เจาะรู.....	102
5.2.3.1 พลังการไหล.....	103
5.2.3.2 พลังการถ่ายเทความร้อน.....	105
5.2.3.3 การสูญเสียความดัน.....	108
5.2.3.4 สมรรถนะเชิงความร้อน.....	109
บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	110
6.1 สรุปผลการทดลอง.....	110
6.2 ข้อเสนอแนะการพัฒนางานวิจัย.....	112
บรรณานุกรม.....	113
ภาคผนวก.....	116
ภาคผนวก ก. คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของอากาศที่ความดันบรรยากาศ.....	117
ภาคผนวก ข. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	119
ประวัติผู้เขียน.....	127

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
6.1 ตารางสรุปผลค่าอัตราส่วนเลนส์เชิล อัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทาน และสมรรถนะเชิงความร้อนของแต่ละแบบจำลอง°	111



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VIII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ครีบริบรูปตัววีที่ใช้ในงานของ Momin et al. (2002)..... 6
2.2	การทดลองของ Li et al. (2018)..... 7
2.3	โมเดลที่ใช้ศึกษาการติดตั้งปีกแบบเจาะรูของ Modi et al. (2020)..... 8
3.1	การไหลแบบสวนทางกัน..... 9
3.2	การไหลแบบทางเดียวกัน..... 10
3.3	การไหลแบบมีทิศทางตั้งฉากกัน..... 11
3.4	ความเชื่อมโยงของกระบวนการติสเครทไทต์และผลเฉลยประมาณค่า..... 14
3.5	รูปแบบการจัดวางกริดในแกน 2 มิติ และ 3 มิติ 15
3.6	ส่วนแรเงาแสดงตำแหน่งของปริมาตรควบคุมแบบ 2 มิติ 15
3.7	รูปแบบแนวคิดของแบบแผนวิธีผลต่างควอดราติกในปริมาตรควบคุมแบบ 1 มิติ..... 19
4.1	โดเมนที่ใช้ศึกษา 21
4.2	แสดงการทดสอบกริดอิสระสำหรับเลขนัสเซลล์ 23
4.3	แสดงการทดสอบกริดอิสระสำหรับตัวประกอบความเสียดทาน..... 23
4.4	การตรวจสอบความถูกต้องของเลขนัสเซลล์เปรียบเทียบกับผลการทดลอง ของ Zukauskas (1987)..... 24
4.5	การตรวจสอบความถูกต้องของตัวประกอบเสียดทานเปรียบเทียบกับ ผลการทดลองของ Zukauskas (1987)..... 25
5.1	ตัวอย่างแบบจำลองครีบริบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แฉก ด้านหลังท่อ ทิศทาง V-Downstream 26
5.2	เส้นกระแสการไหลบนระนาบตามการไหล สำหรับ (ก) ครีบริเรียบ (ข) ครีบริที่ติดตั้งปีกรูปตัววี ความสูง 0.5H, (ค) ครีบริที่ติดตั้งปีกรูปตัววี ความสูง 0.7H และ (ง) ครีบริที่ติดตั้งปีกรูปตัววี ความสูง 0.9H..... 27
5.3	เส้นกระแสการไหล 3 มิติ ครีบริที่ติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แฉก ด้านหลังท่อ มุมปะทะการไหล 30° ทิศทาง V-Downstream สำหรับ (ก) ความสูงของปีก 0.5H, (ข) ความสูงของปีก 0.7H และ (ค) ความสูงของปีก 0.9H..... 28
5.4	เส้นกระแสการไหล 3 มิติ ครีบริที่ติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แฉก ด้านหลังท่อ ทิศทาง V-Downstream ความสูง 0.7H Re 600 สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30° (ข) มุมปะทะการไหล 45° และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°..... 29

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.5	การกระจายตัวของอนุหภูมิ Re 600 สำหรับ (ก) ครีบริียบ, (ข) ครีบริที่ตติตั้งปีกรูปรตัววี 4 แถว ด้านหลังท้อ ทิศทง V-Downstream มูมปะทะการไหล 30° ความสูง 0.5H (ค) ครีบริที่ตติตั้งปีกรูปรตัววี 4 แถว ด้านหลังท้อ ทิศทง V-Downstream มูมปะทะการไหล 30° ความสูง 0.9H.....31
5.6	การกระจายตัวของค่าเลขน้สเชิลบริเวณผิวท้อ Re 600 สำหรับ (ก) ครีบริียบ (ข) ครีบริที่ตติตั้งปีกรูปรตัววี 4 แถว ด้านหลังท้อ ทิศทง V-Downstream มูมปะทะการไหล 30° ความสูง 0.5H (ค) ครีบริที่ตติตั้งปีกรูปรตัววี 4 แถว ด้านหลังท้อ ทิศทง V-Downstream มูมปะทะการไหล 30° ความสูง 0.9H32
5.7	การกระจายตัวของค่าเลขน้สเชิลบริเวณผิวท้อ ครีบริที่ตติตั้งปีกรูปรตัววี 4 แถว ด้านหลังท้อ ทิศทง V-Downstream ความสูง 0.9H Re 600 สำหรับ (ก) มูมปะทะการไหล 30°, (ข) มูมปะทะการไหล 45° และ (ค) มูมปะทะการไหล 60°33
5.8	ความสัมพันธ์ระหว่งอัตราส่วนเลขน้สเชิลและเลขเรย์โนลด์ สำหรับการตติตั้งปีกรูปรตัววี แบบ 4 แถว ด้านหลังท้อ ทิศทง V-Downstream34
5.9	ความสัมพันธ์ระหว่งอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานและเลขเรย์โนลด์ สำหรับการตติตั้งปีกรูปรตัววี แบบ 4 แถว ด้านหลังท้อ ทิศทง V-Downstream35
5.10	ความสัมพันธ์ระหว่งสมรรถนะเชิงความร้อนและเลขเรย์โนลด์ สำหรับการตติตั้งปีกรูปรตัววี แบบ 4 แถว ด้านหลังท้อ ทิศทง V-Downstream36
5.11	ตัวอย่างแบบจำลองครีบริที่ตติตั้งปีกรูปรตัววี 4 แถว ด้านหลังท้อ ทิศทง V-Upstream37
5.12	เส้นกระแสการไหลบนระนาบตามการไหล ครีบริที่ตติตั้งปีกรูปรตัววี 4 แถว ด้านหลังท้อทิศทง V-Upstream ความสูง 0.9H Re 600 สำหรับ (ก) มูมปะทะการไหล 30°(ข) มูมปะทะการไหล 45° และ (ค) มูมปะทะการไหล 60°38
5.13	เส้นกระแสการไหล 3 มิติ ครีบริที่ตติตั้งปีกรูปรตัววี 4 แถว ด้านหลังท้อ ทิศทง V-Upstream ความสูง 0.9H Re 600 สำหรับ (ก) มูมปะทะการไหล 30° (ข) มูมปะทะการไหล 45° และ (ค) มูมปะทะการไหล 60°39
5.14	การกระจายตัวของอนุหภูมิ ครีบริที่ตติตั้งปีกรูปรตัววี 4 แถว ด้านหลังท้อ ทิศทง V-Upstream ความสูง 0.9H Re 600 สำหรับ (ก) มูมปะทะการไหล 30° (ข) มูมปะทะการไหล 45° และ (ค) มูมปะทะการไหล 60°40

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.15	การกระจายตัวของค่าเลขนัสเชิลบริเวณผิวท่อ ครีบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แถว ด้านหลังท่อ ทิศทาง V-Upstream ความสูง $0.9H$ Re 600 สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30° (ข) มุมปะทะการไหล 45° และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°41
5.16	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเชิลและเลขเรย์โนลด์ สำหรับการติดตั้งปีกรูปตัววี แบบ 4 แถว ด้านหลังท่อ ทิศทาง V-Upstream42
5.17	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานและเลขเรย์โนลด์ สำหรับการติดตั้งปีกรูปตัววี แบบ 4 แถว ด้านหลังท่อ ทิศทาง V-Upstream43
5.18	ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อนและเลขเรย์โนลด์ สำหรับการติดตั้งปีกรูปตัววี แบบ 4 แถว ด้านหลังท่อ ทิศทาง V-Upstream44
5.19	ตัวอย่างแบบจำลองครีบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แถว กึ่งกลางท่อ ทิศทาง V-Downstream45
5.20	เส้นกระแสการไหลบนระนาบตามการไหล ครีบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แถว กึ่งกลางท่อทิศทาง V-Downstream ความสูง $0.9H$ Re 600 สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30° (ข) มุมปะทะการไหล 45° และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°46
5.21	เส้นกระแสการไหล 3 มิติ ครีบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แถว กึ่งกลางท่อ ทิศทาง V-Downstream ความสูง $0.9H$ Re 600 สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30° (ข) มุมปะทะการไหล 45° และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°47
5.22	การกระจายตัวของอุณหภูมิ ครีบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แถว กึ่งกลางท่อ ทิศทาง V-Downstream ความสูง $0.9H$ Re 600 สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30° (ข) มุมปะทะการไหล 45° และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°48
5.23	การกระจายตัวของค่าเลขนัสเชิลบริเวณผิวท่อ ครีบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แถว กึ่งกลางท่อ ทิศทาง V-Downstream ความสูง $0.9H$ Re 600 สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30° (ข) มุมปะทะการไหล 45° และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°49
5.24	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเชิลและเลขเรย์โนลด์ สำหรับการติดตั้งปีกรูปตัววี แบบ 4 แถว กึ่งกลางท่อ ทิศทาง V-Downstream50
5.25	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานและเลขเรย์โนลด์ สำหรับการติดตั้งปีกรูปตัววี แบบ 4 แถว กึ่งกลางท่อ ทิศทาง V-Downstream51
5.26	ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อนและเลขเรย์โนลด์ สำหรับการติดตั้งปีกรูปตัววี แบบ 4 แถว กึ่งกลางท่อ ทิศทาง V-Downstream52
5.27	ตัวอย่างแบบจำลองครีบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แถว กึ่งกลางท่อ ทิศทาง V-Upstream53

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.28 เส้นกระแสการไหลบนระนาบตามการไหล ครีบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แถว กึ่งกลางท่อ ทิศทาง V-Upstream ความสูง 0.9H Re 600 สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30° (ข) มุมปะทะการไหล 45° และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°.....	54
5.29 เส้นกระแสการไหล 3 มิติ ครีบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แถว กึ่งกลางท่อ ทิศทาง V-Upstream ความสูง 0.9H Re 600 สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30° (ข) มุมปะทะการไหล 45° และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°.....	55
5.30 การกระจายตัวของอุณหภูมิ ครีบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แถว กึ่งกลางท่อ ทิศทาง V-Upstream ความสูง 0.9H Re 600 สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30° (ข) มุมปะทะการไหล 45° และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°.....	56
5.31 การกระจายตัวของค่าเลขนัสเซลบริเวณผิวท่อ ครีบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แถว กึ่งกลางท่อ ทิศทาง V-Upstream ความสูง 0.9H Re 600 สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30° (ข) มุมปะทะการไหล 45° และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°.....	57
5.32 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลและเลขเรย์โนลด์ สำหรับการติดตั้งปีกรูปตัววี แบบ 4 แถว กึ่งกลางท่อ ทิศทาง V-Upstream.....	58
5.33 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานและเลขเรย์โนลด์ สำหรับการติดตั้งปีกรูปตัววี แบบ 4 แถว กึ่งกลางท่อ ทิศทาง V-Upstream.....	59
5.34 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อนและเลขเรย์โนลด์ สำหรับการติดตั้งปีกรูปตัววี แบบ 4 แถว กึ่งกลางท่อ ทิศทาง V-Upstream.....	60
5.35 ตัวอย่างแบบจำลองครีบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี 8 แถว ทิศทาง V-Downstream.....	61
5.36 เส้นกระแสการไหลบนระนาบตามการไหล ครีบที่มีการติดตั้งปีกรูปตัววี 8 แถว ทิศทาง V-Downstream ความสูง 0.9H Re 600 สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30° (ข) มุมปะทะการไหล 45° และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°.....	62
5.37 เส้นกระแสการไหล 3 มิติ ครีบที่มีการติดตั้งปีกรูปตัววี 8 แถว ทิศทาง V-Downstream ความสูง 0.9H Re 600 สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30° (ข) มุมปะทะการไหล 45° และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°.....	63
5.38 การกระจายตัวของอุณหภูมิ ครีบที่มีการติดตั้งปีกรูปตัววี 8 แถว ทิศทาง V-Downstream ความสูง 0.9H Re 600 สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30° (ข) มุมปะทะการไหล 45° และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°.....	64

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.39	การกระจายตัวของค่าเลขน้สเชิลบริเวณผิวท่อ ครีบที่มีการติดตั้งปีกรูปตัววี 8 แถว ทิศทาง V-Downstream ความสูง 0.9H Re 600 สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30° (ข) มุมปะทะการไหล 45° และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°.....65
5.40	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขน้สเชิลและเลขเรย์โนลด์ สำหรับการติดตั้งปีกรูปตัววี แบบ 8 แถว ทิศทาง V-Downstream.....66
5.41	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานและเลขเรย์โนลด์ สำหรับการติดตั้งปีกรูปตัววี แบบ 8 แถว ทิศทาง V-Downstream.....67
5.42	ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อนและเลขเรย์โนลด์ สำหรับการติดตั้งปีกรูปตัววี แบบ 8 แถว ทิศทาง V-Downstream.....68
5.43	ตัวอย่างแบบจำลองครีบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี 8 แถว ทิศทาง V-Upstream.....69
5.44	เส้นกระแสการไหลบนระนาบตามการไหล ครีบที่มีการติดตั้งปีกรูปตัววี 8 แถว ทิศทาง V-Upstream ความสูง 0.9H Re 600 สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30° (ข) มุมปะทะการไหล 45° และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°.....70
5.45	เส้นกระแสการไหล 3 มิติ ครีบที่มีการติดตั้งปีกรูปตัววี 8 แถว ทิศทาง V-Upstream ความสูง 0.9H Re 600 สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30° (ข) มุมปะทะการไหล 45° และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°.....71
5.46	การกระจายตัวของอุณหภูมิ ครีบที่มีการติดตั้งปีกรูปตัววี 8 แถว ทิศทาง V-Upstream ความสูง 0.9H Re 600 สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30° (ข) มุมปะทะการไหล 45° และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°.....72
5.47	การกระจายตัวของค่าเลขน้สเชิลบริเวณผิวท่อ ครีบที่มีการติดตั้งปีกรูปตัววี 8 แถว ทิศทาง V-Upstream ความสูง 0.9H Re 600 สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30° (ข) มุมปะทะการไหล 45° และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°.....73
5.48	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขน้สเชิลและเลขเรย์โนลด์ สำหรับการติดตั้งปีกรูปตัววี แบบ 8 แถว ทิศทาง V-Upstream.....74
5.49	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานและเลขเรย์โนลด์ สำหรับการติดตั้งปีกรูปตัววี แบบ 8 แถว ทิศทาง V-Upstream.....75
5.50	ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อนและเลขเรย์โนลด์ สำหรับการติดตั้งปีกรูปตัววี แบบ 8 แถว ทิศทาง V-Upstream.....76

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.51 ตัวอย่างแบบจำลองทางกายภาพของการติดตั้งปีกรูปตัววี มุมปะทะการไหล 45° ความสูง 0.9H ติดตั้งแบบ 4 แถวเจาะรู (ก) เจาะ 1 รู (ข) เจาะ 2 รู.....	77
5.52 เส้นกระแสการไหลบนระนาบตามการไหล ครีบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แถว ทิศทาง V-Downstream มุมปะทะการไหล 45° ความสูง 0.9H สำหรับ (ก) ไม่เจาะรู (ข) เจาะ 1 รู และ (ค) เจาะ 2 รู.....	78
5.53 เส้นกระแสการไหล 3 มิติ ครีบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แถว ทิศทาง V-Downstream มุมปะทะการไหล 45° ความสูง 0.9H สำหรับ (ก) ไม่เจาะรู (ข) เจาะ 1 รู และ (ค) เจาะ 2 รู.....	79
5.54 การกระจายตัวของอุณหภูมิครีบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แถว ทิศทาง V-Downstream มุมปะทะการไหล 45° ความสูง 0.9H สำหรับ (ก) ไม่เจาะรู (ข) เจาะ 1 รู และ (ค) เจาะ 2 รู.....	80
5.55 การกระจายตัวของค่าเลขนัสเซลบริเวณผิวท่อ ครีบที่มีการติดตั้งรูปตัววี 4 แถว ทิศทาง V-Downstream มุมปะทะการไหล 45° ความสูง 0.9H สำหรับ (ก) ไม่เจาะรู (ข) เจาะ 1 รู และ (ค) เจาะ 2 รู.....	82
5.56 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลและเลขเรย์โนลด์ ครีบที่มีการติดตั้งรูปตัววี 4 แถว แบบเจาะรู.....	83
5.57 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานและเลขเรย์โนลด์ ครีบที่มีการติดตั้งรูปตัววี 4 แถว แบบเจาะรู.....	84
5.58 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อนและเลขเรย์โนลด์ ครีบที่มีการติดตั้งรูปตัววี 4 แถว แบบเจาะรู.....	85
5.59 ตัวอย่างแบบจำลองครีบที่ติดตั้งปีกแบบหยัก 4 แถว ทิศทาง Downstream.....	86
5.60 เส้นกระแสการไหลบนระนาบตามการไหล ครีบที่มีการติดตั้งปีกแบบหยัก ทิศทาง Downstream สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30° (ข) มุมปะทะการไหล 45° และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°.....	87
5.61 เส้นกระแสการไหล 3 มิติ ครีบที่มีการติดตั้งปีกแบบหยัก 4 แถว ทิศทาง Downstream สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30° (ข) มุมปะทะการไหล 45° และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°.....	88
5.62 การกระจายตัวของอุณหภูมิ ครีบที่มีการติดตั้งปีกแบบหยัก 4 แถว ทิศทาง Downstream สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30°(ข) มุมปะทะการไหล 45° และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°.....	89

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.63 การกระจายตัวของค่าเลขน้สเซลบริเวณผิวท่อ ครีบบ่ที่มีการติดตั้งปีแบบหยัก 4 แถว ทิศทาง Downstream สําหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30° (ข) มุมปะทะการไหล 45° และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°	90
5.64 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขน้สเซลและเลขเรย์โนลด์ สําหรับครีบบ่ที่ติดตั้งปีแบบหยัก 4 แถว ทิศทาง Downstream	91
5.65 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานและเลขเรย์โนลด์ สําหรับครีบบ่ที่ติดตั้งปีแบบหยัก 4 แถว ทิศทาง Downstream	92
5.66 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อนและเลขเรย์โนลด์ สําหรับครีบบ่ที่ติดตั้งปีแบบหยัก 4 แถว ทิศทาง Downstream	93
5.67 ตัวอย่างแบบจำลองครีบบ่ที่ติดตั้งปีแบบหยัก 4 แถว ทิศทาง Upstream	94
5.68 เส้นกระแสการไหลบนระนาบตามการไหล ครีบบ่ที่มีการติดตั้งปีแบบหยัก ทิศทาง Upstream สําหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30° (ข) มุมปะทะการไหล 45° และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°	95
5.69 เส้นกระแสการไหล 3 มิติ ครีบบ่ที่มีการติดตั้งปีแบบหยัก 4 แถว ทิศทาง Upstream สําหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30° (ข) มุมปะทะการไหล 45° และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°	96
5.70 การกระจายตัวของอุณหภูมิ ครีบบ่ที่มีการติดตั้งปีแบบหยัก 4 แถว ทิศทาง Upstream สําหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30°(ข) มุมปะทะการไหล 45° และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°	97
5.71 การกระจายตัวของค่าเลขน้สเซลบริเวณผิวท่อ ครีบบ่ที่มีการติดตั้งปีแบบหยัก 4 แถว ทิศทาง Upstream สําหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30° (ข) มุมปะทะการไหล 45° และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°	98
5.72 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขน้สเซลและเลขเรย์โนลด์ สําหรับครีบบ่ที่ติดตั้งปีแบบหยัก 4 แถว ทิศทาง Upstream	99
5.73 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานและเลขเรย์โนลด์ สําหรับครีบบ่ที่ติดตั้งปีแบบหยัก 4 แถว ทิศทาง Upstream	100
5.74 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อนและเลขเรย์โนลด์ สําหรับครีบบ่ที่ติดตั้งปีแบบหยัก 4 แถว ทิศทาง Upstream	101

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.75 ตัวอย่างแบบจำลองครีบบีบที่ติดตั้งปีกแบบหยัก 4 แถว เจาะรู.....	102
5.76 เส้นกระแสการไหลบนระนาบตามการไหล ครีบบีบที่ติดตั้งปีกแบบหยัก 4 แถว เจาะรู ความสูง 0.9H Re 600 สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30° (ข) มุมปะทะการไหล 45° และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°.....	103
5.77 เส้นกระแสการไหล 3 มิติ ครีบบีบที่ติดตั้งปีกแบบหยัก 4 แถว เจาะรู ความสูง 0.9H Re 600 สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30° (ข) มุมปะทะการไหล 45° และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°.....	104
5.78 การกระจายตัวของอุณหภูมิ ครีบบีบที่ติดตั้งปีกแบบหยัก 4 แถว เจาะรู ความสูง 0.9H Re 600 สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30° (ข) มุมปะทะการไหล 45° และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°.....	105
5.79 การกระจายตัวของค่าเลขนัสเซลล์บริเวณผิวท่อ ครีบบีบที่ติดตั้งปีกแบบหยัก 4 แถว เจาะรู ความสูง 0.9H Re 600 สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30° (ข) มุมปะทะการไหล 45° และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°.....	106
5.80 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลล์และเลขเรย์โนลด์ สำหรับการติดตั้งปีกแบบหยัก 4 แถว เจาะรู.....	107
5.81 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานและเลขเรย์โนลด์ สำหรับการติดตั้งปีกแบบหยัก 4 แถว เจาะรู.....	108
5.82 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อนและเลขเรย์โนลด์ สำหรับการติดตั้งปีกแบบหยัก 4 แถว เจาะรู.....	109

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

A_c	พื้นที่ผิวน้อยที่สุดของการแลกเปลี่ยนความร้อน m^2
A_s	พื้นที่ผิวทั้งหมด, m^2
BR	อัตราส่วนการบล็อกการไหล
C	ค่าความจุความร้อนจำเพาะ, $J/kg \cdot K$
C_p	ค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่, $J/kg \cdot K$
D_h	เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกส์, m
E	พลังงาน, W
f	ตัวประกอบเสียดทาน
f_o	ตัวประกอบเสียดทานของครีบริบาย
k	ค่าการนำความร้อน, $W/m \cdot K$
L	ความยาวของครีบริบาย, m
\dot{m}	อัตราการไหลเชิงมวล, kg/s
Nu	เลขนัสเซิล
Nu_o	เลขนัสเซิลของครีบริบาย
PR	อัตราส่วนระยะพิตต์
Pr	เลขพรานด์เทิล
p	ความดัน, N/m^2
q	อัตราการถ่ายเทความร้อน, W
R	ค่าคงที่ของแก๊ส, $J/kg \cdot K$
Re	เลขเรย์โนลด์
T	อุณหภูมิ, K
T_m	อุณหภูมิเฉลี่ย, K
T_s	อุณหภูมิผิว, K
t	เวลา, s
\mathbf{u}	เวกเตอร์ความเร็ว, m/s
u	ความเร็วในแนวแกน x , m/s
u_m	ความเร็วเฉลี่ย, m/s
v	ความเร็วในแนวแกน y , m/s ; ปริมาตรจำเพาะ, m^3/kg
w	ความเร็วในแนวแกน z , m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และเผยแพร่อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์กรีก

α	มุมปะทะของปีกที่ติดตั้ง degree
ϕ	ค่าคุณสมบัติใดๆ ต่อ หน่วยมวล
TEF	สมรรถนะเชิงความร้อน
μ	ความหนืดสัมบูรณ์, $N \cdot s / m^2$
Γ	การแพร่ทางความร้อน
ρ	ความหนาแน่น, kg / m^3
τ	ความเค้นเฉือนเนื่องจากความหนืด, N / m^2



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากวิกฤตการณ์พลังงาน ทำให้ความสำคัญของการอนุรักษ์พลังงานในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้รับความสนใจมากขึ้น ทำให้การพัฒนาและออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีสมรรถนะเชิงความร้อนที่สูง ค่าใช้จ่ายในการผลิตที่ต่ำ และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมลดลงมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบบและท่อ (fin-tube heat exchanger) ถูกใช้อย่างแพร่หลาย เช่น โรงไฟฟ้า, อุตสาหกรรมการอบแห้ง หรืออุตสาหกรรมยานยนต์ เป็นต้น การเพิ่มประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นสิ่งจำเป็นที่ทำให้สมรรถนะเชิงความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสูงขึ้น โดยพื้นที่การแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบบและท่อ ส่วนใหญ่อยู่บนผิวครีบบ หากสามารถสร้างความปั่นป่วนให้กับอากาศที่ไหลผ่านครีบบท่อได้ จะส่งผลให้การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศและผิวครีบบเพิ่มขึ้น

โดยทั่วไปเทคนิคการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนได้แบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ 1) active techniques คือการนำเอาแหล่งพลังงานภายนอกเข้ามาช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อน เช่น อุปกรณ์ทางกล หรืออุปกรณ์ทางไฟฟ้า ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดการสั่นสะเทือนของพื้นผิว ส่งผลให้ของไหลเกิดการสั่นสะเทือนจะสามารถช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ดีขึ้น และ 2) passive techniques คือการออกแบบลักษณะพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนให้ต่างไปจากผิวเรียบ รวมทั้งการปรับปรุงของไหลหรือสารทำงาน เพื่อให้เพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ดีขึ้นโดยไม่อาศัยพลังงานภายนอกเข้ามาเกี่ยวข้อง วิธีการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่ได้รับความนิยมส่วนมาก คือ passive techniques โดยการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการสร้างการปั่นป่วนเพิ่มเข้าไป อาทิเช่น การติดตั้งแผ่นกั้น หรือลักษณะครีบบ หรือปีก รูปทรงต่าง ๆ เป็นต้น โดยใช้หลักการเพิ่มความเร็วของของไหล ทำให้ความเร็วของไหลสัมผัสผิวในบริเวณใกล้กับผนังท่อมีค่าเพิ่มสูงขึ้นทำให้การถ่ายเทความร้อนดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการที่มีวัตถุไปขวางทางการไหลให้เกิดความปั่นป่วนเพิ่มขึ้น จะเป็นผลให้ค่าการสูญเสียความดันที่เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน

วิธีการแบบ passive techniques ยังต้องคำนึงถึงขีดจำกัดในการทดลองของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง, ค่าตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาซึ่งจำเป็นต้องคำนึงถึงหลายส่วนด้วย ดังนั้นจึงได้นำวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขมาใช้ในการศึกษาซึ่งวิธีนี้จะช่วยลดปัญหาที่เกิดจากการศึกษาด้วยวิธีการทดลอง จากชุดอุปกรณ์จริงไม่ว่าจะเป็นระยะเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์, ค่าอุปกรณ์, วัสดุที่ค่อนข้างมาก เมื่อมีตัวแปรที่ต้องการศึกษาหลายตัวรวมทั้งข้อจำกัดของอุปกรณ์การทดลอง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ มุ่งศึกษาพฤติกรรมการไหลและตัวแปรต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าการถ่ายเทความร้อนภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนประเภทครีบและท่อ (fin and tube) ที่มีการติดตั้งปีกรูปตัววีและปีกแบบหยัก ในลักษณะต่าง ๆ โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยโปรแกรมเชิงพาณิชย์ สำหรับจำลองและวิเคราะห์การไหลและการถ่ายเทความร้อน ซึ่งจะช่วยให้เข้าใจถึงกลไกของการไหลและพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น อีกทั้งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนประเภทอื่น ๆ ได้ อย่างเหมาะสมอีกด้วย ซึ่งงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ ประกอบด้วย

1.2.1 เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมการไหล พฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อน และการสูญเสียความดันของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบและท่อที่มีการติดตั้งปีกรูปตัววีและปีกแบบหยักโดยใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

1.2.2 เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของรูปแบบของปีกรูปตัววีและปีกแบบหยัก ลักษณะของการติดตั้ง ที่มีผลต่อพฤติกรรมการไหล พฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อน และการสูญเสียความดัน

1.2.3 เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน การสูญเสียความดัน และค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบและท่อที่มีการติดตั้งปีกรูปตัววีและปีกแบบหยัก

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ใช้วิธีการแก้ปัญหาพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณด้วยระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่อง (finite volume method)

1.3.2 รูปแบบการจำลองการไหลแบบ 3 มิติ ที่มีการไหลแบบราบเรียบ พิจารณาช่วงเลขเรย์โนลด์ 200 ถึง 1,000 ใช้ของไหลเป็นอากาศสำหรับแบบจำลอง

1.3.3 ใช้แผนผังแบบ SIMPLE (Semi-implicit method for pressure-linked equations) ในการลู่อู่เข้าหาคำตอบ

1.3.4 กำหนดผิวครีبد้านบน และล่าง รวมถึงผนังท่อ มีอุณหภูมิผิวคงที่เท่ากับ 350 K

1.3.5 ปีกรูปตัววีและปีกแบบหยักที่ใช้ในการทดสอบ ไม่สามารถนำความร้อนได้ ติดตั้งบริเวณด้านล่างของครีบ ศึกษาอิทธิพลของปีกรูปตัววี และปีกแบบหยัก ที่ติดตั้ง โดยมีมุมปะทะการไหลเท่ากับ 30° , 45° และ 60° ลักษณะของการติดตั้งปีกวางปีกตามกระแสการไหล (V-downstream) และทวนกระแสการไหล (V-upstream)

1.3.6 หาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่สำคัญในการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.4.1 ศึกษา รวบรวมข้อมูล ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนของการติดตั้งครีบบรูปแบบต่าง ๆ

1.4.2 กำหนดสมมติฐาน ลักษณะของปีก ตำแหน่งการติดตั้งของปีก สร้างแบบจำลอง รวมทั้งเลือกจำนวนและขนาดของกริดให้เหมาะสม

1.4.3 ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่สร้างขึ้นกับผลการทดลองที่เกิดขึ้นจริงจากงานวิจัยที่ผ่านมา เพื่อยืนยันความถูกต้อง

1.4.4 คำนวณเชิงตัวเลขจากแบบจำลองการไหล 3 มิติ โดยเปลี่ยนแปลง ค่าตัวแปรต่าง ๆ

1.4.5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะเพิ่มเติม สำหรับการทำให้วิจัยต่อไปในอนาคต

1.5 ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย

1.5.1 เพื่อให้ทราบถึงอิทธิพลของค่าตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อค่าสมรรถนะเชิงความร้อน

1.5.2 เพื่อการพัฒนาและการออกแบบการติดตั้งปีกรูปตัววี และปีกแบบหยัก ให้เกิดประสิทธิภาพ

1.5.3 เพื่อพัฒนาองค์ความรู้ และเป็นแนวทางสำหรับการวิจัยด้านการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบบและท่อต่อไป

1.5.4 ประหยัดพลังงานและลดการใช้วัสดุในการสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

1.6 คำโครงวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ประกอบด้วย 6 บท ได้แก่ บทที่ 1 กล่าวถึงที่มา ความสำคัญ วัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัย บทที่ 2 กล่าวถึงวรรณกรรมปริทรรศน์ ที่นำเสนอถึงผลงานวิจัยที่ได้ศึกษาและเผยแพร่มาแล้วเกี่ยวกับการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ด้วยวิธีการติดตั้งปีกแบบต่าง ๆ บทที่ 3 กล่าวถึง ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อน และการคำนวณเชิงตัวเลข บทที่ 4 กล่าวถึงการกำหนดปัญหาและการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง บทที่ 5 กล่าวถึง การวิเคราะห์พฤติกรรมของการไหล พฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อน รวมถึงการสูญเสียความดันที่เกิดขึ้นในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ติดตั้งปีกลักษณะต่าง ๆ และในบทที่ 6 กล่าวถึงการสรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ โดยจะกล่าวถึงอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่ได้ศึกษาเพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับงานทางด้านอุตสาหกรรมหรืองานวิจัยอื่น ๆ ต่อไป

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทรรศน์

บทนี้กล่าวถึง งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการไหลและการถ่ายเทความร้อน โดยการปรับปรุงพื้นผิวในลักษณะต่าง ๆ เพื่อช่วยเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน ซึ่งจากผลงานของนักวิจัยที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาทั้งการทดลอง การคำนวณเชิงตัวเลข หรือการใช้ทั้งสองวิธีวิเคราะห์ร่วมกัน โดยเนื้อหาจะเน้นถึงงานวิจัยที่ได้ศึกษามาแล้วและงานวิจัยที่เกี่ยวกับพฤติกรรมของการไหล การถ่ายเทความร้อน และการสูญเสียความดันของการไหลผ่านแผ่นกั้นและการไหลผ่านครีบบรูปแบบต่าง ๆ เพื่อเป็นแนวทางในการวิเคราะห์และพัฒนาต่อไป

2.1 งานวิจัยเรื่องการติดตั้งแผ่นกั้นในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน

Lopez et al. (1996) ศึกษาพฤติกรรมของการไหลและพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่ติดตั้งแผ่นกั้น พิจารณาในช่วงการไหลแบบราบเรียบ พบว่าค่าความดันตกคร่อมจะเพิ่มขึ้นเมื่อเลขเรย์โนลด์และความสูงของแผ่นกั้นเพิ่มขึ้น

Yang and Hwang (2003) ศึกษาการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดัน จากอิทธิพลของความสูงของแผ่นกั้นทั้งแบบทึบและเจาะรู ในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนสี่เหลี่ยมผืนผ้า พบว่าแผ่นกั้นที่มีความสูงมากขึ้นจะทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันมีค่าเพิ่มมากขึ้น

Sripattanapipat and Promvong (2009) ศึกษาเปรียบเทียบค่าการถ่ายเทความร้อนและความดันตกคร่อมของการติดตั้งแผ่นกั้นแบบปกติกับรูสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน พบว่าแผ่นกั้นแบบขนมเปียกปูน ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและความดันตกคร่อมมากกว่าแผ่นกั้นแบบปกติ โดยช่วงมุมปะทะการไหลที่เหมาะสมคือ 5° - 10°

Jedsadaratanachai et al. (2011) ศึกษาการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนที่มีการไหลแบบราบเรียบโดยการติดตั้งแผ่นกั้นมุมปะทะการไหล 30° บริเวณด้านบนและล่างของท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีอัตราส่วนความสูงแผ่นกั้นเท่ากับ 0.2 และเปลี่ยนอัตราส่วนระยะห่างของแผ่นกั้น (PR) ระหว่าง 0.5-2.5 พบว่าที่ PR = 2.5 ให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงที่สุดและที่ PR = 0.5 ให้ค่าต่ำที่สุด

Bensaci et al. (2015) ศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งการแผ่นกั้นที่ติดตั้งลงบนเครื่องอุ่นอากาศด้วย แสงอาทิตย์ โดยสามารถแบ่งออกเป็น 4 กรณี ได้แก่ 1. ติดแผ่นกั้นในพื้นที่ครึ่งหลังของช่องทางการไหล 2. ติดแผ่นกั้นในพื้นที่ครึ่งแรกของช่องทางการไหล 3. ติดแผ่นกั้นในส่วนพื้นที่ตรงกลางของช่องทางการไหล และ 4. ติดแผ่นกั้นตลอดพื้นที่ช่องทางการไหล ผลการทดลองพบว่า ทุกกรณีมีค่าสมรรถนะการเพิ่มการ ถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น กรณีศึกษาที่ 4 มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fawaz et al. (2017) วิเคราะห์เชิงตัวเลขของการเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนในท่อแลกเปลี่ยน ความร้อนสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นรูปตัววีแบบปลายวีชี้ทวนกระแสนการไหล ทำมุม 45° กับการ ไหลโดยศึกษาตัวแปรความสูงและระยะห่างของแผ่นกั้น พบว่าสมรรถนะการเพิ่ม การถ่ายเทความร้อน เพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของแผ่นกั้นและระยะห่างของแผ่นกั้นลดลง

Promvong and Skullong (2020) ทำการทดลองติดตั้งแผ่นกั้นรูปตัววีทั้งทิศปลายวีชี้ ทวนการ ไหลและปลายวีชี้ตามการไหลในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดท่อกลมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ เชิงความร้อน ตัวแปรที่ศึกษาคือความสูงของแผ่นกั้นและระยะห่างของแผ่นกั้น จากการทดลองพบว่ การวางแผ่นกั้น ทิศทางปลายวีชี้ตามกระแสนการไหลให้ผลที่ดีกว่าแบบปลายวีชี้ทวนกระแสนการไหล ประมาณ 6% ให้ สมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดที่อัตราส่วนความสูงแผ่นกั้นเท่ากับ 0.15 และ อัตราส่วน ระยะห่างแผ่นกั้นเท่ากับ 1.0

2.2 งานวิจัยเรื่องเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดครีบและท่อ

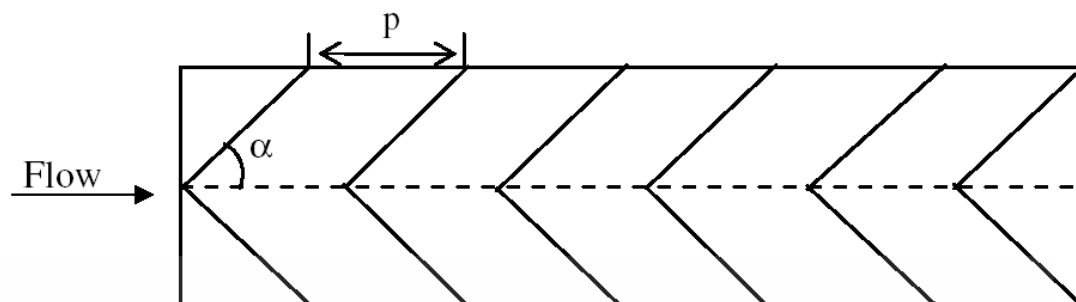
Han et al. (1991) ศึกษาการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อมในท่อสี่เหลี่ยม จตุรัสที่มีการเพิ่มครีบวางตรง, ครีบวางเอียงและครีบตัววี โดยศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 15,000 ถึง 90,000 พบว่าค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่สูงที่สุดจะได้จากกรณีการเพิ่มครีบตัววีที่มีการไหล แบบชี้ ทวนกระแสนการไหล

Olsson and Sunden (1997) ศึกษาการไหลในท่อที่มีการติดตั้งครีบลักษณะ ต่าง ๆ ด้วย เทคนิค smoke-wire visualization ร่วมกับ laser doppler anemometry ได้ศึกษาลักษณะของ ครีบที่แตกต่างกัน ประกอบด้วย ครีบจัดเรียงแบบขนาน, ครีบจัดเรียงแบบเอียง, ครีบรูปตัววีจัดเรียง แบบขนาน, ครีบรูปตัววีจัดเรียงแบบเอียง และครีบรูปตัววีแบบผสม พิจารณาเลขเรย์โนลด์ในช่วง ไม่เกิน 2,000 พบว่า เกิดการไหลหมุนวนในทิศทางที่สอง (secondary flow) เกิดขึ้น โดยผล การศึกษาพบว่าท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสจะให้ค่าที่เสถียรมากกว่าการเกิดในท่อขนานหรือท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้า

Olsson and Sunden (1997) นำเสนอค่า แฟกเตอร์ j และ f ในท่อที่มีการติดตั้งครีบ ที่มี ความสูง, ระยะพิตต์และมุมปะทะการไหลเดียวกัน ศึกษาเฉพาะรูปร่างของครีบที่มีความแตกต่างกัน พบว่าเกิดการไหลแบบหมุนวนในท่อซึ่งทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของค่าการถ่ายเทความร้อน แสดงในรูป ของแฟกเตอร์ j จึงสามารถสรุปได้ว่าสการไหลแบบหมุนวนในท่อ จะให้สมรรถนะเชิงความร้อนที่เพิ่ม มากขึ้นที่ค่าเลขเรย์โนลด์น้อยกว่า 2,000 ส่วนค่าความดันตกคร่อมที่เพิ่มมากขึ้น อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ในช่วงค่าเลขเรย์โนลด์สูง ๆ

Momin et al. (2002) ศึกษาและทดลองติดตั้งครีบรูปตัววี ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน และลักษณะของการไหลในท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับเครื่องอุ้นอากาศด้วยแสงอาทิตย์ พิจารณาในช่วงค่าเลขเรย์โนลด์ ตั้งแต่ 2500 - 18,000 ค่า e/D ช่วง 0.02 - 0.03 ค่า $p/e=10$ และ มุมปะทะ $30^\circ - 90^\circ$ จากผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนตัวเลขนัสเซลและตัวประกอบความเสียดทาน

สูงสุดเพิ่มขึ้นในช่วง 2.3 - 2.83 เท่าเมื่อเทียบกับท่อผิวเรียบ และมีค่ามากที่สุดเกิดขึ้นที่มุมปะทะการไหล 60° ซึ่งได้สรุปว่าครีบริบรูปตัววีให้ค่าสมรรถนะทางความร้อนสูงกว่าครีบริบเอียง



รูปที่ 2.1 ครีบริบรูปตัววีที่ใช้ในงานของ Momin et al. (2002)

Lee and Rhee (2009) ศึกษาด้วยการทดลองเกี่ยวกับรูปแบบการไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมที่มีครีบริบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสรูปตัววีติดตั้งที่ผิวทำมุมปะทะ 60° แบบครีบริบเดี่ยวต่อเนื่อง และครีบริบรูปตัววี มีมุมปะทะการไหล 45° หลายครีบริบวางสลับแถวกัน มีเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (D) คือ 75, 50, 38.4 ค่า e/D คือ 0.04, 0.06, 0.078 และค่า p/e คือ 10 โดยใช้ naphthalene sublimation สำหรับวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและแสดงในรูปแบบของเส้นชั้น ผลการทดลองพบว่า ครีบริบรูปตัววีทำมุม 60° แบบครีบริบเดี่ยวต่อเนื่อง ให้การถ่ายเทความร้อนมากกว่าครีบริบรูปตัววีทำมุม 45° แบบหลายครีบริบวางสลับแถว และการใช้กำลังงานของปั๊มสำหรับการไหลผ่านครีบริบรูปตัววีมุม 45° แบบหลายครีบริบวางสลับแถวจะใช้น้อยกว่าครีบริบรูปตัววีมุม 60° แบบครีบริบเดี่ยวต่อเนื่อง

Bilirgen et al. (2013) ศึกษาผลของความยาวครีบริบ, ระยะห่างของครีบริบ, ความหนาของครีบริบ และ ชนิดวัสดุของครีบริบที่เป็นรูวงแหวนที่มีผลต่อผลการเปลี่ยนแปลงต่อค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อม พิจารณาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 10,000-45,000 จากผลการศึกษาพบว่าค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อมเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวครีบริบมากขึ้นและระยะห่างครีบริบน้อยลง ส่วนของความหนาและชนิดของครีบริบไม่ได้มีผล ต่อค่าทั้งสองมากนัก

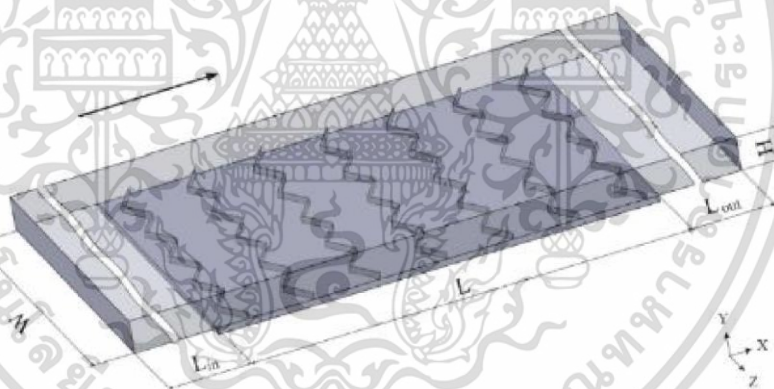
He et al. (2013) ศึกษาและวิเคราะห์ค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ติดตั้งปีกคู่รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าในช่วงเลขเรย์โนลด์ 550-880 ศึกษาอิทธิพลของมุม ปะทะการไหล (10° , 20° และ 30°), จำนวนของปีกที่ติดตั้ง (1, 3 และ 7 ชั้น) และตำแหน่งการวางของปีก (แบบตรงและเอียง) พบว่าที่มุมปะทะ 10° การติดตั้งปีกจำนวน 1 หรือ 3 ชั้น และวางแบบเอียงให้ค่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนดีที่สุด

Sinha et al. (2016) ศึกษาพฤติกรรมการไหลและประสิทธิภาพเชิงความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดครีบริบและท่อที่มีการจัดเรียงท่อทั้งแบบจัดวางท่อตรงและท่อเอียงกัน ติดตั้งปีกความสูงครึ่งหนึ่งของช่อง ท่อการไหลโดยมีมุมปะทะการไหลที่ต่างกัน ผลจากการศึกษาพบว่า การเอียงท่อเป็นเอียงสำหรับท่อสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วางท่อแบบเอียงทำให้ของไหลมีการผสมกันที่ดีกว่าแบบการวางท่อตรงกัน และที่มุมปะทะน้อยกว่าให้ค่าประสิทธิภาพที่ดีกว่า

Zeeshan et al. (2018) ศึกษาวิเคราะห์เชิงตัวเลขของค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าความดัน ตกคร่อมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดครีบและท่อ ในช่วงเลขเรย์โนลด์ 500-900 ติดตั้งปีกสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีตัวแปรที่ศึกษาคือมุมปะทะการไหลและตำแหน่งการวางปีก พบว่ามุมปะทะ 5° และ 15° ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนน้อยกว่ามุม 25° แต่ค่าความดันตกคร่อมก็น้อยกว่าเช่นกันทำให้มี ประสิทธิภาพมากกว่ามุม 25° ในส่วนของตำแหน่งการติดตั้ง พบว่าการวางปีกไว้หลังท่อให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าวางไว้ข้างท่อ

Li et al. (2018) ทำการทดลองเพื่อหาจุดที่เหมาะสมและสมการของพารามิเตอร์ ของการไหล แบบปั่นป่วนในท่อสี่เหลี่ยมที่ติดตั้งด้วยแผ่นกั้นตัววีหลายรูปแบบ และการตรวจสอบความแม่นยำ ของโมเดลความปั่นป่วนแบบ โดยนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองจริงของ Promvongse ซึ่งเห็นว่าโมเดลความปั่นป่วนแบบ Standard $k - \epsilon$ ให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงมากที่สุด จึงนำมาใช้กับ การศึกษาครั้งนี้ ผู้ศึกษาได้เปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของแผ่นกั้นแบบตัววีดังนี้ 1. มุมของแผ่นกั้นตัว วีที่กระทำ ต่อการไหลเท่ากับ $45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ 2. ค่า BR ตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.3 และ 3. ค่า PR = 2, 3, 4



รูปที่ 2.2 การทดลองของ Li et al. (2018)

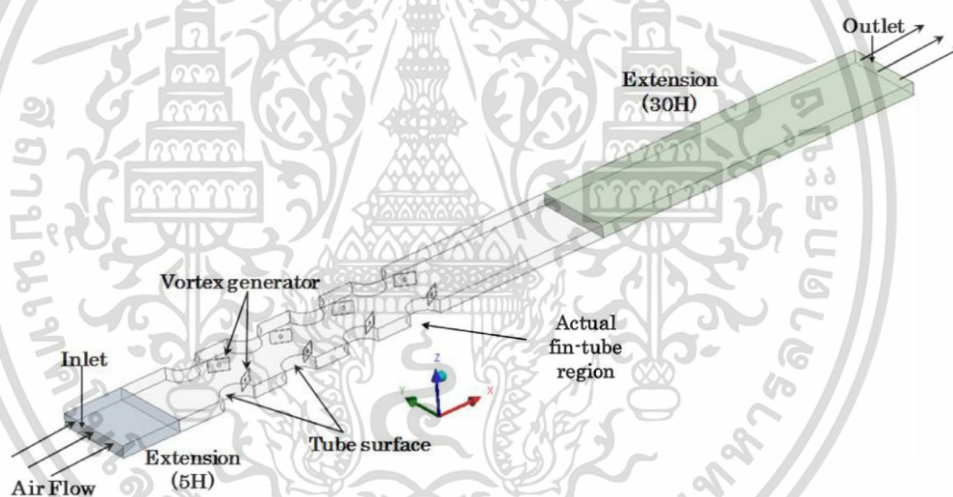
Hosseini et al. (2020) ทดลองและวิเคราะห์เชิงตัวเลขค่าการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบความเสียดทานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดครีบและท่อวงรี ในช่วงเลขเรย์โนลด์ 8,500- 60,000 ศึกษาอิทธิพลของความยาวครีบ, ระยะห่างของครีบ รวมทั้งอัตราส่วนรัศมีแกนเอกต่อแกนโท ของท่อวงรี (อัตราส่วนขนาดท่อ) ผลที่ได้พบว่าที่เลขเรย์โนลด์ต่ำ ระยะห่างของครีบที่ 1 มิลลิเมตร เหมาะสมที่สุดสำหรับทุกความยาวครีบและอัตราส่วนขนาดท่อ ที่เลขเรย์โนลด์ปานกลาง ($Re=20,000$) ระยะห่างของครีบเท่ากับ 3 หรือ 4 มิลลิเมตรเหมาะสำหรับอัตราส่วนขนาดท่อน้อย ๆ แต่สำหรับ อัตราส่วนขนาดท่อที่มาก ระยะห่างของครีบ 1 มิลลิเมตรจะเหมาะสมกว่า และสุดท้ายที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลขเรย์โนลด์สูง แนะนำระยะห่างของครีบเท่ากับ 3 หรือ 4 มิลลิเมตร สำหรับทุกอัตราส่วนขนาดท่อและความยาวครีบ

Gupta et al. (2020) ศึกษาเปรียบเทียบวิธีเชิงตัวเลขและพัฒนาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดครีบและท่อ ด้วยการติดตั้งปีกรูปสี่เหลี่ยมที่ถูกบีบขึ้นรูปบนผิวครีบ ศึกษาในช่วงการไหลที่มีเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 1,500 – 9,000 มุมปะทะการไหล เท่ากับ 45° จากผลการศึกษาพบว่า การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นร้อยละ 34 สำหรับกรณีติดตั้งปีกรูปสี่เหลี่ยมที่ถูกบีบขึ้นรูปบนผิวครีบและถูกเจาะรูด้วย

Modi et al. (2020) ศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดครีบและท่อ โดยใช้ปีกรูปสี่เหลี่ยมที่เจาะรูวงกลม พิจารณาช่วงเลขเรย์โนลด์ 400 – 2,000 เจาะรูวงกลมขนาด 1 mm เพิ่ม 1, 2, 4 และ 6 พบว่าปีกรูปสี่เหลี่ยมที่เจาะรูวงกลม ช่วยสมรรถนะเชิงความร้อนได้ โดยปีกที่เจาะรูวงกลม 6 รู จะให้ประสิทธิภาพดีกว่ากรณีอื่น ๆ ค่าสมรรถนะเชิงความร้อน ของปีกเจาะ 6 รู จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 45.95 และ 57.37 ที่ค่าเรย์โนลด์ 400 และ 2,000 และค่าตัวประกอบความเสียดทานจะลดลง ประมาณร้อยละ 13.81



รูปที่ 2.3 โมเดลที่ใช้ศึกษาการติดตั้งปีกแบบเจาะรูของ Modi et al. (2020)

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้น แสดงให้เห็นแล้วว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการถ่ายเทความร้อนและสมรรถนะเชิงความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นมีด้วยกันหลากหลายปัจจัย ผู้วิจัยจึงได้กำหนดแนวทางการศึกษา คือผลของรูปร่างปีกที่ติดตั้ง และจำนวนรูเจาะบนปีก ที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนและสมรรถนะเชิงความร้อน ในช่วงตัวเลขเรย์โนลด์ 200 – 1,000 โดยศึกษาถึงพฤติกรรมการไหล พฤติกรรมถ่ายเทความร้อน และค่าความดันตกคร่อม ซึ่งจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อน การไหลของของไหล แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และสมการพื้นฐานทางคณิตศาสตร์สำหรับการควบคุมการเคลื่อนที่ของของไหลและการถ่ายเทความร้อน เพื่อนำมาวิเคราะห์ปัญหาของการไหล โดยใช้ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม ด้วยสมการพื้นฐานทางคณิตศาสตร์

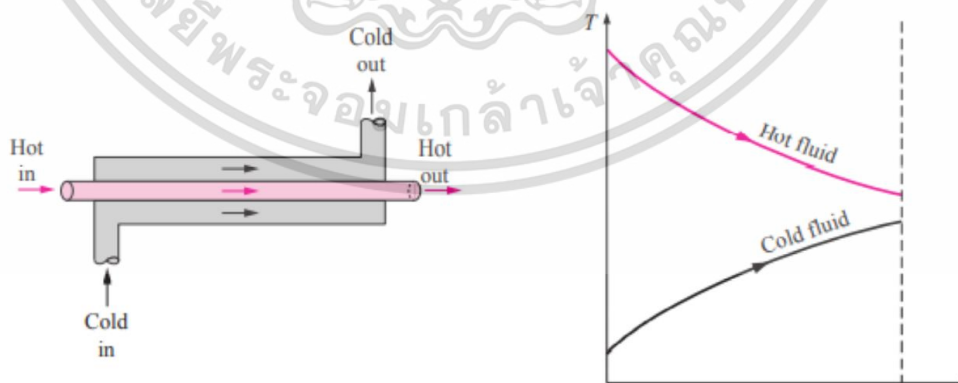
3.1 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน มีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมสมัยใหม่ เช่น อุตสาหกรรมรถยนต์, อุตสาหกรรมพลังงาน, อุตสาหกรรมการบินและอวกาศ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหล 2 ชนิดขึ้นไปที่อุณหภูมิต่างกันโดยของไหลอาจผสมกันหรือไม่ผสมกันก็ได้ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนถูกนำไปใช้ทั้งในกระบวนการทำความเย็นและความร้อน

การแลกเปลี่ยนความร้อนโดยทั่วไป ถูกจำแนกได้ 2 วิธี โดยพิจารณาจากทิศทางการเคลื่อนที่ของของไหลภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และอีกวิธี คือพิจารณาลักษณะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน การจำแนกโดยใช้ทิศทางการเคลื่อนที่ของของไหลแบ่งได้เป็น 3 รูปแบบ ได้แก่

1) การไหลแบบสวนทางกัน (counter flow)

เป็นการไหลของของไหล 2 ชนิดที่ขนานกันแต่มี ทิศทางการไหลตรงกันข้าม การไหลประเภทนี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างของไหลทั้ง 2 ชนิดได้มากที่สุด ส่งผลให้มีประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนมากที่สุดเช่นกัน

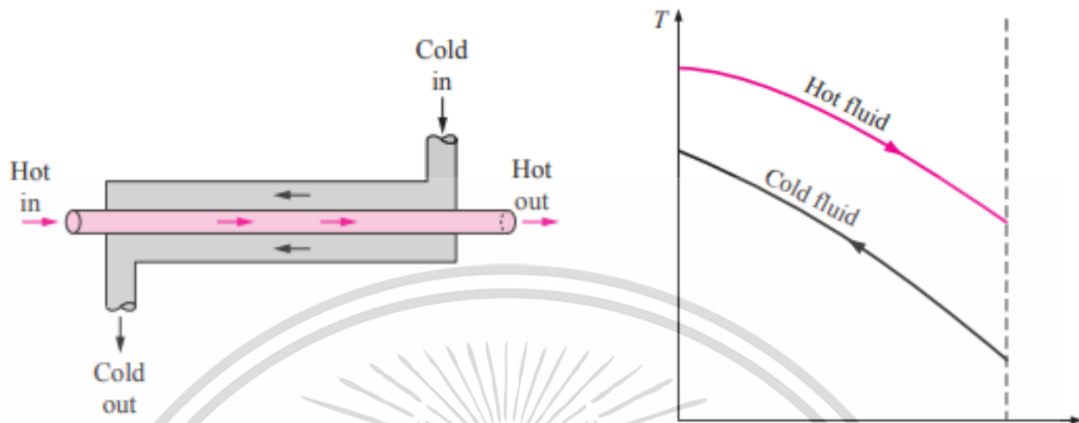


รูปที่ 3.1 การไหลแบบสวนทางกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) การไหลแบบทางเดียวกัน (parallel flow)

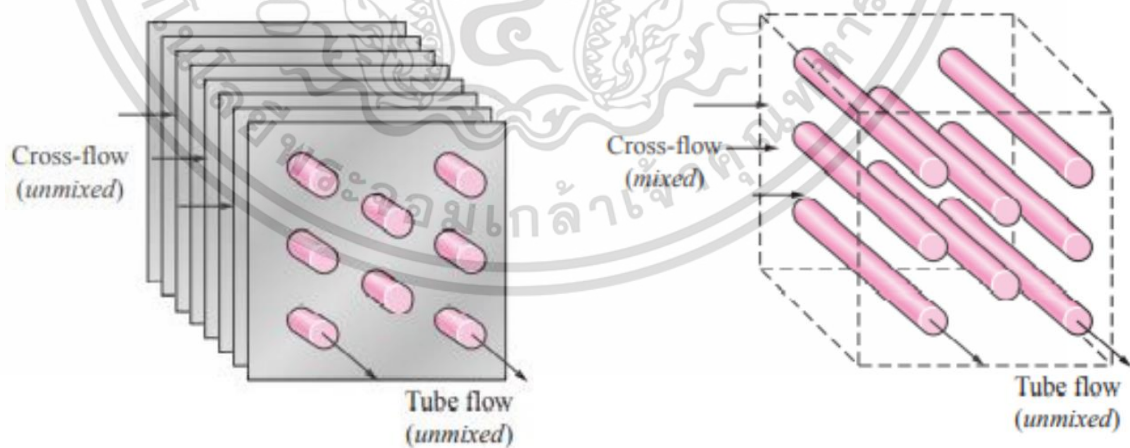
เป็นการไหลของของไหล 2 ชนิดที่ขนานกันและมีทิศทางเดียวกัน ประสิทธิภาพของการไหลประเภทนี้น้อยกว่าการไหลแบบสวนทางกัน แต่จะทำให้ อุณหภูมิที่ผนังคงที่กว่า



รูปที่ 3.2 การไหลแบบทางเดียวกัน

3) การไหลแบบมีทิศทางตั้งฉากกัน (cross flow) และการไหลแบบไหลผ่านหลายครั้ง (multi pass)

เป็นการไหลที่มีทิศทางตั้งฉากกันกับท่อภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ลักษณะการไหลอาจจะ ไหลเดี่ยวเดียว สองเที่ยว หรือมากกว่านั้น ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนจะอยู่ระหว่างการไหล แบบทางเดียวกันกับการไหลแบบสวนทางกัน



รูปที่ 3.3 การไหลแบบมีทิศทางตั้งฉากกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 สมการควบคุมการไหลและการถ่ายเทความร้อน

สำหรับการคำนวณเชิงตัวเลขของการไหลและการถ่ายเทความร้อน ที่มีการติดตั้งครีบบนพื้นผิวให้ความร้อน มีสมมติฐานของการไหลดังนี้

- (1) การไหลแบบราบเรียบ (Laminar) และอัดตัวไม่ได้ (Incompressible flow)
- (2) การไหลและการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบคงตัว 3 มิติ
- (3) คุณสมบัติต่างๆ ของของไหลมีค่าคงที่
- (4) ไม่คำนึงการแผ่รังสีความร้อน
- (5) ไม่คำนึงแรงวัตถุ และการสูญเสียจากความหนืด

จากสมมติฐานข้างต้น สมการควบคุมของงานวิจัย ประกอบด้วยสมการความต่อเนื่อง สมการโมเมนตัม และสมการพลังงาน ซึ่งเขียนให้อยู่ในรูปเทนเซอร์ของระบบพิกัดคาร์ทีเซียน ได้ดังนี้

สมการความต่อเนื่อง

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

สมการโมเมนตัม

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_k) = -\frac{\partial (P)}{\partial x_k} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right) \right] \quad (3.2)$$

สมการพลังงาน

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

เลขเรย์โนลด์ส์

$$Re = \frac{\rho u_i D_h}{\mu} \quad (3.4)$$

ตัวประกอบความเสียดทาน

$$f = \frac{\Delta p}{1/2 \rho u_i^2} \times \frac{D_h}{L} \quad (3.5)$$

เลขนัสเซล

$$Nu = \frac{h D_h}{k} \quad (3.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมประสิทธิ์การพาความร้อน

$$h = \frac{\int h_{local} dA}{\int dA} \quad (3.7)$$

สมรรถนะเชิงความร้อน

$$TEF = \frac{\left(\frac{Nu}{Nu_0}\right)}{\left(\frac{f}{f_0}\right)^{1/3}} \quad (3.8)$$

3.3 หลักการถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อน คือการส่งผ่านพลังงานความร้อนข้ามขอบเขตของระบบอันเนื่องมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิ เมื่อใดที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิเกิดขึ้นในตัวกลางหรือระหว่างตัวกลาง การถ่ายเทความร้อนมักจะเกิดขึ้นได้ จึงถือเป็นพื้นฐานของการถ่ายเทความร้อน สำหรับสมการพื้นฐานสำหรับ กระบวนการถ่ายโอน

$$\text{Rate of a Transfer Process} = \frac{\text{Driving force}}{\text{Resistance}} \quad (3.9)$$

ถ้าตัวกลางมีอุณหภูมิเท่ากันสองตัวจะไม่เกิดการถ่ายเทความร้อน ดังนั้นแรงขับเคลื่อน (driving force) คือความแตกต่างอุณหภูมิ อัตราการถ่ายเทความร้อนขึ้นอยู่กับความแตกต่างของอุณหภูมิต่อหน่วยความยาว (temperature gradient) หรือเรียกอีกอย่างว่าอัตราการลดลงของอุณหภูมิ สภาวะสม่ำเสมอ (steady state) หมายถึง อุณหภูมิที่จุด ๆ หนึ่งภายในวัตถุไม่เปลี่ยนแปลงกับ เวลา แสดงเป็นสมการได้ว่า

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (3.10)$$

เมื่อวัตถุได้รับความร้อนมาเป็นเวลานาน จนอุณหภูมิในวัตถุไม่เปลี่ยนแปลง ไม่ว่าจะถ่ายเทความร้อนไปให้ วัตถุอีกนานเท่าใด เรียกกรณีนี้ว่าสภาวะสม่ำเสมอ สภาวะไม่สม่ำเสมอ (transient state or unsteady state) หมายถึงอุณหภูมิที่จุด ๆ หนึ่ง ภายในวัตถุยังคงเปลี่ยนแปลงอยู่เมื่อเวลาผ่านไป แสดงเป็นสมการได้ว่า

$$\frac{\partial T}{\partial t} \neq 0 \quad (3.11)$$

ในขณะที่เริ่มถ่ายเทความร้อนให้แก่วัตถุ โดยอุณหภูมิของวัตถุยังไม่คงที่ ยังเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาเมื่อ เวลาเปลี่ยนไป เรียกกรณีนี้ว่าสภาวะไม่สม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การพาความร้อน

การถ่ายเทความร้อนทั้งหมดจากการพาความร้อนที่เกิดขึ้น จากการเคลื่อนที่แบบสุ่มของ โมเลกุลและการเคลื่อนที่ของของไหลส่วนใหญ่ การพาความร้อนแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

1) การพาความร้อนแบบธรรมชาติ เป็นการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็ง และของไหล โดยของไหลไม่ถูกทำให้เคลื่อนไหวโดยกลไกภายนอก วัตถุที่มีผิวเรียบอยู่ในของไหลซึ่ง อยู่นิ่ง เมื่ออุณหภูมิของผิวสูงกว่าอุณหภูมิของของไหล ความร้อนจะเริ่มเคลื่อนที่ใกล้ชิดกับผนัง ส่งผล ให้ความหนาแน่นของของไหลที่อยู่ชิดผนังต่ำลง ก่อเกิดแรงผลักดันให้ของไหลลอยตัวขึ้น ดังนั้นของ ไหลที่อยู่ต่ำกว่าจะเคลื่อนที่เข้ามาแทนที่และทำให้เกิด การหมุนเวียนของของไหล

2) การพาความร้อนโดยการบังคับ

เกิดขึ้นเมื่อของไหลมีความเร็วอยู่แล้วโดยกลไกภายนอก เช่น พัดลม เมื่อของไหลมีความเร็ว และทราบกลไกการเคลื่อนที่ของของไหล ซึ่งกลไกการเคลื่อนที่ของของไหลโดยปกติแบ่งออกเป็น 2 แบบ ได้แก่ การไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) และการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) สำหรับการไหลแบบราบเรียบซึ่งของไหลไหลเป็นชั้น ๆ ขนานกับความเร็วยังถ่ายเทจากผิวของ ของแข็งโดยนำ และ ถ่ายเทต่อ ๆ กันไปในของไหลโดยการนำผ่านชั้นของของไหล สำหรับการไหล แบบปั่นป่วน ซึ่งของไหล เคลื่อนที่อย่างไม่ระเบียบ มีความเร็วไม่สม่ำเสมอ มีทิศทางการเคลื่อนไม่ แน่นนอน โดยธรรมชาติของการไหลแบบปั่นป่วนความเร็วของของไหลจะเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กัเวลา และตำแหน่ง การเคลื่อนที่ของความร้อนส่วนใหญ่จะเกิดจากอนุภาคของของไหลที่ได้รับความร้อน มาแล้วเคลื่อนที่นำความร้อนไปยังที่อื่น

3.5 ระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข

วิวัฒนาการของการคำนวณเชิงตัวเลข Anderson (1950) เกิดขึ้นพร้อมกับยุคที่ระบบ คอมพิวเตอร์เริ่มมีการพัฒนา ช่วงเวลานั้นระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (finite difference methods, FDM) และระเบียบวิธีผลต่างมูลฐาน (finite element methods, FEM) เป็นวิธีพื้นฐานในการหาผล เฉลยของสมการอนุพันธ์ย่อย (partial differential equations, PDE) ซึ่งนิยมใช้มากในการคำนวณ ทางพลศาสตร์ของไหล (computational fluid dynamics, CFD) ต่อมาได้รวบรวมเอาองค์ความรู้ ทางระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม และระเบียบวิธีผลต่างมูลฐานเข้าไว้ด้วยกัน (Chung (2002)) เรียกว่า ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (finite volume methods, FVM) ทำให้มีโครงสร้างที่เข้าใจได้ง่ายขึ้น ขณะที่ยังมีความแม่นยำสูง จนเป็นที่นิยมในปัจจุบัน

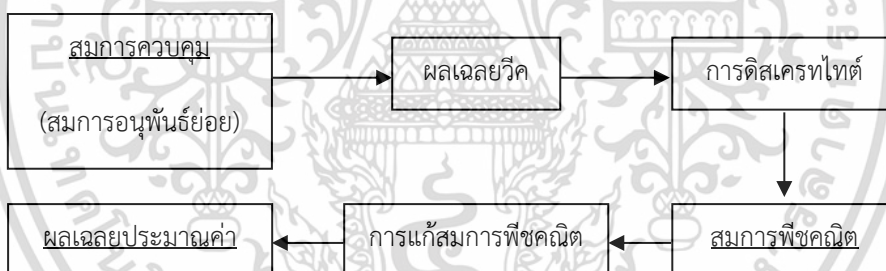
พิจารณาการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลในมุมมองการโปรแกรม จะกล่าวได้ว่าเป็น โครงสร้างของอัลกอริทึมที่สามารถนำไปสู่การจำลองสภาวะการไหลได้ โปรแกรมคำนวณทาง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลศาสตร์ของไหลในเชิงพาณิชย์ ส่วนมากมีระบบที่ให้ผู้ใช้งานสามารถป้อนค่าต่างๆที่ต้องการแล้วจึงนำไปคำนวณ โดยแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนหลักดังนี้ (Versteeg (1995))

3.5.1 ขั้นตอนประมวลผล

ขั้นตอนประมวลผล (pre-processing) คือขั้นตอนเตรียมการ โดยระบุรายละเอียดของการกำหนดปัญหา และพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้อง ดังต่อไปนี้

1. กำหนดรูปทรง และระบุขนาดของระบบที่สนใจ เรียกว่า การกำหนดสนามการคำนวณ (computation domain)
2. กำหนดจำนวน และรูปแบบการจัดวางกริด (grid or mesh) ซึ่งคือการแบ่งสนามการคำนวณออกเป็นปริมาตรเล็กๆ รูปแบบการจัดแบ่ง และจัดวางกริด ขึ้นอยู่กับปัญหาที่พิจารณาการวัดที่เหมาะสมทำให้การหาผลเฉลยประมาณค่า (approximation solution) แม่นยำขึ้น
3. เลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้เหมาะสมกับธรรมชาติของปัญหา เลือกโดยใช้องค์ความรู้ทางทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง
4. กำหนดคุณสมบัติของไหล เช่นพิจารณาของไหลเป็นอากาศที่อุณหภูมิปกติ เป็นต้น
5. กำหนดเงื่อนไขขอบ (boundary condition) และค่าเริ่มต้น (initial condition)



รูปที่ 3.4 ความเชื่อมโยงของกระบวนการดิสcretไทต์และผลเฉลยประมาณค่า

3.5.2 ขั้นตอนประมวลผล

ขั้นตอนประมวลผล (solving) เป็นขั้นที่ต้องใช้ระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อแก้ปัญหาการคำนวณในงานวิจัยนี้ทั้งหมดใช้วิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม โดยมีส่วนขั้นตอนดังนี้

- 1) การประมาณค่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่าด้วยการหาค่าเฉลี่ยของ สร้างเป็นสมการอนุพันธ์ย่อยร่วมกับสมการควบคุมการไหล
- 2) การหาผลเฉลยวีค (weak solution) ของสมการควบคุม ด้วยวิธีการ weight residual จากนั้นดิสcretไทต์ โดยการประมาณค่าแต่ละเทอมของความสัมพันธ์ ด้วยแบบแผนวิธีที่เลือกไว้เพื่อให้ได้ผลลัพธ์เป็นสมการพีชคณิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

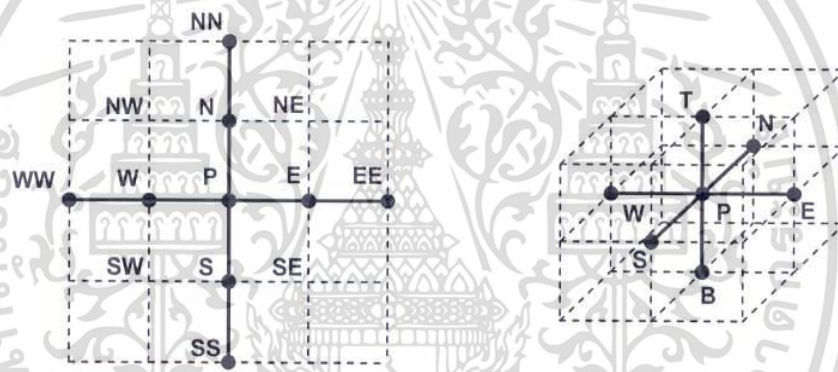
3) แก๊สมการพีชคณิต โดยผลเฉลยที่ได้เรียกว่า ผลเฉลยการประมาณค่า

3.5.3 ชั้นแสดงผล

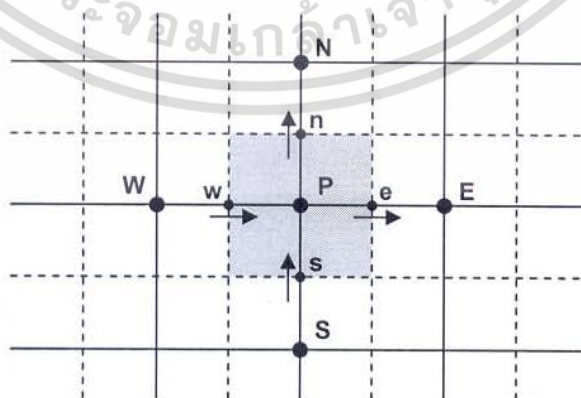
ชั้นแสดงผล (post-processing) คือ การแสดงผลเฉลยการประมาณค่า ของตัวแปรที่สนใจ และใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ เช่น รูปแบบของความเร็ว รูปแบบของการหมุนวน เป็นต้น

3.6 รูปแบบการจัดวางกริด

รูปแบบการจัดวางกริดโดยทั่วไปแบ่งได้เป็น 3 แบบคือ แบบโครงสร้างปกติ (structured grids) แบบกลุ่มโครงสร้าง (block structured grid) และแบบไม่เป็นโครงสร้าง (unstructured grids) เพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจกระบวนการดิสครีไทซ์ จึงได้ใช้รูปแบบการจัดวางกริด แสดงดังรูปที่ 3.5 (แบบโครงสร้างปกติ) และเพื่อความกระชับได้ดีสคริปต์กริด 2 มิติ โดยจะสามารถขยายไปสู่กริดแบบ 3 มิติ ได้โดยตรง



รูปที่ 3.5 รูปแบบการจัดวางกริดในแกน 2 มิติ และ 3 มิติ



รูปที่ 3.6 ส่วนแรเงาแสดงตำแหน่งของปริมาตรควบคุมแบบ 2 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.6 ตำแหน่ง P คือตำแหน่งโนด (node) ที่สนใจ ตัวอักษร เช่น w, e แสดงถึงตำแหน่งของปริมาณที่เข้า-ออก จากปริมาตรควบคุมที่แรเงา (cell volume) เช่น ความเร็ว เรียกว่าตำแหน่งของผิวเซลล์ (cell face) ลูกศรที่ปรากฏแสดงทิศเป็นบวกของปริมาณเวกเตอร์ที่ตำแหน่งของผิวเซลล์ รูปแบบลักษณะนี้ เรียกว่า การจัดเรียงแบบตำแหน่งร่วม (co-located arrangement) คือ ปริมาณสเกลาร์ และเวกเตอร์ มีตำแหน่งเดียวกัน (มวล ความเร็ว ความดัน และอุณหภูมิ)

3.7 แบบแผนการคำนวณเชิงตัวเลข

แบบแผนการคำนวณเชิงตัวเลข (numerical scheme) มีมากมาย อาทิเช่น 4 รูปแบบ ดังนี้

3.7.1 แบบแผนวิธีผลต่างกึ่งกลาง

แบบแผนวิธีผลต่างกึ่งกลาง (central differencing scheme, CDS) คือการประมาณค่าที่ตำแหน่งผิวเซลล์ต่างๆ ด้วยหลักการหาค่าเฉลี่ยกึ่งกลาง เป็นไปตามสมการ (3.12) เมื่อ ϕ แทนปริมาณที่สนใจใดๆ

$$\begin{aligned}\phi_e &= (\phi_P + \phi_E) / 2 \\ \phi_w &= (\phi_W + \phi_P) / 2 \\ \phi_n &= (\phi_P + \phi_N) / 2 \\ \phi_s &= (\phi_S + \phi_P) / 2\end{aligned}\tag{3.12}$$

จากสมการ (3.12) เห็นได้ว่าการประมาณค่าที่ผิวเซลล์ด้วยค่าที่ตำแหน่งโนด โดยถ่วงน้ำหนักโนดประชิด (adjacent node) เท่ากัน แบบแผนวิธีนี้จึงขึ้นอยู่กับระยะกริดเป็นสำคัญ ซึ่งระยะกริดที่ลดลง ทำให้ผลเฉลยมีความแน่นอนสูงขึ้น

3.7.2 แบบแผนวิธีผลต่างต้นลมอันดับหนึ่ง

การประมาณค่าที่ผิวเซลล์ (รูปที่ 3.5) ของแบบแผนวิธีผลต่างต้นลมอันดับหนึ่ง (1st-order upwind differencing scheme, UDS-1, FOU) ให้ปริมาณที่ตำแหน่งท้ายลมมีค่าเท่ากับปริมาณที่ตำแหน่งต้นลม ดังสมการ (3.13) เมื่อ ϕ แทนปริมาณที่สนใจ และ u แทนความเร็วที่ตำแหน่งผิวเซลล์นั้น เช่น u_e แทนความเร็วที่ตำแหน่งผิวเซลล์ e เป็นต้น

$$\begin{aligned}\phi_e &= \alpha_e \phi_P + (1 - \alpha_e) \phi_E && \text{เมื่อ } u_e > 0 \Rightarrow \alpha_e = 1 \text{ และ } u_e < 0 \Rightarrow \alpha_e = 0 \\ \phi_w &= \alpha_w \phi_W + (1 - \alpha_w) \phi_P && \text{เมื่อ } u_w > 0 \Rightarrow \alpha_w = 1 \text{ และ } u_w < 0 \Rightarrow \alpha_w = 0 \\ \phi_n &= \alpha_n \phi_P + (1 - \alpha_n) \phi_N && \text{เมื่อ } u_n > 0 \Rightarrow \alpha_n = 1 \text{ และ } u_n < 0 \Rightarrow \alpha_n = 0 \\ \phi_s &= \alpha_s \phi_S + (1 - \alpha_s) \phi_P && \text{เมื่อ } u_s > 0 \Rightarrow \alpha_s = 1 \text{ และ } u_s < 0 \Rightarrow \alpha_s = 0\end{aligned}\quad (3.13)$$

แบบแผนวิธีผลต่างต้นลมอันดับหนึ่งมีคุณสมบัติจำกัดขอบสูง ทำให้ผลเฉลยไม่กระเพื่อม (oscillatory solution) เป็นข้อดีทั้งในแง่เสถียรภาพการคำนวณ และการลู่เข้าของผลเฉลย แต่ในขณะเดียวกัน ทำให้เกิดพฤติกรรมการแพร่เชิงตัวเลข (numerical diffusive) เนื่องจากลักษณะผลเฉลยเสมือนถูกถ่วงน้ำหนักจากค่าที่ตำแหน่งต้นลมเป็นหลัก สำหรับกรณีที่มีการไหลซับซ้อน แบบแผนวิธีนี้จะทำให้คุณสมบัติความเข้ากันได้ลดลง

3.7.3 แบบแผนวิธีผลต่างต้นลมอันดับสอง

แบบแผนวิธีผลต่างต้นลมอันดับสอง (2nd-order upwind differencing scheme, UDS-2, SOU) ได้พัฒนาให้มีความแม่นยำสูงขึ้น พิจารณาที่ตำแหน่งโนด P เมื่อใช้ออนุกรมขยายของเทเลอร์ (Taylor series expansion) ตามหลักการผลต่างต้นลม เขียนความสัมพันธ์ที่ผิวเซลล์ e ได้ว่า

$$\phi_e = \phi_P + \delta_{eP} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_P + \frac{\delta_{eP}^2}{2} \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \right)_P + H.O.T. \quad \text{เมื่อ } u_e > 0 \quad (3.14)$$

สมการ (3.14) แสดงตัวอย่างแบบแผนวิธีในกรณี 1 มิติ พิจารณาเฉพาะที่ผิวเซลล์ e เมื่อ δ_{eP} แทนระยะห่างระหว่างผิวเซลล์ e และโนดต้นลม P (เนื่องจาก $u_e > 0$) สำหรับกรณีแบบแผนวิธีผลต่างต้นลมอันดับหนึ่งจะใช้เฉพาะเทอมแรกทางขวาของสมการ และแบบแผนวิธีผลต่างต้นลมอันดับสองนี้จะใช้สองเทอมแรกทางขวาของสมการ

เทอม $\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_P$ คือ ความชันของเซลล์ต้นลม ซึ่งประมาณโดยการเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักด้วยปริมาตรของเซลล์นั้น ดังสมการ (3.15) จากนั้นใช้ทฤษฎีของเกาส์ (Gauss theorem) จะเขียนได้ในสมการ (3.16) ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left(\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)_P = \frac{1}{V} \int \left(\frac{\partial\phi}{\partial x}\right) dV \quad (3.15)$$

$$\left(\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)_P = \frac{1}{V} \oint \phi \cdot \bar{n} dA \quad (3.16)$$

เมื่อ v แทนขนาดปริมาตรของเซลล์ A แทนพื้นที่ผิวเซลล์ และ \bar{n} แทนเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับผิวเซลล์ ทำการดิฟเฟอเรนเชียลด้วยระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมใน 2 มิติ (จัดวางกริด ตามรูปที่ 3.5) จะลดรูปได้เป็น

$$\left(\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)_P = \frac{1}{A_P} (\phi_e L_e + \phi_w L_w + \phi_n L_n + \phi_s L_s) \quad (3.17)$$

จากสมการ (3.17) เมื่อ L แทนระยะความกว้างของผิวเซลล์ในแต่ละด้านตามตัวห้อย เช่น L_e แทนระยะความกว้างของผิวเซลล์ e เป็นต้น และ A_P แทนพื้นที่เซลล์ที่ตำแหน่งโนด P อยู่ เช่น A_P มีค่าเท่ากับพื้นที่แรงแงในรูปที่ 3.6 ซึ่งค่า ϕ ที่ผิวเซลล์ต่างๆของสมการ (3.17) หาได้หลายวิธี แต่ในที่นี้เลือกใช้แบบแผนวิธีผลต่างกึ่งกลางดังสมการ (3.12) ดังนั้นสมการ (3.15) จึงเขียนใหม่ได้ว่า

$$\phi_e = \phi_P + \frac{\delta_{eP}}{A_P} \left(\begin{aligned} &\left(\frac{\phi_P + \phi_E}{2}\right) \cdot L_e + \left(\frac{\phi_W + \phi_P}{2}\right) \cdot L_w \\ &+ \left(\frac{\phi_P + \phi_N}{2}\right) \cdot L_n + \left(\frac{\phi_S + \phi_P}{2}\right) \cdot L_s \end{aligned} \right) \text{ เมื่อ } u_e > 0 \quad (3.18)$$

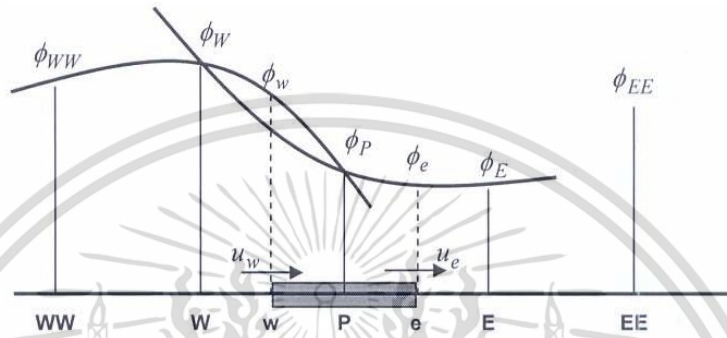
ในทำนองเดียวกันเมื่อ $u_e < 0$ จะเขียนได้ดังสมการ (3.19) และสมการของ ϕ_w, ϕ_n, ϕ_s สามารถหาได้ด้วยหลักการเดียวกัน ซึ่งไม่ขอกล่าวถึงในรายละเอียด

$$\phi_e = \phi_E + \frac{\delta_{eE}}{A_E} \left(\begin{aligned} &\left(\frac{\phi_E + \phi_{EE}}{2}\right) \cdot L_{ee} + \left(\frac{\phi_E + \phi_P}{2}\right) \cdot L_e \\ &+ \left(\frac{\phi_{NE} + \phi_E}{2}\right) \cdot L_{ne} + \left(\frac{\phi_E + \phi_{SE}}{2}\right) \cdot L_{se} \end{aligned} \right) \text{ เมื่อ } u_e < 0 \quad (3.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.4 แบบแผนวิธีผลต่างควอดราติก

แบบแผนวิธีผลต่างควอดราติก (Quadratic upstream interpolation for convective kinetics differencing scheme, QUICK) เริ่มนำเสนอโดย Leonard (1988) เป็นแบบแผนวิธีที่ใช้ โหนด 3 ตำแหน่งในการประมาณค่าของแต่ละผิวเซล (2 โหนดที่ต้นลม และ 1 โหนดที่ท้ายลม) ดังแสดงใน รูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 รูปแบบแนวคิดของแบบแผนวิธีผลต่างควอดราติกในปริมาตรควบคุมแบบ 1 มิติ

จากรูปที่ 3.5 เมื่อ $u_w > 0$ และ $u_e > 0$ การประมาณค่า ϕ_w ที่ผิวเซล w จะใช้ค่าที่โหนดต้นลม คือ WW และ W ประกอบกับที่โหนดท้ายลมคือ P ในทำนองเดียวกันการประมาณค่า ϕ_e ที่ผิวเซล e จะใช้ค่าที่โหนดต้นลมคือ W และ P ประกอบกับที่โหนดท้ายลมคือ E ตามลำดับ

ด้วยหลักการความคล้ายคลึง กรณีที่ $u_w < 0$ และ $u_e < 0$ การประมาณค่า ϕ_w ใช้โหนด E และ P ประกอบกับโหนด W และการประมาณค่า ϕ_e ใช้โหนด EE , E และ P ตามลำดับ ซึ่งความสัมพันธ์ต่าง ๆ สามารถเขียนได้ในสมการ (3.20) ถึง (3.1) โดย $u_x > 0$ แล้ว $\alpha_x = 1$ และ $u_x < 0$ แล้ว $\alpha_x = 0$ เมื่อ $x = w, e, s, n$ ตามลำดับ

$$\phi_w = \frac{3}{8}[(1 + \alpha_w) \cdot \phi_W + (2 - \alpha_w) \cdot \phi_P] - \frac{1}{8}[(1 - \alpha_w) \cdot \phi_E + \alpha_w \cdot \phi_{WW}] \quad (3.20)$$

$$\phi_e = \frac{3}{8}[(1 + \alpha_e) \cdot \phi_P + (2 - \alpha_e) \cdot \phi_E] - \frac{1}{8}[(1 - \alpha_e) \cdot \phi_{EE} + \alpha_e \cdot \phi_W] \quad (3.21)$$

$$\phi_s = \frac{3}{8}[(1 + \alpha_s) \cdot \phi_S + (2 - \alpha_s) \cdot \phi_P] - \frac{1}{8}[(1 - \alpha_s) \cdot \phi_N + \alpha_s \cdot \phi_{SS}] \quad (3.22)$$

$$\phi_n = \frac{3}{8}[(1 + \alpha_n) \cdot \phi_P + (2 - \alpha_n) \cdot \phi_N] - \frac{1}{8}[(1 - \alpha_n) \cdot \phi_{NN} + \alpha_n \cdot \phi_S] \quad (3.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบแผนวิธีผลต่างครอตราติคมีคความแน่นอนอันดับสาม ซึ่งสูงกว่าทั้งแบบแผนวิธีผลต่างต้น
ลมอันดับหนึ่งและสอง เป็นเทคนิคการผสมผสานความได้เปรียบของแบบแผนวิธีผลต่างกึ่งกลางและ
แบบแผนวิธีผลต่างต้นลมเข้าด้วยกัน กล่าวคือมีคุณสมบัติอนุรักษ์ และความเข้ากันได้มากกว่าแบบ
แผนวิธีผลต่างต้นลม อย่างไรก็ตามแบบแผนวิธีอันดับสูง จะมีเงื่อนไขเสถียรภาพการคำนวณ
(conditionally stable) เพิ่มขึ้น และคุณสมบัติจำกัดขอบลดลง



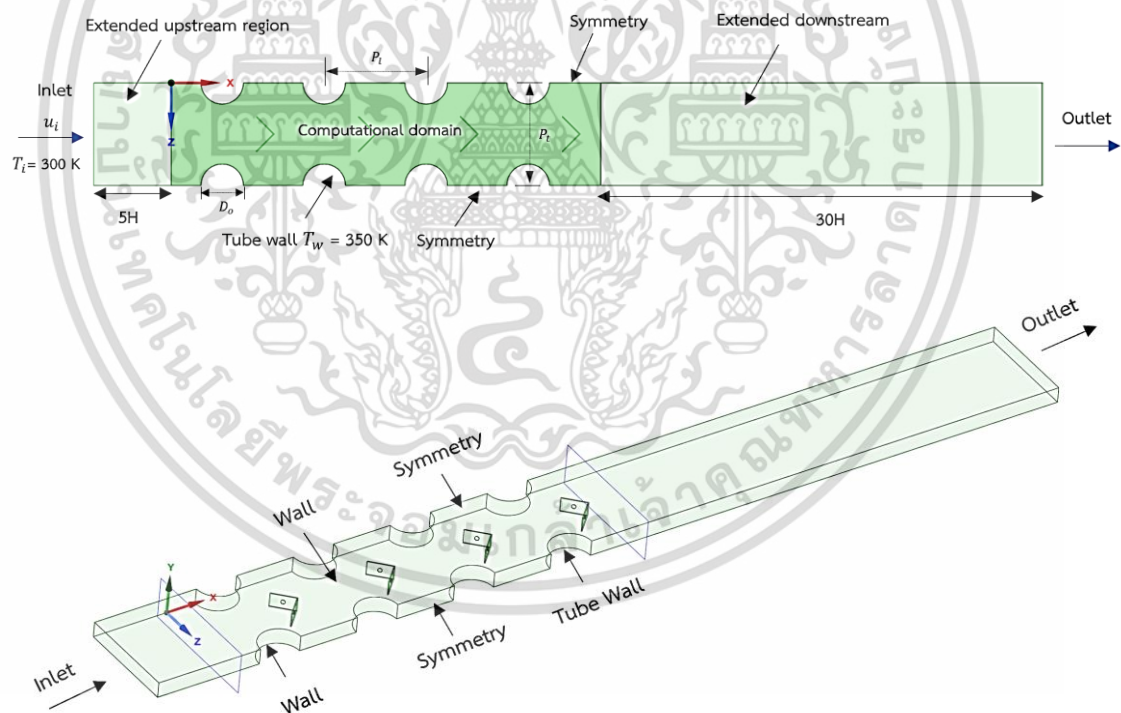
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การกำหนดปัญหาและตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง

4.1 การกำหนดปัญหา

แบบจำลองสำหรับงานวิจัยนี้ เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนประเภท ครีบและท่อ ที่จัดเรียงท่อแนวเดียวกัน (In-line arrangement) ขอบเขตที่ศึกษาพิจารณาเฉพาะบริเวณที่อากาศไหลผ่านระหว่างครีบ ความสูงระหว่างครีบ เท่ากับ 3.85 mm เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ เท่ากับ 10.55 mm ระยะห่างระหว่างท่อในแนวยาว เท่ากับ 25.4 mm ระยะห่างระหว่างท่อในแนวขวาง เท่ากับ 25.4 mm ขอบเขตบริเวณก่อนทางเข้าและบริเวณทางออกของแบบจำลองที่ถูกขยายยาวออกไปเป็นระยะ 5H และ 30H ตามลำดับ ติดตั้งปีกรูปตัววี (V winglet) และแบบหยัก (Wavy winglet) พิจารณาในช่วงเลขเรย์โนลด์ส์ 200 ถึง 1,000 บริเวณทางเข้าของขอบเขตเป็นอากาศ อุณหภูมิ 300 K คุณสมบัติทางกายภาพของอากาศมีค่าคงที่ ผนังท่ออุณหภูมิผิวคงที่ 350 K โดยโดเมนที่ใช้ศึกษาแสดงตัวอย่างดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 โดเมนที่ใช้ศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 สมมติฐาน

สำหรับการคำนวณเชิงตัวเลขของการไหลและการถ่ายเทความร้อน ที่มีการติดตั้งครีบบนพื้นผิวให้ความร้อน มีสมมติฐานของการไหลดังนี้

- (1) การไหลแบบราบเรียบ (Laminar) และอัดตัวไม่ได้ (Incompressible flow)
- (2) การไหลและการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบคงตัว 3 มิติ
- (3) คุณสมบัติต่างๆ ของของไหลมีค่าคงที่
- (4) ไม่คำนึงการแผ่รังสีความร้อน
- (5) ไม่คำนึงแรงวัตถุ และการสูญเสียจากความหนืด
- (6) เงื่อนไขที่ขอบไม่มีการลื่นไหล (No slip conditions)
- (7) กำหนดให้ผนังอยู่กับที่ (Stationary wall)
- (8) ปีกมีความหนาซึ่งความร้อนไม่สามารถผ่านได้

4.3 ค่าเงื่อนไขขอบเขตในการคำนวณการไหลสามมิติ

4.3.1 เงื่อนไขบริเวณต้นทางการไหล

บริเวณทางเข้า : $u = u_{in} = const, v = w = 0, T = T_{in} = const$

บริเวณพื้นผิวด้านบนและด้านล่าง : $\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial v}{\partial z} = 0, w = 0, \frac{\partial T}{\partial z} = 0$

บริเวณพื้นผิวด้านข้าง : $\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial y} = 0, v = 0, \frac{\partial T}{\partial y} = 0$

4.3.2 เงื่อนไขบริเวณปลายทางการไหล

บริเวณทางออก : $\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial x} = 0$

บริเวณพื้นผิวด้านบนและด้านล่าง : $\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial v}{\partial z} = 0, w = 0, \frac{\partial T}{\partial z} = 0$

บริเวณพื้นผิวด้านข้าง : $\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial y} = 0, v = 0, \frac{\partial T}{\partial y} = 0$

4.3.3 เงื่อนไขบริเวณครีบ

บริเวณผิวครีบ : $u = v = w = 0, \frac{\partial T}{\partial y} = 0$

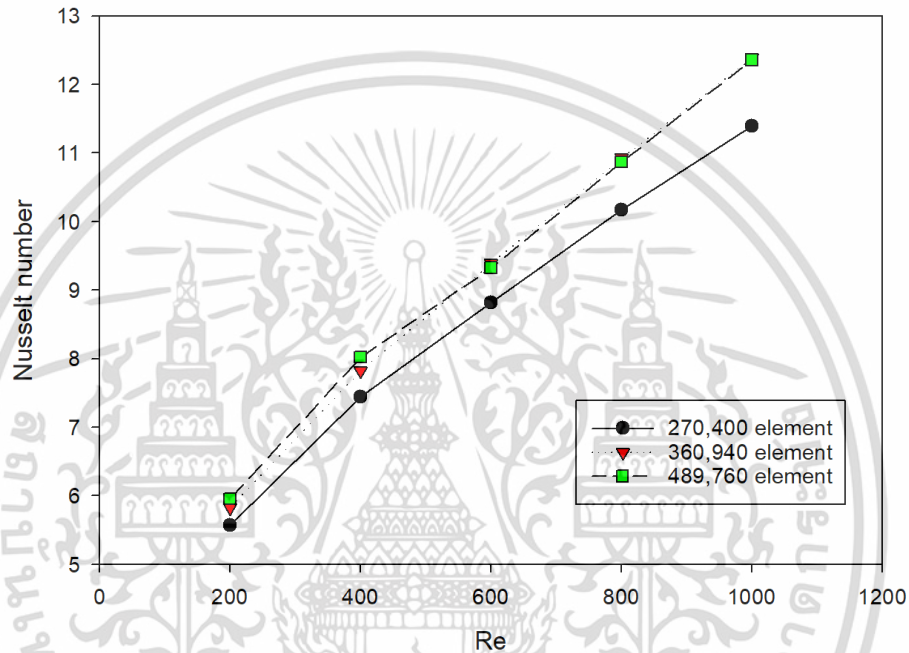
บริเวณของไหล : $\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial w}{\partial y} = 0, v = 0, \frac{\partial T}{\partial y} = 0$

บริเวณพื้นผิวท่อ : $u = v = w = 0, T = T_w = const$

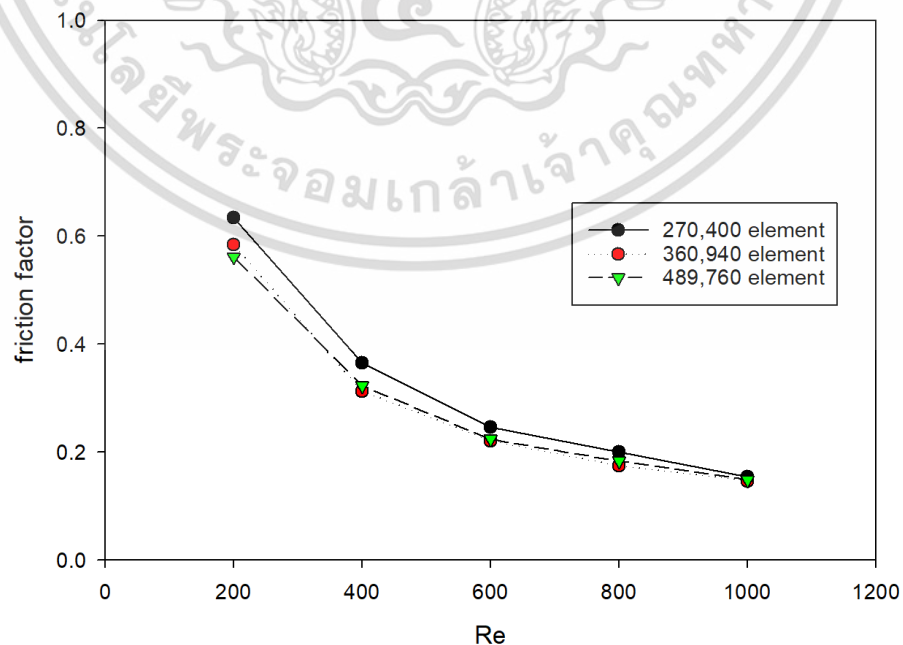
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ลักษณะของกริดและการทดสอบกริดอิสระ

กริดที่ใช้ในแบบจำลองที่ศึกษา ใช้รูปแบบของกริดเป็นเอลิเมนต์รูปทรงสามเหลี่ยม เนื่องจากมีความเหมาะสมในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนและมีการแบ่งแบบไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform grid) พิจารณาผลของกริดที่มีผลต่อค่าคำตอบ เปรียบเทียบผลเฉลยโดยใช้จำนวนกริดที่แตกต่างกัน คือ 270,400 360,940 และ 489,760 พบว่าเมื่อจำนวนกริดเพิ่มขึ้นเป็น 360,940 เลขนัสเซลเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 1.5% ดังนั้น จึงเลือกจำนวนกริด 360,940 สำหรับศึกษาอิทธิพลของค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้น เพื่อลดระยะเวลาประมวลผลของโปรแกรม แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงการทดสอบกริดอิสระสำหรับเลขนัสเซล



รูปที่ 4.3 แสดงการทดสอบกริดอิสระสำหรับตัวประกอบความเสียดทาน

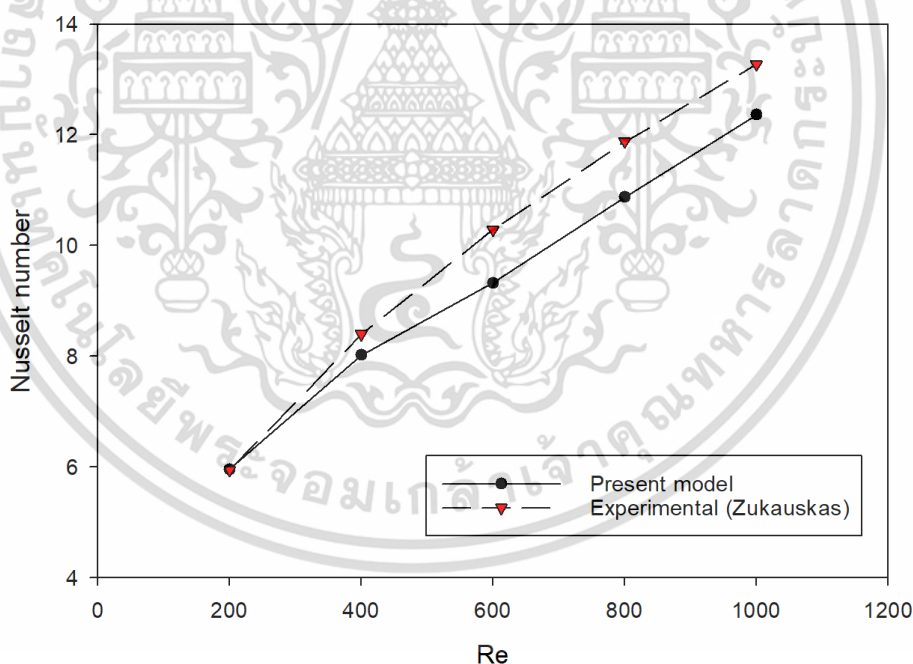
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เนาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การคำนวณเชิงตัวเลข

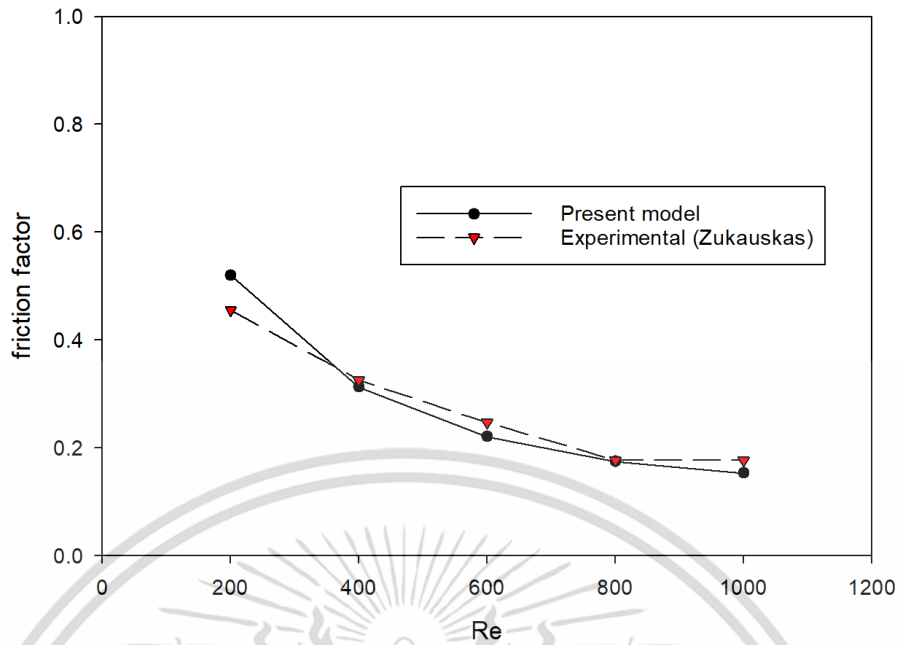
การคำนวณเชิงตัวเลขแบบ 3 มิติ สำหรับการแก้ปัญหาของแบบจำลอง โดยใช้โปรแกรมเชิงพาณิชย์ คำนวณหาผลเฉลยด้วยระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม สมการควบคุมถูก discretized ด้วยแบบแผนวิธีผลต่างควอดราติก (Quadratic upstream interpolation for convective kinetics differencing scheme, QUICK) ใช้แผนผังแบบ SIMPLE (Semi-implicit method for pressure-linked equations) พิจารณาการลู่เข้าหาคำตอบที่การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรน้อยกว่า 10^{-6} สำหรับสมการความต่อเนื่อง, สมการโมเมนตัม และการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรน้อยกว่า 10^{-9} สำหรับสมการพลังงาน

4.6 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

นอกจากการตรวจสอบกริดอิสระแล้ว การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ทำการขึ้นกับผลการทดลองที่เกิดขึ้นจริงมีความสำคัญไม่น้อยไปกว่ากัน โดยเปรียบเทียบกับผลการทดลอง Zukauskas (1987) สำหรับการตรวจสอบความถูกต้อง โดยมีค่าไม่เกิน 6.52% และ 1.5% ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลขมีความสอดคล้องกันกับผลการทดลองอย่างดีและมีความน่าเชื่อถือ



รูปที่ 4.4 การตรวจสอบความถูกต้องของเลขนัสเซลเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Zukauskas (1987)



รูปที่ 4.5 การตรวจสอบความถูกต้องของตัวประกอบความเสียดทาน
เปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Zukauskas (1987)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

โครงสร้างการไหล, พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน

และความดันตกคร่อม

5.1 ผลแบบจำลองการติดตั้งปีกรูปตัววี

5.1.1 ปีกรูปตัววี ติดตั้งแบบ 4 แถว (4EA V-Winglet)

5.1.1.1 ปีกรูปตัววี ติดตั้งแบบ 4 แถว (4EA V-Winglet) ด้านหลังท่อ

5.1.1.1.1 แบบจำลอง ครีบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แถว ด้านหลังท่อ ทิศทาง V-Downstream

การติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แถว บริเวณครีบด้านล่าง ระยะติดตั้งห่างจากทางเข้าแบบจำลอง 25.4 mm หรือด้านหลังท่อ ทิศทาง V-Downstream มุมปะทะการไหล 30° , 45° และ 60° อัตราส่วนความสูงของปีกรูปตัววี เท่ากับ 0.5H, 0.7H และ 0.9H ของความสูงระหว่างครีบ โดยความสูงระหว่างครีบเท่ากับ 3.85 mm ความหนาของปีก 0.2 mm แสดงดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ตัวอย่างแบบจำลองครีบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แถว ด้านหลังท่อ ทิศทาง V-Downstream

5.1.1.1.1.1 พฤติกรรมการไหล

รูปที่ 5.2 (ก) (ข) (ค) และ (ง) แสดงการเปรียบเทียบเส้นกระแสการไหลของอากาศสำหรับครีบเรียบ, ครีบที่มีการติดตั้งปีกรูปตัววี ความสูงของปีก 0.5H, 0.7H และ 0.9H เท่าของความสูงระหว่างครีบที่เลขเรย์โนลด์ 600 พบว่าพฤติกรรมการไหลแตกต่างกัน โครงสร้างการไหลของอากาศที่ไหลผ่านครีบเรียบในรูปที่ 5.2 (ก) จะเกิดกระแสหมุนวนเฉพาะด้านหลังของกลุ่มท่อ (Wake zone) เนื่องจากความแตกต่างของความดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครีบบนที่มีการติดตั้งปีกรูปตัววีที่มีความสูง 0.5H และ 0.7H ในรูปที่ 5.2 (ข) และ 5.2 (ค) พบว่าเกิดกระแสหมุนวนบริเวณด้านหลังของปีกรูปตัววีจำนวน 2-4 คู่ ลักษณะ common-flow-up ซึ่งเป็นการไหลออร์เทกซ์คู่ยกตัวออกจากผนังและการไหลของออร์เทกซ์คู่ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำการไหลกระแทกของกระแสการไหล ช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสูงนอกจากกระแสหมุนวนปกติที่เกิดขึ้นบริเวณด้านหลังของท่อ ซึ่งกระแสหมุนวนที่เกิดขึ้นดังกล่าวจะไหลกระแทกผนังด้านบนและด้านล่างของครีบ ส่วนครีบบนที่มีการติดตั้งปีกรูปตัววีที่มีความสูง 0.9H ในรูปที่ 5.2 (ง) พบว่าเกิดกระแสหมุนวนบริเวณด้านหลังของปีกรูปตัววีจำนวน 2-4 คู่ แต่อย่างไรก็ตามการติดตั้งตัวปีกย่อมส่งผลให้เกิดค่าความดันตกคร่อมที่เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน



รูปที่ 5.2 เส้นกระแสการไหลบนระนาบตามการไหล สำหรับ (ก) ครีบบน
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข) ครีบบนที่ติดตั้งปีกรูปตัววี ความสูง 0.5H, (ค) ครีบบนที่ติดตั้งปีกรูปตัววี ความสูง 0.7H
และ (ง) ครีบบนที่ติดตั้งปีกรูปตัววี ความสูง 0.9H



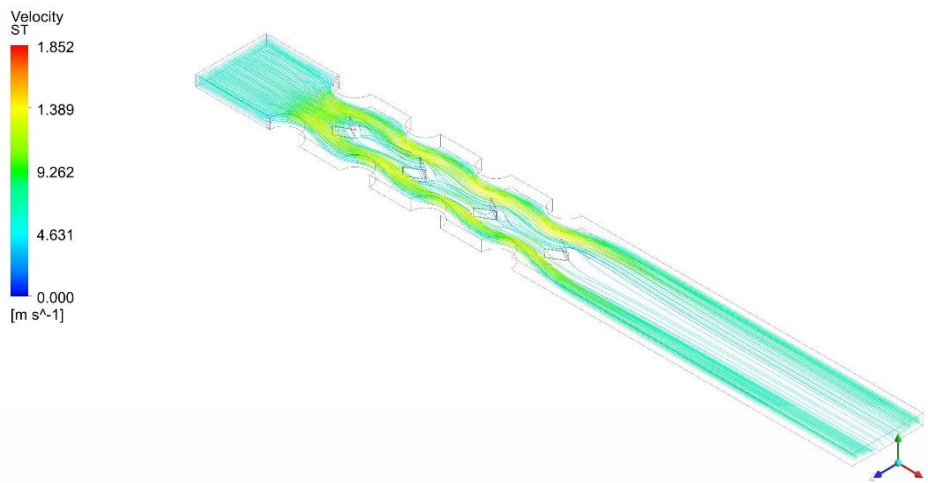
รูปที่ 5.2 (ต่อ) เส้นกระแสการไหลบนระนาบตามการไหล สำหรับ (ก) ครีบบเรียบ
(ข) ครีบบนที่ติดตั้งปีกรูปตัววี ความสูง 0.5H, (ค) ครีบบนที่ติดตั้งปีกรูปตัววี ความสูง 0.7H
และ (ง) ครีบบนที่ติดตั้งปีกรูปตัววี ความสูง 0.9H

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

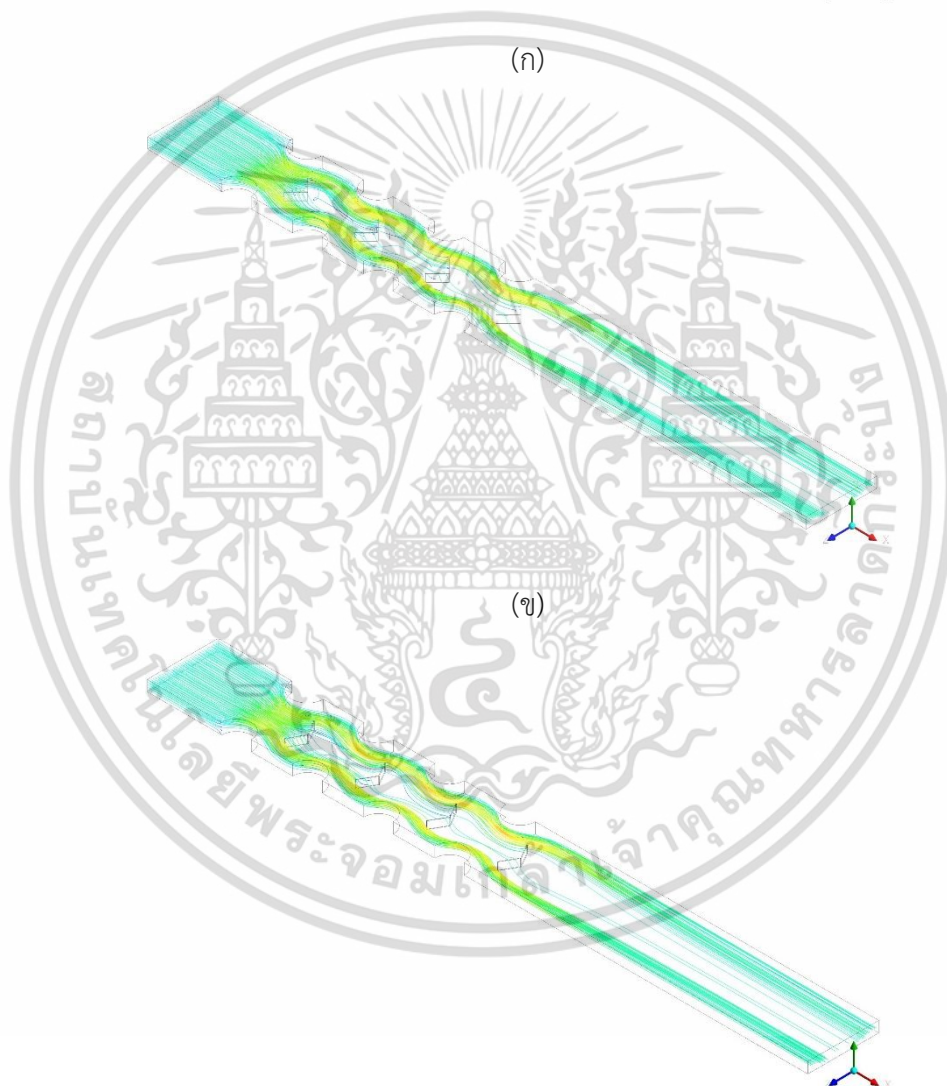


รูปที่ 5.3 เส้นกระแสการไหล 3 มิติ ครีบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แถว ด้านหลังท่อ มุมปะทะการไหล 30°
ทิศทาง V-Downstream สำหรับ (ก) ความสูงของปีก 0.5H, (ข) ความสูงของปีก 0.7H
และ (ค) ความสูงของปีก 0.9H

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



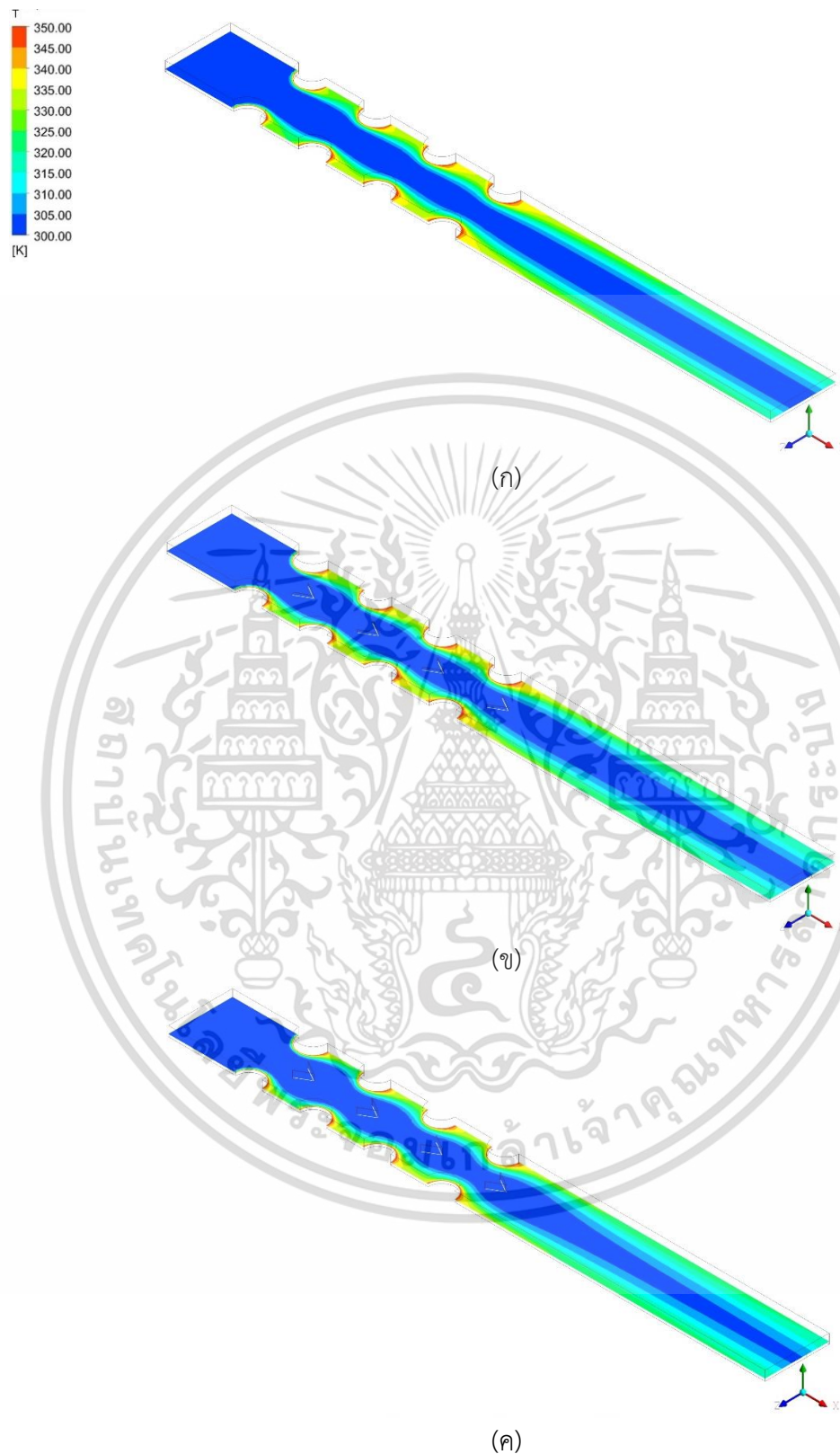
(ข)

(ค)

รูปที่ 5.4 เส้นกระแสการไหล 3 มิติ ครีบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แถว ด้านหลังท่อ
ทิศทาง V-Downstream ความสูง 0.7H Re 600 สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30°
(ข) มุมปะทะการไหล 45° และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.1.1.2 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน



รูปที่ 5.5 การกระจายตัวของอุณหภูมิ Re 600 สำหรับ (ก) ครีบเรียบ,

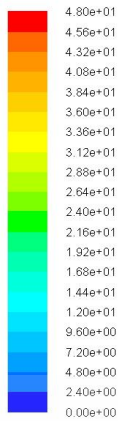
(ข) ครีบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แถว ด้านหลังท่อ ทิศทาง V-Downstream มุมปะทะการไหล 30° ความสูง $0.5H$

(ค) ครีบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แถว ด้านหลังท่อ ทิศทาง V-Downstream มุมปะทะการไหล 30° ความสูง $0.9H$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Nusselt Number



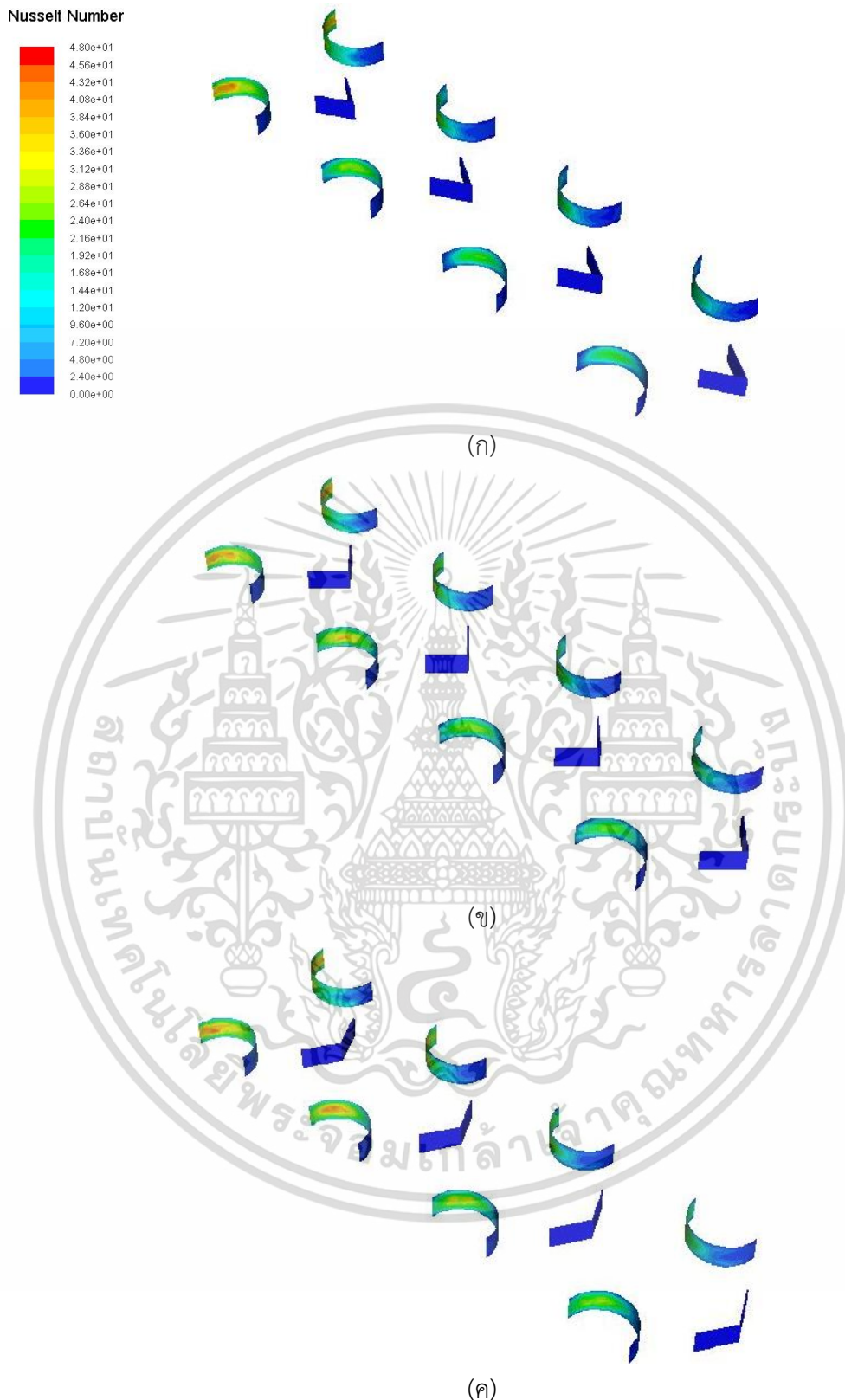
รูปที่ 5.6 การกระจายตัวของค่าเลขนัสเซลบริเวณผิวท่อ Re 600 สำหรับ (ก) ครีบเรียบ

(ข) ครีบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แถว ด้านหลังท่อ ทิศทาง V-Downstream มุมปะทะการไหล 30° ความสูง 0.5H

(ค) ครีบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แถว ด้านหลังท่อ ทิศทาง V-Downstream มุมปะทะการไหล 30° ความสูง 0.9H

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ในการค้า

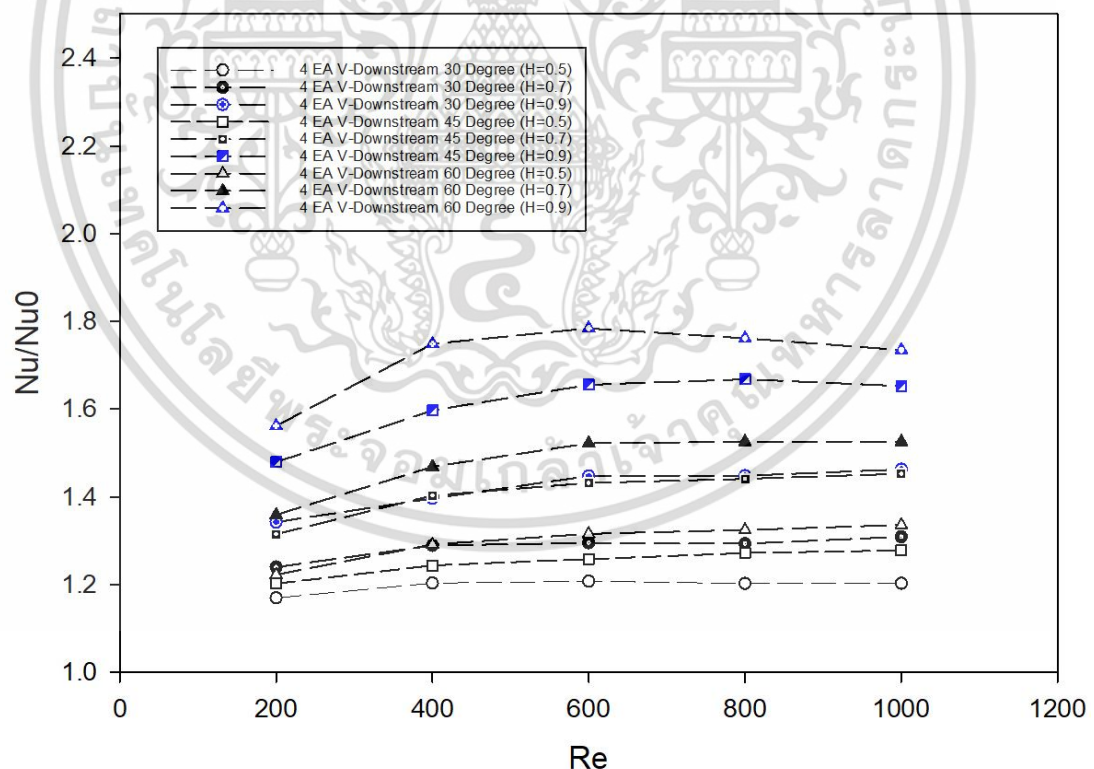
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 การกระจายตัวของค่าเลขนัสเซลบริเวณผิวท่อ ครีบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แถว ด้านหลังท่อ ทิศทาง V-Downstream ความสูง $0.9H$ Re 600 สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30° , (ข) มุมปะทะการไหล 45° และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน พบว่ากระแสหมุนวนที่เกิดขึ้นด้านหลังของปีกรูปตัววี ที่ความสูง 0.5H, 0.9H แสดงดังรูปที่ 5.5 (ข) (ค) จะทำให้กระแสการไหลไหลไปกระแทกกับบริเวณผนังด้านบนและด้านล่างของครีบ ทำให้มีการถ่ายเทความร้อนไปยังผนังท่อได้มากขึ้นกว่าครีบเรียบ โดยที่ความสูงของปีกรูปตัววี 0.9H จะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด เนื่องจากที่ความสูงของปีกมีค่ามากจะเป็นการบังคับทิศทางของกระแสการไหลให้สามารถเข้าไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับผนังท่อได้มากยิ่งขึ้น เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของความสูงของปีกรูปตัววี ดังรูปที่ 5.6 (ข) (ค) แสดงการกระจายตัวของค่าเลขนีสเซลบริเวณผิวท่อที่มีการติดตั้งปีกรูปตัววี ที่ความสูง 0.5H และ 0.9H ตามลำดับ พบว่าจะมีการกระจายตัวที่สูงกว่าครีบเรียบ โดยที่ความสูงของปีก 0.9H จะให้การกระจายตัวของค่าเลขนีสเซลที่สูงที่สุด และเมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของมุมปะทะการไหลของปีก ที่ความสูง 0.9H แสดงดังรูปที่ 5.7 (ก) (ข) และ (ค) พบว่าการกระจายตัวของตัวเลขนีสเซลบริเวณผิวท่อจะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน และที่มุมปะทะการไหล 60° จะให้ค่าคอนทริวี่สแตงที่บริเวณขอบที่มากกว่า ทั้งนี้อาจเนื่องจากมุมปะทะการไหลที่มากขึ้น จะส่งผลให้ความรุนแรงของการไหลหมุนวนและการกระแทกของกระแสการไหลที่บริเวณผิวท่อมากขึ้น ซึ่งการกระแทกของกระแสการไหลเป็นปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้มากขึ้น



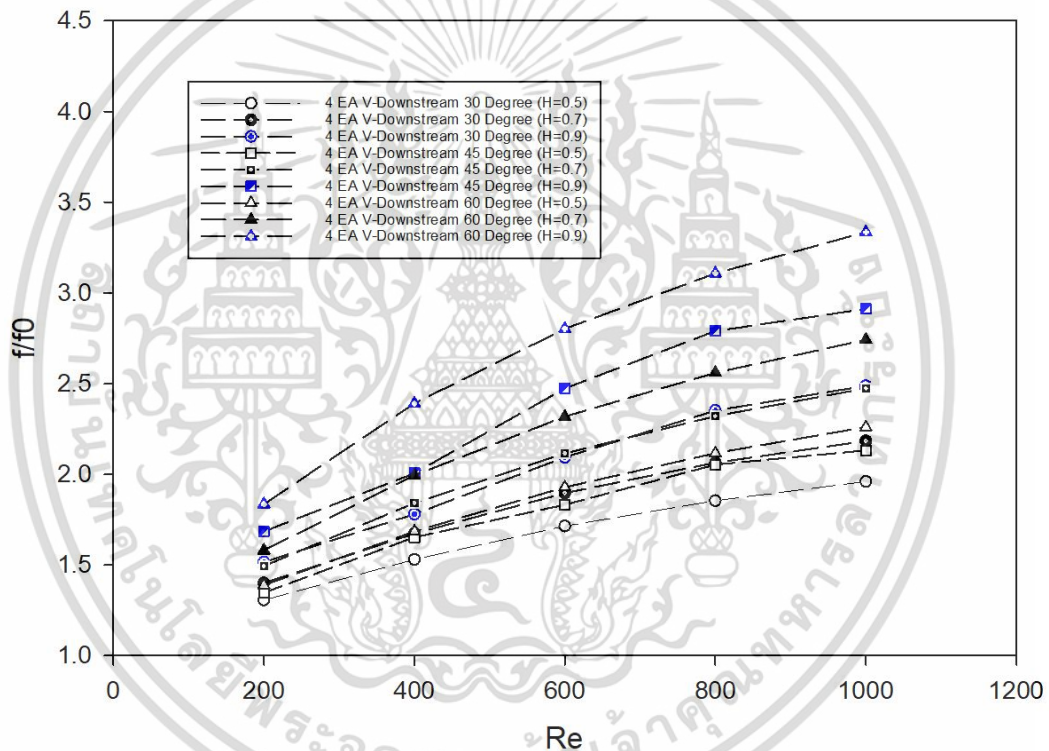
รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนีสเซลและเลขเรย์โนลด์

สำหรับการติดตั้งปีกรูปตัววี แบบ 4 แถว ด้านหลังท่อ ทิศทาง V-Downstream

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.8 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเชิลและเลขเรย์โนลด์ของครีปที่มีการติดตั้งปีกรูปตัววีที่ความสูงต่าง ๆ ที่มุมปะทะการไหลต่าง ๆ พบว่า เมื่อความสูงของปีกเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเชิลเพิ่มมากขึ้น และเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เลขนัสเชิลเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน โดยที่เลขนัสเชิลของปีกรูปตัววีที่มีมุมปะทะการไหล 30° จะมีค่าน้อยที่สุด และเลขนัสเชิลจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมุมปะทะการไหลของปีกเพิ่มขึ้นเช่นกัน สำหรับเลขเรย์โนลด์ 200 ที่ความสูง $0.5H$ มุมปะทะการไหล 30° มีค่าอัตราส่วนเลขนัสเชิลน้อยที่สุดคือ 1.16 ขณะที่ความสูงของปีก $0.9H$ มุมปะทะการไหล 60° เลขเรย์โนลด์ 600 มีค่าอัตราส่วนเลขนัสเชิลมากที่สุดคือ 1.77 เมื่อเทียบกับครีปเรียบ

5.1.1.1.3 การสูญเสียความดัน

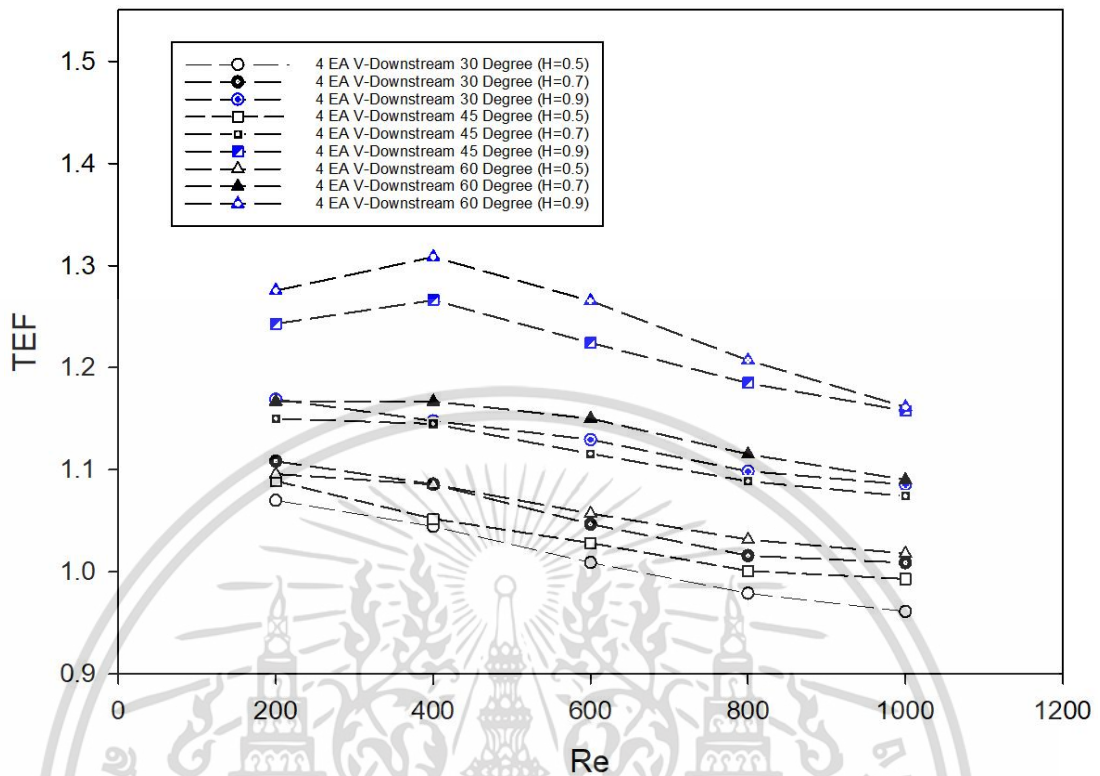


รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานและเลขเรย์โนลด์สำหรับการติดตั้งปีกรูปตัววี แบบ 4 แฉก ด้านหลังท่อ ทิศทาง V-Downstream

รูปที่ 5.9 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานและเลขเรย์โนลด์ของครีปที่มีการติดตั้งปีกรูปตัววีที่ความสูงต่าง ๆ ที่มุมปะทะการไหลต่าง ๆ พบว่า เมื่อความสูงของปีกเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งเมื่อเลขเรย์โนลด์ และมุมปะทะการไหลของปีกเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน โดยที่อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานจะมีค่ามากที่สุด คือ มุมปะทะการไหล 60° เลขเรย์โนลด์ 1,000 มีค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมากที่สุดคือ 3.36 เมื่อเทียบกับครีปเรียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.1.1.1.4 สมรรถนะเชิงความร้อน



รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อนและเลขเรย์โนลด์ สำหรับการติดตั้งปีกรูปตัววี แบบ 4 แฉก ด้านหลังท่อ ทิศทาง V-Downstream

รูปที่ 5.10 แสดงถึงความสัมพันธ์สมรรถนะเชิงความร้อนและเลขเรย์โนลด์ ของครีบที่มีการติดตั้งปีกรูปตัววีที่มีความสูงต่าง ๆ ที่มุมปะทะการไหลต่าง ๆ พบว่า เมื่อความสูงของปีก และมุมปะทะการไหลเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้สมรรถนะเชิงความร้อนเพิ่มมากขึ้น และเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น สมรรถนะเชิงความร้อนมีแนวโน้มลดลง โดยที่ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนจะมีค่ามากที่สุด ณ มุมปะทะการไหล 60° เลขเรย์โนลด์ 400 มีค่าที่สุดคือ 1.32 เมื่อเทียบกับครีบเรียบ

5.1.1.1.2 แบบจำลอง ครีบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แถว ด้านหลังท่อ ทิศทาง V-Upstream

การติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แถว บริเวณครีบบ้านล่าง ระยะติดตั้งห่างจากทางเข้าแบบจำลอง 25.4 mm หรือด้านหลังท่อ ทิศทาง V-Upstream มุมปะทะการไหล 30° , 45° และ 60° อัตราส่วนความสูงของปีกรูปตัววี เท่ากับ 0.5H, 0.7H และ 0.9H ของความสูงระหว่างครีบ โดยความสูงระหว่างครีบเท่ากับ 3.85 mm ความหนาของปีก 0.2 mm แสดงดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 ตัวอย่างแบบจำลองครีบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แถว ด้านหลังท่อ ทิศทาง V-Upstream

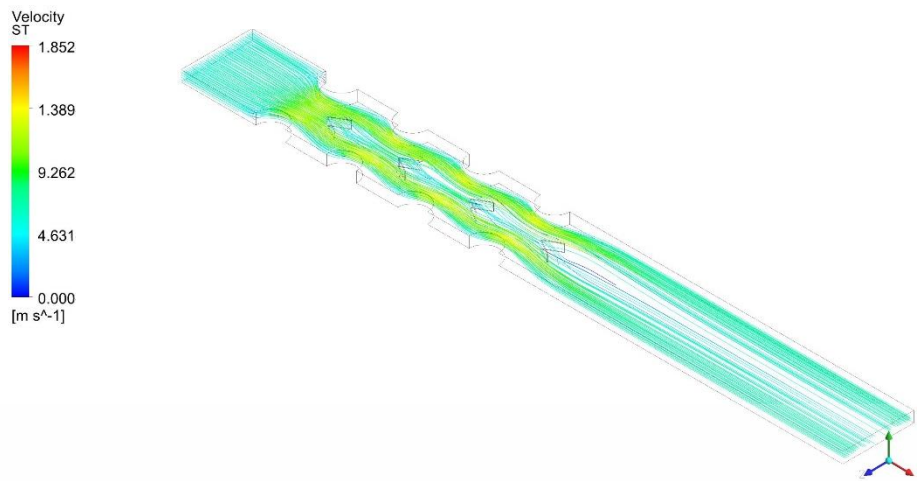
5.1.1.1.2.1 พฤติกรรมการไหล

รูปที่ 5.12 (ก) (ข) และ (ค) แสดงการเปรียบเทียบเส้นกระแสการไหลของอากาศสำหรับครีบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี ทิศทาง V-Upstream ความสูง 0.9H ของความสูงระหว่างครีบ เลขเรย์โนลด์ 600 ที่มุมปะทะการไหลต่างกัน พบว่าพฤติกรรมการไหลของทั้งสามกรณีมีลักษณะคล้ายคลึงกัน คือจะพบว่าเกิดกระแสหมุนวนบริเวณด้านหลังของปีกรูปตัววีจำนวน 2-4 คู่ นอกจากกระแสหมุนวนปกติที่เกิดขึ้นบริเวณด้านหลังของท่อ ก่อให้เกิดกระแสการไหลแบบหมุนวนคู่แบบสวนทาง มีลักษณะการหมุนเป็นแบบ common flow down และจะเกิดการกระแทกที่แผ่นครีบใกล้กับมุมตัววีก่อนจะสไลด์ไปบริเวณใกล้ผิวท่อ ซึ่งกระแสหมุนวนที่เกิดขึ้นดังกล่าวจะไหลกระแทกผนังด้านบนและด้านล่างของครีบ แต่อย่างไรก็ตามการติดตั้งตัวปีกย่อมส่งผลให้เกิดค่าความดันตกคร่อมที่เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน

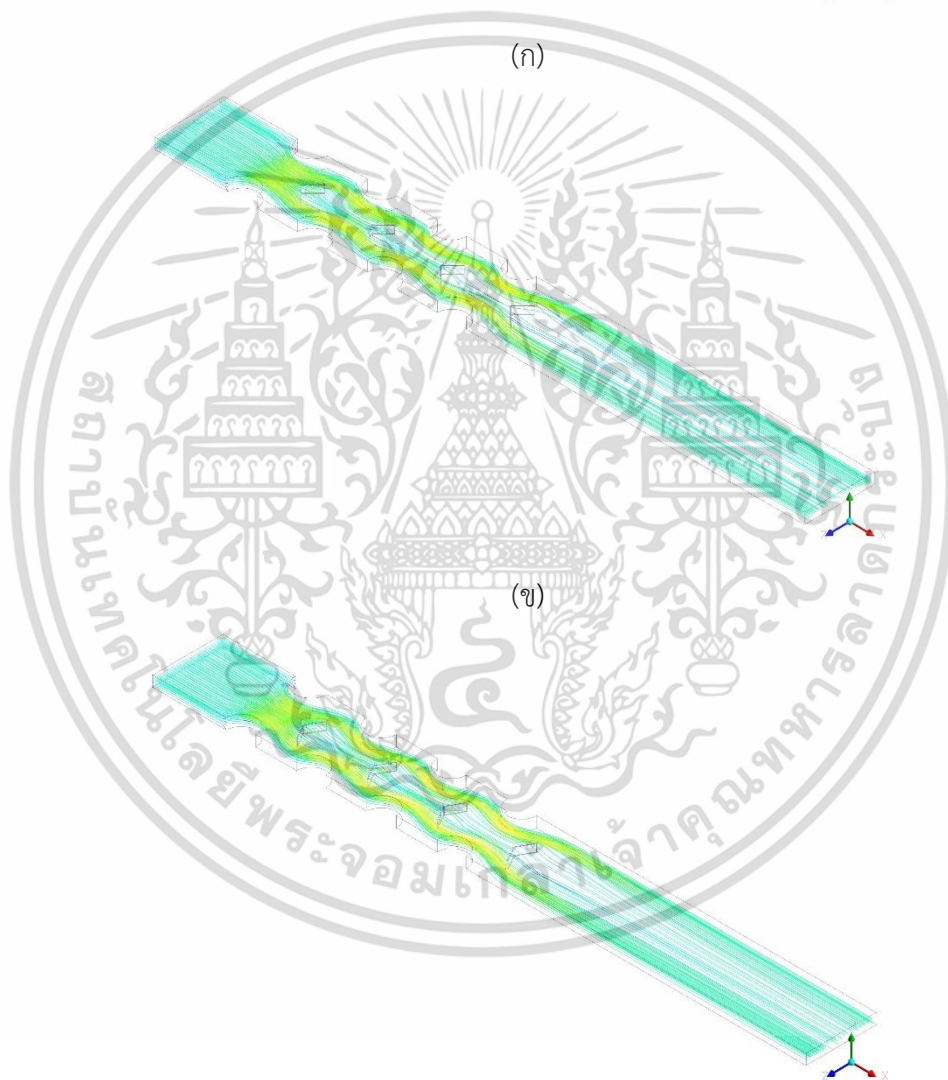


รูปที่ 5.12 เส้นกระแสการไหลบนระนาบตามการไหล ครีบทึ่ติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แฉก ด้านหลังท่อ
ทิศทาง V-Upstream ความสูง $0.9H_{Re} 600$ สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30°
(ข) มุมปะทะการไหล 45° และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



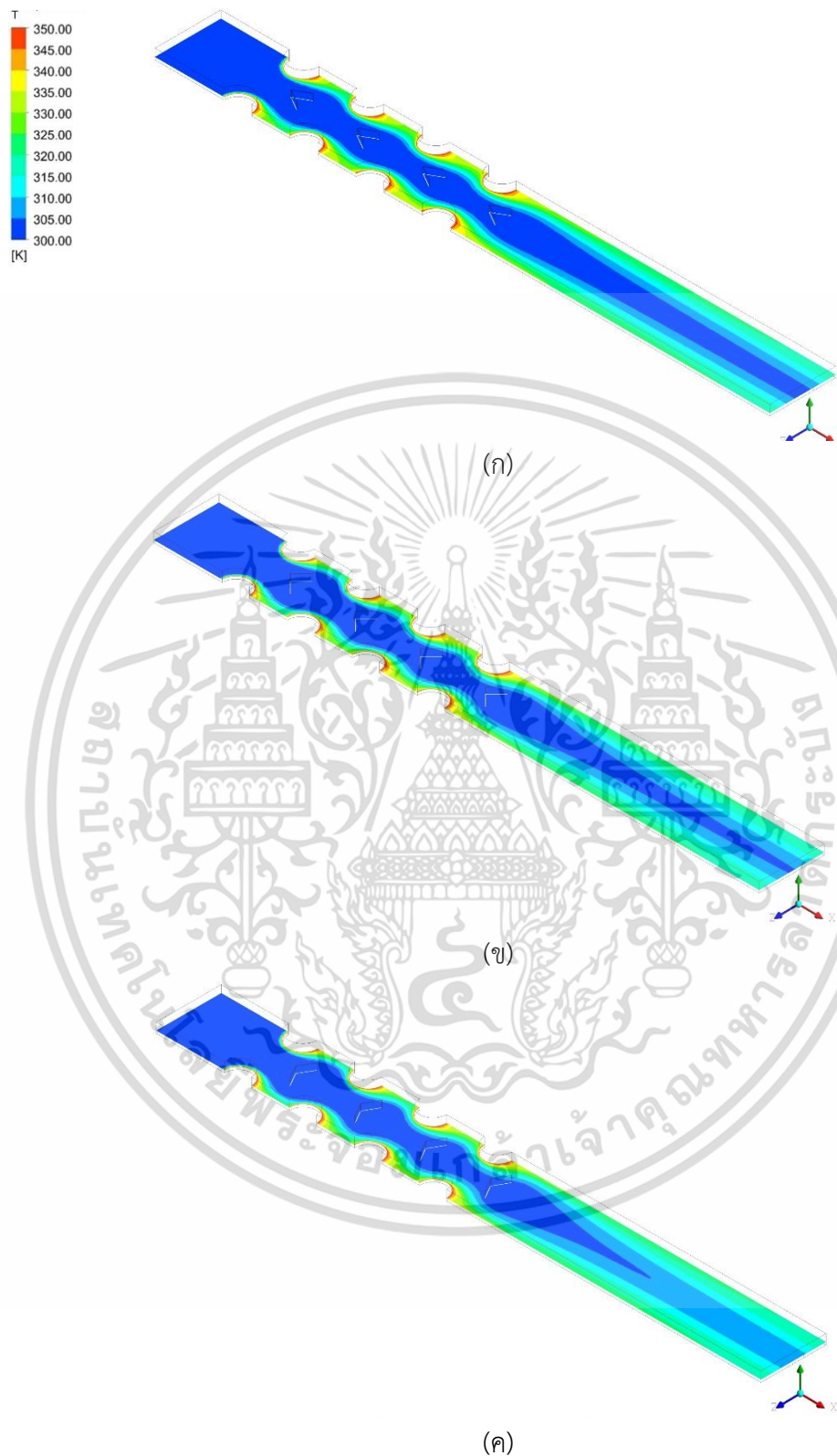
(ข)

(ค)

รูปที่ 5.13 เส้นกระแสการไหล 3 มิติ ครีบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แฉก ด้านหลังท่อทิศทาง V-
Upstream ความสูง $0.9H$ Re 600 สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30°
(ข) มุมปะทะการไหล 45° และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°

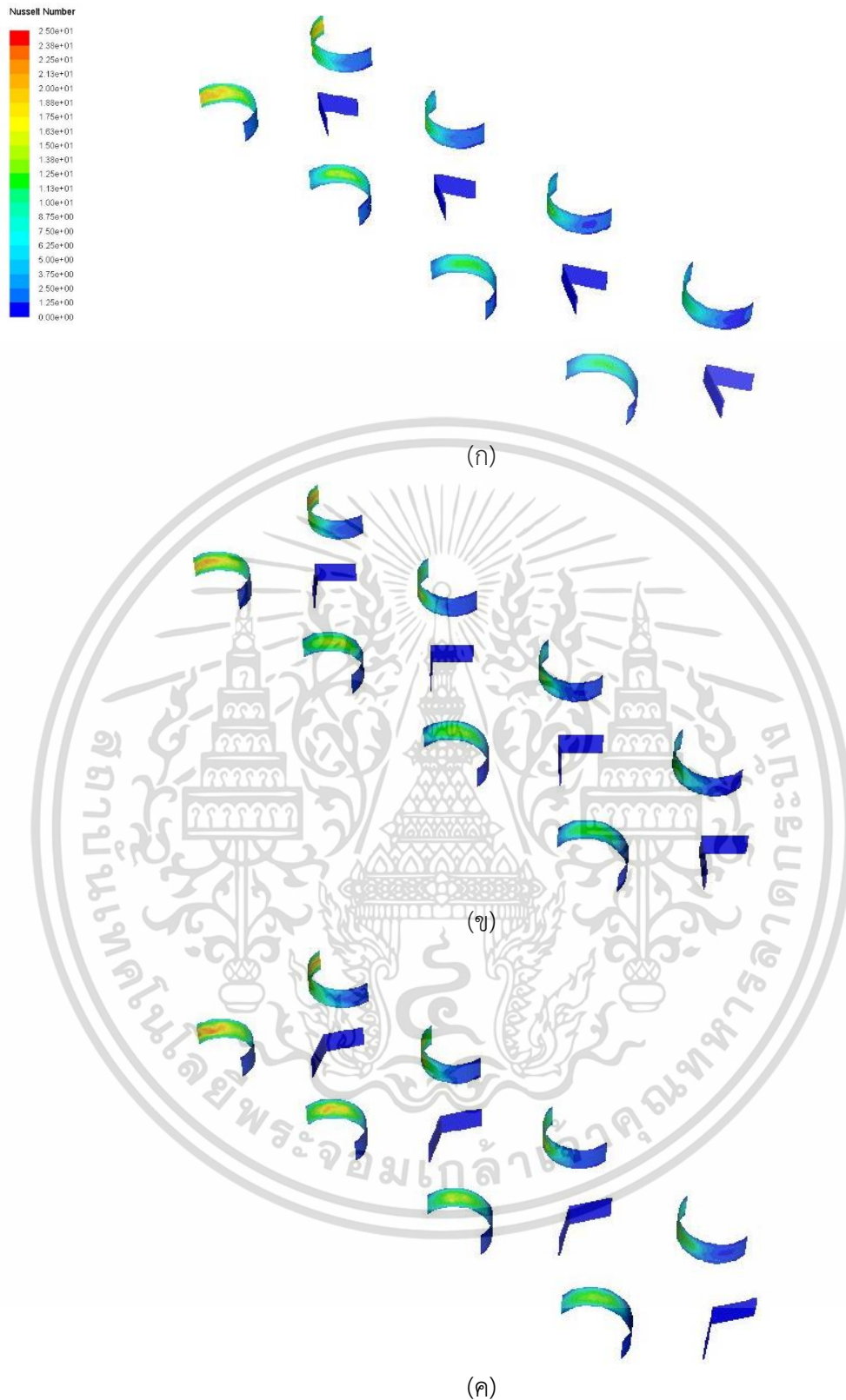
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.1.1.2.2 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน



รูปที่ 5.14 การกระจายตัวของอุณหภูมิ ครีบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แถว ด้านหลังท่อ
ทิศทาง V-Upstream ความสูง $0.9H$ Re 600 สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30°
(ข) มุมปะทะการไหล 45° และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°

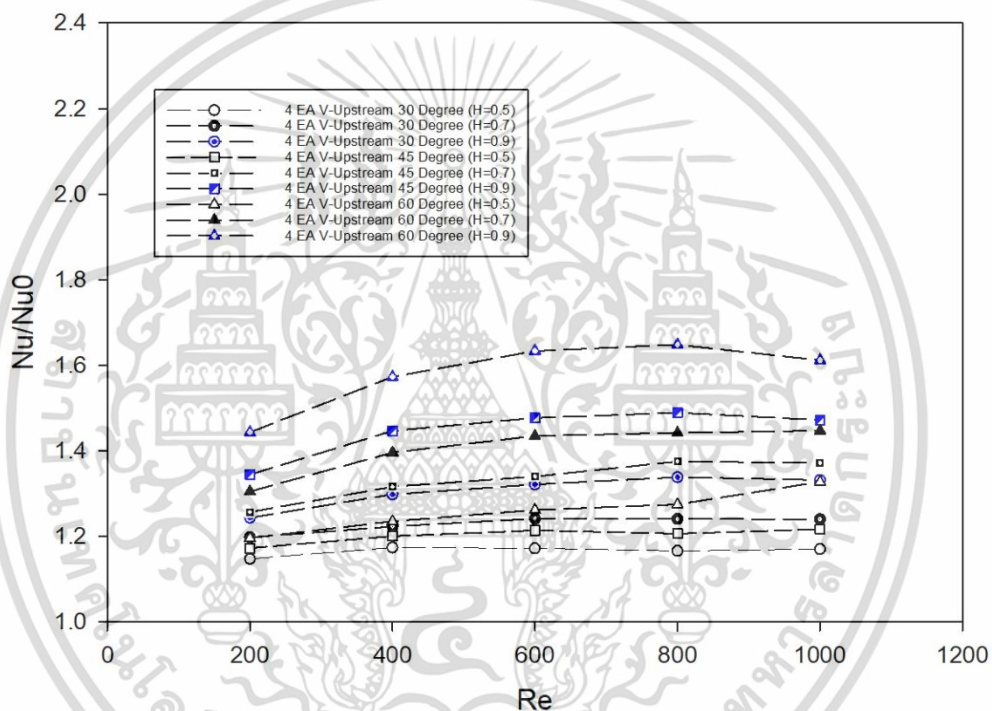
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.15 การกระจายตัวของค่าเลขนัสเซลบริเวณผิวท่อ ครีบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แฉก ด้านหลังท่อ ทิศทาง V-Upstream ความสูง $0.9H$ Re 600 สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30° (ข) มุมปะทะการไหล 45° และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน พบว่ากระแสหมุนวนที่เกิดขึ้นด้านหลังของปีกรูปตัววี ทิศทางสวนกระแสการไหล (V-Upstream) ทำให้เกิดการไหลหมุนวนและเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดียิ่งขึ้น สังเกตคอนทัวร์อุณหภูมิของสีน้ำเงินที่ลดลง แสดงดังรูปที่ 5.14 (ก) (ข) และ (ค) และเมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของมุมปะทะการไหลของปีก ที่ความสูง 0.9H แสดงดังรูปที่ 5.15 (ก) (ข) และ (ค) พบว่าการกระจายตัวของตัวเลขนัสเซลบริเวณผิวท่อจะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน และที่มุมปะทะการไหล 60° จะให้ค่าคอนทัวร์สีแดงที่บริเวณขอบที่มากกว่า ทั้งนี้อาจเนื่องจากมุมปะทะการไหลที่มากขึ้น จะส่งผลให้ความรุนแรงของการไหลหมุนวนและการรบกวนของกระแสการไหลที่บริเวณผิวท่อมากขึ้น ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้มากขึ้น

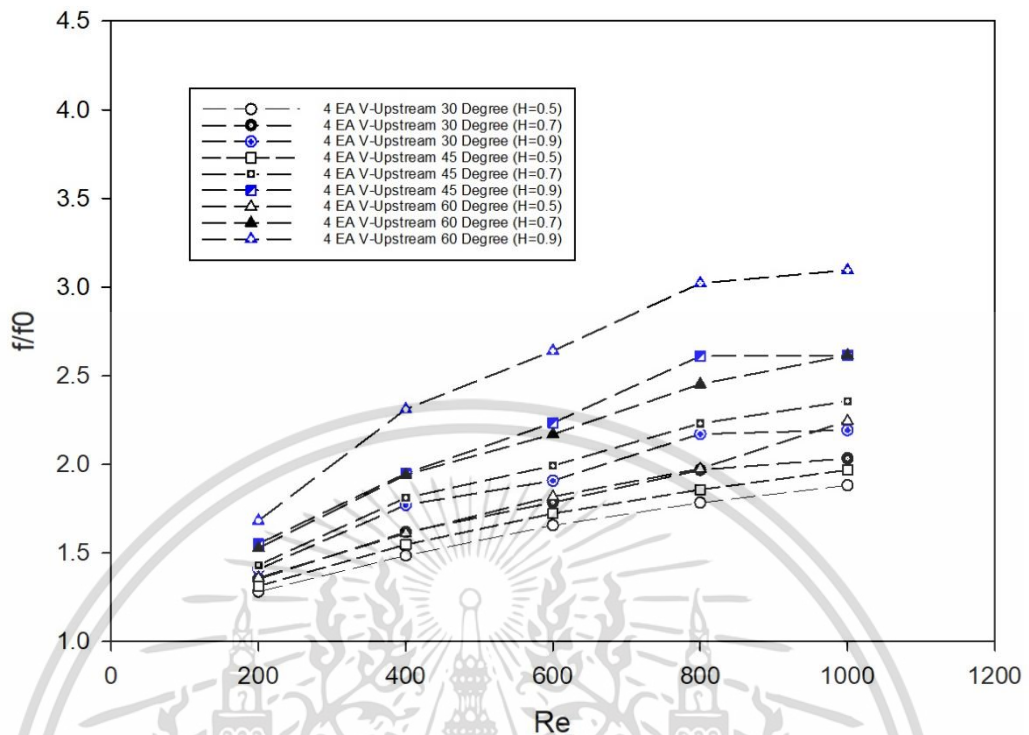


รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลและเลขเรย์โนลด์ สำหรับการติดตั้งปีกรูปตัววี แบบ 4 แถว ด้านหลังท่อ ทิศทาง V-Upstream

รูปที่ 5.16 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลและเลขเรย์โนลด์ สำหรับการติดตั้งปีกรูปตัววี แบบ 4 แถว ด้านหลังท่อ ทิศทาง V-Upstream ที่ความสูงต่าง ๆ และมุมปะทะการไหลต่าง ๆ พบว่า เมื่อความสูงของปีกเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลเพิ่มมากขึ้น และเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เลขนัสเซลเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน โดยเลขนัสเซลของการติดตั้งปีกรูปตัววี ที่มุมปะทะการไหล 30° จะมีค่าน้อยที่สุด และเลขนัสเซลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมุมปะทะการไหลของปีกเพิ่มขึ้นเช่นกัน สำหรับเลขเรย์โนลด์ 200 ที่ความสูง 0.5H มุมปะทะการไหล 30° มีค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลน้อยที่สุดคือ 1.14 ขณะที่ความสูงของปีก 0.9H มุมปะทะการไหล 60° เลขเรย์โนลด์ 800

มีค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลมากที่สุด คือ 1.61 เมื่อเทียบกับคูริบเรียว

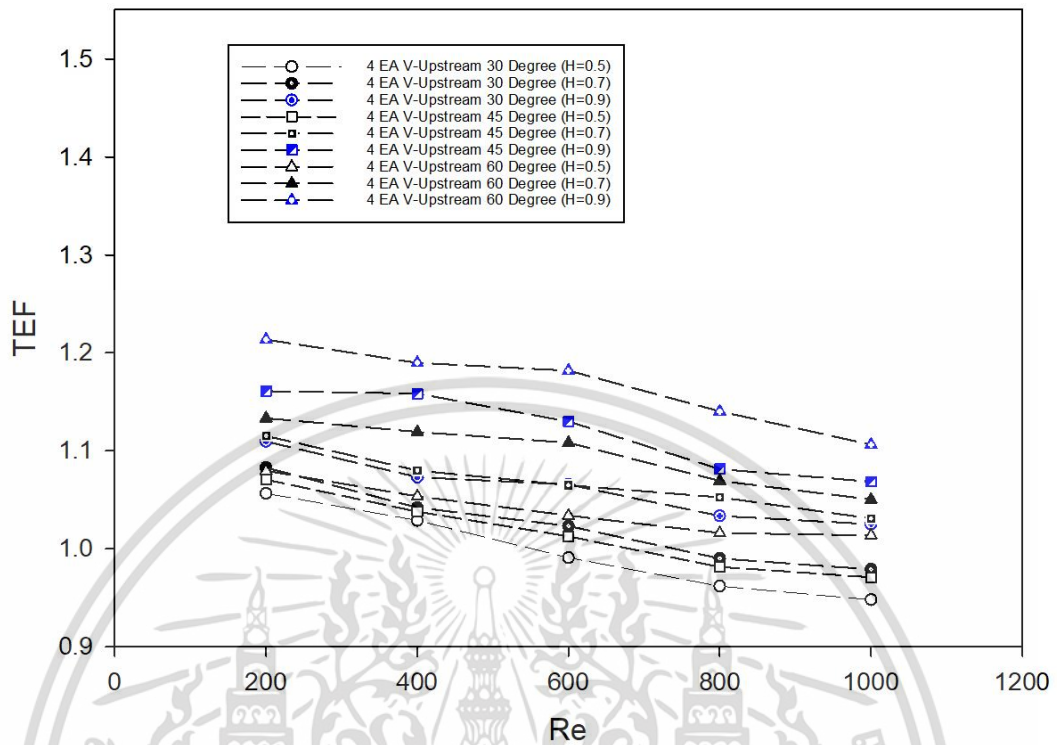
5.1.1.1.2.3 การสูญเสียความดัน



รูปที่ 5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานและเลขเรย์โนลด์ สำหรับการติดตั้งปีกรูปตัววี แบบ 4 แถว ด้านหลังท่อ ทิศทาง V-Upstream

รูปที่ 5.17 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานและเลขเรย์โนลด์ สำหรับการติดตั้งปีกรูปตัววี แบบ 4 แถว ด้านหลังท่อ ทิศทาง V-Upstream ที่ความสูงต่าง ๆ และมุมปะทะการไหลต่าง ๆ พบว่า เมื่อความสูงของปีกเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งเมื่อเลขเรย์โนลด์ และมุมปะทะการไหลของปีกเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน โดยที่อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานจะมีค่ามากที่สุดคือ มุมปะทะการไหล 60° เลขเรย์โนลด์ 1,000 มีค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมากที่สุดคือ 3.26 เมื่อเทียบกับครีบริเยบ

5.1.1.1.2.4 สมรรถนะเชิงความร้อน



รูปที่ 5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อนและเลขเรย์โนลด์ สำหรับการติดตั้งปีกรูปตัววี แบบ 4 แถว ด้านหลังท่อ ทิศทาง V-Upstream

รูปที่ 5.18 แสดงถึงความสัมพันธ์สมรรถนะเชิงความร้อนและเลขเรย์โนลด์ สำหรับการติดตั้งปีกรูปตัววี แบบ 4 แถว ด้านหลังท่อ ทิศทาง V-Upstream ที่ความสูงต่าง ๆ และมุมปะทะการไหลต่าง ๆ พบว่า เมื่อความสูงของปีก และมุมปะทะการไหลเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้สมรรถนะเชิงความร้อนเพิ่มมากขึ้น และเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น สมรรถนะเชิงความร้อนมีแนวโน้มลดลง โดยที่ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนจะมีค่ามากที่สุด ณ มุมปะทะการไหล 60° เลขเรย์โนลด์ 200 มีค่าที่สุดคือ 1.21 เมื่อเทียบกับครีบเรียบ

5.1.1.2 ปีกรูปตัววี ติดตั้งแบบ 4 แถว (4EA V-Winglet) กึ่งกลางท่อ

5.1.1.2.1 แบบจำลอง ครีบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แถว กึ่งกลางท่อ ทิศทาง V-Downstream

การติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แถว บริเวณครีบด้านล่าง ระยะติดตั้งห่างจากทางเข้าแบบจำลอง 12.7 mm หรือกึ่งกลางท่อ ในทิศทางตามกระแสการไหล (V-Downstream) มุมปะทะการไหล 30° , 45° และ 60° อัตราส่วนความสูงของปีกรูปตัววี เท่ากับ 0.5H, 0.7H และ 0.9H ของความสูงระหว่างครีบ โดยความสูงระหว่างครีบเท่ากับ 3.85 mm ความหนาของปีก 0.2 mm แสดงดังรูปที่ 5.19



รูปที่ 5.19 ตัวอย่างแบบจำลองครีบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แถว กึ่งกลางท่อ ทิศทาง V-Downstream

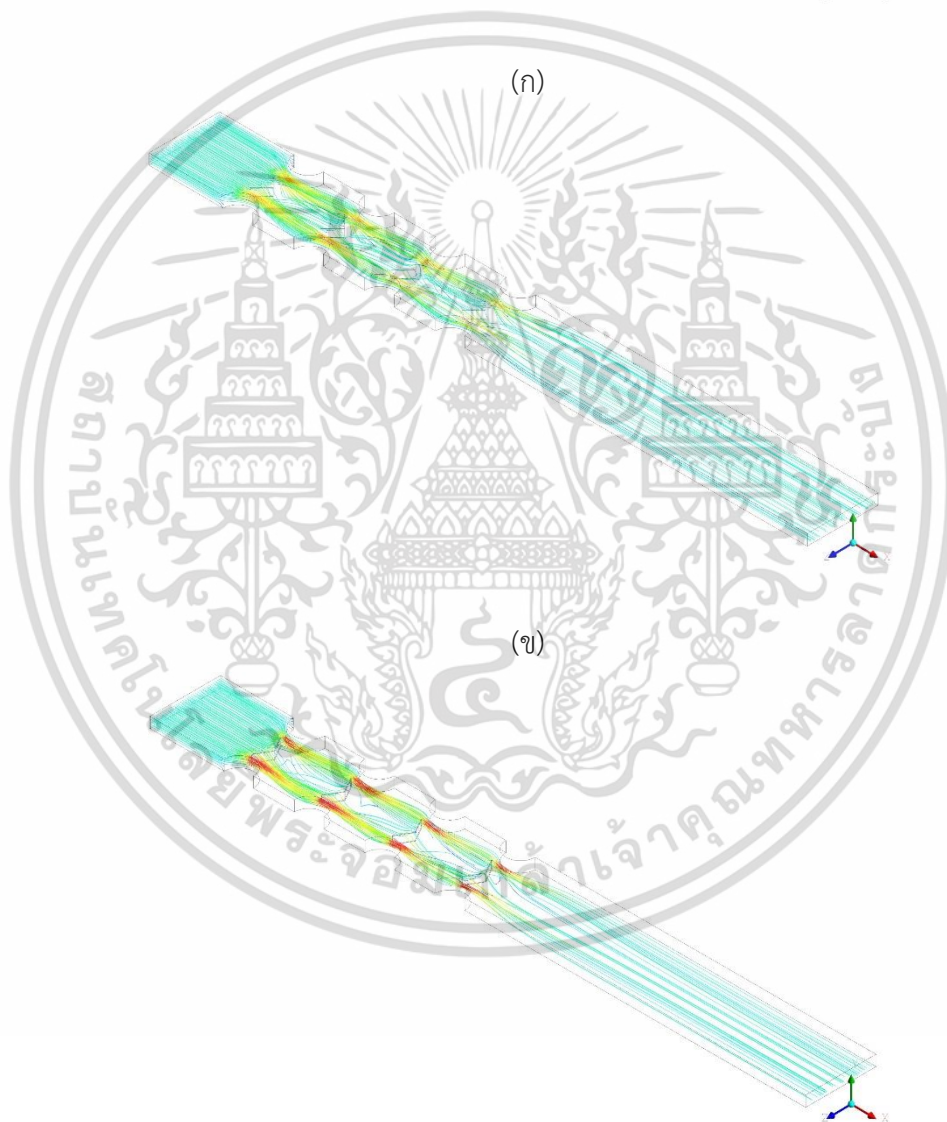
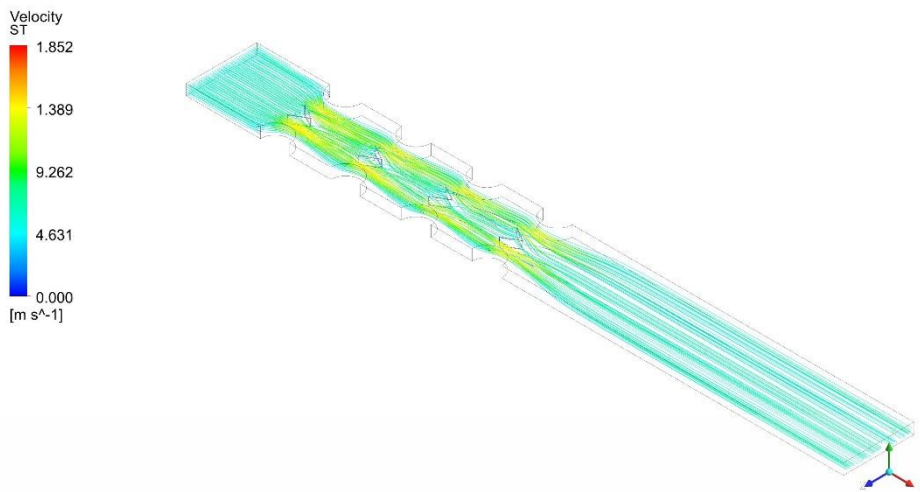
5.1.1.2.1.1 พฤติกรรมการไหล

รูปที่ 5.20 (ก) (ข) และ (ค) แสดงการเปรียบเทียบเส้นกระแสการไหลของอากาศสำหรับครีบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แถว กึ่งกลางท่อ ทิศทาง V-Downstream ความสูง 0.9H เลขเรย์ โนลด์ 600 ที่มุมปะทะการไหลต่างกัน พบว่าพฤติกรรมการไหลของทั้งสามกรณีมีลักษณะคล้ายคลึงกัน คือจะพบว่าการเกิดกระแสหมุนวนบริเวณด้านหลังของปีกรูปตัววีจำนวน 2-4 คู่ นอกจากกระแสหมุนวนปกติที่เกิดขึ้นบริเวณด้านหลังของท่อ ซึ่งกระแสหมุนวนที่เกิดขึ้นดังกล่าวจะไหลกระแทกผนังด้านบนและด้านล่างของครีบ และไหลกระแทกกับผิวท่อก่อนด้วย ซึ่งแตกต่างจากการติดตั้งปีกด้านหลังท่อ แต่อย่างไรก็ตามการติดตั้งตัวปีกย่อมส่งผลให้เกิดค่าความดันตกคร่อมที่เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน



รูปที่ 5.20 เส้นกระแสการไหลบนระนาบตามการไหล ครีบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แฉก กึ่งกลางท่อ
ทิศทาง V-Downstream ความสูง $0.9H$ Re 600 สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30°

(ข) มุมปะทะการไหล 45° และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นแก่ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



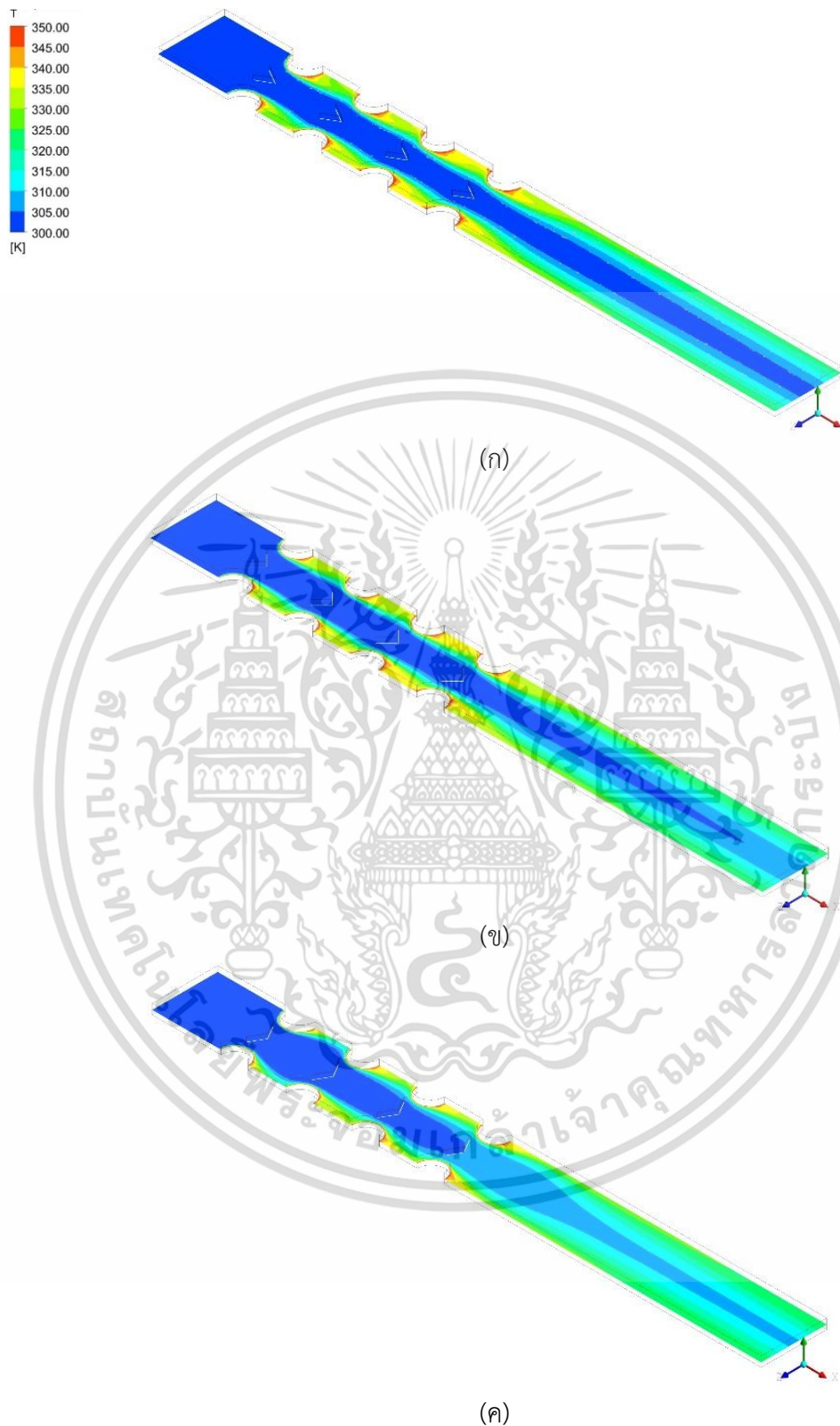
(ค)

รูปที่ 5.21 เส้นกระแสการไหล 3 มิติ ครีบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แถว กึ่งกลางท่อ
ทิศทาง V-Downstream ความสูง $0.9H$ Re 600 สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30°

(ข) มุมปะทะการไหล 45° และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°

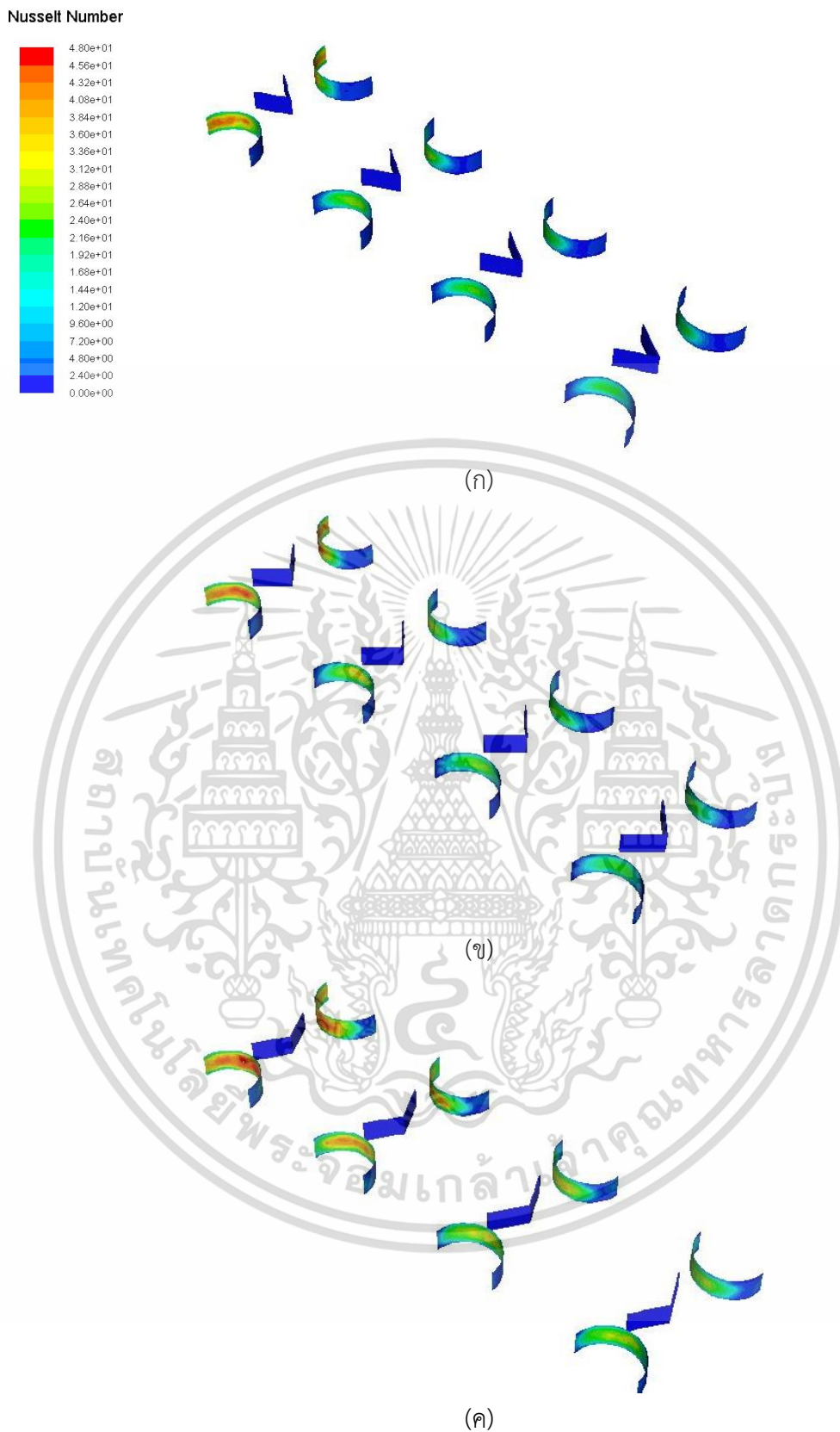
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.1.2.1.2 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน



รูปที่ 5.22 การกระจายตัวของอุณหภูมิ ครีบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แถว กึ่งกลางท่อ
ทิศทาง V-Downstream ความสูง $0.9H$ Re 600 สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30°
(ข) มุมปะทะการไหล 45° และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°

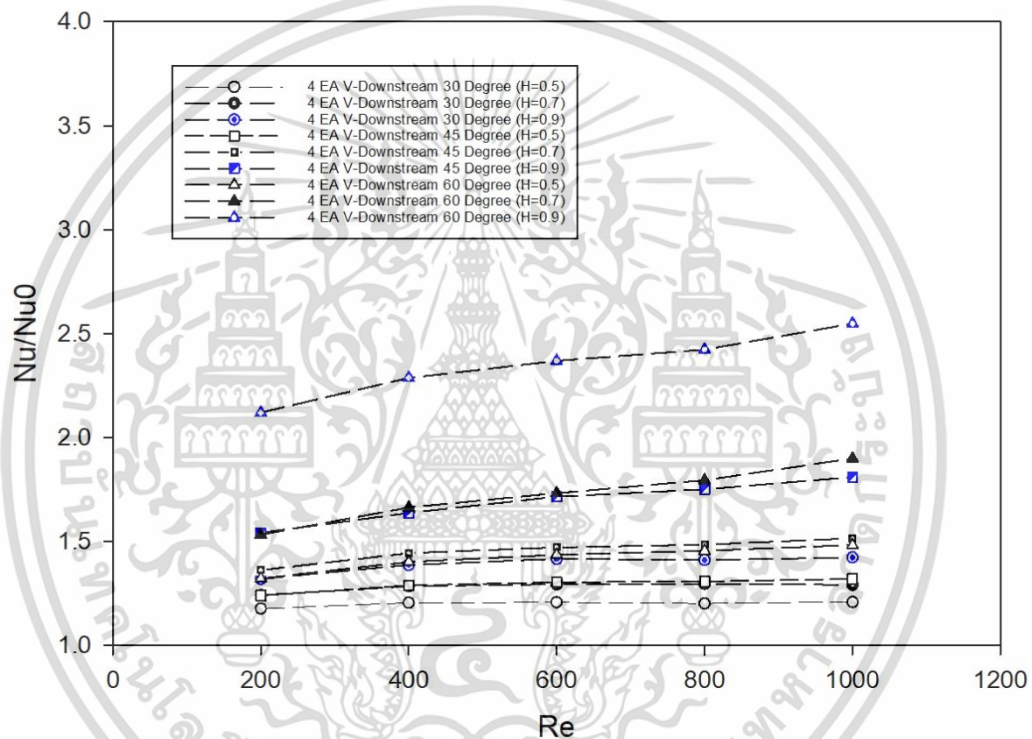
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.23 การกระจายตัวของค่าเลขนัสเซลบริเวณผิวท่อน ครีบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แฉก กึ่งกลางท่อ ทิศทาง V-Downstream ความสูง $0.9H$ Re 600 สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30° (ข) มุมปะทะการไหล 45° และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน พบว่ากระแสหมุนวนที่เกิดขึ้นด้านหลังของปีกรูปตัววี กึ่งกลางท่อ ทิศทาง V-Downstream ทำให้เกิดการไหลหมุนวนและเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดี ยิ่งขึ้น สังเกตคอนทอร์นอุณหภูมิของสีน้ำเงินที่ลดลง ดังรูปที่ 5.22 (ก) (ข) และ (ค) และเมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของมุมปะทะการไหลของปีก ที่ความสูง 0.9H ดังรูปที่ 5.23 (ก) (ข) และ (ค) พบว่าการกระจายตัวของตัวเลขนัสเซลบริเวณผิวท่อจะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน และที่มุมปะทะการไหล 60° จะให้ค่าคอนทอร์นสีแดงที่บริเวณขอบที่มากกว่า ทั้งนี้อาจเนื่องจากมุมปะทะการไหลที่มากขึ้น ส่งผลให้ความรุนแรงของการไหลหมุนวนและการกรแตกของกระแสการไหลที่บริเวณผิวท่อมากขึ้น ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้มากขึ้น

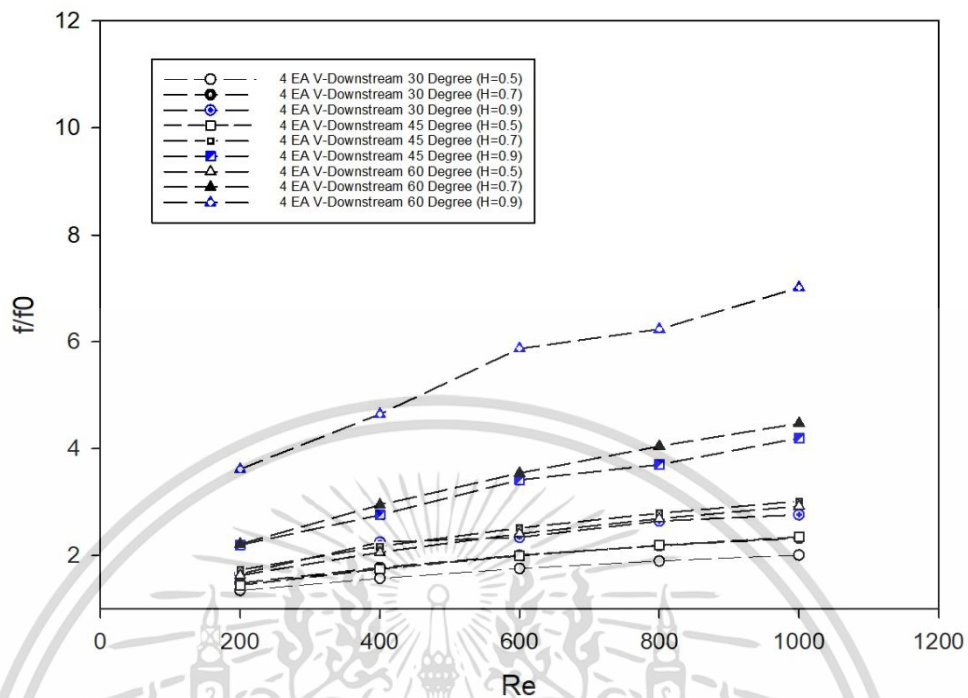


รูปที่ 5.24 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลและเลขเรย์โนลด์ สำหรับการติดตั้งปีกรูปตัววี แบบ 4 แฉก กึ่งกลางท่อ ทิศทาง V-Downstream

รูปที่ 5.24 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลและเลขเรย์โนลด์ของครีบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี แบบ 4 แฉก กึ่งกลางท่อ ทิศทาง V-Downstream ที่ความสูงต่าง ๆ ที่มุมปะทะการไหลต่าง ๆ พบว่า เมื่อความสูงของปีกเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลเพิ่มมากขึ้น และเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เลขนัสเซลเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน โดยที่เลขนัสเซลของปีกรูปตัววีที่มีมุมปะทะการไหล 30° จะมีค่าน้อยที่สุด และเลขนัสเซลจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมุมปะทะการไหลของปีกเพิ่มขึ้นเช่นกัน สำหรับเลขเรย์โนลด์ 200 ที่ความสูง 0.5H มุมปะทะการไหล 30° มีค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลน้อยที่สุดคือ 1.18 ขณะที่ความสูงของปีก 0.9H มุมปะทะการไหล 60° เลขเรย์โนลด์ 600 มีค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลมากที่สุดคือ 2.54 เมื่อเทียบกับครีบเรียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

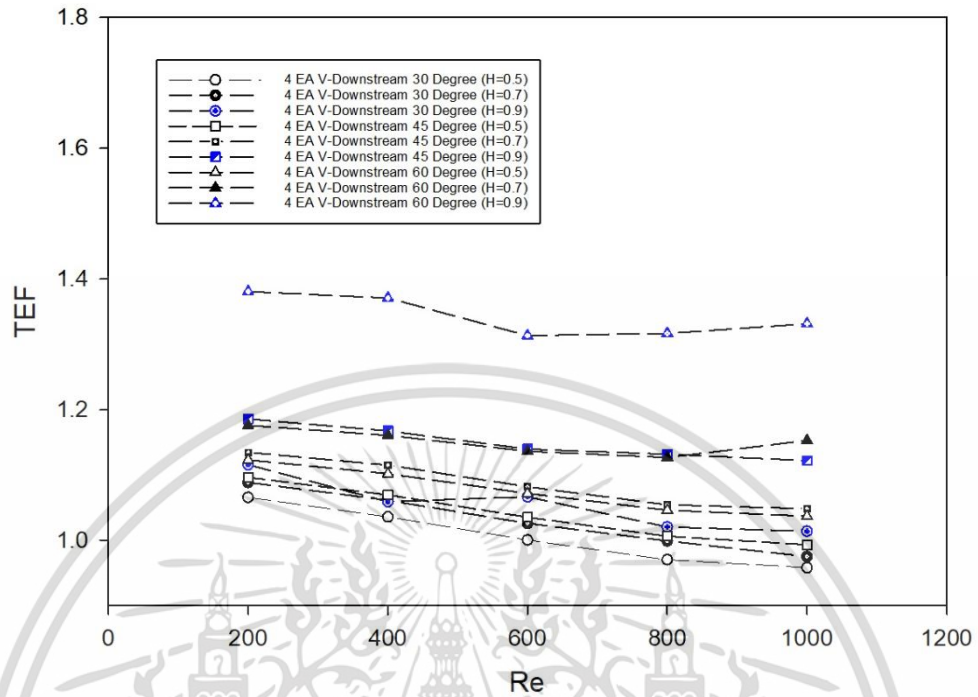
5.1.1.2.1.3 การสูญเสียความดัน



รูปที่ 5.25 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานและเลขเรย์โนลด์ สำหรับการติดตั้งปีกรูปตัววี แบบ 4 แถว กึ่งกลางท่อ ทิศทาง V-Downstream

รูปที่ 5.25 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานและเลขเรย์โนลด์ ของครีปที่ติดตั้งปีกรูปตัววี แบบ 4 แถว กึ่งกลางท่อ ทิศทาง V-Downstream ที่ความสูงต่าง ๆ และมุมปะทะการไหลต่าง ๆ พบว่า เมื่อความสูงของปีกเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งเมื่อเลขเรย์โนลด์ และมุมปะทะการไหลของปีกเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน โดยที่อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานจะมีค่ามากที่สุด คือ มุมปะทะการไหล 60° เลขเรย์โนลด์ 1,000 มีค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมากที่สุดคือ 7.01 เมื่อเทียบกับครีปเรียบ ซึ่งมีความมากกว่าการติดตั้งปีกด้านหลังท่อ เนื่องจากที่มุมปะทะการไหลสูงขึ้น ทำให้การไหลเป็นไปได้ยากขึ้น ทำให้เกิดความดันตกคร่อมเพิ่มขึ้นอย่างมาก ถึงแม้ว่ามุมปะทะการไหลที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ของไหลถูกเร่งความเร็วผ่านช่องว่างระหว่างปีก แต่บริเวณอื่นความเร็วของไหลจะลดลงอย่างมาก

5.1.1.2.1.4 สมรรถนะเชิงความร้อน



รูปที่ 5.26 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อนและเลขเรย์โนลด์ สำหรับการติดตั้งปีกรูปตัววี แบบ 4 แถว กึ่งกลางท่อ ทิศทาง V-Downstream

รูปที่ 5.26 แสดงถึงความสัมพันธ์สมรรถนะเชิงความร้อนและเลขเรย์โนลด์ ของครีที่ติดตั้งปีกรูปตัววี แบบ 4 แถว กึ่งกลางท่อ ทิศทาง V-Downstream ที่ความสูงต่าง ๆ และ มุมปะทะการไหลต่าง ๆ พบว่า เมื่อความสูงของปีก และมุมปะทะการไหลเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้สมรรถนะเชิงความร้อนเพิ่มมากขึ้น และเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น สมรรถนะเชิงความร้อนมีแนวโน้มลดลง โดยที่ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนจะมีค่ามากที่สุด ณ มุมปะทะการไหล 60° เลขเรย์โนลด์ 200 มีค่าที่สุดคือ 1.38 เมื่อเทียบกับครีเรียบ

5.1.1.2.2 แบบจำลอง ครีบบั๊ตติงปีกรูปตัววี 4 แถว กึ่งกลางท่อ ทิศทาง V-Upstream

การติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แถว บริเวณครีบด้านล่าง ระยะติดตั้งห่างจากทางเข้าแบบจำลอง 12.7 mm หรือกึ่งกลางท่อ ในทิศทาง V-Upstream มุมปะทะการไหล 30° , 45° และ 60° อัตราส่วนความสูงของปีกรูปตัววี เท่ากับ 0.5H, 0.7H และ 0.9H ของความสูงระหว่างครีบ โดยความสูงระหว่างครีบเท่ากับ 3.85 mm ความหนาของปีก 0.2 mm แสดงดังรูปที่ 5.27



รูปที่ 5.27 ตัวอย่างแบบจำลองครีบบั๊ตติงปีกรูปตัววี 4 แถว กึ่งกลางท่อ ทิศทาง V-Upstream

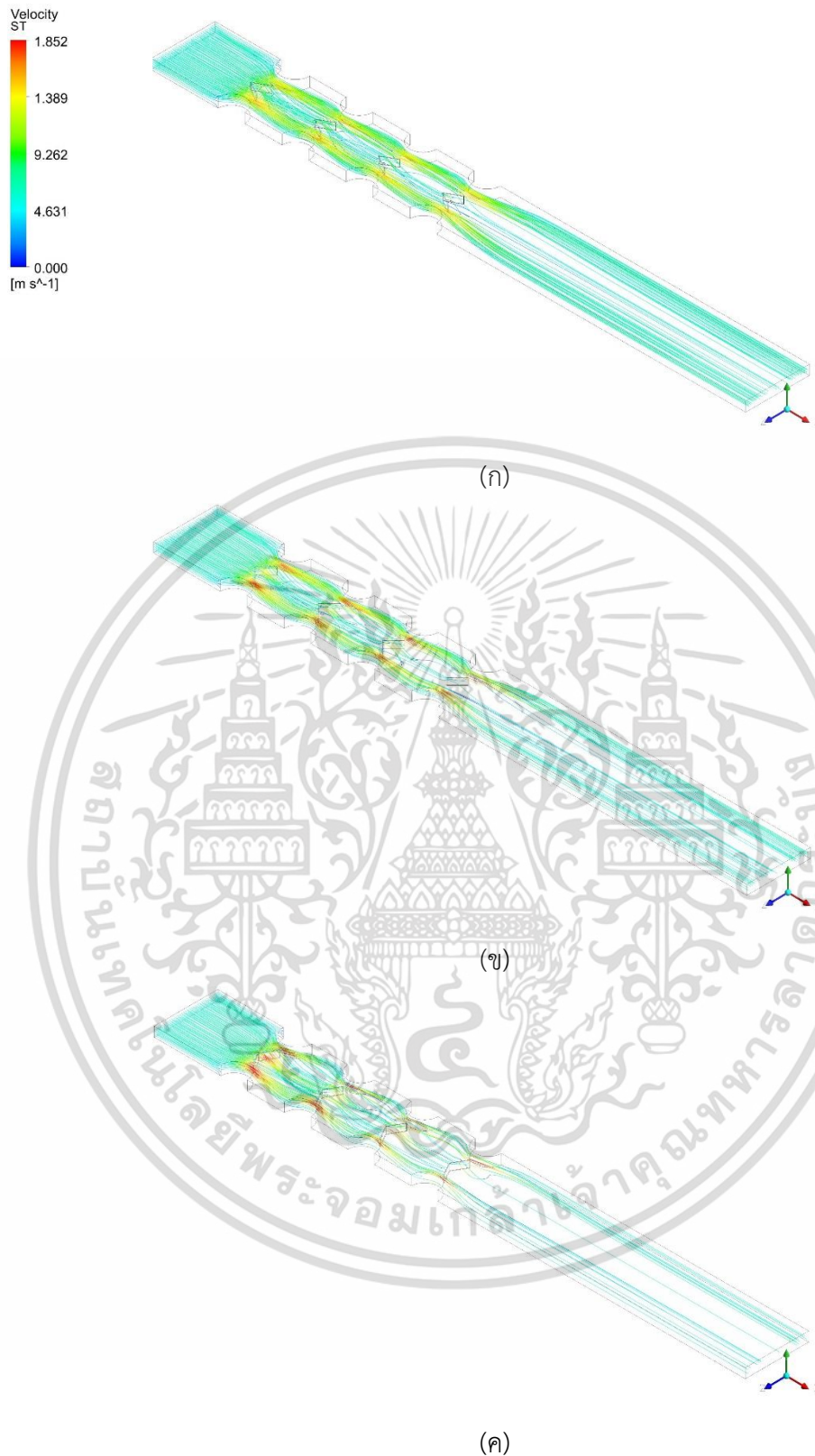
5.1.1.2.2.1 พฤติกรรมการไหล

รูปที่ 5.28 (ก) (ข) และ (ค) แสดงการเปรียบเทียบเส้นกระแสการไหลของอากาศสำหรับครีบบั๊ตติงปีกรูปตัววี 4 แถว กึ่งกลางท่อ ทิศทาง V-Upstream ความสูง 0.9H เลขเรย์ โนลด์ 600 ที่มุมปะทะการไหลต่างกัน พบว่าพฤติกรรมการไหลของทั้งสามกรณีมีลักษณะคล้ายคลึงกัน คือจะพบว่าการเกิดกระแสมุมนวนบริเวณด้านหลังของปีกรูปตัววีจำนวน 2-4 คู่ นอกจากการกระแสมุมนวนปกติที่เกิดขึ้นบริเวณด้านหลังของท่อ ซึ่งกระแสมุมนวนที่เกิดขึ้นดังกล่าวจะไหลกระแทกผนังด้านบนและด้านล่างของครีบ และไหลกระทบกับผิวท่อก่อนด้วย ซึ่งแตกต่างจากการติดตั้งปีกด้านหลังท่อ แต่อย่างไรก็ตามการติดตั้งตัวปีกย่อมส่งผลให้เกิดค่าความดันตกคร่อมที่เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน



รูปที่ 5.28 เส้นกระแสการไหลบนระนาบตามการไหล ครีบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แถว กึ่งกลางท่อ
ทิศทาง V-Upstream ความสูง $0.9H_{Re}$ 600 สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30°
(ข) มุมปะทะการไหล 45° และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°

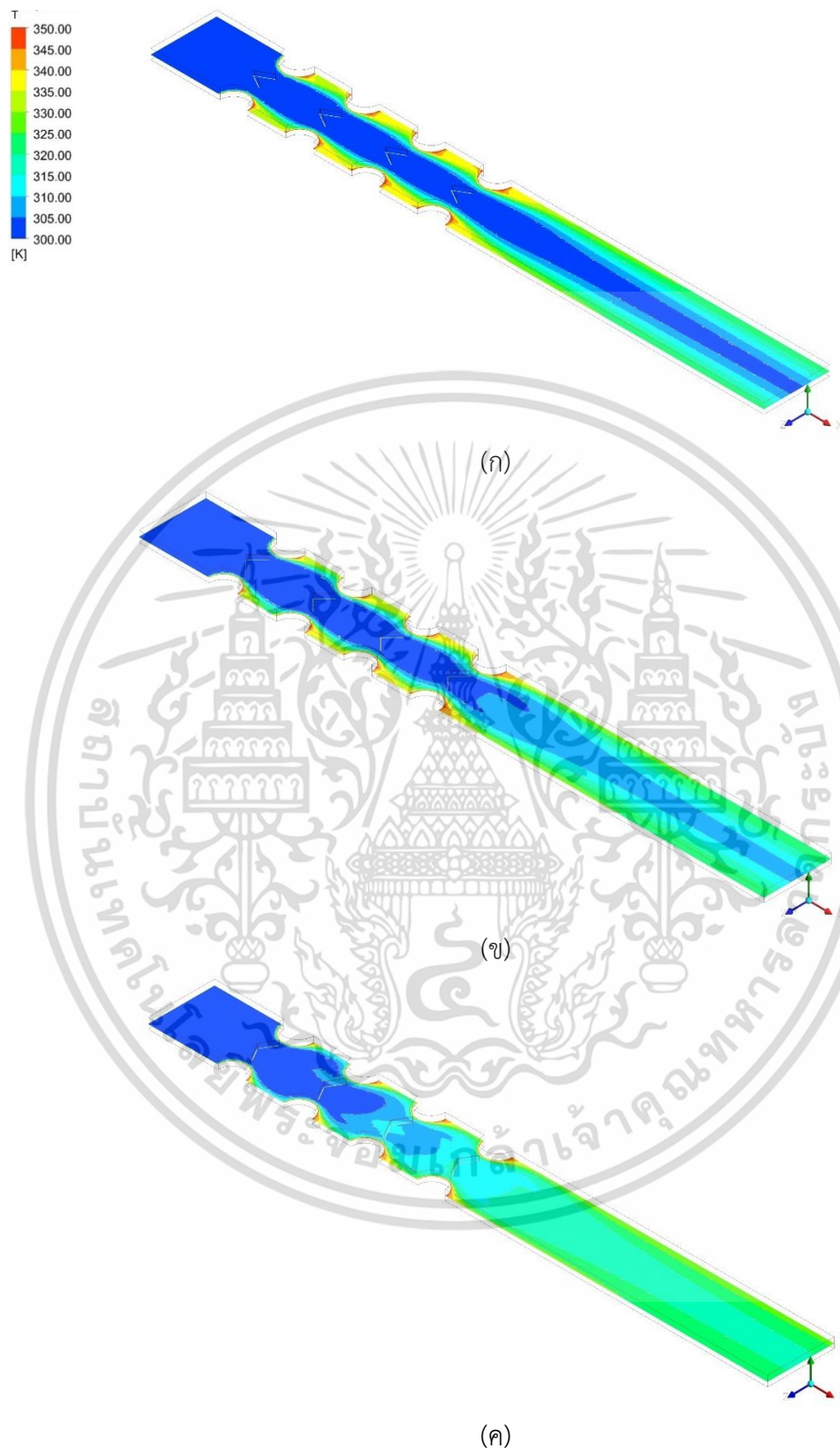
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.29 เส้นกระแสการไหล 3 มิติ ครีบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แถว กึ่งกลางท่อ
ทิศทาง V-Upstream ความสูง 0.9H Re 600 สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30°
(ข) มุมปะทะการไหล 45° และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°

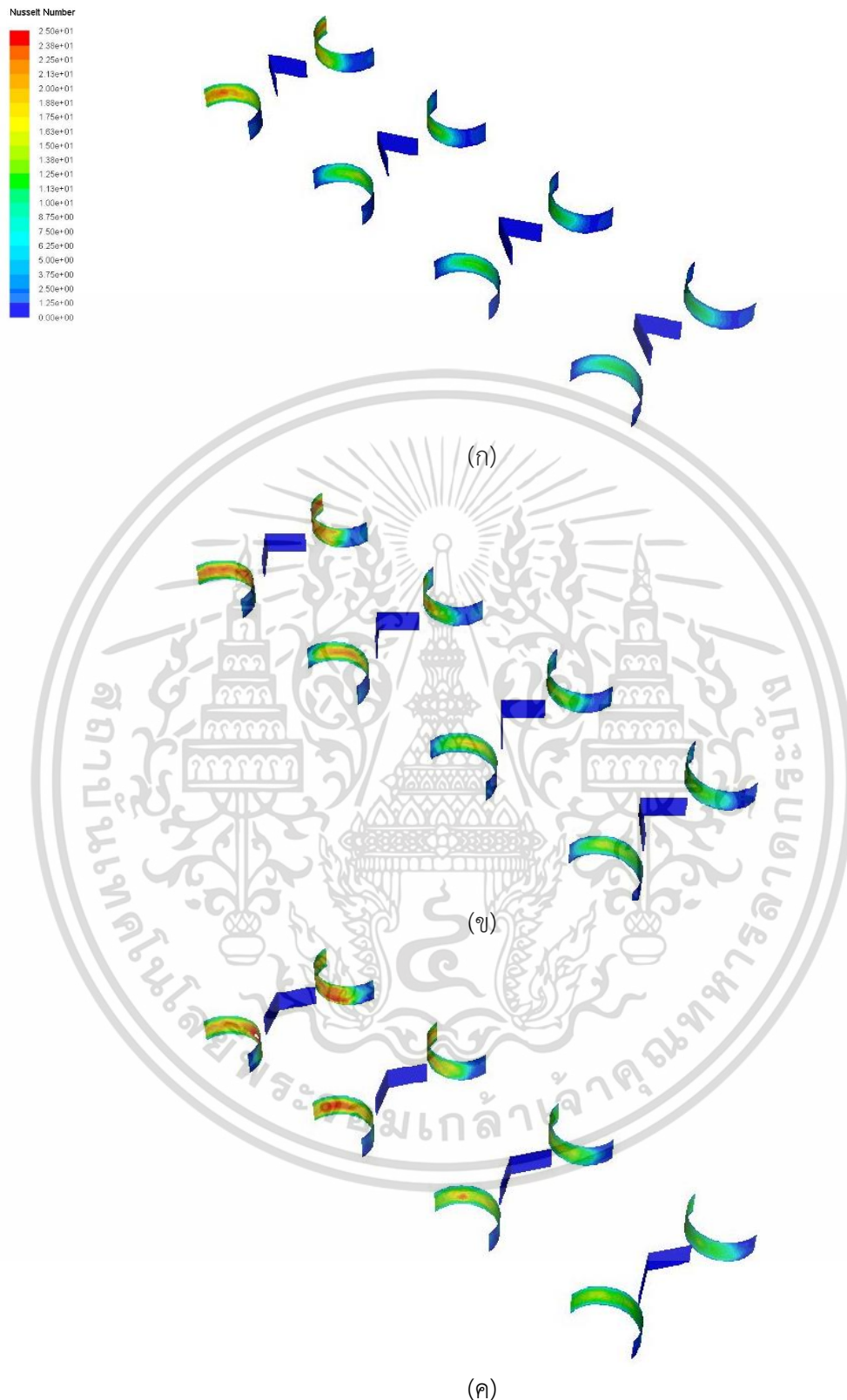
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.1.2.2 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน



รูปที่ 5.30 การกระจายตัวของอุณหภูมิ ครีบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แถว กึ่งกลางท่อ
ทิศทาง V-Upstream ความสูง $0.9H$ Re 600 สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30°
(ข) มุมปะทะการไหล 45° และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°

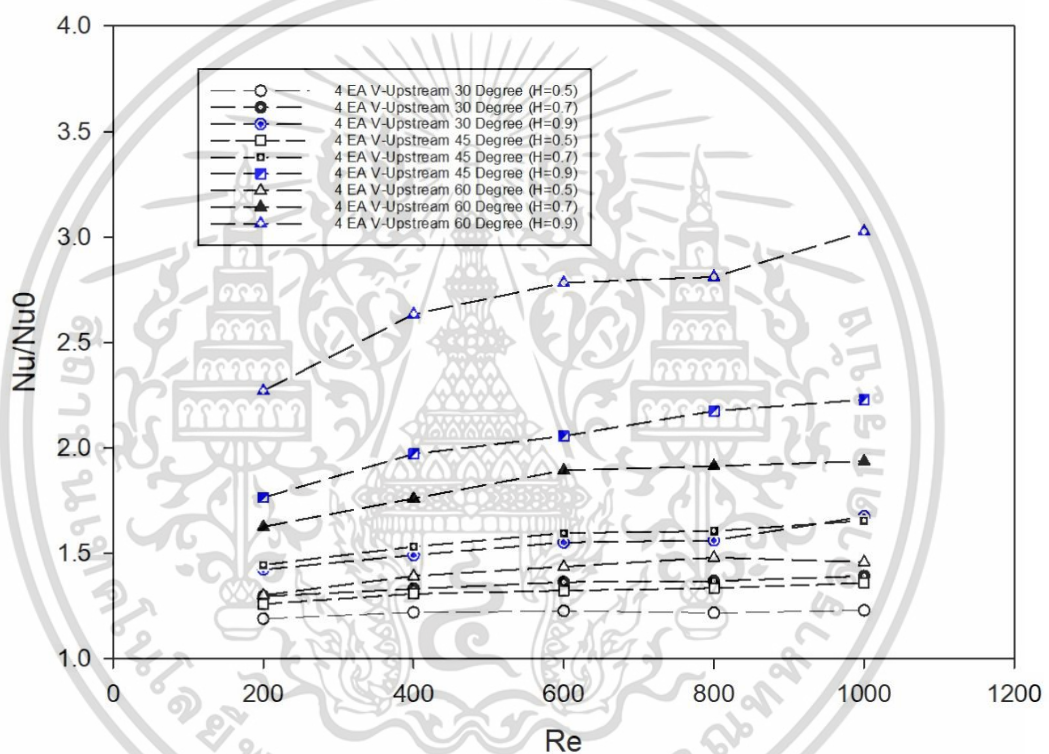
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.31 การกระจายตัวของค่าเลขนัสเซลบริเวณผิวท่อ ครีบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แฉก กึ่งกลางท่อ
ทิศทาง V-Upstream ความสูง $0.9H$ Re 600 สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30°

(ข) มุมปะทะการไหล 45° และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูงาน เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน พบว่ากระแสหมุนวนที่เกิดขึ้นด้านหลังของปีกรูปตัววีทำให้เกิดการไหลหมุนวนและเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดียิ่งขึ้น สังเกตคอนทราสต์อุณหภูมิของสีน้ำเงินที่ลดลง แสดงดังรูปที่ 5.30 (ก) (ข) และ (ค) และเมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของมุมปะทะการไหลของปีก ที่ความสูง 0.9H แสดงดังรูปที่ 5.31 (ก) (ข) และ (ค) พบว่าการกระจายตัวของตัวเลขนัสเซลบริเวณผิวท่อจะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน และที่มุมปะทะการไหล 60° จะให้ค่าคอนทราสต์สีแดงที่บริเวณขอบที่มากกว่า ทั้งนี้อาจเนื่องจากมุมปะทะการไหลที่มากขึ้น จะส่งผลให้ความรุนแรงของการไหลหมุนวนและการกรแทกของกระแสการไหลที่บริเวณผิวท่อมากขึ้น ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้มากขึ้น

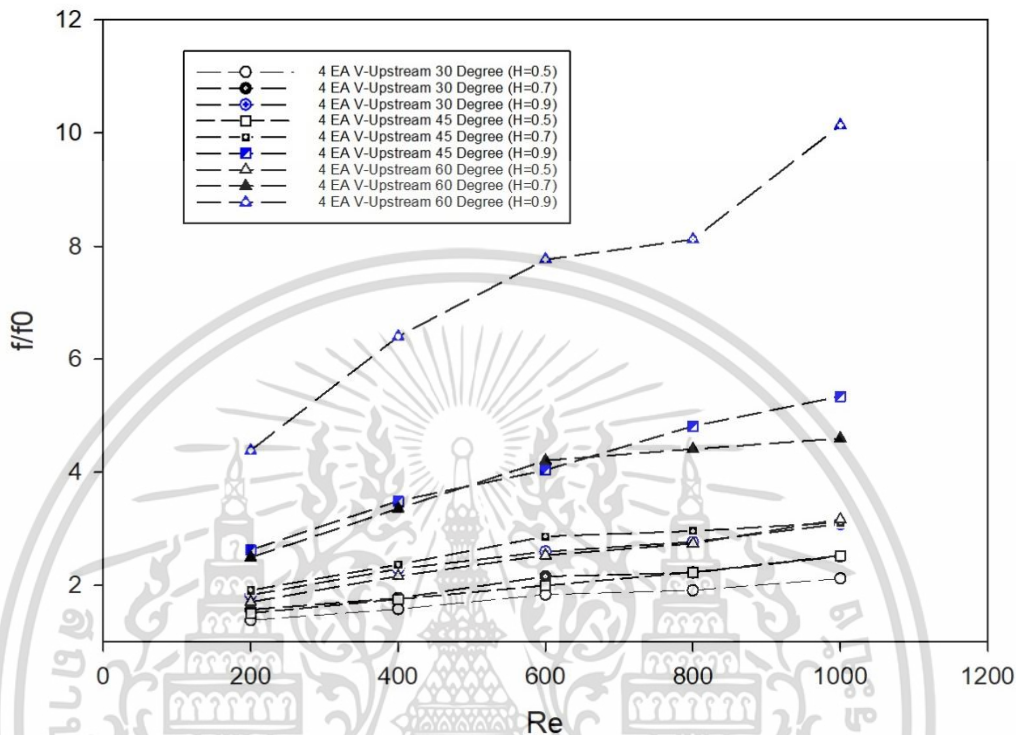


รูปที่ 5.32 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลและเลขเรย์โนลด์สำหรับการติดตั้งปีกรูปตัววี แบบ 4 แถว กึ่งกลางท่อ ทิศทาง V-Upstream

รูปที่ 5.32 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลและเลขเรย์โนลด์ของครีบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี แบบ 4 แถว กึ่งกลางท่อ ทิศทาง V-Upstream ที่ความสูงต่าง ๆ ที่มุมปะทะการไหลต่าง ๆ พบว่า เมื่อความสูงของปีกเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลเพิ่มมากขึ้น และเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เลขนัสเซลเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยที่เลขนัสเซลของปีกรูปตัววีที่มีมุมปะทะการไหล 30° จะมีค่าน้อยที่สุด และเลขนัสเซลจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมุมปะทะการไหลของปีกเพิ่มขึ้นเช่นกัน สำหรับเลขเรย์โนลด์ 200 ที่ความสูง 0.5H มุมปะทะการไหล 30° มีค่าอัตราส่วน

เลขน้สเซลน้อยที่สุดคือ 1.19 ขณะที่ความสูงของปีก 0.9H มุมปะทะการไหล 60° เลขเรย์โนลด์ 600 มีค่าอัตราส่วนเลขน้สเซลมากที่สุดคือ 3.02 เมื่อเทียบกับครีบเรียบ

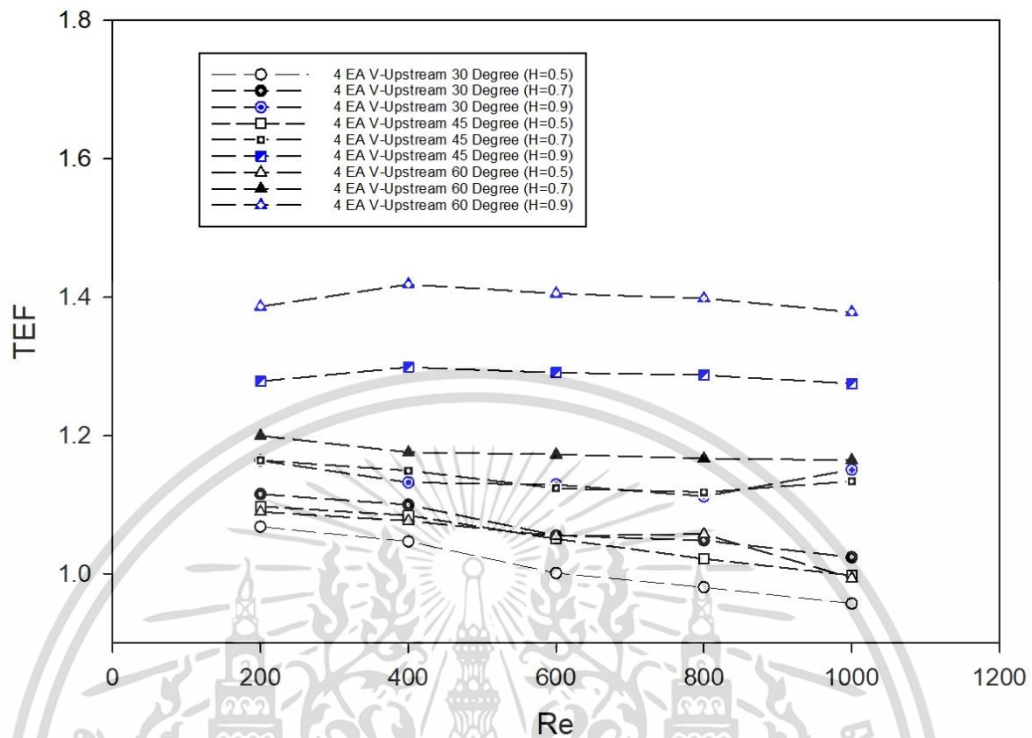
5.1.1.2.2.3 การสูญเสียความดัน



รูปที่ 5.33 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานและเลขเรย์โนลด์ สำหรับการติดตั้งปีกรูปตัววี แบบ 4 แถว กึ่งกลางท่อ ทิศทาง V-Upstream

รูปที่ 5.33 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานและเลขเรย์โนลด์ ของครีบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี แบบ 4 แถว กึ่งกลางท่อ ทิศทาง V-Upstream ที่ความสูงต่าง ๆ และมุมปะทะการไหลต่าง ๆ พบว่า เมื่อความสูงของปีกเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งเมื่อเลขเรย์โนลด์ และมุมปะทะการไหลของปีกเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน โดยที่อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานจะมีค่ามากที่สุด คือ มุมปะทะการไหล 60° เลขเรย์โนลด์ 1,000 มีค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมากที่สุดคือ 10.57 เมื่อเทียบกับครีบเรียบ ซึ่งมีความมากกว่าการติดตั้งปีกด้านหลังท่อ เนื่องจากที่มุมปะทะการไหลสูงขึ้น ทำให้การไหลเป็นไปได้ยากขึ้น ทำให้เกิดความดันตกคร่อมเพิ่มขึ้นอย่างมาก ถึงแม้ว่ามุมปะทะการไหลที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ของไหลถูกเร่งความเร็วผ่านช่องว่างระหว่างปีก แต่บริเวณอื่นความเร็วของไหลจะลดลงอย่างมาก

5.1.1.2.2.4 สมรรถนะเชิงความร้อน



รูปที่ 5.34 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อนและเลขเรย์โนลด์ สำหรับการติดตั้งปีกรูปตัววี แบบ 4 แถว กึ่งกลางท่อ ทิศทาง V-Upstream

รูปที่ 5.34 แสดงถึงความสัมพันธ์สมรรถนะเชิงความร้อนและเลขเรย์โนลด์ ของครีบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี แบบ 4 แถว กึ่งกลางท่อ ทิศทาง V-Upstream ที่ความสูงต่าง ๆ และ มุมปะทะการไหลต่าง ๆ พบว่า เมื่อความสูงของปีก และมุมปะทะการไหลเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้สมรรถนะเชิงความร้อนเพิ่มมากขึ้น และเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น สมรรถนะเชิงความร้อนมีแนวโน้มลดลง โดยที่ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนจะมีค่ามากที่สุด ณ มุมปะทะการไหล 60° เลขเรย์โนลด์ 400 มีค่าที่สุดคือ 1.41 เมื่อเทียบกับครีบเรียบ

5.1.2 ปีกรูปตัววี ติดตั้งแบบ 8 แถว (8EA V-Winglet)

5.1.2.1 แบบจำลอง ครีบบนที่ติดตั้งปีกรูปตัววี 8 แถว ทิศทาง V-Downstream

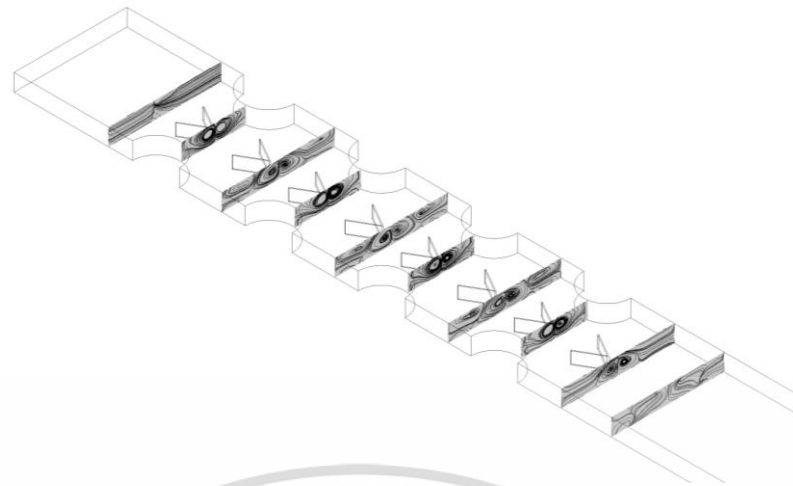
การติดตั้งปีกรูปตัววี 8 แถว (8EA V-Winglet) ทิศทาง V-Downstream บริเวณครีบบนด้านล่าง พิจารณาที่ มุมปะทะการไหล 30° , 45° และ 60° อัตราส่วนความสูงของปีกรูปตัววี เท่ากับ $0.5H$, $0.7H$ และ $0.9H$ ของความสูงระหว่างครีบบน โดยความสูงระหว่างครีบบนเท่ากับ 3.85 mm ความหนาของปีกมีค่า 0.2 mm แสดงดังรูปที่ 5.35



รูปที่ 5.35 ตัวอย่างแบบจำลองครีบบนที่ติดตั้งปีกรูปตัววี 8 แถว ทิศทาง V-Downstream

5.1.2.1.1 พฤติกรรมการไหล

รูปที่ 5.35 (ก) (ข) และ (ค) แสดงการเปรียบเทียบเส้นกระแสการไหลของอากาศสำหรับครีบบนที่มีการติดตั้งปีกรูปตัววี แบบ 8 แถว ทิศทาง V-Downstream ความสูง $0.9H$ ของความสูงระหว่างครีบบน ที่เลขเรย์ โนลด์ 600 ณ มุมปะทะการไหลต่าง ๆ พบว่าพฤติกรรมการไหลของทั้งสามกรณีมีความคล้ายคลึงกัน จะพบว่าเกิดกระแสหมุนวนที่เกิดขึ้นบริเวณด้านหลังของท่อที่เกิดจากการติดตั้งปีกตั้งแต่ชุดแรกเพิ่มเข้าไปด้วย และเกิดกระแสหมุนวนบริเวณด้านหลังของปีกรูปตัววีจำนวน 2 – 4 คู่ ซึ่งกระแสไหลวนที่เกิดขึ้น ทำให้มวลกระแสการไหลหลักเกิดการคลุกเคล้ากันสมบูรณ์มากขึ้น และกระแสหมุนวนที่เกิดขึ้นดังกล่าวจะไหลกระแทกผนังด้านบนและด้านล่างของครีบบน อีกทั้งการติดตั้งปีกแบบ 8 แถว จะช่วยบังคับกระแสการไหลให้มีการแลกเปลี่ยนความร้อนกับผนังท่อในแถวแรกมากกว่าการติดตั้งปีกแบบ 4 แถว



(ก)

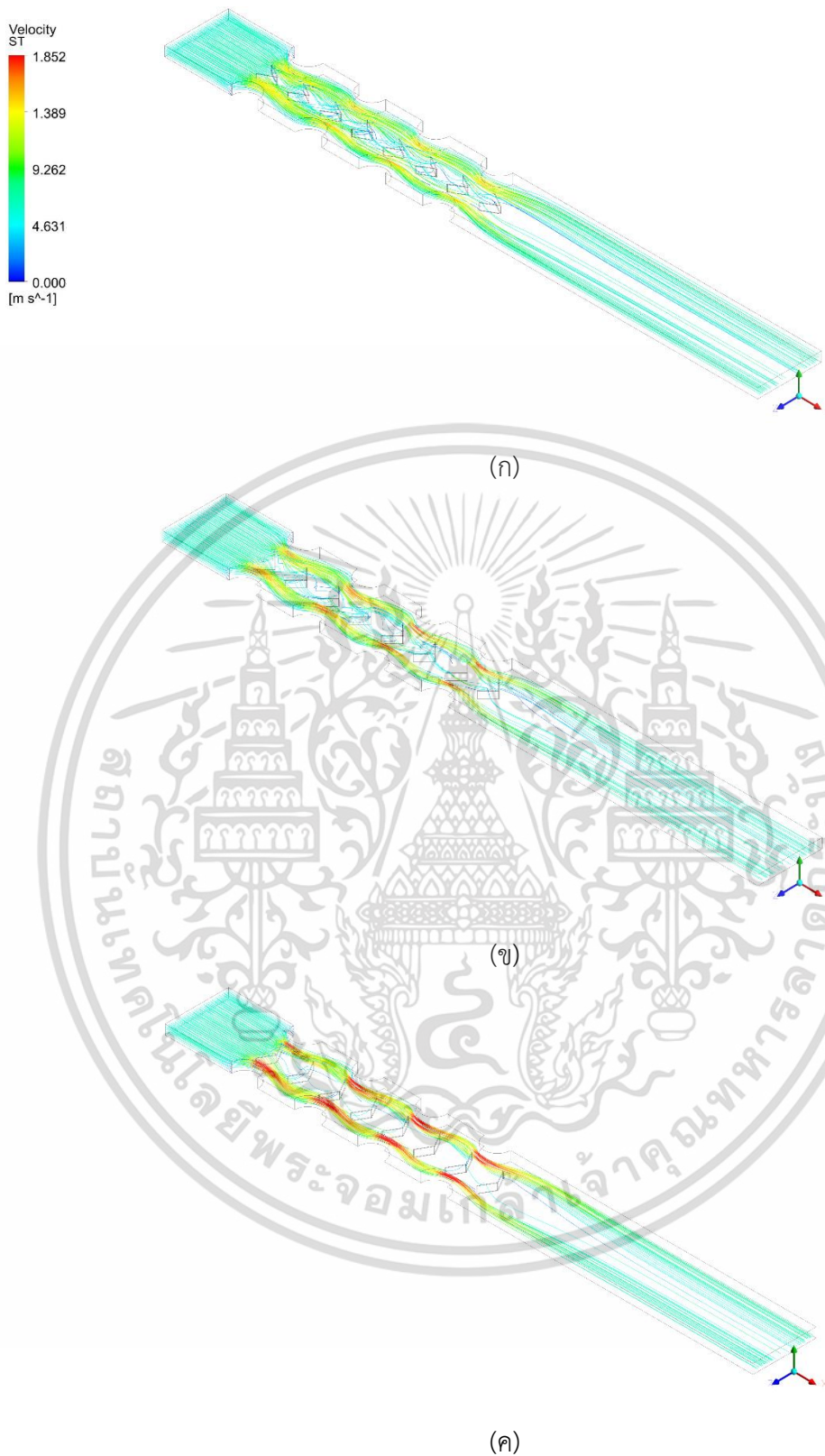


(ข)

(ค)

รูปที่ 5.36 เส้นกระแสน้ำไหลบนระนาบตามการไหล ครีบน้ำที่มีการติดตั้งปีกรูปตัววี 8 แถว
ทิศทาง V-Downstream สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30° (ข) มุมปะทะการไหล 45°
และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°

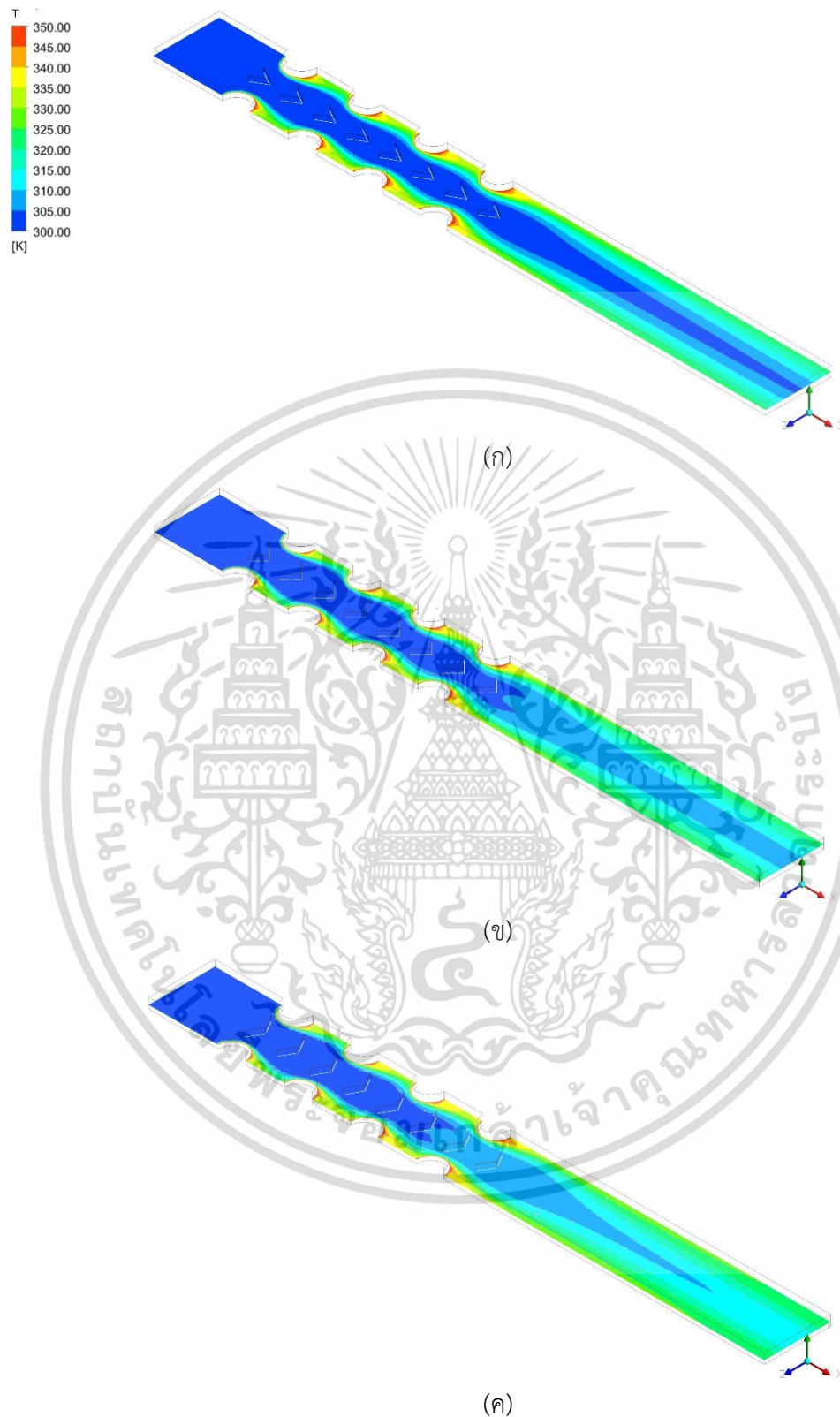
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



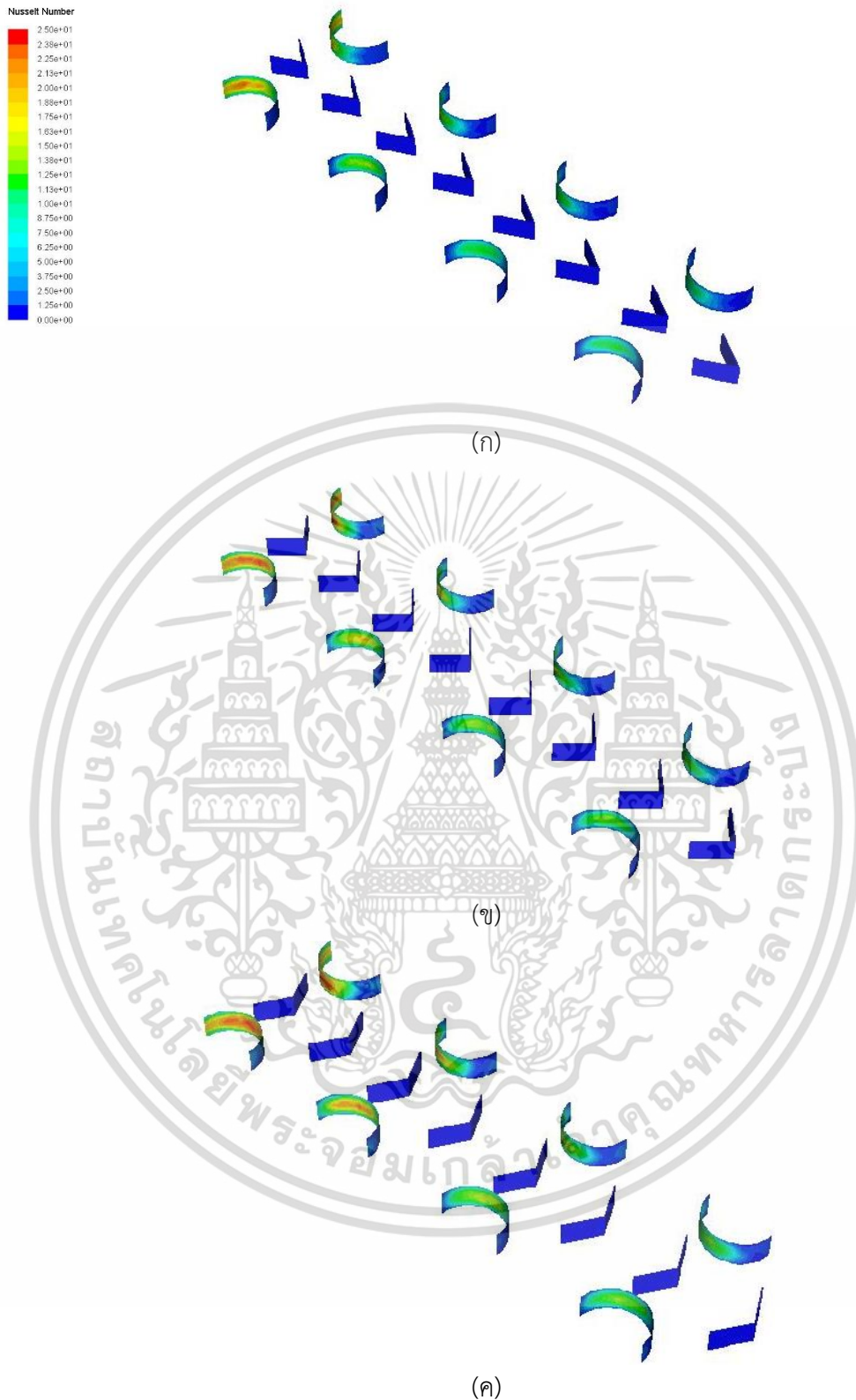
รูปที่ 5.37 เส้นกระแสการไหล 3 มิติ ครีบที่มีการติดตั้งปีกรูปตัววี 8 แถว ทิศทาง V-Downstream สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30° (ข) มุมปะทะการไหล 45° และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2.1.2 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน



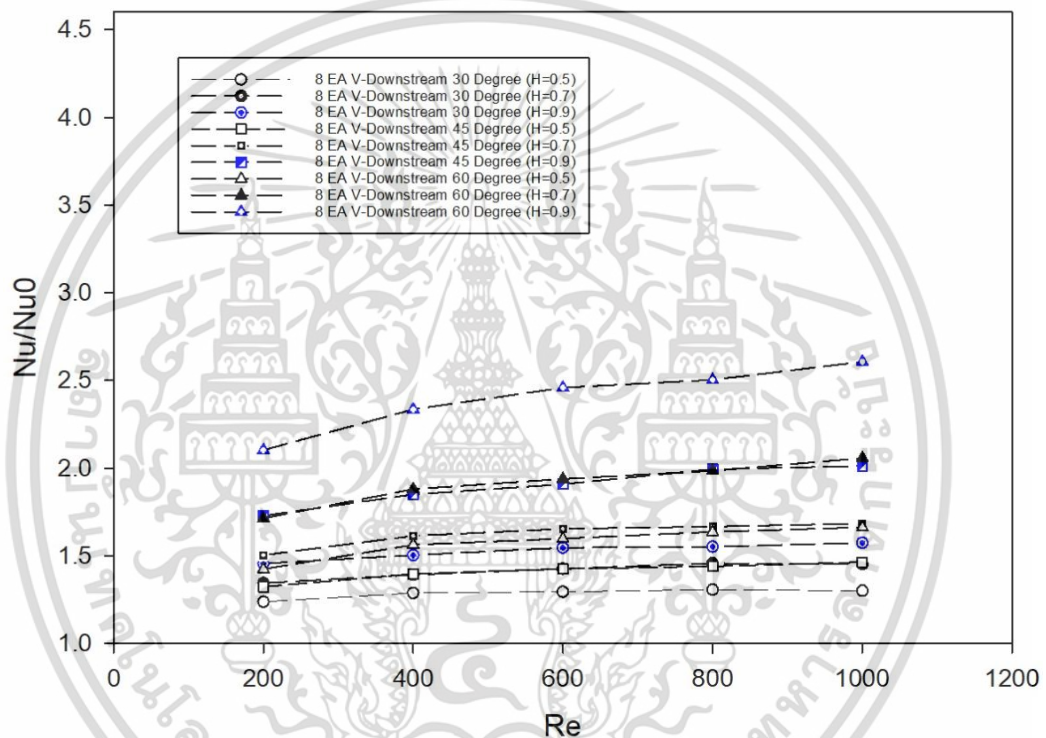
รูปที่ 5.38 การกระจายตัวของอุณหภูมิ ครีบที่มีการติดตั้งปีกรูปตัววี 8 แถว ทิศทาง V-Downstream สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30° (ข) มุมปะทะการไหล 45° และ (ค) มุมปะทะการไหล 60° เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.39 การกระจายตัวของค่าเลขนัสเซลบริเวณผิวท่อ ครีบที่มีการติดตั้งปีกรูปตัววี 8 แถว ทิศทาง V-Downstream สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30° (ข) มุมปะทะการไหล 45° และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน พบว่ากระแสหมุนวนที่เกิดขึ้นด้านหลังของปีกรูปตัววี แบบ 8 แฉก ทิศทาง V-Downstream ทำให้เกิดการไหลหมุนวนและเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดียิ่งขึ้น สังเกตคอนทราสต์อุณหภูมิของสีน้ำเงินที่ลดลง แสดงดังรูปที่ 5.38 (ก) (ข) และ (ค) และเมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของมุมปะทะการไหลของปีก ที่ความสูง 0.9H แสดงดังรูปที่ 5.39 (ก) (ข) และ (ค) พบว่าการกระจายตัวของตัวเลขนัสเซลบริเวณผิวท่อจะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน และที่มุมปะทะการไหล 60° จะให้ค่าคอนทราสต์สีแดงที่บริเวณขอบที่มากกว่า เนื่องจากมุมปะทะการไหลที่มากขึ้น จะส่งผลให้ความรุนแรงของการไหลหมุนวนและการกรแทกของกระแสการไหลที่บริเวณผิวท่อมากขึ้น ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้มากขึ้น

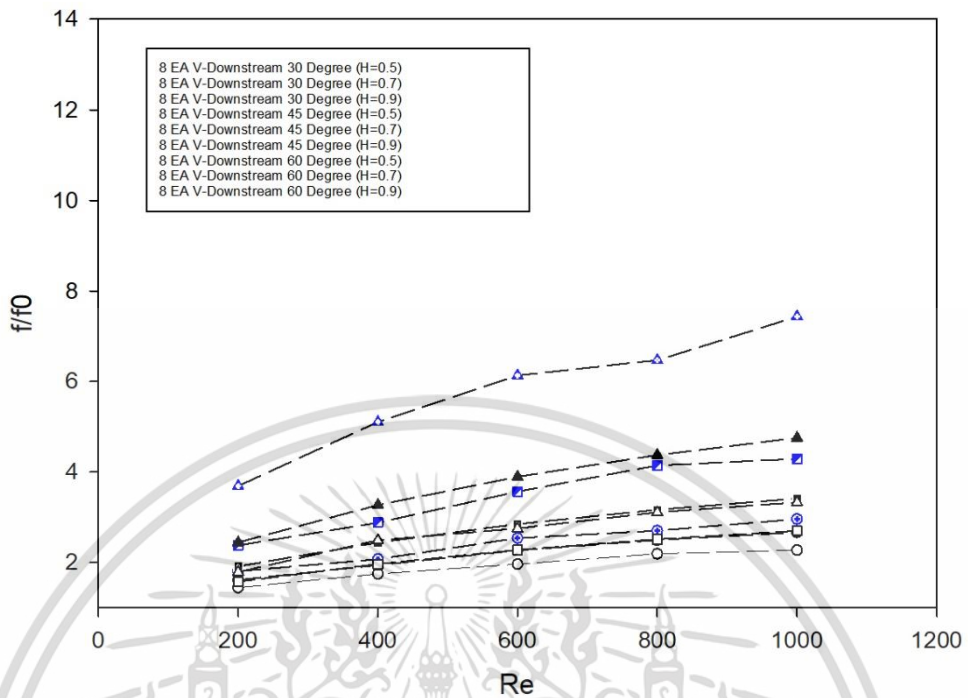


รูปที่ 5.40 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลและเลขเรย์โนลด์ สำหรับการติดตั้งปีกรูปตัววี แบบ 8 แฉก ทิศทาง V-Downstream

รูปที่ 5.40 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลและเลขเรย์โนลด์ของครีบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี แบบ 8 แฉก ทิศทาง V-Downstream ที่มุมปะทะการไหลต่าง ๆ พบว่า เมื่อความสูงของปีกเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลเพิ่มมากขึ้น และเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เลขนัสเซลเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน โดยที่เลขนัสเซลของปีกรูปตัววีที่มีมุมปะทะการไหล 30° จะมีค่าน้อยที่สุด และเลขนัสเซลจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมุมปะทะการไหลของปีกเพิ่มขึ้นเช่นกัน สำหรับเลขเรย์โนลด์ 200 ที่ความสูง 0.5H มุมปะทะการไหล 30° มีค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลน้อยที่สุดคือ 1.23 ขณะที่ความสูงของปีก 0.9H มุมปะทะการไหล 60° เลขเรย์โนลด์ 1,000 มีค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลมากที่สุดคือ 2.61 เมื่อเทียบกับครีบเรียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

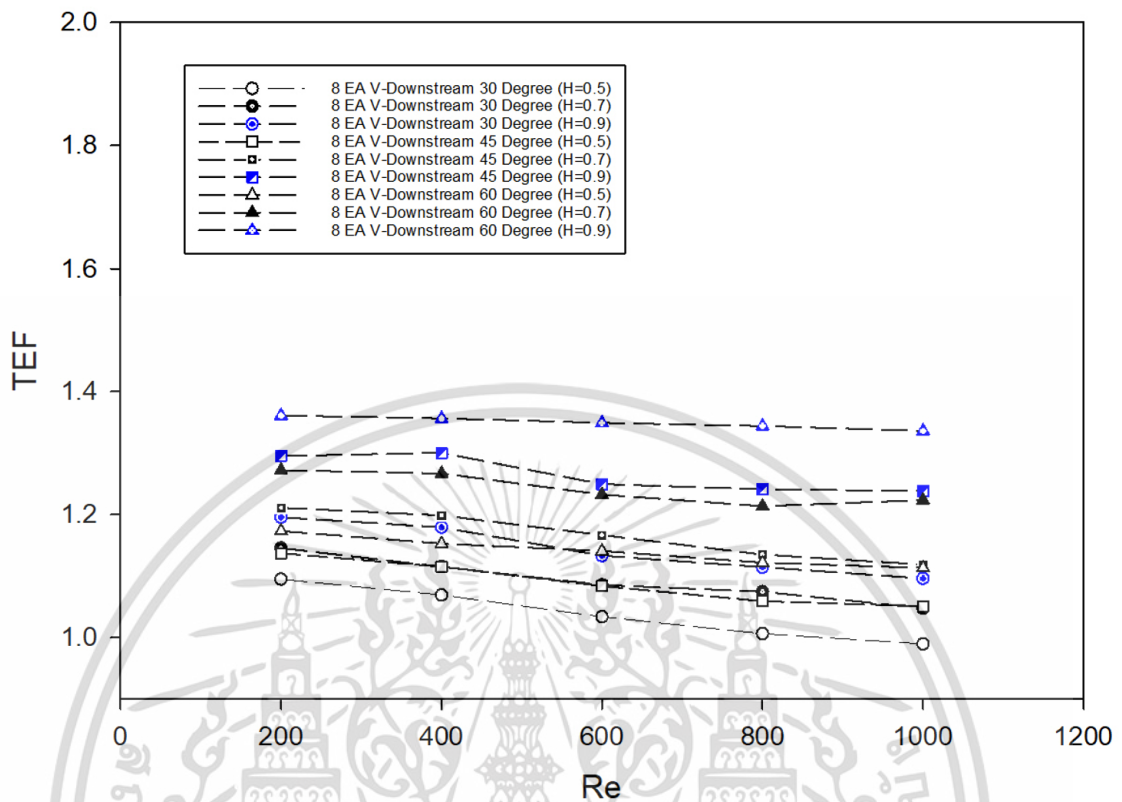
5.1.2.1.3 การสูญเสียความดัน



รูปที่ 5.41 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานและเลขเรย์โนลด์ สำหรับการติดตั้งปีกรูปตัววี แบบ 8 แฉก ทิศทาง V-Downstream

รูปที่ 5.41 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานและเลขเรย์โนลด์ ของครีบที่ ติดตั้งปีกรูปตัววี แบบ 8 แฉก ทิศทาง V-Downstream ที่ความสูงต่าง ๆ และมุมปะทะ การไหลต่าง ๆ พบว่า เมื่อความสูงของปีกเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งเมื่อเลขเรย์โนลด์ และมุมปะทะการไหลของปีกเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน โดยอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมีค่ามากที่สุด คือ มุมปะทะการไหล 60° เลขเรย์โนลด์ 1,000 มีค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมากที่สุดคือ 7.47 เมื่อเทียบกับครีบเรียบ

5.1.2.1.4 สมรรถนะเชิงความร้อน



รูปที่ 5.42 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อนและเลขเรย์โนลด์สำหรับการติดตั้งปีกรูปตัววี แบบ 8 แถว ทิศทาง V-Downstream

รูปที่ 5.42 แสดงถึงความสัมพันธ์สมรรถนะเชิงความร้อนและเลขเรย์โนลด์ ของครีบที่มีการติดตั้งปีกรูปตัววีที่ความสูงต่าง ๆ ที่มุมปะทะการไหลต่าง ๆ พบว่า เมื่อความสูงของปีก และมุมปะทะการไหลเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้สมรรถนะเชิงความร้อนเพิ่มมากขึ้น และเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น สมรรถนะเชิงความร้อนมีแนวโน้มลดลง โดยที่ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนจะมีค่ามากที่สุด ณ มุมปะทะการไหล 60° เลขเรย์โนลด์ 200 มีค่าที่สุดคือ 1.36 เมื่อเทียบกับครีบเรียบ

5.1.2.2 แบบจำลอง ครีบบั๊ตติงปีกรูปตัววี 8 แถว ทิศทาง V-Upstream

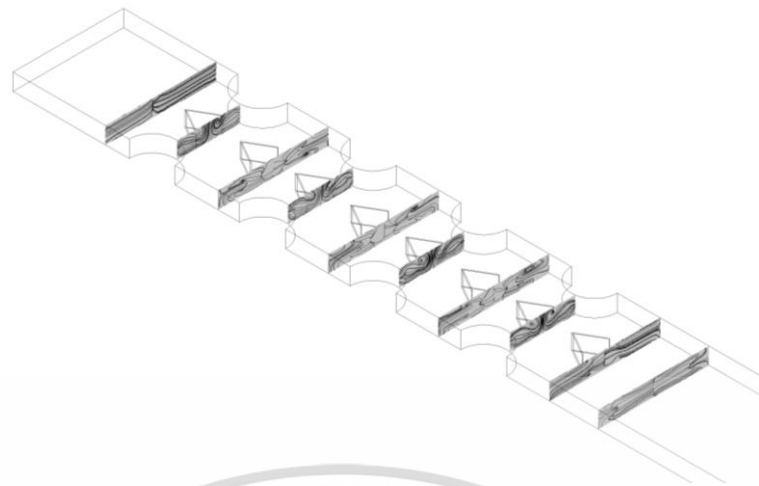
การติดตั้งปีกรูปตัววี 8 แถว (8EA V-Winglet) ทิศทาง V-Upstream บริเวณครีบด้านล่าง พิจารณาที่ มุมปะทะการไหล 30° , 45° และ 60° อัตราส่วนความสูงของปีกรูปตัววี เท่ากับ $0.5H$, $0.7H$ และ $0.9H$ ของความสูงระหว่างครีบ โดยความสูงระหว่างครีบเท่ากับ 3.85 mm ความหนาของปีกมีค่า 0.2 mm แสดงดังรูปที่ 5.43



รูปที่ 5.43 ตัวอย่างแบบจำลองครีบบั๊ตติงปีกรูปตัววี 8 แถว ทิศทาง V-Upstream

5.1.2.2.1 พฤติกรรมการไหล

รูปที่ 5.44 (ก) (ข) และ (ค) แสดงการเปรียบเทียบเส้นกระแสการไหลของอากาศสำหรับครีบบั๊ตติงปีกรูปตัววี แบบ 8 แถว ทิศทาง V-Upstream ความสูง $0.9H$ ของความสูงระหว่างครีบ ที่เลขเรย์โนลด์ 600 ณ มุมปะทะการไหลต่าง ๆ พบว่าพฤติกรรมการไหลของทั้งสามกรณีมีความคล้ายคลึงกัน จะพบว่าเกิดกระแสหมุนวนที่เกิดขึ้นบริเวณด้านหลังของท่อที่เกิดจากการติดตั้งปีกตั้งแต่ชุดแรกเพิ่มเข้าไปด้วย และเกิดกระแสหมุนวนบริเวณด้านหลังของปีกรูปตัววีจำนวน 2 – 4 คู่ ซึ่งกระแสไหลวนที่เกิดขึ้น ทำให้มวลกระแสการไหลหลักเกิดการคลุกเคล้ากันสมบูรณ์มากขึ้น และกระแสหมุนวนที่เกิดขึ้นดังกล่าวจะไหลกระแทกผนังด้านบนและด้านล่างของครีบ อีกทั้งการติดตั้งปีกแบบ 8 แถว จะช่วยบังคับกระแสการไหลให้มีการแลกเปลี่ยนความร้อนกับผนังท่อในแถวแรกมากกว่าการติดตั้งปีกแบบ 4 แถว



(ก)



(ข)

(ค)

รูปที่ 5.44 เส้นกระแสน้ำไหลบนระนาบตามการไหล ครีบน้ำที่มีการติดตั้งปีกรูปตัววี 8 แถว
ทิศทาง V-Upstream สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30° (ข) มุมปะทะการไหล 45°
และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°

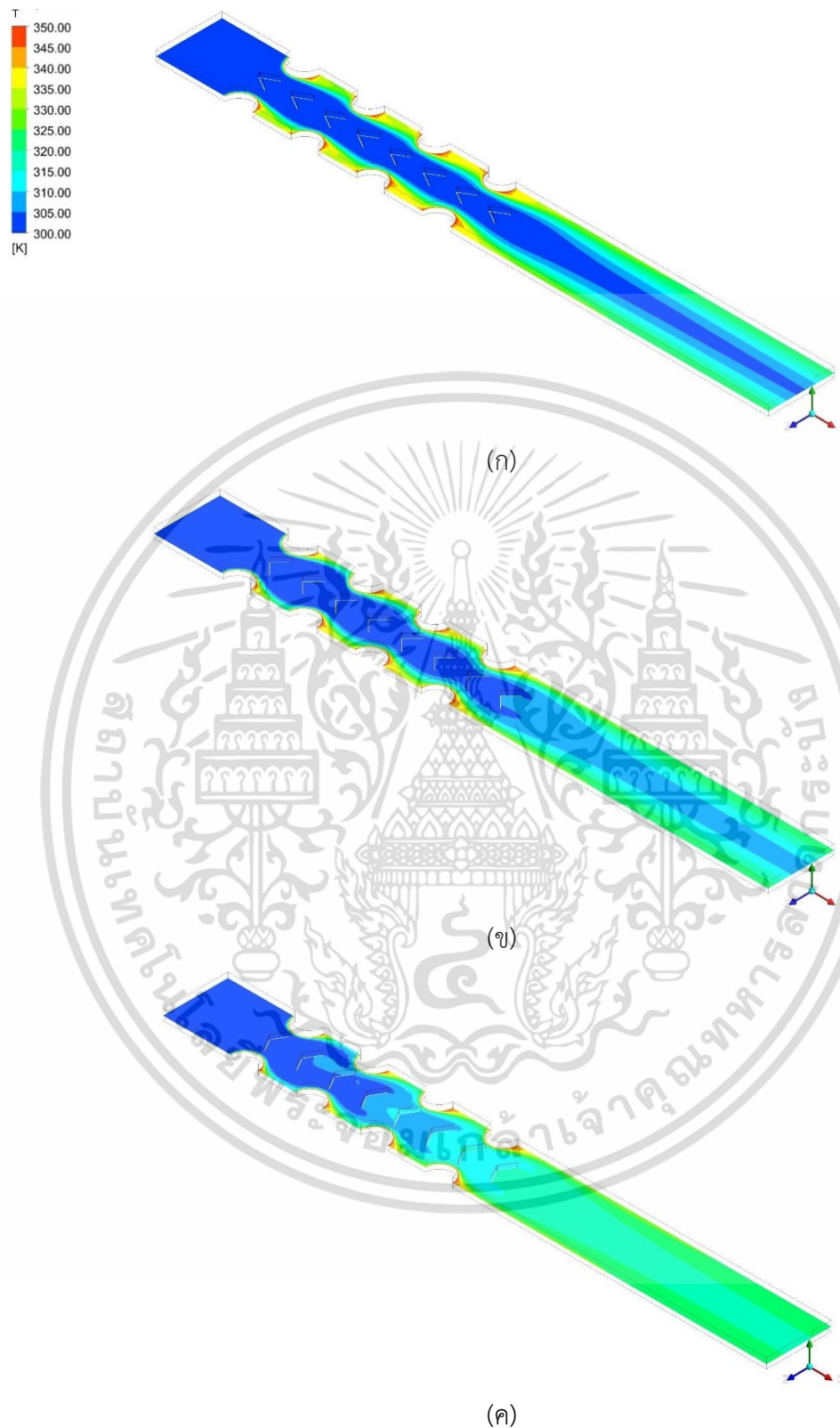
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.45 เส้นกระแสการไหล 3 มิติ ครีบที่มีการติดตั้งปีกรูปตัววี 8 แถว
ทิศทาง V-Upstream สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30° (ข) มุมปะทะการไหล 45°
และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°

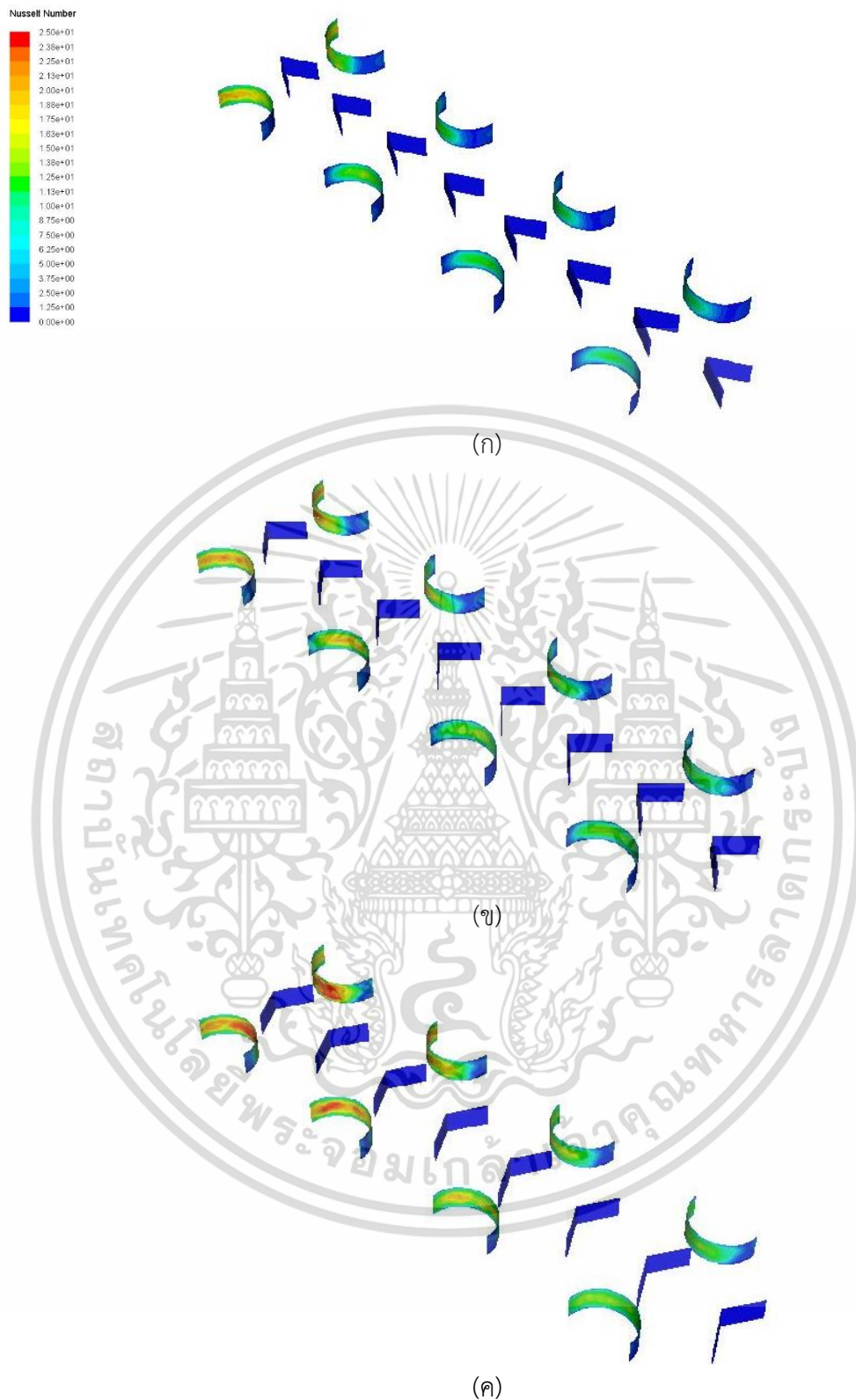
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2.2.2 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน



รูปที่ 5.46 การกระจายตัวของอุณหภูมิ ครีบที่มีการติดตั้งปีกรูปตัววี 8 แถว
ทิศทาง V-Upstream สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30° (ข) มุมปะทะการไหล 45°
และ (ค) มุมปะทะการไหล 60

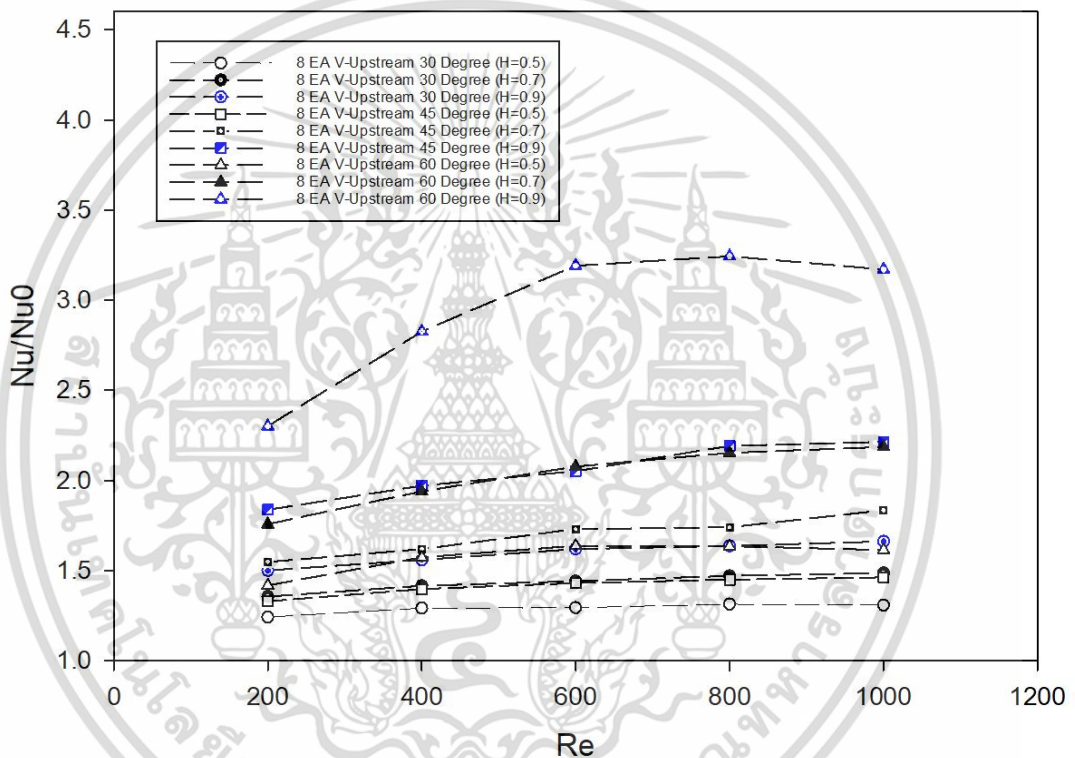
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.47 การกระจายตัวของค่าเลขนัสเซลบริเวณผิวท่อ ครีบที่มีการติดตั้งปีกรูปตัววี 8 แถว
ทิศทาง V-Upstream สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30° (ข) มุมปะทะการไหล 45°
และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน พบว่ากระแสหมุนวนที่เกิดขึ้นด้านหลังของปีกรูปตัววี แบบ 8 แฉก ทิศทาง V-Upstream ทำให้เกิดการไหลหมุนวนและเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดี ยิ่งขึ้น สังเกตคอนทราสต์อุณหภูมิของสีน้ำเงินที่ลดลง แสดงดังรูปที่ 5.46 (ก) (ข) และ (ค) และเมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของมุมปะทะการไหลของปีก ที่ความสูง 0.9H แสดงดังรูปที่ 5.47 (ก) (ข) และ (ค) พบว่าการกระจายตัวของตัวเลขนัสเซลบริเวณผิวท่อจะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน และที่มุมปะทะการไหล 60° จะให้ค่าคอนทราสต์สีแดงที่บริเวณขอบที่มากกว่า เนื่องจากมุมปะทะการไหลที่มากขึ้น จะส่งผลให้ความรุนแรงของการไหลหมุนวนและการกรแทกของกระแสการไหลที่บริเวณผิวท่อมากขึ้น ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้มากขึ้น

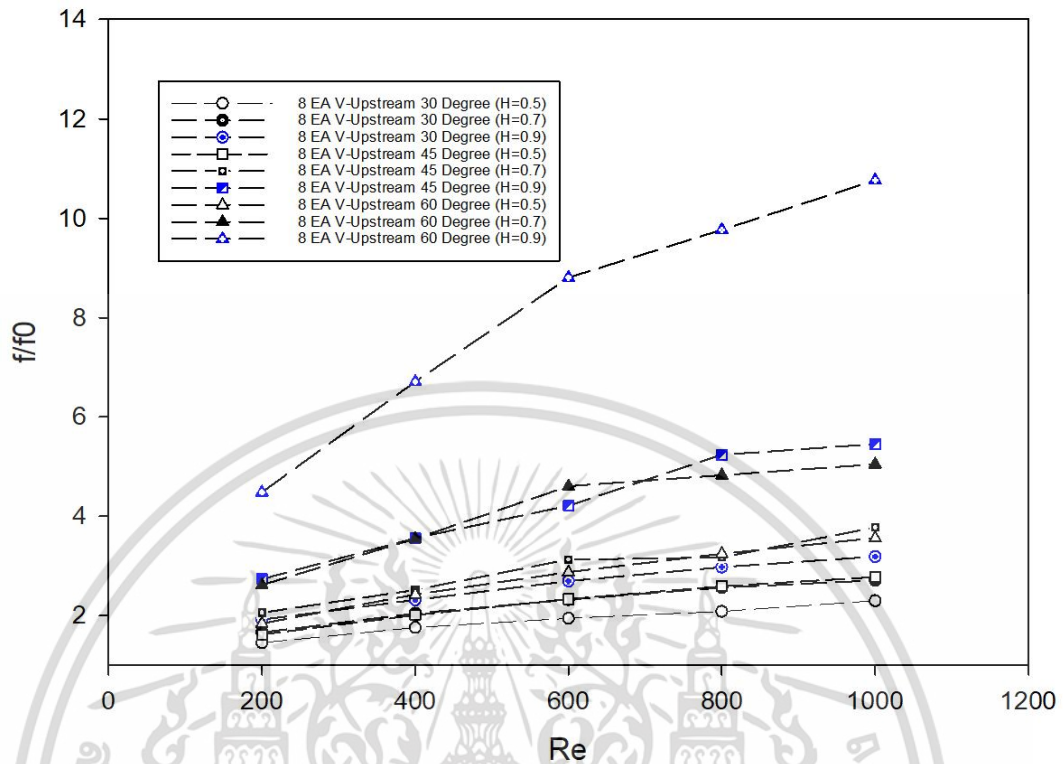


รูปที่ 5.48 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลและเลขเรย์โนลด์ สำหรับการติดตั้งปีกรูปตัววี แบบ 8 แฉก ทิศทาง V-Upstream

รูปที่ 5.48 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลและเลขเรย์โนลด์ของครีบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี แบบ 8 แฉก ทิศทาง V-Upstream ที่มุมปะทะการไหลต่าง ๆ พบว่า เมื่อความสูงของปีกเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลเพิ่มมากขึ้น และเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เลขนัสเซลเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน โดยที่เลขนัสเซลของปีกรูปตัววีที่มีมุมปะทะการไหล 30° จะมีค่าน้อยที่สุด และเลขนัสเซลจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมุมปะทะการไหลของปีกเพิ่มขึ้นเช่นกัน สำหรับเลขเรย์โนลด์ 200 ที่ความสูง 0.5H มุมปะทะการไหล 30° มีค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลน้อยที่สุดคือ 1.24 ขณะที่ความสูงของปีก 0.9H มุมปะทะการไหล 60° เลขเรย์โนลด์ 800 มีค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลมากที่สุดคือ

3.24 เมื่อเทียบกับครีบเรียบ

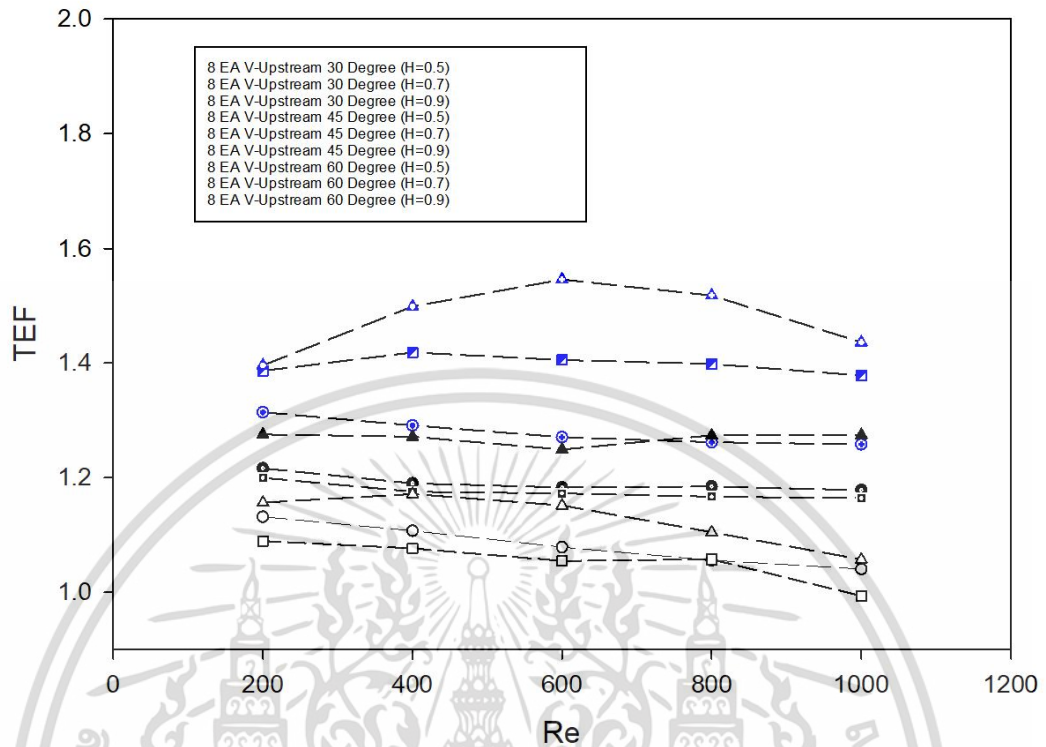
5.1.2.2.3 การสูญเสียความดัน



รูปที่ 5.49 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานและเลขเรย์โนลด์ สำหรับการติดตั้งปีกรูปตัววี แบบ 8 แถว ทิศทาง V-Upstream

รูปที่ 5.49 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานและเลขเรย์โนลด์ ของครีบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี แบบ 8 แถว ทิศทาง V-Upstream ที่ความสูงต่าง ๆ และมุมปะทะการไหลต่าง ๆ พบว่า เมื่อความสูงของปีกเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งเมื่อเลขเรย์โนลด์ และมุมปะทะการไหลของปีกเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน โดยอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมีค่ามากที่สุด คือ มุมปะทะการไหล 60° เลขเรย์โนลด์ 1,000 มีค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมากที่สุดคือ 10.76 เมื่อเทียบกับครีบเรียบ

5.1.2.2.4 สมรรถนะเชิงความร้อน



รูปที่ 5.50 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อนและเลขเรย์โนลด์ สำหรับการติดตั้งปีกรูปตัววี แบบ 8 แถว ทิศทาง V-Upstream

รูปที่ 5.50 แสดงถึงความสัมพันธ์สมรรถนะเชิงความร้อนและเลขเรย์โนลด์ ของครีบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี แบบ 8 แถว ทิศทาง V-Upstream ที่ความสูงต่าง ๆ และมุมปะทะการไหลต่าง ๆ พบว่าเมื่อความสูงของปีก และมุมปะทะการไหลเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้สมรรถนะเชิงความร้อนเพิ่มมากขึ้น และเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น สมรรถนะเชิงความร้อนมีแนวโน้มลดลง โดยที่ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนจะมีค่ามากที่สุด ณ มุมปะทะการไหล 60° เลขเรย์โนลด์ 600 มีค่าที่สุดคือ 1.54 เมื่อเทียบกับครีบเรียบ

5.1.3 ปีกรูปตัววี ติดตั้งแบบ 4 แถว (4EA V-Winglet) เจาะรู

5.1.3.1 แบบจำลอง ติดตั้งแบบ 4 แถว (4EA V-Winglet) เจาะรู

การติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แถว บริเวณครีbsd้านล่าง ทิศทาง V-Downstream พิจารณาที่มุมปะทะการไหล 30° , 45° และ 60° อัตราส่วนความสูงของปีกรูปตัววี เท่ากับ $0.9H$ ของความสูงระหว่างครีบ ความสูงระหว่างครีบ 3.85 mm ความหนาของปีก 0.2 mm เจาะรูวงกลมขนาด 1 mm บริเวณปีกรูปตัววี เจาะรูจำนวน 1 และ 2 รู แสดงดังรูปที่ 5.51



รูปที่ 5.51 ตัวอย่างแบบจำลองทางกายภาพของการติดตั้งปีกรูปตัววี มุมปะทะการไหล 45° ความสูง $0.9H$ ติดตั้งแบบ 4 แถวเจาะรู (ก) เจาะ 1 รู (ข) เจาะ 2 รู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.3.1.1 พฤศจิกายนการไหล



รูปที่ 5.52 เส้นกระแสน้ำไหลบนระนาบตามการไหล ครีบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แถว
ทิศทาง V-Downstream มุมปะทะการไหล 45° ความสูง 0.9H

สำหรับ (ก) ไม่เจาะรู (ข) เจาะ 1 รู และ (ค) เจาะ 2 รู

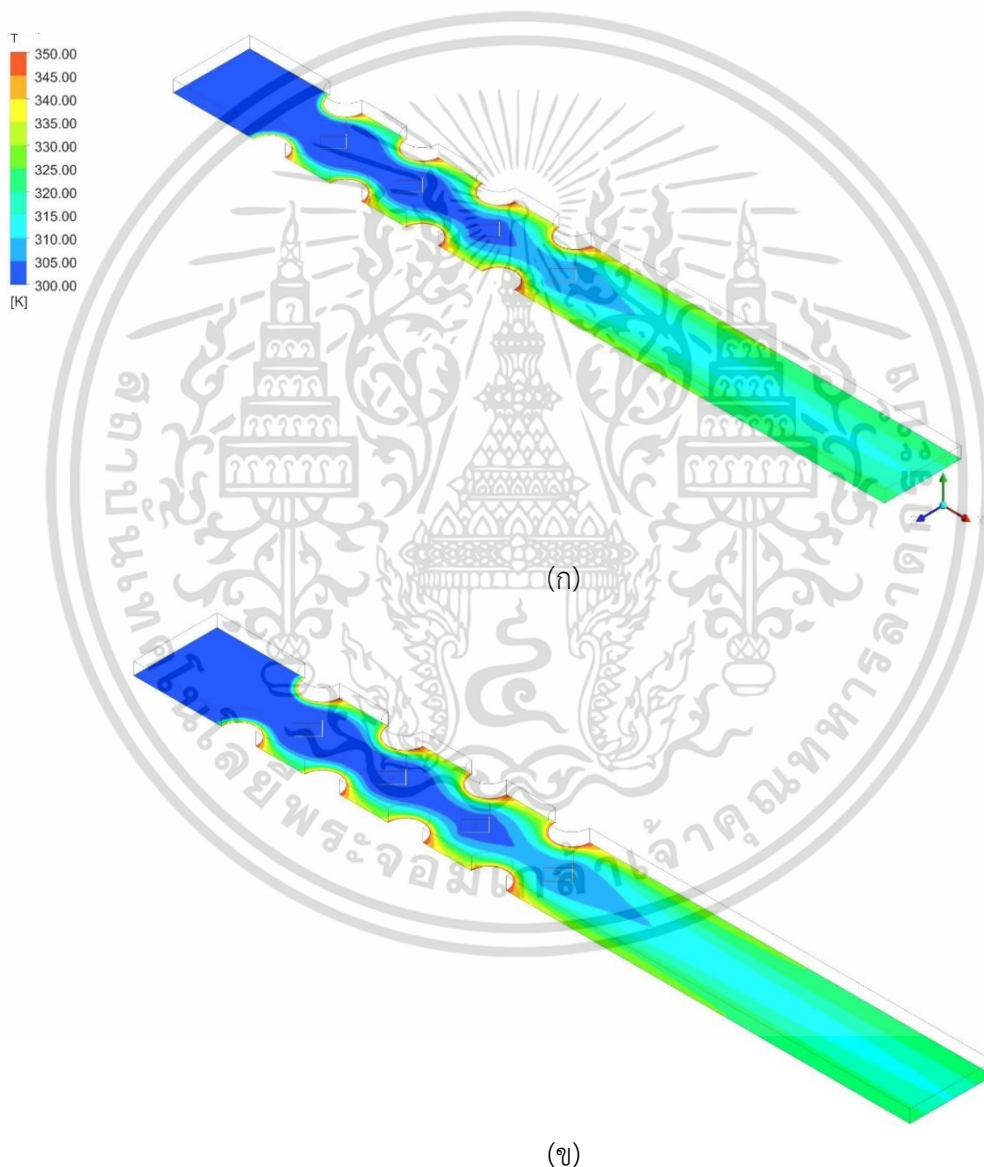
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.53 เส้นกระแสการไหล 3 มิติ ครีบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แถว ทิศทาง V-Downstream มุมปะทะการไหล 45° ความสูง $0.9H$ สำหรับ (ก) ไม่เจาะรู (ข) เจาะ 1 รู และ (ค) เจาะ 2 รู เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

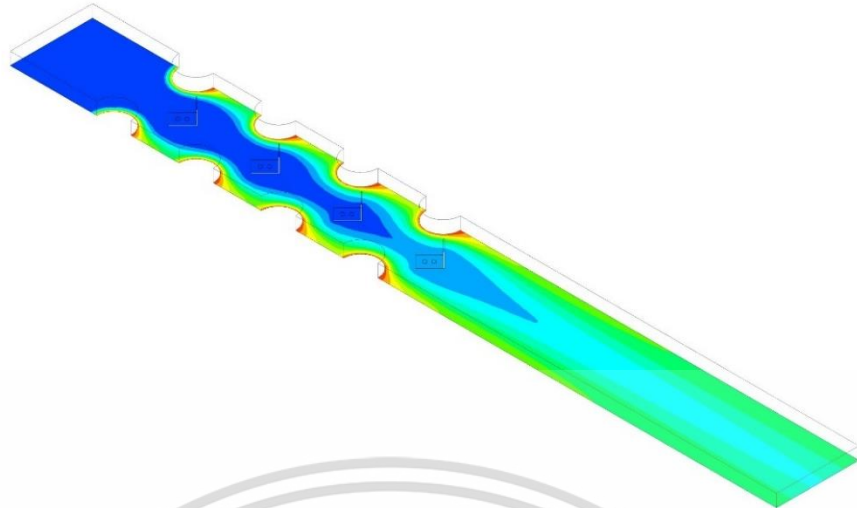
รูปที่ 5.52 (ก) (ข) และ (ค) แสดงการเปรียบเทียบเส้นกระแสการไหลของอากาศสำหรับครีบบที่ติดตั้งปีก 4 แถว มุมปะทะการไหล 45° แบบไม่เจาะรู, เจาะ 1 และเจาะ 2 รู ตามลำดับ ที่เลขเรย์โนลด์ 200 พบว่าพฤติกรรมกรไหลของทั้งสามกรณีมีความคล้ายคลึงกัน จะพบว่าเกิดกระแสหมุนวนบริเวณด้านหลังของปีกรูปตัววีจำนวน 2 - 4 คู่ ซึ่งกระแสหมุนวนที่เกิดขึ้นดังกล่าวจะไหลกระแทกผนังด้านบนและด้านล่างของครีบ การเจาะรูจะทำให้กระแสการไหลของอากาศไหลเข้าไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับผนังท่อได้น้อยลง ทั้งนี้การเจาะรูเพิ่มจะช่วยลดค่าความดันตกคร่อมในระบบลงได้

5.1.3.1.2 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน



รูปที่ 5.54 การกระจายตัวของอุณหภูมิครีบบที่ติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แถว ทิศทาง V-Downstream มุมปะทะการไหล 45° ความสูง $0.9H$ สำหรับ (ก) ไม่เจาะรู (ข) เจาะ 1 รู และ (ค) เจาะ 2 รู

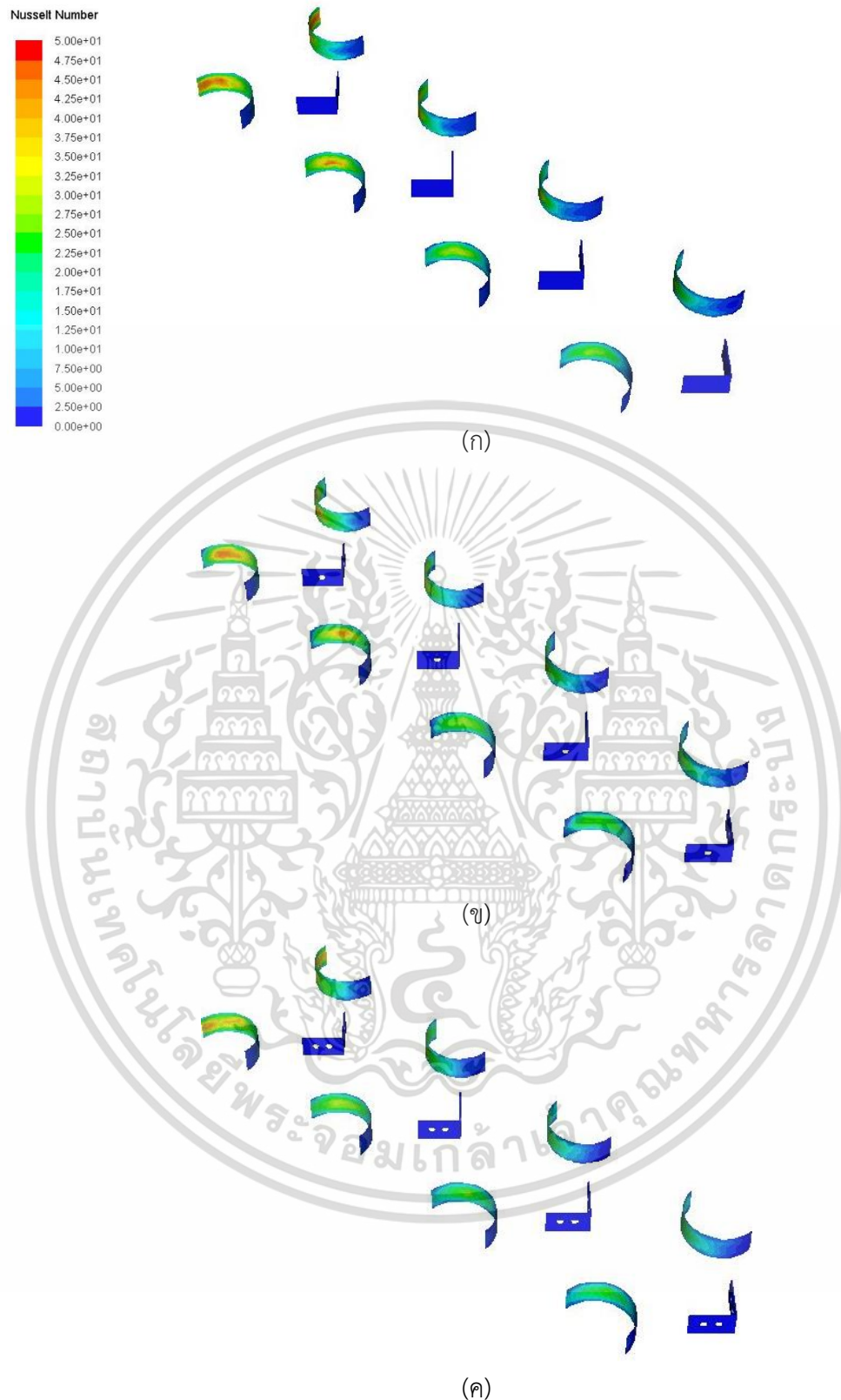
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)

รูปที่ 5.54 (ต่อ) การกระจายตัวของอุณหภูมิครีบทัดตั้งปีกรูปตัววี 4 แถว ทิศทาง V-Downstream มุมปะทะการไหล 45° ความสูง $0.9H$ สำหรับ (ก) ไม่เจาะรู (ข) เจาะ 1 รู และ (ค) เจาะ 2 รู

สำหรับพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน แสดงดังรูปที่ 5.54 พบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิของครีบทัดตั้งปีกแบบไม่เจาะรู จะมีการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่า เนื่องจากกระแสการไหลของอากาศถูกควบคุมทิศทางให้ไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับผนังท่อได้โดยตรง แตกต่างจากปีกที่เจาะรู 1 และ 2 รู ที่อากาศสามารถไหลทะลุรูเจาะไปได้ ทำให้กระแสไหลวนมีความเบาบางลง

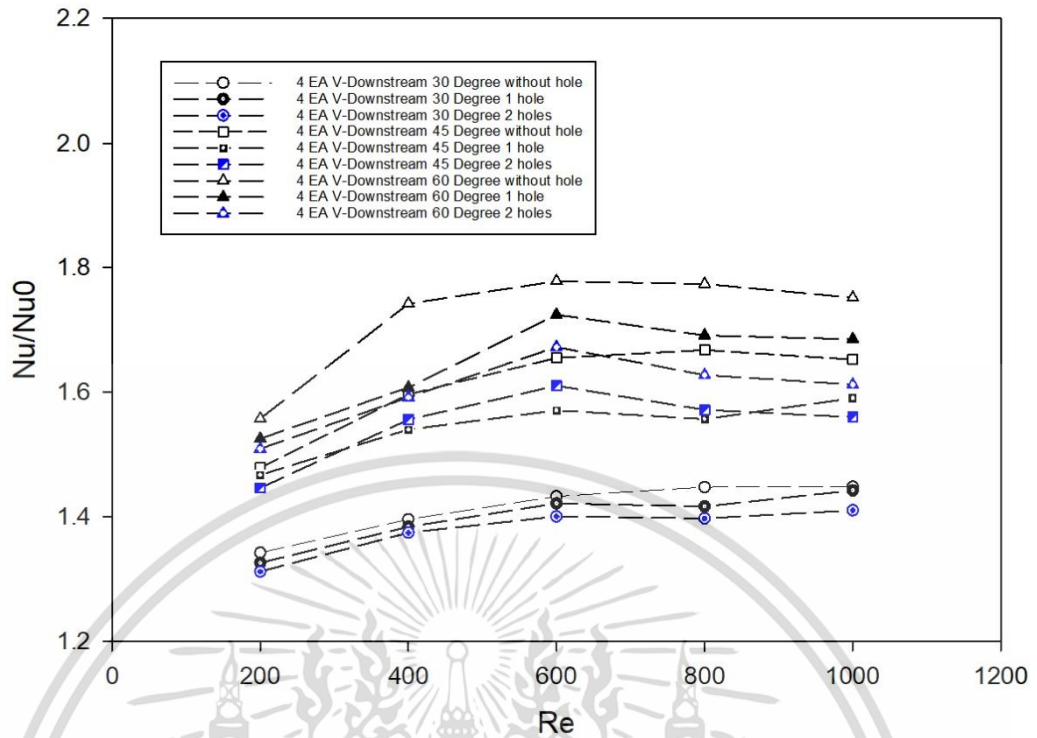


รูปที่ 5.55 การกระจายตัวของค่าเลขนัสเซลบริเวณผิวท่อ ครีบที่มีการติดตั้งรูปตัววี 4 แถว

ทิศทาง V-Downstream มุมปะทะการไหล 45° ความสูง 0.9H

สำหรับ (ก) ไม่เจาะรู (ข) เจาะ 1 รู และ (ค) เจาะ 2 รู

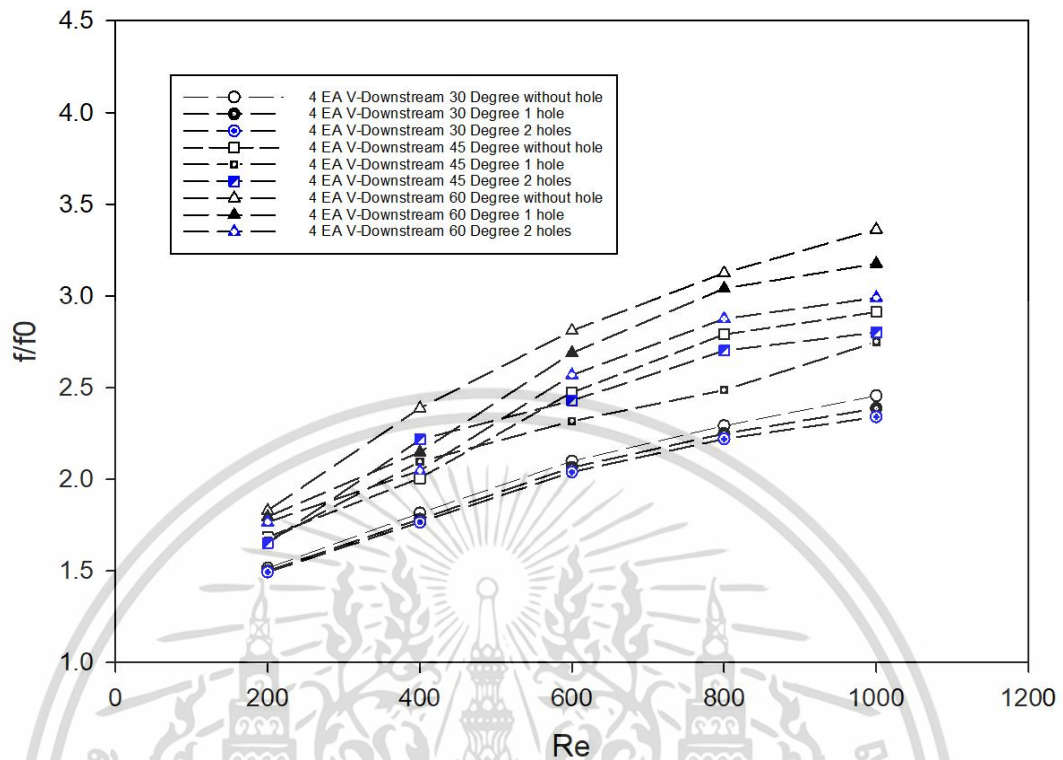
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับวงวิชาการในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.56 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลและเลขเรย์โนลด์
ครีบที่มีการติดตั้งรูปตัววี 4 แฉก แบบเจาะรู

รูปที่ 5.56 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลและเลขเรย์โนลด์ของครีบที่มีการติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แฉก แบบไม่เจาะรู เจาะ 1 รู และ เจาะ 2 รู ที่มุมปะทะการไหลต่าง ๆ พบว่าเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เลขนัสเซลเพิ่มขึ้น โดยการติดตั้งปีกแบบไม่เจาะรูจะให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลที่สูงกว่าปีกแบบเจาะรูทั้ง 2 กรณี ที่เลขเรย์โนลด์เท่ากัน โดยจำนวนรูเจาะที่เพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราส่วนเลขนัสเซลลดลงทุกมุมปะทะการไหล โดยเลขนัสเซลของการติดตั้งปีกแบบไม่เจาะรู มีค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลมากที่สุด คือ 1.78 ที่เลขเรย์โนลด์ 600 มุมปะทะการไหล 60° และเลขนัสเซลของการติดตั้งปีกแบบเจาะ 2 รู มีค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลน้อยที่สุด คือ 1.25 ที่เลขเรย์โนลด์ 200 ที่มุมปะทะการไหล 30°

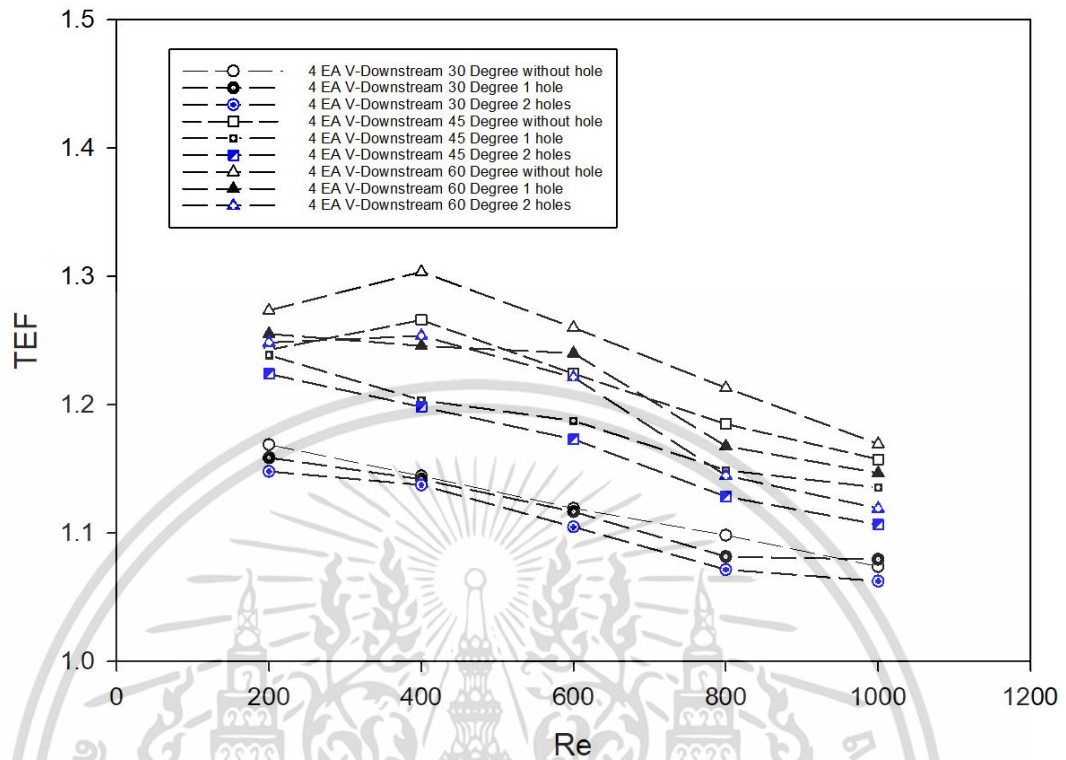
5.1.3.1.3 การสูญเสียความดัน



รูปที่ 5.57 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานและเลขเรย์โนลด์
ครีบที่มีการติดตั้งรูปตัววี 4 แถว แบบเจาะรู

รูปที่ 5.57 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานและเลขเรย์โนลด์ของครีบที่มีการติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แถว แบบไม่เจาะรู เจาะ 1 รู และ เจาะ 2 รู พบว่า อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานของการติดตั้งปีกแบบไม่เจาะรูจะมีค่าที่มากกว่ากรณีที่เจาะรูทุกกรณี โดยการติดตั้งปีกแบบเจาะ 2 รู จะให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานที่น้อยกว่า ณ เลขเรย์โนลด์เท่ากัน

5.1.3.1.4 สมรรถนะเชิงความร้อน



รูปที่ 5.58 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อนและเลขเรย์โนลด์ ครีบที่มีการติดตั้งรูปตัววี 4 แฉก แบบเจาะรู

รูปที่ 5.58 แสดงถึงความสัมพันธ์สมรรถนะเชิงความร้อนและเลขเรย์โนลด์ ของครีบของครีบที่มีการติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แฉก แบบไม่เจาะรู เจาะ 1 รู และ เจาะ 2 รู พบว่า การติดตั้งปีกแบบไม่เจาะรูจะให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่สูงกว่าการติดตั้งปีกแบบเจาะรูทั้ง 2 กรณี โดยมีค่าสมรรถนะเชิงความร้อน เท่ากับ 1.15 – 1.32 และมีค่ามากที่สุด ณ เลขเรย์โนลด์ 600 สำหรับการติดตั้งปีกแบบเจาะ 2 รู จะให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่น้อยที่สุดทุกกรณี และมีค่าน้อยที่สุด คือ 1.09 ณ เลขเรย์โนลด์ 1,000 ที่มุมปะทะการไหล 60°

5.2 ผลแบบจำลองการติดตั้งปีกรูปแบบหยัก

5.2.1 ปีกรูปแบบหยัก ติดตั้งแบบ 4 แถว (4EA Wavy Winglet) ทิศทาง Downstream

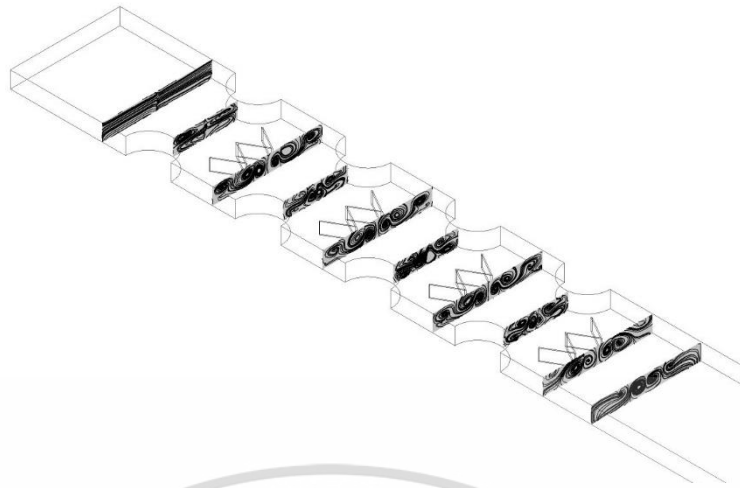
การติดตั้งปีกรูปตัวแบบหยัก 4 แถว บริเวณครีbsd้านล่าง ทิศทาง Downstream พิจารณาที่มุมปะทะการไหล 30° , 45° และ 60° อัตราส่วนความสูงของปีกแบบหยัก เท่ากับ 0.5H, 0.7H และ 0.9H ของความสูงระหว่างครีบ โดยความสูงระหว่างครีบเท่ากับ 3.85 mm ความหนาของปีกมีค่า 0.2 mm แสดงดังรูปที่ 5.59



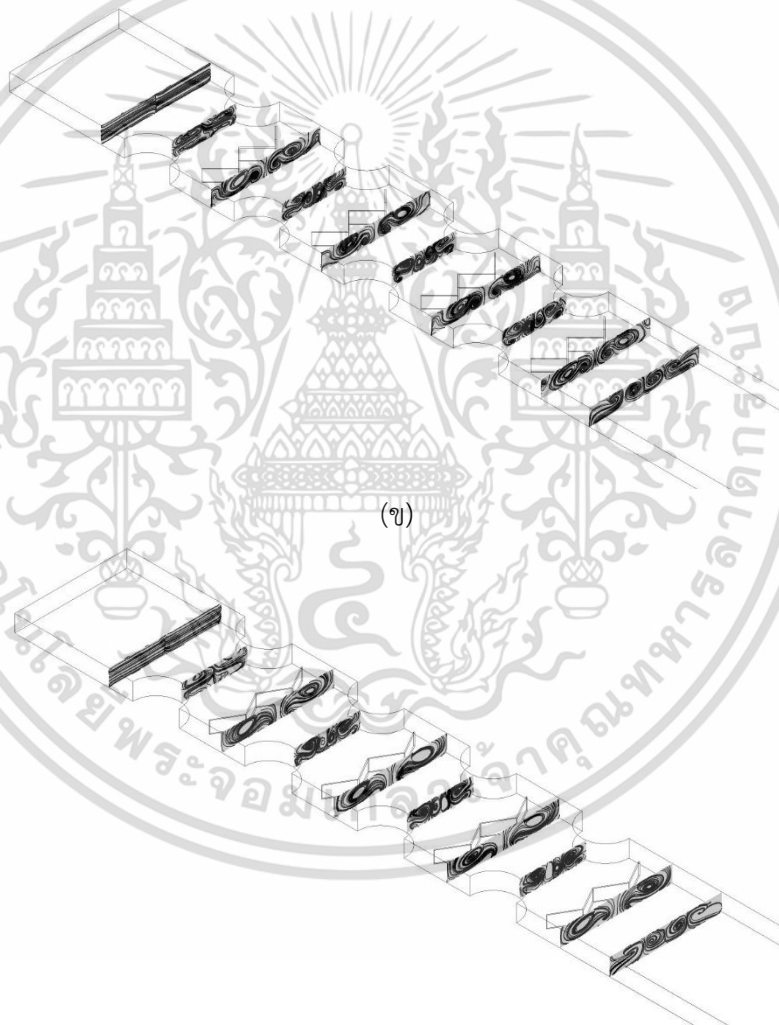
รูปที่ 5.59 ตัวอย่างแบบจำลองครีbsd ที่ติดตั้งปีกแบบหยัก 4 แถว ทิศทาง Downstream

5.2.1.1 พฤติกรรมการไหล

รูปที่ 5.60 (ก) (ข) และ (ค) แสดงการเปรียบเทียบเส้นกระแสการไหลของอากาศสำหรับครีbsd ที่มีการติดตั้งปีกแบบหยัก ความสูง 0.9H ของความสูงระหว่างครีบ ที่เลขเรย์ โนลด์ 600 พบว่าพฤติกรรมการไหลของทั้งสามกรณีมีความคล้ายคลึงกัน จะพบว่าเกิดกระแสหมุนวนที่เกิดขึ้นบริเวณด้านหลังของท่อที่ และเกิดกระแสหมุนวนบริเวณด้านหลังของปีกแบบหยัก จำนวน 2 – 4 คู่ และ ซึ่งกระแสหมุนวนที่เกิดขึ้นดังกล่าวจะไหลกระแทกผนังด้านบนและด้านล่างของครีบ เมื่อพิจารณา ร่วมกับการติดตั้งปีกรูปตัววี หัวข้อ 5.1.1 จะพบว่าการติดตั้งปีกแบบหยักจะให้กระแสหมุนวนที่มากกว่า ทำให้อากาศไหลกระแทกกับผนังได้ดีกว่า



(ก)

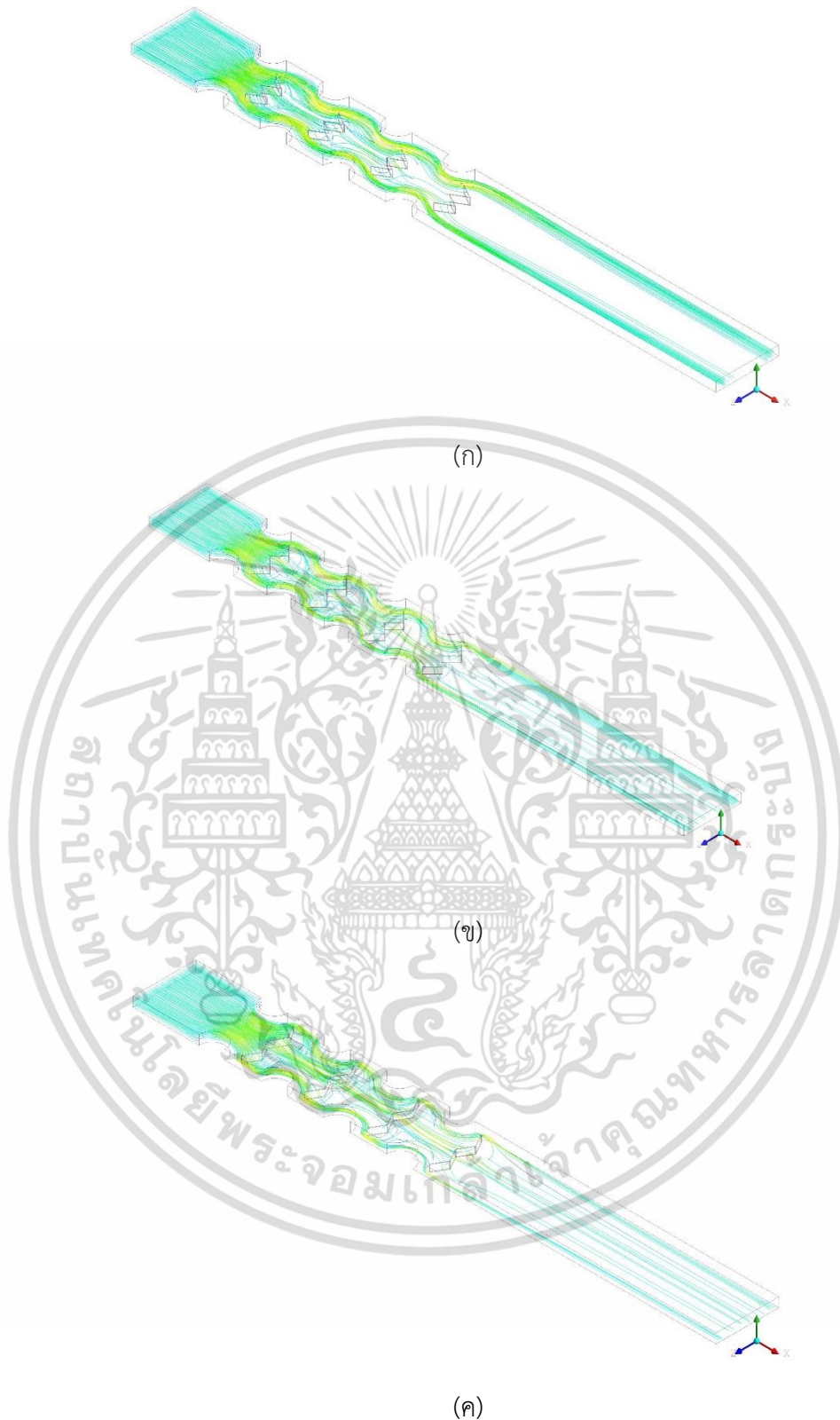


(ข)

(ค)

รูปที่ 5.60 เส้นกระแสน้ำไหลบนระนาบตามการไหล ครีบที่มีการติดตั้งปีกแบบหยัก
ทิศทาง Downstream สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30° (ข) มุมปะทะการไหล 45°
และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°

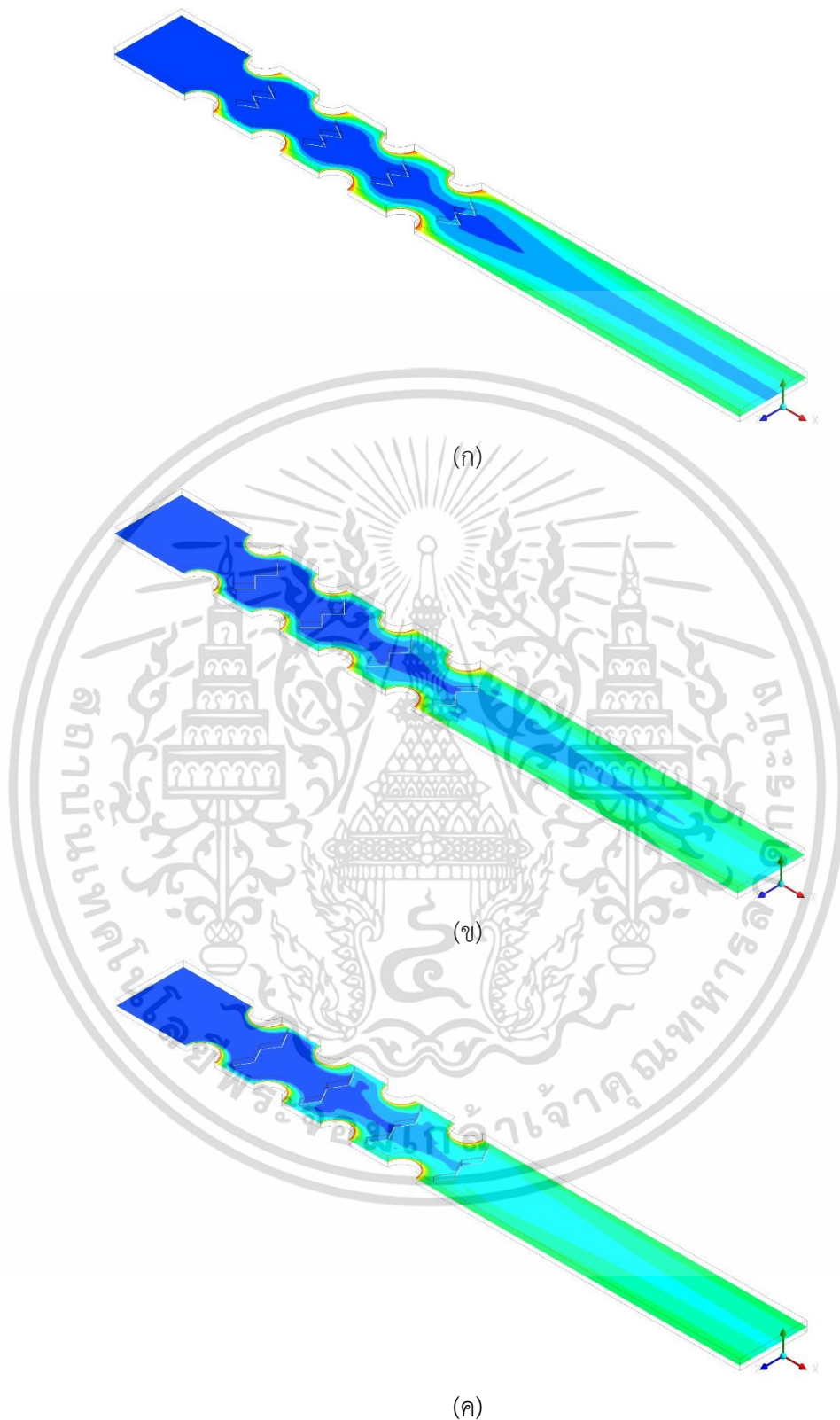
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.61 เส้นกระแสการไหล 3 มิติ ครีบที่มีการติดตั้งปีกแบบหยัก 4 แถว ทิศทาง Downstream สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30° (ข) มุมปะทะการไหล 45° และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.1.2 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน



รูปที่ 5.62 การกระจายตัวของอุณหภูมิ ครีปที่มีการติดตั้งปีแบบหยัก 4 แถว
ทิศทาง Downstream สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30° (ข) มุมปะทะการไหล 45°
และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°

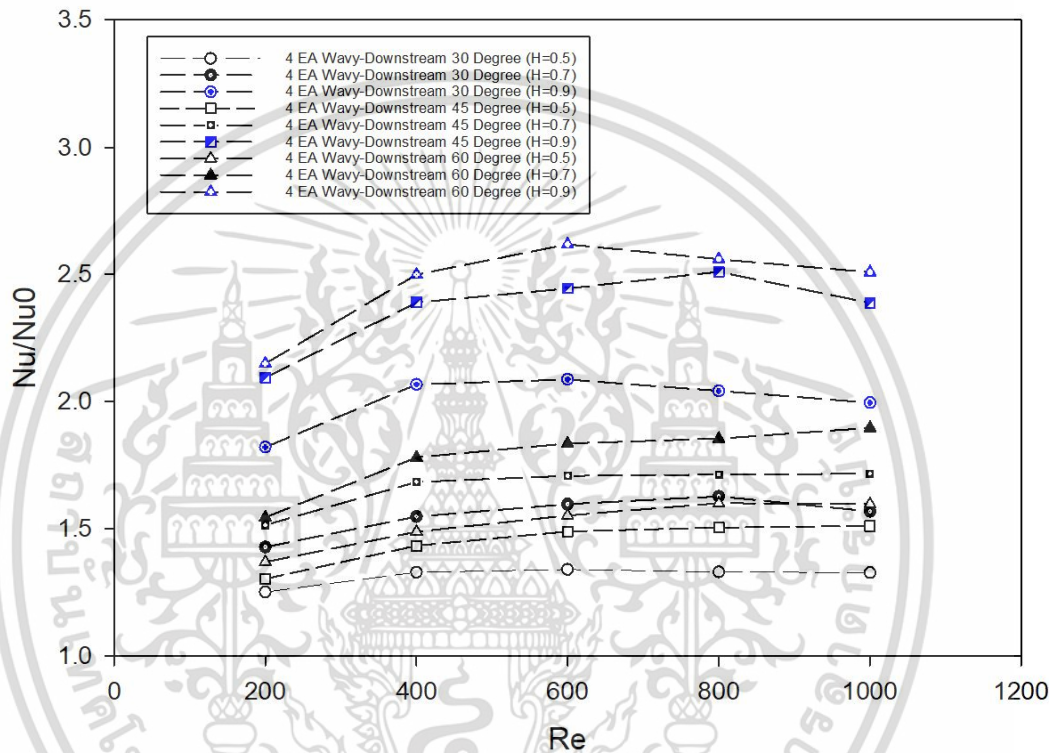
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.63 การกระจายตัวของค่าเลขนัสเซลบริเวณผิวท่อ ครีบที่มีการติดตั้งปีแบบหยัก 4 แถว
ทิศทาง Upstream สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30° (ข) มุมปะทะการไหล 45°
และ (ค) มุมปะทะการไหล 60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน แสดงดังรูปที่ 5.62 (ก) (ข) (ค) พบว่ากระแสหมุนวนที่เกิดขึ้นด้านหลังท่อ และด้านหลังของปีกแบบหยัก จะทำให้กระแสการไหลของอากาศไหลไปกระแทกกับบริเวณผนังด้านบนและด้านล่างของครีบ ทำให้มีการถ่ายเทความร้อนไปยังผนังท่อได้มากขึ้น พื้นที่การแลกเปลี่ยนความร้อนของการติดตั้งปีกหยักที่มุมปะทะการไหลต่าง ๆ มีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน จึงยังไม่สามารถสรุปได้ถึงค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มากขึ้น จึงต้องนำเสนอในรูปแบบของอัตราส่วนนัสเซลและค่าสมรรถนะเชิงความร้อนต่อไป

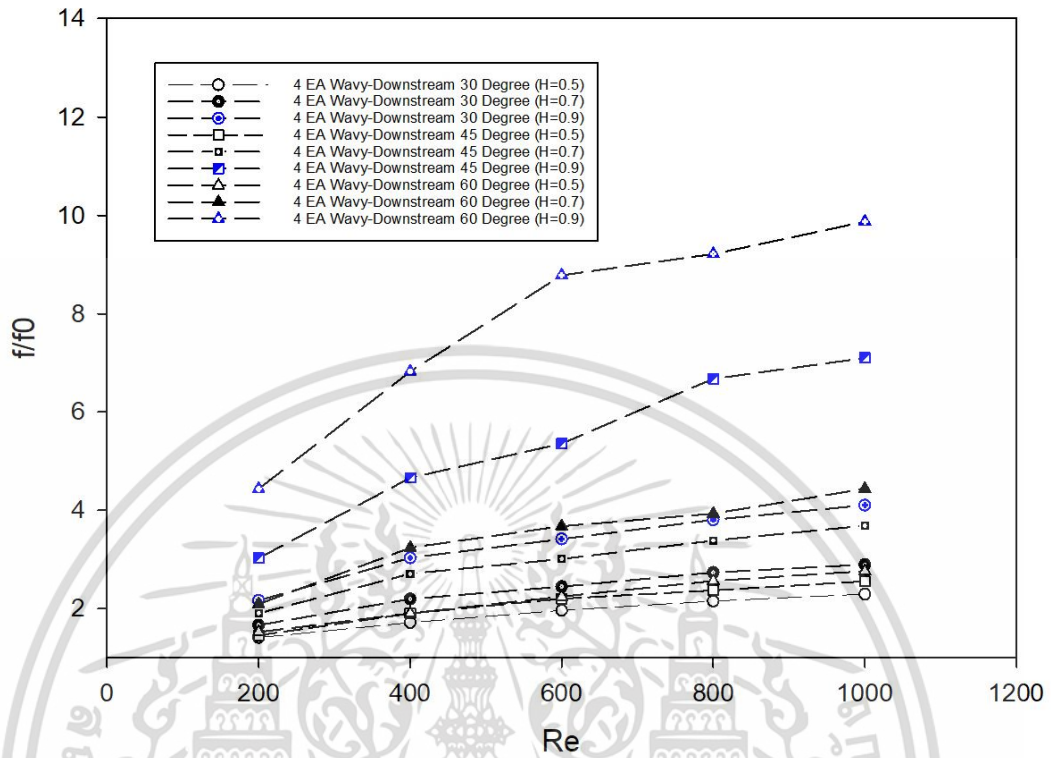


รูปที่ 5.64 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลและเลขเรย์โนลด์ สำหรับครีบที่ติดตั้งปีกแบบหยัก 4 แถว ทิศทาง V-Downstream

รูปที่ 5.64 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลและเลขเรย์โนลด์ของครีบที่มีการติดตั้งปีกแบบหยัก 4 แถว ทิศทาง Downstream ที่ความสูงปีกต่าง ๆ มุมปะทะการไหลต่าง ๆ พบว่า เมื่อความสูงของปีกเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลเพิ่มมากขึ้น และเมื่อ เลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เลขนัสเซลเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน โดยที่เลขนัสเซลของปีกแบบหยักที่มีมุมปะทะการไหล 30° จะมีค่าน้อยที่สุด และเลขนัสเซลจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมุมปะทะการไหลของปีกเพิ่มขึ้นเช่นกัน สำหรับเลขเรย์โนลด์ 200 ที่ความสูง 0.5H มุมปะทะการไหล 30° มีค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลน้อยที่สุดคือ 1.31 ขณะที่ความสูงของปีก 0.9H มุมปะทะการไหล 60° เลขเรย์โนลด์ 600 มีค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลมากที่สุดคือ 2.65 เมื่อเทียบกับครีบเรียบ แต่ทั้งนี้ก็เกิดค่าความดันตกคร่อมมากขึ้นเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

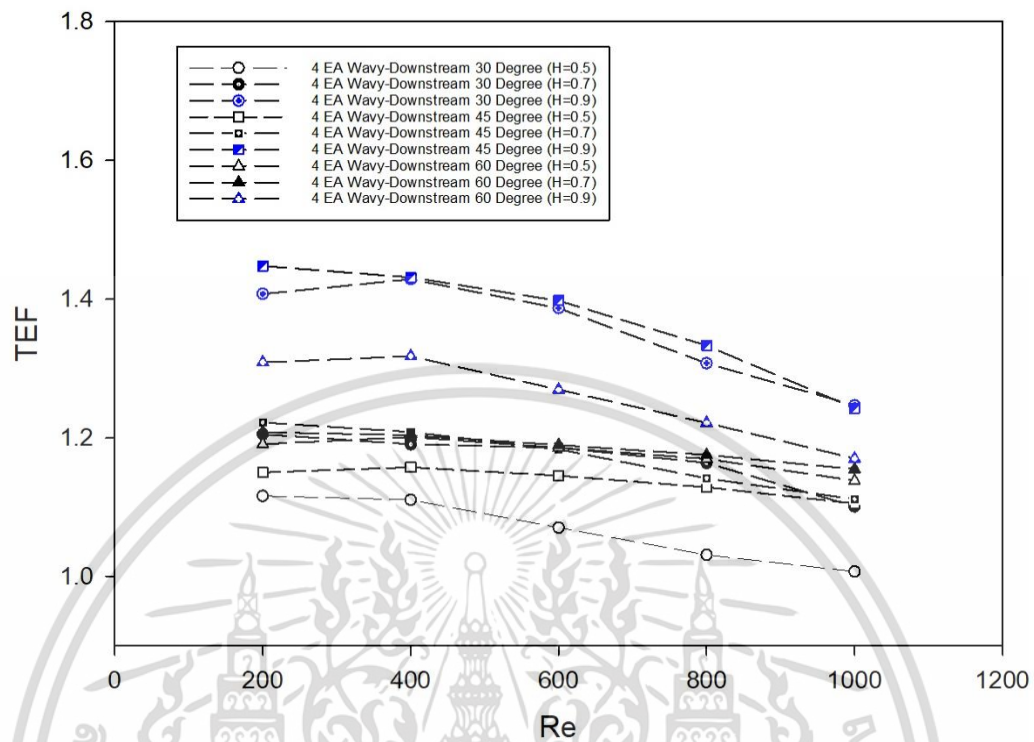
5.2.1.3 การสูญเสียความดัน



รูปที่ 5.65 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานและเลขเรย์โนลด์ สำหรับครีบที่ติดตั้งปีกแบบหยัก 4 แถว ทิศทาง Downstream

รูปที่ 5.65 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานและเลขเรย์โนลด์ของครีบที่มีการติดตั้งปีกแบบหยัก 4 แถว ทิศทาง Downstream ที่ความสูงต่าง ๆ และมุมปะทะการไหลต่าง ๆ พบว่า เมื่อความสูงของปีกเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้น อีกทั้งเมื่อเลขเรย์โนลด์ และมุมปะทะการไหลของปีกเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน โดยที่อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานจะมีค่ามากที่สุด คือ มุมปะทะการไหล 60° เลขเรย์โนลด์ 1,000 มีค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมากที่สุดคือ 11.61 เมื่อเทียบกับครีบเรียบ

5.2.1.4 สมรรถนะเชิงความร้อน



รูปที่ 5.66 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อนและเลขเรย์โนลด์ สำหรับครีที่ติดตั้งปีกแบบหยัก 4 แถว ทิศทาง Downstream

รูปที่ 5.66 แสดงถึงความสัมพันธ์สมรรถนะเชิงความร้อนและเลขเรย์โนลด์ ของครีที่มีการติดตั้งปีกแบบหยัก 4 แถว ทิศทาง Downstream ที่ความสูงต่าง ๆ และ มุมปะทะการไหลต่าง ๆ พบว่า เมื่อความสูงของปีกเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้สมรรถนะเชิงความร้อนเพิ่มมากขึ้น และเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น สมรรถนะเชิงความร้อนมีแนวโน้มลดลง และที่มุมปะทะการไหล 45° จะให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงที่สุด เมื่อเทียบกับมุมปะทะการไหล 30° และ 60° โดย มุมปะทะการไหล 60° มีค่าสมรรถนะเชิงความร้อนต่ำกว่าทุกกรณี เนื่องจากเมื่อมุมปะทะการไหลที่สูงขึ้น จะทำให้การไหลเป็นไปได้ยากมากขึ้น ถึงแม้ว่าที่มุมปะทะการไหลสูง ๆ ทำให้ของไหลถูกเร่งความเร็วผ่านช่องว่าง แต่บริเวณอื่นความเร็วของของไหลจะลดลงอย่างมาก ส่งผลให้เกิดการไหลวนที่สูง และทำให้เกิดค่าความดันตกคร่อมที่สูงขึ้นอย่างมาก โดยค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมีค่ามากที่สุดสำหรับการติดตั้งปีกแบบหยัก ณ มุมปะทะการไหล 45° ความสูงของปีก 0.9H เลขเรย์โนลด์ 200 โดยมีค่าที่สุดคือ 1.44 เมื่อเทียบกับครีเรียบ

5.2.2 ปีกแบบหยัก ติดตั้งแบบ 4 แถว (4EA Wavy Winglet) ทิศทาง Upstream

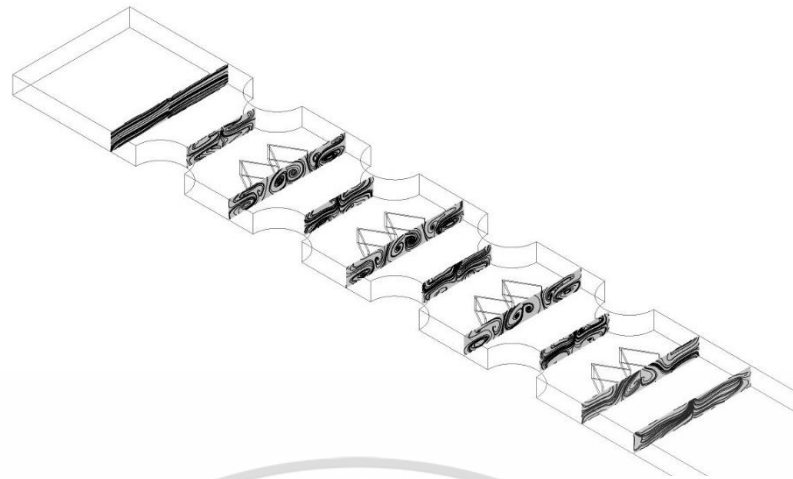
การติดตั้งปีกรูปตัวแบบหยัก 4 แถว บริเวณครีbsd้านล่าง ทิศทาง V-Upstream พิจารณาที่มุมปะทะการไหล 30° , 45° และ 60° อัตราส่วนความสูงของปีกแบบหยัก เท่ากับ $0.5H$, $0.7H$ และ $0.9H$ ของความสูงระหว่างครีbsd โดยความสูงระหว่างครีbsd เท่ากับ 3.85 mm ความหนาของปีกมีค่า 0.2 mm แสดงดังรูปที่ 5.67



รูปที่ 5.67 ตัวอย่างแบบจำลองครีbsd ที่ติดตั้งปีกแบบหยัก 4 แถว ทิศทาง Upstream

5.2.2.1 พฤติกรรมการไหล

รูปที่ 5.68 (ก) (ข) และ (ค) แสดงการเปรียบเทียบเส้นกระแสการไหลของอากาศสำหรับครีbsd ที่มีการติดตั้งปีกแบบหยัก 4 แถว ทิศทาง Upstream ความสูง $0.9H$ ของความสูงระหว่างครีbsd ที่เลขเรย์ โนลด์ 600 พบว่า พฤติกรรมการไหลของทั้งสามกรณีมีความคล้ายคลึงกัน จะพบว่าการเกิดกระแสหมุนวนหลักจำนวน 2 คู่ด้านหลังปีก และเกิดกระแสหมุนวนย่อยบริเวณด้านหลังของปีกแบบหยักจำนวน 2 – 4 คู่ ซึ่งกระแสหมุนวนที่เกิดขึ้นดังกล่าวจะไหลกระแทกผนังด้านบนและด้านล่างของครีbsd เมื่อพิจารณาร่วมกับการติดตั้งปีกรูปตัววี หัวข้อ 5.1.1 จะพบว่าการติดตั้งปีกแบบหยักจะให้กระแสหมุนวนที่มากกว่า ทำให้อากาศไหลกระแทกกับผนังได้ดีกว่า และเกิดการคลุกเคล้ากันสมบูรณ์มากกว่า



(ค)

รูปที่ 5.68 เส้นกระแสน้ำไหลบนระนาบตามการไหล ครีบน้ำที่มีการติดตั้งปีกแบบหยัก
ทิศทาง Upstream สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30° (ข) มุมปะทะการไหล 45°

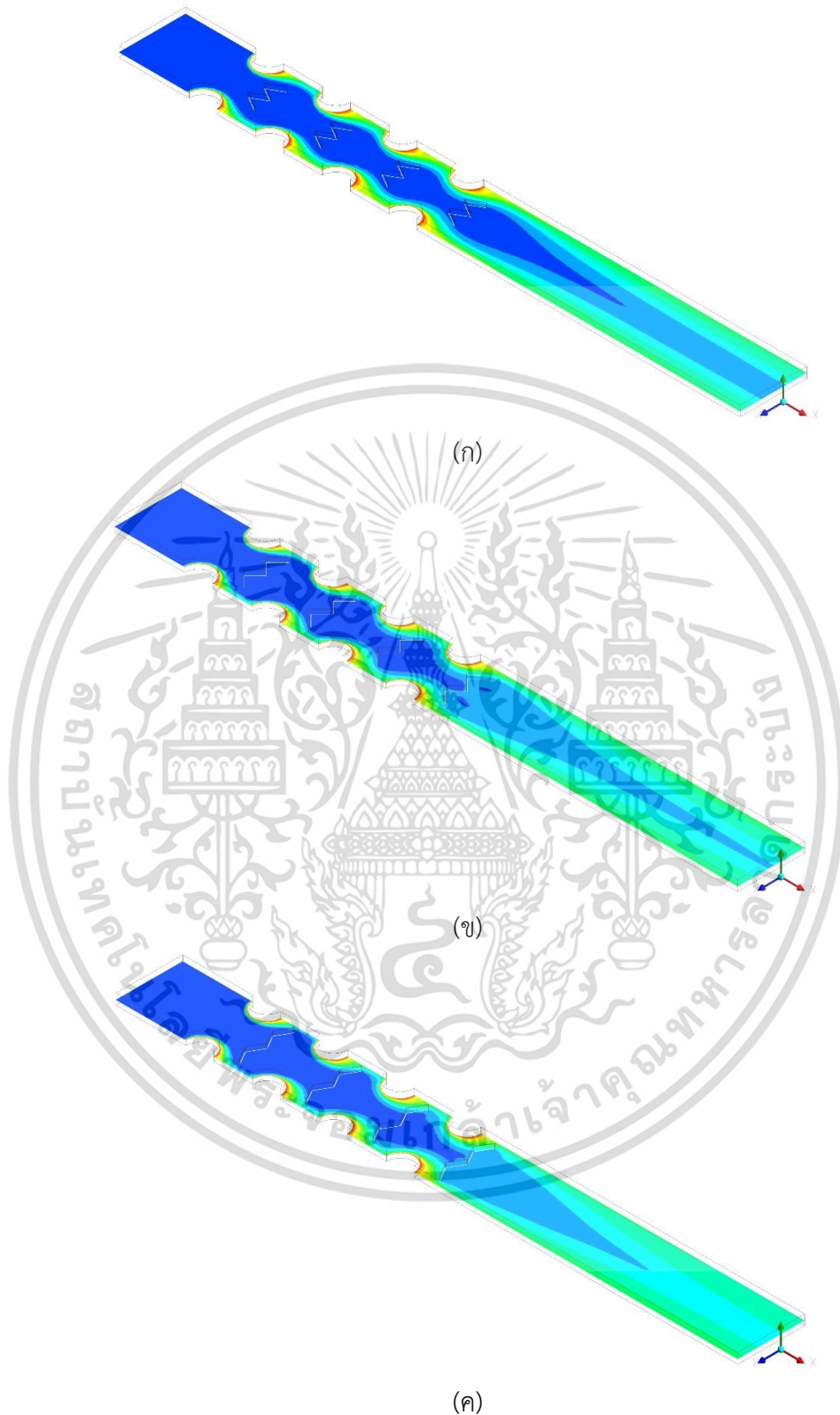
และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.69 เส้นกระแสน้ำไหล 3 มิติ ครีบที่มีการติดตั้งปักแบบหยัก 4 แถว ทิศทาง Upstream สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30° (ข) มุมปะทะการไหล 45° และ (ค) มุมปะทะการไหล 60° เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2.2 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน



รูปที่ 5.70 การกระจายตัวของอุณหภูมิ ครีบที่มีการติดตั้งปีแบบหยัก 4 แฉก ทิศทาง Upstream สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30° (ข) มุมปะทะการไหล 45° และ (ค) มุมปะทะการไหล 60

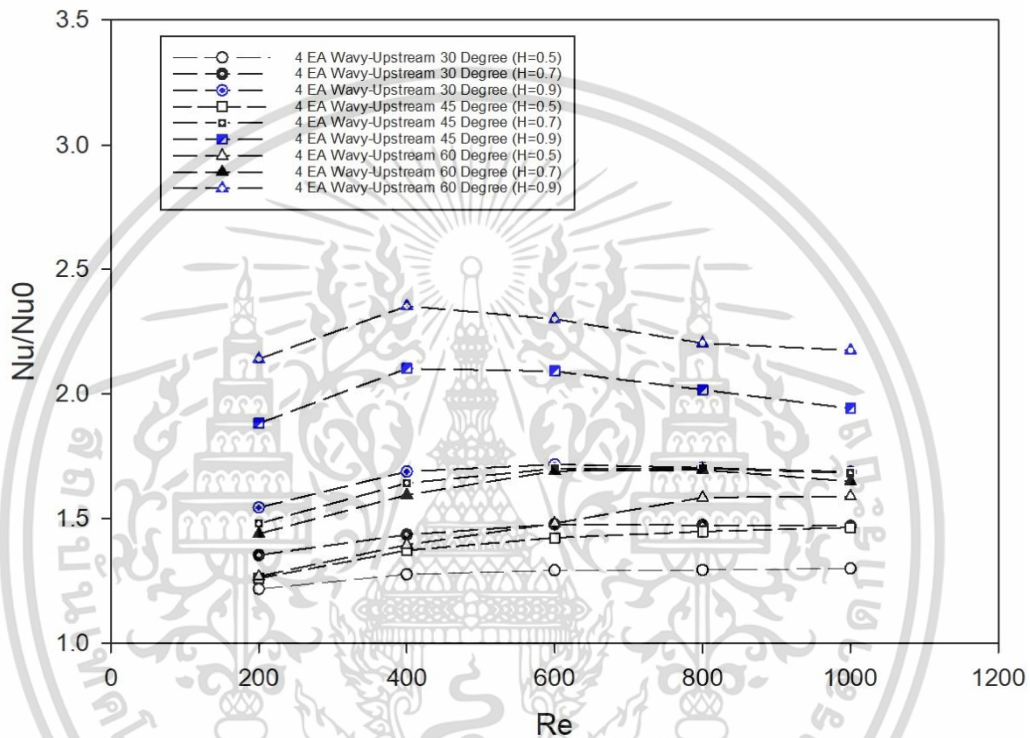
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.71 การกระจายตัวของค่าเลขนัสเซลบริเวณผิวท่อ ครีบที่มีการติดตั้งปีแบบหยัก 4 แถว ทิศทาง Upstream สำหรับ (ก) มุมปะทะการไหล 30° (ข) มุมปะทะการไหล 45° และ (ค) มุมปะทะการไหล 60°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน แสดงดังรูปที่ 5.70 (ก) (ข) (ค) พบว่ากระแสหมุนวนที่เกิดขึ้นด้านหลังท่อ และด้านหลังของปีกแบบหยัก จะทำให้กระแสการไหลของอากาศไหลไปกระแทกกับบริเวณผนังด้านบนและด้านล่างของครีบ ทำให้มีการถ่ายเทความร้อนไปยังผนังท่อได้มากขึ้น พื้นที่การแลกเปลี่ยนความร้อนของการติดตั้งปีกหยักที่มุมปะทะการไหลต่าง ๆ มีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน จึงยังไม่สามารถสรุปได้ถึงค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มากขึ้น จึงต้องนำเสนอในรูปแบบของอัตราส่วนนัสเซลและค่าสมรรถนะเชิงความร้อนต่อไป



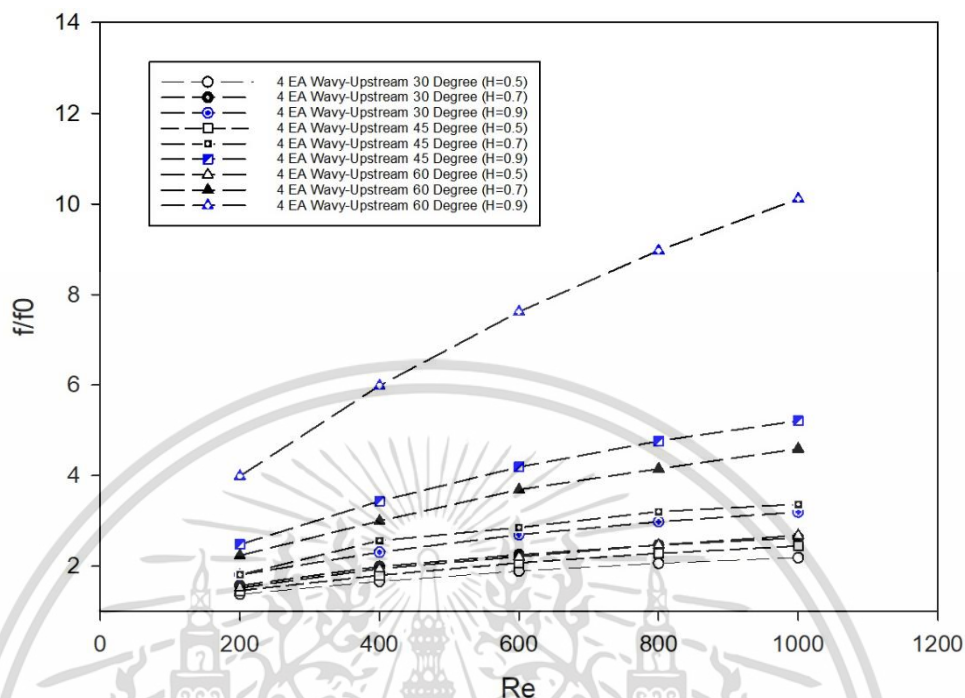
รูปที่ 5.72 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลและเลขเรย์โนลด์ สำหรับครีบที่ติดตั้งปีกแบบหยัก 4 แฉก ทิศทาง Upstream

รูปที่ 5.72 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลและเลขเรย์โนลด์ของครีบที่ติดตั้งปีกแบบหยัก 4 แฉก ทิศทาง Upstream ความสูงต่าง ๆ และที่มุมปะทะการไหลต่าง ๆ พบว่าเมื่อความสูงของปีกเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลเพิ่มมากขึ้น และเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เลขนัสเซลเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน โดยที่เลขนัสเซลของปีกแบบหยักที่มีมุมปะทะการไหล 30° จะมีค่าน้อยที่สุด และเลขนัสเซลจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมุมปะทะการไหลของปีกเพิ่มขึ้นเช่นกัน สำหรับเลขเรย์โนลด์ 200 ที่ความสูง 0.5H มุมปะทะการไหล 30° มีค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลน้อยที่สุดคือ 1.21 ขณะที่ความสูงของปีก 0.9H มุมปะทะการไหล 60° เลขเรย์โนลด์ 400 มีค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลมากที่สุดคือ 2.35 เมื่อเทียบกับครีบเรียบ แต่ทั้งนี้ก็เกิดค่าความดันตกคร่อมมาก

ขึ้นเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

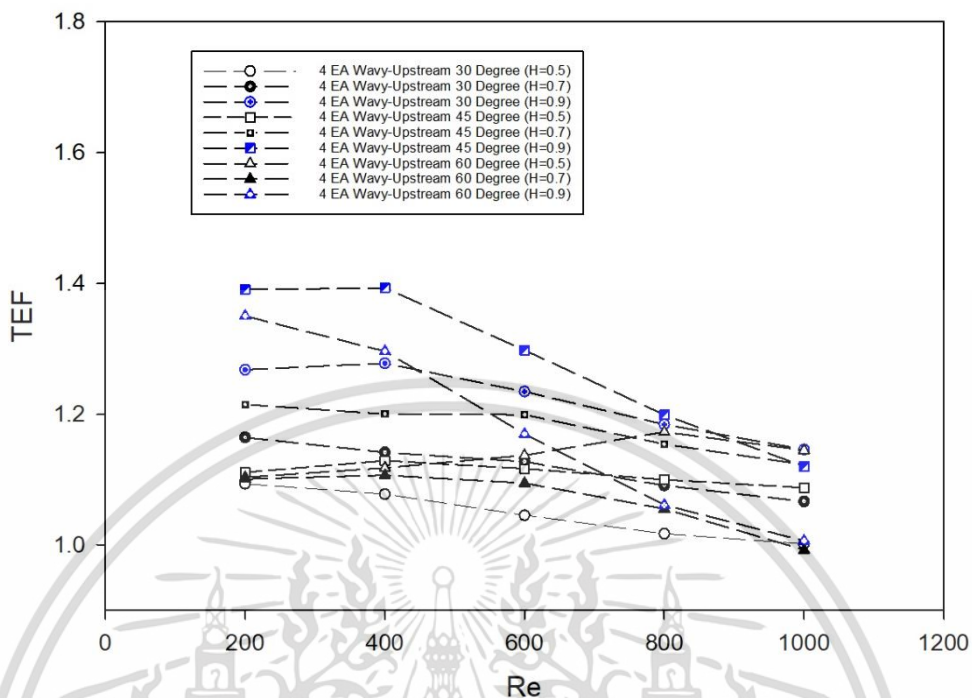
5.2.1.3 การสูญเสียความดัน



รูปที่ 5.73 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานและเลขเรย์โนลด์ สำหรับครีบที่ติดตั้งปีกแบบหยัก 4 แถว ทิศทาง V-Upstream

รูปที่ 5.73 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานและเลขเรย์โนลด์ของครีบที่มีการติดตั้งปีกแบบหยัก 4 แถว ทิศทาง Upstream ความสูงต่าง ๆ และมุมปะทะการไหลต่าง ๆ พบว่า เมื่อความสูงของปีกเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งเมื่อเลขเรย์โนลด์ และมุมปะทะการไหลของปีกเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน โดยที่เลขเรย์โนลด์ 200 ความสูง 0.5H มุมปะทะการไหล 30° มีค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานน้อยที่สุดคือ 1.38 และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานจะมีค่ามากที่สุด คือ มุมปะทะการไหล 60° เลขเรย์โนลด์ 1,000 มีค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมากที่สุดคือ 10.11 เมื่อเทียบกับครีบเรียบ

5.2.1.4 สมรรถนะเชิงความร้อน



รูปที่ 5.74 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อนและเลขเรย์โนลด์ สำหรับครีบที่ติดตั้งปีกแบบหยัก 4 แถว ทิศทาง V-Upstream

รูปที่ 5.74 แสดงถึงความสัมพันธ์สมรรถนะเชิงความร้อนและเลขเรย์โนลด์ ของครีบที่มีการติดตั้งปีกแบบหยัก 4 แถว ทิศทาง Upstream ที่ความสูงต่าง ๆ และที่มุมปะทะการไหลต่าง ๆ พบว่าเมื่อความสูงของปีกเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้สมรรถนะเชิงความร้อนเพิ่มมากขึ้น และเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น สมรรถนะเชิงความร้อนมีแนวโน้มลดลง และที่มุมปะทะการไหล 45° จะให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงที่สุด เมื่อเทียบกับมุมปะทะการไหล 30° และ 60° โดย มุมปะทะการไหล 60° มีค่าสมรรถนะเชิงความร้อนต่ำกว่าทุกกรณี เนื่องจากเมื่อมุมปะทะการไหลที่สูงขึ้น จะทำให้การไหลเป็นไปได้ยากมากขึ้น ถึงแม้ว่าที่มุมปะทะการไหลสูง ๆ ทำให้ของไหลถูกเร่งความเร็วผ่านช่องว่าง แต่บริเวณอื่นความเร็วของของไหลจะลดลงอย่างมาก ส่งผลให้เกิดการไหลวนที่สูง และทำให้เกิดค่าความดันตกคร่อมที่สูงขึ้นอย่างมาก โดยค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมีค่ามากที่สุดสำหรับการติดตั้งปีกแบบหยัก ณ มุมปะทะการไหล 45° ความสูงของปีก 0.9H เลขเรย์โนลด์ 400 โดยมีค่าที่สุดคือ 1.39 เมื่อเทียบกับครีบเรียบ

5.2.3 ปีกรูปแบบหยัก ติดตั้งแบบ 4 แถว (4EA V-Winglet) เจาะรู

การติดตั้งปีกรูปหยักแบบ 4 แถว (4EA V-Winglet) บริเวณครีbsd้านล่าง พิจารณา ติดตั้งปีก V-Downstream พิจารณาที่ มุมปะทะการไหล 30° , 45° และ 60° อัตราส่วนความสูงของปีก เท่ากับ $0.9H$ ของความสูงระหว่างครีบ ความสูงระหว่างครีบ 3.85 mm ความหนาของปีก 0.2 mm เจาะรู วงกลมขนาด 1 mm เจาะรูจำนวน 1 และ 2 รู แสดงดังรูปที่ 5.75



รูปที่ 5.75 ตัวอย่างแบบจำลองทางกายภาพของการติดตั้งปีกรูปแบบหยัก มุมปะทะการไหล 45° ความสูง $0.9H$ ติดตั้งแบบ 4 แถวเจาะรู (ก) เจาะ 1 รู (ข) เจาะ 2 รู

รูปที่ 5.76 (ก) (ข) และ (ค) แสดงการเปรียบเทียบเส้นกระแสการไหลของอากาศสำหรับครีบที่ติดตั้งปีกแบบหยัก 4 แถว มุมปะทะการไหล 45° แบบไม่เจาะรู, เจาะ 1 และเจาะ 2 รู ตามลำดับ ที่เลขเรย์ โนลด์ 600 พบว่าพฤติกรรมกรการไหลของทั้งสามกรณีมีความคล้ายคลึงกัน โดยเกิดกระแสหมุนวนบริเวณด้านหลังของปีกรูปตัววีจำนวน 2 – 4 คู่ ซึ่งกระแสหมุนวนที่เกิดขึ้นดังกล่าวจะไหลกระแทกผนังด้านบนและด้านล่างของครีบ การเจาะรูจะทำให้กระแสการไหลของอากาศไหลเข้าไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับผนังท่อได้น้อยลง ทั้งนี้การเจาะรูเพิ่มจะช่วยลดค่าความดันตกคร่อมในระบบลงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.3.1 พฤติกรรมการไหล



รูปที่ 5.76 พฤติกรรมการไหลของอากาศ ที่ติดตั้งปีกแบบหยัก 4 แถว มุมปะทะการไหล 45°

ความสูง $0.9H$ สำหรับ (ก) ไม่เจาะรู (ข) เจาะ 1 รู และ (ค) เจาะ 2 รู

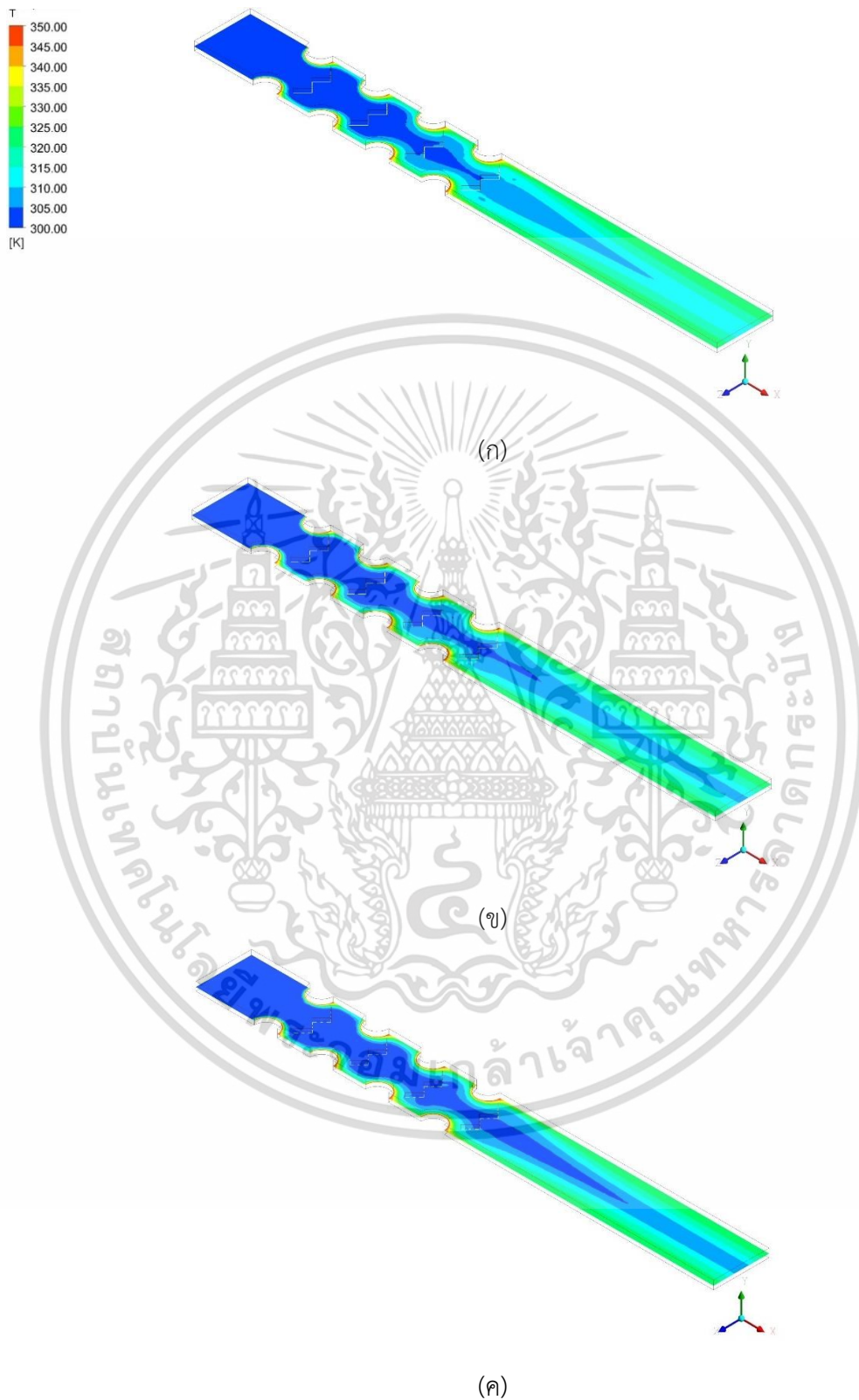
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.77 พฤติกรรมการไหลของอากาศ ครีบที่ติดตั้งปีกแบบหยัก 4 แถว มุมปะทะการไหล 45°
 ความสูง $0.9H$ สำหรับ (ก) ไม่เจาะรู (ข) เจาะ 1 รู และ (ค) เจาะ 2 รู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.3.2 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน

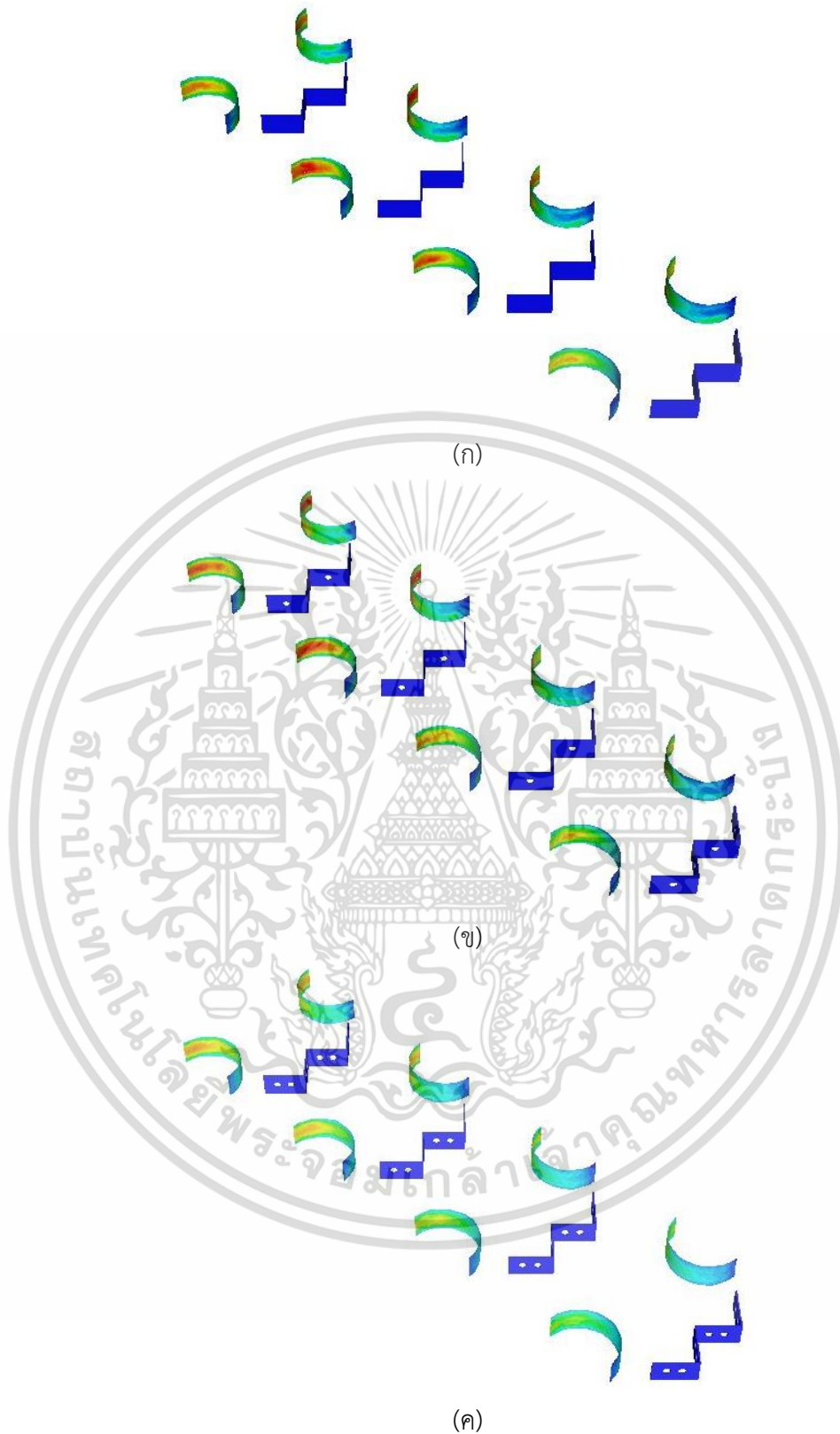


รูปที่ 5.78 การกระจายตัวของอุณหภูมิ ครีบที่ติดตั้งปีกแบบหยัก 4 แถว

มุมปะทะการไหล 45° ความสูง $0.9H$ สำหรับ (ก) ไม่เจาะรู (ข) เจาะ 1 รู และ (ค) เจาะ 2 รู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

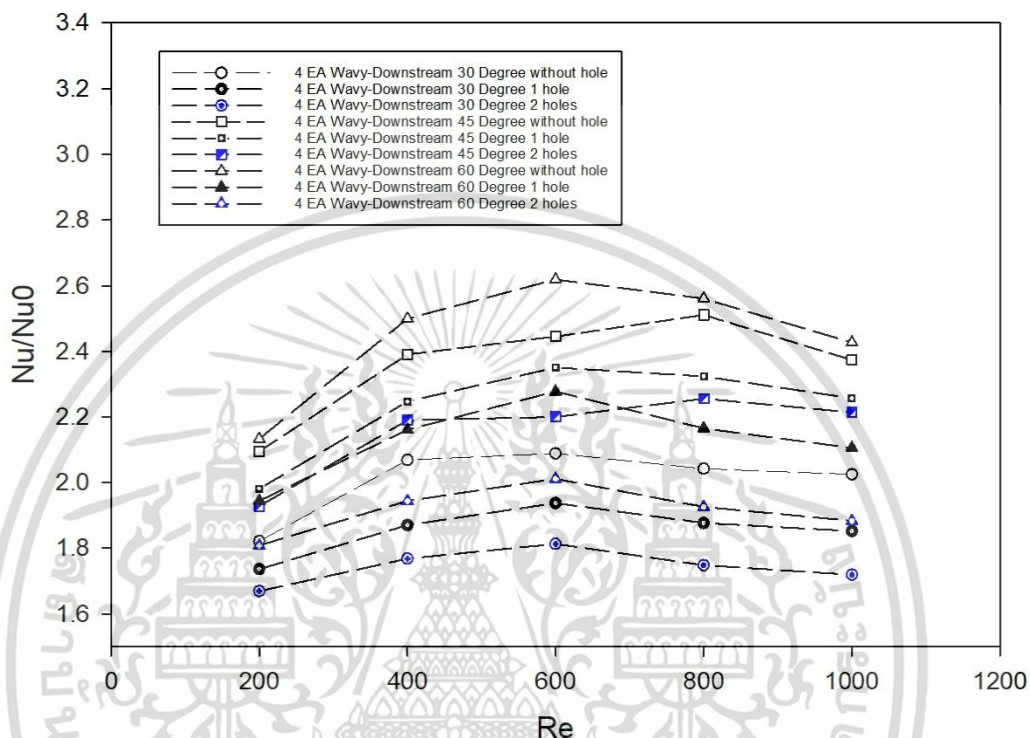
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.79 การกระจายตัวของค่าเลขน้สเซลลบริเวณผิวท้อ ครีบที่มีการติดตั้งปีแบบหยัก 4 แถว มุมปะทะการไหล 45° ความสูง $0.9H$ สำหรับ (ก) ไม่เจาะรู (ข) เจาะ 1 รู และ (ค) เจาะ 2 รู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

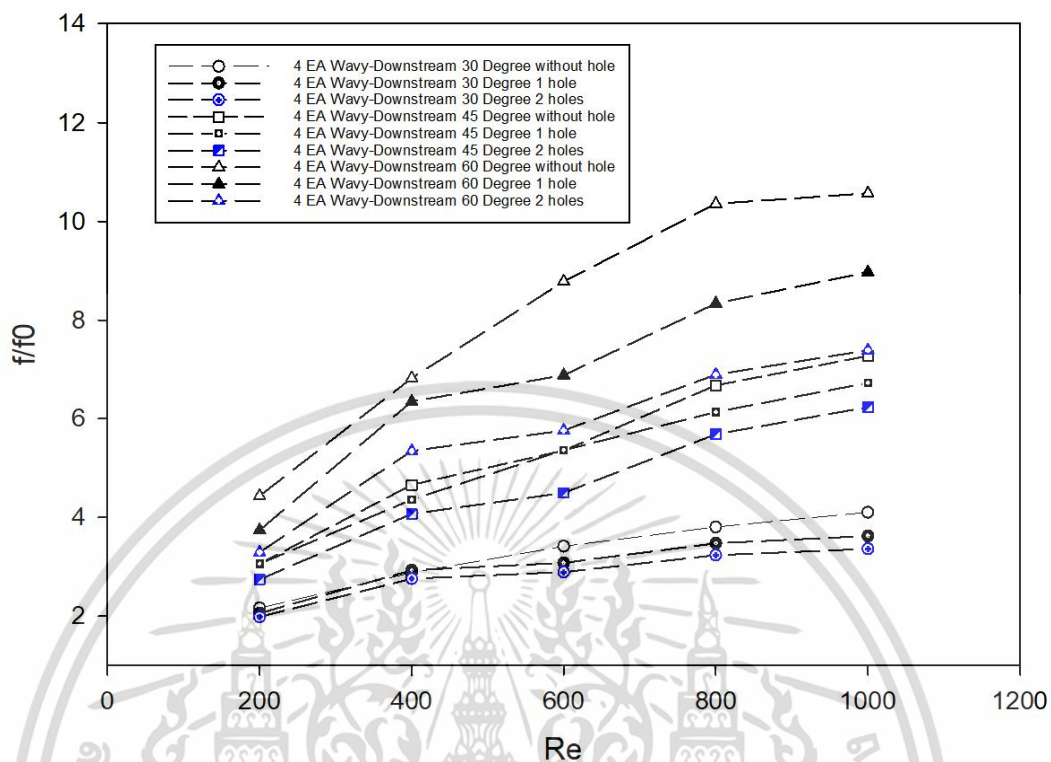
สำหรับพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน แสดงดังรูปที่ 5.78 -5.79 พบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิของครีบบัที่ติดตั้งปีกแบบไม่เจาะรู จะมีการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่า เนื่องจากระแสการไหลของอากาศถูกควบคุมทิศทางให้ไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับผนังท่อได้โดยตรง แตกต่างจากปีกที่เจาะรู 1 และ 2 รู ที่อากาศสามารถไหลทะลุรูเจาะไปได้ ทำให้กระแสไหลวนมีความเบาบางลง



รูปที่ 5.80 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลและเลขเรย์โนลด์ ครีบบัที่มีการติดตั้งปีกแบบหยัก 4 แถว เจาะรู

รูปที่ 5.80 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลและเลขเรย์โนลด์ของครีบบัที่มีการติดตั้งปีกแบบหยัก 4 แถว แบบไม่เจาะรู เจาะ 1 รู และ เจาะ 2 รู พบว่า เมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้เลขนัสเซลเพิ่มขึ้น โดยการติดตั้งปีกแบบไม่เจาะรูจะให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลที่สูงกว่าปีกแบบเจาะรูทั้ง 2 กรณี ที่เลขเรย์โนลด์เท่ากัน โดยจำนวนรูเจาะที่เพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราส่วนเลขนัสเซลลดลง โดยเลขนัสเซลของการติดตั้งปีกแบบไม่เจาะรู โดยที่มุมปะทะการไหล 60° มีค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลมากที่สุดทุกกรณี และมีค่ามากที่สุด คือ 2.61 ที่เลขเรย์โนลด์ 600 และเลขนัสเซลของการติดตั้งปีกแบบเจาะ 2 รู มีค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลน้อยที่สุดทุกมุมปะทะการไหล และมีค่าน้อยที่สุด คือ 1.61 ที่เลขเรย์โนลด์ 200 มุมปะทะการไหล 30°

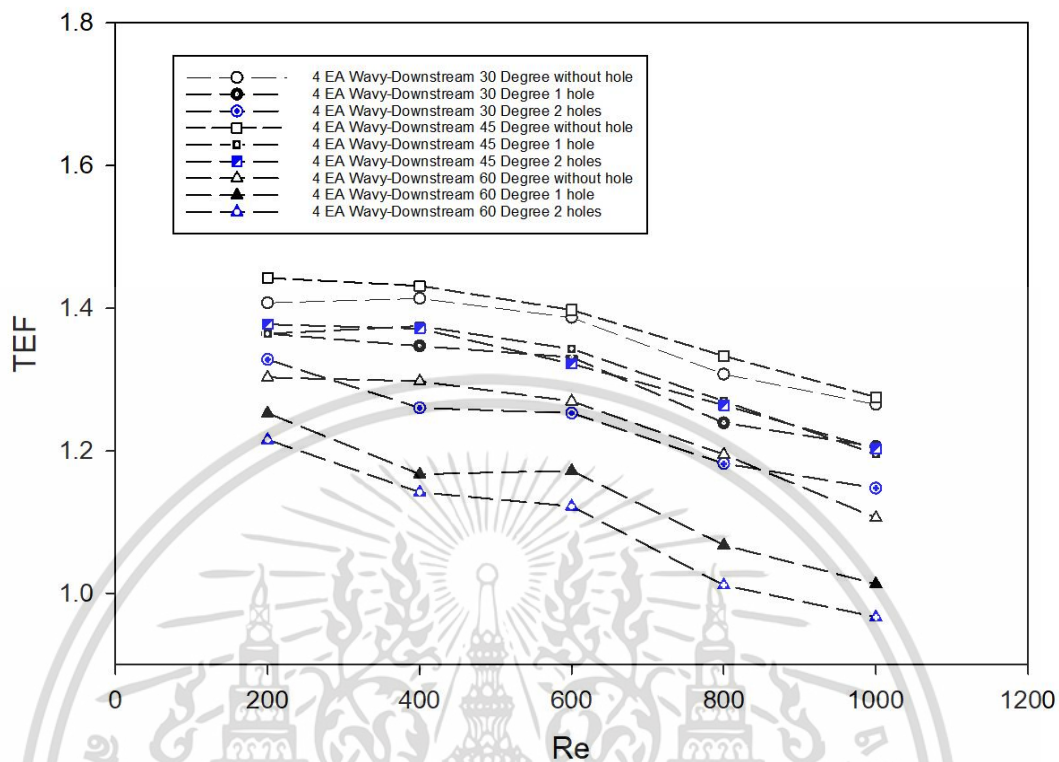
5.2.3.3 การสูญเสียความดัน



รูปที่ 5.81 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานและเลขเรย์โนลด์
ครีบที่มีการติดตั้งปีกแบบหยัก 4 แถว เจาะรู

รูปที่ 5.81 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานและเลขเรย์โนลด์ของครีบที่มีการติดตั้งปีกแบบหยัก 4 แถว แบบไม่เจาะรู เจาะ 1 รู และ เจาะ 2 รู พบว่า อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานของการติดตั้งปีกแบบไม่เจาะรูจะมีค่าที่มากกว่ากรณีที่เจาะรูทุกกรณี โดยการติดตั้งปีกแบบเจาะ 2 รู จะให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานที่น้อยกว่า ณ เลขเรย์โนลด์เท่ากัน

5.2.3.4 สมรรถนะเชิงความร้อน



รูปที่ 5.82 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อนและเลขเรย์โนลด์ ครีบที่มีการติดตั้งปีกแบบหยัก 4 แถว เจาะรู

รูปที่ 5.82 แสดงถึงความสัมพันธ์สมรรถนะเชิงความร้อนและเลขเรย์โนลด์ ของครีบของครีบที่มีการติดตั้งปีกรูปตัววี 4 แถว แบบไม่เจาะรู เจาะ 1 รู และ เจาะ 2 รู พบว่า การติดตั้งปีกแบบไม่เจาะรูจะให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่สูงกว่าการติดตั้งปีกแบบเจาะรูทั้ง 2 กรณี โดยมีค่าสมรรถนะเชิงความร้อน สำหรับการติดตั้งปีกแบบเจาะ 2 รู จะให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่น้อยที่สุดทุกกรณี และมีค่าน้อยที่สุด คือ 1.01 ณ เลขเรย์โนลด์ 1,000 ที่มุมปะทะการไหล 60°

บทที่ 6

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์พฤติกรรมการไหล และตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบและท่อ ที่มีการติดตั้งปีกรูปตัววี และรูปแบบหยัก มุมปะทะการไหล 30° , 45° และ 60° ขนาดความสูงเป็น $0.5H$, $0.7H$ และ $0.9H$ ติดตั้งปีกในทิศทางตามกระแสการไหล (Downstream) และทิศทางสวนกระแสการไหล (Upstream) พิจารณาการไหลในช่วงเลขเรย์โนลด์ 200 ถึง 1,000 สามารถสรุปได้ดังนี้

- การติดตั้งปีกทั้ง 2 ลักษณะ จะทำให้เกิดกระแสการไหลหมุนวนบริเวณด้านหลังของปีกจำนวน 2 – 4 คู่ นอกเหนือจากการหมุนวนแบบปกติที่เกิดขึ้นด้านหลังท่อ โดยกระแสการไหลที่เกิดขึ้นจากปีกจะช่วยบังคับทิศทางการไหล ทำให้ของไหลไหลกระแทกกับผนังด้านบนและด้านล่างของครีบได้ดีขึ้น และช่วยทำให้เกิดการคลุกเคล้ากันอย่างสมบูรณ์ขึ้น

- ความสูงของปีกรูปตัววี และปีกแบบหยักที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อมมีค่าเพิ่มมากขึ้น

- มุมปะทะการไหลที่เพิ่มขึ้น จะทำให้การไหลเป็นไปได้อย่างมากขึ้น เนื่องจากที่มุมปะทะการไหลสูง ๆ ทำให้ของไหลถูกเร่งความเร็วผ่านช่องว่าง แต่บริเวณอื่นความเร็วของของไหลจะลดลงอย่างมาก ส่งผลให้เกิดการไหลวนที่สูง ถึงแม้ทำอัตราส่วนตัวเลขนัสเซลสูงขึ้นก็ตาม แต่ก็ทำให้เกิดค่าความดันตกคร่อมที่สูงขึ้นอย่างมากเช่นกัน จึงต้องพิจารณามุมปะทะการไหลให้เหมาะสมสำหรับปีกแต่ละรูปแบบ

- การเจาะรูที่ปีก จะทำให้มวลอากาศบางส่วนไหลผ่านปีกได้สะดวกมากยิ่งขึ้น ทำให้ค่าความดันตกคร่อมลดลงได้ แต่ทั้งนี้กระแสการไหลของอากาศที่ผ่านรูเจาะจะไปรบกวนกระแสหมุนวนหลักด้านหลังของปีก ทำให้ความรุนแรงและขนาดของกระแสหมุนวนด้านหลังปีกลดลง และส่งผลกระทบต่อไปยังปีกชุดถัดไป เกิดความแตกต่างของความดันที่ลดลง ทำให้ความรุนแรงของกระแสหมุนวนมีค่าลดลงด้วย

- การเพิ่มจำนวนปีก จะทำให้เกิดการไหลปั่นป่วนที่มากขึ้น ส่งผลโดยตรงต่อการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างครีบและท่อ อีกทั้งเป็นการบังคับทิศทางการไหลของอากาศผ่านปีกชุดแรก ทำให้กระแสการไหลของอากาศคลุกเคล้ากันได้อย่างสมบูรณ์มากขึ้น

เนื่องจากแบบจำลองค่อนข้างมีความหลากหลาย ดังนั้นจึงนำเสนอค่า Nu/Nu_0 f/f_0 และ TEF เป็นตาราง แสดงถึงค่าต่ำสุดและสูงสุดที่เกิดขึ้นในช่วงเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 200 ถึง 1,000

ตารางที่ 6.1 ตารางสรุปผลค่าอัตราส่วนเลนส์เซลล์ อัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทาน และสมรรถนะเชิงความร้อนของแต่ละแบบจำลอง

รูปแบบการติดตั้งปีก	N/N_0	f/f_0	TEF
4 EA V-Winglet Downstream (ด้านหลังท่อ)	1.16 – 1.77	1.35 – 3.35	0.96 – 1.27
4 EA V-Winglet Upstream (ด้านหลังท่อ)	1.14 – 1.64	1.28 – 3.10	0.95 – 1.21
4 EA V-Winglet Downstream (กึ่งกลางท่อ)	1.17 – 2.54	1.34 – 7.01	0.95 – 1.38
4 EA V-Winglet Upstream (กึ่งกลางท่อ)	1.19 – 3.02	1.38 – 10.57	0.96 – 1.41
8 EA V-Winglet Downstream	1.23 – 2.61	1.44 – 7.43	0.99 – 1.36
8 EA V-Winglet Upstream	1.25 – 3.24	1.45 – 10.76	0.99 – 1.54
4 EA Wavy Winglet Downstream	1.25 – 2.51	1.41 – 9.87	1.01 – 1.44
4 EA Wavy Winglet Upstream	1.21 – 2.35	1.38 – 10.11	1.01 – 1.39

จากตารางที่ 6.1 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่ติดตั้งปีกแบบรูปตัววี 8 EA V-Winglet Upstream มีแนวโน้มค่าอัตราส่วนสมรรถนะเชิงความร้อนที่สูงที่สุด อัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทาน และสมรรถนะเชิงความร้อน สูงเมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่นๆ โดยการติดตั้งปีกรูปตัววี 8 วี 8 EA V-Winglet Upstream มุมปะทะการไหล 60° ให้ค่าสูงสุดทุกกรณี โดยค่า TEF สูงที่สุดที่เลขเรย์โนลด์ 600 มีค่าเท่ากับ 1.54 เท่าเมื่อเทียบกับครีบริบาย

6.2 ข้อเสนอแนะ

การเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบและท่อ สามารถทำได้หลากหลายวิธี การติดตั้งปีกรูปตัววีและแบบหยักก็สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพได้ ทั้งนี้ จะต้องคำนึงถึงตำแหน่งและลักษณะการติดตั้ง มุมปะทะการไหล หรือการเพิ่มจำนวนปีก ให้เหมาะสม เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- J.R. Lopez, N.K. Anand, L.S. Fletcher (1996). Heat transfer in a three-dimensional channel with baffles, *An International Journal of Computation and Methodology*, vol. 30(2), February 1996, pp. 189 – 205.
- Y.T. Yang, C.Z. Hwang (2003). Calculation of turbulent flow and heat transfer in a porous-baffled channel, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 46(5), February 2003, pp. 771 – 780.
- S. Sripattanapipat, P. Promvong (2009). Numerical analysis of laminar heat transfer in a channel with diamond-shaped baffles, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 36(1), January 2009, pp. 32 – 38.
- W. Jedsadaratanachai, S. Suwannapan, P. Promvong (2011). Numerical Study of Laminar Heat Transfer in Baffled Square Channel with Various Pitches, *Energy Procedia*, vol. 9, 2011, pp. 630 – 642.
- S. Chamoli, N.S. Thakur (2013). Correlations for solar air heater duct with V-shaped perforated baffles as roughness elements on absorber plate, *International Journal of Sustainable Energy*, vol. 35(1), 2016, pp. 1 – 20.
- P. Promvong, S. Tamna, M. Pimsarn, C. Thianpong (2015). Thermal characterization in a circular tube fitted with inclined horseshoe baffles, *Applied Thermal Engineering*, vol. 75, January 2015, pp. 1147 – 1155.
- H.E. Fawaz, M.T.S. Badawy, M.F. Abd Rabbo, A. Elfeky (2018). Numerical investigation of fully developed periodic turbulent flow in a square channel fitted with 45° in-line V-baffle turbulators pointing upstream, *Alexandria Engineering Journal*, vol. 57(2), June 2018, pp. 633 – 642.
- C.E. Bansaci, A. Moumami, F.J. Sanchez de la Flor, E.A.R. Jara, A.R. Casado, A.R. Pardo (2020). Numerical and experimental study of the heat transfer and hydraulic performance of solar air heaters with different baffle positions, *Renewable Energy*, vol. 155, August 2020, pp. 1231 – 1244.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- H. Bilirgen, S. Dunbar, E.K. Levy (2013). Numerical modeling of finned heat exchangers, *Applied Thermal Engineering*, vol. 61(2), November 2013, pp. 278 – 288.
- Y.L. He, P. Chu, W.Q. Tao, Y.W. Zhang, T. Xie (2013). Analysis of heat transfer and pressure drop for fin-and-tube heat exchangers with rectangular winglet-type vortex generators, *Applied Thermal Engineering*, vol. 61(2), November 2013, pp. 770 – 783.
- A. Sinha, H. Chattopadhyay, A.K. Iyengar, G. Biswas (2016). Enhancement of heat transfer in a fin-tube heat exchanger using rectangular winglet type vortex generators, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 101, October 2016, pp. 667 – 681.
- A.A. Bhuiyan, A.K.M.S. Islam (2016). Thermal and hydraulic performance of finned tube heat exchangers under different flow ranges: A review on modeling and
- M. Zeeshan, S. Nath, D. Bhanja, A. Das (2018). Numerical investigation for the optimal placements of rectangular vortex generators for improved thermal performance of fin-and-tube heat exchangers, *Applied Thermal Engineering*, vol. 136, May 2018, pp. 589 – 601.
- A. Hosseini, M.A. Ghazani, M.D. Emami (2020). Experimental study and numerical simulation of thermal hydraulic characteristics of a finned oval tube at different fin configurations, *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 151, May 2020, 106255.
- G. Lu, X. Zhai (2019). Effects of curved vortex generators on the air-side performance of fin-and-tube heat exchangers, *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 136, February 2019, pp. 509 – 518.
- A. Gholami, Mohammed, H. A., Wahid, M. A., & Khiadani, M. (2019). Parametric design exploration of fin-and-oval tube compact heat exchangers performance with a new type of corrugated fin patterns. *International Journal of Thermal Sciences*, pp. 173-190.

- A. Modi, J., Kalel, N. A., & Rathod, M. K. (2020). Thermal performance augmentation of fin-and-tube heat exchanger using rectangular winglet vortex generators having circular punched holes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, pp. 158 - 162
- A. Gupta, Roy, A., Gupta, S., & Gupta, M. (2020). Numerical investigation towards implementation of punched winglet as vortex generator for performance improvement of a fin-and-tube heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, pp. 149-156
- K. Wansaseub, N. Pholdee, S. Bureerat (2017). Optimal U-shaped baffle square-duct heat exchanger through surrogate-assisted self-adaptive differential evolution with neighbourhood search and weighted exploitation-exploration, *Applied Thermal Engineering*, vol. 118, May 2017, pp. 455 – 463.
- H.E. Fawaz, M.T.S. Badawy, M.F. Abd Rabbo, A. Elfeky (2018). Numerical investigation of fully developed periodic turbulent flow in a square channel fitted with 45° in-line V-baffle turbulators pointing upstream, *Alexandria Engineering Journal*, vol. 57(2), June 2018, pp. 633 – 642.
- C.E. Bansaci, A. Moumami, F.J. Sanchez de la Flor, E.A.R. Jara, A.R. Casado, A.R. Pardo (2020). Numerical and experimental study of the heat transfer and hydraulic performance of solar air heaters with different baffle positions, *Renewable Energy*, vol. 155, August 2020, pp. 1231 – 1244
- M. Zeeshan, S. Nath, D. Bhanja, A. Das (2018). Numerical investigation for the optimal placements of rectangular vortex generators for improved thermal performance of fin-and-tube heat exchangers, *Applied Thermal Engineering*, vol. 136, May 2018, pp. 589 – 601.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.
คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของอากาศที่ความดันบรรยากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-1 คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของอากาศที่ความดันบรรยากาศ

T (K)	ρ (kg/m ³)	C_p (kJ/kg.K)	$\mu \times 10^7$ (N.s/m ³)	ν (m ² /s)	$k \times 10^6$ (W/m.K)	$\alpha \times 10^6$ (m ² /s)	Pr
อากาศ							
100	3.25562	1.032	71.1	2.0	9.34	2.54	0.786
150	2.3364	1.012	103.4	4.426	13.8	5.84	0.758
200	1.7458	1.007	132.5	7.59	18.1	10.3	0.737
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	22.5	0.707
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
350	0.990	1.009	208.2	20.92	30.0	29.9	0.700
400	0.8711	1.014	230.1	26.41	33.8	38.3	0.690
450	0.7740	1.021	250.7	32.39	37.3	47.2	0.686
500	0.6964	1.030	270.1	38.79	40.7	56.7	0.684
550	0.6329	1.040	288.4	45.57	43.9	66.7	0.683
600	0.5804	1.051	305.8	52.69	46.9	76.9	0.685
650	0.5356	1.063	322.5	60.21	49.7	87.3	0.690
700	0.4975	1.075	338.8	68.10	52.4	98.0	0.695
750	0.4643	1.087	354.6	76.37	54.9	109	0.702
800	0.4354	1.099	369.8	84.93	57.3	120	0.709
850	0.4097	1.110	384.3	93.80	59.6	131	0.716
900	0.3868	1.121	398.1	102.9	62.0	143	0.720
950	0.3666	1.131	441.3	112.2	64.3	155	0.723
1000	0.3482	1.141	424.4	121.9	67.7	168	0.726
1100	0.3166	1.159	449.0	141.8	71.5	195	0.728
1200	0.2902	1.175	473.0	162.9	76.3	224	0.728
1300	0.2679	1.189	496.0	185.1	82	238	0.719
1400	0.2488	1.207	530	213	91	303	0.703
1500	0.2322	1.230	557	240	100	350	0.685
1600	0.2177	1.248	584	268	106	390	0.688
1700	0.2049	1.267	611	298	113	435	0.685
1800	0.1935	1.286	637	329	120	482	0.683

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





TNIAC

2023

Academic Conference

The 9th TNI Academic Conference (TNIAC)
Bangkok, Thailand

18-19 May, 2023

Organized by Thai-Nichi Institute of Technology (TNI),
Technology Promotion Association (Thailand-Japan) (TPA),
and Artificial Intelligence Association of Thailand (AIAT)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบบและท่อที่มีการติดตั้งปีกแบบหยักเจาะรู

Numerical Analysis on Flow and Heat Transfer in Fin-Tube Heat Exchanger with Wavy Rectangular Winglet Having Punched Holes

ณัฐกิตติ์ กิตติวงศ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

กรุงเทพมหานคร

n.nattakit@gmail.com

วิชาดา เจษฎารัตน์ชัย

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

กรุงเทพมหานคร

withadaje@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ - บทความนี้นำเสนอผลแบบจำลองเชิงตัวเลขของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบบและท่อที่มีการติดตั้งปีกแบบหยักเจาะรูแบบต่อเนื่องบนแผ่นครีบบ ใช้การคำนวณวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมและใช้ลำดับวิธีผลเฉลยแบบ SIMPLE โดยนำเสนอผลของพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน พฤติกรรมการไหล สำหรับเลขเรย์โนลด์สในช่วง $Re = 200 - 1,000$ ผลลัพธ์นำเสนอถึงการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อม แสดงในพจน์ของเลขนัสเซล (Nusselt number) และตัวประกอบเสียดทาน (Friction factor) ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่า เมื่อติดตั้งปีกแบบหยักเจาะรูลงบนแผ่นครีบบ ส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นครีบบเรียบที่ไม่ติดตั้งปีก เนื่องจากแผ่นปีกที่ติดตั้งช่วยทำให้เกิดกระแสการไหลแบบหมุนวนหลังปีกและก่อให้เกิดการไหลกระแทกที่แผ่นครีบบและผิวท่อ ขณะเดียวกันก็ทำให้เกิดความดันสูญเสียเพิ่มมากขึ้น

คำสำคัญ — การถ่ายเทความร้อน, ครีบบและท่อ, ปีก

ABSTRACT — This article presents a numerical model for a fin-tube heat exchanger equipped with wavy rectangular winglets that feature punched holes on the fins. The computations have been carried out using the finite volume method and the SIMPLE algorithm. The study investigates heat transfer characteristics and fluid flow across the heat exchanger over a range of Reynolds numbers from 200 to 1,000. The results of the investigation are presented in terms of Nusselt number and friction factor. The findings demonstrate that the utilization of wavy winglets affixed to the fins yields significantly greater heat transfer rate and friction factor as compared to the base case. This improvement is primarily attributed to the generation of vortex flows induced by the wavy winglets, which facilitate impinging flows. Nonetheless, it is crucial to note that the use of wavy winglets not only enhances heat transfer but also leads to an increased pressure drop across the fins.

Keywords — Heat transfer, Fin-tube, Winglet

1. บทนำ

เนื่องจากวิกฤตการณ์พลังงาน ทำให้ความสำคัญของการอนุรักษ์พลังงานในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้รับความสนใจมากขึ้น การพัฒนาและออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีสมรรถนะที่สูง ค่าใช้จ่ายในการผลิตที่ต่ำและส่งผลกระทบบต่อสิ่งแวดล้อมลดลง การเพิ่มประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นสิ่งจำเป็นที่ทำให้สมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสูงขึ้น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบบและท่อ (fin-tube heat exchanger) ถูกใช้อย่างแพร่หลาย เช่น โรงไฟฟ้า, อุตสาหกรรมกรอบแห้ง หรืออุตสาหกรรมยานยนต์ เป็นต้น พื้นที่การแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบบและท่อส่วนใหญ่อยู่บนผิวครีบบ หากสามารถสร้างความปั่นป่วนให้กับอากาศที่ไหลผ่านครีบบท่อได้ จะส่งผลให้การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศและผิวครีบบเพิ่มขึ้น ตัวอย่างเทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายคือ การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยการติดตั้งตัวสร้างการไหลแบบหมุนวนหรือปีก (Vortex generators, VGs) โดยการป้อนรูหรือการติดตั้งบริเวณพื้นผิว [1-5]

ตัวสร้างการไหลแบบหมุนวน เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น ปีกสามเหลี่ยม (DW), ปีกสี่เหลี่ยม (RW), ปีกสามเหลี่ยมคู่ (DWP) และ ปีกสี่เหลี่ยมคู่ (RWP) และการติดตั้งตัวสร้างการไหลแบบหมุนวนได้ถูกพัฒนาขึ้นอย่างหลากหลาย Torii et al. [6] พบว่าการติดตั้งปีกสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนได้ 10-21% และ 10-30% ในขณะที่ความดันตกคร่อมเพิ่มขึ้น 8-15% และ 34-55% สำหรับการจัดเรียงท่อแบบเดียวกัน และการจัดเรียงท่อแบบเอียงกัน ตามลำดับ Pesteei et al. [7] ได้ทดลองและศึกษาผลของตำแหน่งที่ติดตั้งปีก 5 รูปแบบ ที่มีมุมปะทะการไหล 45° พบว่าการติดตั้งปีกด้านหลังท่อให้ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่สูงที่สุด Zeeshan et al. [8] ศึกษาเชิงตัวเลขของการติดตั้งปีกสี่เหลี่ยม ในช่วงเลขเรย์โนลด์ 500-900 พบว่ามุมปะทะการไหล 5° และ 15° ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนน้อยกว่ามุม 25° และการติดตั้งปีกไว้หลังท่อให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าวางไว้ข้างหน้าท่อ Leu et al. [9] ศึกษาผลของมุมปะทะการไหลของปีกคู่ที่ติดตั้งบริเวณ

2.2 สมการที่ใช้

- แบบจำลองในงานวิจัยที่ศึกษา อาศัยสมมติฐานดังต่อไปนี้
- การถ่ายเทความร้อนและพฤติกรรมการไหลเป็นแบบคงตัว 3 มิติ
- การไหลแบบราบเรียบ (Laminar) และอัดตัวไม่ได้ (Incompressible flow)
- คุณสมบัติของไหลคงที่
- ไม่คำนึงการแผ่รังสีความร้อน
- ไม่คำนึงแรงวัตถุ และการสูญเสียจากความหนืด

จากสมมติฐานข้างต้น สมการควบคุมของงานวิจัย ประกอบด้วย สมการความต่อเนื่อง สมการโมเมนตัม และสมการพลังงาน ซึ่งเขียนให้อยู่ในรูปเทนเซอร์ของระบบพิกัดคาร์ทีเซียน ได้ดังนี้

$$\text{สมการความต่อเนื่อง} \quad \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\text{สมการโมเมนตัม} \quad \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_k) = -\frac{\partial(P)}{\partial x_k} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

$$\text{สมการพลังงาน} \quad \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

2.3 ตัวแปรที่ศึกษา

เลขเรย์โนลด์ส $Re = \frac{\rho u_i D_h}{\mu} \quad (4)$

ตัวประกอบความเสียหาย $f = \frac{\Delta p}{1/2 \rho u_i^2} \times \frac{D_h}{L} \quad (5)$

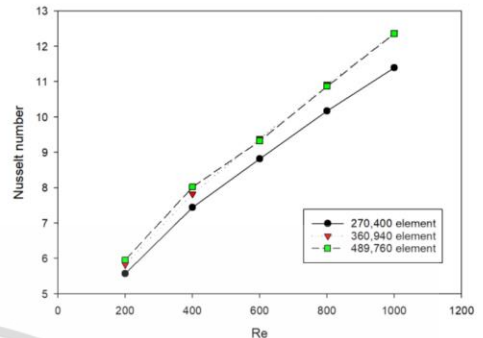
เลขนัสเซลท์ $Nu = \frac{h D_h}{k} \quad (6)$

สัมประสิทธิ์การพาความร้อน $h = \frac{\int h_{local} dA}{\int dA} \quad (7)$

สมรรถนะเชิงความร้อน $TEF = \frac{\left(\frac{Nu}{Nu_0} \right)}{\left(\frac{f}{f_0} \right)^{1/3}} \quad (8)$

2.4 ลักษณะของกริดและการทดสอบกริดอิสระ

กริดที่ใช้ในแบบจำลองที่ศึกษา ใช้รูปแบบของกริดเป็นเฮลิคเอนต์ รูปทรงสามเหลี่ยม เนื่องจากมีความเหมาะสมในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนและมีการแบ่งแบบไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform grid) พิจารณาผลกระทบของกริดที่มีผลต่อค่าคำตอบ เปรียบเทียบกับผลเฉลยโดยใช้จำนวนกริดที่แตกต่างกัน คือ 270400 360940 และ 489760 พบว่าเมื่อจำนวนกริดเพิ่มขึ้น เป็น 360940 ตัวเลขนัสเซลท์เปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 1.5% ดังนั้นจึงเลือกจำนวนกริด เท่ากับ 360940 สำหรับศึกษาอิทธิพลของค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้น เพื่อลดระยะเวลาการประมวลผลของโปรแกรม แสดงดัง รูปที่ 3



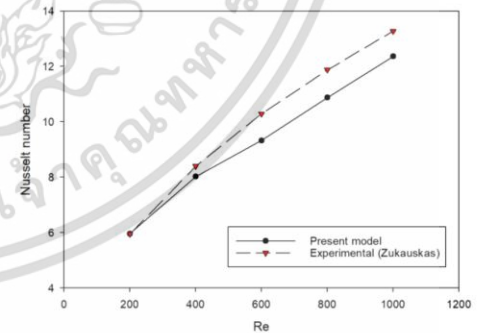
รูปที่ 3 แสดงการทดสอบกริดอิสระสำหรับเลขนัสเซลท์

2.5 การคำนวณเชิงตัวเลข

การคำนวณเชิงตัวเลขแบบ 3 มิติ สำหรับกริดแก้ปัญหาแบบจำลองใช้โปรแกรมเชิงพาณิชย์ สมการควบคุมถูก discretize โดยใช้แบบแผนวิธีผลต่างควอดราติก (Quadratic upstream interpolation for convective kinetics differencing scheme, QUICK) ค่าวนหาผลเฉลยด้วยระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่อง ใช้แผนผังแบบ SIMPLE (Semi-implicit method for pressure-linked equations) การรู้เข้าหาคำตอบพิจารณาจากความแตกต่างของการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรที่น้อยกว่า 10^{-6} สำหรับสมการความต่อเนื่อง, สมการโมเมนตัม และการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรที่น้อยกว่า 10^{-9} สำหรับสมการพลังงาน

2.6 การตรวจสอบความถูกต้อง

นอกจากการตรวจสอบกริดอิสระแล้ว การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ทำขึ้นกับผลการทดลองที่เกิดขึ้นจริงมีความสำคัญไม่น้อยไปกว่ากัน โดยเปรียบเทียบกับผลการทดลอง Zukauskas [12] สำหรับการตรวจสอบความถูกต้อง โดยมีค่าไม่เกิน 6.52% แสดงดังรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลข มีความสอดคล้องกับผลการทดลองอย่างดีและมีความน่าเชื่อถือ



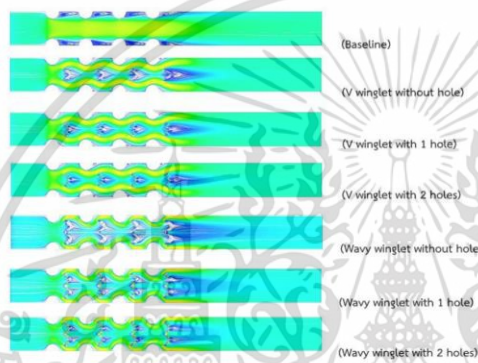
รูปที่ 4 การตรวจสอบความถูกต้องของเลขนัสเซลท์เปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Zukauskas [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3 ผลการวิเคราะห์และการอภิปรายผล

3.1 พฤติกรรมการไหล

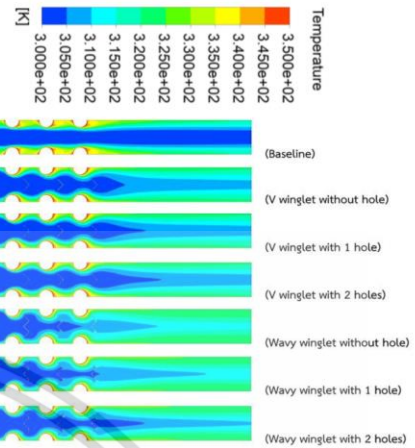
พฤติกรรมการไหลของแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง โดยโครงสร้างการไหลของอากาศผ่านครีบริบจะเกิดการกระแสมุขมนเฉพาะด้านหลังของกลุ่มท่อ (Wake zone) อันเนื่องมาจากความแตกต่างของความดัน เมื่อพิจารณาครีบริบที่มีการติดปีก จะพบว่าเกิดการกระแสมุขมนบริเวณด้านหลังของปีก ส่งผลให้เกิดความปั่นป่วนของการไหล นอกเหนือจากการกระแสมุขมนแบบปกติที่เกิดขึ้นด้านหลังท่อ ซึ่งกระแสการไหลวนดังกล่าวจะไหลกระแทกผนังด้านบนและด้านล่างของครีบริบโดยพบว่าการติดตั้งปีกรูปตัววี และแบบหยัก จะทำให้เกิดการกระแสมุขมนที่มากกว่า ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่สูงขึ้น แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 กระแสการไหลวน ที่มุมปะทะการไหล 45° และ Re = 400 ของการติดตั้งปีกแบบต่าง ๆ

3.2 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน

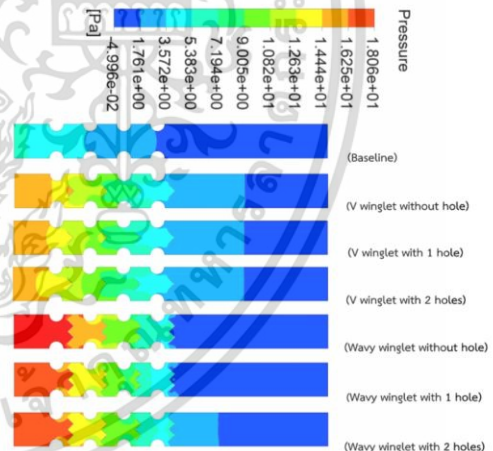
สำหรับพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน พบว่าการกระแสมุขมนที่เกิดขึ้นด้านหลังปีก จะทำให้กระแสการไหลของอากาศมีการไหลไปกระแทกกับบริเวณผนังด้านบน และด้านล่างของครีบริบ ส่งผลให้เกิดการไหลวนวนวน ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมการไหลที่ถูกบังคับทิศทาง การไหลเพื่อเข้าไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับผนังท่อของปีกที่ติดตั้งเพิ่ม ทำให้อากาศไหลผ่านพื้นที่รอบการไหลด้านหลังท่อได้มากขึ้น และพื้นที่รอบการไหลหลังท่อลดลง ช่วยให้เกิดการกระจายอุณหภูมิอากาศได้ดียิ่งขึ้น ส่งผลให้การระบายความร้อนจากผิวท่อมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยการติดตั้งปีกแบบหยัก จะมีการถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุด แสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 คอนทัวร์การกระจายอุณหภูมิ ที่มุมปะทะการไหล 45° และ Re = 400 ของการติดตั้งปีกแบบต่าง ๆ

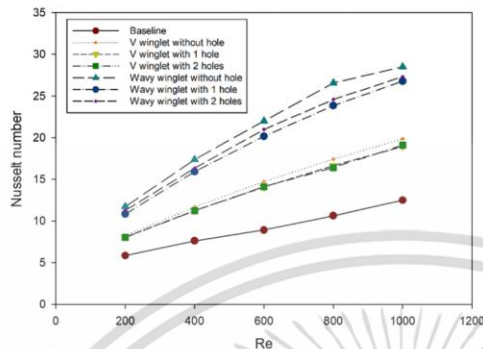
3.3 ค่าความดันตกคร่อม

สำหรับค่าความดันตกคร่อม พบว่า การติดตั้งปีกรูปตัววี และแบบหยัก จะส่งผลให้เกิดค่าความดันตกคร่อมที่สูงขึ้นกว่าครีบริบเปล่า และเมื่อพิจารณาการติดตั้งปีกรูปตัววีและแบบหยักที่เจาะรู จะส่งผลให้ค่าความดันตกคร่อมในระบบลดน้อยลง เนื่องจากอากาศสามารถไหลผ่านรูที่เจาะบริเวณปีกที่ขวางการไหลได้สะดวกขึ้น ดังรูปที่ 7



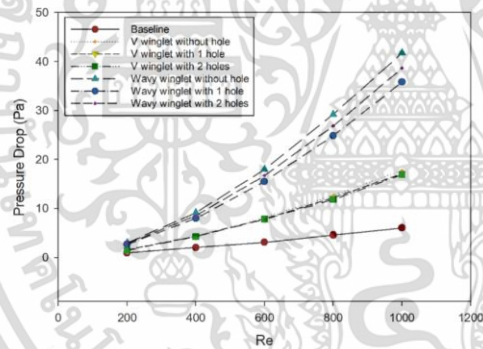
รูปที่ 7 คอนทัวร์การกระจายความดันตกคร่อม ที่มุมปะทะการไหล 45° และ Re = 400 ของการติดตั้งปีกแบบต่าง ๆ

3.4 การถ่ายเทความร้อน ตัวประกอบความเสียดทาน และค่าสมรรถนะเชิงความร้อน



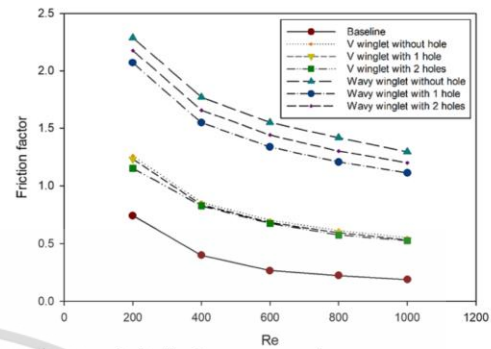
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขนัสเซลท์ และตัวเลขเรย์โนลด์ส สำหรับการติดตั้งปีกลักษณะต่าง ๆ

จากรูปที่ 8 พบว่า เมื่อค่าตัวเลขเรย์โนลด์สเพิ่มขึ้น ตัวเลขนัสเซลท์จะเพิ่มขึ้นทุกกรณี โดยการติดตั้งปีกแบบหยักไม่เจาะรู จะให้ค่านัสเซลท์ที่สูงที่สุดทุกกรณี และมีค่าสูงกว่าการติดตั้งปีกรูปตัววี ทั้งนี้การติดตั้งปีกแบบเจาะรูมีค่าตัวเลขนัสเซลท์ที่ใกล้เคียงกับแบบไม่เจาะรู



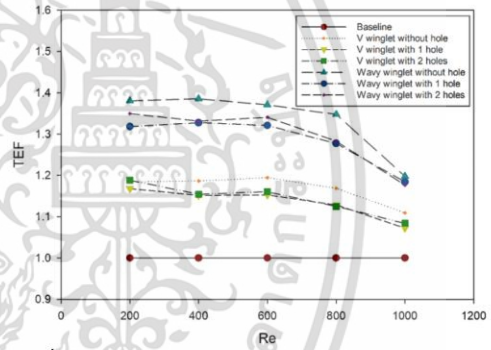
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันตกคร่อม และตัวเลขเรย์โนลด์ส สำหรับการติดตั้งปีกลักษณะต่าง ๆ

จากรูปที่ 9 พบว่า การติดตั้งปีกทั้ง 2 แบบ จะทำให้ความดันตกคร่อมเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับครีบริเรียบ แต่การติดตั้งปีกแบบเจาะรูจะช่วยลดค่าความดันตกคร่อมได้เมื่อเทียบกับไม่เจาะรู ทั้งนี้กรณีติดตั้งปีกแบบหยักเจาะ 2 รู ค่าความดันตกคร่อมจะมีค่าลดลงไม่มากนักเนื่องจากตำแหน่งของการเจาะรูที่ใกล้กัน ทำให้อากาศที่ไหลผ่านรูไหลชนกันและเกิดความปั่นป่วนมากขึ้น ทำให้ความดันตกคร่อมลดลงไม่มากนัก



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ของ ตัวประกอบความเสียดทาน (Friction factor) และตัวเลขเรย์โนลด์ส สำหรับการติดตั้งปีกลักษณะต่าง ๆ

จากรูปที่ 10 พบว่า ตัวประกอบความเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับครีบริเรียบ เนื่องจากการติดตั้งปีกจะเหนี่ยวนำให้เกิดการไหลหมุนวนและเพิ่มระดับความปั่นป่วนให้กับของไหลก่อให้เกิดความเสียดทานสูงขึ้น โดยการติดตั้งปีกแบบหยักจะมีค่าสูงสุดทุกกรณี



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อน และตัวเลขเรย์โนลด์ส สำหรับการติดตั้งปีกลักษณะต่าง ๆ

จากรูปที่ 11 พบว่าการติดตั้งปีกเจาะรูทั้ง 2 แบบ คือรูปตัววี และแบบหยัก ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่น้อยกว่าการติดตั้งปีกแบบไม่เจาะรู ที่ตัวเลขเรย์โนลด์ส 200 มีค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงที่สุด คือ 1.38 สำหรับการติดตั้งปีกแบบหยักไม่เจาะรู และค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเท่ากับ 1.18 สำหรับการติดตั้งปีกรูปตัววีไม่เจาะรู ตามลำดับ และสมรรถนะเชิงความร้อนมีแนวโน้มลดลงเมื่อตัวเลขเรย์โนลด์สเพิ่มขึ้น

4. สรุปผล

จากการจำลองครั้งนี้ได้นำเสนอคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อน, รูปแบบการไหล และการสูญเสียความดัน ในช่วง $Re = 200 - 1,000$ จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อติดตั้งปีกแบบหยัก หรือรูปตัววี ลงบนแผ่นครีบริเรียบส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อมเพิ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นครีบริเรียบที่ไม่ติดตั้งปีก เนื่องมาจาก

บังคับทิศทางการไหลของอากาศ มีผลทำให้กระแสอากาศไหลเข้าไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับผนังท่อได้มากขึ้น โดยเฉพาะบริเวณด้านหลังท่อ อีกทั้งยัง สร้างกระแสหมุนวนขนาดใหญ่ด้านหลังปีก ซึ่งทำให้กระแสการไหลของอากาศมีการคลุกเคล้ากันสมบูรณ์มากขึ้น จากการศึกษาพบว่าการเจาะรูขนาด 1 mm ลงบนปีก จะสามารถลดค่าความดันตกคร่อมในระบบได้ แต่ไม่มากพอ ส่งผลให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับแบบไม่เจาะรู ทั้งนี้จะต้องพิจารณาตำแหน่งการติดตั้งปีก ตำแหน่งและขนาดของรูเจาะให้เหมาะสม เพื่อออกแบบอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Fiebig, A. Valencia, N.K. Mitra, "Wing-type vortex generators for fin-and tube heat exchangers," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 7 pp. 287–295, 1993.
- [2] G. Biswas, N.K. Mitra, M. Fiebig, "Heat transfer enhancement in fin-tube heat exchangers by winglet-type vortex generators," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 37, pp. 283–291, 1994.
- [3] M. Samadifar, D. Toghraie, "Numerical simulation of heat transfer enhancement in a plate-fin heat exchanger using a new type of vortex generators," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 133, pp. 671–681, 2018.
- [4] A. Urkiola, U. Fernandez-Gamiz, I. Errasti, E. Zulueta, "Computational characterization of the vortex generated by a vortex generator on a flat plate for different vane angles", *Aerosp. Sci. Technol.*, vol. 65, pp. 18–25, 2017.
- [5] A. Sinha, K.A. Raman, H. Chattopadhyay, G. Biswas, Effects of different orientations of winglet arrays on the performance of plate-fin heat exchangers," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 57, pp. 202–214, 2013.
- [6] K. Torii, K.M. Kwak, K. Nishino, "Heat transfer enhancement accompanying pressure-loss reduction with winglet-type," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol 45, pp. 3795–3801, 2002.
- [7] S.M. Pestei, P.M.V. Subbarao, R.S. Agarwal, "Experimental study of the effect of winglet location on heat transfer enhancement and pressure drop in fin-tube heat exchangers," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 25, pp.1684–1696, 2005.
- [8] M. Zeeshan, S. Nath, D. Bhanja, A. Das " Numerical investigation for the optimal placements of rectangular vortex generators for improved thermal performance of fin-and-tube heat exchangers," *Applied Thermal Engineering*, vol. 136, pp. 589 – 601, 2018.
- [9] J.S. Leu, Y.H. Wu, J.Y. Jang, "Heat transfer and fluid flow analysis in plate-fin and tube heat exchangers with a pair of block shape vortex generators," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol 47 pp. 4327–4338, 2004.
- [10] A. Gupta, A. Roy, S. Gupta, &M. Gupta, " Numerical investigation towards implementation of punched winglet as vortex generator for performance improvement of a fin-and-tube heat exchanger," *International Journal of Heat and Mass Transfer.*, vol. 149, 119171, 2020.
- [11] Ashish J. Modi, Navnath A. Kalel, Manish K. Rathod, " Thermal performance augmentation of fin-and-tube heat exchanger using rectangular winglet vortex generators having circular punched holes," *International Journal of Heat and Mass Transfer.* pp.158, 2020.
- [12] A. Zukauskas, "Heat transfer from tubes in crossflow," in J.P. Hartnett, T.F. Irvine (Eds.), *Advances in Heat Transfer*, vol. 18, pp.15–87, 1987.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติโดยสังเขป

ประวัติส่วนตัว :

ชื่อ-สกุล นายณัฐกิตติ์ กิตติวงศ์
วัน เดือน ปีเกิด 1 เมษายน พ.ศ.2536

ประวัติการศึกษา :

พ.ศ. 2557 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขา
วิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
ทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร (เกียรตินิยมอันดับ 2)

ประวัติการทำงาน :

พ.ศ. 2562 - ปัจจุบัน ผู้จัดการทั่วไป บริษัท จีกะจูล จำกัด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้