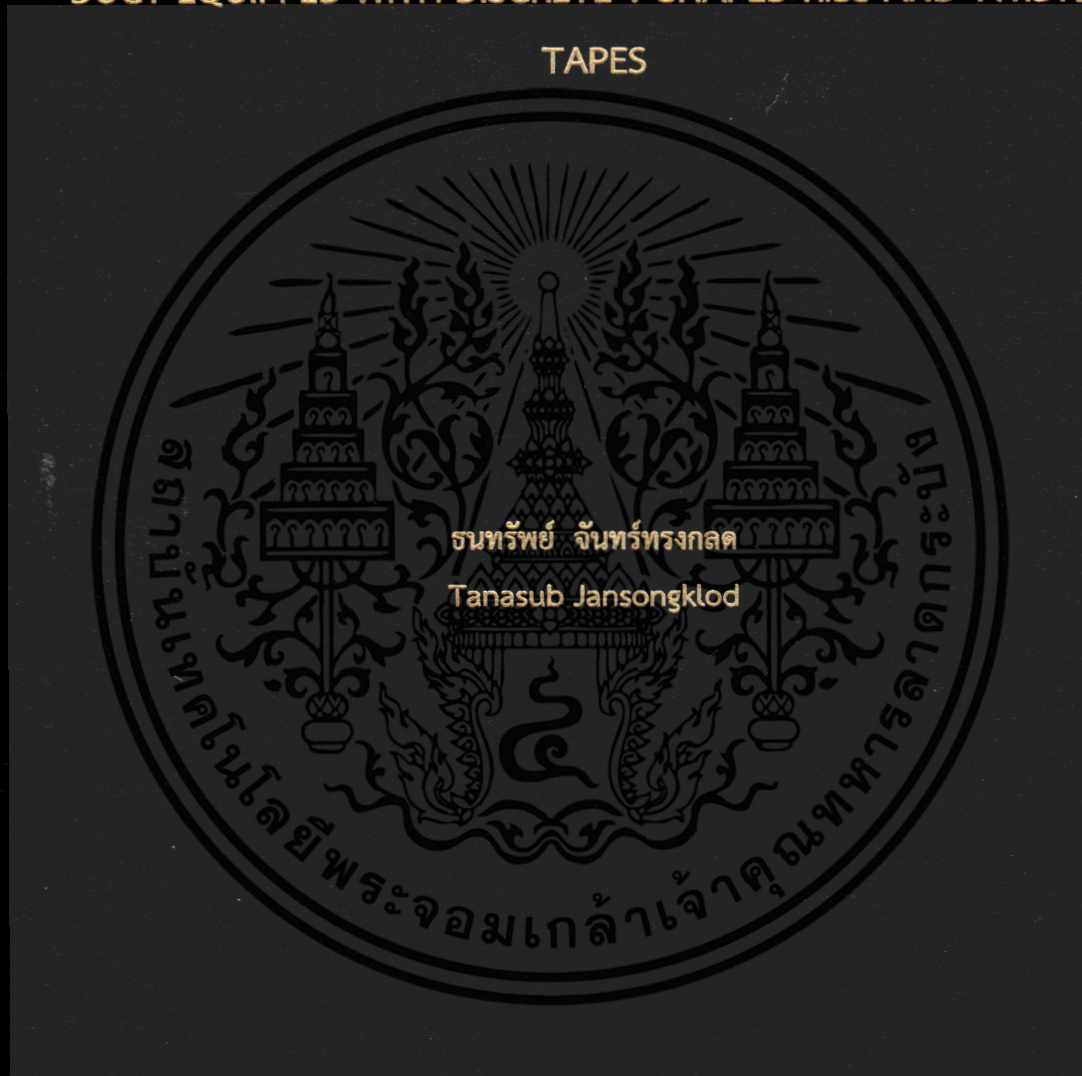


การศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อจัตุรัสที่ติดตั้ง
ครีบทวีแฉกส่วนและใบบิด

NUMERICAL STUDY OF FLOW AND HEAT TRANSFER IN SQUARE
DUCT EQUIPPED WITH DISCRETE V-SHAPED RIBS AND TWISTED
TAPES



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2561

KMITL-2018-EN-M-030-085

การศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อจัตุรัสที่ติดตั้ง
ครีบทวีแยกส่วนและไบบิต

NUMERICAL STUDY OF FLOW AND HEAT TRANSFER IN SQUARE
DUCT EQUIPPED WITH DISCRETE V-SHAPED RIBS AND TWISTED
TAPES



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2561

KMITL-2018-EN-M-030-085

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NUMERICAL STUDY OF FLOW AND HEAT TRANSFER IN SQUARE
DUCT EQUIPPED WITH DISCRETE V-SHAPED RIBS AND TWISTED
TAPES



TANASUB JANSONGKLOD

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2018
KMITL-2018-EN-M-030-085

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2018

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อจัตุรัสที่ติดตั้งครีبدัดวีแยกส่วนและใบบิด

Thesis Title Numerical Study of Flow and Heat Transfer in Square Duct Equipped with Discrete V-Shaped Ribs and Twisted Tapes

นักศึกษา นายธนทรัพย์ จันทร์ทรงกลด

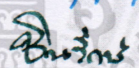

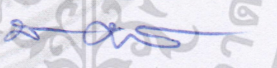
รหัสประจำตัว 56601148

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.วิฑาดา เกษภูรตันชัย


หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2018-EN-M-030-085

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.สมิทธิ์	เอี่ยมสอาด	
รศ.ดร.ชินรัชช์	เจียรพงษ์	
ดร.มธุรส	สุชาติวัฒณ์	
รศ.ดร.พงษ์เจต	พรหมวงศ์	
ผศ.ดร.วิฑาดา	เกษภูรตันชัย	วิฑาดา เกษภูรตันชัย

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 12 กรกฎาคม พ.ศ. 2561 เวลา 13.00-15.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้อง HM-304 อาคารเฉลิมพระเกียรติ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ฉบับนี้ คณะวิศวกรรมศาสตร์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อจากนี้จึงเป็นเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
วันที่ 12 กรกฎาคม พ.ศ. 2561

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อ จัดรัศที่ติดตั้งครีปตัววีแยกส่วนและไบบิต
นักศึกษา	นายธนทรัพย์ จันทร์ทรงกลด
รหัสนักศึกษา	56601148
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.วิฑาดา เจษฎารัตนชัย

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการตรวจสอบเชิงตัวเลขสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนสามมิติ ที่มีลักษณะการไหลแบบพัฒนาอย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วงๆของการไหลและการถ่ายเทความร้อนภายในช่องระบายความร้อนรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยมีการติดตั้งครีปแยกรูปตัววีและไบบิตแบบต่อเนื่อง เพื่อเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนให้มากขึ้นภายในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส การคำนวณเชิงตัวเลขใช้ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม การคำนวณของความเร็วและความดันใช้กระบวนการวิธีแบบ SIMPLE และสำหรับเทอมของการพาใช้แบบแผนการคำนวณแบบ QUICK โดยใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบที่มีอัตราการไหลในเทอมของเลขเรย์โนลด์ที่อยู่ในช่วง 10,000 ถึง 25,000 ซึ่งผลลัพธ์ของการคำนวณเชิงตัวเลขจะใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Realizable $k-\epsilon$ ภายใต้การตรวจสอบถึงความถูกต้องโดยใช้การเปรียบเทียบกับข้อมูลจากสมการสหสัมพันธ์ท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบ การตรวจสอบอย่างละเอียดจากอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความสูงของแผ่นกั้นต่อความสูงของท่อ (BR) ค่าอัตราส่วนระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นต่อความสูงของท่อ (PR) มุมปะทะของแผ่นกั้นกับทิศทางการไหล (α) และค่าอัตราส่วนระยะไบบิตต่อความสูงของช่องระบายความร้อน (TR) ของตัวสร้างความปั่นป่วนสองชนิดนี้ ส่งผลต่อลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบพัฒนาอย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วงๆภายในช่องระบายความร้อนของไบบิตกึ่งหันก๊าซ พบว่ากระแสหมุนวนที่เกิดจากตัวสร้างความปั่นป่วนทั้งสองชนิด ส่งผลให้เกิดการเหนี่ยวนำของการไหลไปตกกระทบที่ผนังซึ่งนำไปสู่การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนตลอดช่วงท่อทดสอบ ซึ่งค่าสมรรถนะทางความร้อนสูงสุด (TEF_{max}) มีค่าเท่ากับ 2.07 ซึ่งได้มาจากการใช้ตัวสร้างความปั่นป่วนชนิดครีปแยกรูปตัววีชี้ทวนการไหล ที่มีค่า $\alpha=45^\circ$, $BR=0.05$, $PR=1$, $Re=10,000$ โดยที่อัตราส่วนของเลขนัสเซลท์ (Nu/Nu_0) และอัตราส่วนของตัวประกอบความเสียดทาน (f/f_0) มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 3.34-2.53 และ 4.18-5.99 เท่า ตามลำดับ

Thesis Title	NUMERICAL STUDY OF FLOW AND HEAT TRANSFER IN SQUARE DUCT EQUIPPED WITH DISCRETE V-SHAPED RIBS AND TWISTED TAPES
Student	Mr. Tanasub Jansongklod
Student ID.	56601148
Degree	Master of Engineering
Program	Mechanical Engineering
Year	2018
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Withada Jedsadaratanachai

ABSTRACT

The thesis presents a numerical investigation on turbulent periodic flow and heat transfer characteristics in a 3-dimensional square channel cooling of gas turbine with v-shaped discrete ribs and continuous twisted tape insert to enhance heat exchanger performance inside gas turbine blade. The computations are based on a finite volume method with the SIMPLE algorithm for handling the pressure-velocity coupling and using the QUICK scheme for the convection terms. Air is used as the test fluid with the airflow rate in terms of Reynolds numbers ranging from 10,000 to 25,000. The numerical results obtained from using the Realizable $k-\varepsilon$ turbulence model are first validated by comparison with correlation data of smooth square channel. Effects of different baffle- to channel-height ratios, (BR) baffle-pitch to channel-height ratios (PR), different attack angles (α) and different twist to channel height (TR) on thermal and flow characteristics for periodically fully developed baffled-channel flows based on modified baffles are extensively investigated. It is found the vortex caused by the both of tabulators can induce impingement/reattachment flows repeatedly on the channel walls leading to greater increase in the heat transfer over the test channel. The maximum thermal performance (TEF_{max}) is 2.07 from v-shaped discrete rib with $\alpha=45^\circ$, $BR=0.05$, $PR=1$, $Re=10,000$ whereas the heat transfer (Nu/Nu_0) and the friction factor ratios (f/f_0) are in the range of 3.34-2.53 and 4.18-5.99 times, respectively.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่อง การศึกษาเชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนและลักษณะการไหลแบบปั่นป่วน ในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นตัววีวางแนวทแยง สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากความกรุณาและการให้คำปรึกษาที่มีคุณค่าจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิฑาดา เจษฎารัตนชัย ซึ่งผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง อีกทั้งขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ สำหรับคำแนะนำเพิ่มเติมทำให้วิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกๆ เรื่อง ขอขอบคุณ ผศ.ดร.วิฑาดา เจษฎารัตนชัย, และ อาจารย์ ดร.พิทักษ์ พร้อมไธสง ที่กรุณาให้คำแนะนำที่ดีแก่ผู้วิจัย ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือทางด้านอุปกรณ์และสถานที่สำหรับการวิจัย ขอขอบคุณ พี่ๆ น้องๆ จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือข้าพเจ้าในทุกๆ ด้าน ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้สำหรับคุณงามความดีอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน ที่ได้มอบวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ธนทรัพย์ จันทร์ทรงกลด

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XIV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบสมมติฐาน.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย.....	4
1.7 เค้าโครงวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์.....	6
2.1 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยใช้วิธีการติดตั้งแผ่นกัน.....	6
2.1.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง.....	6
2.1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณเชิงตัวเลข.....	7
2.2 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนด้วยการติดตั้งแผ่นกันเจาะรู.....	7
2.3 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนด้วยการติดตั้งครีบริบบแบบต่างๆ.....	9
2.3.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง.....	9
2.3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณเชิงตัวเลข.....	15
บทที่ 3 สมการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	17
3.1 สมมติฐานของการไหลและสมการควบคุม.....	17
3.2 การไหลแบบภายในและการถ่ายเทความร้อน.....	18
3.2.1 สภาวะการไหล.....	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ IV อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2.2 ตัวประกอบความเสียดทาน.....	19
3.2.3 สภาวะการถ่ายเทความร้อน.....	19
3.2.4 สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์เชิงความร้อน.....	20
3.2.5 ค่าตัวประกอบของการเพิ่มทางความร้อน.....	20
3.3 การคำนวณการไหลแบบชั่วเป็นช่วง.....	21
3.3.1 การไหลชั่วเป็นช่วงเชิงความเร็ว.....	21
3.3.2 การไหลชั่วเป็นช่วงเชิงความร้อน.....	22
3.4 สมการแปลงรูป.....	24
3.4.1 การประมาณค่าเทอมของการพา.....	25
3.4.2 การแปลงรูปสมการโมเมนตัม.....	26
3.4.3 การแปลงรูปสมการความต่อเนื่อง.....	26
3.4.4 การคู่ควบของความเร็วและความดัน.....	26
3.5 การไหลแบบปั่นป่วนและอิทธิพลของความปั่นป่วนในสมการนาเวียร์-สโตกส์.....	27
3.6 การไหลแบบปั่นป่วนที่มีผนังเป็นขอบเขต.....	30
3.7 แบบจำลองความปั่นป่วน $k-\epsilon$	39
3.11.1 แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ $k-\epsilon$ มาตรฐาน.....	39
3.11.2 แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k-\epsilon$	41
3.11.3 แบบจำลองความปั่นป่วน Realizable $k-\epsilon$	44
3.8 แบบจำลองความปั่นป่วน $k-\omega$	45
3.12.1 แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ $k-\omega$ มาตรฐาน.....	45
3.12.2 แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ SST $k-\omega$	44
3.9 การวิเคราะห์บริเวณใกล้ผนังสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนที่มีผนังเป็นขอบเขต.....	46
3.13.1 การจำลองการไหลใกล้ผนังด้วยวิธี enhanced wall treatment.....	48
3.13.2 การจำลองการไหลใกล้ผนังด้วยฟังก์ชันผนังเสริม.....	49
3.13.3 เงื่อนไขค่าขอบของแบบจำลองความปั่นป่วน.....	50
3.10 การจำลองการถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบปั่นป่วน.....	52
3.14.1 แบบจำลอง $k-\epsilon$ มาตรฐานและแบบ $k-\omega$	53
3.14.2 แบบจำลอง RNG $k-\epsilon$	53

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การออกแบบอุปกรณ์และขั้นตอนการศึกษา	55
4.1 การออกแบบอุปกรณ์และที่มาของปัญหาทางานวิจัย.....	59
4.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหา	60
4.3 เงื่อนไขขอบเขตในการคำนวณการไหลสามมิติ.....	62
4.4 การตรวจสอบความเป็นอิสระของผลเฉลยจากจำนวนกริดเซลล์.....	65
4.5 เปรียบเทียบผลของแบบจำลองความปั่นป่วนกับผลการทดลองการไหลในท่อเรียบ.....	67
บทที่ 5 ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและการอภิปราย	69
5.1 ตัวเพิ่มการปั่นป่วนการไหลแบบใบพัดต่อเนื่อง	70
5.1.1 แบบจำลองทางกายภาพ.....	71
5.1.2 อธิพจน์ Twist Ratio.....	71
5.2 ตัวเพิ่มการปั่นป่วนการไหลแบบครีบบนตัววี	72
5.2.1 แบบจำลองทางกายภาพ.....	82
5.2.2 อธิพจน์ของเลขเรย์โนลด์	83
5.2.3 อธิพจน์ของความสูงของแผ่นกั้น (อัตราส่วนการบล็อกการไหล, BR).....	85
5.2.4 อธิพจน์ของมุมปะทะ (α).....	86
5.2.5 อธิพจน์ของทิศทางการไหล	90
5.2.6 อธิพจน์ของระยะพิตช์.....	100
5.3 ตัวเพิ่มการปั่นป่วนการไหลแบบครีบบนตัววีและใบพัดแบบต่อเนื่องรวมกัน	127
5.3.1 แบบจำลองทางกายภาพ.....	127
5.3.2 อธิพจน์ของการใช้ตัวสร้างความปั่นป่วนสองแบบรวมกัน.....	129
5.4 สรุป	130
บทที่ 6 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	132
6.1 สรุปผล	132
6.1.1 อธิพจน์ของเลขเรย์โนลด์.....	133
6.1.2 อธิพจน์ของอัตราส่วนการบล็อกการไหล	133
6.1.3 อธิพจน์ของระยะพิตช์.....	133
6.1.4 อธิพจน์ของมุมปะทะการไหล.....	134

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VI อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.1.5 อิทธิพลของทิศทางการไหล	134
6.1.6 อิทธิพล Twist Ratio ของใบพัด	134
6.2 ข้อเสนอแนะการพัฒนางานวิจัย	135
บรรณานุกรม	136
ภาคผนวก	139
ภาคผนวก ก. คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของอากาศที่ความดันบรรยากาศ	140
ภาคผนวก ข. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์	141
ประวัติผู้เขียน	151



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 จำนวนของกริดเซลล์ที่ส่งผลต่อค่า Nu และ f	65



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ครีบบางเอียงที่ใช้ในการตรวจสอบการถ่ายเทความร้อนโดย Gupta et al. (1997)..... 10
2.2	ครีบบรูปตัววีที่ใช้ในงานของ Momin et al. (2002)..... 10
2.3	รูปแบบครีบบภายในท่อสี่เหลี่ยมของ Karwa (2003)..... 11
2.4	รูปร่างและลักษณะการจัดเรียงครีบบที่ใช้ในงานของ Gupta et al. (2008)..... 12
2.5	รูปแบบครีบบภายในท่อสี่เหลี่ยมของ Lee and Rhee (2009) 13
3.1	ตัวอย่างของรูปทรงเรขาคณิตที่ซ้ำเป็นช่วง 21
3.2	ปริมาตรควบคุมสำหรับใช้อธิบายสมการแปดรูป 25
3.3	ปริมาตรควบคุมแบบ 1 มิติ..... 27
4.1	รูปแสดงการแลกเปลี่ยนความร้อนในใบพัดกังหันก๊าซ (Gus turbine)..... 64
4.2	ช่องทางการระบายความร้อนของกังหันก๊าซเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส 65
4.3	การออกแบบช่องทางการหล่อเย็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยมีแผ่นครีบบแยกรูปตัววีเป็นตัวสร้างความปั่นป่วน 65
4.4	ค่าตัวแปรต่างๆของตัวสร้างความปั่นป่วนชนิดแผ่นกั้นรูปตัววีแบบแยก..... 66
4.5	รูปทรงของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นตัววีแบบแยกและโดเมนที่ใช้ในการคำนวณโดยคิดการไหลแบบ periodic..... 67
4.6	การออกแบบช่องทางการหล่อเย็นของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยมีใบพัดแบบต่อเนื่องเป็นตัวสร้างความปั่นป่วน 67
4.7	ค่าตัวแปรต่างๆของตัวสร้างความปั่นป่วนชนิดใบพัดแบบต่อเนื่อง 68
4.8	รูปทรงของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดตั้งใบพัดและโดเมนที่ใช้ในการคำนวณโดยคิดการไหลแบบ periodic ที่มีการสร้างตาข่ายสี่เหลี่ยมแบบไม่สม่ำเสมอ 68
4.9	การออกแบบช่องทางการหล่อเย็นของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยมีแผ่นกั้นตัววีแบบแยกตัวและใบพัดแบบต่อเนื่องเป็นตัวสร้างความปั่นป่วน 69
4.10	ค่าตัวแปรต่างๆของตัวสร้างความปั่นป่วนชนิดผสมระหว่างแผ่นกั้นรูปตัววีแบบแยกและใบพัดแบบต่อเนื่อง 70
4.11	รูปทรงของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นและใบพัด และโดเมนที่ใช้ในการคำนวณโดยคิดการไหลแบบ periodic ที่มีการสร้างตาข่ายสี่เหลี่ยมแบบไม่สม่ำเสมอ 71
4.12	แบบจำลองการไหลสามมิติของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีแผ่นกั้นรูปตัววี..... 73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ IX อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13	อิทธิพลของจำนวนกริตเซลล์ต่อส่งผลต่อค่า Nu และ f ที่ $Re=10,000$ 74
4.14	ค่าเลขนัสเซลล์เฉลี่ยของการถ่ายเทความร้อนในท่อผิวเรียบ 75
4.16	ค่าตัวประกอบความเสียดทานของการถ่ายเทความร้อนในท่อผิวเรียบ..... 76
5.1	รูปทรงของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดตั้งใบพัดแบบต่อเนื่องและโดเมนที่ใช้ในการคำนวณโดย คิดการไหลแบบperiodic ที่มีการสร้างตาข่ายสี่เหลี่ยมแบบไม่สม่ำเสมอ 120
5.2	เส้นกระแสการไหล 3 มิติ ตามแนวการไหลที่ค่า (ก) $TR = 2$ (ข) $TR = 4$ (ค) $TR = 5$77
5.3	เส้นกระแสการไหลบนระนาบตามขวางการไหลที่ค่า (ก) $TR = 2$ (ข) $TR = 4$ (ค) $TR = 5$79
5.4	การกระจายอุณหภูมิในระนาบขวางการไหลที่ค่า (ก) $TR = 2$ (ข) $TR = 4$ (ค) $TR = 5$80
5.5	การกระจายของเลขนัสเซลล์ที่ค่า (ก) $TR = 2$ (ข) $TR = 4$ (ค) $TR = 5$82
5.6	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราเลขนัสเซลล์กับเลขเรย์โนลด์ของใบพัดแบบต่อเนื่อง สำหรับ (ก) $TR = 2$ (ข) $TR = 4$ (ค) $TR = 5$83
5.7	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ของใบพัดแบบต่อเนื่อง สำหรับ (ก) $TR = 2$ (ข) $TR = 4$ (ค) $TR = 5$83
5.8	รูปทรงของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นตัวแบบเต็มตัวมีปลายวีซีตามกระแสการ ไหล (V-Upstream) และโดเมนที่ใช้ในการคำนวณโดยคิดการไหลแบบ periodic ที่มีการสร้าง ตาข่ายสี่เหลี่ยมแบบไม่สม่ำเสมอ 84
5.9	รูปทรงของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นตัวแบบเต็มตัวมีปลายวีซีทวนกระแสการ ไหล (V-Downstream) และโดเมนที่ใช้ในการคำนวณโดยคิดการไหลแบบ periodic ที่มีการ สร้างตาข่ายสี่เหลี่ยมแบบไม่สม่ำเสมอ 84
5.10	เส้นกระแสการไหล 3 มิติ ตามแนวการไหลที่ค่า $\alpha = 60^\circ$, $BR = 0.1$, $PR = 1.0$ และ V-Upstream สำหรับ (ก) $Re = 10,000$ (ข) $Re = 15,000$ (ค) $Re = 25,000$ 84
5.11	เส้นกระแสการไหลบนระนาบตามแนวการไหลที่ค่า $\alpha = 60^\circ$, $BR = 0.1$, $PR = 1.0$ และ V-upstream สำหรับ (ก) $Re = 10,000$ (ข) $Re = 15,000$ (ค) $Re = 25,000$85
5.12	เส้นกระแสการไหลในระนาบขวางการไหลที่ค่า $\alpha = 60^\circ$, $BR = 0.1$, $PR = 1.0$ และ V-Upstream สำหรับ (ก) $Re = 10,000$ (ข) $Re = 15,000$ (ค) $Re = 25,000$ 86
5.13	การกระจายอุณหภูมิในระนาบขวางการไหลที่ค่า $\alpha = 60^\circ$, $BR = 0.1$, $PR = 1.0$ และ V-Upwntstream สำหรับ (ก) $Re = 10,000$ (ข) $Re = 15,000$ (ค) $Re = 25,000$ 87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ X อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.14 การกระจายของเลขนัสเซลล์ท์ที่ค่า $\alpha = 60^\circ$, BR = 0.1, PR = 1.0 และ V-Upstream สำหรับ (ก) Re = 10,000 (ข) Re = 15,000 (ค) Re = 25,000	88
5.15 เส้นกระแสการไหล 3 มิติ ตามแนวการไหลที่ค่า $\alpha = 60^\circ$, PR = 1.0, Re = 12,500 และ V-upstream สำหรับ (ก) BR = 0.05 (ข) BR = 0.075 (ค) BR = 0.10 (ง) BR = 0.125 (จ) BR = 0.15	89
5.16 เส้นกระแสการไหลบนระนาบตามแนวการไหลที่ค่า $\alpha = 60^\circ$, PR = 1.0, Re = 12,500 และ V-upstream สำหรับ (ก) BR = 0.05 (ข) BR = 0.075 (ค) BR = 0.10 (ง) BR = 0.125 (จ) BR = 0.15	90
5.17 การกระจายอุณหภูมิจนในระนาบขวางการไหลที่ค่า $\alpha = 60^\circ$, PR = 1.0, Re = 12,500 และ V-upstream สำหรับ (ก) BR = 0.05 (ข) BR = 0.075 (ค) BR = 0.10 (ง) BR = 0.125 (จ) BR = 0.15	92
5.18 การกระจายของเลขนัสเซลล์ท์ที่ค่า $\alpha = 60^\circ$, PR = 1.0, Re = 12,500 และ V-upstream สำหรับ (ก) BR = 0.05 (ข) BR = 0.075 (ค) BR = 0.10 (ง) BR = 0.125 (จ) BR = 0.15	93
5.19 เส้นกระแสการไหล 3 มิติ ตามแนวการไหลที่ค่า (ก) $\alpha = 30^\circ$ (ข) $\alpha = 45^\circ$ (ค) $\alpha = 60^\circ$ ที่ BR = 0.1, PR = 1.0, Re = 12,500 และ V-Upstream.....	95
5.20 เส้นกระแสการไหลบนระนาบตามแนวการไหลที่ค่า (ก) $\alpha = 30^\circ$ (ข) $\alpha = 45^\circ$ (ค) $\alpha = 60^\circ$ ที่ BR = 0.1, PR = 1.0, Re = 12,500 และ V-Upstream.....	96
5.21 การกระจายอุณหภูมิจนในระนาบขวางการไหลที่ค่า (ก) $\alpha = 30^\circ$ (ข) $\alpha = 45^\circ$ (ค) $\alpha = 60^\circ$ ที่ BR = 0.1, PR = 1.0, Re = 12,500 และ V-Upstream.....	98
5.22 การกระจายเลขนัสเซลล์ท์ที่ค่า (ก) (ข) $\alpha = 30^\circ$ (ค) $\alpha = 45^\circ$ (จ) $\alpha = 60^\circ$ ที่ BR = 0.1, PR = 1.0, Re = 12,500 และ V-Upstream	99
5.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราเลขนัสเซลล์ท์กับเลขเรย์โนลด์ของแผ่นกั้นตัววีแบบเต็มตัวที่ค่า BR และ ต่างๆสำหรับ (ก) V-Upstream (ข) V-Downstream	100
5.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ของแผ่นกั้นตัววีแบบเต็มตัวที่ค่า BR และ ต่างๆสำหรับ (ก) V-Upstream (ข) V-Downstream.....	102
5.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ของแผ่นกั้นตัววีแบบเต็มตัวที่ค่า BR และ ต่างๆสำหรับ (ก) V-Upstream (ข) V-Downstream	103
5.26 เส้นกระแสการไหลในระนาบขวางการไหลที่ค่า $\alpha = 45^\circ$, BR = 0.15, PR = 1.0 และ Re = 12,500 สำหรับ (ก) V-Downstream (ข) V-Upstream.....	105

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ XI อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.27 เส้นกระแสการไหลในระนาบตามแนวการไหลที่ค่า $\alpha = 45^\circ$, BR = 0.15, PR = 1.0 และ Re = 12,500 สำหรับ (ก) V-Downstream (ข) V-Upstream.....	96
5.28 การกระจายอุณหภูมิในระนาบขวางการไหลที่ค่า $\alpha = 45^\circ$, BR = 0.15, PR = 1.0 และ Re = 12000 สำหรับ (ก) V-Downstream (ข) V-Upstream.....	97
5.29 การกระจายของเลขนัสเซลล์ที่ค่า $\alpha = 45^\circ$, BR = 0.15, PR = 1.0 และ Re = 12000 สำหรับ (ก) V-Downstream (ข) V-Upstream	98
5.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราเลขนัสเซลล์กับเลขเรย์โนลด์ของแผ่นกั้นตัววีแบบเต็มตัว เปรียบเทียบทิศทางการไหลแบบ V-Downstream และ V-Upstream ที่ค่า BR ต่างๆ สำหรับ (ก) $\alpha = 30^\circ$ (ข) $\alpha = 45^\circ$ (ค) $\alpha = 60^\circ$	100
5.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ของแผ่นกั้นตัววีแบบเต็มตัว เปรียบเทียบทิศทางการไหลแบบ V-Downstream และ V-Upstream ที่ค่า BR ต่างๆ สำหรับ (ก) $\alpha = 30^\circ$ (ข) $\alpha = 45^\circ$ (ค) $\alpha = 60^\circ$	103
5.32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ของแผ่นกั้นตัววีแบบเต็มตัว เปรียบเทียบทิศทางการไหลแบบ V-Downstream และ V-Upstream ที่ค่า BR ต่างๆ สำหรับ (ก) $\alpha = 30^\circ$ (ข) $\alpha = 45^\circ$ (ค) $\alpha = 60^\circ$	105
5.33 เส้นกระแสการไหลตามแนวยาวสำหรับ (ก) PR = 1 (ข) PR = 1.5 ที่ $\alpha = 30^\circ$, BR = 0.10, Re = 10,000 และ V-Upstream	106
5.34 การกระจายอุณหภูมิในระนาบขวางการไหลสำหรับ (ก) PR = 1 (ข) PR = 1.5 ที่ $\alpha = 30^\circ$, BR = 0.10, Re = 10,000 และ V-Upstream	107
5.35 การกระจายเลขนัสเซลล์สำหรับ (ก) PR = 1 (ข) PR = 1.5 ที่ $\alpha = 30^\circ$, BR = 0.10, Re = 10,000 และ V-Upstream	107
5.36 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์กับเลขเรย์โนลด์ของแผ่นกั้นตัววีแบบแยกตัวที่ค่า BR ต่างๆ และ V-Upstream $\alpha = 30^\circ$ ที่ PR = 1 และ 1.5.....	108
5.37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ของแผ่นกั้นตัววีแบบแยกตัวที่ค่า BR ต่างๆ และ V-Upstream $\alpha = 30^\circ$ ที่ PR = 1 และ 1.5.....	109
5.38 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ของแผ่นกั้นตัววีแบบแยกตัวที่ค่า BR ต่างๆ และ V-Upstream $\alpha = 30^\circ$ ที่ PR = 1 และ 1.5.....	110

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.40 รูปทรงของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดตั้งใบพัดบริเวณตรงกลางท่อและแผ่นกั้นตัววีแบบแยกตัวมีปลายวีชี้ตามกระแสการไหล (V-Upstream) มุมประทะการไหล $\alpha = 30^{\circ}$ โดย (ก) TR=2 และ PR=2 (ข) TR=4 และ PR=4 (ค) TR=5 และ PR=5.....	119
5.41 รูปทรงของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นตัววีแบบเต็มตัวมีปลายวีชี้ตามกระแสการไหล (V-Upstream) และโดเมนที่ใช้ในการคำนวณโดยคิดการไหลแบบ periodic ที่มีการสร้างตาข่ายสี่เหลี่ยมแบบไม่สม่ำเสมอ	120
5.42 เส้นกระแสการไหล 3 มิติ ตามแนวการไหลที่มีการติดตั้งใบพัดบริเวณตรงกลางท่อและแผ่นกั้นตัววีแบบแยกตัวมีปลายวีชี้ตามกระแสการไหล (V-Upstream) มุมประทะการไหล $\alpha = 30^{\circ}$ โดย(ก) TR=2 และ PR=2 (ข) TR=4 และ PR=4 (ค) TR=5 และ PR=5.....	121
5.43 เส้นกระแสการไหลบนระนาบตามขวางการไหลที่มีการติดตั้งใบพัดบริเวณตรงกลางท่อและแผ่นกั้นตัววีแบบแยกตัวมีปลายวีชี้ตามกระแสการไหล (V-Upstream) มุมประทะการไหล $\alpha = 30^{\circ}$ โดย(ก) TR=2 และ PR=2 (ข) TR=4 และ PR=4 (ค) TR=5 และ PR=5	122
5.44 การกระจายอุณหภูมิในระนาบขวางการไหลที่มีการติดตั้งใบพัดบริเวณตรงกลางท่อและแผ่นกั้นตัววีแบบแยกตัวมีปลายวีชี้ตามกระแสการไหล (V-Upstream) มุมประทะการไหล $\alpha = 30^{\circ}$ โดย (ก) TR=2 และ PR=2 (ข) TR=4 และ PR=4 (ค) TR=5 และ PR=5	124
5.45 การกระจายของเลขนัสเซลล์ท์ที่มีการติดตั้งใบพัดบริเวณตรงกลางท่อและแผ่นกั้นตัววีแบบแยกตัวมีปลายวีชี้ตามกระแสการไหล (V-Upstream) มุมประทะการไหล $\alpha = 30^{\circ}$ โดย (ก) TR=2 และ PR=2 (ข) TR=4 และ PR=4 (ค) TR=5 และ PR=5	125
5.46 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราเลขนัสเซลล์ท์กับเลขเรย์โนลด์์การติดตั้งใบพัดบริเวณตรงกลางท่อและแผ่นกั้นตัววีแบบแยกตัวมีปลายวีชี้ตามกระแสการไหล (V-Upstream) มุมประทะการไหล $\alpha = 30^{\circ}$ (ก) TR=2 และ PR=2 (ข) TR=4 และ PR=4 (ค) TR=5 และ PR=5	126
5.47 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์์ของใบพัดแบบต่อเนื่อง สำหรับ (ก) TR = 2 (ข) TR = 4 (ค) TR = 5	127
5.48 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์์ของแผ่นกั้นตัววีแบบเต็มตัวที่ค่า BR และ α ต่างๆสำหรับ (ก) V-Downstream (ข) V-Upstream.....	128

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

A	พื้นที่การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการพา, m^2
A_c	พื้นที่หน้าตัดของท่อ, m^2
A_s	พื้นที่ผิวท่อทั้งหมด, m^2
BR	อัตราส่วนการขวางการไหล, (e/D)
C_f	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานแผ่นนิ่ง
c_p	ค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่, $J/kg \cdot K$
D	เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส, $m (=H)$
E	พลังงานรวม, J
b	ความสูงของครีป, m
e	ระยะการตัดขอบ, m
d	ระยะการตัดปลายวี, m
f	ตัวประกอบเสียดทาน
f_0	ตัวประกอบเสียดทานของท่อผิวเรียบ
H	ความสูงของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส, m
h	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, $W/m^2 \cdot K$
i	พลังงานภายใน, J/kg
J	ฟลักซ์ของมวล, $kg/m^2 s$
K	พลังงานจลน์ของกระแสการไหลเฉลี่ยต่อหน่วยมวล, J/kg
k	พลังงานจลน์ของความปั่นป่วนต่อหน่วยมวล, J/kg
k_a	ค่าการนำความร้อนของอากาศ, $W/m \cdot K$
L	ความยาวของท่อ, m
l	ค่าบ่งชี้ลักษณะเชิงขนาด, m
L_e	ความยาวช่วงขาเข้า, m
\dot{m}	อัตราการไหลเชิงมวล, kg/s
Nu	เลขนัทเชลท์เฉลี่ย
Nu_0	เลขนัทเชลท์ของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบ
P	เส้นรอบรูป, m
p	ความดันสถิต, Pa ; ระยะห่างระหว่างครีป, m
PR	อัตราส่วนระยะห่างระหว่างครีป, (p/D)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ XIV อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

Pr	เลขพรานด์
q_s''	ฟลักซ์ความร้อนระหว่างของไหลกับผิวท่อที่จุดใดๆ, W/m^2
Re	เลขเรย์โนลด์
S_{ij}	เทนเซอร์ค่าเฉลี่ยของอัตราความเครียด, s^{-1}
s	ความหนาครีบ, m
T	อุณหภูมิ, K
T_0	อุณหภูมิเฉลี่ย, K
T_s	อุณหภูมิผิว, K
TEF	ค่าตัวประกอบของการเพิ่มทางความร้อน
t	เวลา, s
U_i	ความเร็วเฉลี่ยในแนวแกน x_i , m/s
u_i	ความเร็วย่อยในแนวแกน x_i , m/s
u_i'	ความเร็วย่อยผันแปรในแนวแกน x_i , m/s
u_0	ความเร็วเฉลี่ย, m/s
V	ปริมาตรของเซลล์, m^3
X	ระยะในหนึ่งช่วงครีบ, m
x	พิกัดบอกทิศทางการไหล
y^+	ระยะไร้หน่วยที่วัดจากผนัง

สัญลักษณ์กรีก

Φ	ค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติใดๆ ของของไหล
Ω	เทนเซอร์ค่าเฉลี่ยของอัตราการหมุน, s^{-1}
Γ	การแพร่ทางความร้อน
α	มุมปะทะของครีบกับกระแสการไหล, degree
β	มุมการตัดปลายวี, degree
α	เลขพรานด์ยังผลผกผัน
ϕ	ค่าคุณสมบัติใดๆ ต่อหน่วยมวล
λ	ความหนืดที่สอง
μ	ความหนืดสัมบูรณ์, $N \cdot s/m^2$
ε	อัตราการสูญเสียของความปั่นป่วน, m^2/s^3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ XV อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

ω	อัตราการสูญเสียจําเพาะ, s^{-1}
ρ	ความหนาแน่น, kg/m^3
τ	ความเค้นเฉือน, N/m^2

ตัวห้อย

0	ท่อผิวเรียบ (smooth duct)
a	อากาศ (air)
m	เฉลี่ย (mean)
pp	กำลังของปั๊ม (pumping power)
s	พื้นผิว (surface)
w	ผนัง (wall)



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตต่างๆ นำอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมาใช้กันอย่างแพร่หลาย อาทิเช่น เครื่องทำความเย็น เครื่องอบแห้ง เตาดำ เครื่องยนต์ แผงรับความร้อนจากแสงอาทิตย์ และการระบายความร้อนของกังหันก๊าซ เป็นต้น และเพื่อให้ได้มาซึ่งการผลิตที่มีประสิทธิภาพ การพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนให้มีสมรรถนะทางความร้อนสูงขึ้นจึงจำเป็นอย่างยิ่ง โดยที่หน้าที่สำคัญของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน คือ การนำเอาพลังงานความร้อนมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพและเกิดประโยชน์สูงสุด ดังนั้นการพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ให้ได้มาซึ่งสมรรถนะทางความร้อนที่สูง ก็จะเป็นการใช้พลังงานความร้อนได้อย่างคุ้มค่า ไม่สิ้นเปลืองให้สูญเปล่า

โดยทั่วไปเทคนิคการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนได้แบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 แบบ active techniques เป็นการนำเอาแหล่งพลังงานภายนอกเข้ามาช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อน เช่น อุปกรณ์ทางกล อุปกรณ์ทางไฟฟ้าซึ่งจะมีผลทำให้เกิดการสั่นของผิวทำให้ของไหลเกิดการสั่นสามารถช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ดียิ่งขึ้น กลุ่มที่ 2 แบบ passive techniques เป็นการออกแบบลักษณะพื้นผิวของท่อแบบพิเศษต่างไปจากผิวเรียบและปรับปรุงของไหลหรือสารทำงาน เพื่อให้มีการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ดีมากขึ้นโดยไม่มีพลังงานภายนอกเข้ามาเกี่ยวข้อง

ในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน วิธีที่ได้รับความนิยมกันส่วนมากก็คือ วิธีการแบบ passive techniques โดยการติดตั้งอุปกรณ์การสร้างการปั่นป่วนเข้าไปภายในท่อเช่น ติดตั้งแผ่นกั้น (baffle) ใช้ครีบริบรูปร่างต่างๆ (ribs) หรืออาจจะใช้ลักษณะรูปร่างปีก (winglet) เป็นต้นเพื่อเพิ่มความเร็วของการไหลของของไหลส่งผลทำให้ความเร็วสัมผัสผิวในบริเวณใกล้กับผนังท่อมีค่าเพิ่มสูงขึ้นซึ่งเป็นผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้นส่งผลให้สมรรถนะทางความร้อนของระบบดีขึ้น แต่ถึงกระนั้นการที่มีวัตถุไปต้านทางการไหลให้เกิดความปั่นป่วนเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่าประจอบเสียดทานของระบบเพิ่มขึ้นและเป็นผลต่อค่าการสูญเสียความดันเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน

วิธีการแบบ passive techniques ยังต้องคำนึงถึงขีดจำกัดในการทดลองของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง, ค่าตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาซึ่งจำเป็นต้องคำนึงถึงหลายส่วนด้วยกัน ดังนั้นจึงได้นำวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขมาใช้ในการศึกษาซึ่งวิธีนี้จะช่วยลดปัญหาที่เกิดจากการศึกษาด้วยวิธีการทดลอง จากชุดอุปกรณ์จริงไม่ว่าจะเป็นระยะเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์, ค่าอุปกรณ์, วัสดุที่ค่อนข้างมากเมื่อมีตัวแปรที่ต้องการศึกษาหลายตัวรวมทั้งข้อจำกัดของอุปกรณ์การทดลอง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

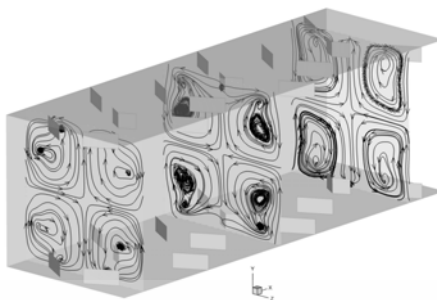
งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการไหลที่มีลักษณะเป็นการไหลแบบปั่นป่วน 3 มิติ และการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสซึ่งจำลองมาจากช่องระบายความร้อนของใบพัดของกังหันก๊าซ โดยท่อแบบจำลองนั้นมีการติดตั้งครีบบนตัววิด้าบนและด้านล่างของผนังท่อสี่เหลี่ยมซึ่งทำมุมปะทะการไหลและตามการไหล และติดตั้งใบพัดแบบต่อเนื่องอยู่บริเวณตรงกลางท่อ โดยผนังท่อด้านบนและด้านล่างมีการให้ความร้อนแบบพลักซ์ความร้อนคงที่ และผนังด้านข้างไม่มีความร้อนภายนอกเข้ามาเกี่ยวข้อง การจำลองการไหลและการถ่ายเทความร้อนใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขนำมาวิเคราะห์การไหลและการถ่ายเทความร้อน วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขนี้ทำให้เข้าใจถึงกลไกของการไหลและการถ่ายเทความร้อนที่ได้รับจากการศึกษายังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการถ่ายเทความร้อนในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมอื่นๆ ได้อีกด้วย ดังนั้น วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ประกอบด้วย

- 1.2.1 เพื่อศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งได้มีการศึกษามาแล้วในอดีตทั้งในส่วนของ การทดลอง และการวิเคราะห์เชิงตัวเลข
- 1.2.2 เพื่อศึกษาด้วยการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของพฤติกรรมการไหล การถ่ายเทความร้อน ค่าความดันตกคร่อม และค่าตัวประกอบของการเพิ่มทางความร้อน ของการไหล ภายในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสในกรณีที่มีตัวสร้างความปั่นป่วนสองชนิดซึ่งประกอบไปด้วยครีบบนตัววิด้าและใบพัดแบบต่อเนื่อง ที่เกิดจากอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย อิทธิพลของเลขเรย์โนลด์ (Re) อิทธิพลของความสูงของแผ่นกั้นซึ่งพิจารณาในเทอมอัตราส่วนของความสูงของแผ่นกั้นต่อความยาวบ่งลักษณะของช่องทางไหลหรือเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (BR) และอิทธิพลความยาวของใบพัดต่อความยาวบ่งลักษณะของช่องทางไหลหรือเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (TR)
- 1.2.3 เพื่อพัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้ตัวสร้างความปั่นป่วนสองชนิดซึ่งใช้ครีบบนตัววิด้าและใบพัดแบบต่อเนื่องเพื่อนำไปสู่ค่าตัวประกอบของการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนที่สูงขึ้น
- 1.2.4 เพื่อพัฒนาครีบบนตัววิด้าและใบพัดแบบต่อเนื่องในส่วนของ การลดค่าความดันตกคร่อม

1.3 ข้อสมมติฐาน

จากกรณีศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาของการครีบบนตัววิด้าติดตั้งบริเวณผนัง ลักษณะของเส้นกระแสการไหลของระนาบตามขวางนั้น จะเกิดการหมุนวนสี่แกนซึ่งเป็นผลมาจากความแตกต่างของความดันตกคร่อมที่บริเวณด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นครีบนี้นำให้เกิดการหมุนวนบริเวณด้านหลังครีบบนตัววิด้าและเกิดการกระแทกของกระแสการไหลที่บริเวณผนังทั้ง สี่ด้านของท่อทำให้อากาศมีเวลาสัมผัสและ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แลกเปลี่ยนความร้อนกับผิวที่มากขึ้นซึ่งแสดงไว้ในรูป 1.1



รูปที่ 1.1 เส้นกระแสการไหลในระนาบตามขวางภายในท่อจัดรัศที่ติดตั้งครีบ

และจากสมมติฐานในการใช้ไบบิตที่เป็นตัวสร้างความปั่นป่วนที่ติดตั้งบริเวณกลางท่อ จะทำให้ของไหลบริเวณตรงกลางท่อหมุนวนตามไบบิตมาสัมผัสกับผนังของท่อที่เสียดสีกันมากขึ้นตามรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 เส้นกระแสการไหลในระนาบตามขวางภายในท่อจัดรัศที่ติดตั้งไบบิต

จากสมมติฐานของลักษณะการไหลที่เกิดจากตัวสร้างความปั่นป่วนทั้งสองชนิด ผู้วิจัยสนใจที่จะนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกัน โดยเล็งเห็นผลประโยชน์จากกระแสการไหลที่แตกต่างกันของตัวสร้างความปั่นป่วนทั้งสองชนิด เมื่อนำมาใช้แล้วมีความเป็นไปได้ที่จะทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนและสมรรถนะทางความร้อนดีขึ้นกว่าการใช้ตัวสร้างความปั่นป่วนเพียงอย่างเดียวอย่างใดอย่างหนึ่ง ดังนั้นเพื่อพิสูจน์สมมติฐานดังกล่าวว่าเป็นจริงหรือไม่ แบบจำลองของท่อสี่เหลี่ยมจัดรัศที่ติดตั้งครีบและไบบิตด้วยกันจึงถูกนำมาคำนวณในงานวิจัยนี้

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล และการถ่ายเทความร้อนบนพื้นฐานของระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (finite volume method)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการสงวนสิทธิ์ในชื่อของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางมหาวิทยาลัยฯ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.3.2 ทำการคำนวณในแบบจำลองการไหล 3 มิติ ที่มีการไหลแบบปั่นป่วน เป็นการไหลแบบคงตัวและไม่อัดตัว ในช่วงเลขเรย์โนลด์ ตั้งแต่ 10,000 ถึง 25,000 และมีอากาศเป็นของไหลทดสอบ
- 1.3.3 ใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Realizable $k-\epsilon$ และการคู่ควบของความเร็วและความดันใช้กระบวนการวิธีแบบ SIMPLE
- 1.3.4 เทอมของการพาใช้แบบแผนการคำนวณแบบ QUICK
- 1.3.5 ทำการวิจัยเฉพาะท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส ที่มีการให้ความร้อนที่ผนังด้านบนและด้านล่างแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่เท่ากับ 1.5 kw/m^2 และบริเวณด้านข้างเนื่องจากอุณหภูมิระหว่างท่อของไหลไหลผ่านที่อุณหภูมิที่เท่ากัน จึงกำหนดให้ไม่มีการถ่ายเทความร้อน
- 1.3.6 ครีบบางรูปตัววีและใบพัดแบบต่อเนื่องที่ใช้ในการวิเคราะห์มีลักษณะเป็นแผ่นบางซึ่งไม่สามารถนำความร้อนได้
- 1.3.7 ศึกษาอิทธิพลของครีบบางรูปตัววีที่ถูกติดตั้งบนผนังบนและล่างของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยทำมุม $\alpha = 30^\circ, 45^\circ$ และ 60° มีการศึกษาทั้งการไหลโดยวางครีบบางตามกระแสการไหล (V-downstream) และทวนกระแสการไหล (V-upstream) โดยค่า $BR = 0.05, 0.075, 0.1, 0.125$ และ 0.15 และค่า $PR = 1$ และ 1.5 เพื่อให้ได้ค่าสมรรถนะทางความร้อนที่สูงและเหมาะสมที่สุด
- 1.3.8 ศึกษาอิทธิพลของใบพัดต่อเนื่องซึ่งติดตั้งภายในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยศึกษา $TR=2, 4$ และ 5 เพื่อหาค่าสมรรถนะทางความร้อนที่สูงและเหมาะสมที่สุด
- 1.3.9 ศึกษาอิทธิพลของการใช้ครีบบางรูปตัววีและใบพัดต่อเนื่องรวมกันภายในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยเงื่อนไข $TR=2 PR=2, TR=4 PR=4$ และ $TR=5 PR=5$, เพื่อหาค่าสมรรถนะทางความร้อนที่สูงและเหมาะสมที่สุด

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1.4.1 รวบรวมข้อมูล ทำการศึกษาทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของการไหลผ่านครีบบางรูปแบบต่างๆ
- 1.4.2 กำหนดลักษณะของปัญหาและกำหนดลักษณะรูปร่างของครีบบางและใบพัดเพื่อสร้างแบบจำลองบนโปรแกรมออกแบบทางพลศาสตร์ของไหลพร้อมกับเลือกขนาดและจำนวนของกริดเซลล์ที่เหมาะสม
- 1.4.3 ตรวจสอบแบบจำลองความปั่นป่วนที่เหมาะสมเทียบกับผลกับของนักวิจัยในอดีตสำหรับท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.4.4 ดำเนินการคำนวณเชิงตัวเลขจากแบบจำลองการไหลสามมิติ โดยเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตามที่ระบุในวัตถุประสงค์ได้แก่ Re , BR , PR , α , และ TR การจัดวางครีบ ลักษณะการติดตั้งครีบ และรูปแบบของครีบ
- 1.4.5 สรุปผลการวิจัยและให้ข้อเสนอแนะเพิ่มเติมสำหรับการทำวิจัยต่อไปในอนาคต

1.6 ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย

- 1.5.1 ทำให้ทราบถึงอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อสมรรถนะในการถ่ายเทความร้อนของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดตั้งครีบแยกรูปตัววีและใบพัดแบบต่อเนื่อง
- 1.5.2 เพื่อการพัฒนาและออกแบบแผ่นกั้นภายในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสให้มีความเหมาะสม ทั้งในการประยุกต์ใช้งานในช่องระบายความร้อนของใบกังหันก๊าซและในอุปกรณ์การถ่ายเทความร้อนรูปแบบอื่นๆ
- 1.5.3 เป็นองค์ความรู้และเป็นแนวทางเพื่อการวิจัยด้านการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสต่อไป
- 1.5.4 ประหยัดพลังงานและลดการใช้วัสดุในการสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งนำไปสู่การลดต้นทุนการผลิต

1.7 คำโครงวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 6 บท โดยที่ในบทที่ 1 ได้กล่าวถึงที่มาของงานวิจัย รวมถึงความสำคัญ วัตถุประสงค์ และขอบเขตของงานวิจัย บทที่ 2 กล่าวถึงวรรณกรรมปริทรรศน์ นำเสนอเกี่ยวกับผลงานวิจัยที่ได้มีการศึกษาและเผยแพร่มาแล้ว ซึ่งศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีการใช้แผ่นกั้นและใช้ครีบในรูปแบบต่างๆ บทที่ 3 ได้นำเสนอสมการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับพลศาสตร์การไหลและการคำนวณเชิงตัวเลข บทที่ 4 นำเสนอการตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองความปั่นป่วน อธิบายรูปแบบการศึกษาจากการติดตั้งครีบแยกรูปตัววีและใบพัดแบบต่อเนื่อง

ผลจากการศึกษาและการวิเคราะห์เชิงตัวเลขนำเสนอในบทที่ 5 ซึ่งได้นำเสนออิทธิพลของการใช้ตัวสร้างความปั่นป่วนของครีบแยกรูปตัววี, ใบพัดต่อเนื่องและการใช้ทั้งสองรวมกัน โดยศึกษาถึงโครงสร้างการไหล พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน และความดันตกคร่อมซึ่งแสดงในรูปของตัวเลขนัสเซลท์ ค่าตัวประกอบความเสียดทาน และค่า TEF รวมทั้งเส้นกระแสการไหลรูปแบบต่างๆ ต่อมาในบทที่ 6 แสดงการสรุปผลจากการศึกษาทั้งหมดและข้อเสนอแนะต่างๆเพิ่มเติมในการต่อยอดงานวิจัย ซึ่งจะถูกรวบรวมไว้ในบทนี้

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทรรศน์

จากเนื้อหาในบทนำที่ผ่านมา ได้นำมาสู่เนื้อหาในบทนี้ซึ่งกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการไหลและการถ่ายเทความร้อนผ่านพื้นผิวให้ความร้อน ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวในรูปแบบต่างๆ เพื่อช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนจากผลงานของนักวิจัยในอดีตที่ผ่านมา ซึ่งได้มีการศึกษาทั้งการทดลอง การคำนวณเชิงตัวเลข หรือใช้ทั้งสองวิธีวิเคราะห์ร่วมกัน โดยเน้นถึงงานวิจัยที่ได้ศึกษาและวิเคราะห์เกี่ยวกับพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบความเสียหายของการไหลผ่านแผ่นกั้นและการไหลผ่านครีบริบบแบบต่างๆ เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปวิเคราะห์การไหลและการถ่ายเทความร้อนในช่องทางไหลสี่เหลี่ยมจัตุรัสต่อไป

2.1 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยใช้วิธีการติดตั้งแผ่นกั้น

การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อด้วยการติดตั้งแผ่นกั้นซึ่งมีลักษณะเป็นครีบริบบที่มีหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมบาง ถูกติดตั้งบนผนังของท่อโดยมีการจัดวางทั้งแบบตรงและแบบเอียงเป็นอีกหนึ่งวิธีที่นำมาใช้ในกระบวนการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน โดยการไหลผ่านแผ่นกั้นจะรบกวนชั้นขีดผิว ความร้อนทำให้บริเวณระหว่างแผ่นกั้นทั้งสองที่อยู่ติดกันเกิดการหมุนวนของการไหลและช่วยในการเพิ่มสัมประสิทธิ์การพาความร้อน โดยวิธีนี้จะทำให้อุปกรณ์ที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อน มีขนาดเล็กลง ซึ่งเหมาะสำหรับอุปกรณ์ที่มีพื้นที่จำกัดในการใช้งานและต้องการความกะทัดรัด ดังนั้นในอดีตที่ผ่านมาจึงมีผู้ที่ศึกษาจากการศึกษาด้วยชุดทดลองจริง และศึกษาด้วยวิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลข ดังนี้

2.1.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง

Founti and Whitelaw (1981) ใช้ LDA (laser doppler anemometry) ศึกษาการไหลผ่านอุปกรณ์จำลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นที่ผิวของเปลือกด้านนอก จากผลการศึกษาพบว่าการกระจายตัวของค่าเฉลี่ยของความเร็วแบบซ้ำเป็นช่วง (periodic) หรือมีพฤติกรรมซ้ำกันและมีลักษณะการไหลปั่นป่วนเกิดขึ้นหลังจากช่วงที่สอง (โมดูลที่ 2) จากทางเข้า

Berner et al.(1984) ศึกษาผลของการกระจายตัวของความเร็วและลักษณะการไหลปั่นป่วนของของไหลที่มีการติดตั้งกลุ่มแผ่นกั้นในท่อ ผลจากการศึกษาพบว่าท่อที่มีการเพิ่มแผ่นกั้น จะเกิดการสลัดของกระแสวน(vortex shedding) ที่เลขเรย์โนลด์มากกว่า 600 ส่วนช่วงการไหลที่ค่าเลขเรย์โนลด์น้อยกว่า 600 อยู่ในช่วงการสลัดของกระแสวนอิสระ(free vortex shedding) สำหรับช่วงการไหลราบเรียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Habib et al. (1994) ศึกษาด้วยการทดลองในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนและพฤติกรรม การถ่ายเทความร้อนแบบซ้้าเป็นช่วง สำหรับท่อที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นที่มีการจัดวางแบบเอียง จากผล การทดลองพวกเขาสรุปว่าค่าความดันตกคร่อมและค่าการถ่ายเทความร้อน มีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีการ เพิ่มความสูงของแผ่นกั้นและเลขเรย์โนลด์

2.1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณเชิงตัวเลข

Patankar et al. (1977) เป็นผู้ริเริ่มศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อ วิเคราะห์การไหลและการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อ โดยจากการศึกษาพบว่า การไหลในช่วง พัฒนาอย่างสมบูรณ์มีพฤติกรรมการไหลแบบซ้้าเป็นช่วง ซึ่งมีลักษณะที่เหมือนกันและซ้้ากันทุกๆ โมดูล

Webb and Ramadhyani (1985) ได้นำแนวคิดการไหลแบบซ้้าเป็นช่วงของ Patankar et al. (1977) มาศึกษาพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนในช่องทางไหลขนาน ที่มีการ ติดตั้งแผ่นกั้นโดยมีการจัดวางแบบเอียง

Cheng and Huang (1989) ทำการศึกษาในช่วงการไหลแบบราบเรียบของของไหลในช่วงที่ มีการเปลี่ยนแปลงตามทางเข้าของท่อโดยใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข สำหรับท่อแบบกึ่งไม่จำกัด (semi-infinite) ที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นทั้งแบบวางด้านเดียวและสองด้าน

Cheng and Huang (1991) ศึกษากรณีของการติดตั้งแผ่นกั้นตามขวางที่มีการจัดวางแบบ ไม่สมมาตร จากผลการศึกษาพบว่าตำแหน่งในการจัดวางแผ่นกั้นมีอิทธิพลต่อลักษณะการไหล โดยเฉพาะแผ่นกั้นที่มีความสูงมาก

ในช่วงแรกๆ ของงานวิจัยโดยใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข ส่วนมากศึกษาพฤติกรรมการไหล และการถ่ายเทความร้อนโดยจำกัดวิธีการศึกษาเป็นแบบการไหล 2 มิติ อันเนื่องมาจากข้อจำกัดของ คอมพิวเตอร์ที่ใช้ศึกษาและความซับซ้อนของการไหล แต่ต่อมาเมื่อคอมพิวเตอร์มีการพัฒนามากขึ้น จึงมีงานวิจัยที่ขยายการไหลไปสู่สนามการไหล 3 มิติ ซึ่งได้แก่

Lopez et al. (1996) ได้พยายามศึกษาพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อที่มี การติดตั้งแผ่นกั้น โดยมีการศึกษาแบบ 3 มิติ ด้วยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข ศึกษาในช่วงการไหลแบบ ราบเรียบ โดยกำหนดให้ผิวท่อด้านบนและด้านล่างมีการให้ความร้อนแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ ส่วนด้านข้างของท่อเป็นฉนวนความร้อน จากผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วนบ่งลักษณะท่อ (aspect ratio) มีอิทธิพลเพียงเล็กน้อยสำหรับค่าความดันตกคร่อม แต่ค่าความดันตกคร่อมจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า ความสูงของแผ่นกั้นและเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น

Guo and Anand (1997) ศึกษาพฤติกรรมในช่วงการเปลี่ยนแปลงตามทางเข้าของการ ถ่ายเทความร้อนแบบ 3 มิติ ในท่อที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นเดียว

Bazdid-Tehrani and Naderi-Abadi (2004) ได้นำเสนอผลจากการศึกษาด้วยวิธีการ คำนวณเชิงตัวเลขของพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อที่มีการเพิ่มแผ่นกั้นโดยมีการ เอกสารนี้เป็นเอกสารทสรงานวิศวกรรมเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จัดวางแผ่นกันแบบตรงกัน จากการศึกษาพบว่าอัตราส่วนการขวางการไหลหรือความสูงของแผ่นกัน จะส่งผลถึงพฤติกรรมการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและส่งผลให้ค่าสมรรถนะทางความร้อนลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่กล่าวถึงแผ่นกันที่มีการจัดวางแบบเอียง

Mousavi and Hooman (2006) ศึกษาพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการติดตั้งแผ่นกันแบบเอียง ทั้งด้านบนและด้านล่างของช่องทางไหลขนาน โดยศึกษาอิทธิพลของเลขเรย์โนลด์ ค่าอัตราส่วนการขวางการไหลและเลขพรานด์ โดยอัตราส่วนระยะห่างระหว่างแผ่นกันกำหนดให้มีค่าคงที่ จากผลการศึกษาพบว่าเงื่อนไขของการไหลแบบพัฒนาอย่างสมบูรณ์และเป็นการไหลแบบชั่วเป็นช่วง ขึ้นอยู่กับค่าเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนการขวางการไหลจะส่งผลให้เลขนัสเซลที่มีค่าเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังส่งผลให้ค่าความดันตกคร่อมเพิ่มมากขึ้นด้วย โดยค่าอัตราส่วนการขวางการไหลระหว่าง 0.25-0.50 จะส่งผลอย่างมากถึงการเปลี่ยนแปลงค่าการถ่ายเทความร้อนและความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้น

Promvong and Kwankaomeng (2010), Promvong et al. (2010a), และ Promvong et al. (2010b) ได้ศึกษาด้วยการคำนวณเชิงตัวเลขของการไหลแบบราบเรียบ โดยวิเคราะห์ถึงการถ่ายเทความร้อนและลักษณะการไหลที่เกิดจากอิทธิพลของมุมปะทะของแผ่นกันยาวต่อเนื่อง ซึ่งติดตั้งที่ผนังด้านบนและด้านล่างของช่องทางไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส และได้ศึกษาถึงกระแสสวนตามยาวที่เกิดจากการไหลปะทะแผ่นกัน และเหนี่ยวนำให้เกิดลำการไหลพุ่งกระแทกพื้นผิวให้ความร้อน ซึ่งนำไปสู่การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนอย่างมากในบริเวณการไหลตกกระทบนั้น

นอกจากนี้ Promvong, Changcharoen, Kwankaomeng and Thianpong (2011) ได้ศึกษาด้วยการคำนวณเชิงตัวเลขของการไหลแบบปั่นป่วน โดยวิเคราะห์ถึงการถ่ายเทความร้อนและลักษณะการไหลที่เกิดจากอิทธิพลของมุมปะทะของแผ่นกันตัววีแยกตัว ซึ่งติดตั้งที่ผนังด้านบนและด้านล่างของช่องทางไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยผนังด้านข้างถูกหุ้มฉนวน พบว่าการไหลได้เข้าสู่ช่วงการไหลชั่วเป็นช่วงที่ระยะ $x/D=7-11$ และกระแสหมุนวนที่เกิดจากการไหลปะทะแผ่นกันได้พุ่งกระแทกที่ผนังทำให้เกิดการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนอย่างมาก ซึ่งมีค่ามากกว่าท่อเปล่า 200-370%

2.2 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนด้วยการติดตั้งแผ่นกันเจาะรู

แผ่นกันที่มีการเจาะรูสามารถทำให้เกิดลำการไหล(jet) ซึ่งไหลไปกระแทกบริเวณพื้นผิว แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและยังอาจช่วยลดความดันตกคร่อมลงได้ และส่งผลให้มีค่าสมรรถนะทางความร้อนที่ดีขึ้น

Dutta et al. (1997) ทำการทดลองเกี่ยวกับแผ่นกันที่มีการเจาะรู โดยผลจากการทดลองพบว่าแผ่นกันที่มีการเจาะรู ให้ค่าการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อนที่มากกว่าเมื่อเทียบกับแผ่นกัน

ที่ไม่มีการเจาะรู การติดตั้งแผ่นกันจะแนบไปกับผิวความร้อนโดยมีการจัดวางตามทิศทางการไหล ซึ่งพบว่าค่าการถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้นโดยมีค่าเป็น 5 เท่า เมื่อเทียบกับท่อเปล่า

Dutta et al. (1998) ได้ทำการศึกษาและรายงานเกี่ยวกับค่าการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อนโดยการเพิ่มแผ่นกันแบบเจาะรูและไม่เจาะรู พวกเขาศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของขนาดของแผ่นกัน ตำแหน่งและการจัดวางแผ่นกัน จากการศึกษาพบว่าแผ่นกันที่มีการเจาะรูจะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่าแผ่นกันที่ไม่เจาะรู เนื่องจากแผ่นกันที่มีการเจาะรูทำให้เกิดการกระแทกของลำการไหล ไปสู่บริเวณพื้นผิวความร้อนซึ่งเป็นการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน อย่างไรก็ตามในกรณีของแผ่นกันเดี่ยว บริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนสูงและถูกจำกัดอยู่แค่บริเวณที่มีการติดตั้งแผ่นกันเท่านั้น เมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของทิศทางการไหลของของไหล พวกเขาพบว่า การกำหนดทิศทางการไหลแบบไหลตามกระแสการไหล(downstream) ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่มากกว่าแบบทวนกระแสการไหล(upstream)

Yang and Hwang (2003) ศึกษาและเปรียบเทียบผลระหว่างแผ่นกันทั่วไปและแผ่นกันแบบพรุน โดยมีการศึกษาแบบ 2 มิติ สำหรับท่อขนานในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน

Dutta and Hossain (2005) ทำการศึกษาวิจัยและนำเสนอเกี่ยวกับพฤติกรรมของการกระจายการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อมในท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการติดตั้งแผ่นกันวางเอียงแบบเจาะรูและไม่เจาะรู ซึ่งใช้กรณีศึกษาในเงื่อนไขเดียวกันของแผ่นกันทั้งสองแบบที่มีขนาดเดียวกัน แผ่นกันมีการจัดวางที่ผิวด้านบนของท่อ โดยมีการให้ความร้อนแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ที่ผนังด้านบนเพียงด้านเดียว ทำการศึกษาในช่วงค่าเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 12,000 ถึง 41,000 จากผลการทดลองพบว่า ค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้นซึ่งเกิดการจากรบกวนชั้นขีดผิวความร้อนและเกิดการไหลพุ่งออกเป็นลำกระแทกบริเวณพื้นผิวความร้อน โดยค่าการถ่ายเทความร้อนที่เปลี่ยนแปลงเป็นผลมาจากการจัดวางแผ่นกัน ทิศทางการไหลและรูปร่างของแผ่นกัน โดยแผ่นกันคู่ให้ค่าความดันตกคร่อมมากกว่าแผ่นกันเดี่ยว ค่าความดันตกคร่อมมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อค่าเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ค่าดังกล่าวยังขึ้นอยู่กับการจัดวางของแผ่นกันอีกด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าแผ่นกันที่มีการจัดวางทั้งสองด้านมีค่าความดันตกคร่อมที่มากกว่าแผ่นกันที่มีการจัดวางเพียงด้านเดียว

วิธีที่ใช้ในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนจากงานวิจัยดังที่ได้กล่าวมานั้น ซึ่งได้แก่ การใช้แผ่นกัน และการใช้แผ่นกันเจาะรู ซึ่งมีข้อดี ข้อด้อย และลักษณะการใช้ที่แตกต่างกันไป ซึ่งการใช้แผ่นกันมีจุดประสงค์เพื่อเป็นการรบกวนที่แกนการไหลหลักของของไหล ส่งผลให้มีการถ่ายเทความร้อนที่สูงขึ้นแต่ในขณะเดียวกันก็ส่งผลให้มีความดันตกคร่อมเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก ซึ่งอาจจะเหมาะสมสำหรับช่วงการไหลแบบราบเรียบ ส่วนการใช้แผ่นกันเจาะรูซึ่งทำให้เกิดการกระแทกของลำการไหล ส่งผลทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนดีขึ้นที่บริเวณผิวความร้อนและช่วยลดความดันตกคร่อมซึ่งเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้กันในปัจจุบัน และสามารถสังเกตเห็นได้จากการใช้หล่อเย็นที่ขายหน้าของใบกังหันก๊าซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนด้วยการติดตั้งครีบบรูปแบบต่างๆ

นอกจากการใช้แผ่นกันแล้วมีผู้วิจัยจำนวนมากให้ความสนใจกับการใช้ครีบ ที่มีรูปร่างของหน้าตัดหลากหลายรูปแบบ และมีความสูงไม่มากนักเมื่อเทียบกับความสูงของแผ่นกัน มาช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ซึ่งการใช้ครีบที่ติดตั้งตลอดแนวพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนนั้น จะสร้างการไหลรบกวนชั้นขีดยึดผิวในบริเวณระหว่างครีบใกล้พื้นผิวถ่ายเทความร้อน ซึ่งเหมาะสำหรับการถ่ายเทความร้อนที่มีการไหลแบบปั่นป่วน โดยครีบที่ยาวต่อเนื่องและวางตั้งฉากกับทิศทางการไหลจะสร้างการไหลวนที่มีแกนการไหลตั้งฉากกับทิศทางการไหลและรบกวนบริเวณการไหลหลักน้อย ส่วนการไหลผ่านครีบที่ทำมุมปะทะต่างๆ กับทิศทางการไหลนั้นจะสร้างการไหลวนตามยาวไปทางด้านท้ายการไหลและก่อให้เกิดการรบกวนบริเวณการไหลหลัก ซึ่งพฤติกรรมของการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนส่วนใหญ่จะเกิดบริเวณใกล้กับผิวความร้อน ข้อดีของครีบคือมีการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยที่ค่าความดันตกคร่อมไม่สูงมากนัก ซึ่งจะส่งผลให้ได้ค่าตัวประกอบทางความร้อนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

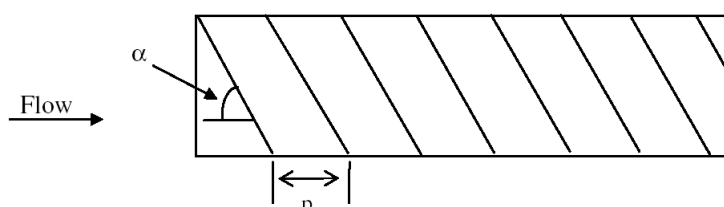
2.3.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง

Webb et al. (1971) พวกเขาได้นำเสนอพฤติกรรมของการไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อที่มีการติดตั้งครีบที่เรียงตัวซ้ำกัน

Han et al. (1978) ศึกษาพื้นผิวที่มีการเพิ่มครีบ โดยทำการศึกษาอิทธิพลของรูปร่างของครีบ มุมปะทะ และอัตราส่วนระยะห่างระหว่างแผ่นครีบต่อความสูงของท่อ และแสดงในรูปของค่าความดันตกคร่อมและอัตราการถ่ายเทความร้อนในช่องทางไหลขนาน ศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 3000 ถึง 30,000 จากผลการศึกษาพบว่าครีบทำมุมปะทะ 45° ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าครีบตรงทำมุมปะทะ 90° กับทิศทางการไหลโดยให้ค่าความดันตกคร่อมที่น้อยกว่า

Gee and Webb (1980) ศึกษาค่าการถ่ายเทความร้อนและความดันตกคร่อมสำหรับการเพิ่มครีบในท่อกลม ในช่วงเลขเรย์โนลด์ 6000 ถึง 65,000 พวกเขาพบว่ามุมปะทะการไหลที่เหมาะสมที่สุดในการติดตั้งครีบคือมุม 45°

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

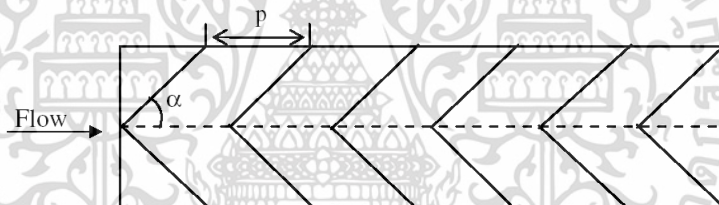


รูปที่ 2.1 ครีบบางเอียงที่ใช้ในการตรวจสอบการถ่ายเทความร้อนโดย Gupta et al. (1997)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Gupta et al. (1997) ตรวจสอบอิทธิพลของ e/D มุมปะทะ และเลขเรย์โนลด์ ต่อการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบความเสียหายในท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีครีบบนเส้นลวดหน้าตัดวงกลมติดตั้งบนแผ่นดูดซับความร้อน แสดงดังรูปที่ 2.2 ซึ่งพวกเขาพบว่าอัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงถึง 1.8 และตัวประกอบความเสียหายมีค่าเท่ากับ 2.7 เท่าเมื่อเทียบกับท่อผิวเรียบ และค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบความเสียหายเกิดขึ้นที่มุมปะทะ 60° และ 70° ตามลำดับ นอกจากนี้ค่า TEF สูงที่สุดเกิดขึ้นที่ $e/D = 0.033$ ที่เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 14,000

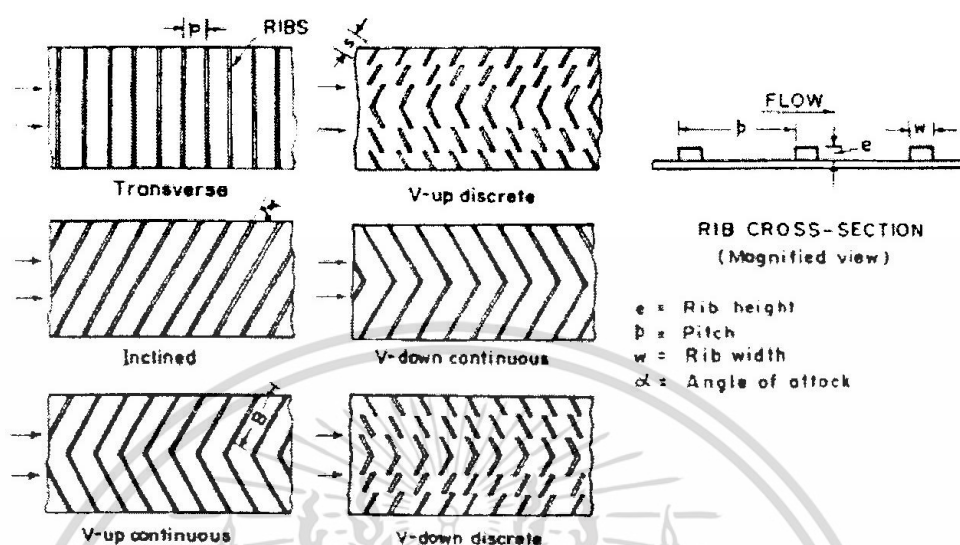
Momin et al. (2002) ตรวจสอบด้วยผลการทดลองของการไหลผ่านครีบบรูปตัววี ต่อการถ่ายเทความร้อนและลักษณะการไหลในท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าของเครื่องอุ่นอากาศด้วยแสงอาทิตย์ แสดงดังรูปที่ 2.4 ศึกษาในช่วงค่าเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 2500 ถึง 18,000 ค่า e/D อยู่ในช่วง 0.02 ถึง 0.034 มุมปะทะอยู่ในช่วง 30° ถึง 90° และค่า $p/e=10$ จากผลการทดลองพบว่าค่าสูงสุดของอัตราส่วนตัวเลขชั้นเสถียรและตัวประกอบความเสียหายเท่ากับ 2.3 และ 2.83 เท่าของท่อผิวเรียบตามลำดับ และเกิดขึ้นที่มุมปะทะ 60° และพวกเขาสรุปว่าครีบบรูปตัววีให้ค่าสมรรถนะทางความร้อนสูงกว่าครีบบีเอียงที่มีเงื่อนไขการไหลเดียวกัน



รูปที่ 2.2 ครีบบรูปตัววีที่ใช้ในงานของ Momin et al. (2002)

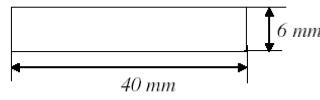
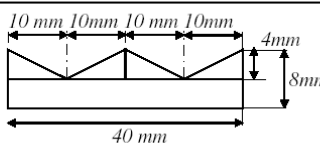
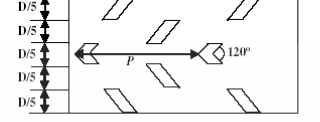
Karwa (2003) ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียหายที่เกิดขึ้นภายในท่อสี่เหลี่ยมที่มีติดตั้งครีบบนด้านเดียว โดยครีบบที่ทดสอบมีลักษณะเป็นครีบบตรง ครีบบีเอียง ครีบบรูปตัววี ทั้งในลักษณะยาวต่อเนื่อง และแบบแยกตัว โดยท่อที่ทดสอบมีอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงเท่ากับ 7.19 ถึง 7.75 อัตราส่วนความสูงครีบบต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก เท่ากับ 0.0476 และ 0.050 และอัตราส่วนระยะห่างระหว่างครีบบต่อความสูงครีบบเท่ากับ 10 โดยครีบบรูปตัววีที่ทดสอบเป็นครีบบรูปตัววีทำมุม 60° และครีบบีเอียง โดยทำการทดลองในช่วงค่าเลขเรย์โนลด์ $Re=2800-15,000$ และความร้อนที่ให้กับท่อสี่เหลี่ยมเป็นแบบพลักซ์ความร้อนคงที่ รูปแบบครีบบภายในท่อสี่เหลี่ยมแสดงในรูปที่ 2.6 จากผลการทดลองพบว่า แผ่นครีบบรูปตัววียาวต่อเนื่องทำให้เกิดค่าตัวประกอบเสียหายมากที่สุด และมีค่ามากกว่าแผ่นเรียบประมาณ 3.40 ถึง 3.92 เท่า ส่วนแผ่นครีบบรูปตัววีชนิดยาวไม่ต่อเนื่องมีค่าตัวประกอบความเสียหายน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับแผ่นครีบบลักษณะต่างๆ และมีค่ามากกว่าแผ่นเรียบประมาณ 2.35 ถึง 2.47 เท่า ในขณะที่ค่าเลขสแตนต์ตัน (Stanton number, St) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับแผ่นครีบริบรูปตัววีมีทิศทางการตรงข้ามกับการไหล จะมีแนวโน้มมากที่สุดคือ 2.10 ถึง 2.47 เท่า เมื่อเทียบกับแผ่นเรียบ และครีบริบตรงตั้งฉากกับการไหลมีค่า St น้อยที่สุด



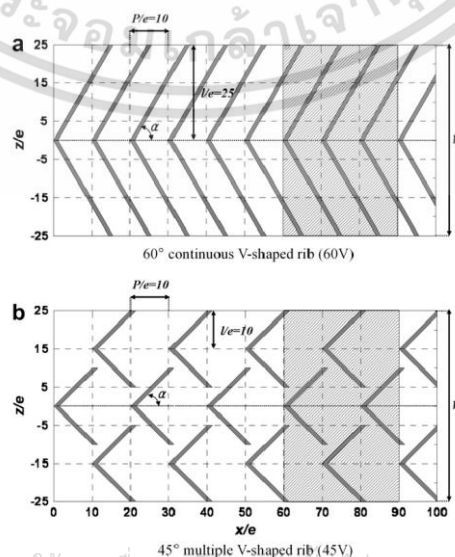
รูปที่ 2.3 รูปแบบครีบริบภายในท่อสี่เหลี่ยมของ Karwa (2003)

Gupta et al. (2008) ได้ศึกษาเชิงทดลองของการวัดการกระจายค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉพาะที่ ที่มีการไหลในช่องทางไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสซึ่งติดตั้งครีบริบที่ทำจากแผ่นกระจกทนความร้อน (Plexiglas) หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสติดตั้งที่ผนังด้านบนและด้านล่าง มีการให้ความร้อนแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ ซึ่งจำลองเป็นช่องหล่อเย็นของใบกังหันก๊าซ ศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 10,000-30,000 ลักษณะครีบริบที่ใช้ศึกษาประกอบด้วย ครีบริบยาวต่อเนื่องและรูปฟันเลื่อยทำมุมปะทะ 90° กับทิศทางการไหล และครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัวทำมุมปะทะ 60° กับทิศทางการไหล ซึ่งมีรายละเอียดของพารามิเตอร์ที่ใช้ศึกษาแสดงดังรูปที่ 2.10 โดยใช้วิธีการถ่ายภาพรังสีอินฟราเรด (infrared thermography technique) วัดค่าการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวให้ความร้อนและแสดงในรูปแบบเส้นชั้น (contour plots) ซึ่งให้ค่าที่ค่อนข้างละเอียด จากผลการทดลองพวกเขาสรุปว่าการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนจากครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัวให้ค่าสูงกว่าครีบริบยาวต่อเนื่องและรูปฟันเลื่อย

Case	Configuration	P/e	e/D	Description
A, B		7, 10	0.15	90° continuous rib
C			0.15	90° saw tooth profiled ribs with one peak and two valleys
D		7.5, 10, 12	0.0625	60° V broken rib

รูปที่ 2.4 รูปร่างและลักษณะการจัดเรียงครีบบที่ใช้ในงานของ Gupta et al. (2008)

Promvong and Thianpong (2008) ศึกษาด้วยการทดลองเกี่ยวกับอิทธิพลของการไหลผ่านครีบบที่มีหน้าตัดรูปทรงต่างๆ ที่วางตั้งฉากกับทิศทางการไหลในช่องทางไหลต่อการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทาน โดยครีบบที่ใช้ศึกษามีการจัดเรียงทั้งแบบตรงกันและแบบเอียงกัน ซึ่งประกอบไปด้วยครีบบสามเหลี่ยมด้านเท่า ครีบบรูปสี่เหลี่ยมที่หันไปทางด้านท้ายการไหล และครีบบรูปสี่เหลี่ยม ซึ่งถูกติดตั้งบนผิวให้ความร้อนแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ที่ผนังด้านบนและด้านล่าง ช่องทางไหลมีอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของช่อง (W/H) เท่ากับ 15 ค่า $p/H=2$ และค่า $e/H=0.15$ ศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 4000-16,000 จากผลการทดลองสรุปได้ว่า ที่เงื่อนไขการไหลเดียวกันการจัดวางครีบบแบบตรงกัน ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบความเสียดทานสูงกว่าการจัดวางครีบบแบบเอียงกัน และครีบบรูปสี่เหลี่ยมที่หันไปทางด้านท้ายการไหลให้ค่าเลขนัสเซลท์และค่าตัวประกอบความเสียดทานสูงที่สุด ในขณะที่ครีบบรูปสามเหลี่ยมวางเอียงกันให้ค่า TEF สูงที่สุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่ากับ 10 ค่า $p/H=1.33$ และค่า $e/H=0.13$ ศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 5000-22,000 จากผลการทดลองพวกเขาสรุปว่า อัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานและเลขนัสเซลล์ท์อยู่ในช่วง 2.2-5.5 และ 2.2-2.6 ตามลำดับ ซึ่งขึ้นอยู่กับมุมปะทะและเลขเรย์โนลด์ และการเรียงครีบบแบบสลับร่วมกับปีกเล็กที่มีมุมปะทะ 30° ให้ค่า TEF สูงที่สุด

2.3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณเชิงตัวเลข

Yang and Hwang (2004) ได้ตรวจสอบด้วยการคำนวณเชิงตัวเลขของลักษณะการถ่ายเทความร้อนในท่อหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีครีบบยาวต่อเนื่องและครีบบแบบแยกตัวติดตั้งบนผนังให้ความร้อนเพียงหนึ่งด้าน และพวกเขาได้สรุปว่าครีบบแบบแยกตัวให้ลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่าครีบบต่อเนื่อง

Kim and Lee (2007) ได้นำเสนอด้วยผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการไหลแบบปั่นป่วนและการถ่ายเทความร้อนเพื่อวิเคราะห์ค่าที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการออกแบบช่องทางไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ที่มีการติดตั้งครีบบรูปตัววีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ผนังด้านบนและด้านล่าง

Ryu et al. (2007) ศึกษาด้วยการคำนวณเชิงตัวเลข โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ $k-\omega$ มีสิ่งที่น่าสนใจคือ สำหรับการวิเคราะห์การไหล 2 มิติ ในเบื้องต้นพวกเขาได้เปรียบเทียบผลการคำนวณเชิงตัวเลขกับค่าที่ได้จากการทดลองจากเอกสารที่พวกเขาใช้อ้างอิง ซึ่งพบว่าสอดคล้องกันดีทั้งสนามการไหลและการถ่ายเทความร้อน และนอกจากนี้พวกเขาได้ศึกษาผลของการไหลและการถ่ายเทความร้อนสำหรับการไหลผ่านครีบบที่วางบนผนังด้านล่าง 4 รูปแบบคือ ครีบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส ครีบบสามเหลี่ยมหน้าจั่ว ครีบบรูปครึ่งวงกลม และครีบบรูปไข่ โดยมีความสูงครีบบ 20% ของความสูงช่องทางไหล และเปลี่ยนค่า p/e หลายค่า ซึ่งพบว่าที่ค่า $p/e=10$ ครีบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสให้ค่าเลขนัสเซลล์ท์และตัวประกอบความเสียดทานสูงที่สุด

Kamali and Binesh (2008) ศึกษาการไหลและการถ่ายเทความร้อนโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ SST $k-\omega$ วิเคราะห์การไหลในท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ซึ่งมีครีบบยาวต่อเนื่องวางตั้งฉากกับทิศทางการไหลและมีหน้าตัด 4 รูปทรงคือ สี่เหลี่ยม สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยมคางหมูที่มีด้านสั้นหันไปทางการไหลและตรงข้ามกับทิศทางการไหล ซึ่งติดตั้งบนพื้นผิวให้ความร้อนเพียงหนึ่งด้าน ศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 8000-20,000 จากผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขพวกเขาสังเกตได้ว่าการเปรียบเทียบอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์ที่เกิดจาก ครีบบสี่เหลี่ยมคางหมูที่มีด้านสั้นหันไปทางการไหลกับผลการทดลองจากเอกสารที่พวกเขาใช้อ้างอิงนั้นสอดคล้องกันดี ซึ่งกริดเซลล์ท์ที่ใช้มีลักษณะเป็นรูปทรงสามเหลี่ยม และครีบบรูปทรงดังกล่าวให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์และค่าตัวประกอบความเสียดทานสูงกว่าครีบบรูปทรงอื่น

Sripattanapipat and Promvong (2009) แสดงผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนที่มีการไหลแบบราบเรียบ 2 มิติ ในช่องขนานที่ติดตั้งกันรูปเพชรที่ผนังด้านบนและด้านล่างในแนวเอียง มีลักษณะการไหลแบบซ้ำเป็นช่วงโดยใช้เงื่อนไขอุณหภูมิที่ผนังคงที่ ในช่วงเลข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรย์โนลด์ 100-600 พบว่าเมื่อลดมุมที่ยอดรูปเพชรจะทำให้ค่าเลขนัสเซลท์และตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้น และยังพบว่าทุกค่าเลขเรย์โนลด์ที่ใช้มุมยอดเพชรที่ 5° และ 10° ให้ค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนสูงกว่ามุมยอดเพชรที่ 0° (แผ่นกั้นแบน)

Kumar and Saini (2009) ศึกษาด้วยการคำนวณเชิงตัวเลขของการไหลและการถ่ายเทความร้อน ของการไหลผ่านครีบบแบบเส้นลวดโค้งที่วางบนแผ่นให้ความร้อนของเครื่องอุณหอากาศด้วยแสงอาทิตย์ โดยวิเคราะห์เรขาคณิตของครีบต่อการถ่ายเทความร้อน ค่าตัวประกอบความเสียดทาน และค่า TEF ที่ e/D อยู่ในช่วง 0.0299 ถึง 0.0426 และอัตราส่วนของมุมปะทะ ($\alpha/90^\circ$) อยู่ในช่วง 0.333 ถึง 0.666 และเลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 6000 ถึง 18,000 โดยเปรียบเทียบแบบจำลองความปั่นป่วนหลายแบบจำลองกับค่าเลขนัสเซลท์ของท่อผิวเรียบ จากสมการสหพันธ์ของ Dittus-Boelter ซึ่งพบว่าแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG $k-\epsilon$ ให้ค่าได้ใกล้เคียงมากที่สุด และจากผลการคำนวณเชิงตัวเลขพวกเขาสรุปว่า ค่า TEF สูงที่สุดได้เท่ากับ 1.7 สำหรับช่วงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการตรวจสอบ

จะเห็นได้ว่ามีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาเกี่ยวข้องกับการไหล และการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ของการไหลผ่านตัวสร้างความปั่นป่วนในรูปแบบต่างๆ โดยให้ความสนใจกับลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากอิทธิพลของความสูงครีบ มุมปะทะ และอัตราส่วนระยะห่างระหว่างครีบ ซึ่งมีทั้งกรณีครีบยาวต่อเนื่องและตั้งฉากกับทิศทางการไหล ครีบยาวต่อเนื่องวางเอียง ครีบบรูปตัววี ทั้งแบบยาวต่อเนื่องและแบบแยกตัว ซึ่งมีทั้งในส่วนของการทดลองและการวิเคราะห์เชิงตัวเลข โดยภาพรวมนั้นสังเกตพบว่าครีบบรูปตัววีทั้งแบบต่อเนื่องและแบบแยกตัว ที่ทำมุมปะทะค่าต่างๆ กับทิศทางการไหลและติดตั้งบนพื้นผิวให้ความร้อนนั้น ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบของการเพิ่มทางความร้อนสูงกว่าตัวสร้างความปั่นป่วนรูปแบบอื่น และนอกจากนี้ในส่วนของการวิเคราะห์เชิงตัวเลขที่มีการไหลแบบปั่นป่วนนั้น แบบจำลองความปั่นป่วนที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์การไหลและการถ่ายเทความร้อน มี 2 แบบจำลองที่เป็นที่นิยมกันในปัจจุบันคือ RNG $k-\epsilon$ และ SST $k-\omega$

แต่สำหรับการศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน โดยใช้ตัวสร้างความปั่นป่วนสองชนิดพร้อมกัน ซึ่งติดตั้งครีบบแยกรูปตัววีที่ผนังด้านบนและด้านล่างของพื้นผิวให้ความร้อนและติดตั้งใบปิดแบบต่อเนื่องตรงกลางพร้อมกันในช่องทางไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสของกรณีการไหลแบบซ้ำเป็นช่วง ยังพบว่ามีงานศึกษาน้อยมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งกับการใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นการศึกษาแบบจำลองการคำนวณเชิงตัวเลขสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนแบบ 3 มิติ โดยพิจารณาลักษณะการไหลเป็นคาบในท่อจัตุรัสที่มีการติดตั้งแผ่นครีบบแยกรูปตัววีด้านบนและด้านล่างและใบปิดแบบต่อเนื่อง เพื่อทำความเข้าใจถึงกลไกการไหลจากสนามการไหลที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อน และความดันตกคร่อม ซึ่งได้รับอิทธิพลจากตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ศึกษา ได้แก่ ความสูงครีบ ระยะห่างระหว่างครีบ มุมปะทะ และความยาวของใบปิด เพื่อนำไปสู่การหาค่า TEF ที่มีค่าสูงสุดและเหมาะสม และในท้ายที่สุดสามารถนำไปออกแบบสำหรับการใช้งานจริงได้ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

สมการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับการควบคุมการเคลื่อนที่ของไหลและสมการพลังงานเพื่อวิเคราะห์ปัญหาของการไหลแบบปั่นป่วน โดยใช้ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมหรือไฟไนต์วอลุ่ม ซึ่งเป็นระเบียบวิธีที่มีอยู่ในซอฟต์แวร์ที่จำหน่ายกันอยู่ในระดับสากลและเป็นที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน โดยสามารถนำมาใช้วิเคราะห์ปัญหาการไหลผ่านรูทรงที่มีความซับซ้อนได้ดี

3.1 สมมุติฐานของการไหลและสมการควบคุม

การคำนวณเชิงตัวเลขของการไหลและการถ่ายเทความร้อน ที่มีการติดตั้งครีบบนพื้นผิวให้ความร้อนในท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีสมมุติฐานของการไหลดังนี้

- (1) เป็นการไหลแบบปั่นป่วนและอัดตัวไม่ได้
- (2) การไหลและการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบคงตัว 3 มิติ
- (3) เป็นการไหลและการถ่ายเทความร้อนที่พัฒนาอย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วง
- (4) สมบัติต่างๆ ของของไหลมีค่าคงที่
- (5) ไม่พิจารณาแรงวัตถุ

สมการควบคุมการไหลประกอบไปด้วยสมการความต่อเนื่อง สมการโมเมนตัม (หรือเรียกว่าสมการนาเวียร์-สโตกส์) และสมการพลังงาน เมื่อพิจารณาภายใต้สมมุติฐานข้างต้น สมการดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังนี้

สมการความต่อเนื่อง

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

สมการโมเมนตัม

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการพลังงาน

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

เมื่อ Γ คือสัมประสิทธิ์การแพร่เชิงความร้อน ซึ่งกำหนดโดย $\Gamma = \mu / Pr$

กลุ่มสมการควบคุมการไหลข้างต้นเมื่อใช้ร่วมกับเงื่อนไขขอบที่เหมาะสม สามารถนำไปวิเคราะห์การไหลแบบราบเรียบได้ แต่ถ้านำสมการควบคุมดังกล่าวมาวิเคราะห์ปัญหาที่มีการไหลแบบปั่นป่วน จะก่อให้เกิดความยุ่งยากในการวิเคราะห์ เนื่องจากลักษณะเฉพาะตัวของการไหลแบบปั่นป่วนนั้นมีความซับซ้อน ดังนั้นในส่วนถัดไปจะนำเสนอพื้นฐานการไหลแบบปั่นป่วน เพื่อนำไปสู่สมการของแบบจำลองความปั่นป่วนรูปแบบต่างๆ และเป็นพื้นฐานในการตัดสินใจเลือกแบบจำลองที่มีความเหมาะสมสำหรับการนำมาใช้คำนวณเชิงตัวเลขต่อไป

3.2 การไหลแบบภายในและการถ่ายเทความร้อน

การไหลแบบภายใน เช่นการไหลในช่องทางไหล หรือการไหลในท่อที่มีหน้าตัดรูปแบบต่างๆ มีเนื้อหาพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการไหลแบบปั่นป่วนและการถ่ายเทความร้อนดังนี้

3.2.1 สถานะการไหล

การไหลแบบภายในเช่นการไหลในท่อ มีขอบเขตจำกัดโดยที่ความหนาของชั้นขีดผิวไม่สามารถเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ได้ เนื่องจากเมื่อไหลไปได้ระยะหนึ่งชั้นขีดผิวจะก่อตัวเต็มหน้าตัดการไหลรูปร่างของความเร็วจะมีลักษณะชัดเจนแน่นอนไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งเรียกว่าการไหลพัฒนาอย่างสมบูรณ์(fully developed flow) สำหรับช่วงการไหลก่อนหน้านี้เรียกว่าการไหลที่กำลังปรับตัว(developing flow) และเรียกระยะของการไหลที่กำลังปรับตัวว่าความยาวขาเข้า, L_c (hydrodynamic entrance length)

สำหรับการไหลภายในนั้น เลขเรย์โนลด์สำหรับการไหลกำหนดโดย

$$Re = \frac{\rho u_0 D}{\mu} \quad (3.4)$$

เมื่อ u_0 เป็นความเร็วเฉลี่ยภายในท่อ และ D คือความยาวบ่งลักษณะของช่องทางไหล หรือเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก(hydraulic diameter) มีนิยามเป็น

$$D = \frac{4A_c}{P} \quad (3.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อค่า A_c และ P เป็นพื้นที่หน้าตัดและเส้นรอบรูปของหน้าตัดตามลำดับ

โดยทั่วไปสำหรับการไหลในท่อผิวเรียบ เลขเรย์โนลด์ส์วิกฤติของการเปลี่ยนแปลงไปเป็นการไหลปั่นป่วน เริ่มต้นจาก $Re_D > 4000$ และความยาวของช่วงบริเวณทางเข้าสำหรับการปรับตัวหาได้จากสมการ

$$\left(\frac{L_c}{D}\right)_{\text{turb}} \approx 4.4 Re_D^{1/6} \quad (3.6)$$

3.2.2 ตัวประกอบความเสียดทาน

ตัวประกอบความเสียดทาน(friction factor) ของ Moody (หรือ Darcy) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ไร้มิติ มีนิยามว่า

$$f_{\text{Darcy}} \equiv \frac{(\Delta p / L) D}{\rho u_0^2 / 2} \quad (3.7)$$

เมื่อค่า L คือช่วงความยาวที่วัดค่าความดันตกคร่อม และค่า f_{Darcy} นี้แตกต่างกับค่าตัวประกอบความเสียดทาน f ซึ่งเรียกว่าตัวประกอบความเสียดทานเฟานิง มีสมการดังนี้

$$f = \frac{f_{\text{Darcy}}}{4} \quad (3.8)$$

3.2.3 สถานะการถ่ายเทความร้อน

ถ้าของไหลที่มีอุณหภูมิสม่ำเสมอไหลเข้าไปในท่อโดยมีอุณหภูมิแตกต่างจากอุณหภูมิที่ผิวแล้ว การพาความร้อนจะเกิดขึ้นและชั้นขีดผิวของความร้อนจะเริ่มก่อตัวขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าสถานะที่ผิวของท่อคงที่โดยอาจเป็นอุณหภูมิผิว, T_s คงที่ หรือฟลักซ์ความร้อนที่ผิว, q_s'' คงที่ สถานะพัฒนาอย่างสมบูรณ์เชิงความร้อน(thermally fully developed condition) ก็จะเกิดขึ้น

สำหรับการไหลแบบราบเรียบ ถ้า $Pr > 1$ การพัฒนาชั้นขีดผิวเชิงความเร็วจะขยายตัวเร็วกว่าชั้นขีดผิวเชิงความร้อน และกลับกันถ้า $Pr < 1$ และสำหรับอากาศการพัฒนาชั้นขีดผิวเชิงความเร็วและชั้นขีดผิวเชิงความร้อนจะใกล้เคียงกัน และจากการทดลองสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนเงื่อนไขทั้งสองเกือบจะเป็นอิสระไม่ขึ้นกับ Pr ซึ่งอาจจะประมาณได้ว่า $L_{c,th} / D \approx 10$

ฟลักซ์ความร้อน (q_s'') ระหว่างของไหลกับผิวท่อที่จุดใดๆ หาได้จากกฎเย็นตัวของนิวตัน

$$q_s'' = h(T_s - T_m) \quad (3.9)$$

โดยที่ T_s คืออุณหภูมิพื้นผิว

T_m คืออุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลที่หน้าตัดของช่องทางไหล

พลັกซ์ความร้อนนี้จะสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่แตกต่างรวมทั้งหมระหว่างผนังกับของไหล ซึ่ง h คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้วยการพาบางครั้งเรียกว่าการนำผ่านฟิล์ม เพราะความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นกระบวนการนำความร้อนในชั้นบางๆ ของของไหลที่บริเวณผิวของผนัง ค่า T_m จะเปลี่ยนแปลงไปตามทิศทางการไหลนั้นคือ dT_m/dx จะไม่เป็นศูนย์ถ้ามีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้น ค่าของ T_m จะเพิ่มขึ้นไปตามระยะทางการไหล, x ถ้ามีการถ่ายเทความร้อนจากผิวสู่ของไหล

3.2.4 สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์เชิงความร้อน

เนื่องจากการพาความร้อนเกิดขึ้นจริงระหว่างผิวและของไหล นั่นคืออุณหภูมิของของไหลต้องเปลี่ยนแปลงตามระยะ x ซึ่งสภาวะการปรับตัวอย่างสมบูรณ์แล้วของอุณหภูมิจะไม่เคยเกิดขึ้นเลย ปรากฏการณ์นี้จะต้องจัดรูปใหม่ให้อยู่ในรูปไร้มิติของอุณหภูมิ เพื่อให้ได้เงื่อนไขของสภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์เชิงความร้อน

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

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{T_s - T}{T_s - T_m} \right] = 0 \quad (3.10)$$

โดยที่ T คืออุณหภูมิของไหลที่ตำแหน่งใดๆ

เงื่อนไขที่กำหนดให้สำหรับสมการ (3.10) ซึ่งจะเกิดขึ้นในช่องทางไหลอาจจะเป็นกรณี q_s'' คงที่หรือ T_s คงที่ก็ได้ เงื่อนไขที่ผิวแบบนี้เกิดขึ้นมากในทางวิศวกรรม เช่น ผนังท่อซึ่งได้รับความร้อนจากไฟฟ้าหรือผิวภายนอกที่ได้รับจากการแผ่รังสีอย่างสม่ำเสมอจะเป็นกรณีของ q_s'' คงที่ ส่วนกรณี T_s คงที่จะเกิดขึ้นถ้ามีการเปลี่ยนสถานะ (เนื่องจากการเดือดหรือการควบแน่น) เกิดขึ้นที่ผิวภายนอก

3.2.5 ค่าตัวประกอบของการเพิ่มทางความร้อน

Sripattanapipat and Promvong (2009) นำเสนอค่าตัวประกอบของการเพิ่มทางความร้อนหรือค่าสมรรถนะของการเพิ่มขึ้นทางความร้อน, TEF ซึ่งคำนวณได้จาก

$$TEF = \frac{(Nu / Nu_o)}{(f / f_o)^{1/3}} \quad (3.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การคำนวณการไหลแบบซ้ำเป็นช่วง

เพื่อต้องการลดจำนวนของกริดเซลล์และเวลาที่ใช้ในการคำนวณสำหรับการวิเคราะห์การไหลและการถ่ายเทความร้อนในช่วงที่มีการพัฒนาอย่างสมบูรณ์ ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการคำนวณการไหลแบบซ้ำเป็นช่วง (periodic flow) ซึ่งการวิเคราะห์การไหลลักษณะนี้เกิดขึ้นเมื่อ รูปทรงทางเรขาคณิตและรูปแบบที่ต้องการหาค่าผลเฉลยของการไหลและการถ่ายเทความร้อน โดยธรรมชาติแล้วมีการซ้ำเป็นช่วงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งการไหลแบบซ้ำเป็นช่วงสามารถแบ่งได้เป็น การไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความเร็วและการไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความร้อน โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.3.1 การไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความเร็ว

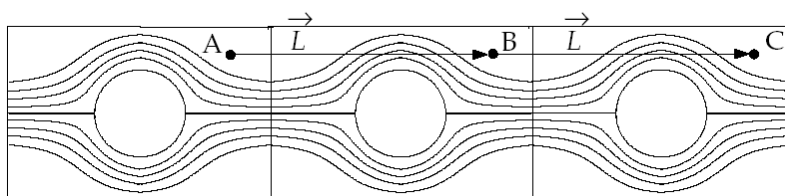
การไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความเร็วเป็นลักษณะการไหลเมื่อมีค่าความดันตกคร่อมเกิดขึ้นข้ามขอบเขตการไหลตามแนวทิศทางการไหล โดยเกิดขึ้นกับการไหลที่พัฒนาอย่างสมบูรณ์ ลักษณะการไหลเช่นนี้มีการเปลี่ยนแปลงทางเรขาคณิตที่ซ้ำกันไปตามแนวทิศทางการไหล โดยมีรูปแบบของการไหลเกิดขึ้นซ้ำกับเป็นวงรอบ สภาวะการไหลที่ซ้ำเป็นช่วงนี้เกิดขึ้นหลังจากมีช่วงของความยาวขาเข้าที่เพียงพอ โดยขึ้นอยู่กับเลขเรย์โนลด์ของการไหลและรูปร่างทางเรขาคณิตของช่องทางไหล

3.3.1.1 นิยามของความเร็วเมื่อมีการไหลซ้ำเป็นช่วง

สภาวะของการไหลซ้ำเป็นช่วงเกิดขึ้นเมื่อรูปแบบการไหลเกิดขึ้นซ้ำกันในช่วงการไหล L โดยมีค่าความดันตกคร่อมคงที่ในช่วงโมดูลของการไหลตามแนวทิศทางการไหล นิยามของการไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความเร็ว ถูกกำหนดโดยค่าของความเร็วย่อยนั้นจะซ้ำกันโดยตัวมันเอง ดังสมการ

$$u_i(\vec{r}) = u_i(\vec{r} + \vec{L}) = u_i(\vec{r} + 2\vec{L}) = \dots \quad i = 1, 2, 3 \quad (3.12)$$

เมื่อ \vec{r} คือเวกเตอร์บอกตำแหน่ง และค่า \vec{L} คือเวกเตอร์ของความยาวที่ซ้ำเป็นช่วงของโดเมนการไหลที่พิจารณา สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างของรูปทรงเรขาคณิตที่ซ้ำเป็นช่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปสามารถแสดงเป็นความสัมพันธ์ได้ว่า

$$u_A = u_B = u_C \quad \tilde{p}_A = \tilde{p}_B = \tilde{p}_C$$

$$v_A = v_B = v_C \quad p_B - p_A = p_C - p_B$$

3.3.1.2 นิยามของความดันเมื่อมีการไหลช้าเป็นช่วง

สำหรับการไหลแบบมีความหนืด ค่าของความดันจะไม่ช้าเป็นช่วงตามนิยามของความเร็วดังในสมการที่ (3.11) แต่ค่าของความดันตกคร่อมช่วงของการไหลหรือโมดูลจะมีค่าเท่ากัน แสดงได้ดังสมการ

$$\Delta p = p(\bar{r}) - p(\bar{r} + \bar{L}) = p(\bar{r} + \bar{L}) - p(\bar{r} + 2\bar{L}) = \dots \quad (3.13)$$

ค่าเกรเดียนต์ของความดันเฉพาะที่ สามารถแยกออกได้เป็นสองส่วนคือ ส่วนของเกรเดียนต์ที่ช้าเป็นช่วง, $\nabla \tilde{p}(\bar{r})$ และส่วนของเกรเดียนต์ของการเปลี่ยนแปลงเชิงเส้น, $\beta \frac{\bar{L}}{|\bar{L}|}$ โดยแสดงได้ดังสมการ

$$\nabla p(\bar{r}) = \beta \frac{\bar{L}}{|\bar{L}|} + \nabla \tilde{p}(\bar{r}) \quad (3.14)$$

เมื่อค่า $\tilde{p}(\bar{r})$ คือความดันที่ช้ากันเป็นช่วง(periodic pressure) และค่า $|\beta \bar{L}|$ คือส่วนของการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นของความดัน โดยที่ค่าความดันที่ช้ากันเป็นช่วงคือผลต่างของความดันทางด้านซ้ายกับความดันที่ทางออกซึ่งเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้น และส่วนของการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นของความดันเป็นผลของแรงที่กระทำต่อของไหลในสมการโมเมนตัม ซึ่งค่า β นั้นจะเป็นค่าที่ไม่ทราบมาก่อนและได้ค่ามาจากการคำนวณช้าจนกระทั่งการไหลมีค่าของอัตราการไหลเชิงมวลเท่ากับค่าที่กำหนดไว้ตอนเริ่มต้น

3.3.2 การไหลช้าเป็นช่วงเชิงความร้อน

การไหลช้าเป็นช่วงเชิงความร้อนตามแนวทิศทางการไหล สามารถเกิดขึ้นได้สำหรับการระบุพลักซ์ความร้อนคงที่ที่ผนัง ในการไหลเช่นนี้ค่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิระหว่างขอบเขตที่ช้าเป็นช่วงจะมีค่าคงที่ และสัมพันธ์กับการเพิ่มความร้อนสุทธิจากขอบเขตของผนัง

เมื่อการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นช้ากันเป็นช่วง สนามอุณหภูมิจะมีความคล้ายคลึงกับสนามของความดันในกรณีของการไหลเป็นช่วงเชิงความเร็ว โดยมีสมการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{T(\bar{r} + \bar{L}) - T(\bar{r})}{L} = \frac{T(\bar{r} + 2\bar{L}) - T(\bar{r} + \bar{L})}{L} = \sigma \quad (3.15)$$

เมื่อค่า σ คือเกรเดียนต์ของอุณหภูมิ ซึ่งสามารถเขียนได้ในเทอมของการเพิ่มความร้อนทั้งหมดภายในโดเมน, Q ดังสมการ

$$\sigma = \frac{Q}{\dot{m}c_p L} = \frac{T_{\text{bulk,exit}} - T_{\text{bulk,inlet}}}{L} \quad (3.16)$$

เมื่อค่า m คืออัตราการไหลเชิงมวลที่กำหนดให้

และค่า T_{bulk} มีนิยามโดย

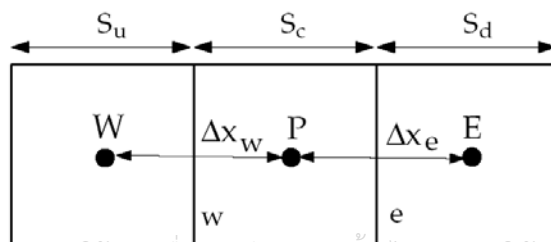
$$T_{\text{bulk}} = \frac{\int_A T |\rho \vec{u} \cdot d\vec{A}|}{\int_A |\rho \vec{u} \cdot d\vec{A}|} \quad (3.17)$$

เมื่อ T_{bulk} อินทิเกรตตลอดพื้นที่หน้าตัดของโดเมนการไหลที่เข้าเป็นช่วง, A

3.4 วิธีการประมาณค่าแบบ QUICK

วิธีการประมาณค่าแบบ QUICK (Quadratic upstream interpolation for convective kinetics differencing scheme, QUICK) ใช้สำหรับการคำนวณค่าที่ผิวเซลล์ ϕ_f ที่มีอันดับความแม่นยำที่สูงขึ้น โดยใช้พื้นฐานของการเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักของวิธีการประมาณค่าต้นลมอันดับสองร่วมกับวิธีการประมาณค่าของตัวแปรที่ศูนย์กลาง สำหรับผิวเซลล์ e ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งถ้ามีการไหลจากด้านซ้ายไปด้านขวา ค่าที่ผิวเซลล์ e สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\phi_e = \theta \left[\frac{S_d}{S_c + S_d} \phi_P + \frac{S_d}{S_c + S_d} \phi_E \right] + (1 - \theta) \left[\frac{S_u + 2S_c}{S_u + S_c} \phi_P - \frac{S_c}{S_u + S_c} \phi_W \right] \quad (3.18)$$



รูปที่ 3.3 ปริมาตรควบคุมแบบ 1 มิติ

เมื่อค่า $\theta=1$ สมการที่ (3.26) จะกลายเป็นสมการของการประมาณค่าในช่วงที่ศูนย์กลางอันดับสอง (central second-order interpolation) ในขณะที่ $\theta=0$ จะได้สมการของการประมาณค่าต้นลมอันดับสอง ซึ่งโดยทั่วไปสำหรับวิธีการประมาณค่าแบบ QUICK นั้นจะกำหนดให้ $\theta=1/8$

3.4.1 การแปลงรูปสมการโมเมนตัม

สมการสำหรับการแปลงรูปสมการโมเมนตัม จะใช้สมการที่ (3.22) ยกตัวอย่างเช่น สมการโมเมนตัมในแนวแกน x จะกำหนดให้ $\phi = u$ ซึ่งจะได้

$$a_p u = \sum_{nb} a_{nb} u_{nb} + \sum p_f A \cdot \hat{i} \quad (3.19)$$

สำหรับระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมจะพิจารณาอัตราเปลี่ยนแปลงความดัน เป็นเทอมแหล่งกำเนิด (source term) เนื่องจากความสัมพันธ์ที่ควบคู่กัน (couple relation) ระหว่างสมการอนุรักษ์มวลและสมการนาเวียร์-สโตกส์ด้วยตัวแปรความเร็ว ดังนั้นหากทราบค่าของความดันที่ถูกต้องแล้ว ผลเฉลยของสมการนาเวียร์-สโตกส์แบบอัดไม่ได้จะต้องสอดคล้องกับสมการอนุรักษ์มวลด้วย

ถ้าค่าของสนามความดันและอัตราการไหลเชิงมวลนั้นทราบค่า สมการที่ (3.27) ก็จะสามารถแก้สมการหาค่าของสนามความเร็วได้ แต่ค่าของสนามความดันและอัตราการไหลเชิงมวลนั้นยังไม่ทราบค่ามาก่อนและจะต้องได้มาจากส่วนหนึ่งของผลเฉลย ซึ่งมีสิ่งสำคัญที่เกี่ยวข้องกับเรื่องของการเก็บค่าความดันและการแปลงรูปเทอมเกรเดียนต์ของความดัน โดยทั่วไปการหาค่าของสนามความดันจะใช้แบบแผนตำแหน่งร่วม (co-located scheme) ซึ่งเป็นการเก็บค่าของความเร็วและความดันที่ศูนย์กลางเซลล์ แต่อย่างไรก็ตามสมการที่ (3.27) ต้องการค่าของความดันที่ผิวเซลล์ที่อยู่ระหว่างเซลล์ c_0 และ c_1 ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ดังนั้นจึงต้องการแบบแผนการประมาณค่าในช่วงสำหรับการคำนวณค่าความดันที่ผิวเซลล์จากค่าที่ศูนย์กลางเซลล์

โดยทั่วไปแบบแผนในการประมาณค่าในช่วงของความดันที่ผิวเซลล์ สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ในสมการโมเมนตัม มีสมการเป็น

$$p_f = \frac{\frac{p_{c0}}{a_{p,c0}} + \frac{p_{c1}}{a_{p,c1}}}{\frac{1}{a_{p,c0}} + \frac{1}{a_{p,c1}}} \quad (3.20)$$

สมการนี้ใช้ได้ผลดีสำหรับการเปลี่ยนแปลงความดันอย่างราบรื่น แต่หากการกระจายตัวของความดันเปลี่ยนแปลงไปมาก หรือเกิดพฤติกรรมความดันกระเพื่อม (pressure fluctuation) ซึ่งเรียกว่าปัญหากระดานหมากรุก (checker-board problem) การประมาณค่าโดยใช้วิธีตำแหน่งร่วมจะไม่เหมาะสม ซึ่งอาจแก้ไขโดยการเพิ่มจำนวนกริดเซลล์ให้มากขึ้นในบริเวณนั้น หรือใช้วิธีการวางตำแหน่งของกริดเซลล์สำหรับคำนวณความเร็วและความดันให้เหลื่อมกันซึ่งเรียกว่าระบบพิกัดแบบกริดเยื้อง (Staggered grid)

3.4.2 การแปลงรูปสมการความต่อเนื่อง

อินทิเกรตสมการความต่อเนื่องตลอดปริมาตรควบคุมดังรูปที่ 3.2 จะได้สมการแปลงรูปดังนี้

$$\sum_f^{N_{\text{faces}}} J_f A_f = 0 \quad (3.21)$$

เมื่อ $J_f = \rho u_n$ คือฟลักซ์ของมวลที่พุ่งผ่านผิว f โดยคำนวณจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าของความเร็วที่ผิว, \bar{u}_n กับค่าของความเร็วที่ศูนย์กลางเซลล์ และการประมาณค่าในช่วงของความเร็วที่ศูนย์กลางเซลล์ไปสู่ค่าที่ผิวเซลล์ในปัญหากระดานหมากรุกของความดัน จะมีวิธีการป้องกันการเกิดปัญหานี้โดยค่าของความเร็วที่ผิวจะไม่ได้คำนวณจากการเฉลี่ยแบบเชิงเส้น แต่จะทำการเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักโมเมนตัม (momentum-weighted averaging) ซึ่งตัวประกอบของการถ่วงน้ำหนัก จะมีพื้นฐานมาจากค่าสัมประสิทธิ์ a_p จากสมการที่ (3.22) ซึ่งค่า J_f จะคำนวณได้จากสมการ

$$J_f = \rho_f \frac{a_{p,c0} u_{n,c0} + a_{p,c1} u_{n,c1}}{a_{p,c0} + a_{p,c1}} + d_f \left((p_{c0} + (\bar{\nabla} p)_{c0} \cdot \bar{r}_0) - (p_{c1} + (\bar{\nabla} p)_{c1} \cdot \bar{r}_1) \right)$$

หรือ

$$J_f = \hat{J}_f + d_f (p_{c0} - p_{c1}) \quad (3.22)$$

เมื่อ p_{c0} , p_{c1} และ $u_{n,c0}$, $u_{n,c1}$ คือค่าของความดันที่เซลล์และค่าความเร็วตั้งฉาก ตามลำดับ โดยสังเกตได้ในรูปที่ 3.2 และค่า \hat{J}_f จะมีอิทธิพลต่อค่าความเร็วในเซลล์นี้ และเทอม d_f เป็นฟังก์ชันของ \bar{a}_p ซึ่งค่า \bar{a}_p คือการเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์ a_p ในสมการโมเมนตัม

3.4.3 การคู่ควบของความเร็วและความดัน

หากทราบค่าสนามความดัน สมการโมเมนตัมที่แปลงรูปแล้วในสมการที่ (3.27) สามารถนำมาใช้ในการหาสนามการไหลได้ และถ้าสนามความดันมีความถูกต้องผลเฉลยของสนามการไหลที่คำนวณได้ก็จะเป็นไปตามกฎการอนุรักษ์มวล แต่ถ้าหากไม่ทราบค่าสนามความดันก็จำเป็นต้องหาเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการคำนวณค่าสนามความดัน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้กระบวนการวิธีแบบ SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ขั้นตอนการเดาและการแก้ไขค่าในการคำนวณหาค่าความดัน ซึ่งในวิธีนี้จะเริ่มจากการเดาสนามความดัน ทำการหาค่าตอบของสมการโมเมนตัมและสมการค่าแก้ของสนามความดันที่แปลงมาจากสมการความต่อเนื่อง เมื่อได้ค่าแก้ดังกล่าวแล้วนำมาปรับปรุงค่าของสนามความดันและสนามความเร็วได้ นำสนามความเร็วและสนามความดันที่ได้ใหม่นั้นไปใช้ในการป้อนเข้าในสมการโมเมนตัมและสมการค่าแก้ของความดันอีก และเมื่อทำซ้ำจนกระทั่งคำตอบทั้งหมดลู่เข้าก็จะได้สนามความเร็วและสนามความดันที่เป็นไปตามกฎการเคลื่อนย้ายโมเมนตัมและกฎการอนุรักษ์มวล

กระบวนการวิธีแบบ SIMPLE นั้น เริ่มต้นจากการเดาค่าสนามความดัน p^* ตลอดทั้งโดเมนการไหล จากนั้นจะทำการหาค่าฟลักซ์ที่ผิว J_f^* จากสมการที่ (3.30) ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$J_f^* = \hat{J}_f^* + d_f(p_{c0}^* - p_{c1}^*) \quad (3.23)$$

ซึ่งหากไม่สอดคล้องกับสมการความต่อเนื่อง จะดำเนินการแก้ไขโดยการนิยามเทอม J_f' ซึ่งเป็นผลต่างระหว่างค่าฟลักซ์ที่ผิวที่ถูกต้องกับค่าฟลักซ์ที่ผิวที่เดาขึ้น ดังนี้

$$J_f = J_f^* + J_f' \quad (3.24)$$

เพื่อให้สอดคล้องกับสมการความต่อเนื่อง วิธีแบบ SIMPLE จะตั้งสมมติฐานของเทอม J_f' ในรูปของ

$$J_f' = d_f(p'_{c0} - p'_{c1}) \quad (3.25)$$

เมื่อค่า p' คือค่าแก้ของความดัน

วิธีแบบ SIMPLE จะแทนค่าของสมการที่ (3.32) และ (3.33) ลงในสมการของความต่อเนื่องที่แปลงรูปแล้วคือสมการที่ (3.29) ซึ่งจะนำไปสู่สมการแปลงรูปของค่า p' ในเซลล์ ดังสมการ

$$a_p p' = \sum_{nb} a_{nb} p'_{nb} + b \quad (3.26)$$

เมื่อเทอมของแหล่งกำเนิด b คืออัตราการไหลสุทธิเข้าสู่เซลล์ แสดงได้ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$b = \sum_f^{N_{faces}} J_f^* A_f \quad (3.27)$$

สมการค่าแก้ของความดัน (p') ดังในสมการที่ (3.34) สามารถแก้สมการได้โดยใช้วิธี ระเบียบวิธีการทำซ้ำ และเมื่อได้ค่าของผลเฉลยแล้วค่าความดันของเซลล์และฟลักซ์ที่ผิวเซลล์ที่ถูกต้องคือ

$$p = p^* + \alpha_p p' \quad (3.28)$$

$$J_f = J_f^* + d_f (p'_{c0} - p'_{c1}) \quad (3.29)$$

โดยที่ค่า α_p คือตัวประกอบภายใต้การผ่อนคลาย (under-relaxation) สำหรับความดัน

3.5 การไหลแบบปั่นป่วนและอิทธิพลของความปั่นป่วนในสมการนาเวียร์-สโตกส์

สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนนั้นค่าเลขเรย์โนลด์ของการไหลจะเป็นตัวชี้วัด จากการทดลองพบว่าที่เลขเรย์โนลด์ต่ำกว่าค่าวิกฤติ การไหลแต่ละชั้นของของไหลจะเป็นการไหลแบบราบเรียบ ที่ค่าเลขเรย์โนลด์เกินค่าวิกฤติจะเกิดปรากฏการณ์ที่ซับซ้อนขึ้นหลายอย่าง ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะจำเพาะของการไหลไปอย่างมาก เป็นการไหลไร้ระเบียบและยุ่งเหยิง การเคลื่อนที่ของของไหลเป็นแบบไม่คงตัวตลอดเวลาถึงแม้ว่าจะมีเงื่อนไขขอบเขตคงที่ก็ตาม ค่าและทิศทางของความเร็ว รวมทั้งคุณสมบัติอื่นๆ ของการไหลจะเปลี่ยนแปลงอย่างยุ่งเหยิง ซึ่งกลายเป็นการไหลแบบปั่นป่วนนั่นเอง ความยุ่งเหยิงดังกล่าวนี้เป็นผลให้ไม่สามารถคำนวณหาหรืออธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาคของของไหลได้

นอกจากนี้การไหลแบบปั่นป่วนนั้นจะเกิดการหมุนวนขนาดเล็กโดยมีขนาดที่แตกต่างกัน เช่น สำหรับการไหลขนาด 0.1m^2 ที่มีค่าเลขเรย์โนลด์สูงๆ จะมีการหมุนวนตั้งแต่ขนาด 10 จนถึง 100 μm ซึ่งหากต้องการจำลองการไหลโดยวิธีเชิงตัวเลขที่ละเอียดเพียงพอนั้น จะต้องสร้างปริมาตรควบคุมจำนวนมาก (ในช่วง 10^9 ถึง 10^{12}) และความถี่ของความแปรเปลี่ยนสูงสุดจะอยู่ในย่าน 10 kHz ซึ่งต้องใช้คาบเวลาการคำนวณในช่วง 100 μs การจำลองปรากฏการณ์ของความปั่นป่วนแบบที่ขึ้นกับเวลาโดยตรงนั้นต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่มีความสามารถสูงมาก

หากทำการวัดค่าของความเร็วที่จุดใดจุดหนึ่งตลอดเวลาที่ยาวนานพอสมควร ในสนามการไหลปั่นป่วน ค่าของความเร็วสามารถเขียนได้เป็น

$$u_i = U_i + u'_i \quad (3.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ U_i คือค่าความเร็วเฉลี่ย และค่า u'_i คือความเร็วที่ผันแปรหรือแกว่งไปมา ($i=1,2,3$) ในทำนองเดียวกันสำหรับความดันและปริมาณสเกลาร์อื่นๆ สามารถเขียนได้เป็น

$$\varphi = \Phi + \varphi' \quad (3.31)$$

โดยที่ φ แสดงถึงปริมาณสเกลาร์ เช่น ความดัน และพลังงาน

ค่า Φ คือค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติ φ ใดๆ ของของไหลและมีความสัมพันธ์ตามสมการ

$$\Phi = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \varphi(t) dt \quad (3.32)$$

Δt คือช่วงเวลาที่กว้างมากเพียงพอที่ครอบคลุมค่าความแปรเปลี่ยนที่ช้าที่สุดของคุณสมบัติการไหลนั้น(อันเนื่องมาจากการหมุนวนที่ใหญ่ที่สุด)

ค่าคุณสมบัติ φ ของการไหลที่แปรเปลี่ยนไปตามเวลานั้น สามารถแสดงเป็นผลบวกของค่าเฉลี่ย Φ กับค่าของความผันแปรที่ขึ้นกับเวลา (φ') ซึ่งค่าเฉลี่ยของความผันแปรนี้จะเท่ากับศูนย์ ดังนั้น

$$\overline{\varphi'} = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \varphi'(t) dt = 0 \quad (3.33)$$

แทนค่าสมการที่ (3.45) และ (3.46) ลงในสมการความต่อเนื่องและสมการนาเวียร์-สโตกส์ หลังจากนั้นทำการเฉลี่ยตลอดทั้งสมการ โดยประยุกต์ใช้ร่วมกับสมการที่ (3.47) และ (3.48) จะได้สมการควบคุมสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\overline{U_i}) = 0 \quad (3.34)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \overline{U_i U_j}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \overline{U_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{U_j}}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (3.35)$$

เรียกกลุ่มสมการที่ (3.49) และ (3.50) นี้ว่าสมการนาเวียร์-สโตกส์เรย์โนลด์เฉลี่ย (Reynolds-averaged Navier-Stokes, RANS) หรือเรียกสมการที่ (3.50) ว่าสมการเรย์โนลด์ สังเกตได้ว่าสมการเรย์โนลด์นี้มีลักษณะเช่นเดียวกับสมการนาเวียร์-สโตกส์ แต่ผลของการเฉลี่ยนั้นทำให้เกิดพจน์ใหม่คือ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\frac{\partial}{\partial x_j}(-\overline{\rho u_i' u_j'})$ ซึ่งมีความหมายถึงการเคลื่อนย้ายหรือถ่ายโอนโมเมนตัม อันเนื่องมาจากความเร็วผันแปรนั้น โดยทั่วไปจะจัดเทอมนี้ไว้ด้านขวาของสมการเพื่อแสดงให้เห็นว่าเป็นความเค้นอันเนื่องมาจากความปั่นป่วน ซึ่งเทอม $-\overline{\rho u_i' u_j'}$ คือความเค้นอันเนื่องมาจากความปั่นป่วนและเรียกว่าความเค้นเรย์โนลด์ (Reynolds stress) การไหลปั่นป่วนโดยทั่วไปนั้นค่าความเค้นอันเนื่องมาจากความปั่นป่วนนี้จะมีค่าสูงกว่าความเค้นเนื่องจากความหนืดของของไหลอย่างมาก

สำหรับสมการ RANS นั้นพบว่าไม่สามารถแก้สมการหาคำตอบได้ ในทางวิศวกรรมนั้น โดยทั่วไปจะให้ความสนใจกับค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติต่างๆ ของการไหลและของไหล และด้วยความซับซ้อนของความปั่นป่วนนั้น จะไม่พบสมการอย่างง่ายที่ใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าว ดังนั้นสมการของแบบจำลองความปั่นป่วน จึงมีบทบาทสำคัญซึ่งเกี่ยวข้องกับการพัฒนาวิธีในการคำนวณ เพื่อให้มีความถูกต้องในระดับที่เพียงพอและครอบคลุมปัญหาความปั่นป่วนโดยทั่วไปได้

แบบจำลองการไหลปั่นป่วนที่จะนำมาใช้วิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับงานวิจัยนี้ ถูกพัฒนาขึ้นจากสมมติฐานว่า อิทธิพลของความเค้นเรย์โนลด์ที่มีต่อการถ่ายเทโมเมนตัมในการไหลเฉื่อยนั้น คล้ายกับความเค้นอันเนื่องมาจากความหนืด ซึ่งเป็นสัดส่วนกับอัตราการเสียรูปของชิ้นส่วนของของไหลสำหรับของไหลแบบนิวโทเนียนและอัดไม่ได้ จะได้ว่า

$$\tau_{ij} = \mu s_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.36)$$

อัตราการเสียรูปของชิ้นส่วนของของไหลประกอบด้วย ค่าเฉลี่ยและค่าผันแปรของการเสียรูป แสดงได้ดังสมการ $s_{ij}(t) = S_{ij} + s'_{ij}$ จากการทดลองพบว่าความปั่นป่วนมีการสลายตัวไปหากไม่มีแรงเฉือน และพบว่าค่าของความเค้นเรย์โนลด์จะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการเฉือนของการไหลเพิ่มขึ้น ดังนั้น Boussinesq จึงได้เสนอสมมติฐานไว้ในปี 1877 ว่าปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u_i' u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (3.37)$$

โดยที่ μ_t คือค่าความหนืดที่เกิดจากความปั่นป่วน(turbulent viscosity) และค่า k คือพลังงานจลน์ต่อหน่วยมวลซึ่งมีสมการเป็น $k = 0.5(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$ และค่า δ_{ij} เรียกว่าโคเรนเคเกอร์เดลต้า (Kronecker delta, $\delta_{ij} = 1$ เมื่อ $i = j$ และ $\delta_{ij} = 0$ เมื่อ $i \neq j$) จากสมมติฐานของ Boussinesq นี้ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้สำหรับแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ $k-\epsilon$ และแบบ $k-\omega$ ซึ่งเป็นพื้นฐานของแบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ และมีข้อดีคือใช้ทรัพยากรทางคอมพิวเตอร์ไม่สูงนักสำหรับการคำนวณหาค่า μ_t

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า μ_t นั้นเป็นฟังก์ชันของค่า k และ ε โดยที่แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ $k-\varepsilon$ นี้มีการสร้างสมการการเคลื่อนย้ายเพิ่มขึ้นไปอีก 2 สมการ คือสมการของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน(k) และสมการของอัตราการสลายตัวของพลังงานความปั่นป่วนนั้น(ε) โดยพิจารณาว่าสนามการไหลได้ก่อให้เกิดการเคลื่อนย้ายของการหมุนวนผ่านกระบวนการการพา การแพร่ อีกทั้งมีการสร้างใหม่ อันเนื่องมาจากการเฉือนของกระแสการไหลหลักและการสลายตัว โดยแบบจำลองนี้ตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ว่าค่าของความหนืดปั่นป่วนนั้นเป็นแบบไอโซโทรปิก(isotropic) หรือกล่าวได้ว่าอัตราส่วนระหว่างความเค้นเรย์โนลด์ กับอัตราการเสียรูปของก้อนของไหลมีค่าเท่ากันไม่ว่าจะมองในทิศทางใด ซึ่งสมมุติฐานนี้อาจไม่ถูกต้องนักสำหรับการไหลหลายรูปแบบ จึงเป็นผลให้การจำลองมีความคลาดเคลื่อนเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง

เพื่อนำไปสู่ความเข้าใจโดยรวมของแบบจำลองการไหลปั่นป่วนที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ในส่วนถัดไปจะกล่าวถึงลักษณะทั่วไปของการไหลในบริเวณที่ใกล้กับผนัง

3.6 การไหลแบบปั่นป่วนที่มีผนังเป็นขอบเขต

แบบจำลองความปั่นป่วนที่ได้นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ ประกอบไปด้วยแบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k-\varepsilon$ และ SST $k-\omega$ ซึ่งเป็นแบบจำลองที่อยู่ในกลุ่ม $k-\varepsilon$ และ $k-\omega$ ตามลำดับ ดังนั้นในส่วนถัดไปจะกล่าวถึงแบบจำลองในกลุ่ม $k-\varepsilon$ และกลุ่ม $k-\omega$ เพื่อนำไปสู่ความเข้าใจและเห็นภาพโดยรวมของแบบจำลองความปั่นป่วนเหล่านี้

3.7 แบบจำลองความปั่นป่วน $k-\varepsilon$

แบบจำลอง RNG $k-\varepsilon$ ซึ่งได้ถูกปรับปรุงมาจากแบบจำลองความปั่นป่วน $k-\varepsilon$ มาตรฐาน ในหัวข้อถัดไปจะกล่าวถึงแบบจำลองความปั่นป่วน $k-\varepsilon$ มาตรฐาน โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.7.1 แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ $k-\varepsilon$ มาตรฐาน

แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ $k-\varepsilon$ มาตรฐานเป็นแบบจำลองที่สมบูรณ์และมีรูปแบบที่ง่ายที่สุดของแบบจำลองความปั่นป่วนที่มี 2 สมการ แบบจำลองนี้ได้พัฒนาขึ้นร่วมกับผลการทดลองโดยมีสมมุติฐานว่า เป็นการไหลแบบปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์(การไหลที่เลขเรย์โนลด์สูง) และไม่พิจารณาอิทธิพลของความหนืดเชิงโมเลกุล ดังนั้นจึงมีความถูกต้องเพียงสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์เท่านั้น โดยทั่วไปสามารถสร้างสมการการเคลื่อนย้ายของคุณสมบัติทางด้านความปั่นป่วนได้ แม้กระทั่งอัตราการสูญเสียของพลังงานจลน์ปั่นป่วน(ε) แต่สมการการเคลื่อนย้ายของ ε นี้ขึ้นอยู่กับตัวแปรไม่ทราบค่าจำนวนมากและไม่สามารถวัดค่าได้ แบบจำลอง $k-\varepsilon$ แบบมาตรฐานจะมีสมการการเคลื่อนย้ายของพารามิเตอร์ 2 ตัว คือ k และ ε ซึ่งพัฒนามาจากพื้นฐานความรู้ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการที่ทำให้เกิดความเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เหล่านี้

สมการการเคลื่อนย้ายสำหรับ k และ ε ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (3.38)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.39)$$

สมการที่ (3.58) และ (3.59) สามารถเขียนได้ในรูปทั่วไปคือ

การเคลื่อนย้ายของ k (หรือ ε) โดยการพา = การเคลื่อนย้ายของ k (หรือ ε) โดยการแพร่ + อัตราการสร้าง k (หรือ ε) + อัตราการทำลาย k (หรือ ε)

โดยที่ G_k คือเทอมที่แสดงถึงการสร้างพลังงานจลน์ปั่นป่วน ซึ่งเทอมนี้มีนิยามโดย

$$G_k = -\rho u'_i u'_j \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \quad (3.40)$$

การหาค่า G_k ในรูปแบบที่สอดคล้องกับสมมติฐานของ Boussinesq คือ

$$G_k = \mu_t S^2 \quad (3.41)$$

เมื่อค่า S คือค่าเทนเซอร์ของอัตราการเสียรูปเฉลี่ย และมีนิยามเป็น

$$S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (3.42)$$

โดยที่

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \quad (3.43)$$

ค่า σ_k และ σ_ε คือเลขพรานด์ของความปั่นป่วน (turbulent Prandtl numbers) สำหรับค่า k และ ε ตามลำดับ ซึ่งถูกกำหนดให้เป็นค่าคงที่สำหรับแบบจำลอง k - ε แบบมาตรฐาน ค่า μ_t มีสมการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.44)$$

ค่า C_μ เป็นค่าตัวแปรไร้มิติซึ่งเป็นค่าคงที่ และในสมการ (3.58) และ (3.59) มีค่าคงที่ดังนี้

$$C_\mu = 0.09; \sigma_k = 1.00; \sigma_\varepsilon = 1.30; C_{1\varepsilon} = 1.44 \text{ และ } C_{2\varepsilon} = 1.92$$

ถึงแม้ว่าแบบจำลอง $k-\varepsilon$ มาตรฐาน จะได้รับความนิยมอย่างมากในการนำไปใช้ในเชิงอุตสาหกรรมแต่ก็มีข้อจำกัดของการใช้งานอยู่พอสมควร แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ $k-\varepsilon$ มาตรฐาน ให้ผลการจำลองที่ไม่ดีในลักษณะการไหลดังต่อไปนี้

1. การไหลที่ไม่มีขอบเขตแน่นอนบางแบบ
2. การไหลที่มีความเครียดสูงมากๆ (ชั้นขีดผิวที่มีความโค้งมากๆ และการไหลเป็นเกลียว)
3. การไหลแบบหมุนวน
4. การไหลที่มีการพัฒนาอย่างสมบูรณ์ในท่อที่มีหน้าตัดไม่เป็นวงกลม

จะเห็นได้ว่าแบบจำลองความปั่นป่วน $k-\varepsilon$ นั้นมีข้อเสียซึ่งอาจจะไม่เหมาะสมกับการไหลเป็นเกลียวและการไหลที่มีการพัฒนาอย่างสมบูรณ์ในท่อที่มีหน้าตัดไม่เป็นวงกลม ซึ่งเป็นลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นในงานวิจัยนี้

และเนื่องจากในปัจจุบันมีการพัฒนาแบบจำลองสำหรับการไหลปั่นป่วนขึ้นมาหลายแบบจำลอง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้สามารถใช้งานได้กับการไหลหลายลักษณะ ซึ่งขึ้นอยู่กับพื้นฐานของการไหลที่ได้พัฒนาแบบจำลองขึ้น และเมื่อย้อนกลับไปพิจารณาเนื้อหาในบทที่ 2 ที่ได้กล่าวถึงวรรณกรรมปริทรรศน์ ซึ่งมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้แบบจำลองความปั่นป่วนสำหรับการวิเคราะห์การไหลและการถ่ายเทความร้อนของกรณีการไหลผ่านครีบบรูแบบต่างๆ โดยพบว่ามี 2 แบบจำลองที่อยู่ในความสนใจของนักวิจัย เนื่องจากมีความเหมาะสมและเป็นที่ยอมรับใช้กันอยู่ในปัจจุบันคือแบบจำลอง RNG $k-\varepsilon$ และ SST $k-\omega$ โดยที่ทั้งสองแบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองที่ได้มีการปรับปรุงขึ้นจากแบบจำลอง $k-\varepsilon$ มาตรฐาน ดังนั้นในส่วนถัดไปจะได้นำเสนอรายละเอียดของแบบจำลองดังกล่าวนี้

3.7.2 แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k-\varepsilon$

แบบจำลอง RNG $k-\varepsilon$ เป็นแบบจำลองที่พัฒนามาจากการใช้วิธีเชิงสถิติอย่างแม่นยำ (ซึ่งเรียกว่าทฤษฎี Renormalization group, RNG) ซึ่งคล้ายกับแบบจำลอง $k-\varepsilon$ มาตรฐาน แต่ได้เพิ่มเติมเทอมต่างๆ เข้าไป ดังต่อไปนี้

- (1) ทฤษฎี RNG ให้สมการสำหรับการวิเคราะห์เลขพราวน์ของความปั่นป่วน ในขณะที่

แบบจำลอง $k-\varepsilon$ มาตรฐานจะใช้วิธีระบุเป็นค่าคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (2) แบบจำลอง RNG นั้นได้รวมอิทธิพลของการหมุนวน (rotation หรือ swirl) ต่อการไหลปั่นป่วน และเพิ่มความแม่นยำสำหรับการไหลหมุนวน
- (3) แบบจำลอง RNG ได้เพิ่มพจน์เข้าไปในสมการ ε ซึ่งมีส่วนสำคัญในการปรับปรุงความแม่นยำสำหรับการไหลที่เกิดความเครียดอย่างรวดเร็ว
- (4) ในขณะที่แบบจำลอง $k-\varepsilon$ มาตรฐานเป็นแบบจำลองสำหรับเลขเรย์โนลด์สูง แต่ทฤษฎี RNG ให้สมการการวิเคราะห์ในรูปสมการอนุพันธ์สำหรับค่าความหนืดยังผล (μ_{eff}) ที่ใช้ในการคำนวณสำหรับอิทธิพลของเลขเรย์โนลด์ต่ำ ซึ่งผลของการคำนวณในลักษณะนี้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของการจำลองการไหลที่ใกล้กับผนัง

จากลักษณะดังกล่าวข้างต้นทำให้แบบจำลอง RNG $k-\varepsilon$ มีความแม่นยำและน่าเชื่อถือได้สำหรับการนำไปใช้วิเคราะห์การไหลที่หลากหลายมากกว่าแบบจำลอง $k-\varepsilon$ มาตรฐาน สมการการเคลื่อนย้ายของแบบจำลอง RNG $k-\varepsilon$ สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (3.45)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon \quad (3.46)$$

ค่าความหนืดยังผล (μ_{eff}) โดยทั่วไปมีสมการเป็น

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (3.47)$$

ค่า α_k และ α_ε คือเลขพรานด์ยังผลผกผัน (inverse effective Prandtl numbers) สำหรับค่า k และ ε ตามลำดับ ซึ่งถูกคำนวณจากสมการที่ได้พัฒนาขึ้นมาจากทฤษฎี RNG ดังนี้

$$\left| \frac{\alpha - 1.3929}{\alpha_0 - 1.3929} \right|^{0.6321} \left| \frac{\alpha + 2.3929}{\alpha_0 + 2.3929} \right|^{0.3679} = \frac{\mu}{\mu_{eff}} \quad (3.48)$$

เมื่อค่า $\alpha_0 = 1.0$ สำหรับการไหลที่เลขเรย์โนลด์สูง ($\mu / \mu_{eff} \ll 1$) ผลจากการคำนวณพบว่า $\alpha_k = \alpha_\varepsilon \approx 1.393$

ความแตกต่างที่สำคัญของแบบจำลอง RNG กับแบบจำลอง $k-\varepsilon$ มาตรฐาน ก็คือการเพิ่มค่า R_ε เข้าไปในสมการ ε ซึ่งกำหนดโดย

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta / \eta_0) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} k \quad (3.49)$$

เมื่อ $\eta = Sk / \varepsilon$, $\eta_0 = 4.38$ และ $\beta = 0.012$

อิทธิพลของ R_ε ของสมการ ε ในแบบจำลอง RNG สามารถเห็นได้ชัดเจนขึ้นเมื่อจัดรูปสมการที่ (3.66) ใหม่ โดยการแทนค่าจากสมการที่ (3.69) ลงในสมการที่ (3.66) จะได้

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon}^* \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.50)$$

$$\text{เมื่อ} \quad C_{2\varepsilon}^* = C_{2\varepsilon} + \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta / \eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \quad (3.51)$$

ในบริเวณที่อยู่ในช่วงของการไหลแบบปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์ ($\eta < \eta_0$) ค่า $C_{2\varepsilon}^* > C_{2\varepsilon}$ เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลอง $k-\varepsilon$ มาตรฐาน จากผลที่ได้ทำให้การทำลายค่า ε เพิ่มขึ้น ค่า ε จึงลดลง และส่งผลให้ค่า k เพิ่มขึ้น ดังนั้นสำหรับการไหลที่มีความเครียดเฉือนน้อยถึงปานกลาง แบบจำลอง RNG จะให้ค่าความหนืดปั่นป่วนที่มีแนวโน้มมากกว่าแบบจำลอง $k-\varepsilon$ มาตรฐาน

สำหรับในบริเวณที่มีอัตราความเครียดสูง ($\eta > \eta_0$) จะส่งผลให้ค่า $C_{2\varepsilon}^* < C_{2\varepsilon}$ เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลอง $k-\varepsilon$ มาตรฐาน การทำลายที่น้อยลงของค่า ε จะทำให้ค่า ε เพิ่มขึ้น และส่งผลให้ค่า k ลดลง ซึ่งทำให้การไหลจะได้รับอิทธิพลจากความหนืดของของไหล ดังนั้นการไหลที่มีความเครียดเฉือนอย่างรวดเร็ว แบบจำลอง RNG จะให้ค่าความหนืดปั่นป่วนต่ำกว่าค่าในแบบจำลอง $k-\varepsilon$ มาตรฐาน ดังนั้น แบบจำลอง RNG จะตอบสนองต่ออิทธิพลของความเครียดเฉือนและความโค้งของเส้นกระแสมากกว่าแบบจำลอง $k-\varepsilon$ มาตรฐาน

ทฤษฎี RNG ให้สมการเชิงอนุพันธ์สำหรับการวิเคราะห์ความหนืดอันเนื่องมาจากความปั่นป่วน (turbulent viscosity) ดังนี้

$$d \left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\varepsilon \mu}} \right) = 1.72 \frac{\hat{\nu}}{\sqrt{\hat{\nu}^3 - 1 + C_\nu}} d\hat{\nu} \quad (3.52)$$

เมื่อ $\hat{\nu} = \mu_{eff} / \mu$ และ $C_\nu \approx 100$

เมื่ออินทิเกรตสมการที่ (3.72) จะได้ค่าที่แม่นยำของการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนย้าย ที่เกิดจากอิทธิพลของความปั่นป่วนกับอิทธิพลของเลขเรย์โนลด์ (หรือในระดับการหมุนวนขนาดเล็ก) ซึ่งแบบจำลองนี้จะให้ผลการวิเคราะห์ที่ดีสำหรับการไหลที่เลขเรย์โนลด์ต่ำในบริเวณใกล้กับผนัง

ในกรณีการไหลที่เลขเรย์โนลด์สูง สมการที่ (3.72) จะเปลี่ยนไปเป็น

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.53)$$

โดยที่ค่า $C_\mu = 0.0875$ ซึ่งค่านี้ได้มาจากทฤษฎี RNG และมีข้อสังเกตที่น่าสนใจว่าค่า C_μ นี้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงทดลองที่มีค่า $C_\mu = 0.09$ ในสมการแบบจำลอง $k-\varepsilon$ มาตรฐาน โดยทั่วไปแล้วอิทธิพลเนื่องจากความหนืดปั่นป่วนนั้นจะถูกคำนวณโดยใช้การคำนวณในกรณีเลขเรย์โนลด์สูงในสมการที่ (3.73) อย่างไรก็ตามเมื่อต้องการรวมอิทธิพลของการไหลที่เลขเรย์โนลด์ต่ำ แบบจำลอง RNG จะมีทางเลือกที่สามารถใช้ได้โดยคำนวณจากความสัมพันธ์ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ดังได้แสดงในสมการที่ (3.72)

ค่าคงที่ในสมการของแบบจำลอง RNG แสดงได้ดังนี้

$$C_{1\varepsilon} = 1.42; \quad C_{2\varepsilon} = 1.68$$

3.7.3 แบบจำลองความปั่นป่วน Realizable $k-\varepsilon$

แบบจำลอง Realizable $k-\varepsilon$ แตกต่างจากแบบจำลอง $k-\varepsilon$ มาตรฐาน 2 ข้อคือ

- (1) แบบจำลอง Realizable $k-\varepsilon$ มีการกำหนดทางเลือกสำหรับความหนืดปั่นป่วน
- (2) ปรับปรุงสมการเคลื่อนย้ายสำหรับการกระจายของ ε ซึ่งได้มาจากสมการผลเฉลยแม่นยำสำหรับการเคลื่อนย้ายของการผันแปรความเร็วเฉลี่ย

คำว่า 'Realizable' หมายความว่าแบบจำลองที่เป็นไปตามข้อจำกัดบางข้อในทางคณิตศาสตร์บน Reynolds stresses ซึ่งสอดคล้องกับฟิสิกส์ของการไหลปั่นป่วน

เพื่อเข้าใจถึงหลักคณิตศาสตร์ซึ่งเป็นพื้นฐานของแบบจำลอง Realizable $k-\varepsilon$ จะพิจารณาการรวมความสัมพันธ์ Boussinesq และนิยามของความหนืดไหลวนในสมการ (3.64) ต่อไปนี้สำหรับของไหลที่อัดตัวไม่ได้

$$\overline{u^2} = \frac{2}{3} k - 2\nu_t \frac{\partial U}{\partial x} \quad (3.54)$$

การใช้สมการ (3.73) สำหรับ $\nu_t \equiv \mu_t/\rho$ จะได้ผลลัพธ์ซึ่งอยู่ในรูปของ normal stress, $\overline{u^2}$, ซึ่งโดยความหมายแล้วจะทำให้ปริมาณบวกกลายเป็นปริมาณลบ นั่นคือ "non-realizable" เมื่อแรงดึงมีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะให้การตอบสนอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{k}{\omega} \frac{\partial U}{\partial x} > \frac{1}{3C_\mu} \approx 3.7 \quad (3.55)$$

ในการทำงานเดียวกันก็ยิ่งแสดงให้เห็นว่าความไม่เท่ากันของ Schwarz สำหรับ shear stresses $\overline{u_\alpha u_\beta^2} \leq \overline{u_\alpha^2 u_\beta^2}$ มีผลบวกไม่เกิน α และ β และสามารถใช้ได้เมื่ออัตราความเครียดเฉลี่ยมีขนาดใหญ่ วิธีการที่ง่ายที่สุดเพื่อให้สามารถเข้าใจได้ (ค่าบวกของ normal stresses และ Schwarz มีความไม่เท่ากันของความเค้นเฉือน) คือการทำให้ตัวแปร C_μ ให้อัตราการไหลเฉลี่ย (การเสีรูปร่างเฉลี่ย) และความปั่นป่วน (k, ϵ) ความคิดของตัวแปร C_μ ถูกนำเสนอโดยการสร้างแบบจำลองจำนวนมากรวมทั้ง เรย์โนลด์ส์ และมีการพิสูจน์อย่างละเอียดจากการทดลอง ตัวอย่างเช่น พบว่า C_μ จะอยู่ที่ประมาณ 0.09 ในชั้นลอการิทึมของความสมดุลของชั้นบาวตารี และ 0.05 ในการไหลเฉือนซึ่งมีคุณสมบัติที่เหมือนกัน

ทั้งแบบจำลอง Realizable และแบบจำลอง RNG $k-\epsilon$ ได้แสดงให้เห็นการปรับปรุงที่สำคัญมากกว่าแบบจำลอง $k-\epsilon$ มาตรฐาน เมื่อลักษณะการไหลรวมถึงความโค้งของกระแสการไหลที่รุนแรง การไหลวน และการหมุน เนื่องจากรูปแบบนี้ยังค่อนข้างใหม่ซึ่งยังไม่ชัดเจนในความถูกต้องเหมือนกรณีของแบบจำลอง Realizable $k-\epsilon$ แต่มีประสิทธิภาพดีกว่าแบบจำลอง RNG อย่างไรก็ตามการศึกษาเริ่มต้นแสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง Realizable ให้ประสิทธิภาพการทำงานที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับแบบจำลอง C_μ ทั้งหมด ด้วยการตรวจสอบการแยกกันของกระแสการไหลและการไหลที่ซับซ้อน

แบบจำลอง Realizable $k-\epsilon$ ถูกนำเสนอโดย Shih et al. มีจุดมุ่งหมายเพื่อแก้ไขข้อบกพร่องของแบบจำลอง $k-\epsilon$ ดั้งเดิม โดยการนำเสนอรูปแบบต่อไปนี้

1. สูตรความหนืดหมุนวนแบบใหม่ที่เกี่ยวข้องกับตัวแปร C_μ ถูกนำเสนอโดยเรย์โนลด์ส์
2. สมการรูปแบบใหม่สำหรับการกระจาย (ϵ) ตามสมการไดนามิกของการผันผวนความเร็วเฉลี่ย

หนึ่งในข้อจำกัดของแบบจำลอง Realizable $k-\epsilon$ คือจะก่อให้เกิดความหนืดปั่นป่วนแบบ non-physical ในสถานการณ์เมื่อโดเมนการคำนวณมีทั้งการหมุนและการอยู่นิ่งของโซนการไหล เพราะนี่คือความจริงที่ว่าแบบจำลอง Realizable $k-\epsilon$ จะรวมผลกระทบของการหมุนเฉลี่ยในความหมายของความหนืดปั่นป่วนในสมการ (3.78) และ (3.80) ผลการหมุนนี้ได้ถูกตรวจสอบในระบบการเคลื่อนไหวในหนึ่งพิกัดและแสดงพฤติกรรมชัดเจนมากกว่าแบบจำลอง $k-\epsilon$ มาตรฐาน อย่างไรก็ตามเนื่องจากธรรมชาติของการปรับเปลี่ยนนี้ได้นำไปประยุกต์ใช้ในระบบอ้างอิงหลายพิกัด

สมการการเคลื่อนย้ายของแบบจำลอง Realizable $k-\epsilon$ สำหรับ k และ ϵ คือ

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b + \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (3.56)$$

และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (3.57)$$

เมื่อ

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$$

ในสมการเหล่านี้ G_k แสดงให้เห็นถึงการสร้างพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากการเค้นความเร็วเฉลี่ยที่คำนวณตามที่ได้อธิบายไว้ในการสร้างแบบจำลองการสร้างความปั่นป่วนในแบบจำลอง $k-\varepsilon$ ซึ่ง G_b คือพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากการลอยตัวซึ่งคำนวณตามที่ได้อธิบายไว้ในผลกระทบของการลอยตัวบนความปั่นป่วนในแบบจำลอง $k-\varepsilon$ ส่วน Y_m คือการเกี่ยวข้องของการขยายตัวผันผวนในการปั่นป่วนอัดตัวกับอัตราการกระจายซึ่งสามารถคำนวณได้ตามที่ได้อธิบายไว้ในผลกระทบของการอัดปั่นป่วนในแบบจำลอง $k-\varepsilon$ เมื่อ C_2 และ $C_{1\varepsilon}$ คือค่าคงที่ σ_k และ σ_ε คือเลขพรานด์ปั่นป่วนสำหรับ k และ ε ตามลำดับ S_k และ S_ε คือชอคเทอม

สมการ k ในสมการ (3.76) คือสมการเดียวกันในแบบจำลอง $k-\varepsilon$ มาตรฐานและแบบจำลอง RNG $k-\varepsilon$ ยกเว้นค่าคงที่ อย่างไรก็ตามรูปแบบของสมการ ε ค่อนข้างจะแตกต่างในแบบจำลองมาตรฐานเหล่านั้นและแบบจำลอง RNG พื้นฐานและ $k-\varepsilon$ หนึ่งในคุณสมบัติที่น่าสังเกตคือเทอมของการสร้างสมการ ε (เทอมที่สองทางด้านขวามือของสมการ 3.77) ไม่เกี่ยวข้องกับการสร้างค่า k นั่นคือมันไม่มีเทอม G_k ดังในแบบจำลอง $k-\varepsilon$ อื่นๆ เป็นที่เชื่อกันว่ารูปแบบที่ดีกว่าในปัจจุบันแสดงให้เห็นถึงการถ่ายโอนพลังงานสเปกตรัม อีกหนึ่งของคุณลักษณะที่เป็นที่น่าพอใจคือเทอมของการทำลาย (เทอมที่สามด้านขวามือของสมการ 3.77) ซึ่งไม่ได้มีความผิดปกติใดๆ ที่ตัวหารไม่เคยหายไปถึงแม้ว่า k จะหายไปหรือมีค่าน้อยกว่าศูนย์ คุณลักษณะนี้แตกต่างกับแบบจำลอง $k-\varepsilon$ ดั้งเดิม ซึ่งมีความเป็นลักษณะเฉพาะตัวเนื่องจากมี k เป็นตัวหาร

การสร้างแบบจำลองความหนืดปั่นป่วน

แบบจำลอง $k-\varepsilon$ อื่นๆ ความหนืดไหลวนจะคำนวณจาก

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.58)$$

ความแตกต่างระหว่างแบบจำลอง Realizable $k-\varepsilon$ และแบบจำลอง $k-\varepsilon$ มาตรฐานคือค่า C_μ จะไม่คงที่ ซึ่งคำนวณจาก

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{k u^*}{\varepsilon}} \quad (3.59)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

$$U^* \equiv \sqrt{S_{ij}S_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}} \quad (3.60)$$

และ

$$\begin{aligned} \tilde{\Omega}_{ij} &= \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk}\omega_k \\ \Omega_{ij} &= \overline{\Omega_{ij}} - \varepsilon_{ijk}\omega_k \end{aligned}$$

เมื่อ $\overline{\Omega_{ij}}$ คืออัตราการหมุนเฉลี่ยสำหรับการเคลื่อนที่ในพิกัดอ้างอิงกับความเร็วเร็วเชิงมุม ω_k โดยค่าคงที่ A_0 และ A_s กำหนดโดย

$$A_0 = 4.04, A_s = \sqrt{6} \cos \phi \quad (3.61)$$

เมื่อ

$$\phi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6}W), W = \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{S^3}, \tilde{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}}, S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (3.62)$$

จะเห็นได้ว่า C_μ เป็นฟังก์ชันของความเครียดเฉลี่ยและอัตราการหมุนซึ่งมีความเร็วเชิงมุมของระบบการหมุนและสนามความปั่นป่วน (k และ ε) และ C_μ ในสมการ (3.78) สามารถแสดงให้เห็นอีกครั้งว่ามีค่ามาตรฐานคือ 0.09 สำหรับเงื่อนไขขอบเขตในสมดุลชั้นบาวตารี

ค่าคงที่ C_2, σ_k และ σ_ε ได้ถูกกำหนดขึ้นเพื่อให้แน่ใจว่ารูปแบบของการไหลนั้นมีประสิทธิภาพ โดยมีค่าคงที่สำหรับแบบจำลองคือ

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, C_2 = 1.9, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.2$$

การสร้างความปั่นป่วนสำหรับแบบจำลอง $k-\varepsilon$

เทอม G_k แสดงถึงการสร้างพลังงานจลน์ปั่นป่วน เป็นรูปแบบเหมือนกันสำหรับมาตรฐาน RNG และแบบจำลอง Realizable $k-\varepsilon$ จากสมการแม่นยำสำหรับการเคลื่อนย้ายของ k เทอมนี้อาจจะถูกกำหนดเป็น

$$G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (3.63)$$

เพื่อประเมิน G_k ในลักษณะที่สอดคล้องกับสมมติฐาน Boussinesq

$$G_k = \mu_t S^2 \quad (3.64)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ S เป็นโมดูลัสของอัตราความเครียดเฉลี่ย กำหนดโดย

$$S \equiv \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (3.65)$$

3.8 แบบจำลองความปั่นป่วน $k-\omega$

แบบจำลองความปั่นป่วนในกลุ่มของ $k-\omega$ ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้คือแบบจำลอง SST $k-\omega$ ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ปรับปรุงมาจากแบบจำลอง $k-\omega$ มาตรฐาน ดังนั้นในหัวข้อถัดไปจะกล่าวถึงแบบจำลองความปั่นป่วน $k-\omega$ มาตรฐาน โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.8.1 แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ $k-\omega$ มาตรฐาน

แบบจำลอง $k-\omega$ มาตรฐานตั้งอยู่บนพื้นฐานของแบบจำลอง Wilcox $k-\omega$ ซึ่งถูกปรับปรุงให้สอดคล้องกับอิทธิพลของการไหลที่เลขเรย์โนลด์ต่ำ การไหลอัดได้ และการกระจายการไหลเฉือน แบบจำลอง Wilcox สามารถทำนายการไหลเฉือนอิสระ ชั้นการไหลผสม การไหลผ่านระนาบ การไหลรอบวัตถุ และลำการไหลในแนวรัศมี และยังสามารถประยุกต์ให้ใช้ได้กับการไหลที่มีผนังเป็นขอบเขต แบบจำลอง $k-\omega$ มาตรฐาน คือแบบจำลองเชิงทดลองมีพื้นฐานมาจากสมการการเคลื่อนย้ายของค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วน (k) และอัตราการสูญเสียสลายจำเพาะ (specific dissipation rate), ω ซึ่งพิจารณาได้ในรูปของ $\omega = \varepsilon/k$ นอกจากนี้แบบจำลอง $k-\omega$ ได้เพิ่มเทอมของการสร้างทั้งในสมการของ k และ ω เพื่อปรับปรุงความแม่นยำของแบบจำลองสำหรับการทำนายการไหลเฉือนอิสระ

ค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วน, k และอัตราการสูญเสียสลายจำเพาะ, ω คำนวณได้จากสมการการเคลื่อนย้ายของแบบจำลอง $k-\omega$ มาตรฐาน แสดงได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k \quad (3.66)$$

และ

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \omega U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega \quad (3.67)$$

ความหมายของแต่ละพจน์แสดงได้ดังนี้

(1) ค่า G_k คือเทอมที่แสดงถึงการสร้างพลังงานจลน์ปั่นป่วน ซึ่งเทอมนี้ใช้นิยามเดียวกันกับแบบจำลอง $k-\varepsilon$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2) ค่าการแพร่กระจายยังผล(effective diffusivities) มีสมการดังนี้

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (3.68)$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \quad (3.69)$$

เมื่อค่า σ_k และ σ_ω คือเลขพรานด์ของความปั่นป่วน (turbulent Prandtl numbers) สำหรับค่า k และ ω ตามลำดับซึ่งถูกกำหนดให้เป็นค่าคงที่ และค่าความหนืดปั่นป่วน, μ_t ถูกคำนวณโดยการรวมค่า k และ ω โดยมีสมการดังนี้

$$\mu_t = \alpha^* \frac{\rho k}{\omega} \quad (3.70)$$

สำหรับการแก้ปัญหาคาร์ไหลในช่วงเลขเรย์โนลด์ต่ำนั้น ค่าสัมประสิทธิ์ α^* จะไปหวนค่าความหนืดปั่นป่วนซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดความแม่นยำสำหรับการไหลในช่วงเลขเรย์โนลด์ต่ำ ค่า α^* มีสมการดังนี้

$$\alpha^* = \alpha_0^* \left(\frac{\alpha_0^* + Re_t / R_k}{1 + Re_t / R_k} \right) \quad (3.71)$$

เมื่อ

$$Re_t = \frac{\rho k}{\mu \omega} \quad (3.72)$$

$$R_k = 6 \quad (3.73)$$

$$\alpha_0^* = \frac{\beta_1}{3} \quad (3.74)$$

$$\beta_1 = 0.072 \quad (3.75)$$

สำหรับการไหลที่เลขเรย์โนลด์สูงนั้น แบบจำลอง $k-\omega$ จะใช้ค่า $\alpha^* = \alpha_\infty^* = 1.0$

(3) ค่า G_ω คือเทอมของการสร้างค่า ω ซึ่งแสดงโดย

$$G_\omega = \alpha \frac{\omega}{k} G_k \quad (3.76)$$

ในสมการที่ (3.96) นั้นค่า α กำหนดให้โดย

$$\alpha = \frac{\alpha_\infty}{\alpha^*} \left(\frac{\alpha^* + Re_t / R_\omega}{1 + Re_t / R_\omega} \right) \quad (3.77)$$

เมื่อค่า $R_\omega = 2.95$ และนอกจากนี้ค่า α^* และค่า Re_t หาค่าได้จากสมการ (3.91) และ (3.92) ตามลำดับ และสำหรับการไหลที่เลขเรย์โนลด์สูงนั้น แบบจำลอง $k-\omega$ จะใช้ค่า $\alpha = \alpha_\infty = 1.0$

(4) ค่าการสูญเสียสายของ k กำหนดโดย

$$Y_k = \rho \beta^* f_{\beta^*} k \omega \quad (3.78)$$

เมื่อ

$$f_{\beta^*} = \begin{cases} 1 & \chi_k \leq 0 \\ \frac{1 + 680 \chi_k^2}{1 + 400 \chi_k^2} & \chi_k > 0 \end{cases} \quad (3.78)$$

เมื่อ

$$\chi_k \equiv \frac{1}{\omega^3} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (3.80)$$

และ

$$\beta^* = \beta_i^* [1 + \zeta^* F(M_t)] \quad (3.81)$$

$$\beta_i^* = \beta_\infty^* \left(\frac{4/5 + (Re_t / R_\beta)^4}{1 + (Re_t / R_\beta)^4} \right) \quad (3.82)$$

$$\zeta^* = 1.5 \quad (3.83)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_\beta = 8 \quad (3.84)$$

$$\beta_\infty^* = 0.09 \quad (3.85)$$

โดยที่ค่า Re_τ กำหนดโดยสมการที่ (3.92)

(5) ค่าการสูญเสียของ ω กำหนดโดย

$$Y_\omega = \rho \beta f_\beta \omega^2 \quad (3.86)$$

เมื่อ

$$f_\beta = \frac{1 + 70 \chi_\omega}{1 + 80 \chi_\omega} \quad (3.87)$$

$$\chi_\omega = \frac{|\Omega_{ij} \Omega_{jk} S_{ki}|}{(\beta_\infty^* \omega)^3} \quad (3.88)$$

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.89)$$

เทนเซอร์ของอัตราความเครียด S_{ij} กำหนดโดยสมการที่ (3.63) และ

$$\beta = \beta_i \left[1 - \frac{\beta_i^*}{\beta_i} \zeta^* F(M_i) \right] \quad (3.90)$$

β_i^* ได้แสดงไว้ในสมการ (3.102) และค่า $F(M_i)$ คือฟังก์ชันของการอัดได้ มีสมการเป็น

$$F(M_i) = \begin{cases} 0 & M_i \leq M_{i0} \\ M_i^2 - M_{i0}^2 & M_i > M_{i0} \end{cases} \quad (3.91)$$

$$M_i^2 = 2 \frac{k}{a^2} \quad (3.92)$$

$$M_{i0} = 0.25 \quad (3.93)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$a = \sqrt{\gamma RT} \quad (3.94)$$

สำหรับการไหลที่เลขเรย์โนลด์สูงนั้น แบบจำลอง $k-\omega$ จะใช้ค่า $\beta_i^* = \beta_\infty^*$ และสำหรับการไหลอัดไม่ได้นั้นค่า $\beta^* = \beta_i^*$

(6) ค่าคงที่ต่างๆ ในแบบจำลอง $k-\omega$ มาตรฐาน มีดังนี้

$$\alpha_\infty^* = 1, \quad \alpha_\infty = 0.52, \quad \alpha_0 = 1/9, \quad \beta_\infty^* = 0.09, \quad \beta_i = 0.072, \quad R_\beta = 8$$

$$R_k = 6, \quad R_\omega = 2.95, \quad \zeta^* = 1.5, \quad M_{t0} = 0.25, \quad \sigma_k = 2, \quad \sigma_\omega = 2$$

3.8.2 แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ SST $k-\omega$

แบบจำลองการเคลื่อนย้ายของความเค้นเฉือน (shear-stress transport, SST) $k-\omega$ หรือเรียกว่า SST $k-\omega$ เป็นแบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้นจากสมการที่มีการผสมผสานกันอย่างดีและแม่นยำระหว่างแบบจำลอง $k-\omega$ ในบริเวณการไหลใกล้ผนังกับการไหลที่เป็นอิสระจากกระแสการไหลหลักของแบบจำลอง $k-\epsilon$ ในสนามการไหลที่ไกลออกไปจากผนัง โดยทั่วไปจะมีความคล้ายคลึงกับ $k-\omega$ มาตรฐาน แต่ได้เพิ่มสิ่งต่างๆ เข้าไปดังต่อไปนี้

(1) แบบจำลอง $k-\omega$ มาตรฐานและแบบจำลอง $k-\epsilon$ ถูกรวมเข้าด้วยกันด้วยฟังก์ชันการผสมผสาน (blending function) ซึ่งถูกออกแบบมาเพื่อกระตุ้นการใช้แบบจำลอง $k-\omega$ มาตรฐานในบริเวณการไหลใกล้ผนัง และจะกระตุ้นการใช้แบบจำลอง $k-\epsilon$ สำหรับบริเวณการไหลที่ไกลจากผนัง

(2) แบบจำลอง SST ได้รวมเทอมการแพร่กระจายข้าม (cross-diffusion) ไว้ในสมการ ω

(3) มีการปรับปรุงนิยามของค่าของความหนืดปั่นป่วน โดยรวมผลการเคลื่อนย้ายของความเค้นเฉือนปั่นป่วนเข้าไว้ด้วย

ลักษณะต่างๆ ที่ได้สร้างขึ้นในแบบจำลอง SST $k-\omega$ ทำให้มีความแม่นยำมากขึ้นและเชื่อถือได้กับการไหลในช่วงกว้างมากกว่าแบบจำลอง $k-\omega$ มาตรฐาน เช่น การไหลที่มีค่าความดันต้านกลับ การไหลผ่านแพนอากาศ การไหลที่มีคลื่นช็อค การปรับปรุงดังกล่าวนี้ทำให้มั่นใจได้ว่าสมการของแบบจำลองมีพฤติกรรมที่เหมาะสมกับบริเวณการไหลทั้งไกลและใกล้ผนัง

3.8.2.1 สมการการเคลื่อนย้ายของแบบจำลอง SST $k-\omega$

สมการการเคลื่อนย้ายของแบบจำลอง SST $k-\omega$ แสดงได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \tilde{G}_k - Y_k \quad (3.95)$$

และ

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega \quad (3.96)$$

ความหมายของแต่ละพจน์ในสมการที่ (3.115) และ (3.116) สามารถแสดงได้ดังนี้

(1) ค่าการแพร่กระจายยังผล (effective diffusivities) สำหรับแบบจำลอง SST $k-\omega$ มีสมการดังนี้

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (3.97)$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \quad (3.98)$$

เมื่อค่า σ_k และ σ_ω คือเลขพรานด์ของความปั่นป่วน (turbulent Prandtl numbers) สำหรับค่า k และ ω ตามลำดับ และค่าความหนืดปั่นป่วน, μ_t ถูกคำนวณจากสมการดังนี้

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max \left[\frac{1}{\alpha^*}, \frac{SF_2}{a_1 \omega} \right]} \quad (3.99)$$

เมื่อค่า S คือขนาดของอัตราของความเครียด (strain rate magnitude) และ

$$\sigma_k = \frac{1}{F_1 / \sigma_{k,1} + (1 - F_1) / \sigma_{k,2}} \quad (3.100)$$

$$\sigma_\omega = \frac{1}{F_1 / \sigma_{\omega,1} + (1 - F_1) / \sigma_{\omega,2}} \quad (3.101)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ α^* กำหนดโดยสมการที่ (3.94) และฟังก์ชันของการผสมผสาน F_1 และ F_2 กำหนดโดย

$$F_1 = \tanh(\Phi_1^4) \quad (3.102)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Phi_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right), \frac{4\rho k}{\sigma_{\omega,2} D_\omega^+ y^2} \right] \quad (3.103)$$

$$D_\omega^+ = \max \left[2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega,2}} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10} \right] \quad (3.104)$$

$$F_2 = \tanh(\Phi_2^2) \quad (3.105)$$

$$\Phi_2 = \max \left[2 \frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right] \quad (3.106)$$

เมื่อค่า y คือค่าระยะทางที่ห่างจากพื้นผิว และค่า D_ω^+ คือค่าส่วนที่เป็นบวกของเทอมการแพร่กระจายข้าม, D_ω ซึ่งการเปลี่ยนรูปสมการจากแบบจำลอง $k-\varepsilon$ มาเป็นแบบจำลอง $k-\omega$ นั้นได้นำไปสู่การเพิ่มเทอม D_ω ซึ่งมีสมการเป็น

$$D_\omega = 2(1-F_1)\rho\sigma_{\omega,2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (3.107)$$

(2) ค่า \tilde{G}_k คือเทอมที่แสดงถึงการสร้างพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากเกรเดียนต์ของความเร็วเฉลี่ย เทอมนี้มีนิยามโดย

$$\tilde{G}_k = \min(G_k, 10\rho\beta^*k\omega) \quad (3.108)$$

เมื่อค่า G_k ถูกกำหนดให้มีความหมายเดียวกันกับแบบจำลอง $k-\omega$ มาตรฐาน

(3) ค่า G_ω คือเทอมของการสร้างค่า ω ซึ่งแสดงโดย

$$G_\omega = \frac{\alpha}{V_t} G_k \quad (3.109)$$

สังเกตได้ว่าสมการนี้แตกต่างจากค่าในแบบจำลอง $k-\omega$ มาตรฐาน ซึ่งความแตกต่างในสองแบบจำลองจะเห็นได้ชัดว่าแตกต่างกันที่ค่า α_∞ โดยในแบบจำลอง $k-\omega$ มาตรฐานค่า α_∞ เป็นค่าคงที่และถูกกำหนดให้เท่ากับ 0.52 แต่สำหรับแบบจำลอง SST $k-\omega$ นั้นค่า α_∞ มีสมการเป็น

$$\alpha_\infty = F_1\alpha_{\infty,1} + (1-F_1)\alpha_{\infty,2} \quad (3.110)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

$$\alpha_{\infty,1} = \frac{\beta_{i,1}}{\beta_{\infty}^*} - \frac{\kappa^2}{\sigma_{\omega,1}\sqrt{\beta_{\infty}^*}} \quad (3.111)$$

$$\alpha_{\infty,2} = \frac{\beta_{i,2}}{\beta_{\infty}^*} - \frac{\kappa^2}{\sigma_{\omega,2}\sqrt{\beta_{\infty}^*}} \quad (3.112)$$

เมื่อ κ มีค่าเท่ากับ 0.41

(4) ค่าการสูญเสียของ k กำหนดโดย Y_k ซึ่งมีนิยามคล้ายกับแบบจำลอง $k-\omega$ มาตรฐาน แต่สำหรับแบบจำลอง SST $k-\omega$ จะกำหนดให้ค่า $f_{\beta^*} = 1$ ดังนั้นจะได้

$$Y_k = \rho \beta^* k \omega \quad (3.113)$$

(5) ค่าการสูญเสียของ ω กำหนดโดย Y_{ω} ซึ่งมีนิยามคล้ายกับแบบจำลอง $k-\omega$ มาตรฐาน แต่สำหรับแบบจำลอง SST $k-\omega$ จะกำหนดให้ค่า $f_{\beta} = 1$ ดังนั้นจะได้

$$Y_{\omega} = \rho \beta \omega^2 \quad (3.114)$$

สำหรับการแทนค่าคงที่นั้น ค่า β_i กำหนดโดย

$$\beta_i = F_1 \beta_{i,1} + (1 - F_1) \beta_{i,2} \quad (3.115)$$

ซึ่งค่า F_1 กำหนดโดยสมการที่ (3.122)

(6) ค่าคงที่ต่างๆ ในแบบจำลอง SST $k-\omega$ มีดังนี้

$$\sigma_{k,1} = 1.176, \quad \sigma_{\omega,1} = 2.0, \quad \sigma_{k,2} = 1.0, \quad \sigma_{\omega,2} = 1.168$$

$$a_1 = 0.31, \quad \beta_{i,1} = 0.075, \quad \beta_{i,2} = 0.0828$$

ค่าคงที่ต่างๆ ที่นอกเหนือจากนี้ใช้ค่าเดียวกับแบบจำลอง $k-\omega$ มาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8.2.2 เงื่อนไขขอบที่ผนังของค่า ω

เงื่อนไขขอบที่ผนัง(Wall boundary conditions) สำหรับสมการ k ในแบบจำลอง $k-\omega$ ใช้เงื่อนไขเดียวกับ enhanced wall treatments ในแบบจำลอง RNG $k-\epsilon$ (ดูหัวข้อ 3.12.1)

เงื่อนไขขอบที่ผนังของค่า ω ถูกระบุโดย

$$\omega_w = \frac{\rho(u^*)^2}{\mu} \omega^+ \quad (3.116)$$

ค่า ω^+ ของการไหลในชั้นย่อยหนืดหรือการไหลชั้นย่อยแบบราบเรียบ กำหนดโดย

$$\omega^+ = \min\left(\omega_w^+, \frac{6}{\beta_i(y^+)^2}\right) \quad (3.117)$$

เมื่อ

$$\omega_w^+ = \begin{cases} \left(\frac{50}{k_s^+}\right)^2 & k_s^+ < 25 \\ \frac{100}{k_s^+} & k_s^+ \geq 25 \end{cases} \quad (3.118)$$

และ

$$k_s^+ = \max\left(1.0, \frac{\rho k_s u^*}{\mu}\right) \quad (3.119)$$

เมื่อค่า k_s คือความสูงของความขรุขระ

ในบริเวณการไหลแบบปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์ ค่า ω^+ มีสมการเป็น

$$\omega^+ = \frac{1}{\sqrt{\beta_\infty^*}} \frac{du_{\text{turb}}^+}{dy^+} \quad (3.120)$$

ซึ่งได้นำไปสู่ค่า ω ของเซลล์ที่ผนัง ดังนี้

$$\omega = \frac{u^*}{\sqrt{\beta_\infty^*} \kappa y} \quad (3.121)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับกรณีของกริดเซลล์ที่ผนังถูกวางอยู่ในชั้นบัฟเฟอร์ แบบจำลองจะทำการผสมระหว่างค่า ω^+ ของการไหลในชั้นปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์กับการไหลในชั้นย่อยหนืด

3.9 การวิเคราะห์บริเวณใกล้ผนังสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนที่มีผนังเป็นขอบเขต

แบบจำลอง $k-\epsilon$ โดยเริ่มแรกนั้นมีความแม่นยำสำหรับการไหลปั่นป่วนในบริเวณแกนการไหล นั่นคือการไหลในบริเวณใดๆ ที่ไกลออกไปจากผนัง ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องพิจารณาว่าแบบจำลองการไหลต้องเหมาะสมกับการไหลที่มีขอบเขตในบริเวณที่ใกล้กับผนัง โดยทั่วไปจะมี 2 วิธีในการจำลองการไหลบริเวณใกล้กับผนังคือ

(1) วิธีการใช้ฟังก์ชันผนัง(wall function approach) ซึ่งวิธีนี้อธิพลของค่าความหนืดในบริเวณการไหลชั้นย่อยหนืด ไม่ได้ถูกคำนวณโดยตรงแต่จะใช้สมการเชิงทดลองซึ่งเรียกว่าฟังก์ชันผนัง(wall functions) เป็นตัวเชื่อมระหว่างบริเวณที่ได้รับอิทธิพลของความหนืดในบริเวณใกล้ผนังกับบริเวณการไหลแบบปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์ ซึ่งการใช้ฟังก์ชันผนังนั้นทำให้ไม่จำเป็นที่จะต้องใช้การปรับปรุงแบบจำลองความปั่นป่วนสำหรับอิทธิพลของการมีอยู่ของผนัง

(2) วิธีจำลองใกล้ผนัง(near-wall modeling approach) คือวิธีการปรับปรุงแบบจำลองความปั่นป่วนให้สามารถแก้ปัญหาบริเวณที่ได้รับอิทธิพลของความหนืดด้วยการใช้กริดเซลล์ทั่วทั้งบริเวณที่อยู่ใกล้ผนังซึ่งรวมทั้งบริเวณการไหลในชั้นย่อยหนืด

วิธีของฟังก์ชันผนังนั้นเป็นวิธีที่ประหยัดทรัพยากรทางคอมพิวเตอร์ และเป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับการคำนวณการไหลในบริเวณที่ใกล้กับผนังในเชิงอุตสาหกรรม แต่อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ไม่เหมาะสำหรับการไหลที่อยู่ในสภาวะการไหลบางกรณีดังนี้

1. การไหลอยู่ภายใต้อิทธิพลของเลขเรย์โนลด์ต่ำที่กระจายไปทั่วทั้งโดเมนในสนามการไหล
2. การไหลที่เกิดเกรเดียนต์ของความดันอย่างรุนแรงซึ่งนำไปสู่การแยกไหลของชั้นขีดผิว
3. มีการไหลแบบ 3 มิติในบริเวณใกล้กับผนังนั้นคือเกิดการไหลแบบบิดตัวอย่างรุนแรงของชั้นขีดผิวแบบ 3 มิติ

จากสภาวะการไหลดังกล่าว สมมุติฐานของการใช้ฟังก์ชันผนังนั้นจะไม่ถูกต้อง (ซึ่งพบว่า การไหลผ่านครีบูปตัวที่เรียงตัวอย่างต่อเนื่องบนพื้นผิวให้ความร้อนนั้น มีลักษณะสอดคล้องกับการไหลในกรณีดังกล่าวข้างต้น) การแก้ปัญหการไหลดังกล่าวนี้จะใช้วิธีการจำลองใกล้ผนัง ร่วมกับการใช้จำนวนกริดเซลล์ที่เหมาะสมในบริเวณใกล้กับผนัง โดยวิธีการนี้เรียกว่า enhanced wall treatment

ถึงแม้ว่า enhanced wall treatment ถูกออกแบบให้มีความแม่นยำสำหรับการจำลองการไหลในบริเวณที่ใกล้กับผนัง แต่ยังคงต้องมีการสร้างกริดเซลล์ที่ใช้สำหรับการคำนวณอย่างสมบูรณ์ในบริเวณการไหลใกล้กับผนังที่ได้รับอิทธิพลของความหนืด ซึ่งเมื่อมีการใช้ enhanced wall treatment เพื่อคำนวณการไหลในชั้นย่อยหนืด ค่า y^+ ที่ติดกับผนังควรมีค่าเท่ากับ 1 แต่อย่างไรก็ตามค่า y^+ ที่มีค่าสูงกว่านี้และสามารถยอมรับได้คือ $y^+ < 4$ ถึง 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.9.1 การจำลองการไหลใกล้ผนังด้วยวิธี enhanced wall treatment

วิธี enhanced wall treatment เป็นวิธีการจำลองการไหลใกล้ผนังซึ่งถูกใช้ในแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG $k-\epsilon$ โดยมีพื้นฐานมาจากแบบจำลองการไหล 2 ชั้น (two-layer model) ซึ่งวิธีนี้โดเมนการไหลทั้งหมดได้ถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ บริเวณที่ได้รับอิทธิพลของความหนืดกับบริเวณการไหลแบบปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์ และขอบเขตของทั้งสองบริเวณนั้นสามารถหาได้โดยการใช้ระยะทางจากผนัง ซึ่งเรียกว่าเลขเรย์โนลด์ปั่นป่วน, Re_y (turbulent Reynolds number) ซึ่งมีนิยามเป็น

$$Re_y \equiv \frac{\rho y \sqrt{k}}{\mu} \quad (3.122)$$

ค่า y คือระยะทางที่วัดตั้งฉากจากผนังไปยังจุดศูนย์กลางเซลล์

ในบริเวณการไหลแบบปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์นั้น ($Re_y \geq 200$ ซึ่ง $Re_y^* = 200$) แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ $k-\epsilon$ มาตรฐานจะถูกนำมาใช้ในการคำนวณ

ในบริเวณการไหลที่ใกล้กับผนังซึ่งได้รับอิทธิพลของความหนืด ($Re_y < 200$) แบบจำลอง 1 สมการ (one-equation model) จะถูกนำมาใช้ ซึ่งมีเพียงสมการ k เท่านั้นที่ถูกใช้ในบริเวณนี้ โดยที่ค่าความหนืดปั่นป่วน, μ_t จะคำนวณจากสมการ

$$\mu_{t,2layer} = \rho C_\mu l_\mu \sqrt{k} \quad (3.123)$$

เมื่อ l_μ คือค่าบ่งชี้ลักษณะเชิงขนาด (length scale) คำนวณจากสมการ

$$l_\mu = y C_l^* (1 - e^{-Re_y/A_\mu}) \quad (3.124)$$

นิยามของการไหล 2 ชั้น ผสมผสานกันอย่างราบรื่นกับการไหลที่เลขเรย์โนลด์สูง และค่าของ μ_t สำหรับการไหลด้านนอกมีสมการเป็น

$$\mu_{t,enh} = \lambda_\epsilon \mu_t + (1 - \lambda_\epsilon) \mu_{t,2layer} \quad (3.125)$$

เมื่อค่า μ สำหรับการไหลที่เลขเรย์โนลด์สูงถูกกำหนดไว้ในแบบจำลอง $k-\varepsilon$ และนอกจากนี้ ฟังก์ชันการผสมผสาน(blending function), λ_ε ถูกกำหนดให้เท่ากับหนึ่งสำหรับบริเวณที่ไกลจากผนัง และมีค่าเท่ากับศูนย์สำหรับบริเวณที่อยู่ใกล้กับผนังมาก ซึ่งฟังก์ชันการผสมผสานมีสมการเป็น

$$\lambda_\varepsilon = \frac{1}{2} \left[1 + \tanh \left(\frac{\text{Re}_y - \text{Re}_y^*}{A} \right) \right] \quad (3.126)$$

ค่าคงที่ A หาจากสมการดังนี้

$$A = \frac{|\Delta \text{Re}_y|}{\tanh(0.98)} \quad (3.127)$$

โดยทั่วไปค่า ΔRe_y ถูกกำหนดให้มีค่าอยู่ระหว่าง 5% ถึง 25% ของค่า Re_y^* ซึ่งวัตถุประสงค์ของการมีฟังก์ชันการผสมผสานคือป้องกันการขัดขวางการลู่เข้า เมื่อผลเฉลยจากการคำนวณจากแบบจำลอง $k-\varepsilon$ ที่ชั้นด้านนอกไม่สอดคล้องกับสมการของวิธีจำลองการไหล 2 ชั้น

ค่าของ ε ในสนามการไหลคำนวณจากสมการ

$$\varepsilon = \frac{k^{3/2}}{l_\varepsilon} \quad (3.128)$$

ค่า l_ε คำนวณจากสมการ

$$l_\varepsilon = y C_\ell^* (1 - e^{-\text{Re}_y / A_\varepsilon}) \quad (3.129)$$

ถ้าโดเมนการไหลทั้งหมดอยู่ในบริเวณที่ได้รับอิทธิพลของความหนืด ($\text{Re}_y < 200$) ค่า ε จะไม่ได้คำนวณจากการแก้สมการการเคลื่อนย้าย แต่จะใช้ค่าในสมการที่ (3.148)

ค่าคงที่ซึ่งอยู่ในสมการค่าบ่งชี้ลักษณะเชิงขนาด มีดังนี้

$$C_\ell^* = \kappa C_\mu^{-3/4}, \quad A_\mu = 70, \quad A_\varepsilon = 2C_\ell^*$$

3.9.2 เงื่อนไขค่าขอบของแบบจำลองความปั่นป่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เงื่อนไขค่าขอบของแบบจำลองความปั่นป่วนแบ่งได้เป็น เงื่อนไขค่าขอบที่ผนังและเงื่อนไขทางเข้า มีรายละเอียดของการกำหนดค่าดังนี้

3.9.2.1 เงื่อนไขค่าขอบที่ผนัง

สำหรับแบบจำลอง k - ε สมการของค่า k ที่ถูกคำนวณในโดเมนของการไหลและรวมถึงเซลล์ที่ติดกับผนัง เงื่อนไขขอบของค่า k ที่ติดกับผนังมีสมการเป็น

$$\frac{\partial k}{\partial n} = 0 \quad (3.130)$$

เมื่อค่า n คือพิกัดของตำแหน่งที่ตั้งฉากกับผนัง

เทอมของการสร้างพลังงานจลน์, G_k และอัตราการสูญเสีย, ε ของเซลล์ที่ติดกับผนัง ซึ่งเป็นเทอมของแหล่งกำเนิดในสมการ k ถูกคำนวณจากพื้นฐานของสมมติฐานความสมดุลเฉพาะที่ (local equilibrium hypothesis) ภายใต้สมมติฐานนี้ การสร้างค่า k และอัตราการสูญเสียของมัน ถูกสมมติว่าเท่ากันในปริมาตรควบคุมที่ติดกับผนัง ดังนั้นการสร้างค่า k คำนวณได้จากสมการ

$$G_k = \tau_w \frac{\partial U}{\partial y} = \tau_w \frac{\tau_w}{\kappa \rho C_\mu^{1/4} k_P^{1/2} y_P} \quad (3.131)$$

ค่า ε คำนวณได้จากสมการ

$$\varepsilon_P = \frac{C_\mu^{3/4} k_P^{3/2}}{\kappa y_P} \quad (3.132)$$

สมการ ε ไม่ได้ถูกคำนวณที่เซลล์ที่ติดกับผนัง แต่แทนที่การคำนวณด้วยการใช้สมการที่ (3.148) และสังเกตได้ว่าเงื่อนไขขอบที่ผนังสำหรับการหาค่าผลเฉลยของตัวแปร ซึ่งรวมทั้งความเร็วเฉลี่ย, อุณหภูมิ, k และ ε ถูกกำหนดโดยฟังก์ชันผนัง ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องระบุค่าเหล่านี้ที่ผนัง

3.9.2.2 เงื่อนไขทางเข้า

ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปแล้วจะใช้ค่า k และ ε ของทางเข้าที่ได้จากผลงานตีพิมพ์ของนักวิจัย อาจมีการศึกษาผลกระทบของค่าเหล่านี้ต่อการไหลเพิ่มเติม เพื่อประเมินความน่าเชื่อถือของผลการจำลองที่ได้ นอกจากนี้สามารถประมาณการค่า k และ ε อย่างคร่าวๆ ได้ จากความเข้มข้นของความปั่นป่วน (turbulence intensity), T_i และค่าบ่งชี้เชิงขนาด D ของช่องทางไหลโดยความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$k = \frac{3}{2}(U_{ref} T_i)^2; \quad \varepsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{\ell}; \quad \ell = 0.07D \quad (3.133)$$

3.10 การจำลองการถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบปั่นป่วน

การถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบปั่นป่วน มีสมการที่จำลองขึ้นโดยใช้แนวคิดของความคล้ายคลึงของเรย์โนลด์ส(Reynolds' analogy) ต่อการถ่ายเทโมเมนตัมของความปั่นป่วน ดังนั้นสมการพลังงานที่ถูกสร้างขึ้น สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (U_i (\rho E + p)) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (3.134)$$

เมื่อค่า E คือพลังงานรวม และค่า k_{eff} คือค่าการนำความร้อนยังผล(effective thermal conductivity) โดยที่ $k_{eff} = k + k_t$ ซึ่งค่า k_t คือค่าการนำความร้อนปั่นป่วนและมีนิยามตามแบบจำลองความปั่นที่เลือกใช้ดังนี้

3.10.1 แบบจำลอง k - ε มาตรฐานและแบบ k - ω

สำหรับการจำลองการถ่ายเทความร้อนของแบบจำลองความปั่นป่วน k - ε มาตรฐานและแบบ k - ω นั้นค่า k_{eff} มีสมการคือ

$$k_{eff} = k + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \quad (3.135)$$

เมื่อค่า k ในกรณีนี้คือค่าการนำความร้อน และค่า Pr_t คือเลขพรานด์ของความปั่นป่วน (turbulent Prandtl Number) ซึ่งมีค่า $Pr_t = 0.85$

3.10.2 แบบจำลอง RNG k - ε

สำหรับการจำลองการถ่ายเทความร้อนของแบบจำลองความปั่นป่วน RNG k - ε นั้นค่า k_{eff} มีสมการคือ

$$k_{eff} = \alpha c_p \mu_{eff} \quad (3.136)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ค่า α นั้นคำนวณได้จากสมการที่ (3.68) แต่สำหรับค่า α_0 นั้นคำนวณจากสมการ $\alpha_0 = 1/Pr = k/\mu c_p$ จะสังเกตได้ว่าค่า α เปลี่ยนแปลงไปตามค่า μ/μ_{eff} ดังที่ปรากฏอยู่ในสมการที่ (3.68) ซึ่งเป็นข้อดีของแบบจำลอง RNG $k-\epsilon$ และมีหลักฐานบ่งชี้ว่าการวิเคราะห์โดยใช้สมการที่ (3.68) มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองเมื่อค่า Pr_t เปลี่ยนแปลงไปตามค่า Pr และความปั่นป่วน โดยที่สมการที่ (3.68) นี้ใช้งานได้ดีสำหรับค่า Pr ในช่วงที่กว้างมาก ซึ่งสามารถคำนวณการถ่ายเทความร้อนได้สำหรับการไหลในบริเวณเลขเรย์โนลด์ส์ต่ำ สมการที่ (3.68) นี้ทำนายผลการเปลี่ยนแปลงได้อย่างราบรื่นของเลขพรานด์ที่ยังผลผกผันจากค่า $\alpha = 1/Pr$ ในบริเวณการไหลที่ได้รับอิทธิพลจากความหนืดของของไหลไปสู่ค่าของความปั่นป่วน ($\alpha = 1.393$) ในบริเวณการไหลปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

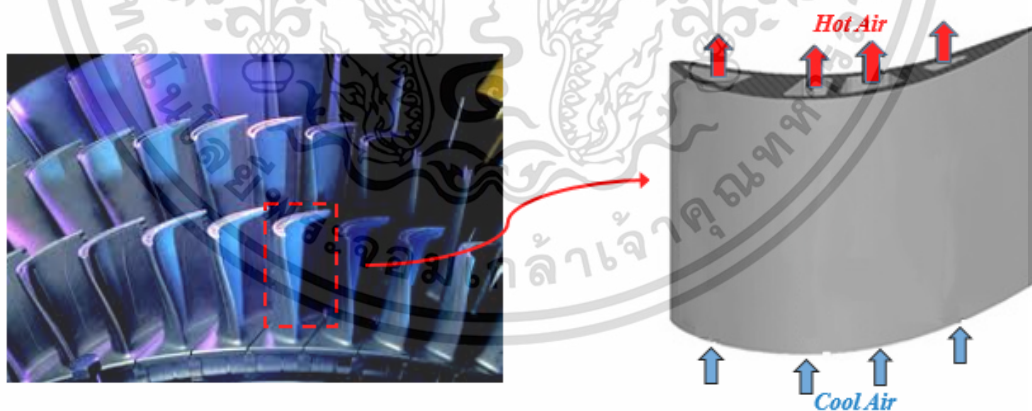
บทที่ 4

กรณีศึกษาและความถูกต้องของแบบจำลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงที่มาของการออกแบบโครงสร้างปัญหาของงานวิจัย พร้อมทั้งการตรวจสอบความเหมาะสมและความน่าเชื่อถือของแบบจำลองความปั่นป่วนที่ได้นำมาใช้ ระหว่างแบบจำลองความปั่นป่วน 2 แบบจำลองคือ Renormalization Group (RNG) $k-\epsilon$ และแบบ SST $k-\omega$ โดยเปรียบเทียบกับสมการสหพันธ์ที่เกี่ยวข้องของค่าตัวประกอบความเสียดทานและค่าการถ่ายเทความร้อนในท่อผิวเรียบ และตรวจสอบหาจำนวนกริดเซลล์ที่เหมาะสม

4.1 การออกแบบอุปกรณ์และที่มาของปัญหาทางานวิจัย

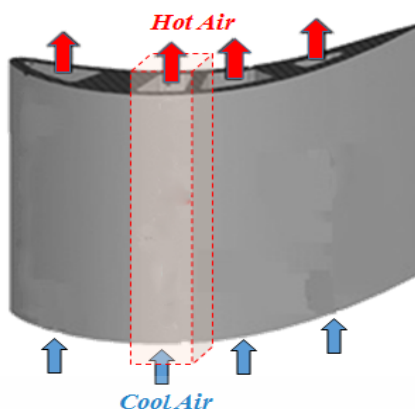
การศึกษาโครงสร้างปัญหาทางานวิจัยนี้จำลองมาจากพฤติกรรมการไหลเวียนแลกเปลี่ยนความร้อนของไหลภายในใบพัดของ Gas Turbine ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งภายในช่องหล່อยนั้นจะใช้อากาศเป็นของไหลหล່อยไม่ใ้ใบพัดของ Gas Turbine เกิดความร้อนที่สูงเกินกว่าจุดหลอมละลายของวัสดุของใบพัดจากการทำงานของ Gas turbine ซึ่งภายในช่องหล່อยนั้นจะติดตั้งตัวเพิ่มความปั่นป่วนเพื่อเพิ่มสมรรถนะการการหล່อยภายในใบพัด โดยงานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาการใช้พฤติกรรมการไหลผ่านตัวสร้างคามปั่นป่วนสองชนิดคือแผ่นกันครีบแยกรูปตัววี ,ใบปิดแบบต่อเนื่อง และการใช้ทั้งสองแบบพร้อมกัน ซึ่งแสดงไว้ในรูป 4.3 ถึง 4.4



รูปที่ 4.1 รูปแสดงการแลกเปลี่ยนความร้อนในใบพัดกังหันก๊าซ(Gas turbine)

การออกแบบช่องทางการไหลของของในการศึกษาครั้งนี้ เพื่อที่ง่ายต่อการหาอัตราส่วนของตัวแปลต่างๆที่จะทำการศึกษา ช่องทางการไหลจะเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสซึ่งจะมีลักษณะคล้ายคลึงช่องทางการไหลภายในห้องหล່อยของกังหันไอน้ำมากที่สุด ตามรูปที่4.2

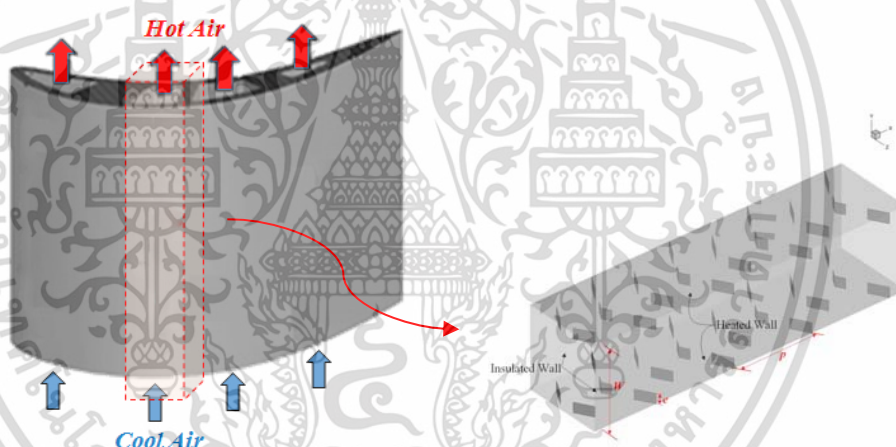
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ช่องทางการระบายความร้อนของกังหันก๊าซเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส

4.1.1 ตัวสร้างความปั่นป่วนชนิดแผ่นกั้นแบบแยกรูปตัววี

ตัวสร้างความปั่นป่วนตัวแรกที่จะทำการศึกษาคือแผ่นครีบบแยกรูปตัววี ซึ่งติดอยู่บนผนังบนและผนังล่าง ตามแสดงไว้ในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 การออกแบบช่องทางการไหลเย็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยมีแผ่นครีบบแยกรูปตัววีเป็นตัวสร้างความปั่นป่วน

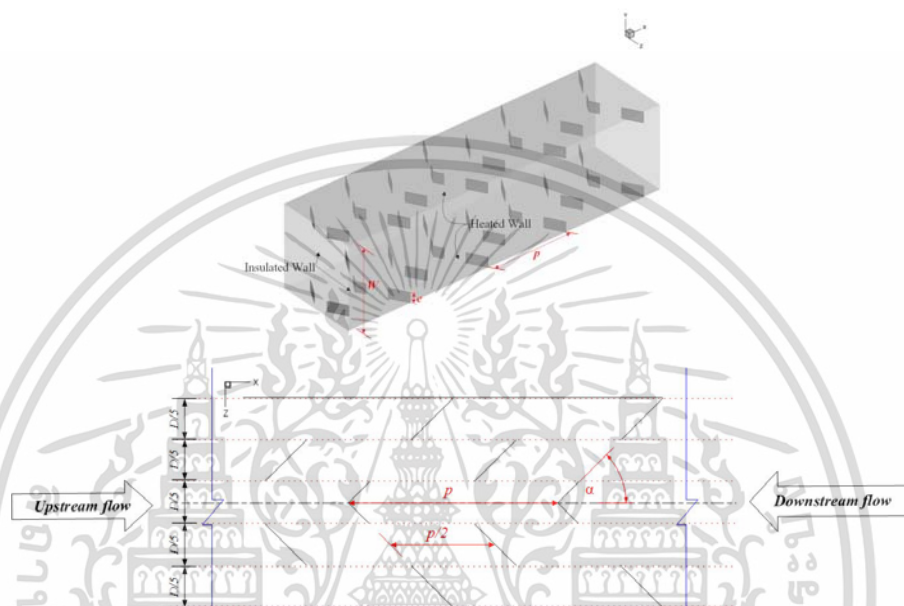
โดยค่าตัวแปรต่างที่จะทำการศึกษาของตัวสร้างความปั่นป่วนแบบครีบบแยกรูปตัววีมีดังต่อไปนี้

- 1.) อัตราส่วนระหว่างความสูงของแผ่นกั้นต่อความสูงของท่อ Blockage ratio (BR) = $e/w = 0.05, 0.075, 0.1, 0.125, 0.15$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

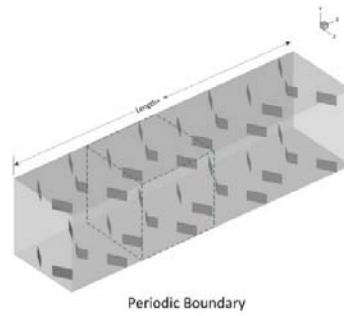
- 2.) มุมตามแนวแกนการไหลของแผ่นครีป Angle (α) = 60° 45° 30°
- 3.) อัตราส่วนระหว่างระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นต่อความสูงของท่อ (P/H , PR) หรือระยะพิตช์ pitch spacing ration = 1, 1.5
- 4.) การจัดวางแผ่นครีปทำมุมปะทะการไหล(Upstream flow)และทำมุมตามการไหล(Downstream flow)

จากตัวแปรที่จะทำการศึกษาค้างต้น เพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจ ตัวแปรดังกล่าวได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.4 ค่าตัวแปรต่างๆของตัวสร้างความปั่นป่วนชนิดแผ่นกั้นรูปตัววีแบบแยก

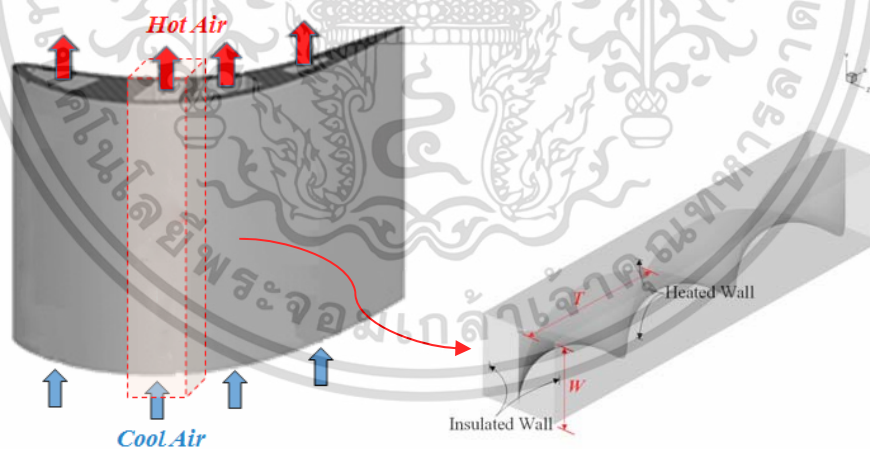
กำหนดให้ความสูงของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใช้ในการแบบจำลองนี้มีค่า $W = 0.04$ m โดยแบบจำลองนี้ได้กำหนดโดเมนการไหลและพิจารณาการไหลเป็น แบบคาบ (periodic) ตามรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5. รูปทรงของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นตัววีแบบแยกและโดเมนที่ใช้ในการคำนวณโดยวิธีการไหลแบบคาบ

4.1.2) ตัวสร้างความปั่นป่วนชนิดใบพัดแบบต่อเนื่อง

ตัวสร้างความปั่นป่วนตัวที่สองที่งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาคือใบพัดแบบต่อเนื่องซึ่งติดตั้งบริเวณตรงกลางของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส ตามแสดงไว้ในรูปที่ 4.6



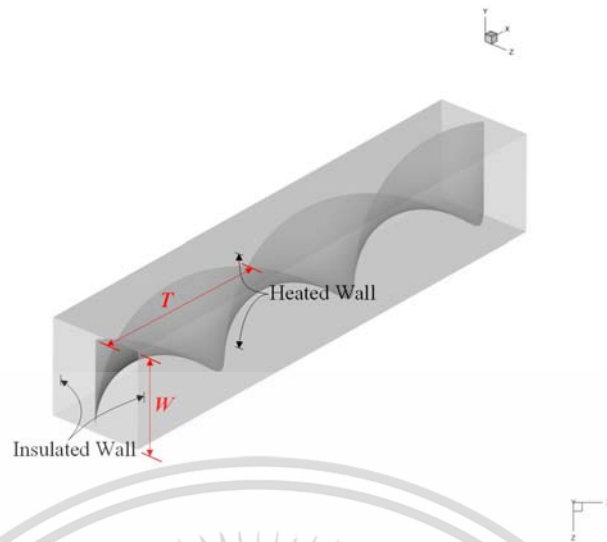
รูปที่ 4.6 การออกแบบช่องทางการไหลของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยมีใบพัดแบบต่อเนื่องเป็นตัวสร้างความปั่นป่วน

โดยค่าตัวแปรต่างที่จะทำการศึกษาของตัวสร้างความปั่นป่วนชนิดใบพัดแบบต่อเนื่องมีดังต่อไปนี้

อัตราส่วนระหว่างความยาวของใบพัดต่อความสูงของท่อ Twist ratio (TR) = $T/D = 2, 4, 5$

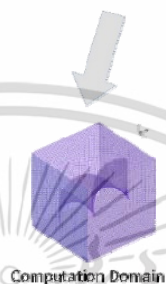
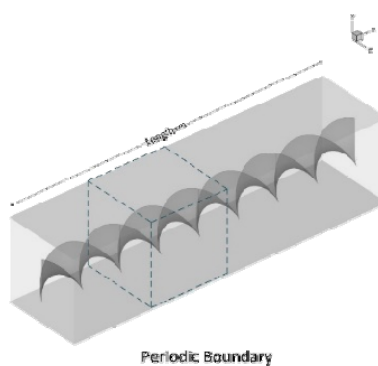
จากตัวแปรที่จะทำการศึกษาข้างต้น เพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจ ตัวแปรดังกล่าวได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



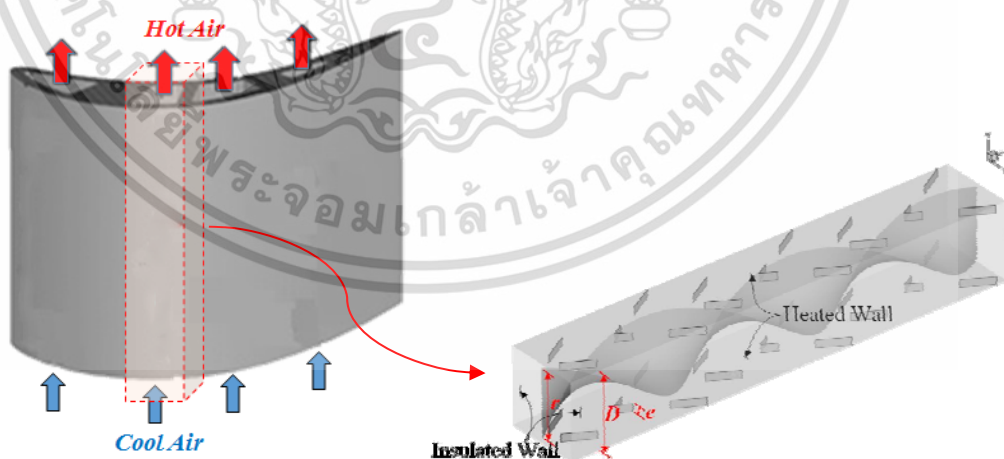
รูปที่ 4.7 ค่าตัวแปรต่างๆของตัวสร้างความปั่นป่วนชนิดไบบิตแบบต่อเนื่อง

กำหนดให้ความสูงของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใช้ในการแบบจำลองนี้มีค่า $W = 0.04$ m โดยแบบจำลองนี้ได้กำหนดโดเมนการไหลและพิจารณาการไหลเป็น แบบคาบ (periodic) ตามแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.8 รูปทรงของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดตั้งใบปิดและโดเมนที่ใช้ในการคำนวณโดยคิดการไหลแบบ periodic ที่มีการสร้างตาข่ายสี่เหลี่ยมแบบไม่สม่ำเสมอ

4.1.3) การใช้ตัวสร้างความปั่นป่วนชนิดแผ่นกั้นตัววิแบบแยกตัวและใบปิดแบบต่อเนื่องรวมกัน ตัวสร้างความปั่นป่วนชนิดที่สามของงานวิจัยนี้คือการใช้ตัวสร้างความปั่นป่วนชนิดแผ่นกั้นตัววิแบบแยกและใบปิดแบบต่อเนื่องรวมกัน โดยจะออกแบบให้แผ่นกั้นติดอยู่บนผนังท่อด้านบนและด้านล่างและใบปิดแบบต่อเนื่องจะติดตั้งอยู่บริเวณตรงกลางท่อ ตามแสดงในรูปที่ 4.8



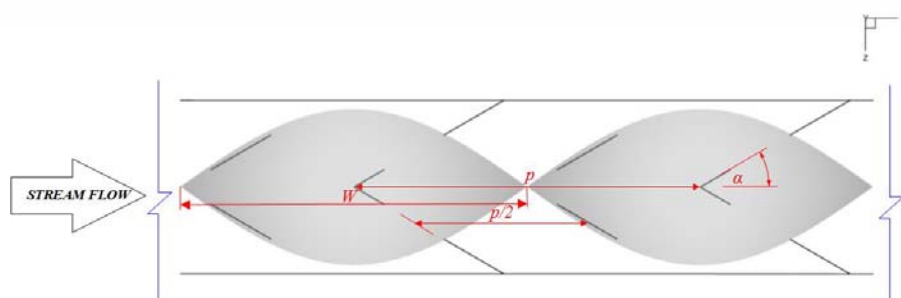
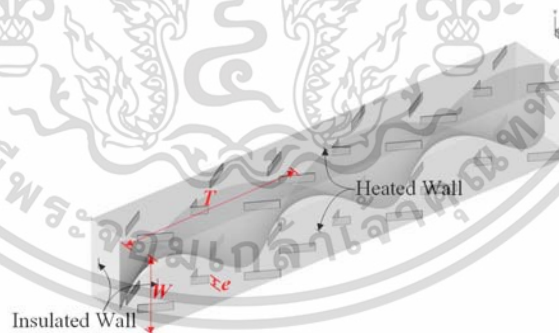
รูปที่ 4.9 การออกแบบช่องทางการไหลเวียนของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยมีแผ่นกั้นตัววิแบบแยกตัวและใบปิดแบบต่อเนื่องเป็นตัวสร้างความปั่นป่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาค่าตัวแปรต่างๆที่ส่งผลต่ออิทธิพลการถ่ายเทความร้อนภายในช่องหล่อเย็นของกังหันก๊าซ ซึ่งตัวแปรของทั้งสองที่จะทำการศึกษาของตัวสร้างความปั่นป่วนแบบผสมมีดังต่อไปนี้

- 1.) อัตราส่วนระหว่างความสูงของแผ่นกั้นต่อความสูงของท่อ Blockage ratio (BR)= $e/D = 0.05, 0.075, 0.1, 0.125, 0.15$ ของใบบิดที่มีอัตราส่วนระหว่างความยาวของใบบิดต่อความสูงของท่อ Twist ratio (TR)= $T/D = 2$, และ แผ่นกั้นที่มีอัตราส่วนระหว่างระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นต่อความสูงของท่อ ($P/H, PR$) หรือระยะพิตช์ pitch spacing ratio = 2
- 2.) อัตราส่วนระหว่างความสูงของแผ่นกั้นต่อความสูงของท่อ Blockage ratio (BR)= $e/D = 0.05, 0.075, 0.1, 0.125, 0.15$ ของใบบิดที่มีอัตราส่วนระหว่างความยาวของใบบิดต่อความสูงของท่อ Twist ratio (TR)= $T/D = 4$, และ แผ่นกั้นที่มีอัตราส่วนระหว่างระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นต่อความสูงของท่อ ($P/H, PR$) หรือระยะพิตช์ pitch spacing ratio = 4
- 3.) อัตราส่วนระหว่างความสูงของแผ่นกั้นต่อความสูงของท่อ Blockage ratio (BR)= $e/D = 0.05, 0.075, 0.1, 0.125, 0.15$ ของใบบิดที่มีอัตราส่วนระหว่างความยาวของใบบิดต่อความสูงของท่อ Twist ratio (TR)= $T/D = 5$, และ แผ่นกั้นที่มีอัตราส่วนระหว่างระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นต่อความสูงของท่อ ($P/H, PR$) หรือระยะพิตช์ pitch spacing ratio = 5

จากตัวแปรที่จะทำการศึกษาข้างต้น เพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจ ตัวแปรดังกล่าวได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.10

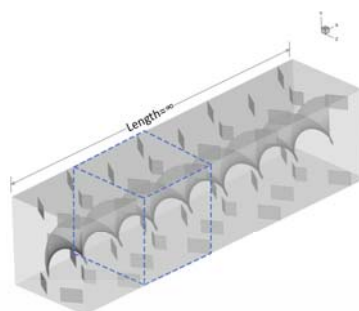


รูปที่ 4.10 ค่าตัวแปรต่างๆของตัวสร้างความปั่นป่วนชนิดผสมระหว่างแผ่นกั้นรูปตัววีแบบ

แยกและใบบิดแบบต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้ความสูงของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใช้ในการแบบจำลองนี้มีค่า $W = 0.04$ m โดยแบบจำลองนี้ได้กำหนดโดเมนการไหลและพิจารณาการไหลเป็น แบบคาบ (periodic) ตามแสดงในรูปที่ 4.11



Periodic Boundary

Computation Domain

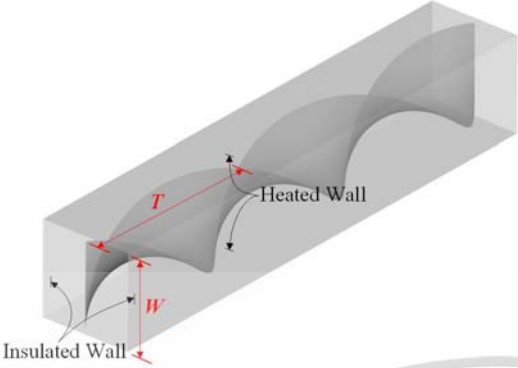
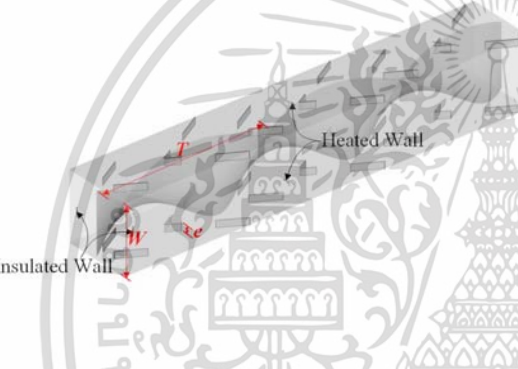
รูปที่ 4.11 รูปทรงของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดตั้งแผ่นกันและใบปิด และโดเมนที่ใช้ในคำนวณโดยคิดการไหลแบบ periodic ที่มีการสร้างตาข่ายสี่เหลี่ยมแบบไม่สม่ำเสมอ

4.1.4) สรุปการออกแบบปัญหาและการวิเคราะห์ห้อธิพลต่างๆของตัวสร้างความปั่นป่วน

ในงานวิจัยนี้จะใช้ของอากาศของไหลซึ่งจะศึกษาในช่วงความปั่นป่วนโดยมีค่า Re คือ 10000 ,12500 ,15000 ,17500 ,20000 ,22500 และ 25000 ซึ่งอิทธิพลของตัวแปรของตัวสร้างความปั่นป่วนของทั้งสามชนิดตั้งที่กล่าวมาข้างต้นสรุปไว้ดังต่อไปนี้

ชนิดของตัวสร้างความปั่นป่วน	อิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่ทำการศึกษา
	Blockage ratio (BR) = e/D โดยค่าที่จะทำการศึกษาคือ $BR = 0.05, 0.075, 0.1, 0.125$ และ 0.15
	มุมตามแนวแกนการไหลของแผ่นครีบ Angle (α) = $60^\circ, 45^\circ, 30^\circ$
	อัตราส่วนระหว่างระยะห่างระหว่างแผ่นกันต่อความสูงของท่อ ($P/H, PR$) หรือระยะพิตช์ pitch spacing ratio = $1, 1.5$
	การจัดวางแผ่นครีบทำมุมปะทะการไหล (Up stream flow) และทำมุมตามการไหล (Down stream flow)

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสจวณไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	<p>อัตราส่วนระหว่างความยาวของใบบิดต่อความสูงของท่อ Twist ratio (TR)= $T/D = 2, 4, 5$</p>
 <p>มุมตามแนวแกนการไหลของแผ่นครีบ Angle (α)= 30°</p>	<p>Blockage ratio (BR)= $e/D = 0.05, 0.075, 0.1, 0.125, 0.15$ และ Twist ratio (TR)= $T/D = 2$, และ ($P/H, PR$) หรือระยะพิตช์ pitch spacing ration = 2</p> <p>Blockage ratio (BR)= $e/D = 0.05, 0.075, 0.1, 0.125, 0.15$ และ Twist ratio (TR)= $T/D = 4$, และ ($P/H, PR$) หรือระยะพิตช์ pitch spacing ration = 4</p> <p>Blockage ratio (BR)= $e/D = 0.05, 0.075, 0.1, 0.125, 0.15$ และ Twist ratio (TR)= $T/D = 5$, และ ($P/H, PR$) หรือระยะพิตช์ pitch spacing ration = 5</p>

ตารางที่ 4.1 สรุปอิทธิพลของตัวแปรปัญหาต่างๆที่จะทำการศึกษาในงานวิจัย

4.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหา

พารามิเตอร์ต่างๆ ที่สนใจต่อการวิเคราะห์การไหลและการถ่ายเทความร้อนในงานวิจัยนี้ ประกอบไปด้วยตัวเลขเรย์โนลด์ส์ (Re) ตัวประกอบความเสียดทานแพนนิ่ง (f) ตัวเลขนัสเซลท์ (Nu) และตัวประกอบของการเพิ่มทางความร้อน (TEF) ซึ่งมีสมการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(1) เลขเรย์โนลด์

$$Re = \rho u_0 D / \mu \quad (4.1)$$

(2) ตัวประกอบความเสียดทานแฟนนิง

$$f = \frac{(\Delta p) D}{2 \rho L u_0^2} \quad (4.2)$$

เมื่อ Δp คือค่าความดันลด และ L คือความยาวหนึ่งช่วงการไหล

(3) ตัวเลขนัสเซิลท์เฉพาะที่

$$Nu_s = h_s D / k_a \quad (4.3)$$

(4) ตัวเลขนัสเซิลท์เฉลี่ย

$$Nu = \frac{1}{A} \int Nu_s dA \quad (4.4)$$

(5) ตัวประกอบของการเพิ่มทางความร้อน

$$TEF = \frac{h}{h_0} \Big|_{pp} = \frac{Nu}{Nu_0} \Big|_{pp} = (Nu / Nu_0) / (f / f_0)^{1/3} \quad (4.5)$$

4.3 เงื่อนไขขอบเขตในการคำนวณการไหลสามมิติ

สำหรับการคำนวณในสามมิติ ได้ใช้ค่าเงื่อนไขขอบเขตดังต่อไปนี้

4.2.1 สภาวะทางเข้าและทางออกเป็นแบบ Periodic Translation อากาศไหลเข้าด้วยอัตราการไหลเชิงมวลอย่างสม่ำเสมอ และอุณหภูมิของอากาศอยู่ที่ 300 K โดยมีค่าเลขพรานด์เทิล (Prandtl number; Pr) คงที่เท่ากับ 0.707

4.2.2 รูปร่างความเร็วทางเข้าและทางออกมีลักษณะเหมือนกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

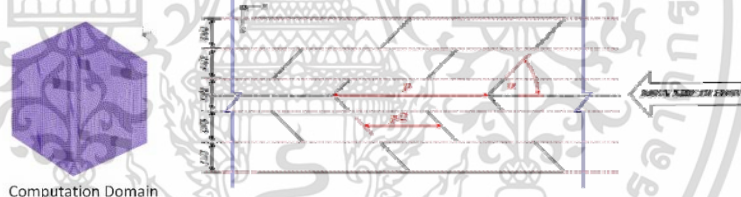
4.2.3 กำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ผนังความเร็วมีค่าเท่ากับศูนย์ (No slip condition) เป็นผนังที่อยู่กับที่ (Stationary wall)

4.2.4 กำหนดให้ค่าฟลักซ์ความร้อนของตัววีแบบแยกตัวและใบบิตมีค่าเท่ากับศูนย์ (แผ่นกันและใบบิตแผ่นบางเป็นฉนวน)

4.2.5 กำหนดให้ที่ผนังทุกด้านของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีค่าฟลักซ์ความร้อนคงที่ 1500 w/m^2

4.4 การตรวจสอบความเป็นอิสระของผลเฉลยจากจำนวนกริดเซลล์

การตรวจสอบความเป็นอิสระของผลเฉลยจากจำนวนกริดเซลล์โดยมีช่องทางไหลทดสอบที่มีแผ่นกันรูปตัววีแบบแยกติดอยู่บนผนังท่อด้านบนและด้านล่าง โดยช่องทางไหลทดสอบนั้นมีอัตราส่วนระหว่างระยะห่างระหว่างแผ่นกันต่อความสูงของท่อ (P/H , PR) หรือระยะพิทที่มีค่าเท่ากับ 1.0 โดยแผ่นกันทำมุมปะทะการไหล $\alpha = 60^\circ$ และมีอัตราส่วนระหว่างความสูงของแผ่นกันต่อความสูงของท่อ (b/H , BR) หรือค่าอัตราส่วนการบล็อกการไหลเท่ากับ 0.15 ความสูงของท่อหน้าตัดจัตุรัสที่ใช้ในการจำลองนี้มีค่า $W = 0.04 \text{ m}$ โดยพิจารณาการไหลแบบเป็นคาบ (periodic) ซึ่งคำนวณการไหลในช่วงพัฒนาอย่างสมบูรณ์และซ้ำเป็นช่วง หรืออาจเรียกว่าการคำนวณแบบเป็นโมดูล แสดงดังรูปที่ 4.10 และมีการจัดวางแผ่นกันบางแบบปลายวีชี้ตามกระแสการไหล



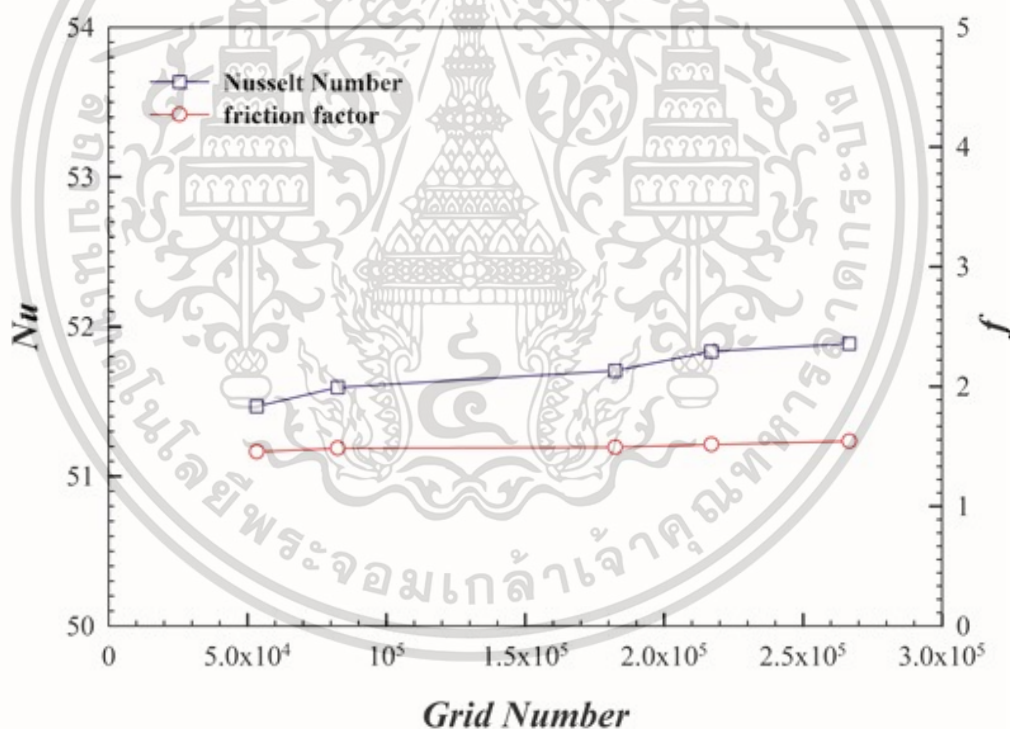
รูปที่ 4.12 แบบจำลองการไหลสามมิติของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีแผ่นกันรูปตัววี

กริดที่ใช้สำหรับกรณีแผ่นกันรูปตัววีติดอยู่บนผนังบางซึ่งจัดวางในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบทแยงมุม แบ่งกริดแบบไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform grid) ซึ่งจะพิจารณาบริเวณที่ติดผนังให้มีจำนวนกริดหนาแน่นและบริเวณที่ห่างออกไปจากผนังก็มีจำนวนกริดเบาบางลง ส่วนการหาผลกระทบของกริดที่มีผลต่อคำตอบได้ทำการศึกษาโดยใช้ปริมาณของกริดที่แตกต่างกัน ที่จำนวน 53420, 82500, 182400, 217000 และ 266600 ใช้ลำดับวิธีการคำนวณหาผลเฉลยแบบ SIMPLE และใช้แบบแผนการคำนวณแบบ QUICK โดยมีเงื่อนไขขอบเขตตั้งหัวข้อที่ 3 เงื่อนไขการลู่ออกหาคำตอบของทุกค่าอยู่ที่ 10^{-5} ยกเว้นสมการพลังงานซึ่งอยู่ที่ 10^{-9} พบว่าเมื่อจำนวนกริดเพิ่มขึ้นจาก 217000 เป็น 266600 ค่าเลขนัยเซิลท์มีความคลาดเคลื่อนจากผลเฉลยแม่นยำตรง 0.1 % ส่วนค่าตัวประกอบเสียดทาน

มีความคลาดเคลื่อนจากผลเฉลยแม่นยำตรง 1.77 % ดังนั้นจึงเลือกปริมาณของกริดที่ 266600 ซึ่งปริมาณกริดนี้จะถูกนำไปใช้ในการศึกษาอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ต่อไป

ตารางที่ 4.2 จำนวนของกริดเซลล์ที่ส่งผลต่อค่า Nu และ f

Grid number	Nu	f
53400	51.46731	1.45425
82500	51.59325	1.48349
182400	51.70545	1.49241
217000	51.83376	1.51541
266600	51.88601	1.54278



รูปที่ 4.13 อิทธิพลของจำนวนกริดเซลล์ต่อส่งผลต่อค่า Nu และ f ที่ $Re=10,000$

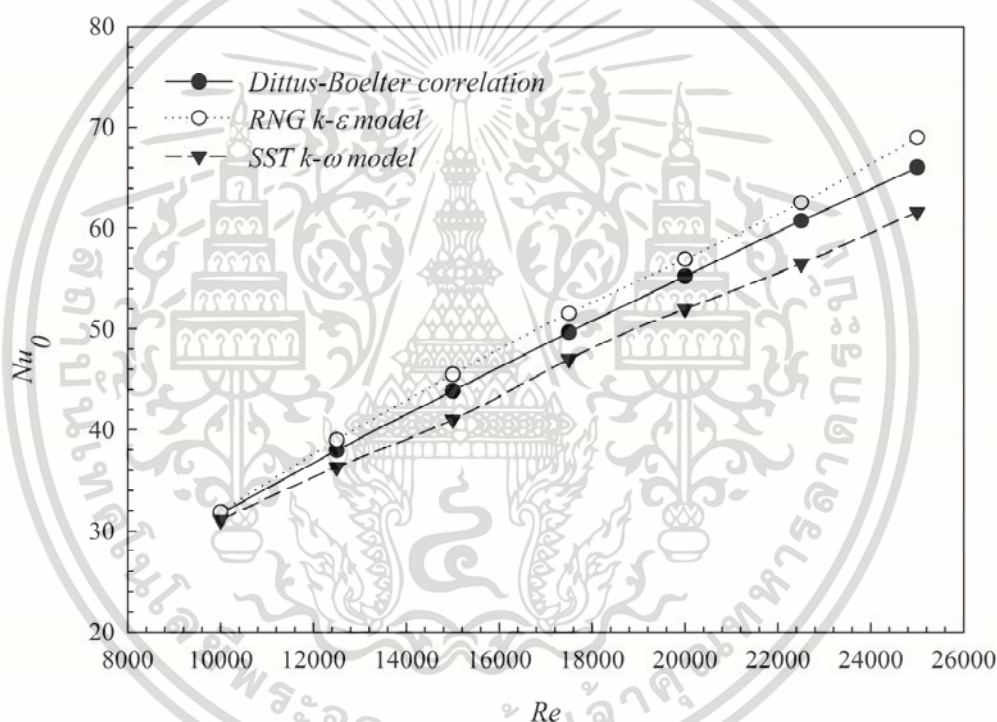
4.5 เปรียบเทียบผลของแบบจำลองความปั่นป่วนกับผลการทดลองการไหลในท่อเรียบ

การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG $k-\epsilon$ และ SST $k-\omega$ สำหรับการคำนวณการไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบ (ไม่ติดตั้งแผ่นกั้น) โดยใช้กริดเซลล์ที่ได้จากการตรวจสอบความเป็นอิสระในหัวข้อ 4.4 และใช้วิธีการคำนวณเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบเป็นโมดูล ที่มีความยาวช่วงเท่ากับ $1p$ (1 โมดูล) วิเคราะห์การไหลในช่วงเลขเรย์โนลด์ส์ 3,000 ถึง 20,000 และนำผลการคำนวณมาเปรียบเทียบกับสมการสหสัมพันธ์ของ Dittus–Boelter ซึ่งมีแสดงไว้ใน Incropera and Dewitt (1996) เพื่อวิเคราะห์ค่าของเลขนัสเซลท์ สมการสหสัมพันธ์ของ Dittus–Boelter แสดงได้ดังนี้

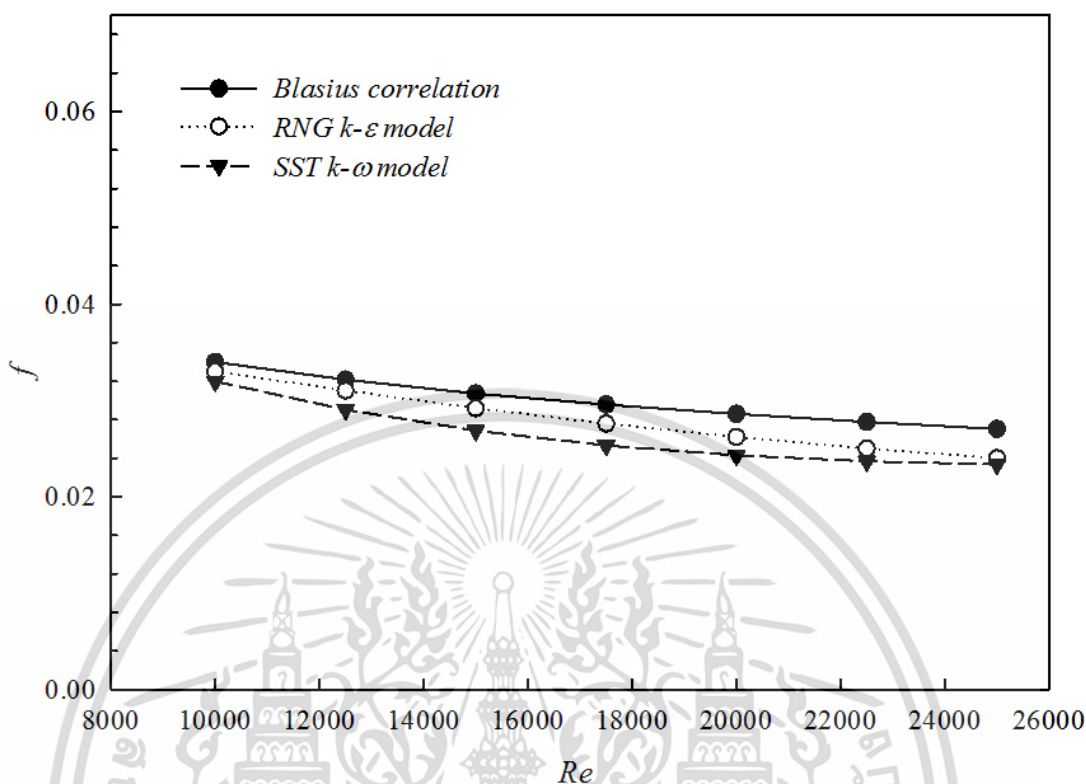
$$Nu_0 = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} \quad (4.6)$$

สมการนี้ได้รับการยืนยันจากผลการทดลองสำหรับช่วงของเงื่อนไขดังนี้คือ $0.7 \leq Pr \leq 160$, $Re \geq 10,000$ และ $L_e/D \geq 10$ โดยที่ L_e คือความยาวช่วงขาเข้า



รูปที่ 4.14 ค่าเลขนัสเซลท์เฉลี่ยของการถ่ายเทความร้อนในท่อผิวเรียบ

ในรูปที่ 4.14 ได้แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Realizable $k-\epsilon$ สอดคล้องกันดีกับสมการสหสัมพันธ์ของ Dittus–Boelter มากกว่าแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ SST $k-\omega$ ซึ่งให้ค่าคลาดเคลื่อนสูงที่สุดเท่ากับ 4.95% ตลอดช่วงเลขเรย์โนลด์ส์ที่พิจารณา



รูปที่ 4.15 ค่าตัวประกอบความเสียดทานของการถ่ายเทความร้อนในท่อผิวเรียบ

นอกจากการเปรียบเทียบค่าของเลขนัสเซลท์เฉลี่ยในท่อผิวเรียบแล้ว ยังได้เปรียบเทียบค่าตัวประกอบความเสียดทานอีกด้วย โดยเปรียบเทียบค่าของตัวประกอบความเสียดทานกับสมการสหสัมพันธ์ของ Blasius ดังแสดงไว้ในสมการที่ (4.7) และ (4.8)

$$f_0 = 0.079Re^{-0.25} \quad \text{เมื่อ } Re \leq 2 \times 10^4 \quad (4.7)$$

$$f_0 = 0.046Re^{-0.20} \quad \text{เมื่อ } Re > 2 \times 10^4 \quad (4.8)$$

ผลการเปรียบเทียบได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.15 ซึ่งสังเกตได้ว่าแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG $k-\epsilon$ สอดคล้องกับสมการสหสัมพันธ์ของ Blasius มากกว่าแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ SST $k-\omega$ ซึ่งให้ค่าความคลาดเคลื่อนสูงที่สุดเท่ากับ 7.89% ตลอดช่วงเลขเรย์โนลด์ที่พิจารณา

บทที่ 5

ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและการอภิปราย

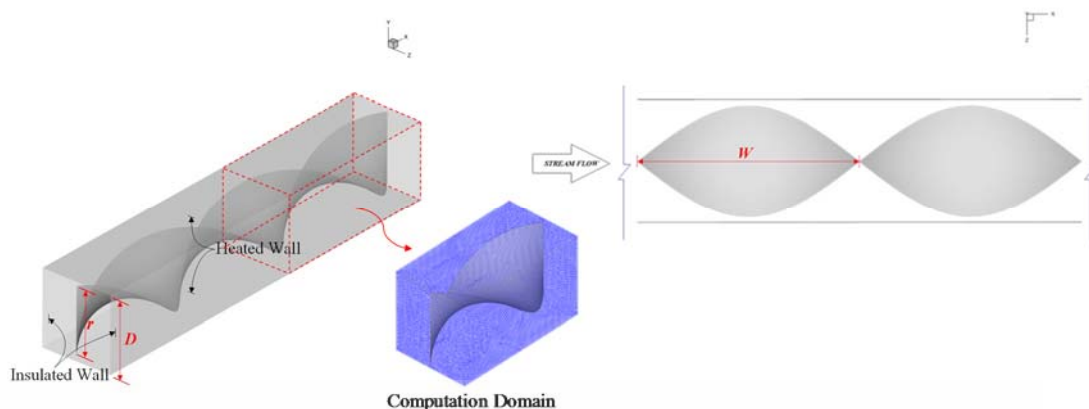
ในบทนี้แบ่งเป็นสองส่วนหลัก คือ ส่วนที่เป็นการแสดงผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขโดยกล่าวถึงพฤติกรรมการไหล ลักษณะการถ่ายเทความร้อนของการใช้ตัวสร้างความปั่นป่วนแบบต่างๆ โดยจะพิจารณาในส่วนของอิทธิพลของเลขเรย์โนลด์ อิทธิพลของความสูงของครีบ อิทธิพลของระยะพิตต์ของครีบ อิทธิพลของมุมปะทะของครีบ อิทธิพลการจัดวางแบบปลายวีชี้ตามกระแสการไหล (v -downstream) และปลายวีชี้ทวนกระแสการไหล (v -upstream) อิทธิพลของระยะการบิดตัวของใบบิดแบบต่อเนื่อง อิทธิพลของระยะความกว้างของใบบิดแบบต่อเนื่อง อิทธิพลของการใช้แผ่นครีบแยก รูปตัววีและใบบิดแบบต่อเนื่องรวมกัน โดยแสดงผลจากการศึกษาด้วยรูปภาพพฤติกรรมการไหลที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อม เช่นการแสดงความไหลในแนวแกนต่างๆ คอนทัวร์หรือการกระจายตัวของอุณหภูมิ เป็นต้น ซึ่งการแสดงผลในลักษณะดังกล่าวจะช่วยให้สามารถอธิบายถึงการถ่ายเทความร้อนและค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในอิทธิพลตัวแปรต่างๆ ได้ง่ายขึ้น

ส่วนที่สองกล่าวถึงผลจากการศึกษาด้วยการวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับค่าการถ่ายเทความร้อน ค่าความดันตกคร่อมและค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน โดยค่าของการถ่ายเทความร้อนจะแสดงในรูปของค่าอัตราส่วนเลขนัสเซล (Nu/Nu_0) ค่าความดันตกคร่อมจะแสดงในรูปของอัตราส่วนความเสียดทาน (f/f_0) และค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนจะแสดงในรูปของ TEF โดยจะพิจารณาในส่วนของอิทธิพลของเลขเรย์โนลด์ (Re) อิทธิพลของความสูงของครีบ (b/H , BR) อิทธิพลของระยะพิตต์ของครีบ (PR) อิทธิพลของมุมปะทะของครีบ (α) อิทธิพลการจัดวางแบบปลายวีชี้ตามกระแสการไหล (V -Downstream) และปลายวีชี้ทวนกระแสการไหล (V -Upstream) อิทธิพลของระยะการบิดตัวของใบบิดแบบต่อเนื่อง (TR) อิทธิพลของการใช้แผ่นครีบแยก รูปตัววีและใบบิดแบบต่อเนื่องรวมกัน

5.1 ตัวเพิ่มการปั่นป่วนการไหลแบบใบบิดต่อเนื่อง

5.1.1 แบบจำลองทางกายภาพ

ระบบที่ให้ความสนใจคือตัวเพิ่มการปั่นป่วนการไหลแบบใบบิดต่อเนื่องอยู่บริเวณตรงกลางในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยจะทำการศึกษาอัตราส่วนของความยาวใบบิด W ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางใบบิด (W/r , TR) หรือ Twist Ratio ที่เท่ากับ 2, 4 และ 5 โดยการศึกษาอิทธิพลของ Twist Ratio นี้ กำหนดให้เส้นผ่านศูนย์กลางใบบิดคงที่เท่ากับ $r = 0.036$ m ความสูงของท่อหน้าตัดจัตุรัสที่ใช้ในการจำลองนี้มีค่า $H = 0.04$ m โดยพิจารณาการไหลเป็นแบบคาบ (periodic) ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 รูปทรงของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดตั้งใบพัดแบบต่อเนื่อง และโดเมนที่ใช้ในการคำนวณ โดยคิดการไหลแบบ periodic ที่มีการสร้างตาข่ายสี่เหลี่ยมแบบไม่สม่ำเสมอ

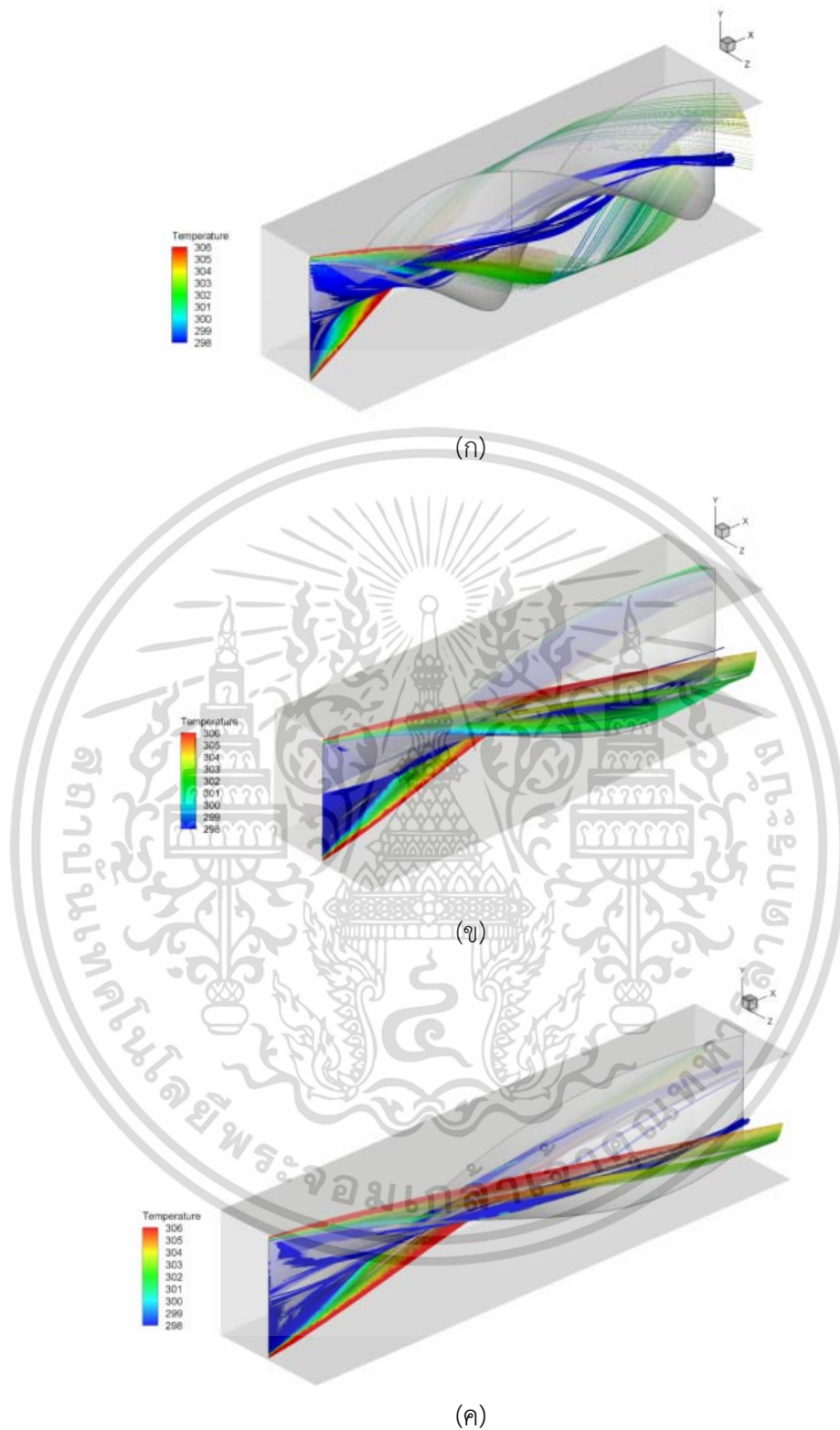
5.1.2 อธิพล Twist Ratio

ในส่วนของใบพัด จะทำการศึกษาอิทธิพลของความยาวใบพัด โดยใช้ค่าอัตราส่วนของความยาวใบพัด W ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด (W/r , TR) หรือ Twist Ratio ที่เท่ากับ 2, 4 และ 5 โดยการศึกษาอิทธิพลของ Twist Ratio นี้กำหนดให้เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดคงที่เท่ากับ $r = 0.036\text{m}$ จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ประกอบด้วย ส่วนที่ 1 นำเสนอเส้นกระแสการไหลหรือพฤติกรรมการไหลทั้งแบบ 2 มิติและ 3 มิติ เพื่อให้สามารถทำความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมการไหลผ่านแผ่นกั้นตัววี ส่วนที่ 2 นำเสนอการถ่ายเทความร้อนหรือพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนซึ่งแสดงในรูปของคอนทัวร์หรือการกระจายตัวของอุณหภูมิและ Nu ที่ค่า Re ต่าง ๆ

5.1.2.2 เส้นกระแสการไหล

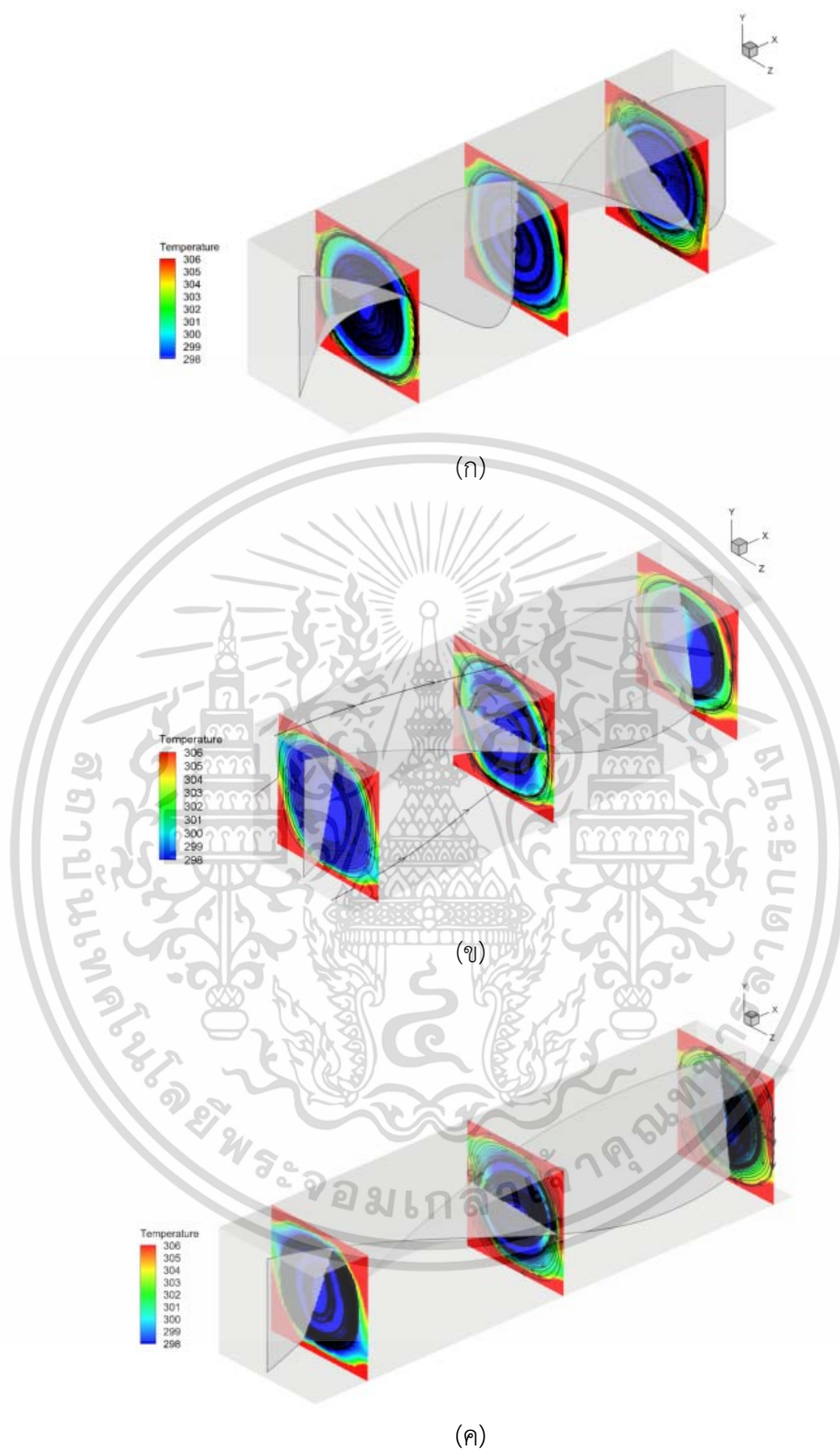
รูปที่ 5.2-5.3 แสดงเส้นกระแสการไหล 3 มิติ ตามแนวการไหล, เส้นกระแสการไหลบน และเส้นกระแสการไหลในระนาบขวางการไหล ที่ค่า (ก) $TR = 2$ (ข) $TR = 4$ (ค) $TR = 5$ ตามลำดับ พบว่าเมื่ออากาศไหลผ่านใบพัดเนื่องจะเกิดการหมุนวนตามใบพัด ซึ่งเมื่อ TR เพิ่มขึ้นกระแสความปั่นป่วนก็จะลดลงไปตามรูป 5.2

เมื่อพิจารณาเส้นกระแสการไหลบนระนาบขวางแนวการไหลดังรูปที่ 5.3 จะเห็นได้ว่าเส้นกระแสการไหลมีลักษณะคล้ายกันทุก TR คือเมื่ออากาศไหลผ่านแผ่นกั้นตัววีจะก่อให้เกิดการหมุนวนบริเวณด้านหลังของแผ่นกั้น ซึ่งการหมุนจะรุนแรงขึ้นเมื่อค่า TR เพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.2 เส้นกระแสการไหล 3 มิติ ตามแนวการไหลที่ค่า (ก) $TR = 2$ (ข) $TR = 4$ (ค) $TR = 5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 เส้นกระแสการไหลบนระนาบตามขวางการไหลที่ค่า (ก) $TR = 2$ (ข) $TR = 4$ (ค) $TR = 5$

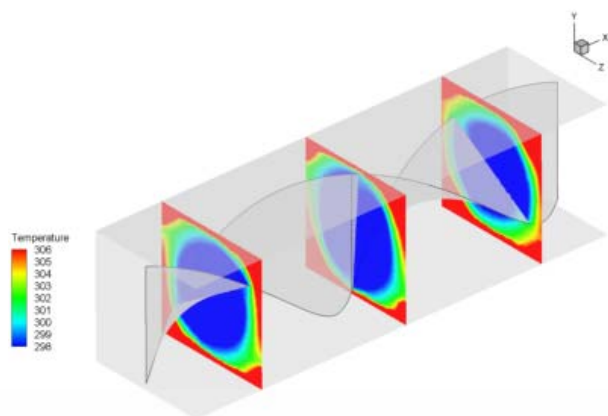
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2.2 การถ่ายเทความร้อน

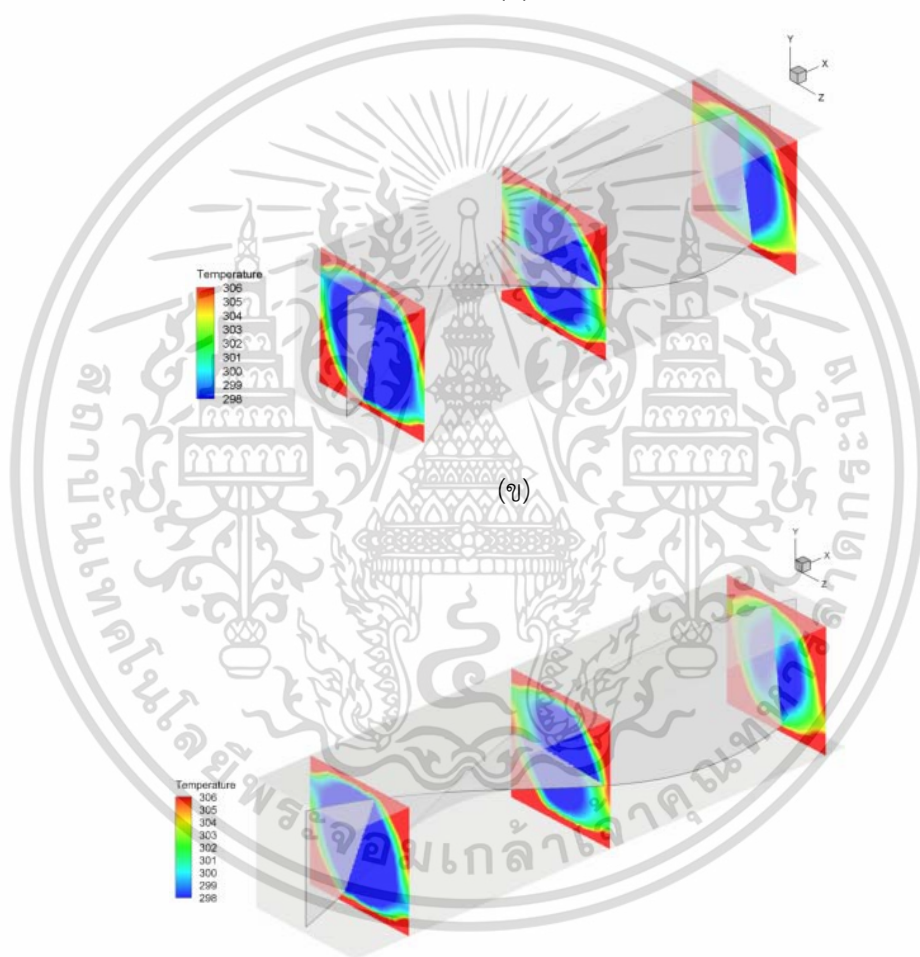
ค่าการถ่ายเทความร้อนหรือพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนพิจารณาในรูปของการกระจายของอุณหภูมิในระนาบขวางการไหล ดังรูปที่ 5.4 และการกระจายเลขนัสเซลล์ท์ที่บริเวณผิวท่อ ดังรูปที่ 5.36 ที่ค่า TR ต่าง ๆ

รูปที่ 5.4 แสดงถึงการกระจายอุณหภูมิในระนาบขวางการไหลที่ค่า (ก) $TR = 2$ (ข) $TR = 4$ (ค) $TR = 5$ เมื่อพิจารณาค่าการกระจายอุณหภูมิที่ระนาบขวางการไหลของ TR ทุกค่า จะเห็นได้ว่าจะมีลักษณะคล้ายๆกัน คือที่บริเวณใกล้ผนังท่อทั้ง 4 ด้าน อากาศยังคงมีอุณหภูมิสูงซึ่งจะสังเกตได้จากคอนทอร์สสีแดง และอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำหรือคอนทอร์สสีฟ้าและสีน้ำเงินซึ่งอยู่เฉพาะบริเวณตรงกลางไม่สามารถที่จะกระจายไปยังบริเวณใกล้ผิวท่อซึ่งเป็นผลมาจากการปั่นป่วนที่มีน้อย ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนของผิวท่อกับอากาศที่น้อยตามไป

รูปที่ 5.5 แสดงการกระจายของเลขนัสเซลล์ท์ที่ค่า ก) $TR = 2$ ข) $TR = 4$ ค) $TR = 5$ พบว่าเมื่อติดใบพัดแบบต่อเนื่องแล้วส่งผลให้อากาศเย็นภายในท่อเกิดการปั่นป่วนของกระแสการไหล และความปั่นป่วนของกระแสการไหลจะช่วยกระจายอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำไปยังบริเวณใกล้กับผนังท่อ ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศกับผนังท่อที่มีค่าสูงขึ้น โดยสังเกตจากคอนทอร์สสีแดงบริเวณผนังท่อซึ่งหมายถึงบริเวณมีการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด จะเห็นว่าที่ $TR = 5$ จะเกิดผิวแสดงแถบสีเขียวเป็นส่วนใหญ่และเกิดค่าการถ่ายเทความร้อนน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับ เมื่อเทียบกับค่า TR อื่นๆ และพบว่าที่ $TR = 2$ จะมีการถ่ายเทความร้อนมากที่สุดซึ่งสังเกตได้จากคอนทอร์สสีแดงที่มีพื้นที่มากที่สุด จึงสามารถสรุปได้ว่าเมื่อค่า TR เพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้น โดยพิจารณาได้จากการกระจายของเลขนัสเซลล์ท์บริเวณผิวท่อ



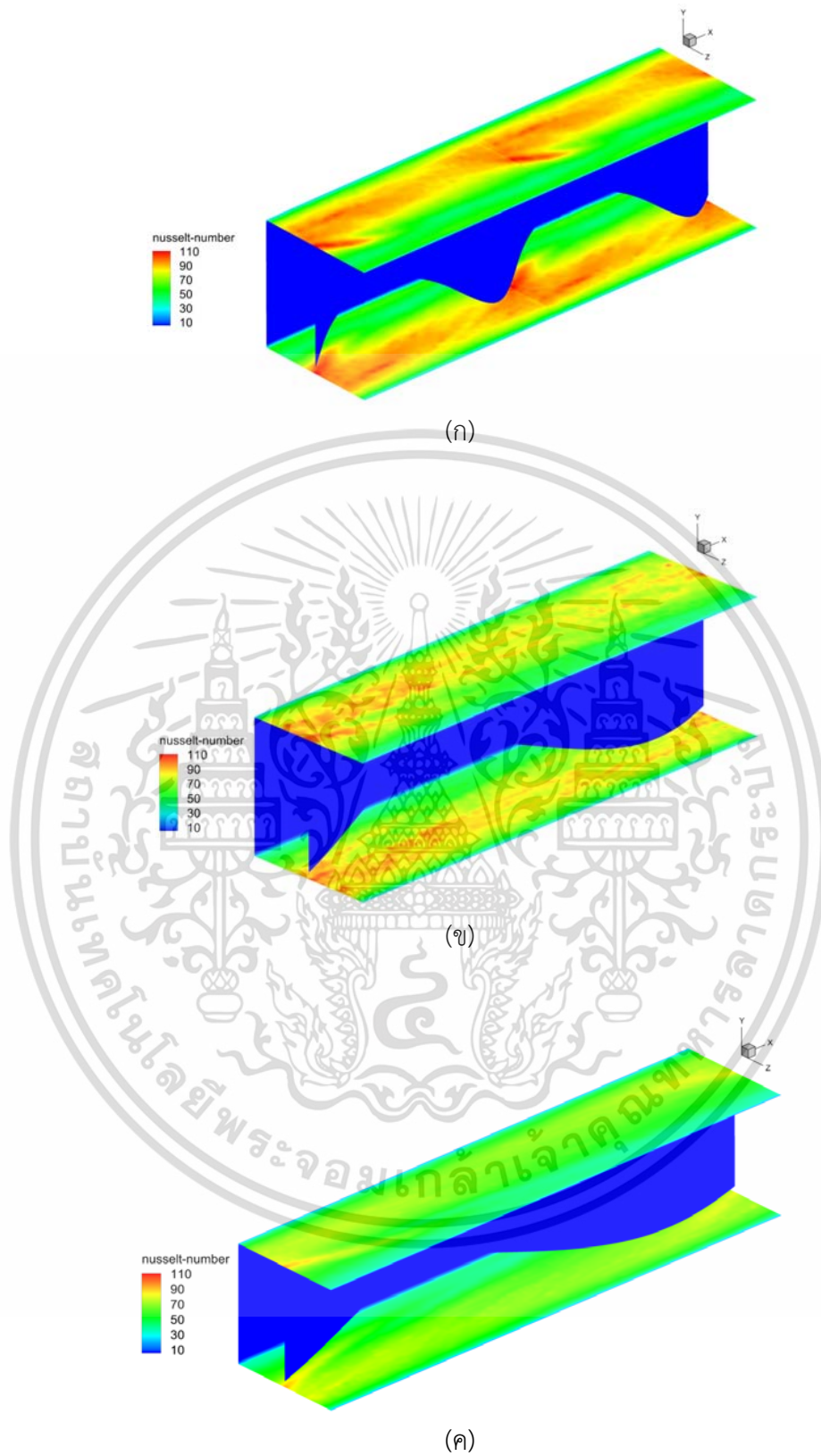
(ก)



(ข)

รูปที่ 5.4 การกระจายอุณหภูมิในระนาบขวางการไหลที่ค่า ก) $TR = 2$ ข) $TR = 4$ ค) $TR = 5$

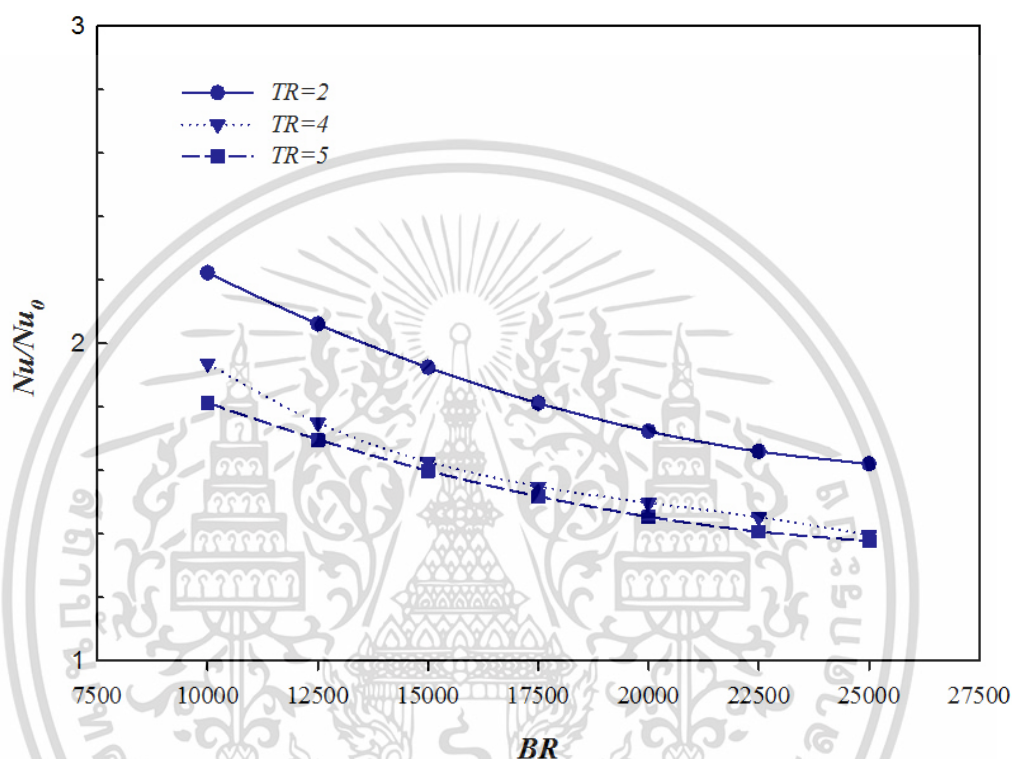
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 การกระจายของเลขนัสเซิลท์ที่ค่า ก) $TR = 2$ (ข) $TR = 4$ (ค) $TR = 5$

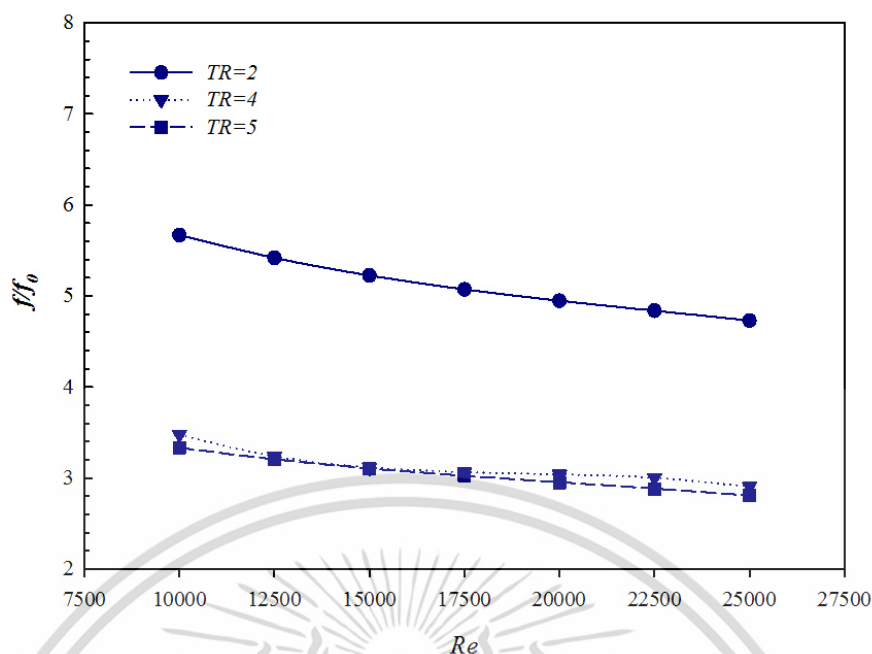
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราเลขนัสเซลล์ท์กับเลขเรย์โนลด์ของไบบิตแบบต่อเนื่องที่ค่า $TR=2$, 4 และ 5 พบว่าเมื่อ TR เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์ลดลง และเมื่อ Re เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์ลดลง และพบว่าที่ $TR=2$ จะมีค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์มากกว่า TR ทุกๆค่าที่ได้ทำการศึกษา สำหรับค่า $TR=5$, ที่ค่า $Re=10,000$ ให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์น้อยที่สุดคือ 1.37 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่า และค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์ที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 2.22 เท่า ที่ค่า $TR=2$, ที่ค่า $Re=25,000$ เมื่อเทียบกับท่อเปล่า



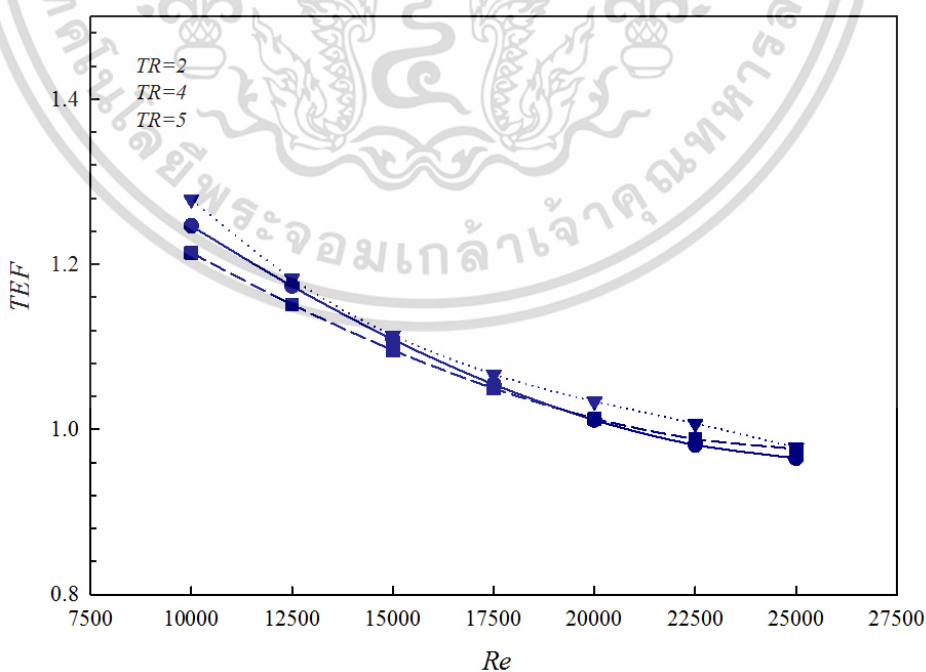
รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราเลขนัสเซลล์ท์กับเลขเรย์โนลด์ของไบบิตแบบต่อเนื่อง สำหรับ
ก) $TR = 2$ ข) $TR = 4$ ค) $TR = 5$

รูปที่ 5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ของไบบิตแบบต่อเนื่องที่ค่า $TR=2$, 4 และ 5 พบว่าเมื่อ TR เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเพิ่มลดลง และเมื่อ Re เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานลดลง และพบว่าที่ $TR=2$ จะมีค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมากกว่า TR ทุกๆค่าที่ได้ทำการศึกษา สำหรับค่า $TR=5$, ที่ค่า $Re=10,000$ ให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานน้อยที่สุดคือ 2.87 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่า และค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์ที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 5.67 เท่า ที่ค่า $TR=2$, ที่ค่า $Re=25,000$ เมื่อเทียบกับท่อเปล่า



รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ของใบปิด
แบบต่อเนื่อง สำหรับ ก) $TR = 2$ ข) $TR = 4$ ค) $TR = 5$

รูปที่ 5.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ของใบปิด
แบบต่อเนื่องที่ค่า $TR=2$, 4 และ 5 พบว่าที่ $TR=4$ จะให้ค่าค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมากกว่า TR
ทุกๆค่าวนซึ่งจะให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมากที่สุดเท่ากับ 1.22 เท่า ที่ $Re=10,000$



รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ของแผ่นกั้นตัววีแบบเต็ม

ตัวที่ค่า BR และ α ต่างๆสำหรับ ก) V-Downstream ข) V-Upstream

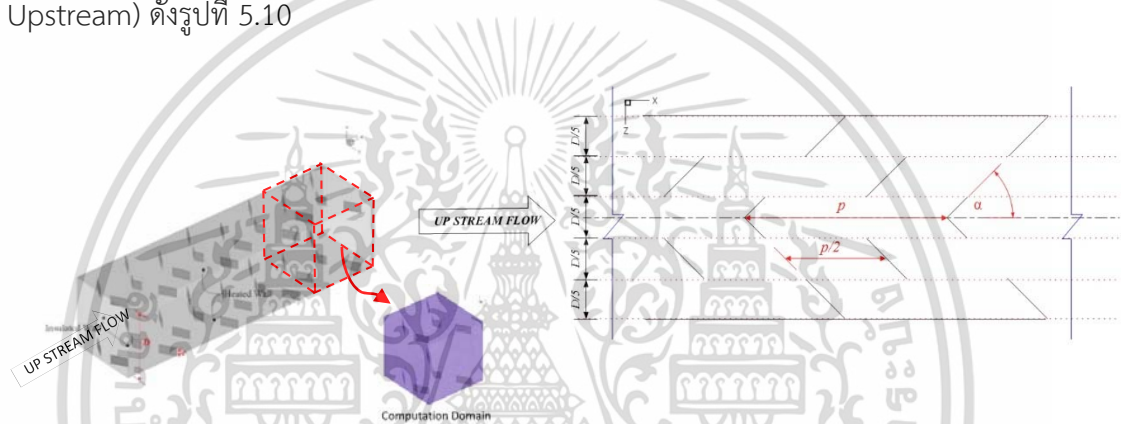
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตเป็นการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

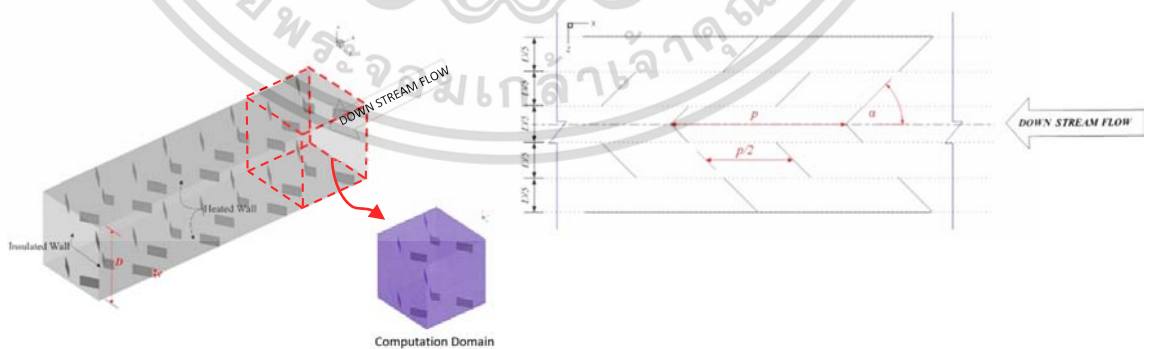
5.2 ตัวเพิ่มการปั่นป่วนการไหลแบบครีบบแยกรูปตัววี

5.2.1 แบบจำลองทางกายภาพ

ระบบที่ให้ความสนใจคือตัวเพิ่มการปั่นป่วนการไหลแบบครีบบแยกรูปตัววีติดอยู่บนผนังบนและล่างภายในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีอัตราส่วนระยะห่างระหว่างแผ่นกันต่อความสูงของท่อ (P/H , PR) หรือระยะพิทที่มีค่าคงที่เท่ากับ 1.0, 1.5 โดยแผ่นกันทำมุมปะทะการไหล $\alpha = 30^\circ$, 45° และ 60° มีอัตราส่วนระหว่างความสูงของแผ่นกันต่อความสูงของท่อ (b/H , BR) หรือค่าอัตราส่วนการบดอัดการไหลเท่ากับ 0.05, 0.075, 0.1, 0.125 และ 0.15 ความสูงของท่อหน้าตัดจัตุรัสที่ใช้ในการจำลองนี้มีค่า $W = 0.04$ m โดยพิจารณาการไหลเป็นแบบคาบ (periodic) และมีการจัดวางแผ่นกันแบบปลายวีชี้ตามกระแสการไหล (V-Downstream) ดังรูปที่ 5.9 และปลายวีชี้ทวนกระแสการไหล (V-Upstream) ดังรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.9 รูปทรงของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดตั้งแผ่นกันตัววีแบบเต็มตัวมีปลายวีชี้ตามกระแสการไหล (v-upstream) และโดเมนที่ใช้ในการคำนวณโดยคิดการไหลแบบ periodic ที่มีการสร้างตาข่ายสี่เหลี่ยมแบบไม่สม่ำเสมอ



รูปที่ 5.10 รูปทรงของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดตั้งแผ่นกันตัววีแบบเต็มตัวมีปลายวีชี้ทวนกระแสการไหล (v-downstream) และโดเมนที่ใช้ในการคำนวณโดยคิดการไหลแบบ periodic ที่มีการสร้างตาข่ายสี่เหลี่ยมแบบไม่สม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2 อิทธิพลของเลขเรย์โนลด์

ในส่วนของอิทธิพลของ Re ได้นำเสนอกรณีแผ่นกั้นตัววีแบบเต็มตัวสำหรับ $\alpha = 60^\circ$, $PR = 1.00$ และ $BR = 0.15$ ที่ค่า Re ต่าง ๆ และมีทิศทางการไหลแบบ V-Upstream โดยการนำเสนอผลจากอิทธิพลของ Re จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ประกอบด้วย ส่วนที่ 1 นำเสนอเส้นกระแสการไหลหรือพฤติกรรมการไหลทั้งแบบ 2 มิติและ 3 มิติ เพื่อให้สามารถทำความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมการไหลผ่านแผ่นกั้นตัววี ส่วนที่ 2 นำเสนอการถ่ายเทความร้อนหรือพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนซึ่งแสดงในรูปของคอนทัวร์หรือการกระจายตัวของอุณหภูมิและ Nu ที่ค่า Re ต่าง ๆ

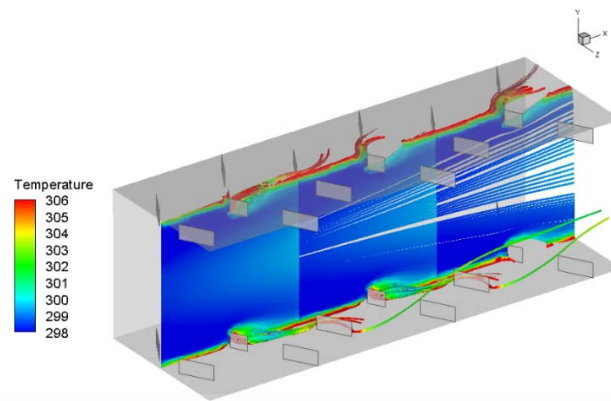
5.2.2.1 เส้นกระแสการไหล

ในส่วนของเส้นกระแสการไหลจะแสดงในรูปของเส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติ, เส้นกระแสการไหลบนระนาบตามการไหลและบนระนาบขวางการไหลเพื่อให้เห็นถึงลักษณะการไหลโดยทั่วไปของการไหลผ่านแผ่นกั้นตัววีแบบแยกตัว โดยทำการพล็อตเปรียบเทียบในตำแหน่งของระนาบเดียวกันที่ค่า Re ต่าง ๆ ซึ่งเส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติ จะทำให้เห็นความรุนแรงของการปั่นป่วนเมื่อของไหลไหลผ่านแผ่นกั้นตัววีแบบแยกตัว ส่วนเส้นกระแสการไหลบนระนาบตามการไหลจะช่วยในการอธิบายการหมุนวนย่อย ๆ ที่เกิดบริเวณด้านหลังของแผ่นกั้นตัววี และเส้นกระแสการไหลบนระนาบขวางการไหลจะช่วยในการอธิบายการหมุนวนที่เกิดขึ้นเมื่ออากาศไหลผ่านแผ่นกั้นตัววีแบบแยกในตำแหน่งที่แตกต่างกัน โดยเส้นกระแสการไหลทั้ง 3 รูปแบบนี้จะแสดงไว้ในรูปที่ 5.11-5.13

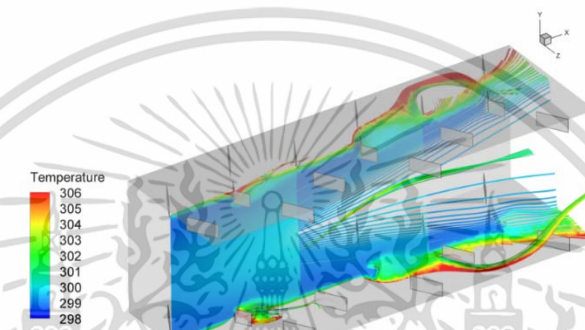
รูปที่ 5.11-5.13 แสดงเส้นกระแสการไหล 3 มิติ ตามแนวการไหล, เส้นกระแสการไหลบนระนาบตามแนวการไหล และเส้นกระแสการไหลในระนาบขวางการไหล ที่ค่า $\alpha = 60^\circ$, $BR = 0.15$, $PR = 1.0$ และ V-Upstream สำหรับ (ก) $Re = 10,000$ (ข) $Re = 15,000$ (ค) $Re = 25,000$ ตามลำดับ พบว่าเมื่ออากาศไหลผ่านแผ่นกั้นตัววีจะก่อให้เกิดการปั่นป่วนขึ้น โดยเมื่อค่า Re เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้การปั่นป่วนรุนแรงขึ้นดังรูปที่ 5.3

เมื่อพิจารณาเส้นกระแสการไหลบนระนาบตามแนวการไหลดังรูปที่ 5.12 ซึ่งตำแหน่งของระนาบของทุก Re เป็นตำแหน่งเดียวกัน จะเห็นได้ว่าเส้นกระแสการไหลมีลักษณะคล้ายกันทุก Re คือเมื่ออากาศไหลผ่านแผ่นกั้นตัววีจะก่อให้เกิดการหมุนวนบริเวณด้านหลังของแผ่นกั้น

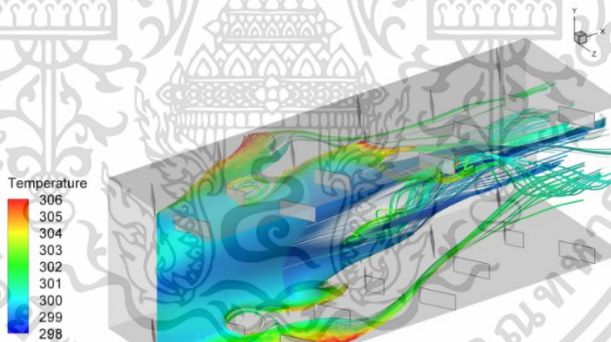
สำหรับเส้นกระแสการไหลบนระนาบขวางแนวการไหลแสดงไว้ในรูปที่ 5.13 ซึ่งตำแหน่งของระนาบทั้ง 5 ระนาบของทุก Re เป็นตำแหน่งเดียวกัน จะพบว่าทุก Re คือเมื่ออากาศไหลผ่านแผ่นกั้นตัวรูปตัววีแบบแยก จะทำให้เกิดแกนการหมุนวนหลัก 4 แกน และแกนการหมุนวนย่อย ๆ ที่บริเวณขอบท่อทั้ง 4 มุม และยังพบอีกว่าเมื่อ Re เพิ่มขึ้น จะมีการเกิดการปั่นป่วนที่แกนการหมุนวน บริเวณขอบท่อทั้ง 4 มุมเพิ่มขึ้น



(ก)



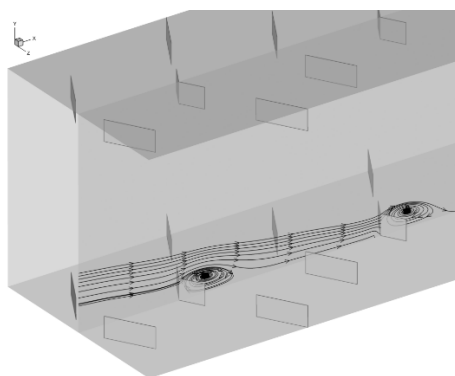
(ข)



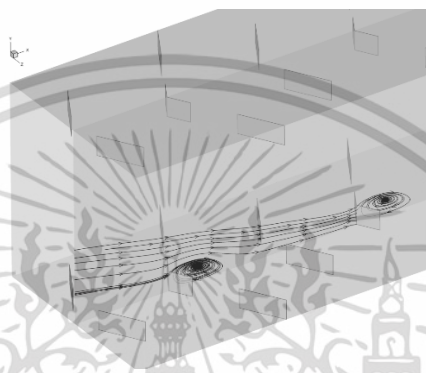
(ค)

รูปที่ 5.11 เส้นกระแสการไหล 3 มิติ ตามแนวการไหลที่ค่า $\alpha = 60^\circ$, $BR = 0.1$, $PR = 1.0$ และ V-Upstream สำหรับ (ก) $Re = 10,000$ (ข) $Re = 15,000$ (ค) $Re = 25,000$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



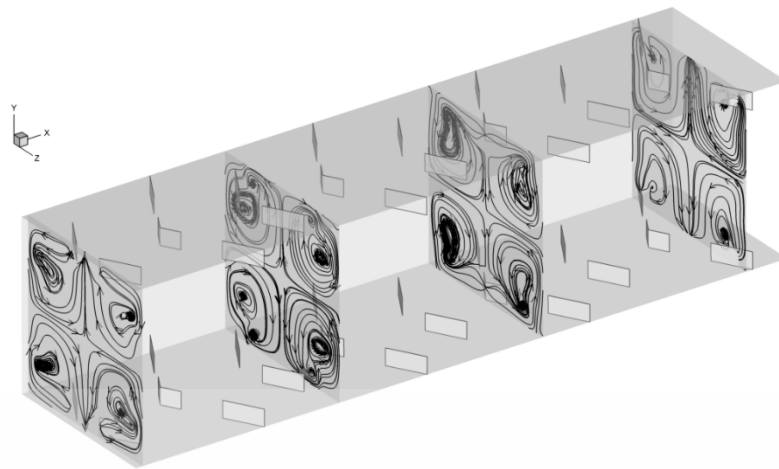
(ข)



(ค)

รูปที่ 5.12 เส้นกระแสการไหลบนระนาบตามแนวการไหลที่ค่า $\alpha = 60^\circ$, $BR = 0.1$, $PR = 1.0$ และ V -upstream สำหรับ (ก) $Re = 10,000$ (ข) $Re = 15,000$ (ค) $Re = 25,000$

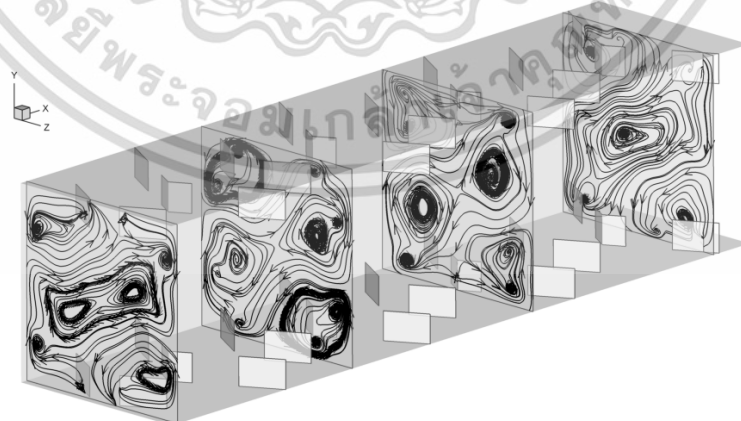
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 5.13 เส้นกระแสการไหลในระนาบขวางการไหลที่ค่า $\alpha = 60^\circ$, $BR = 0.1$, $PR = 1.0$ และ

V-Upstream สำหรับ (ก) $Re = 10,000$ (ข) $Re = 15,000$ (ค) $Re = 25,000$

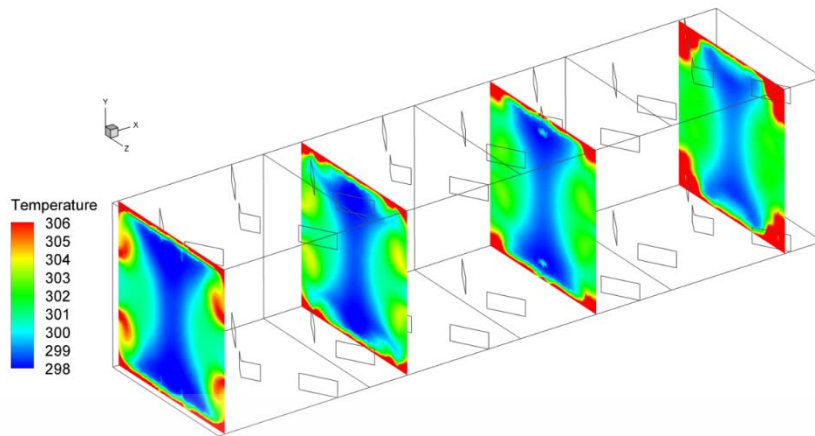
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้เห็นประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2.2 การถ่ายเทความร้อน

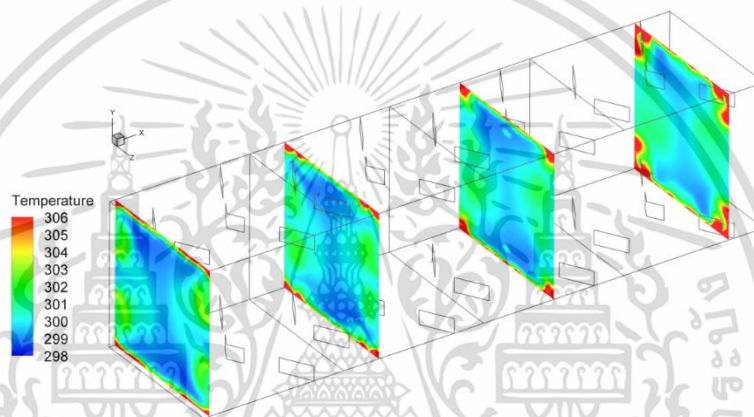
ค่าการถ่ายเทความร้อนหรือพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนพิจารณาในรูปของการกระจายของอุณหภูมิในระนาบขวางการไหล ดังรูปที่ 5.14 และการกระจายเลขนัสเซลล์ที่บริเวณผิวท่อ ดังรูปที่ 5.15 ที่ค่า Re ต่าง ๆ

รูปที่ 5.14 แสดงถึงการกระจายอุณหภูมิในระนาบขวางการไหลที่ค่า $\alpha = 60^\circ$, $BR = 0.1$, $PR = 1.0$ และ V-Upstream สำหรับ (ก) $Re = 10,000$ (ข) $Re = 15,000$ (ค) $Re = 25,000$ เมื่อพิจารณาค่าการกระจายอุณหภูมิที่ระนาบขวางการไหลสำหรับ $Re = 10,000$ จะเห็นได้ว่าที่บริเวณใกล้ผนังท่อทั้ง 4 ด้าน ยังคงมีอุณหภูมิสูงเมื่อเทียบกับบริเวณกลางท่อโดยลักษณะของการกระจายอุณหภูมิจะแยกเป็นชั้น ๆ อย่างเห็นได้ชัดเจน จึงสามารถสรุปได้ว่าที่ $Re = 10,000$ ค่าการถ่ายเทความร้อนระหว่างอุณหภูมิของอากาศที่อยู่กลางท่อกับผิวท่อยังไม่ค่อยดีมากนักเมื่อเทียบกับค่า Re อื่น ๆ ซึ่งเป็นผลมาจากการปั่นป่วนของ $Re = 10,000$ มีความรุนแรงน้อยกว่าที่ค่า Re อื่น ๆ เมื่อพิจารณาที่ $Re = 15,000$ และ $25,000$ ที่ค่า PR และ BR เดียวกัน จะเห็นได้ว่าเกิดการผสมผสานระหว่างอุณหภูมิของอากาศที่บริเวณใกล้ผิวท่อและบริเวณกลางท่อได้เป็นอย่างดี ซึ่งเป็นผลมาจากการปั่นป่วนที่รุนแรงมากขึ้น ช่วยทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้น และเมื่อ Re มีค่าเพิ่มมากขึ้นการผสมผสานระหว่างอุณหภูมิของอากาศที่บริเวณใกล้ผิวท่อและบริเวณกลางท่อก็มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นด้วย

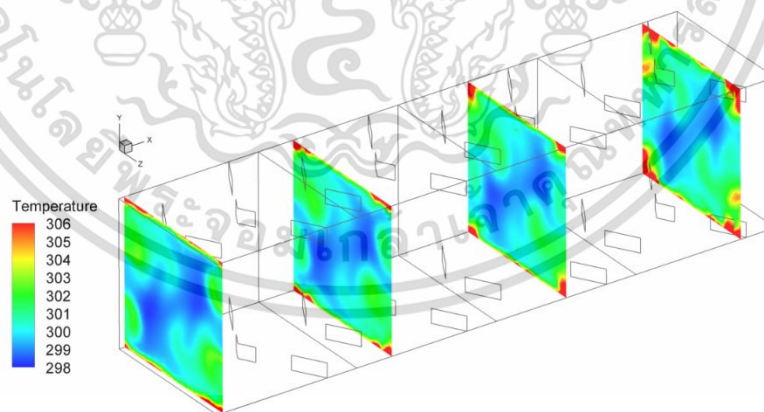
รูปที่ 5.15 แสดงการกระจายของเลขนัสเซลล์ที่ค่า $\alpha = 60^\circ$, $BR = 0.1$, $PR = 1.0$ และ V-Upstream สำหรับ (ก) $Re = 10,000$ (ข) $Re = 15,000$ (ค) $Re = 25,000$ พบว่าเมื่อติดแผ่นกันตัววีแล้วส่งผลให้เกิดการปั่นป่วนของกระแสการไหล และความปั่นป่วนของกระแสการไหลจะช่วยกระจายอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำไปยังบริเวณใกล้กับผนังท่อ ทำให้การถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศและผนังท่อที่มีค่าที่สูงขึ้น โดยสังเกตจากคอนทัวร์สีแดงบริเวณผนังท่อซึ่งหมายถึงบริเวณมีการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด จะเห็นว่าที่ $Re = 10,000$ จะเกิดสีเขียวเป็นส่วนใหญ่และเกิดค่าการถ่ายเทความร้อนน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับ $Re = 15,000$ และ $25,000$ เมื่อพิจารณาที่ $Re = 15,000$ จะเกิดแถบสีแดงหลังครีบอกอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากว่าการหมุนวนของการปั่นป่วนของกระแสการไหลบริเวณหลังครีบอกทำให้การปั่นป่วนดีขึ้น แสดงให้เห็นว่าที่ $Re = 12,000$ จะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนมากกว่าที่ $Re = 10,000$ และเมื่อพิจารณาที่ $Re = 25,000$ ซึ่งเกิดแถบสีแดงที่ผนังเป็นส่วนใหญ่ จึงสามารถสรุปได้ว่าเมื่อค่า Re เพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้น โดยพิจารณาได้จากการกระจายของเลขนัสเซลล์ที่บริเวณผิวท่อ แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อค่า Re เพิ่มมากขึ้นกลับพบว่าที่บริเวณด้านหลังของแผ่นกันยังคงให้แถบสีฟ้าและสีเขียวซึ่งแสดงค่าการถ่ายเทความร้อนที่น้อยกว่าส่วนอื่น ๆ



(ก)



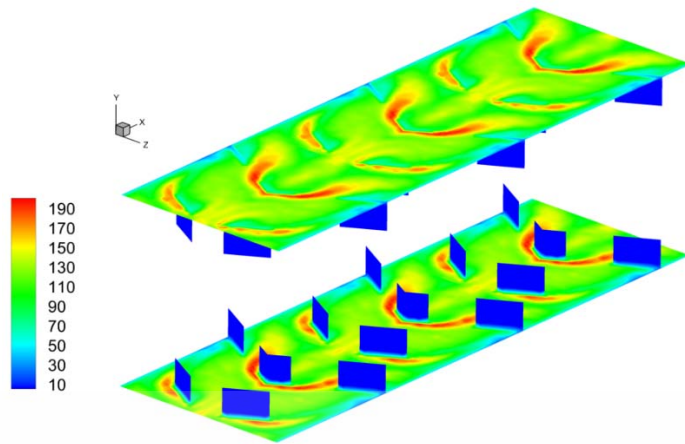
(ข)



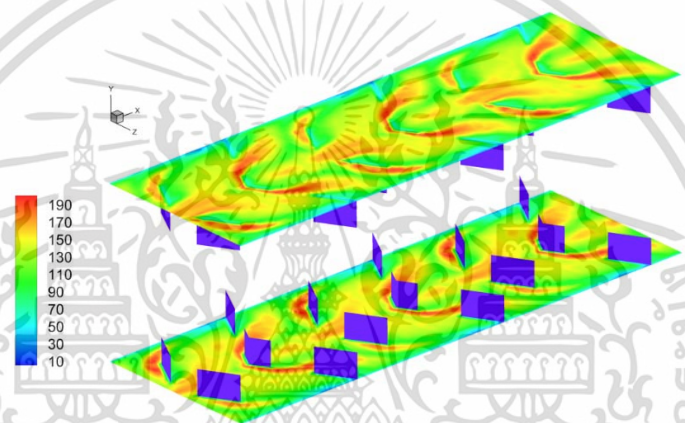
(ค)

รูปที่ 5.14 การกระจายอุณหภูมิในระนาบขวางการไหลที่ค่า $\alpha = 60^\circ$, $BR = 0.1$, $PR = 1.0$ และ V-Upwstream สำหรับ (ก) $Re = 10,000$ (ข) $Re = 15,000$ (ค) $Re = 25,000$

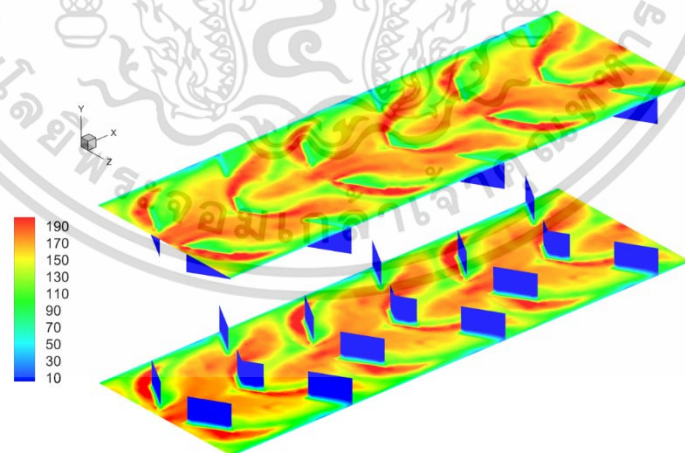
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 5.15 การกระจายของเลขน้สเชิลท์ที่ค่า $\alpha = 60^\circ$, $BR = 0.1$, $PR = 1.0$ และ V-Upstream
 สำหรับ (ก) $Re = 10,000$ (ข) $Re = 15,000$ (ค) $Re = 25,000$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.3 อิทธิพลของความสูงของแผ่นกั้น (อัตราส่วนการบล็อกการไหล, BR)

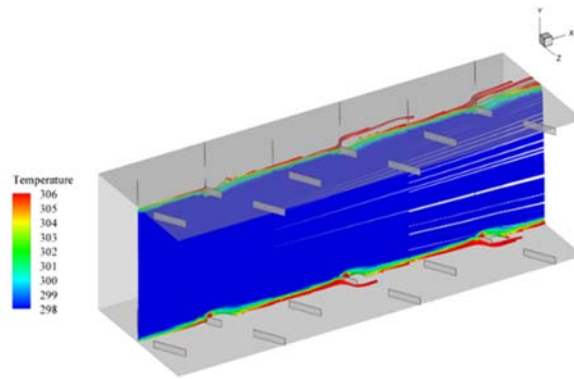
ในส่วนของอิทธิพลของ BR ได้นำเสนอกรณีแผ่นกั้นตัววีแบบเต็มตัวสำหรับ $\alpha = 60^\circ$, $PR = 1.00$ และ $Re = 12,000$ ที่ค่า $BR = 0.05, 0.075, 0.10, 0.125$ และ 0.15 มีทิศทางไหลแบบ V-Upstream โดยมีการนำเสนอผลจากอิทธิพลของ BR ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ประกอบด้วย ส่วนที่ 1 นำเสนอเส้นกระแสการไหลหรือพฤติกรรมของการไหลทั้งแบบ 2 มิติและ 3 มิติ เพื่อให้สามารถทำความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมของการไหลผ่านแผ่นกั้นตัววี ส่วนที่ 2 นำเสนอการถ่ายเทความร้อนหรือพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนซึ่งแสดงในรูปของคอนทัวร์หรือการกระจายตัวของอุณหภูมิและเลขนัสเซลท์

5.2.3.1 เส้นกระแสการไหล

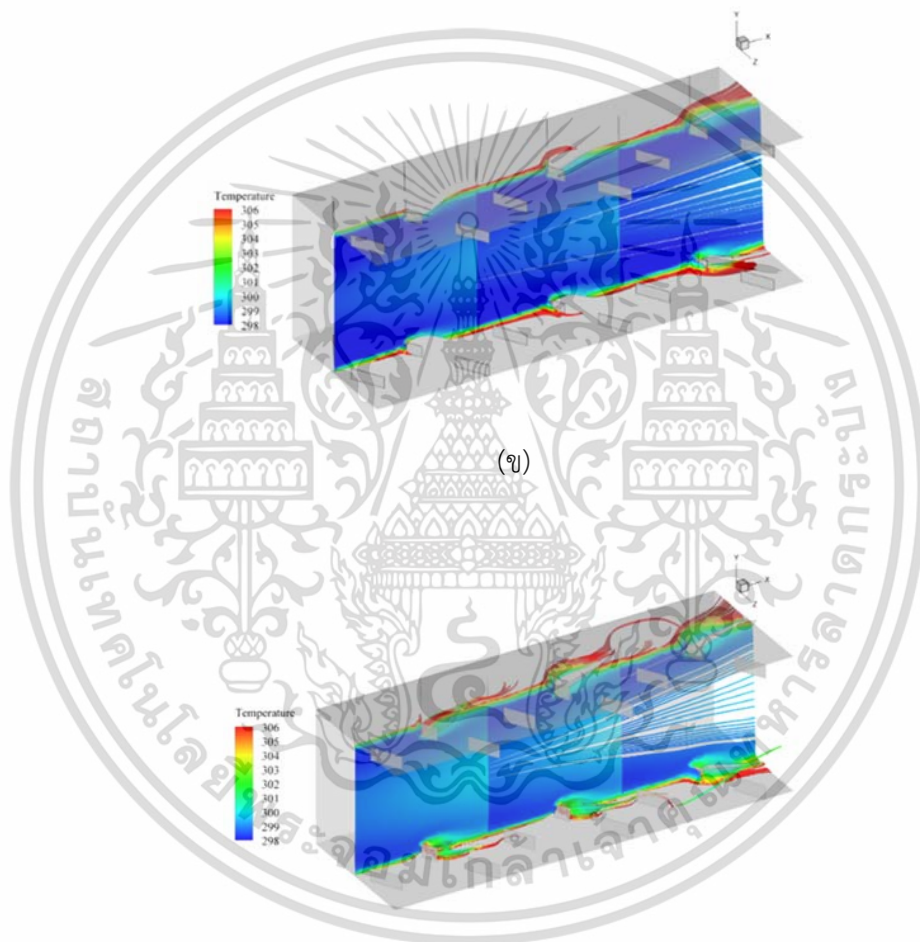
ในส่วนของเส้นกระแสการไหลจะแสดงในรูปของเส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติ และเส้นกระแสการไหลบนระนาบตามการไหลและบนระนาบขวางการไหลเพื่อให้เห็นถึงลักษณะการไหลโดยทั่วไปของการไหลผ่านแผ่นกั้นตัววี โดยทำการพล็อตเปรียบเทียบในตำแหน่งของระนาบเดียวกันที่ค่า BR ต่าง ๆ ซึ่งเส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติ จะทำให้เห็นความรุนแรงของการปั่นป่วนเมื่อของไหลไหลผ่านแผ่นกั้นตัววี ส่วนเส้นกระแสการไหลบนระนาบตามการไหลจะช่วยในการอธิบายการหมุนวนย่อย ๆ ที่เกิดบริเวณด้านหลังของแผ่นกั้นตัววี โดยเส้นกระแสการไหลทั้ง 2 รูปแบบนี้จะแสดงไว้ในรูปที่ 5.16 และ 5.17

รูปที่ 5.16-5.17 แสดงเส้นกระแสการไหล 3 มิติ ตามแนวการไหล และเส้นกระแสการไหลบนระนาบตามแนวการไหล ที่ค่า $\alpha = 60^\circ$, $PR = 1.0$, $Re = 12,500$ และ V-upstream สำหรับ (ก) $BR = 0.05$ (ข) $BR = 0.075$ (ค) $BR = 0.10$ (ง) $BR = 0.125$ (จ) $BR = 0.15$ พบว่าเมื่ออากาศไหลผ่านแผ่นกั้นตัววีจะก่อให้เกิดการปั่นป่วนขึ้น ซึ่งจากรูปที่ 5.8 พบว่าที่ค่า $BR = 0.05$ จะมีการปั่นป่วนที่มีความรุนแรงน้อยที่สุด และเมื่อค่า BR เพิ่มขึ้น ส่งผลให้การปั่นป่วนมีความรุนแรงมากยิ่งขึ้น โดยที่ค่า $BR = 0.15$ พบว่าเกิดการปั่นป่วนที่รุนแรงมากที่สุด

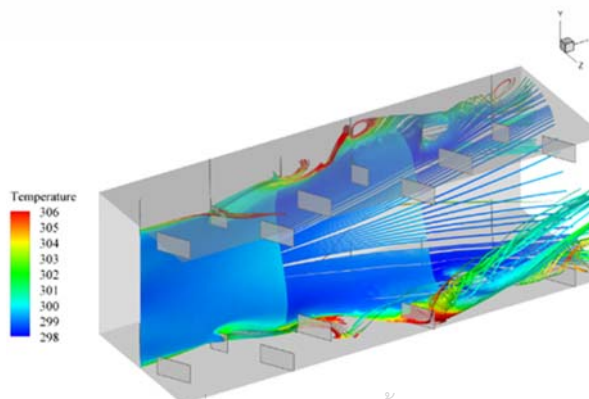
เมื่อพิจารณาเส้นกระแสการไหลบนระนาบตามแนวการไหลดังรูปที่ 5.16 ซึ่งตำแหน่งของระนาบของทุก Re เป็นตำแหน่งเดียวกัน จะเห็นได้ว่าเส้นกระแสการไหลมีลักษณะคล้ายกันทุก BR คือเมื่ออากาศไหลผ่านแผ่นกั้นตัววีจะก่อให้เกิดการหมุนวนบริเวณด้านหลังของแผ่นกั้น ซึ่งเมื่อ BR เพิ่มขึ้นความรุนแรงของการไหลแบบหมุนวนก็จะเพิ่มขึ้นตาม



(ก)



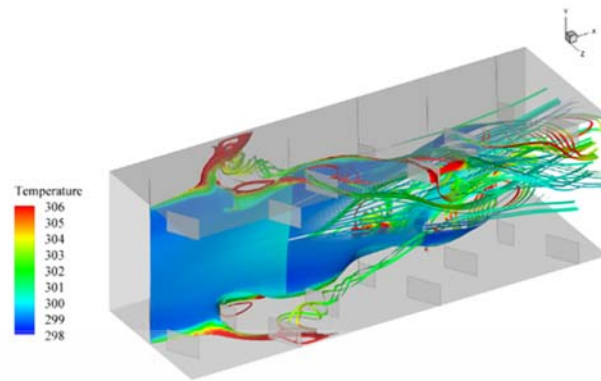
(ข)



(ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

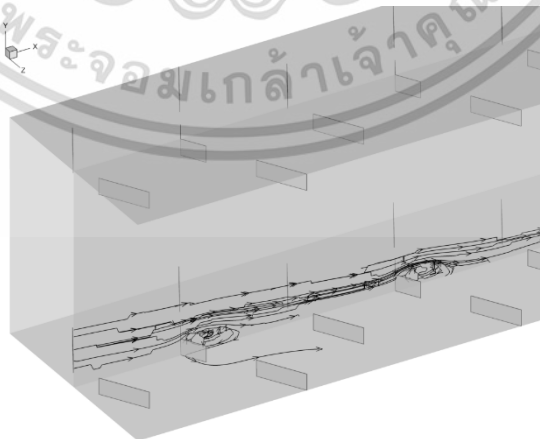
(ง)



(จ)

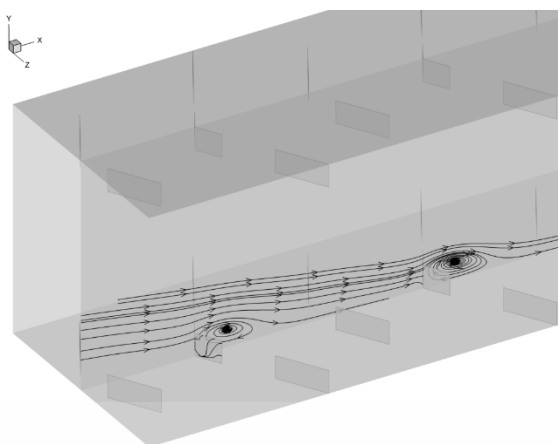
รูปที่ 5.16 เส้นกระแสการไหล 3 มิติ ตามแนวการไหลที่ค่า $\alpha = 60^\circ$, $PR = 1.0$, $Re = 12,500$ และ V-upstream สำหรับ (ก) $BR = 0.05$ (ข) $BR = 0.075$ (ค) $BR = 0.10$ (ง) $BR = 0.125$ (จ) $BR = 0.15$

(ก)



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)



(จ)

รูปที่ 5.17 เส้นกระแสการไหลบนระนาบตามแนวการไหลที่ค่า $\alpha = 60^\circ$, $PR = 1.0$, $Re = 12,500$ และ V -upstream สำหรับ (ก) $BR = 0.05$ (ข) $BR = 0.075$ (ค) $BR = 0.10$ (ง) $BR = 0.125$ (จ) $BR = 0.15$

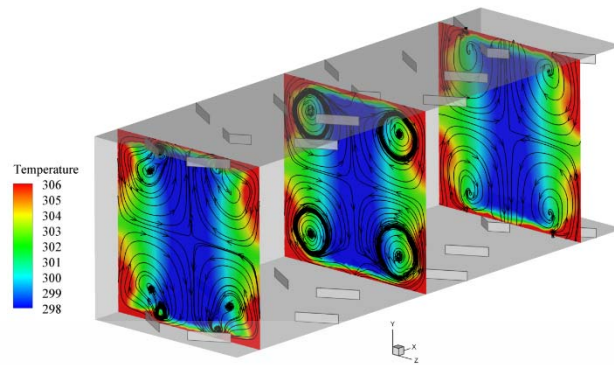
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.3.2 การถ่ายเทความร้อน

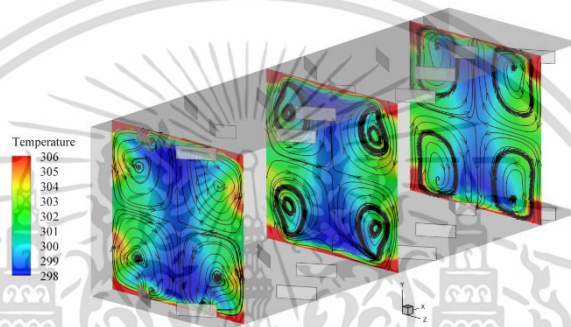
ค่าการถ่ายเทความร้อนหรือพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนพิจารณาในรูปของการกระจายของอุณหภูมิในระนาบขวางการไหล ดังรูปที่ 5.18 และการกระจายของเลขนัสเซลล์ท์ที่บริเวณผิวท่อ ดังรูปที่ 5.19 ที่ค่า $BR = 0.05, 0.075, 0.1, 0.125$ และ 0.15

รูปที่ 5.18 แสดงถึงการกระจายอุณหภูมิในระนาบขวางการไหลที่ค่า $\alpha = 60^\circ$, $PR = 1.0$, $Re = 12,500$ และ V -Upstream สำหรับ (ก) $BR = 0.05$ (ข) $BR = 0.075$ (ค) $BR = 0.1$ (ง) $BR = 0.125$ และ (จ) $BR=0.15$ เมื่อพิจารณาค่าการกระจายอุณหภูมิที่ระนาบขวางการไหลสำหรับ $BR = 0.05$ จะเห็นได้ว่าที่บริเวณใกล้ผนังท่อทั้ง 4 ด้าน อากาศยังคงมีอุณหภูมิสูงซึ่งจะสังเกตได้จากคอนทัวร์สีแดง ซึ่งเป็นผลมาจากการปั่นป่วนที่มีความรุนแรงน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับค่า BR อื่นๆ ดังรูปที่ 5.8 (ก) ทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศและผิวท่อเกิดขึ้นได้ไม่ดีเมื่อเทียบกับค่า BR อื่นๆ แต่เมื่อพิจารณาที่ $BR = 0.075$ พบว่าอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำหรือคอนทัวร์สีฟ้าและสีน้ำเงินเริ่มมีการกระจายไปยังบริเวณใกล้ผิวท่อมากขึ้นอันเป็นผลมาจากการปั่นป่วนที่มีความรุนแรงมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามยังปรากฏอากาศที่มีอุณหภูมิสูงหรือคอนทัวร์สีแดงอยู่บริเวณมุมของท่อ และพบว่าที่ค่า $BR = 0.125$ และ 0.15 คอนทัวร์สีแดงเริ่มลดน้อยลงและอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำหรือคอนทัวร์สีฟ้าและสีน้ำเงินได้กระจายไปยังบริเวณใกล้ผิวท่อมากขึ้น โดยเฉพาะที่ค่า $BR = 0.15$ เกิดการกระจายตัวของอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำหรือคอนทัวร์สีฟ้าและสีน้ำเงินไปยังบริเวณใกล้ผิวท่อมากที่สุดและมีคอนทัวร์สีแดงเกิดขึ้นน้อยที่สุดอันเนื่องมาจากการปั่นป่วนที่รุนแรงที่สุดนั่นเอง

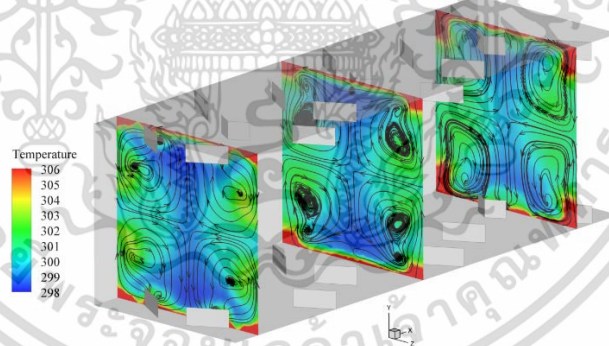
รูปที่ 5.19 แสดงการกระจายของเลขนัสเซลล์ท์ที่ค่า $\alpha = 60^\circ$, $PR = 1.0$, $Re = 12,500$ และ V -Upstream สำหรับ (ก) $BR = 0.05$ (ข) $BR = 0.075$ (ค) $BR = 0.1$, (ง) $BR = 0.125$ และ (จ) $BR=0.15$ พบว่าเมื่อติดแผ่นกั้นตัวแล้วส่งผลให้เกิดการปั่นป่วนของกระแสการไหล และความปั่นป่วนของกระแสการไหลจะช่วยกระจายอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำไปยังบริเวณใกล้กับผนังท่อ ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศกับผนังท่อที่มีค่าสูงขึ้น โดยสังเกตจากคอนทัวร์สีแดงบริเวณผนังท่อซึ่งหมายถึงบริเวณมีการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด จะเห็นว่าที่ $BR = 0.05$ จะเกิดผิวแสดงแถบสีเขียวเป็นส่วนใหญ่และเกิดค่าการถ่ายเทความร้อนน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับ เมื่อเทียบกับค่า BR อื่นๆ และพบว่าที่ $BR = 0.15$ จะมีการถ่ายเทความร้อนมากที่สุดซึ่งสังเกตได้จากคอนทัวร์สีแดงที่มีพื้นที่มากที่สุด จึงสามารถสรุปได้ว่าเมื่อค่า BR เพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้น โดยพิจารณาได้จากการกระจายของเลขนัสเซลล์ท์บริเวณผิวท่อ แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อค่า BR เพิ่มมากขึ้น กลับพบว่าที่บริเวณด้านหลังของแผ่นกั้นยังคงให้แถบคอนทัวร์สีเขียวซึ่งแสดงค่าการถ่ายเทความร้อนที่น้อยกว่าส่วนอื่น ๆ



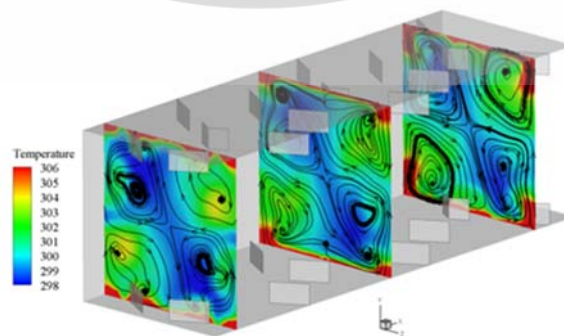
(ก)



(ข)

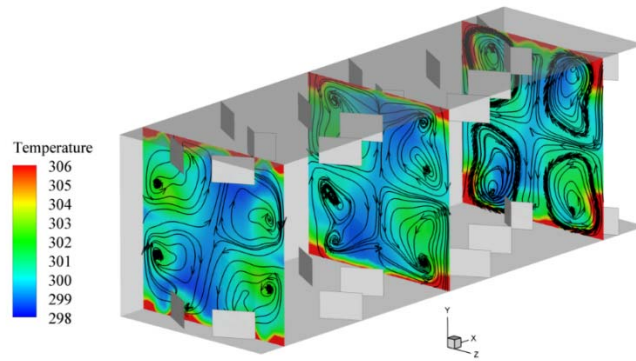


(ค)

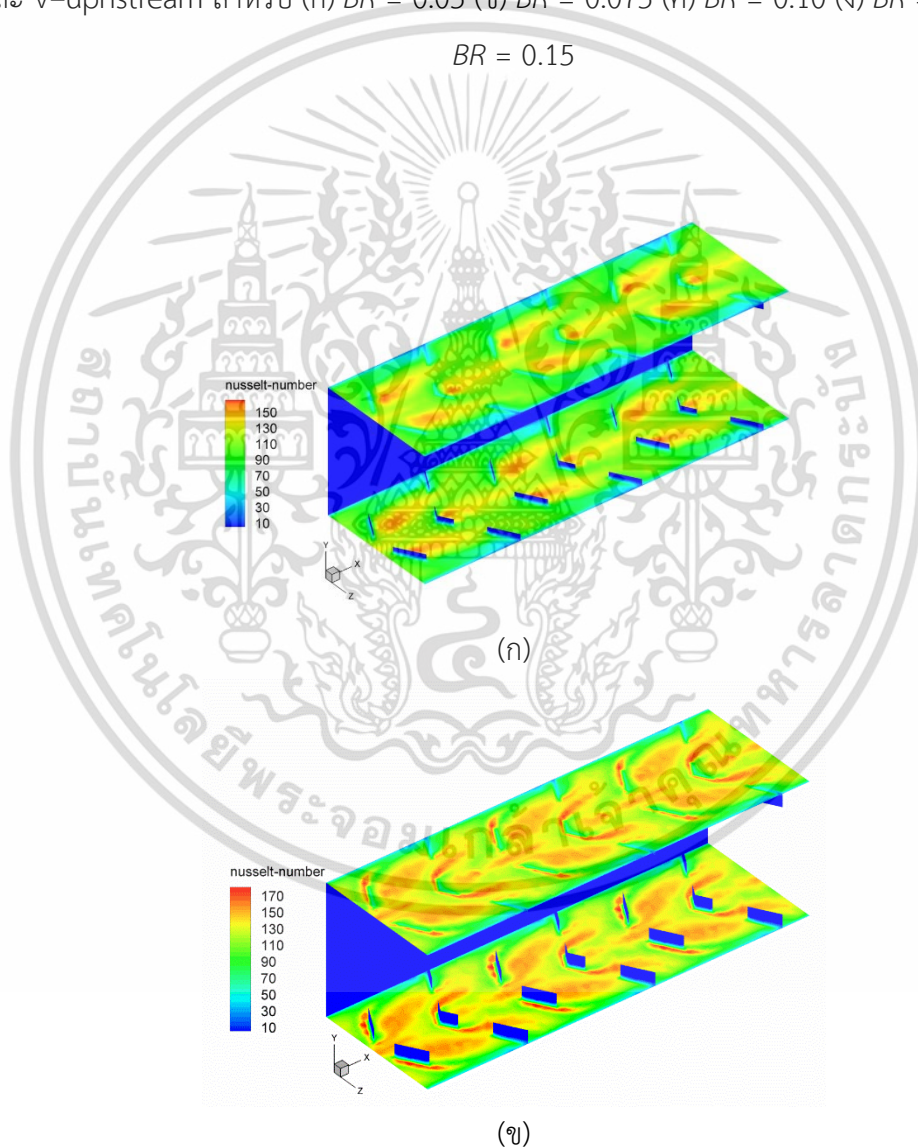


(ง)

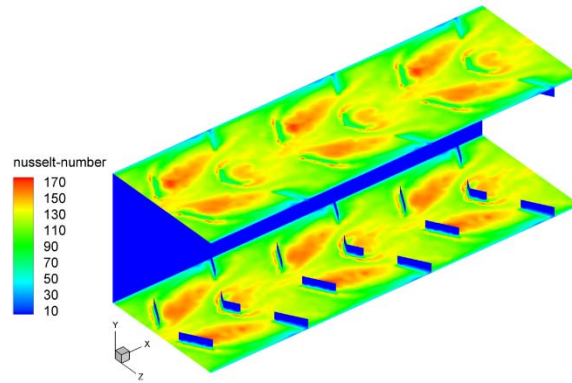
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



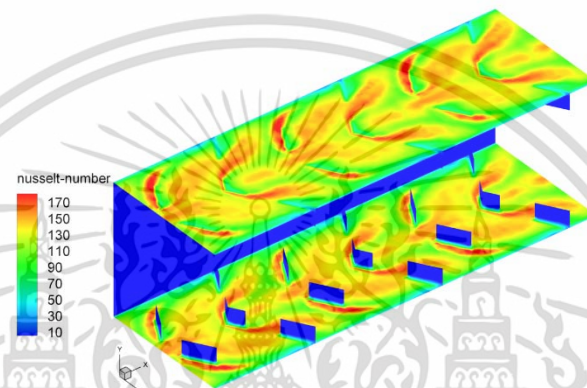
รูปที่ 5.18 การกระจายอุณหภูมิในระนาบขวางการไหลที่ค่า $\alpha = 60^\circ$, $PR = 1.0$, $Re = 12,500$ และ V-upstream สำหรับ (ก) $BR = 0.05$ (ข) $BR = 0.075$ (ค) $BR = 0.10$ (ง) $BR = 0.125$ (จ)



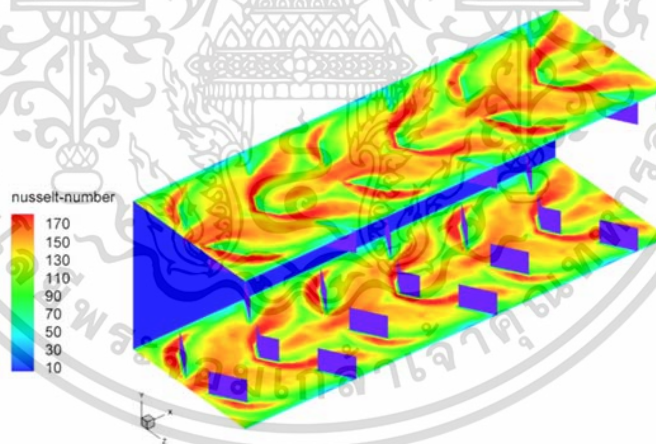
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)



(ง)



(จ)

รูปที่ 5.19 การกระจายของเลขนัสเซลท์ที่ค่า $\alpha = 60^\circ$, $PR = 1.0$, $Re = 12,500$ และ V-upstream สำหรับ (ก) $BR = 0.05$ (ข) $BR = 0.075$ (ค) $BR = 0.10$ (ง) $BR = 0.125$ (จ) $BR = 0.15$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.4 อิทธิพลของมุมปะทะ (α)

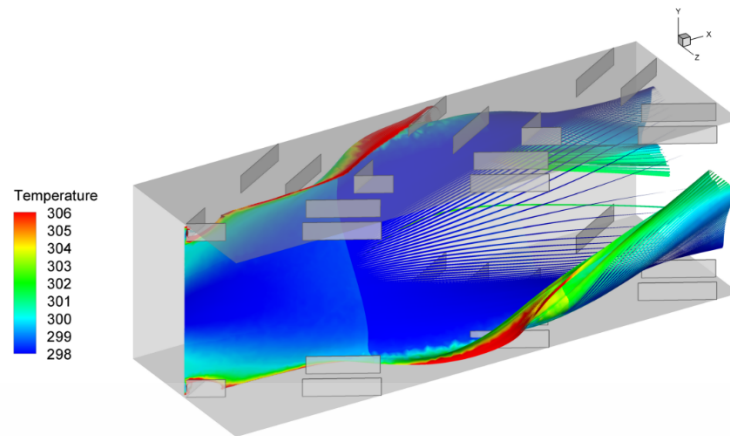
ในส่วนของอิทธิพลของ α ได้นำเสนอกรณีแผ่นกั้นตัววีแบบเต็มตัวสำหรับ $BR = 0.1$, $Re = 12,500$ และ $PR = 1.00$ ที่ค่า $\alpha = 30^\circ$, 45° และ 60° มีทิศทางการไหลแบบ V-Upstream โดยมีการนำเสนอผลจากอิทธิพลของ α ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ประกอบด้วย ส่วนที่ 1 นำเสนอเส้นกระแสการไหลหรือพฤติกรรมการไหลแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ เพื่อให้สามารถทำความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมการไหลผ่านแผ่นกั้นตัววี ส่วนที่ 2 นำเสนอการถ่ายเทความร้อนหรือพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนซึ่งแสดงในรูปของคอนทัวร์หรือการกระจายตัวของอุณหภูมิและเลขนัสเซลล์ท์

5.2.4.1 เส้นกระแสการไหล

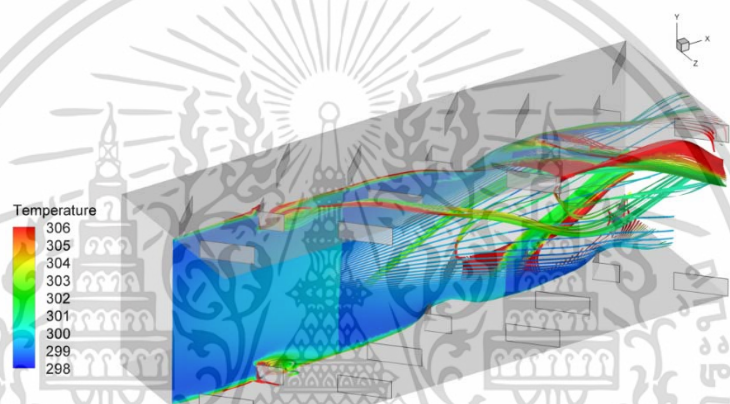
ในส่วนของเส้นกระแสการไหลจะแสดงในรูปของเส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติ และเส้นกระแสการไหลบนระนาบตามการไหลและบนระนาบขวางการไหลเพื่อให้เห็นถึงลักษณะการไหลโดยทั่วไปของการไหลผ่านแผ่นกั้นตัววีแบบแยก โดยทำการพล็อตเปรียบเทียบในตำแหน่งของระนาบเดียวกันที่ค่า $\alpha = 30^\circ$, 45° และ 60° ซึ่งเส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติ จะทำให้เห็นความรุนแรงของการปั่นป่วนเมื่อของไหลไหลผ่านแผ่นกั้นตัววี ส่วนเส้นกระแสการไหลบนระนาบตามการไหลจะช่วยในการอธิบายการหมุนวนย่อย ๆ ที่เกิดบริเวณด้านหลังของแผ่นกั้นตัววี โดยเส้นกระแสการไหลทั้ง 2 รูปแบบนี้จะแสดงไว้ในรูปที่ 5.20 และ 5.21

รูปที่ 5.20 แสดงเส้นกระแสการไหล 3 มิติ ตามแนวการไหลที่ค่า $\alpha = 30^\circ$, 45° และ 60° ที่ $BR = 0.1$, $PR = 1.0$, $Re = 12,500$ และ V-Upstream ซึ่งจากรูปพบว่าโครงสร้างการไหลตามแนวยาวของอากาศเมื่อไหลผ่านแผ่นกั้นรูปตัววีจะก่อให้เกิดการปั่นป่วนขึ้นและพบว่าที่มุมปะทะ α 45° จะมีการปั่นป่วนที่รุนแรงสูงสุดเมื่อเทียบกับมุมปะทะ $\alpha = 30^\circ$ และ 60°

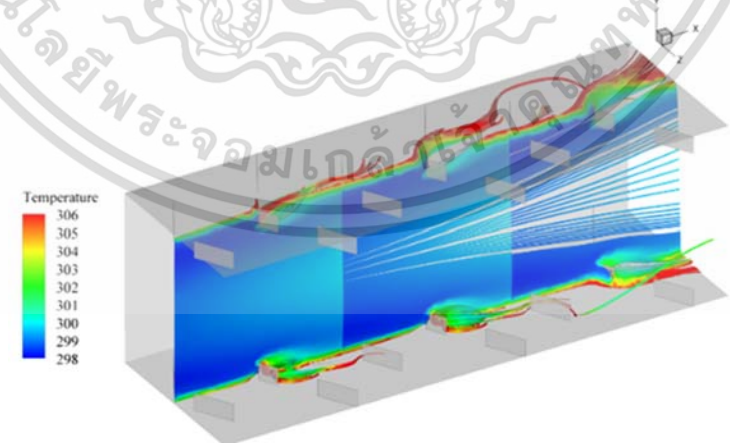
เมื่อพิจารณาเส้นกระแสการไหลบนระนาบตามแนวการไหลดังรูปที่ 5.21 ซึ่งตำแหน่งของระนาบทั้ง 3 ระนาบของ $\alpha = 30^\circ$ และ 45° เป็นตำแหน่งเดียวกัน จะเห็นได้ว่าเส้นกระแสการไหลของ $\alpha = 30^\circ$ และ 45° มีลักษณะคล้ายกัน คือเมื่ออากาศไหลผ่านแผ่นกั้นตัววีจะก่อให้เกิดการหมุนวนบริเวณด้านหลังของแผ่นกั้น



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 5.20 เส้นกระแสการไหล 3 มิติ ตามแนวการไหลที่ค่า (ก) $\alpha = 30^\circ$ (ข) $\alpha = 45^\circ$ (ค) $\alpha = 60^\circ$ ที่

$BR = 0.1$, $PR = 1.0$, $Re = 12,500$ และ V -Upstream

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.21 เส้นกระแสการไหลบนระนาบตามแนวการไหลที่ค่า (ก) $\alpha = 30^\circ$ (ข) $\alpha = 45^\circ$ (ค) $\alpha = 60^\circ$
 ที่ $BR = 0.1$, $PR = 1.0$, $Re = 12,500$ และ V -Upstream

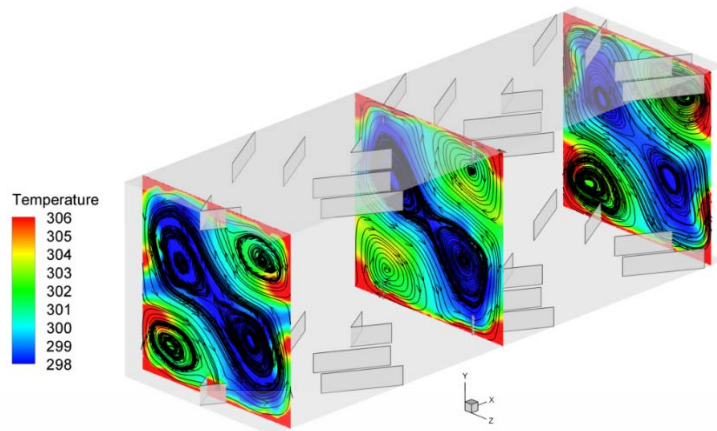
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.4.2 การถ่ายเทความร้อน

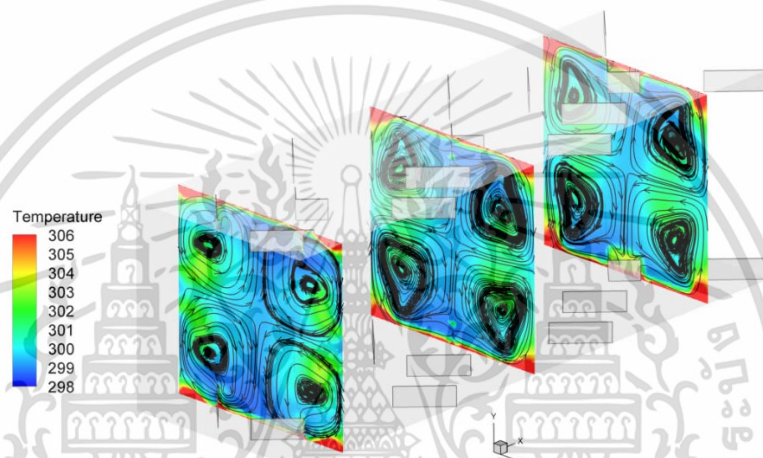
ค่าการถ่ายเทความร้อนหรือพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนพิจารณาในรูปของการกระจายของอุณหภูมิในระนาบขวางการไหล ดังรูปที่ 5.22 และการกระจายของเลขนัสเซลล์ท์ที่บริเวณผิวท่อ ดังรูปที่ 5.23 ที่ค่า $\alpha = 30^\circ$, 45° และ 60°

รูปที่ 5.22 แสดงการกระจายอุณหภูมิในระนาบขวางการไหลที่ค่า (ก) $\alpha = 30^\circ$ (ข) $\alpha = 45^\circ$ (ค) $\alpha = 60^\circ$ ที่ $BR = 0.1$, $PR = 1.0$, $Re = 12,500$ และ V -Upwstream ซึ่งตำแหน่งของระนาบทั้ง 3 ระนาบของ $\alpha = 30^\circ$, 45° และ 60° เป็นตำแหน่งเดียวกัน จะเห็นได้ว่าการกระจายอุณหภูมิในระนาบขวางการไหลของ $\alpha = 45^\circ$ และ 60° มีลักษณะคล้ายกัน เมื่อพิจารณาการกระจายอุณหภูมิที่ระนาบขวางการไหลสำหรับ $\alpha = 30^\circ$ จะเห็นได้ว่าที่บริเวณผนังของท่อมีคอนทิวริ่งสีแดงเข้มซึ่งหมายถึงอุณหภูมิร้อนแสดงให้เห็นว่าเป็นจุดที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ไม่ดี เมื่อเพิ่ม $\alpha = 45^\circ$ และ 60° พบว่าเกิดการผสมผสานกันของอากาศบริเวณกลางท่อและบริเวณผิวท่อได้ดีกว่า เห็นได้ชัดในระนาบที่ 2 ซึ่งมีสีแดงน้อยกว่า $\alpha = 30^\circ$ ซึ่งเป็นผลมาจากการปั่นป่วนที่รุนแรงกว่านั่นเอง

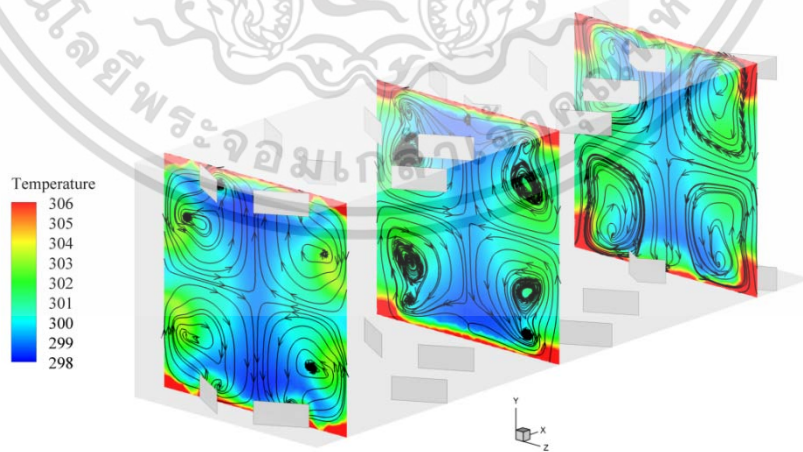
รูปที่ 5.23 แสดงการกระจายเลขนัสเซลล์ท์ที่ค่า (ก) $\alpha = 30^\circ$ (ข) $\alpha = 45^\circ$ (ค) $\alpha = 60^\circ$ ที่ $BR = 0.1$, $PR = 1.0$, $Re = 12,500$ และ V -Upstream พบว่าการกระจายเลขนัสเซลล์ท์ของ $\alpha = 45^\circ$ มีคอนทิวริ่งสีแดงเข้มที่ผนังมากที่สุด เนื่องจากที่ $\alpha = 45^\circ$ มีการปั่นป่วนของกระแสการไหลที่รุนแรงมากกว่า $\alpha = 30^\circ$ และ 60° ส่งผลให้เกิดการกระจายอุณหภูมิเย็นของภาคไปยังบริเวณใกล้เคียงมากกว่า $\alpha = 30^\circ$ และ 60° จึงทำให้ที่ $\alpha = 45^\circ$ มีการถ่ายเทความร้อนมากกว่าทุกมุม



(ก)

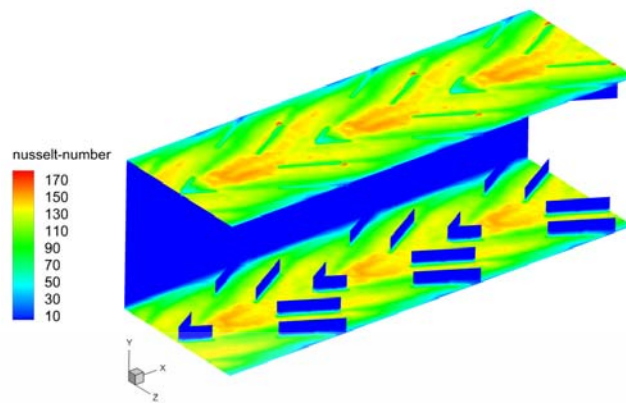


(ข)

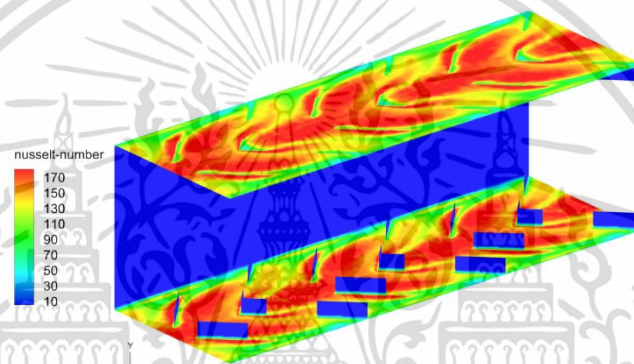


รูปที่ 5.22 การกระจายอุณหภูมิในระนาบขวางการไหลที่ค่า (ก) $\alpha = 30^\circ$ (ข) $\alpha = 45^\circ$ (ค) $\alpha = 60^\circ$ ที่ $BR = 0.1$, $PR = 1.0$, $Re = 12,500$ และ V-Upstream

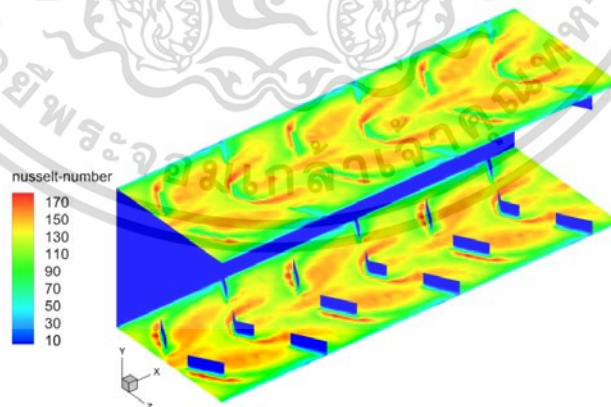
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



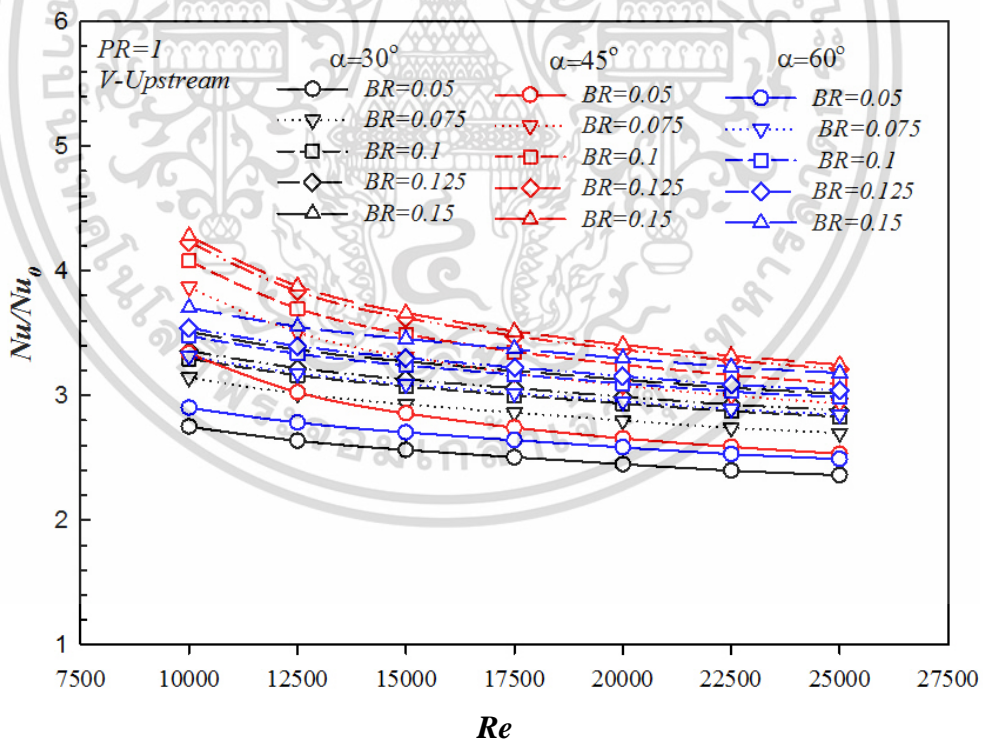
(ค)

รูปที่ 5.23 การกระจายเลขนัสเซิลท์ที่ค่า (ก) $\alpha = 30^\circ$ (ข) $\alpha = 45^\circ$ (ค) $\alpha = 60^\circ$ ที่ $BR = 0.1$, $PR = 1.0$, $Re = 12,500$ และ V-Upstream

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

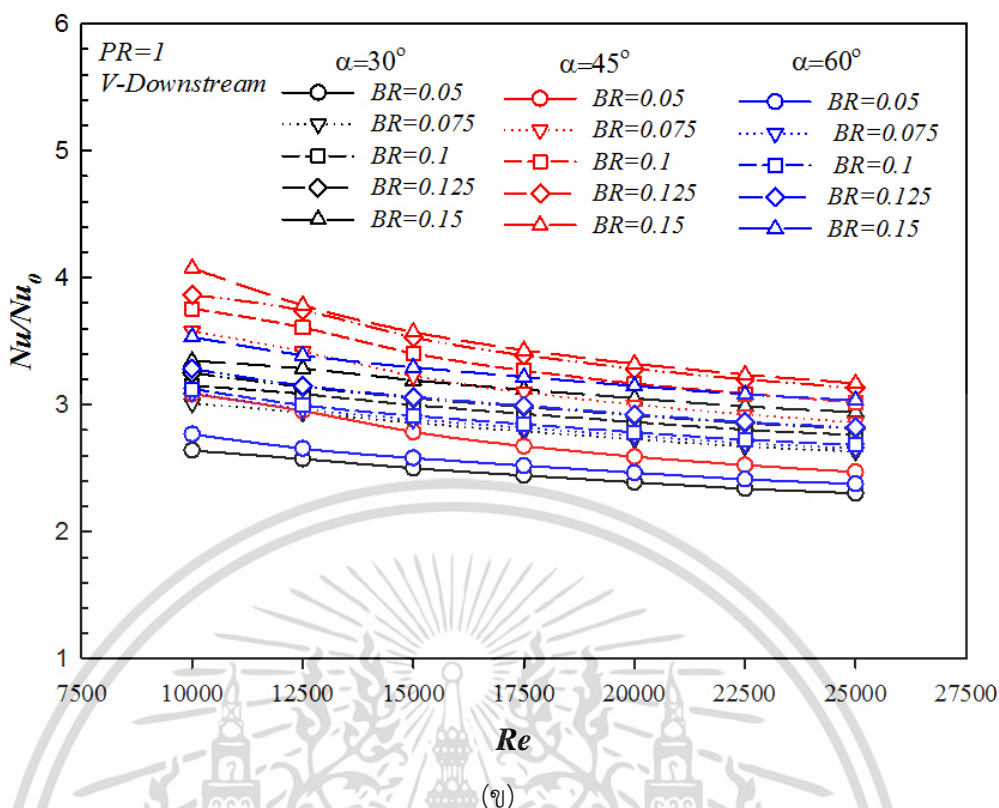
รูปที่ 5.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราเลขนัสเซลล์กับเลขเรย์โนลด์ของแผ่นกั้นตัววีแบบเต็มตัวที่ค่า BR และ α ต่างๆ สำหรับ (ก) V-Upstream (ข) V-Downstream เมื่อวิเคราะห์กรณี V- Upstream พบว่าเมื่อ BR เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์เพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกัน และเมื่อ Re เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ลดลง และพบว่าที่มุมปะทะ 45° จะมีค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ที่มากกว่ามุมปะทะทุกมุม และสำหรับค่า $BR=0.05$, $\alpha = 30^\circ$ ที่ค่า $Re=25,000$ ให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ที่น้อยที่สุดคือ 2.36 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่า และค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 4.28 เท่า ที่ค่า $\alpha = 45^\circ$, $BR=0.15$ และ $Re=10,000$ เมื่อเทียบกับท่อเปล่า

สำหรับกรณี V-Downstream พบว่าเมื่อ BR เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์เพิ่มมากขึ้น และเมื่อ Re เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ลดลง และพบว่าที่มุมปะทะ 45° จะมีค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ที่มากกว่ามุมปะทะทุกมุม และสำหรับค่า $BR=0.05$, $\alpha = 30^\circ$ ที่ค่า $Re=25,000$ ให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ที่น้อยที่สุดคือ 2.30 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่า และค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 4.07 เท่า ที่ค่า $\alpha = 45^\circ$, $BR=0.15$ และ $Re=10,000$ เมื่อเทียบกับท่อเปล่า



(ก)

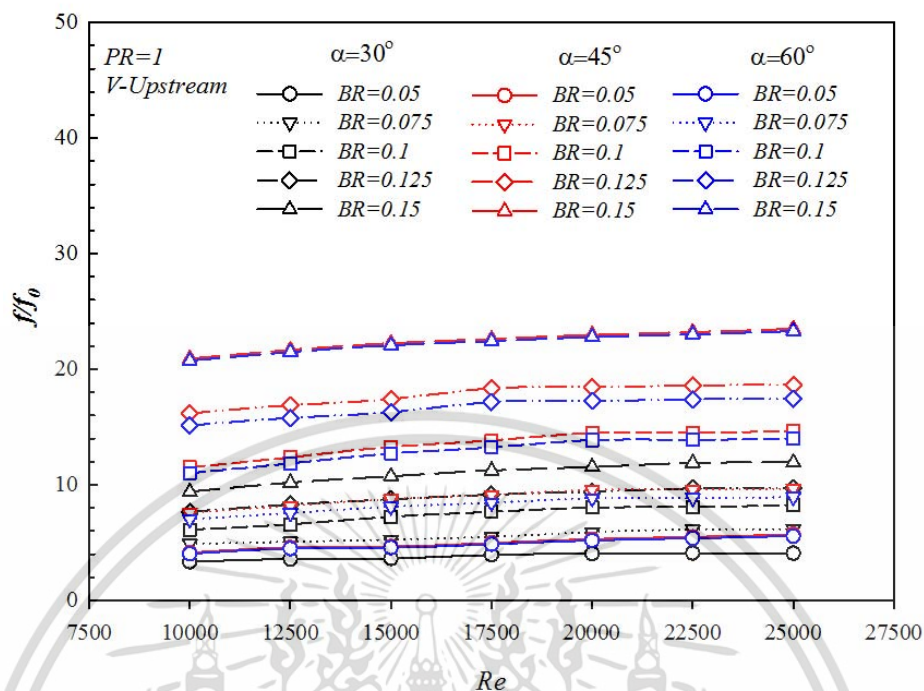
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



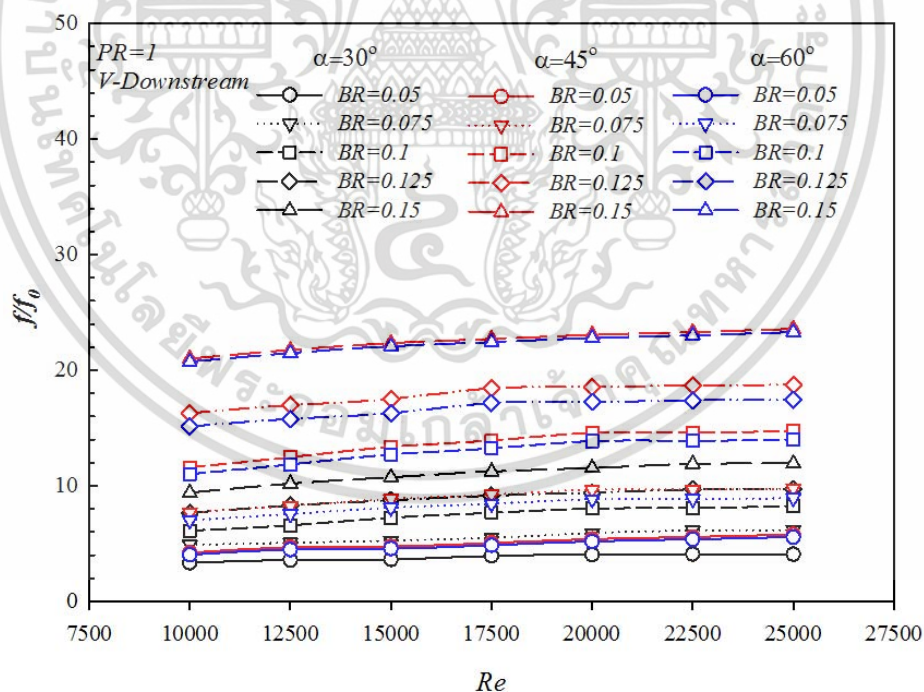
รูปที่ 5.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์ของแผ่นกั้นตัวแบบเติมตัวที่ค่า BR และ α ต่างๆ สำหรับ (ก) V-Upstream (ข) V-Downstream

รูปที่ 5.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ของแผ่นกั้นตัวแบบเติมตัวที่ค่า BR และ α ต่างๆ สำหรับ (ก) V-Upstream (ข) V-Downstream เมื่อวิเคราะห์กรณี V-Upstream พบว่าเมื่อ BR เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกัน และเมื่อ Re เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้น และพบว่าที่มุมปะทะ 45° จะมีค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมากกว่าทุกมุมปะทะ $BR=0.05$, $\alpha = 30^\circ$ ที่ค่า $Re=10,000$ ให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์น้อยที่สุดคือ 3.39 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่า และค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมากที่สุดมีค่าเท่ากับ 25.10 เท่า ที่ค่า $\alpha = 45^\circ$, $BR=0.15$ และ $Re=25,000$ เมื่อเทียบกับท่อเปล่า

สำหรับกรณี V-Downstream พบว่าเมื่อมุมปะทะการไหลเท่ากับ 45° จะมีค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมากกว่าทุกมุม สำหรับค่า $BR=0.05$, $\alpha = 30^\circ$ ที่ค่า $Re=10,000$ ให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานน้อยที่สุดคือ 3.34 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่า และค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 23.5 เท่า ที่ค่า $\alpha = 45^\circ$, $BR=0.15$ และ $Re=25,000$ เมื่อเทียบกับท่อเปล่า



(ก)



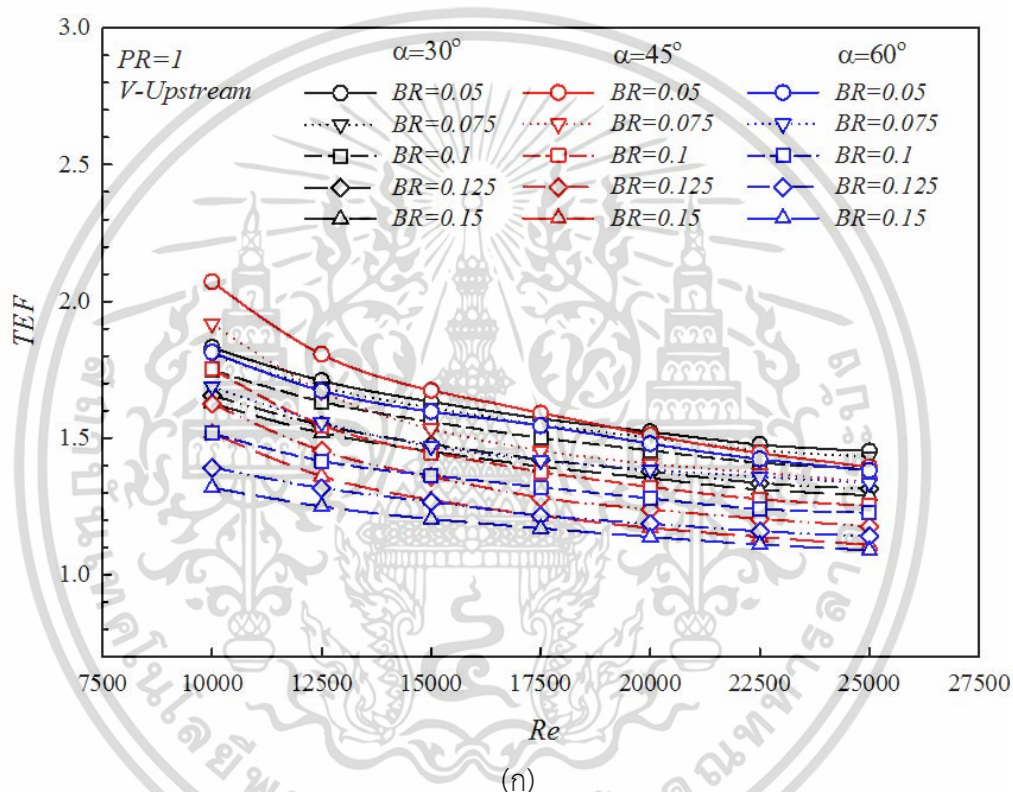
(ข)

รูปที่ 5.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ของแผ่นกั้นตัววีแบบเต็มตัวที่ค่า BR และ α ต่างๆ สำหรับ (ก) V-Upstream (ข) V-Downstream

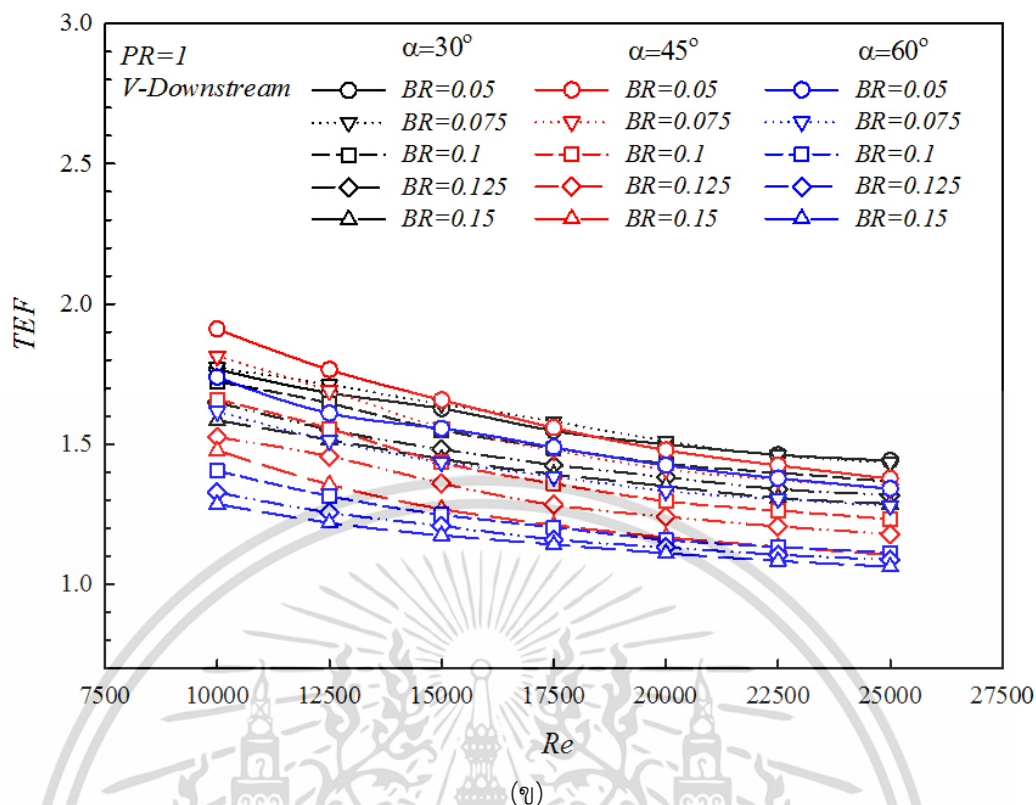
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ของแผ่นกั้นตัววีแบบแยกตัวที่ค่า BR และ α ต่างๆ สำหรับ (ก) V-Upstream (ข) V-Downstream เมื่อวิเคราะห์กรณี V-Upstream พบว่าเมื่อ Re เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเพิ่มขึ้นลดลง และพบว่าที่มุมปะทะ 45° ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงที่สุดคือ 2.07 ที่ค่า $BR=0.05$ และ $Re=10,000$

สำหรับกรณี V-Downstream พบว่าเมื่อ Re เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเพิ่มขึ้นลดลงเช่นกัน และพบว่าที่มุมปะทะ 45° ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงที่สุดคือ 1.91 ที่ค่า $BR=0.105$ และ $Re=10,000$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ของแผ่นกั้นตัววีแบบเต็มตัวที่ค่า BR และ α ต่างๆ สำหรับ (ก) V-Upstream (ข) V-Downstream

5.2.5 อิทธิพลของทิศทางการไหล

ในส่วนของอิทธิพลของทิศทางการไหลได้นำเสนอกรณีแผ่นกั้นตัววีแบบเต็มตัวสำหรับ $\alpha = 45^\circ$, $BR = 0.15$, $Re = 12,500$ และ $PR = 1.0$ โดยมีการนำเสนอผลจากอิทธิพลของทิศทางการไหลนั้นแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ประกอบด้วย ส่วนที่ 1 นำเสนอเส้นกระแสการไหลหรือพฤติกรรมการไหลแบบ 2 มิติ ในระนาบขวางการไหลและระนาบตามการไหล ส่วนที่ 2 นำเสนอการถ่ายเทความร้อนหรือพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนซึ่งแสดงในรูปของคอนทัวร์หรือการกระจายตัวของอุณหภูมิและเลขนัสเซลล์ท์

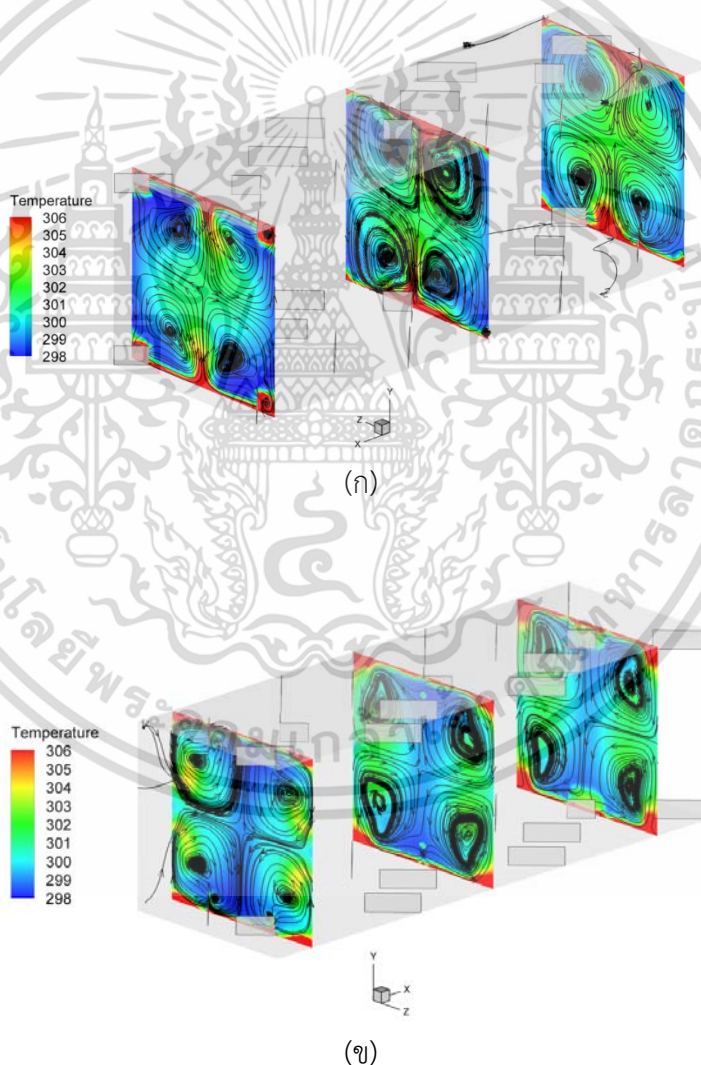
5.2.5.1 เส้นกระแสการไหล

ในส่วนของเส้นกระแสการไหลจะแสดงในรูปของเส้นกระแสการไหลแบบ 2 มิติ ประกอบด้วยเส้นกระแสการไหลบนระนาบตามการไหลและบนระนาบขวางการไหลเพื่อให้เห็นถึงความแตกต่างของความรุนแรงของการปั่นป่วนและการหมุนวนเมื่อของไหลไหลผ่านแผ่นกั้นตัว โดยเส้นกระแสการไหลทั้ง 2 รูปแบบนี้จะแสดงไว้ในรูปที่ 5.27 และ 5.28

รูปที่ 5.19 เส้นกระแสการไหลในระนาบขวางการไหลที่ค่า $\alpha = 45^\circ$, $BR = 0.15$, $PR = 1.0$ และ $Re = 12500$ สำหรับ (ก) V-Downstream (ข) V-Upstream ซึ่งจากรูปพบว่าทั้ง V-เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Downstream และ V-Upstream มีเส้นกระแสการไหลที่แบ่งการหมุนวนออกเป็น 4 แกนการหมุนวนหลัก เมื่อพิจารณาส่วนครึ่งที่ต่อต้านบนจะพบว่า ในกรณีของ V-Downstream จะมีการหมุนวนของกระแสการไหล 2 แกนการหมุนวนหลักซึ่งมีทิศทางการหมุนจากแผ่นกั้นขึ้นมาที่บริเวณผนัง เรียกว่า common-flow-up แต่กรณีของ V-Upstream จะมีการหมุนวนของกระแสการไหล 2 แกนการหมุนวนหลักซึ่งมีทิศทางการหมุนจากผนังที่ลงมายังแผ่นกั้น เรียกว่า common-flow-Down

เมื่อพิจารณาเส้นกระแสการไหลบนระนาบตามแนวการไหลดังรูปที่ 5.27 ซึ่งตำแหน่งของระนาบ เป็นตำแหน่งเดียวกัน พบว่าในกรณีของ V-Downstream ลักษณะของทิศทางการไหล เมื่อกระแสการไหลชนเข้ากับมุมปะทะ กระแสการไหลจะมีทิศทางพุ่งเข้าหาบริเวณตรงกลาง แต่ในกรณีของ V-Upstream พบว่าจะเกิดการหมุนวนที่บริเวณด้านหลังของแผ่นกั้น และทิศทางของการไหลของกระแสการไหลจะเห็นว่ามีทิศทางพุ่งเข้าหาผนังที่



รูปที่ 5.27 เส้นกระแสการไหลในระนาบขวางการไหลที่ค่า $\alpha = 45^\circ$, $BR = 0.15$, $PR = 1.0$ และ

$Re = 12,500$ สำหรับ (ก) V-Downstream (ข) V-Upstream

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.28 เส้นกระแสการไหลในระนาบตามแนวการไหลที่ค่า $\alpha = 45^\circ$, $BR = 0.15$, $PR = 1.0$ และ $Re = 12,500$ สำหรับ (ก) V-Downstream (ข) V-Upstream

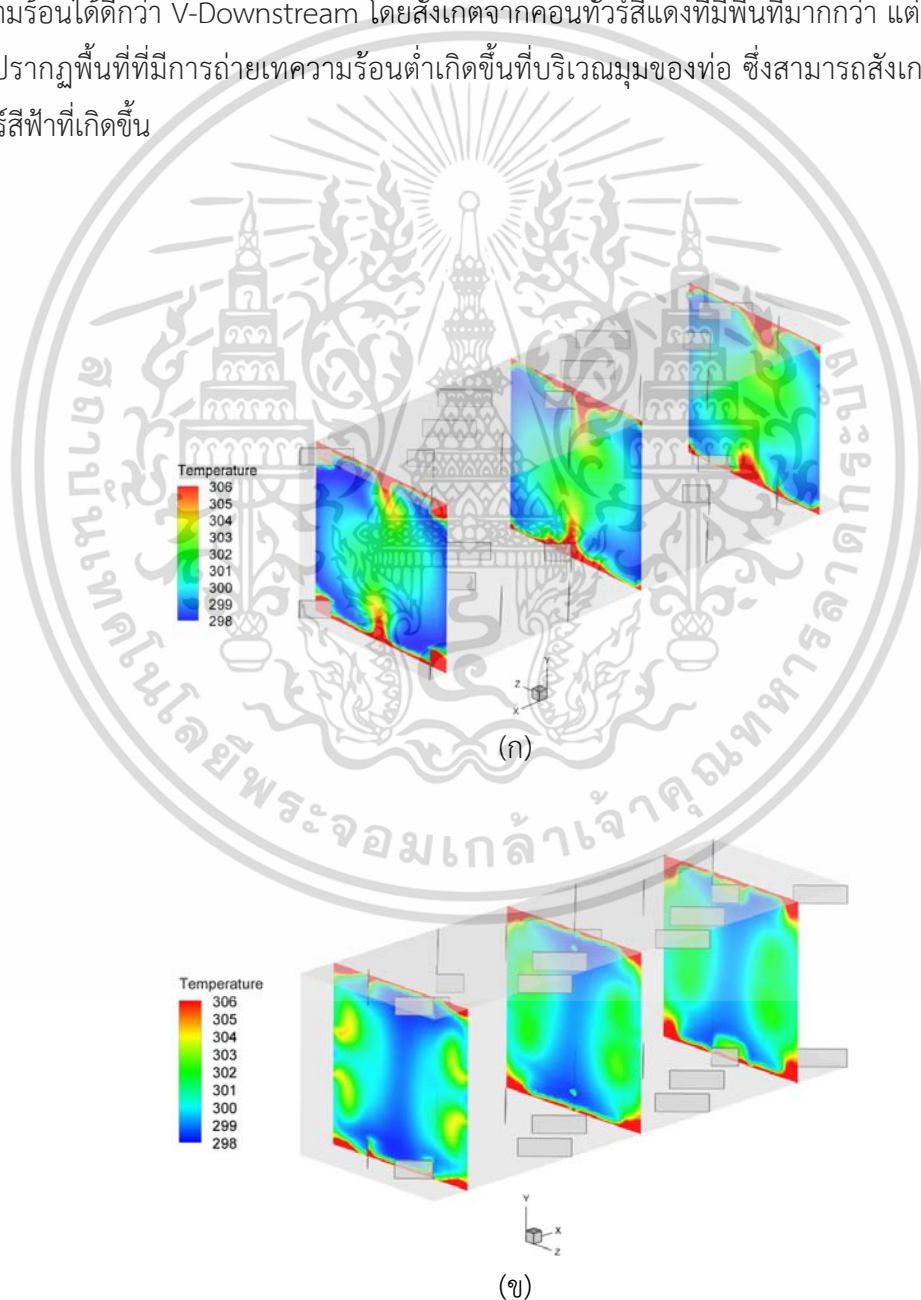
5.1.5.2 การถ่ายเทความร้อน

ค่าการถ่ายเทความร้อนหรือพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนพิจารณาในรูปของการกระจายของอุณหภูมิในระนาบขวางการไหล ดังรูปที่ 5.29 และการกระจายของเลขนัสเซลล์ท์ที่บริเวณผิวท่อ ดังรูปที่ 5.30 ที่ค่า $\alpha = 45^\circ$, $BR = 0.15$, $PR = 1.0$ และ $Re = 12,500$ สำหรับ V-Downstream และ V-Upstream

รูปที่ 5.29 แสดงการกระจายอุณหภูมิในระนาบขวางการไหลที่ค่า $\alpha = 45^\circ$, $BR = 0.15$, $PR = 1.0$ และ $Re = 12,500$ สำหรับ (ก) V-Downstream (ข) V-Upstream ซึ่งตำแหน่งของระนาบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับเป็นเอกสารที่เผยแพร่ในเชิงพาณิชย์ การคัดลอกหรือการนำเอกสารนี้ไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

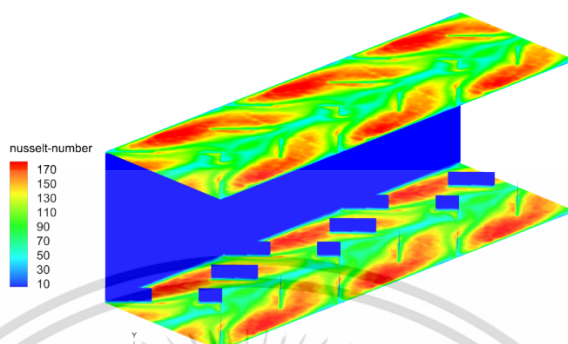
ทั้ง 3 ระนาบ เป็นตำแหน่งเดียวกัน จะเห็นว่าในกรณีของ V-Downstream ยังปรากฏคอนทัวร์สีน้ำเงินบริเวณผนังด้านข้าง ซึ่งหมายถึงอากาศเย็นที่ถูกสัมผัสแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีเฉพาะด้านข้างที่สัมผัสกับผนังด้านบน แต่ในกรณีของ V-Upstream พบว่า เกิดการกระจายของอุณหภูมิเย็นได้ดีกว่ากรณีของ V-Downstream ซึ่งสังเกตได้จากคอนทัวร์สีฟ้าและสีน้ำเงินซึ่งกระจายไปยังบริเวณผนังของท่อ

รูปที่ 5.30 แสดงการกระจายเลขนัสเซิลท์ที่ค่า $\alpha = 45^\circ$, $BR = 0.15$, $PR = 1.0$ และ $Re = 12000$ สำหรับ (ก) V-Downstream (ข) V-Upstream พบว่า จากผลของการกระจายอุณหภูมิของ V-Upstream เกิดขึ้นได้ดีกว่า V-Downstream ส่งผลให้ในกรณีของ V-Upstream มีการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่า V-Downstream โดยสังเกตจากคอนทัวร์สีแดงที่มีพื้นที่มากกว่า แต่อย่างไรก็ตาม ยังปรากฏพื้นที่ที่มีการถ่ายเทความร้อนต่ำเกิดขึ้นที่บริเวณมุมของท่อ ซึ่งสามารถสังเกตได้จากคอนทัวร์สีฟ้าที่เกิดขึ้น

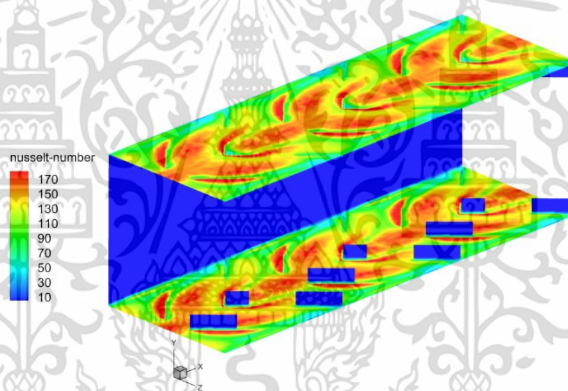


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.29 การกระจายอุณหภูมิในระนาบขวางการไหลที่ค่า $\alpha = 45^\circ$, $BR = 0.15$, $PR = 1.0$ และ $Re = 12000$ สำหรับ (ก) V-Downstream (ข) V-Upstream



(ก)



(ข)

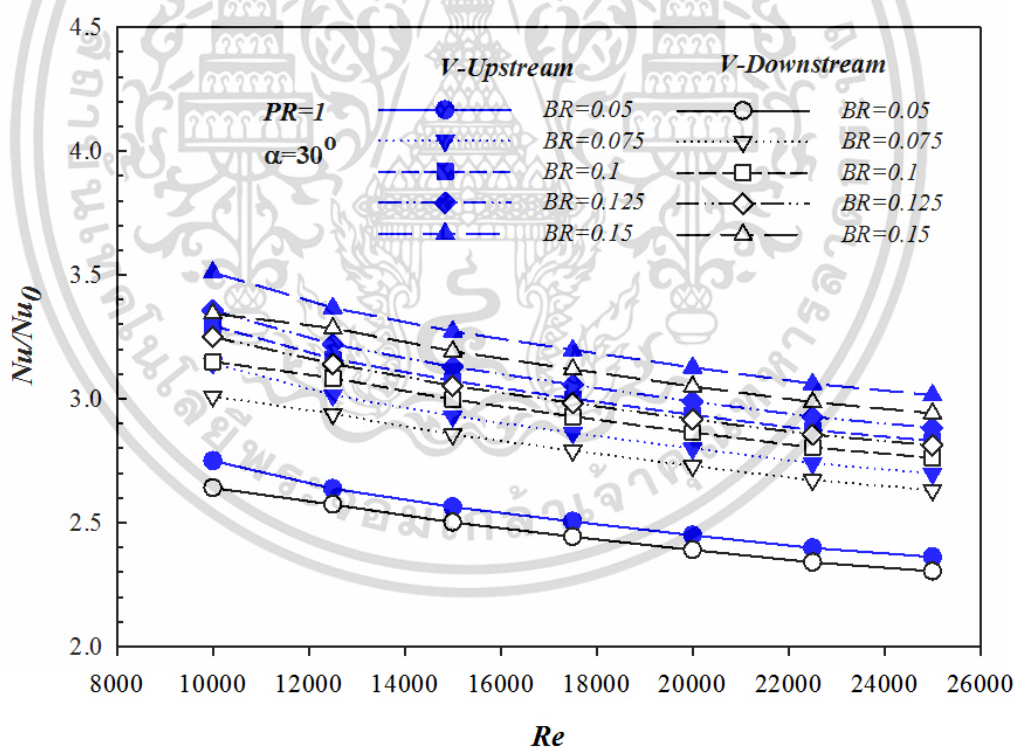
รูปที่ 5.30 การกระจายของเลขนัสเซลท์ที่ค่า $\alpha = 45^\circ$, $BR = 0.15$, $PR = 1.0$ และ $Re = 12000$ สำหรับ (ก) V-Downstream (ข) V-Upstream

รูปที่ 5.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์ของแผ่นกั้นตัววีแบบเต็มตัวเปรียบเทียบทิศทางการไหลแบบ V-Downstream และ V-Upstream ที่ค่า BR ต่างๆ สำหรับ (ก) $\alpha = 30^\circ$ (ข) $\alpha = 45^\circ$ (ค) $\alpha = 60^\circ$ เมื่อวิเคราะห์กรณีของ $\alpha = 30^\circ$ พบว่าเมื่อ BR เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์เพิ่มมากขึ้น และเมื่อ Re เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ลดลง และพบว่าในกรณีของ V-Upstream จะมีค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์มากกว่ากรณีของ V-Downstream ทุกๆ ค่า BR สำหรับค่า $BR=0.05$, V-Downstream ที่ค่า $Re=25,000$ ให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์น้อยที่สุดคือ 2.3 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่า และค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 3.51 เท่า ที่ค่า $BR=0.15$, V-Upstream และ $Re=10,000$ เมื่อเทียบกับท่อเปล่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

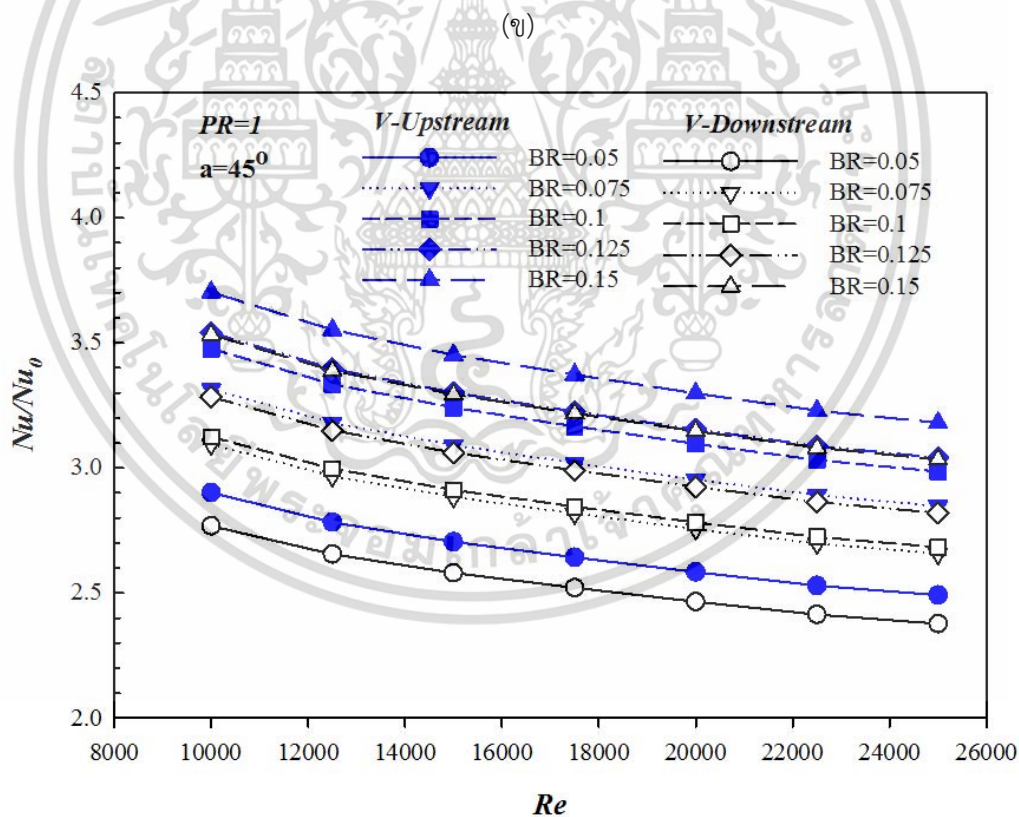
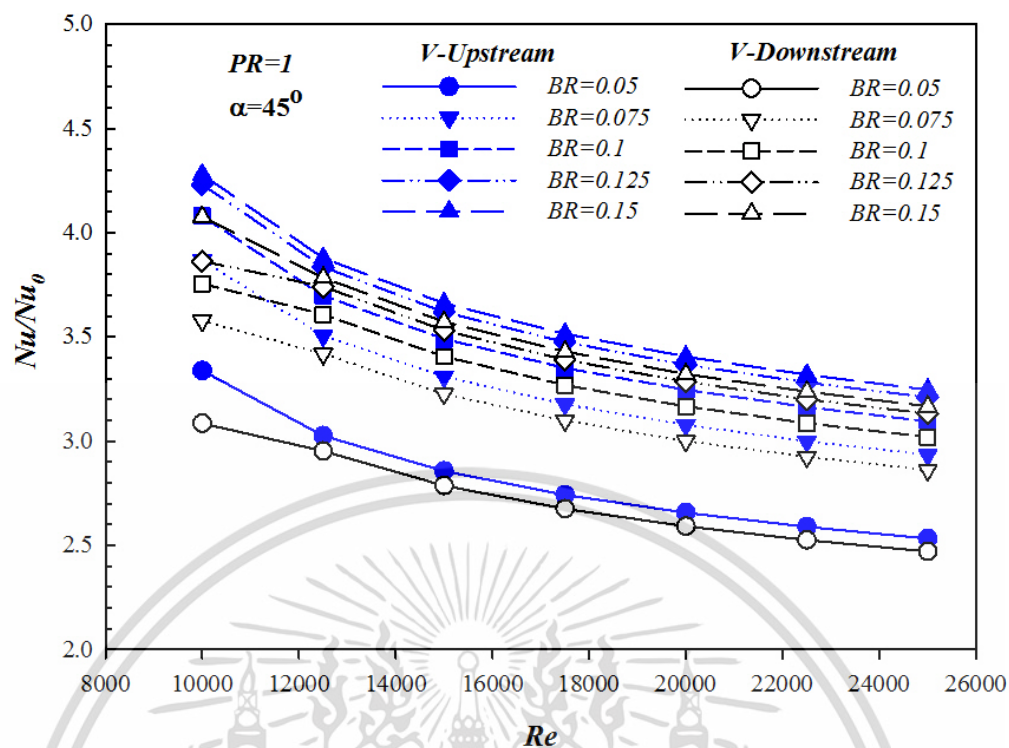
สำหรับกรณี $\alpha = 45^\circ$ พบว่าเมื่อ BR เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์เพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกัน และเมื่อ Re เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์ลดลง และพบว่าในกรณีของ V-Upstream จะมีค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์มากกว่ากรณีของ V-Downstream ทุกๆ ค่า BR สำหรับค่า $BR=0.05$, V-Downstream ที่ค่า $Re=25,000$ ให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์น้อยที่สุดคือ 3.08 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่า และค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์ที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 4.08 เท่า ที่ค่า $BR=0.15$, V-Upstream และ $Re=10,000$ เมื่อเทียบกับท่อเปล่า

สำหรับกรณี $\alpha = 60^\circ$ พบว่าเมื่อ BR เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์เพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกัน และเมื่อ Re เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์ลดลง และพบว่าในกรณีของ V-Upstream จะมีค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์มากกว่ากรณีของ V-Downstream ทุกๆ ค่า BR สำหรับค่า $BR=0.05$, V-Downstream ที่ค่า $Re=25,000$ ให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์น้อยที่สุดคือ 2.77 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่า และค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์ที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 3.7 เท่า ที่ค่า $BR=0.15$, V-Upstream และ $Re=10,000$ เมื่อเทียบกับท่อเปล่า



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



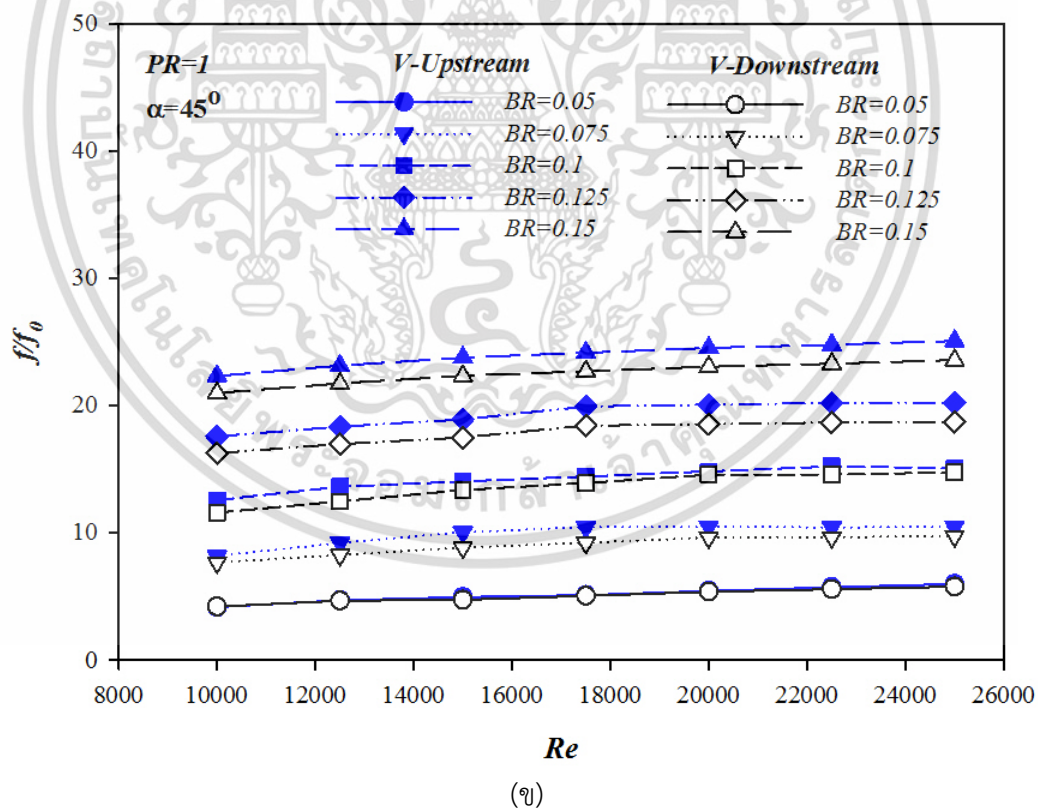
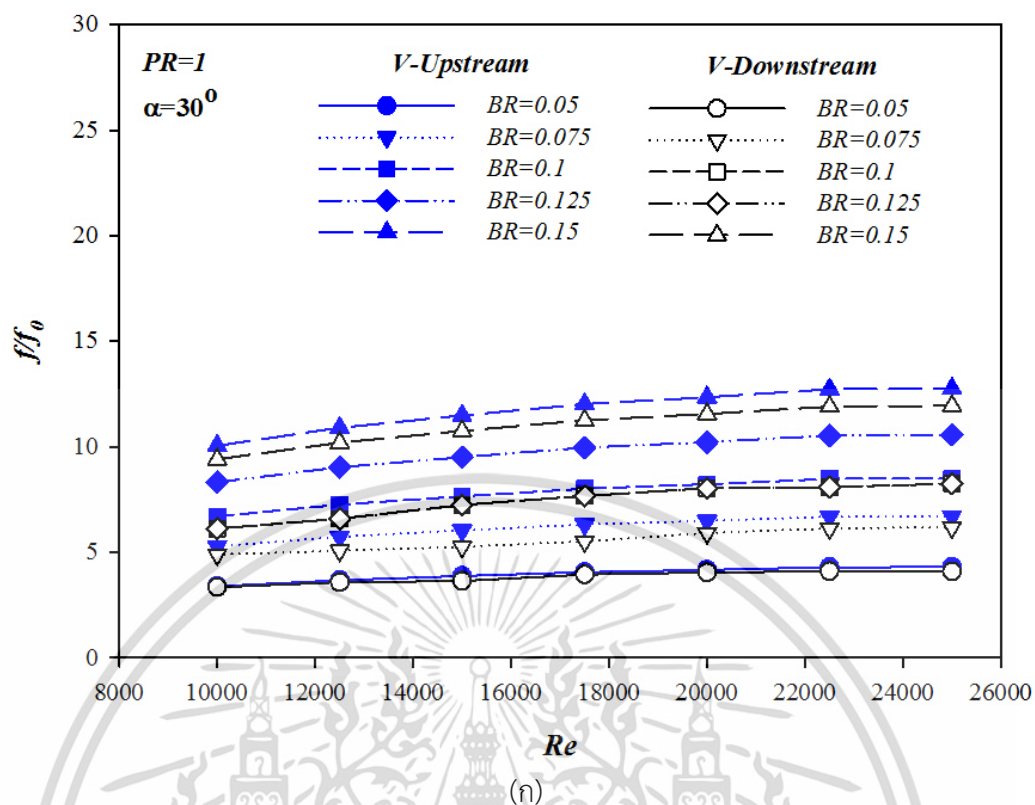
รูปที่ 5.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์ของแผ่นกั้นตัววีแบบเต็มตัว
เปรียบเทียบทิศทางการไหลแบบ V-Downstream และ V-Upstream ที่ค่า BR ต่างๆ สำหรับ
(ก) $\alpha = 30^\circ$ (ข) $\alpha = 45^\circ$ (ค) $\alpha = 60^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

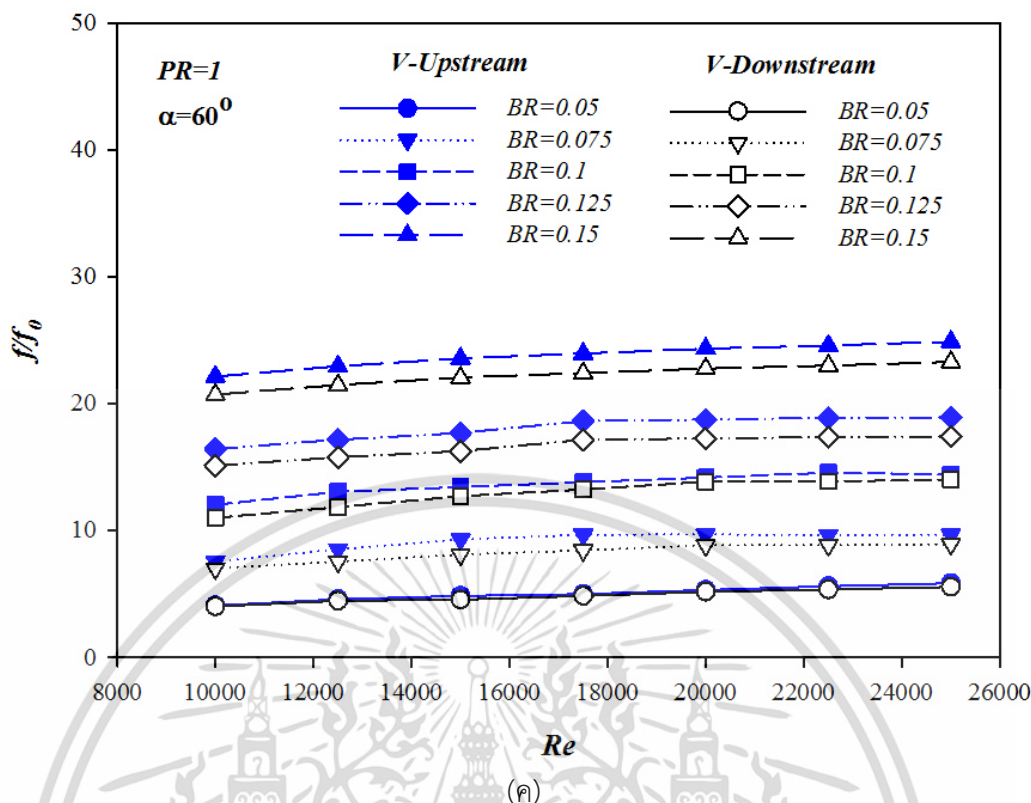
รูปที่ 5.32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ของแผ่นกั้นตัวแบบเต็มตัวเปรียบเทียบทิศทางการไหลแบบ V-Downstream และ V-Upstream ที่ค่า BR ต่างๆ สำหรับ (ก) $\alpha = 30^\circ$ (ข) $\alpha = 45^\circ$ (ค) $\alpha = 60^\circ$ เมื่อวิเคราะห์กรณีของ $\alpha = 30^\circ$ พบว่าเมื่อ BR เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์เพิ่มมากขึ้น และเมื่อ Re เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน และพบว่าในกรณีของ $BR = 0.05$ ของ V-Upstream จะมีค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานใกล้เคียงกับกรณีของ V-Downstream แต่ในกรณีของ BR ค่าอื่นๆ V-Upstream จะมีค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมากกว่ากรณีของ V-Downstream สำหรับค่า $BR=0.05$, V-Downstream ที่ค่า $Re=10,000$ ให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานน้อยที่สุดคือ 3.34 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่า และค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 12.76 เท่า ที่ค่า $BR=0.15$, V- Upstream และ $Re=25,000$ เมื่อเทียบกับท่อเปล่า

สำหรับกรณี $\alpha = 45^\circ$ พบว่าเมื่อ BR เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์เพิ่มมากขึ้น และเมื่อ Re เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันกับกรณีของ $\alpha = 30^\circ$ และพบว่าในกรณีของ $BR = 0.05$ ของ V-Upstream จะมีค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานใกล้เคียงกับกรณีของ V-Downstream แต่ในกรณีของ BR ค่าอื่นๆ ของ V-Upstream จะมีค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมากกว่ากรณีของ V-Downstream สำหรับค่า $BR=0.05$, V-Downstream ที่ค่า $Re=10,000$ ให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานน้อยที่สุดคือ 4.21 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่า และค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 25.10 เท่า ที่ค่า $BR=0.15$, V- Upstream และ $Re=25,000$ เมื่อเทียบกับท่อเปล่า

สำหรับกรณี $\alpha = 60^\circ$ พบว่าเมื่อ BR เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์เพิ่มมากขึ้น และเมื่อ Re เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันกับกรณีของ $\alpha = 30^\circ$ และ 45° และพบว่าในกรณีของ $BR = 0.05$ ของ V-Upstream จะมีค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานใกล้เคียงกับกรณีของ V-Downstream แต่ในกรณีของ BR ค่าอื่นๆ ของ V-Upstream จะมีค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมากกว่ากรณีของ V-Downstream สำหรับค่า $BR=0.05$, V-Downstream ที่ค่า $Re=10,000$ ให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานน้อยที่สุดคือ 4.03 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่า และค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 24.9 เท่า ที่ค่า $BR=0.15$, V- Upstream และ $Re=25,000$ เมื่อเทียบกับท่อเปล่า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

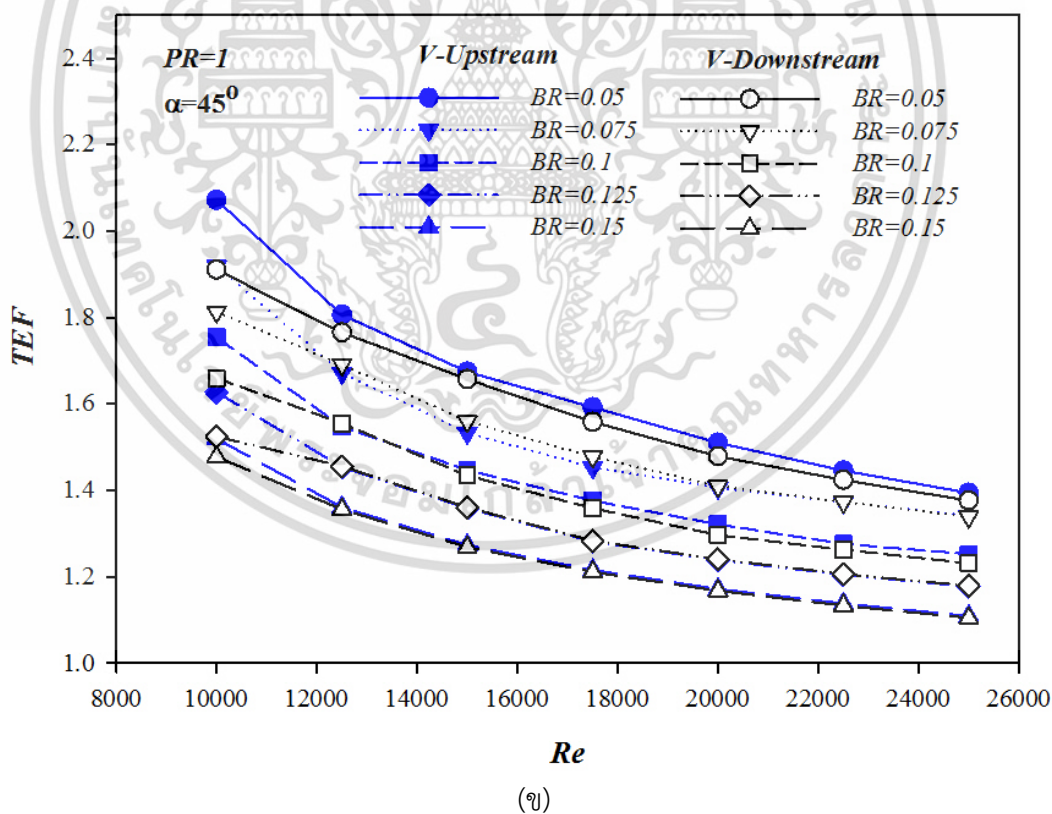
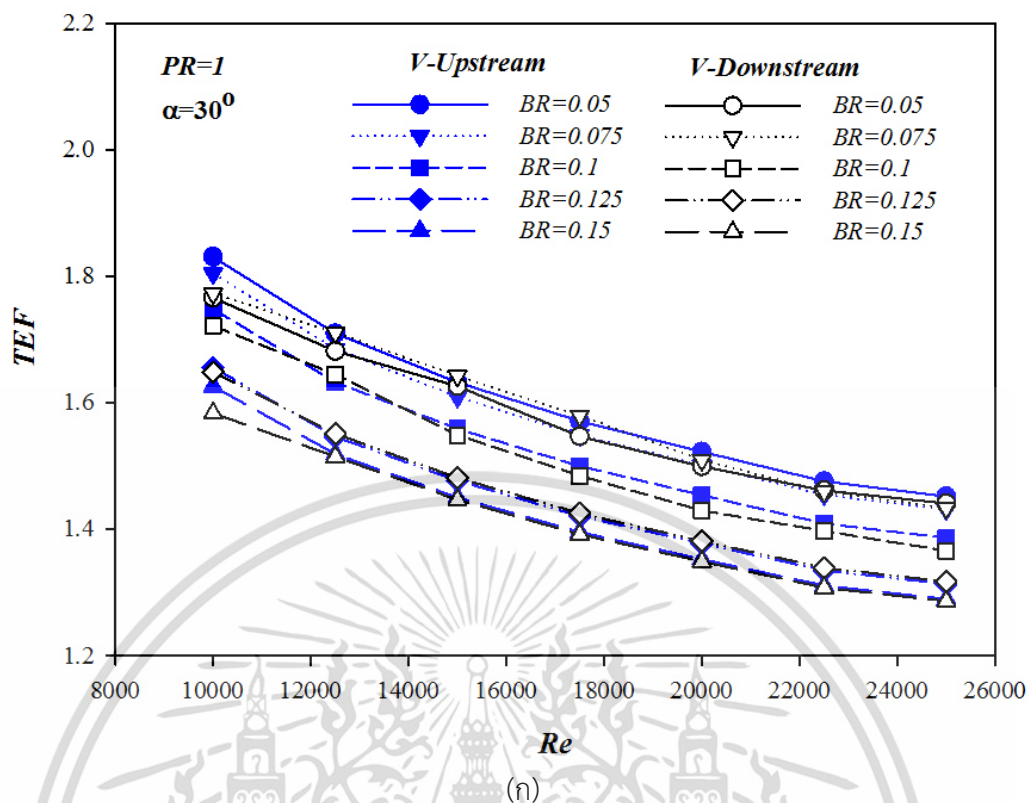


รูปที่ 5.232 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ของแผ่นกั้นตัววีแบบเต็มตัวเปรียบเทียบทิศทางการไหลแบบ V-Downstream และ V-Upstream ที่ค่า BR ต่างๆ สำหรับ (ก) $\alpha = 30^\circ$ (ข) $\alpha = 45^\circ$ (ค) $\alpha = 60^\circ$

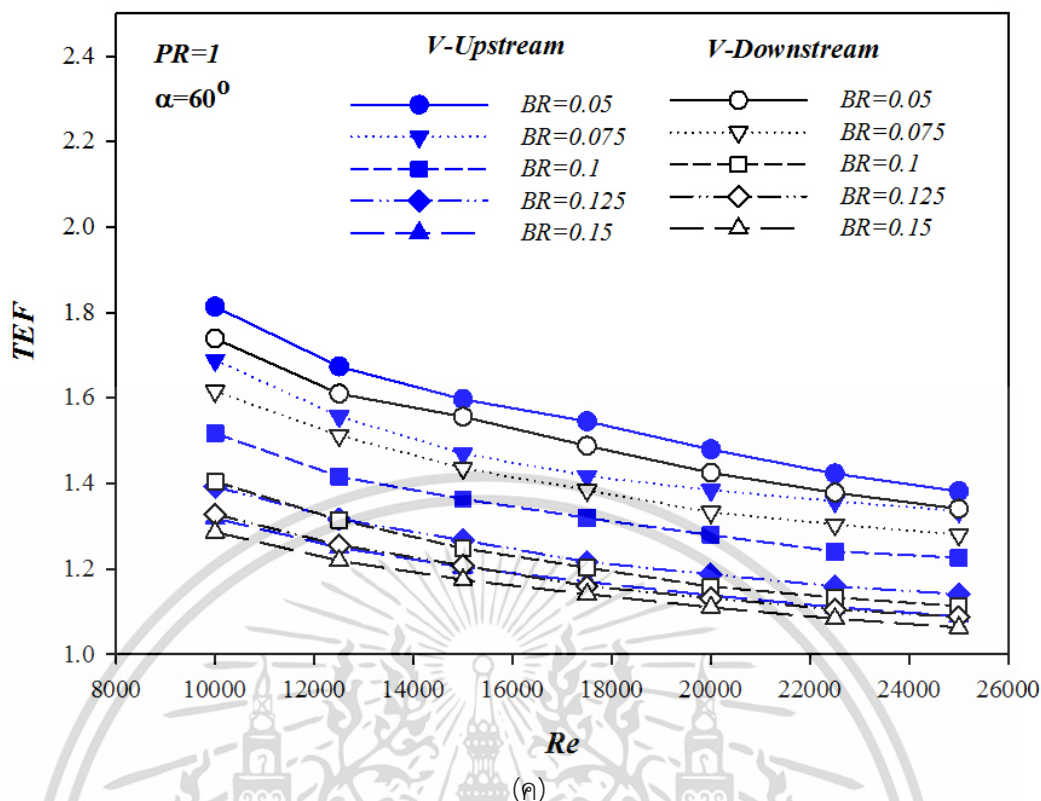
รูปที่ 5.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ของแผ่นกั้นตัววีแบบเต็มตัวเปรียบเทียบทิศทางการไหลแบบ V-Downstream และ V-Upstream ที่ค่า BR ต่างๆ สำหรับ (ก) $\alpha = 30^\circ$ (ข) $\alpha = 45^\circ$ (ค) $\alpha = 60^\circ$ เมื่อวิเคราะห์กรณี $\alpha = 30^\circ$ พบว่าเมื่อ Re เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเพิ่มขึ้นลดลง และพบว่ากรณีของ V-Upstream ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงที่สุดคือ 1.83 ที่ค่า $BR=0.05$ และ $Re=10,000$

สำหรับกรณี $\alpha = 45^\circ$ พบว่าเมื่อ Re เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเพิ่มขึ้นลดลงเช่นกัน และพบว่ากรณีของ V-Upstream ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงที่สุดคือ 2.07 ที่ค่า $BR=0.05$ และ $Re=10,000$

สำหรับกรณี $\alpha = 60^\circ$ พบว่าเมื่อ Re เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเพิ่มขึ้นลดลงเช่นกัน และพบว่ากรณีของ V-Upstream ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงที่สุดคือ 1.81 ที่ค่า $BR=0.05$ และ $Re=10,000$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



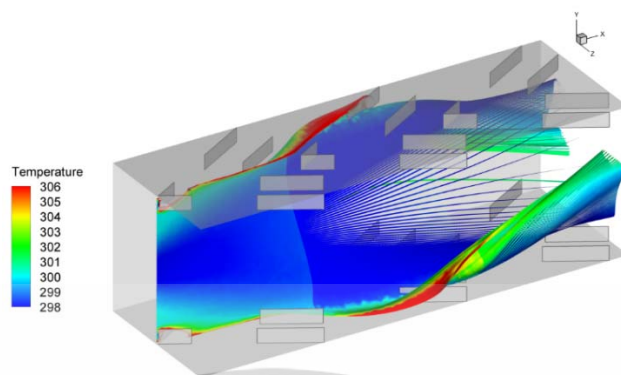
รูปที่ 5.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ของแผ่นกั้นตัววีแบบเต็มตัวเปรียบเทียบทิศทางการไหลแบบ V-Downstream และ V-Upstream ที่ค่า BR ต่างๆ สำหรับ (ก) $\alpha = 30^\circ$ (ข) $\alpha = 45^\circ$ (ค) $\alpha = 60^\circ$

5.2.6 อิทธิพลของระยะพิตช์

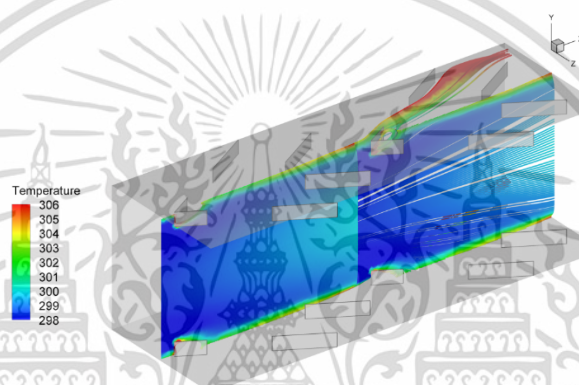
ข้อดีที่สำคัญของการทำให้แผ่นกั้นตัววีแบบตัดขอบแบ่งออกเป็น 5 ส่วนเท่าๆ กัน หรือเรียกว่าแผ่นกั้นตัววีแบบแยกตัวนั้น คือค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียทานที่ลดลงซึ่งจะส่งผลกระทบต่อกำลังขับของปั๊มหรือโบลเวอร์ แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มแผ่นกั้นตัววีแบบแยกตัวได้ส่งผลกระทบต่อค่าการถ่ายเทความร้อนลดลงไปด้วยเช่นกัน ดังนั้นจึงได้ศึกษาต่อโดยการปรับค่าระยะพิตช์ (PR) ของแผ่นกั้นรูปตัววีแบบแยกตัวที่จะส่งผลกระทบต่อค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียทาน และการถ่ายเทความร้อน

รูปที่ 5.34 แสดงให้เห็นถึงกระแสการไหลตามแนวยาวในกรณีของแผ่นกั้นตัววีแบบแยกตัว สำหรับ (ก) PR = 1 (ข) PR = 1.5 ที่ $\alpha = 30^\circ$, BR = 0.10 และ Re = 10,000 พบว่าเมื่อค่า PR เพิ่มขึ้นส่งผลให้กระแสการไหลตามแนวยาวมีความปั่นป่วนน้อยลงโดยในกรณี โดยเมื่อเปรียบเทียบ PR ทั้งสองค่า PR = 1 จะมีการปั่นป่วนที่รุนแรงที่กว่า PR = 1.5 ส่งผลให้กระแสของของไหลสามารถไหลไปกระแทกกับผนังของท่อ และทำให้อากาศที่มีอุณหภูมิต่ำ (คอนทิวร์สีน้ำเงิน) กระจายไปยังบริเวณใกล้กับผนังของท่อเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนได้มากกว่ากรณีอื่น ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.35 และ

ที่ $PR = 1$ มีค่าการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดโดยสังเกตจากคอนทัวร์นีสเชิลท์ซึ่งมีพื้นที่สีแดงมากกว่ากรณี $PR = 1.5$ ดังแสดงในรูปที่ 5.36



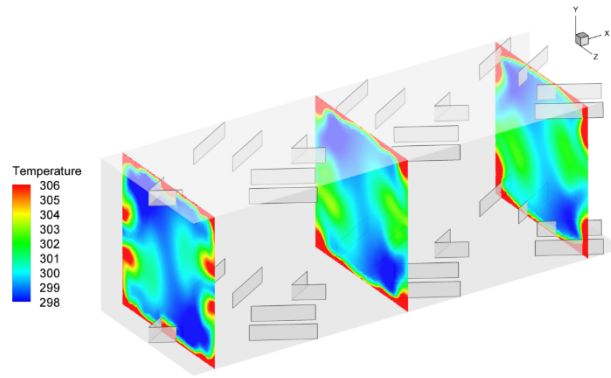
(ก)



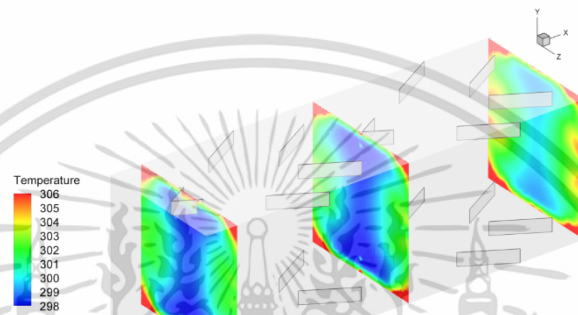
(ข)

รูปที่ 5.34 เส้นกระแสการไหลตามแนวยาวสำหรับ (ก) $PR = 1$ (ข) $PR = 1.5$
ที่ $\alpha = 30^\circ$, $BR = 0.10$, $Re = 10,000$ และ V-Upstream

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

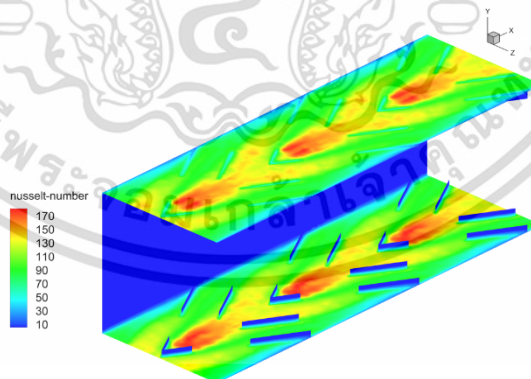


(ก)



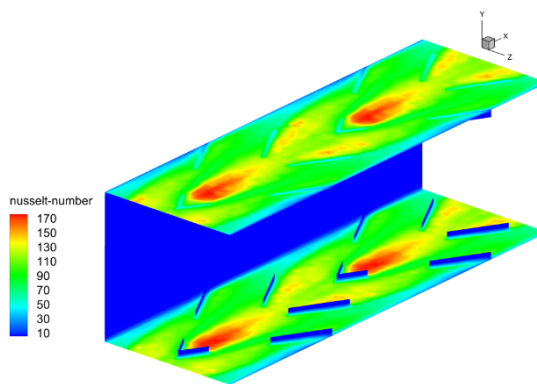
(ข)

รูปที่ 5.35 การกระจายอุณหภูมิในระนาบขวางการไหลสำหรับ (ก) $PR = 1$ (ข) $PR = 1.5$
 ที่ $\theta = 30^\circ$, $BR = 0.10$, $Re = 10,000$ และ V-Upstream



(ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

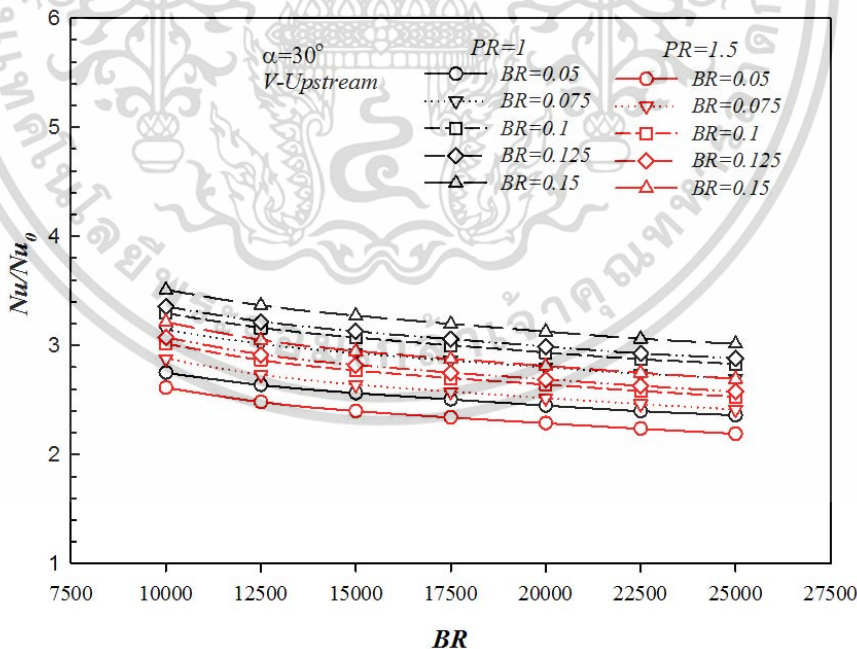


(จ)

รูปที่ 5.36 การกระจายเลขนัสเซิลท์สำหรับ (ก) PR = 1 (ข) PR = 1.5

ที่ $\alpha = 30^\circ$, BR = 0.10, Re = 10,000 และ V-Upstream

รูปที่ 5.37 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์ของแผ่นกั้นตัววีแบบแยกตัวที่ค่า BR ต่างๆ และ V-Upstream สำหรับ $\alpha = 30^\circ$ พบว่าเมื่อค่า PR เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์ลดลงอันเนื่องมาจากการปั่นป่วนของกระแสการไหลที่มีความรุนแรงน้อยลง ซึ่งที่ $\alpha = 30^\circ$ จะให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์มากที่สุดที่ 3.5 เท่าสำหรับ BR = 0.15, PR = 1 และ Re = 10,000 เมื่อเทียบกับท่อเปล่า และพบว่าเมื่อเพิ่มแผ่นกั้นตัววีแบบแยกตัวทำให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์สูงสุดสำหรับ $\alpha = 30^\circ$ ลดลง 10.6%

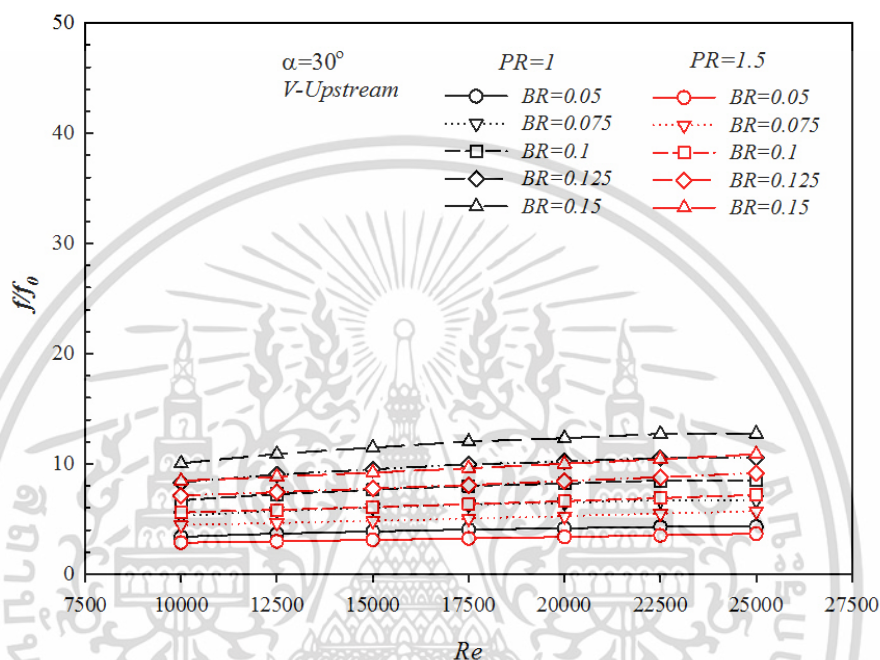


รูปที่ 5.37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์ของแผ่นกั้นตัววีแบบ

แยกตัวที่ค่า BR ต่างๆ และ V-Upstream $\alpha = 30^\circ$ ที่ PR = 1 และ 1.5

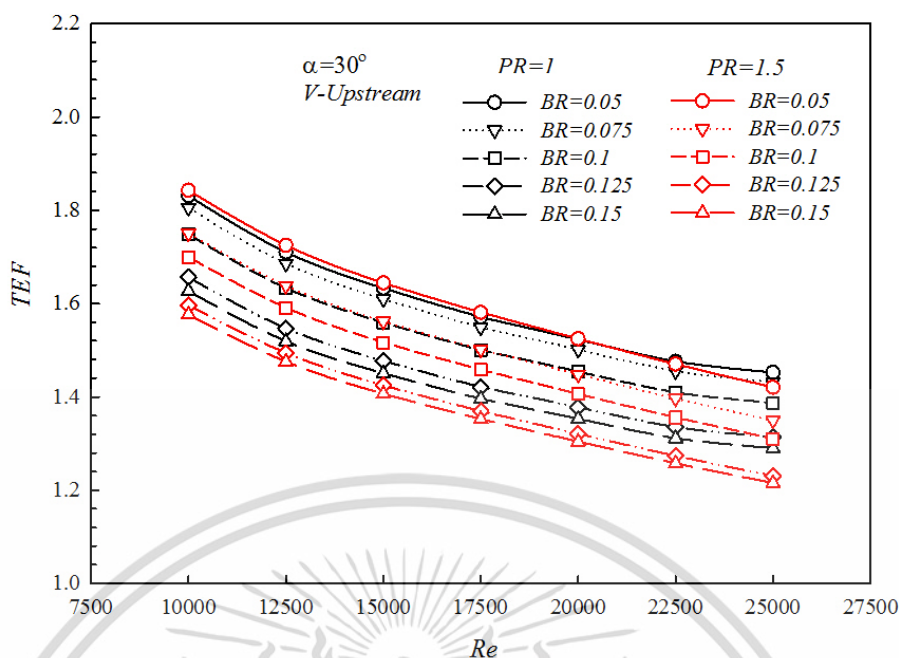
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.38 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ของแผ่นกั้นตัววีแบบแยกตัวที่ค่า BR ต่างๆ และ V -Upstream สำหรับ $\alpha = 30^\circ$ พบว่าเมื่อค่า PR เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานลดลงอันเนื่องมาจากการปั่นป่วนของกระแสการไหลที่มีความรุนแรงน้อยลง ซึ่งที่ $\alpha = 30^\circ$ จะให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมากที่สุดที่ 12.76 เท่าสำหรับ $BR = 0.15$, $PR = 1$ และ $Re = 25,000$ เมื่อเทียบกับท่อเปล่า และพบว่าเมื่อเพิ่มแผ่นกั้นตัววีแบบแยกตัวทำให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์สูงสุดสำหรับ $\alpha = 30^\circ$ ลดลง 14.7%



รูปที่ 5.38 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ของแผ่นกั้นตัววีแบบแยกตัวที่ค่า BR ต่างๆ และ V -Upstream $\alpha = 30^\circ$ ที่ $PR = 1$ และ 1.5

รูปที่ 5.39 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ของแผ่นกั้นตัววีแบบแยกตัวที่ค่า BR ต่างๆ และ Upstream สำหรับ $\alpha = 30^\circ$ ที่ $PR = 1$ และ 1.5 พบว่าค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ $BR = 0.05$ ที่ $PR = 1.0$ และ 1.5 มีค่าใกล้เคียงกันในทุก Re และในส่วนของ $BR = 0.75, 0.10, 0.125$ และ 0.15 ค่า สมรรถนะเชิงความร้อนของ $PR = 1.5$ จะมีค่าลดลง 3-6%



รูปที่ 5.39 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ของแผ่นกั้นตัววีแบบแยกตัว ที่ค่า BR ต่างๆ และ V-Upstream $\alpha = 30^\circ$ ที่ $PR = 1$ และ 1.5

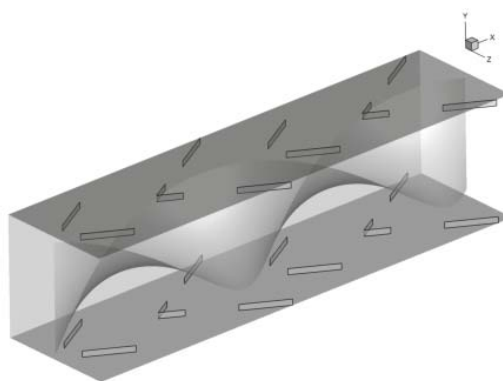
5.3 ตัวเพิ่มการปั่นป่วนการไหลแบบครีบก้นรูปตัววีและใบพัดแบบต่อเนื่องรวมกัน

จากหัวข้อการศึกษาตัวสร้างความปั่นป่วนชนิดใบพัดแบบต่อเนื่องในหัวข้อที่แล้วนั้นจะเห็นว่าจะได้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์และสมรรถนะเชิงความร้อนที่ต่ำมาก ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์เพื่อให้ผิวท่อและอากาศภายในท่อนั้นมีการถ่ายเทความร้อนและสมรรถนะเชิงความร้อนดียิ่งขึ้น ในหัวข้อนี้จึงจะทำการศึกษาการใช้ตัวสร้างความปั่นป่วนของสองชนิดรวมเข้าด้วยกัน ซึ่งจะใช้ตัวเพิ่มการปั่นป่วนการไหลแบบครีบก้นรูปตัววีและใบพัดแบบต่อเนื่องรวมกัน

5.3.1 แบบจำลองทางกายภาพ

ระบบที่ให้ความสนใจคือตัวเพิ่มการปั่นป่วนการไหลสองชนิด ซึ่งจะใช้ใบพัดต่อเนื่องอยู่บริเวณตรงกลางในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสและแผ่นครีบก้นรูปตัววี โดยจะทำการศึกษาค่าการศึกษา รวมกันระหว่าง อัตราส่วนของความยาวใบพัด W ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด (W/r , TR) หรือ Twist Ratio และ ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นต่อความสูงท่อหรือระยะพิตช์ (PR) ดังรูป 5.40 ก) $TR = 2$ โดยใช้ $PR = 2$ ข) $TR = 4$ โดยใช้ $PR = 4$ ค) $TR = 5$ โดยใช้ $PR = 5$ โดยการศึกษาอิทธิพลของ Twist Ratio นี้กำหนดให้เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดคงที่เท่ากับ $r = 0.036\text{m}$ แผ่นครีบก้นตัววีแบบแยกตัวปลายวีชี้ตามกระแสการไหล (V-Upstream) มุมประทะการไหล $\alpha = 30^\circ$ โดยจะทำการศึกษา BR ที่ 0.05, 0.075, 0.1, 0.125 และ 0.15 กำหนดท่อหน้าตัดจัตุรัสที่ใช้ในการจำลองนี้มีค่า $H = 0.04\text{m}$ โดยพิจารณาการไหลเป็นแบบคาบ (periodic) ดังรูปที่ 5.41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

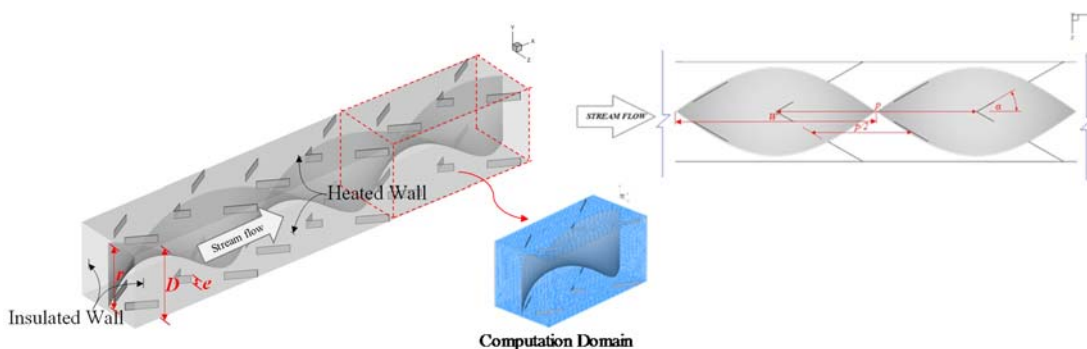


(ข)

(ค)

รูปที่ 5.40 รูปทรงของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดตั้งไบบิตบริเวณตรงกลางท่อและแผ่นกั้นตัวแบบแยกตัวมีปลายวีชี้อัฒตามกระแสการไหล (V-Upstream) มุมประทะการไหล $\alpha = 30^\circ$ โดย (ก) $TR=2$ และ $PR=2$ (ข) $TR=4$ และ $PR=4$ (ค) $TR=5$ และ $PR=5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.41 รูปทรงของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นตัววีแบบเต็มตัวมีปลายวีชี้ตามกระแสการไหล (V-Upstream) และโดเมนที่ใช้ในการคำนวณโดยคิดการไหลแบบ periodic ที่มีการสร้างตาข่ายสี่เหลี่ยมแบบไม่สม่ำเสมอ

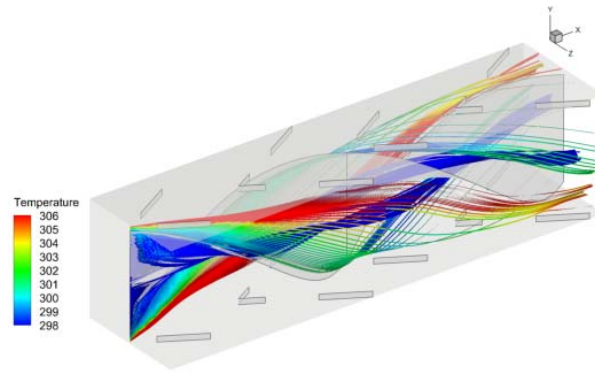
5.3.2 อิทธิพลของการใช้ตัวสร้างความปั่นป่วนสองแบบรวมกัน

ในส่วนของอิทธิพลของอิทธิพลของการใช้ตัวสร้างความปั่นป่วนสองแบบ ได้นำเสนอกรณีของการผสมระหว่าง (W/r , TR) หรือ Twist Ratio และ ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นต่อความสูงท่อหรือระยะพิทช์ โดยจะทำการศึกษา $TR = 2$ โดยใช้ $PR = 2$ (ข) $TR = 4$ โดยใช้ $PR = 4$ (ค) $TR = 5$ โดยใช้ $PR = 5$ ซึ่งแผ่นครีบอกตัววีแบบแยกตัวปลายวีชี้ตามกระแสการไหล (V-Upstream) มุมประทุนการไหล $\alpha = 30^\circ$ โดยจะทำการศึกษา BR ที่ 0.05, 0.075, 0.1, 0.125 และ 0.15 ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วน จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ประกอบด้วย ส่วนที่ 1 นำเสนอเส้นกระแสการไหลหรือพฤติกรรมการไหลทั้งแบบ 2 มิติและ 3 มิติ เพื่อให้สามารถทำความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมการไหลผ่านแผ่นกั้นตัววี ส่วนที่ 2 นำเสนอการถ่ายเทความร้อนหรือพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนซึ่งแสดงในรูปของคอนทัวร์หรือการกระจายตัวของอุณหภูมิและ Nu ที่ค่า Re ต่าง ๆ

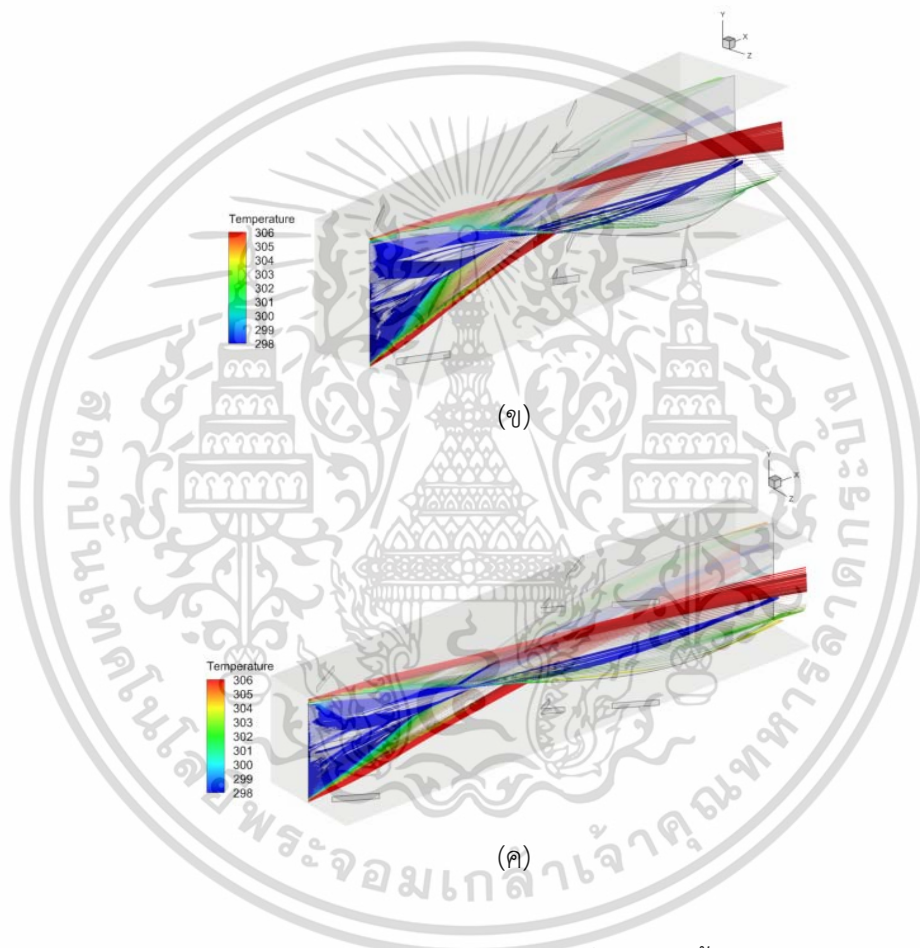
5.3.2.1 เส้นกระแสการไหล

รูปที่ 5.44 แสดงเส้นกระแสการไหล 3 มิติ ตามแนวการไหล, เส้นกระแสการไหลบน และเส้นกระแสการไหลในระนาบขวางการไหล ที่ค่า (ก) $TR=2$ และ $PR=2$ (ข) $TR=4$ และ $PR=4$ (ค) $TR=5$ และ $PR=5$ ตามลำดับ พบว่าเมื่ออากาศไหลผ่านใบพัดเนื่องจะเกิดการหมุนวนตามใบพัด ซึ่งเมื่อ TR เพิ่มขึ้นกระแสดความปั่นป่วนก็จะลดลงไปตามรูป 5.42

เมื่อพิจารณาเส้นกระแสการไหลบนระนาบขวางแนวการไหลดังรูปที่ 5.43 จะเห็นได้ว่าเส้นกระแสการไหลมีลักษณะคล้ายกันทุก TR คือเมื่ออากาศไหลผ่านแผ่นกั้นตัววีจะก่อให้เกิดการหมุนวนบริเวณด้านหลังของแผ่นกั้น และที่แตกต่างจากการใช้ใบพัดอย่างเดียวคือจะมีอากาศหมุนวนที่มุมท่อด้านบนและด้านล่างซึ่งจะทำให้การกระจายตัวดีกว่าซึ่งการใช้ใบพัดแบบเดียวตามรูป 5.45



(ก)

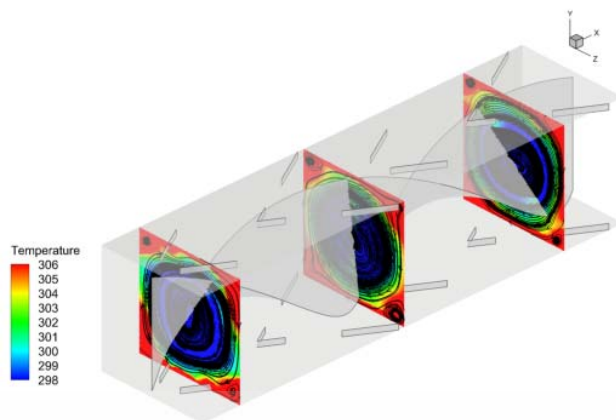


(ค)

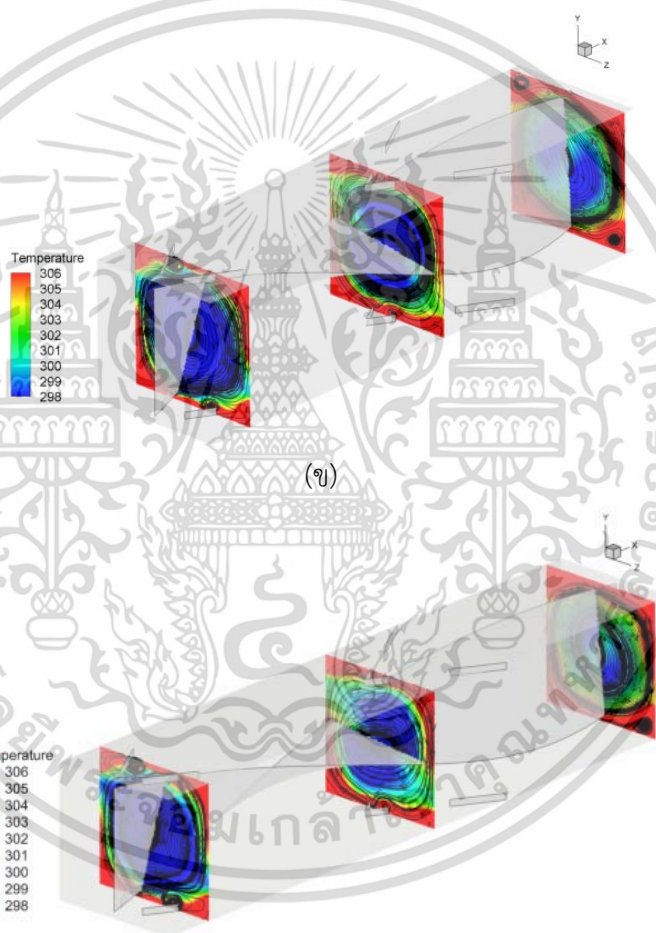
รูปที่ 5.42 เส้นกระแสการไหล 3 มิติ ตามแนวการไหลที่มีการติดตั้งใบปิดบริเวณตรงกลางท่อและแผ่นกั้นตัววีแบบแยกตัวมีปลายวีชี้ตามกระแสการไหล (V-Upstream) มุมประทะการไหล $\alpha = 30^\circ$ โดย

(ก) $TR=2$ และ $PR=2$ (ข) $TR=4$ และ $PR=4$ (ค) $TR=5$ และ $PR=5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 5.43 เส้นกระแสการไหลบนระนาบตามขวางการไหลที่มีการติดตั้งใบพัดบริเวณตรงกลางท่อ และแผ่นกั้นตัววีแบบแยกตัวมีปลายวีชี้ตามกระแสการไหล (V-Upstream) มุมประทะการไหล $\alpha = 30^\circ$ โดย

(ก) $TR=2$ และ $PR=2$ (ข) $TR=4$ และ $PR=4$ (ค) $TR=5$ และ $PR=5$

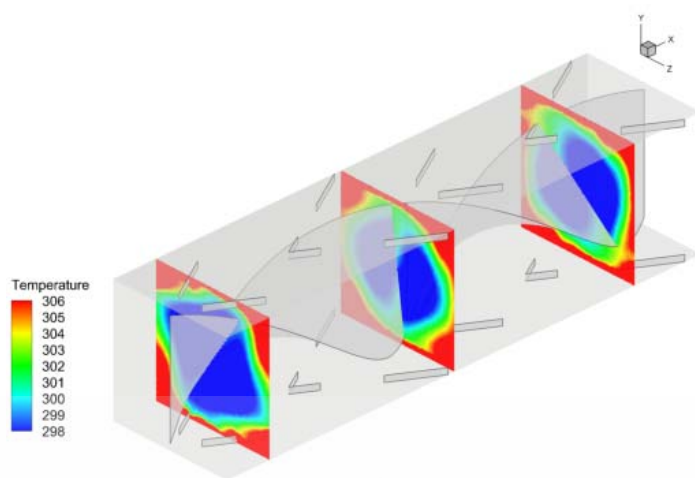
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.2.2 การถ่ายเทความร้อน

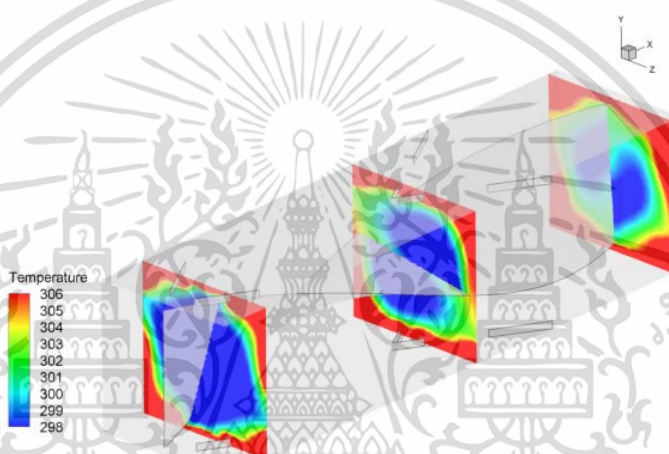
ค่าการถ่ายเทความร้อนหรือพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนพิจารณาในรูปของการกระจายของอุณหภูมิในระนาบขวางการไหล ดังรูปที่ 5.44 และการกระจายเลขนัสเซลล์ท์ที่บริเวณผิวท่อ ดังรูปที่ 5.45 ที่ค่า TR และ PR ต่าง ๆ

รูปที่ 5.44 แสดงถึงการกระจายอุณหภูมิในระนาบขวางการไหลที่ค่า (ก) $TR=2$ และ $PR=2$ (ข) $TR=4$ และ $PR=4$ (ค) $TR=5$ และ $PR=5$ เมื่อพิจารณาค่าการกระจายอุณหภูมิที่ระนาบขวางการไหลของ TR และ PR ทุกค่า จะเห็นได้ว่าจะมีลักษณะคล้ายๆกัน โดยการกระจายตัวของอากาศเย็นคอนทิวร์สไฟฟ้าและสีน้ำเงินซึ่งจะกระจายตัวไปด้านข้างทำให้บริเวณด้านข้างมีการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าการใช้ใบพัดเพียงอย่างเดียว

รูปที่ 5.45 แสดงการกระจายของเลขนัสเซลล์ท์ที่ค่า (ก) $TR=2$ และ $PR=2$ (ข) $TR=4$ และ $PR=4$ (ค) $TR=5$ และ $PR=5$ ซึ่งส่งผลให้อากาศเย็นภายในท่อเกิดการปั่นป่วนของกระแสการไหลและความปั่นป่วนของกระแสการไหลจะช่วยกระจายอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำไปยังบริเวณใกล้กับผนังท่อทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศกับผนังท่อที่มีค่าสูงขึ้น โดยสังเกตจากคอนทิวร์สีแดงบริเวณผนังท่อซึ่งหมายถึงบริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด จะเห็นว่าที่ $TR=5$ และ $PR=5$ จะเกิดผิวแสดงแถบสีเขียวเป็นส่วนใหญ่และเกิดค่าการถ่ายเทความร้อนน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับเมื่อเทียบกับค่า TR อื่นๆ และพบว่าที่ $TR=2$ และ $PR=2$ จะมีการถ่ายเทความร้อนมากที่สุดซึ่งสังเกตได้จากคอนทิวร์สีแดงที่มีพื้นที่มากที่สุด จึงสามารถสรุปได้ว่าเมื่อค่า TR เพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้น โดยพิจารณาได้จากการกระจายของเลขนัสเซลล์ท์บริเวณผิวท่อ



(ก)



(ข)

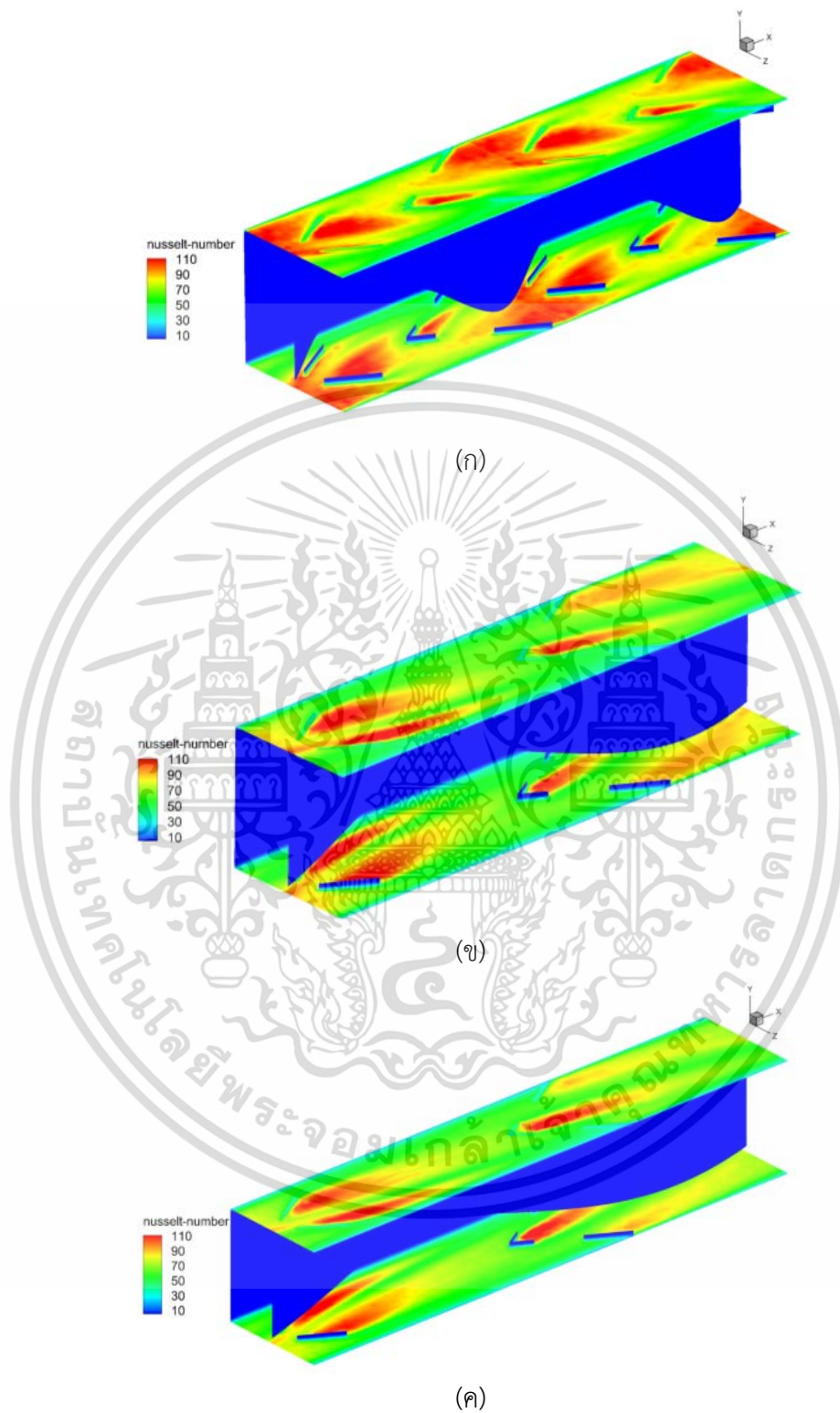


(ค)

รูปที่ 5.44 การกระจายอุณหภูมิในระนาบขวางการไหลที่มีการติดตั้งใบพัดบริเวณตรงกลางท่อและแผ่นกั้นตัววีแบบแยกตัวมีปลายวีชี้ตามกระแสการไหล (V-Upstream) มุมประทะการไหล $\alpha = 30^\circ$

(ก) $TR=2$ และ $PR=2$ (ข) $TR=4$ และ $PR=4$ (ค) $TR=5$ และ $PR=5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

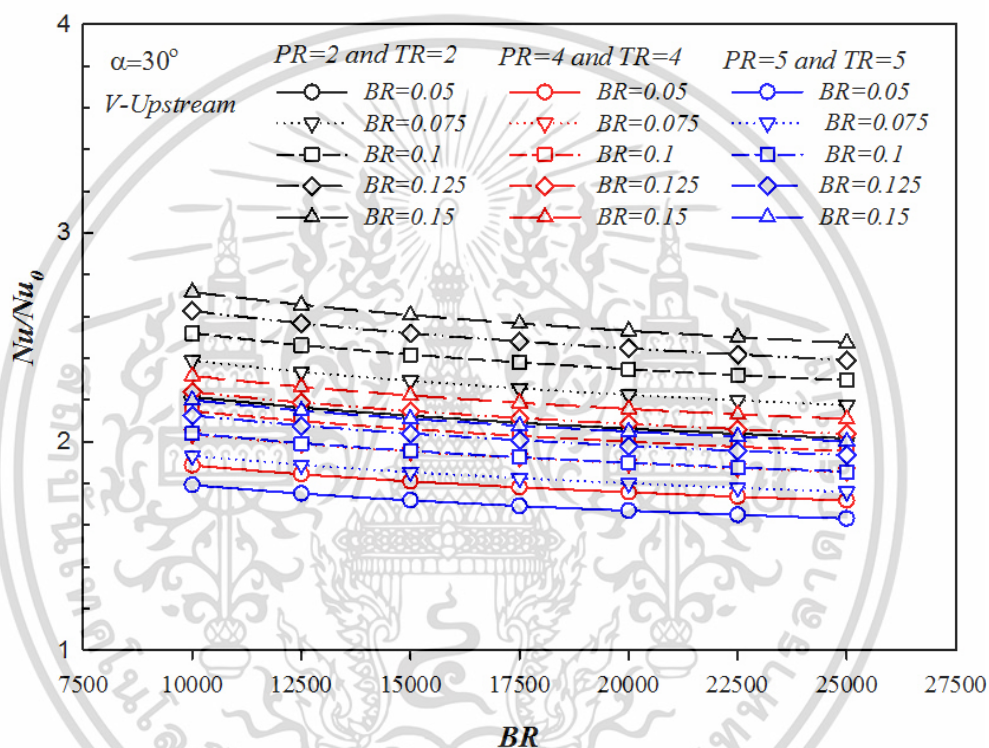


รูปที่ 5.45 การกระจายของเลขนัสเซลท์ที่ที่มีการติดตั้งไบบิตบริเวณตรงกลางท่อและแผ่นกั้นตัววีแบบแยกตัวมีปลายวีชี้ตามกระแสการไหล (V-Upstream) มุมประทะการไหล $\alpha = 30^\circ$ โดย

(ก) $TR=2$ และ $PR=2$ (ข) $TR=4$ และ $PR=4$ (ค) $TR=5$ และ $PR=5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราเลขนัสเซลล์ท์กับเลขเรย์โนลด์ของไบบิตแบบต่อเนื่องที่ค่า $TR=2$ ที่ $PR=2$ (ข) $TR=4$ ที่ $PR=4$ (ค) $TR=5$ และ $PR=5$ พบว่าเมื่อ TR และ PR เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์ลดลง และเมื่อ Re เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์ลดลง และพบว่าที่ $TR=2$ จะมีค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์มากกว่า TR ทุกๆค่าที่ได้ทำการศึกษา สำหรับค่า $TR=5$ และ $PR=5$, ที่ค่า $BR=0.05$, $Re=25,000$ ให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์น้อยที่สุดคือ 1.62 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่า และค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์ที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 2.72 เท่า ที่ค่า $TR=2$ และ $PR=2$, ที่ $BR=0.15$ $Re=25,000$ เมื่อเทียบกับท่อเปล่า

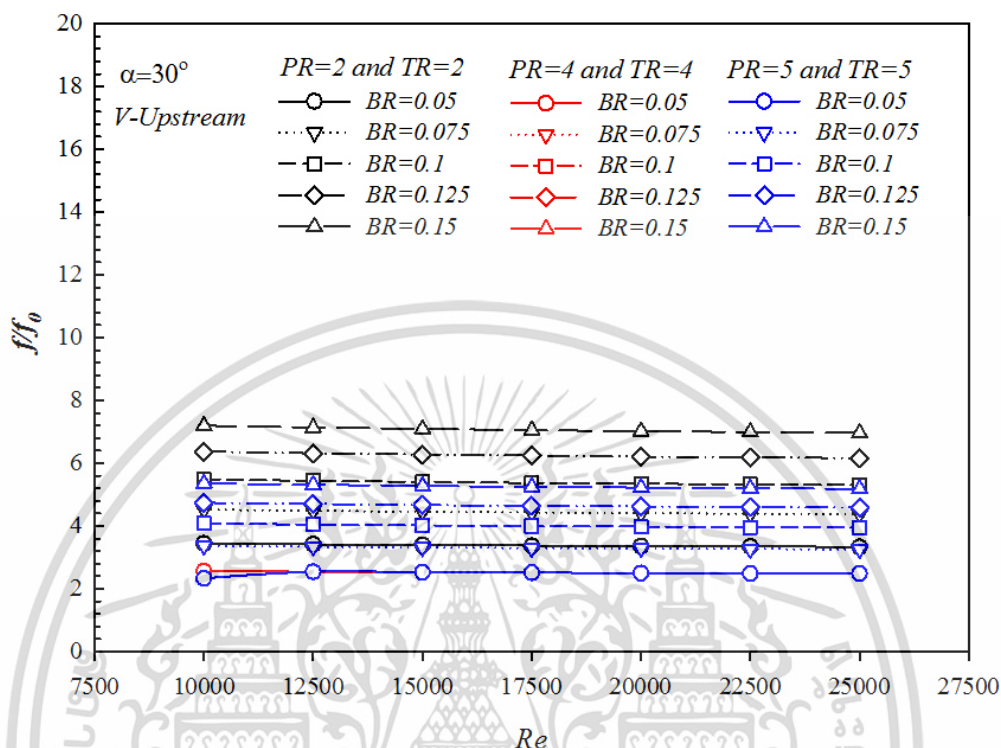


รูปที่ 5.46 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราเลขนัสเซลล์ท์กับเลขเรย์โนลด์การติดตั้งไบบิตบริเวณตรงกลางท่อและแผ่นกั้นตัววีแบบแยกตัวมีปลายวีชี้ตามกระแสการไหล (V-Upstream) มุมประทะการไหล $\alpha = 30^\circ$ (ก) $TR=2$ และ $PR=2$ (ข) $TR=4$ และ $PR=4$ (ค) $TR=5$ และ $PR=5$

รูปที่ 5.47 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ของไบบิตแบบต่อเนื่องที่ค่า $TR=2$ ที่ $PR=2$, $TR=4$ ที่ $PR=4$ และ $TR=5$ ที่ $PR=5$ พบว่าเมื่อ TR และ PR เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเพิ่มลดลง และเมื่อ Re เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานลดลงและพบว่าที่ $TR=2$ ที่ $PR=2$ จะมีค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมากกว่า TR และ PR ทุกๆค่าที่ได้ทำการศึกษา สำหรับค่า $TR=5$, และ $PR=5$ ที่ค่า $BR=0.05$ $Re=10,000$ ให้ค่าอัตราส่วนอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานน้อยที่สุดคือ 2.33 เท่า

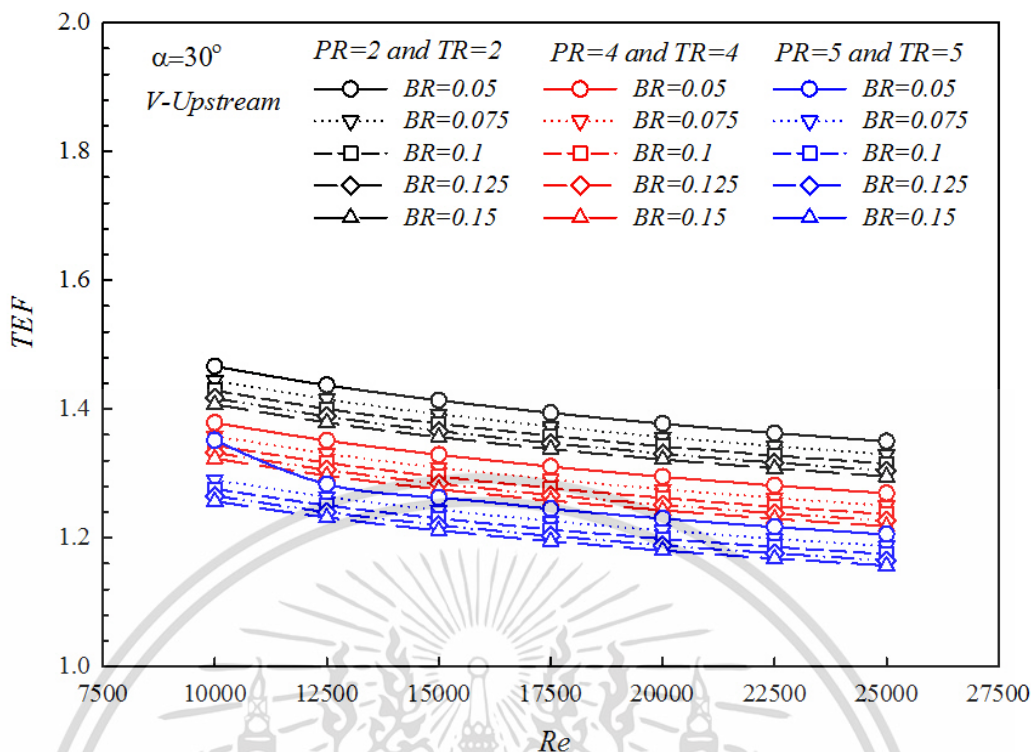
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเทียบกับท่อเปล่า และค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์ที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 7.20 เท่า ที่ค่า $TR=2$ และ $PR=2$, ที่ค่า $BR=0.15$ และ $Re=25,000$ เมื่อเทียบกับท่อเปล่า



รูปที่ 5.47 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ของไบบิต
แบบต่อเนื่อง สำหรับ ก) $TR = 2$ (ข) $TR = 4$ (ค) $TR = 5$

รูปที่ 5.48 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ของไบบิตแบบต่อเนื่องที่ค่า $TR=2$ ที่ $PR=2$, $TR=4$ ที่ $PR=4$ และ $TR=5$ ที่ $PR=5$ พบว่าที่ $TR=2$ ที่ $PR=2$ จะให้ค่าค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมากกว่า ทุกๆค่าวนซึ่งจะให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมากที่สุดเท่ากับ 1.47เท่า ที่ $BR = 0.05$ $Re=10,000$



รูปที่ 5.48 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ของแผ่นกั้นตัววีแบบเต็ม ตัวที่ค่า BR และ α ต่างๆสำหรับ (ก) V-Downstream (ข) V-Upstream

5.4 สรุป

จากการศึกษาเชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนและลักษณะการไหลในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดตั้งตัวสร้างความปั่นทั้ง 3 ลักษณะ พบว่าท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ถูกติดตั้งด้วยแผ่นกั้นตัววีแบบแยกตัวซึ่งจัดวางไว้บนผนังบนและผนังล่างจะส่งผลให้การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างผนังท่อและอากาศเย็นดีที่สุด เนื่องจากว่าของไหลที่ไหลผ่านแผ่นกั้นเกิดการปั่นป่วนขึ้น และเกิดการหมุนวน 4 แกนหลักเมื่อพิจารณาในระนาบขวางการไหล ซึ่งการปั่นป่วนนี้ทำให้ของไหลเกิดการกระแทกที่บริเวณผนังของท่อและช่วยกระจายอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำไปยังบริเวณใกล้เคียงกับผนังท่อทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีขึ้น ส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น โดยให้ค่าอัตราเลขนัสเซลท์อยู่ในช่วงระหว่าง 2.75-4.28 เท่า ซึ่งในกรณีแผ่นกั้นตัววีแบบแยกตัวจะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่ 4.28 เท่า ที่ค่า $PR=1, \alpha = 45^\circ, BR=0.15, Re=10,000$ และ V-Upstream เมื่อเทียบกับท่อเปล่า ส่วนกรณีการใช้ไบบิตแบบต่อเนื่องเพียงอย่างเดียวจะส่งผลให้ได้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่น้อยที่สุดเมื่อเทียบการการใช้ทั้งสามลักษณะ โดยมีค่าอัตราเลขนัสเซลท์อยู่ในช่วงระหว่าง 2.22-1.37 ซึ่งถือว่าเป็นค่าของการถ่ายเทความร้อนที่น้อย เมื่อเทียบกับท่อเปล่า ดังนั้นเพื่อให้ได้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้นจากการใช้ไบบิตเพียงอย่างเดียว จึงได้ทำการศึกษาการใช้ตัวสร้างการปั่นป่วนสองแบบรวมกันโดยการใช้ค่า TR PR และ BR ค่าต่างๆ ซึ่งจะให้ค่าอัตราเลขนัสเซลท์อยู่ในช่วงระหว่าง 2.72-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.63 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่า ซึ่งจะมากกว่าการใช้ใบพัดเพียงอย่างเดียวแต่ยังคงน้อยกว่าการใช้แผ่นครีบบนแบบแยกรูปตัววีเพียงอย่างเดียวเนื่องจากเกิดการหมุนวนของ 4 แกนหลักตามที่กล่าวมา

โดยทั้งหมดของการศึกษาตัวสร้างความปั่นป่วนของงานวิจัยเล่มนี้ ด้วยความเหมาะสมของค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานและค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์แล้ว ทำให้กรณีของแผ่นกั้นตัววีแบบตัดขอบมีค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดที่ 2.07 ที่ค่า $\alpha = 45^\circ$, $BR=0.05$, $PR=1.0$, $Re=10000$ และ V-Upstream



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาอิทธิพลของตัวสร้างความปั่นป่วนของสามแบบ ซึ่งประกอบไปด้วยแผ่นกั้นตัววีแบบแยกที่มีการติดตั้งบนผนังบนและล่างของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส การใช้ใบพัดแบบต่อเนื่องติดบริเวณตรงกลางท่อ และการผสมผสานการใช้ใบพัดและแผ่นครีบบแยกรูปตัววีทั้งสองชนิด ที่มีต่อพฤติกรรมการไหล, ลักษณะการถ่ายเทความร้อนและความดันตกคร่อม โดยศึกษาถึงอิทธิพลของ Re , BR , PR , α , TR ทิศทางการไหล ซึ่งทำการศึกษาในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ในช่วง $Re = 10,000-205000$ ที่ค่า $BR = 0.05, 0.075, 0.1, 0.125$ และ 0.15 พบการใช้แผ่นกั้นตัววีแบบแยกที่มีการติดตั้งบนผนังบนและล่างของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส จะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและสมรรถนะเชิงความร้อนดีที่สุด สืบเนื่องมาจากการเกิดโครงสร้างการไหลหมุนวนหลัก 4 แกนและแกนการหมุนวนย่อย ๆ ที่บริเวณขอบท่อ ซึ่งจะทำให้การกระจายตัวของอากาศภายในท่อกระจายตัวดีกว่าการใช้ตัวสร้างความปั่นป่วนแบบอื่นๆ

6.1.1 อิทธิพลของเลขเรย์โนลด์

เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของค่า Re พบว่าเมื่อค่า Re เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า Nu/Nu_0 และ f/f_0 มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น สำหรับทุกกรณีที่ศึกษา ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า เมื่อค่า Re เพิ่มขึ้นทำให้เกิดค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังส่งผลถึงค่าอัตราของความดันตกคร่อมที่เพิ่มมากขึ้นด้วย สำหรับกรณีที่น่ามาศึกษา พบว่าที่ $Re = 25000$ จะให้ค่า Nu/Nu_0 และ f/f_0 สูงที่สุด นอกจากค่า Re จะมีผลต่อ Nu/Nu_0 และ f/f_0 แล้ว ค่า Re ยังมีผลต่อเกลียวการไหลของของไหลก่อนการกระแทกและหลังการกระแทกที่บริเวณผนังท่ออีกด้วย ทั้งนี้ความยาวของเกลียวยังขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ตัวอื่น ๆ อีก แต่สำหรับอิทธิพลจากค่า Re จะเห็นได้ว่า เมื่อค่า Re เพิ่มมากขึ้น เกลียวของการหมุนวนก่อนการกระแทกและหลังการกระแทกจะสั้นลง นอกจากนี้ยังมีผลต่อระดับความรุนแรงในการกระแทกอีกด้วย เมื่อค่า Re เพิ่มมากขึ้น ความรุนแรงในการกระแทกก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวท่อและของไหลในท่อได้ดีขึ้นแต่อย่างไรก็ตามค่าความดันตกคร่อมก็จะเพิ่มสูงขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับค่า Nu/Nu_0 และ f/f_0 ที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อค่า Re เพิ่มขึ้น และยังพบอีกว่าเมื่อ Re เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเพิ่มขึ้นลดลง

จากอิทธิพลของค่า Re ที่เพิ่มขึ้นทำให้ความปั่นป่วนของกระแสการไหลมากขึ้น นำไปสู่ค่าค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h : heat transfer coefficient, $W/(m \cdot K)$) เพิ่มขึ้นตาม และสุดท้ายนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของ Nu

6.1.2 อิทธิพลของอัตราส่วนการปล่อยการไหล

อิทธิพลของ BR พบว่าเมื่อค่า BR เพิ่มมากขึ้น ค่า Nu/Nu_0 และ f/f_0 ก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าเมื่อค่า BR เพิ่มมากขึ้นค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อมก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วย สำหรับทุกกรณีที่ทำการศึกษา ที่ค่า $BR = 0.15$ จะให้ค่า Nu/Nu_0 และ f/f_0 มากที่สุดและที่ค่า $BR = 0.05$ จะให้ค่า Nu/Nu_0 และ f/f_0 ที่น้อยที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมของการไหล เมื่อค่า BR เพิ่มขึ้นระยะเกลียวของของไหลจะมีระยะที่สั้นลง และมีความรุนแรงในการปั่นป่วนเพิ่มมากขึ้นด้วย และยิ่งพบอีกว่าเมื่อ BR เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเพิ่มขึ้นลดลง

6.1.3 อิทธิพลของระยะพิตช์

อิทธิพลของ PR พบว่าเมื่อค่า PR เพิ่มมากขึ้น ค่า Nu/Nu_0 และ f/f_0 กลับมีค่าลดลง ที่ค่า PR ต่ำๆ จะให้ค่า Nu/Nu_0 และ f/f_0 ที่เยอะ ส่วนที่ค่า PR สูงๆ จะให้ ค่า Nu/Nu_0 และ f/f_0 ที่น้อย และเมื่อพิจารณาในส่วนของการไหลเมื่อ ค่า PR แตกต่างกัน พบว่าเมื่อค่า PR เพิ่มขึ้นระยะเกลียวของของไหลจะมีระยะที่ยาวขึ้น และมีความรุนแรงในการปั่นป่วนน้อยลงด้วย .ในส่วนของการคำนวณสมรรถนะเชิงความร้อน พบว่าค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ $BR = 0.05$ ที่ $PR = 1.0$ และ 1.5 มีค่าใกล้เคียงกันในทุก Re และในส่วนของการ $BR = 0.75, 0.10, 0.125$ และ 0.15 ค่า สมรรถนะเชิงความร้อนของ $PR= 1.5$ จะมีค่าลดลง 3-6%

6.1.4 อิทธิพลของมุมปะทะการไหล

อิทธิพลของมุมปะทะการไหล พบว่า ที่ $\alpha = 45^\circ$ ให้ค่าการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนมากที่สุดเมื่อพิจารณาจากค่า Nu/Nu_0 ซึ่งให้ค่ามากกว่า $\alpha = 30^\circ, 60^\circ$ แต่อย่างไรก็ตาม ค่าการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่มากขึ้นนำไปสู่การเพิ่มของค่าความดันตกคร่อมหรือค่าความดันสูญเสียที่เพิ่มสูงขึ้นด้วย พบว่าที่ $\alpha = 45^\circ$ ให้ค่าความดันตกคร่อมมากที่สุด และพบว่าเมื่อค่า α เพิ่มขึ้นระยะเกลียวของของไหลจะมีระยะที่สั้นลง และมีความรุนแรงในการปั่นป่วนเพิ่มมากขึ้นด้วย และกรณี V-Upstream พบว่าที่มุมปะทะ 45° ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงที่สุดคือ 2.07 ที่ค่า $BR=0.05$ และ $Re=10,000$ กรณีของ V-Downstream พบว่าที่มุมปะทะ 45° ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงที่สุดคือ 1.91 ที่ค่า $BR=0.105$ และ $Re=10,000$

6.1.5 อิทธิพลของทิศทางการไหล

อิทธิพลของทิศทางการไหลแบบ V-Downstream และ V-Upstream นั้นจะส่งผลต่อตำแหน่งของการเกิดการกระแทกเป็นประเด็นหลัก พบว่าการไหลแบบ V-Downstream สำหรับทุก ๆ กรณีที่ทำการศึกษาจะทำให้เกิดการกระแทกของกระแสการไหล 2 จุด คือที่บริเวณผนังท่อด้านข้าง

เป็นหลัก และบริเวณด้านหน้าของแผ่นกั้น สำหรับแบบ V-Upstream จะเกิดการกระแทกที่ผนังที่บริเวณด้านหลังของแผ่นกั้นเพียงจุดเดียวเป็นหลัก

เมื่อพิจารณาในระนาบขวางการไหลพบว่าทั้งแบบ V-Downstream และ V-Upstream ให้แผนการหมุนวนหลัก 4 แกนและการหมุนวนย่อย ๆ ที่บริเวณขอบของท่อ แต่ทิศทางการหมุนของทั้งสองแบบมีลักษณะต่างกัน โดยเมื่อพิจารณาที่แกนการหมุนวนหลักซึ่งเกิดจากแผ่นกั้นที่ติดตั้งที่ด้านล่างของท่อ พบว่า V-Downstream ทำให้เกิดการหมุนวนแบบ common-flow-up ส่วน V-Upstream ทำให้เกิดการหมุนวนแบบ common-flow-down ดังนั้นตำแหน่งที่เกิดการกระแทกของกระแสการไหลจึงมีตำแหน่งที่แตกต่างกันออกไปตามลักษณะทิศทางการไหลทั้งสองแบบ

เมื่อพิจารณาในระนาบตามแกนการไหลพบว่าในกรณีของ V-Downstream จะเกิดการหมุนวนที่รุนแรงบริเวณด้านหลังของแผ่นกั้นและลักษณะของทิศทางการไหลจะมีทิศทางพุ่งเข้าหาแผ่นบางแต่ในกรณีของ V-Upstream พบว่าจะเกิดการหมุนวนที่บริเวณด้านหลังของแผ่นกั้นเพียง 1 ระนาบเท่านั้น และทิศทางของการไหลของกระแสการไหลจะเห็นว่ามีความพุ่งเข้าหาผนังท่อ ในส่วนของค่าสมรรถนะทางความร้อน V-Upstream จะให้ค่าที่สูงกว่าการใช้ครีบบแบบ V-Downstream

6.1.6 อธิพจน์ Twist Ratio ของใบบิด

อธิพจน์ของ TR พบว่าเพิ่มมากขึ้น ค่า Nu/Nu_0 และ f/f_0 กลับมีค่าลดลง ที่ค่า PR ต่ำๆ จะให้ค่า Nu/Nu_0 และ f/f_0 ที่เยอะ ส่วนที่ค่า TR สูงๆ จะให้ค่า Nu/Nu_0 และ f/f_0 ที่น้อย และเมื่อพิจารณาในส่วนของการสร้างการไหลเมื่อ ค่า TR แตกต่างกัน พบว่าเมื่อค่า TR เพิ่มขึ้นระยะเกลียวของของไหลจะมีระยะที่ยาวขึ้น และมีความรุนแรงในการปั่นป่วนน้อยลงด้วย ในส่วนของค่าสมรรถนะเชิงความร้อนค่า พบว่าที่ $TR=4$ จะให้ค่าค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมากกว่า TR ทุกๆค่าวน ซึ่งจะให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมากที่สุดเท่ากับ 1.22 เท่า ที่ $Re=10,000$

6.2 ข้อเสนอแนะการพัฒนางานวิจัย

จากผลงานวิจัยที่ได้นำเสนอทำให้ทราบถึงข้อดีของการใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับพฤติกรรมการไหล ลักษณะการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อม เนื่องจากสามารถประหยัดเวลาที่ใช้ในการจำลองการไหล นอกจากนี้ยังสามารถลดต้นทุนสำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองได้อีกด้วย อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเป็นเพียงการทำนายถึงผลการจำลองที่มีความเป็นไปได้ สำหรับการนำผลการวิเคราะห์ที่ได้ศึกษาไปใช้งานจริงนั้นค่าสมรรถนะทางความร้อนที่ได้ยังขึ้นอยู่กับความถูกต้องและแม่นยำของเครื่องมือวัดอีกด้วย

สำหรับแนวทางการพัฒนางานวิจัยต่อไปนั้น เมื่อพิจารณาถึงการใช้ตัวสร้างความปั่นป่วนสองชนิดร่วมกัน พบว่ายังสามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเพิ่มขึ้นได้ไปอีก

หากทำการปรับมุมปะทะการไหลให้เหมาะสมของแผ่นcribแบบแยกที่ติดตั้งบนผนัง หรือการพัฒนาให้มีแผ่นcribอยู่บนใบพัด ซึ่งเป็นแนวทางที่น่าสนใจต่อการนำไปศึกษาในอนาคต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- Bazdid–Tehrani, F. and Naderi-Abadi, M. 2004. “Numerical Analysis of Laminar Heat Transfer in Entrance Region of a Horizontal Channel with Transverse Fins.” **Int. Commun. Heat Mass Transfer.** 31(2): 211–220.
- Berner, C., Durst, F. and McEligot, D.M. 1984. “Streamwise–periodic Flow around Baffles.” in: **Proceedings of the 2nd International Conference on Applications of Laser Anemometry to Fluid Mechanics.** Lisbon, Portugal.
- Cheng, C.H. and Huang, W.H. 1989. “Laminar Forced Convection Flows in Horizontal Channel with Transverse Fins Placed in Entrance Regions.” **Numerical Heat Transfer. Part A.** (16): 77–100.
- Cheng, C.H. and Huang W.H. 1991. “Numerical Prediction for Laminar Forced Convection in Parallel–plate Channels with Transverse Fin Arrays.” **Int. J. Heat Mass Transfer.** 34: 2739–2749.
- Dutta, S., Dutta, P., Jones, R.E. and Khan, J.A. 1997. “Experimental Study of Heat Transfer Coefficient Enhancement with Inclined Solid and Perforated Baffles.” **International Mechanical Engineering Congress and Exposition.** Dallas, Texas, ASME Paper No. 97–WA/HT–4, November 1621.
- Dutta, P. and Dutta, S. 1998. “Effect of Baffle Size, Perforation and Orientation on Internal Heat Transfer Enhancement.” **Int. J. Heat Mass Transfer.** 41(19): 3005–3013.
- Dutta, P. and Hossain, A. 2005. “Internal Cooling Augmentation in Rectangular Channel Using Two Inclined Baffles.” **Int. J. Heat Fluid Flow.** 26: 223–232.
- Eiamsa-ard, S. and Promvongse, P. 2009. “Thermal Characteristics of Turbulent Rib-grooved Channel Flows.” **International Communications in Heat and Mass Transfer.** 36: 705–711.
- Founti, M.A. and Whitelaw, J.H. 1981. “Shell Side Flow in a Model Disc and Doughnut Heat Exchanger.” **Tech. Report FS/81/37.** Mech. Eng. Dept., Imperial College, London, UK.
- Gee, D.L. and Webb, R.L. 1980. “Forced Convection Heat Transfer in Helically Rib–Roughened Tubes.” **Int. J. Heat Mass Transfer.** 23: 1127–1136.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Guo, Z. and Anand, N.K. 1997. “Three Dimensional Heat Transfer in a Channel with a Baffle in the Entrance Region.” **Numerical Heat Transfer. Part A.** 31: 21–35.
- Gupta D, Solanki SC, Saini JS. 1997. “Thermohydraulic performance of solar air heaters with roughened absorber plates.” **Solar Energy.** 61: 33–42.
- Gupta, A. et al. 2008. “Local heat transfer distribution in a square channel with 90° continuous, 90° saw tooth profiled and 60° broken ribs.” **Experimental Thermal and Fluid Science.** 32: 997–1010.
- Habib, M.A., Mobarak, A.M., Sallak, M.A., Abdel Hadi, E.A. and Affify, R.I. 1994. “Experimental Investigation of Heat Transfer and Flow over Baffles of Different Heights.” **ASME J. Heat Transfer.** 116: 363–368.
- Han, J.C., Glicksman, L.R. and Rohsenow, W.M. 1978. “An Investigation of Heat Transfer and Friction for Rib-roughened Surfaces.” **Int. J. Heat Mass Transfer.** 21: 1143–1156.
- Han J.C., Zhang Y.M., 1992. “High performance heat transfer ducts with parallel broken and V-shaped broken ribs.” **International Journal of Heat and Mass Transfer.** 35: 513–523.
- Kamali, R. and Binesh, A.R. 2008. “The Importance of Rib Shape Effects on the Local Heat Transfer and Flow Friction Characteristics of Square Ducts with Ribbed Internal Surfaces.” **International Communications in Heat and Mass Transfer.** 35: 1032–1040.
- Karwa, R. 2003. “Experimental Studies of Augmented Heat Transfer and Friction in Asymmetrically Heated Rectangular Ducts with Ribs on The heated wall in Transverse, Inclined, V-Continuous and V-Discrete Pattern.” **Int. Comm. Heat Mass Transfer.** 30: 241–250.
- Kim, K.Y. and Lee, Y.M. 2007. “Design Optimization of Internal Cooling Passage with V-shaped Ribs.” **Numerical Heat Transfer Part A: Applications.** 51(11): 1103–1118.
- Kumar, S. and Saini R.P. 2009. “CFD Based Performance Analysis of a Solar Air Heater Duct Provided with Artificial Roughness.” **Renewable Energy.** 34: 1285–1291.

- Lee, D.H. and Rhee, D.H. 2009. “Detailed Measurement of Heat/Mass Transfer with Continuous and Multiple V-shaped Ribs in Rectangular Channel.” **Energy**. 34: 1770-1778.
- Lopez, J.R., Anand, N.K. and Fletcher, L.S. 1996. “Heat Transfer in a Three-dimensional Channel with Baffles.” **Numer. Heat Transfer A**. 30: 189–205.
- Momin, A.-M.E., Saini, J.S., and Solanki, S.C., 2002. “Heat Transfer and Friction in Solar Air Heater Duct with V-shaped Rib Roughness on Absorber Plate.” **International Journal of Heat and Mass Transfer**. 45: 3383–3396.
- Mousavi, S.S. and Hooman, K. 2006. “Heat and Fluid Flow in Entrance Region of a Channel with Staged Baffles.” **Energy Conversion and Management**. 47: 2011–2019.
- Patankar, S. V., Liu, C. H. and Sparrow, E. M. 1977. “Fully Developed Flow and Heat-Transfer in Ducts Having Streamwise-Periodic Variations of Cross-Sectional Area.” **ASME J. Heat Transfer**. 99: 180–186.
- Promvongse and P. Kwankaomeng, S. 2010. “Periodic Laminar Flow and Heat Transfer in a Channel with 45° Staggered V-baffles.” **International Communications in Heat and Mass Transfer**. 37: 841–849.
- Promvongse, P. et al. 2010c. “Enhanced Heat Transfer in a Triangular Ribbed Channel with Longitudinal Vortex Generators” **Energy Conversion and Management**. 51: 1242–1249.
- Promvongse, P. and Tianpong, C. 2008. “Thermal Performance Assessment of Turbulent Channel Flows over Different Shaped Ribs.” **International Communications in Heat and Mass Transfer**. 35: 1327–1334.
- Promvongse, P. Changcharoen, W. Kwankaomeng, S. and Tianpong, C. 2011 “Numerical heat transfer study of turbulent square-duct flow through inline V-shaped discrete ribs.” **International Communications in Heat and Mass Transfer**. 38: 1392-1399.
- Ryu, D.N. et al. 2007. “Analysis of Turbulent Flow in Channels Roughened by Two-dimensional Ribs and Three-dimensional Blocks. Part II: Heat Transfer.” **Int. J. Heat and Fluid Flow**. 28: 1112–1124.

- Sripattanapipat, S., and P. Promvonge. 2009. "Numerical Analysis of Laminar Heat Transfer in a Channel with Diamond-shaped Baffles." **Int. Comm. Heat Mass Transfer** 36: pp. 32–38.
- Thianpong, C. et al. 2009. "Thermal Characterization of Turbulent Flow in a Channel with Isosceles Triangular Ribs." **International Communications in Heat and Mass Transfer**. 36: 712–717.
- Webb, R.L. Eckert, E.R.G. Goldstein, R.J. 1971 "Heat transfer and friction in tubes with repeated-rib roughness." **International Journal of Heat and Mass Transfer**. 14: 601–617.
- Webb G.W. and Ramadhyani S. 1985. "Conjugate Heat Transfer in a Channel with Staggered Ribs." **Int. J. Heat Mass Transfer**. 28 : 1679–1687.
- Yang, Y.T. and Hwang, C.W. 2004. "Numerical calculations of heat transfer and friction characteristics in rectangular ducts with slit and solid ribs mounted on one wall." **Numerical Heat Transfer Part A: Applications**. 45 (4): 363–375.
- Yang, Y.T. and Hwang, C.Z. 2003. "Calculation of Turbulent Flow and Heat Transfer in a Porous-baffled Channel." **Int. J. Heat Mass Transfer**. 46 (5): 771–780.
- พงษ์เจต พรหมวงศ์. 2542. การถ่ายเทความร้อน. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล. คณะวิศวกรรมศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. หน้า 167–252.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของอากาศที่ความดันบรรยากาศ

ตารางที่ ก-1 คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของอากาศที่ความดันบรรยากาศ

T (K)	ρ (kg/m ³)	C_p (kJ/kg.K)	$\mu \times 10^7$ (N.s/m ²)	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	411.3	112.2	64.3	155	0.723
1000	0.3482	1.141	424.4	121.9	67.7	168	0.726
1100	0.3166	1.159	449.0	141.8	71.5	195	0.728
1200	0.2902	1.175	473.0	162.9	76.3	224	0.728
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
1900	0.1833	1.307	663	362	128	534	0.677
2000	0.1741	1.337	689	296	137	589	0.672

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

ME NETT 28
KHON KAEN UNIVERSITY

The 28th Conference of
Mechanical Engineering Network of Thailand
**การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล
แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28**
วันที่ 15-17 ตุลาคม 2557 จังหวัดขอนแก่น

"Driving ME
Research
Education
and Innovation
Towards Creative
Economy"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CST-61

การศึกษาการถ่ายเทความร้อนเชิงตัวเลขของการไหลชนิดปั่นป่วนในท่อสี่เหลี่ยม
ไหลผ่านท่อรูปตัววีและใบบิดแบบต่อเนื่อง

Numerical heat transfer study of turbulent square-duct flow through inline

V-shaped discrete ribs and continuous twisted tape insert

ธนทรัพย์ จันทร์ทรงกลด¹, วิฑิตา เจษฎารัตนชัย^{1*}, และ อานาจ บุญลอย²¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

1 ซอยฉลองกรุง ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

²ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1518 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

*ติดต่อ: Email: kjwithad@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

แบบจำลองเชิงตัวเลขสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนและลักษณะการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมที่มีครีบบรรูปตัววีทำมุมปะทะการไหลเท่ากับ 60° และอัตราส่วนแผ่นกันต่อความสูงท่อ $PR=1$ และใบบิดแบบต่อเนื่อง $TR=1$ ได้ถูกศึกษาในงานวิจัยนี้ โดยฟลักซ์ความร้อนแบบคงที่ถูกนำมาใช้ที่ผิวบนและผิวด้านล่างของท่อ ในขณะที่ด้านข้างของท่อทั้งสองถูกหุ้มด้วยฉนวน การคำนวณ finite volume method และ SIMPLE algorithm ถูกนำมาใช้ในการศึกษาในช่วงการไหลของอากาศที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ในช่วง 10,000 ถึง 25,000 ผลการศึกษาของผลกระทบของค่า BR ต่อลักษณะการถ่ายเทความร้อนพบว่าลักษณะการไหลหมุนวนแบบสวนทางกันที่เกิดจากครีบบและใบบิดดังกล่าวสามารถทำให้เกิดการกระแทกที่บริเวณผนังท่อ ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ การเพิ่มขึ้นของค่า BR นำไปสู่การเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อนและแรงเสียดทาน ค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 1.3 และมีค่าการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้นที่มากที่สุดเท่ากับ 2.76 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่า ที่ $BR = 0.05$

คำหลัก: ครีบบรูปตัววี, ใบบิดแบบต่อเนื่อง, โดยฟลักซ์ความร้อนแบบคงที่, ตัวเลขเรย์โนลด์, การถ่ายเทความร้อนที่ปรับตัวเต็ม

Abstract

The numerical simulation for turbulent periodic flow and heat transfer characteristic in a square-duct with 60° V-shaped discrete thin ribs placed on two opposite heated walls with Pitch ratio $PR=1$ and continuous twisted tape insert with twist ratios $TR=1$ was presented in the paper. The isothermal-flux condition was applied on both the upper and lower duct walls, while the two sidewalls were insulation. The computation based on the finite volume method with the SIMPLE algorithm have been conducted in the air flow in terms of Reynolds number based on the hydraulic diameter of the square duct, D_h , ranging from 10,000 to 25,000. Effects of difference rib height to duct diameter ratios (BR) on the thermal characteristics have been investigated. It is found that counter-rotating vortices cause by the ribs and the

CST-61

twist along the square-duct length can induce impingement/attachment flows on the walls leading greater increase in heat transfer over the test duct. In addition, the rise of BR leads to the increase in heat transfer and friction loss. The maximum thermal performance is around 1.3 for rib with $BR = 0.05$ where the heat transfer rate is about 2.75 times above the smooth duct at higher Reynolds number.

Keywords: Continuous twisted tape insert, Fully developed periodic flow, Isothermal-flux, Reynolds number, V-shaped discrete thin ribs.

1. บทนำ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตต่างๆ นำอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมาใช้กันอย่างแพร่หลาย อาทิ เช่น เครื่องทำความเย็น เครื่องอบแห้ง เต้าเผา เครื่องยนต์ แผงรับความร้อนจากแสงอาทิตย์ เป็นต้น และเพื่อให้ได้มาซึ่งการผลิตที่มีประสิทธิภาพ การพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนให้มีความร้อนสูงยิ่งขึ้นจึงจำเป็นอย่างยิ่ง โดยที่หน้าที่สำคัญของ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน คือ การนำเอาพลังงานความร้อนมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเกิดประโยชน์สูงสุด ดังนั้นการพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ให้ได้มาซึ่งสมรรถนะทางความร้อนที่สูง ก็จะเป็นการ ใช้พลังงานความร้อนได้อย่างคุ้มค่า ไม่สิ้นเปลืองให้สูญเปล่า

โดยทั่วไปเทคนิคการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนได้แบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม [1-3] คือ กลุ่มที่ 1 แบบ active techniques เป็นการนำเอาแหล่งพลังงานภายนอกเข้ามาช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อน เช่น อุปกรณ์ทางกล อุปกรณ์ทางไฟฟ้าซึ่งจะมีผลทำให้เกิดการสั่นของผิวทำให้ของไหลเกิดการสั่นสามารถช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ดียิ่งขึ้น กลุ่มที่ 2 แบบ passive techniques เป็นการออกแบบลักษณะพื้นผิวของท่อแบบพิเศษต่างไปจากผิวเรียบและปรับปรุงของไหลหรือสารทำงานเพื่อให้มีการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ดีมากขึ้นโดยไม่มีพลังงานภายนอกเข้ามาเกี่ยวข้อง

ในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน วิธีที่ได้รับความนิยมกันส่วนมากก็คือ วิธีการแบบ passive techniques โดยการติดตั้งอุปกรณ์การสร้างการ

ปั่นป่วนเข้าไปภายในท่อเช่น ติดตั้งแผ่นกั้น (baffle) ใช้ครีบริบรูปทรงต่างๆ (ribs) หรือ อาจจะใช้ลักษณะรูปทรงปีก (winglet) เป็นต้นเพื่อเพิ่มความเร็วของการไหลของของไหลส่งผลทำให้ความเร็วสัมพัทธ์ในบริเวณใกล้เคียงกับผนังท่อมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้นส่งผลให้สมรรถนะทางความร้อนของระบบดีขึ้น แต่ถึงกระนั้นการที่มีวัตถุไปด้านทางการไหลให้เกิดความปั่นป่วนเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่าการสูญเสียความดันของระบบเพิ่มขึ้นและเป็นผลต่อค่าการสูญเสียความดันเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน

จากการศึกษาการงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่ามีการศึกษาโครงสร้างการไหล,ค่าการนำความร้อน รวมถึงค่าตัวประกอบเสียดทาน เพื่อที่จะให้ได้มาซึ่งค่าสมรรถนะทางความร้อนที่สูงที่สุด วิธี การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนแบบ passive techniques ได้มีการใช้วิธีการสร้างแบบจำลองการ คำนวณเชิงตัวเลข เข้ามาร่วมวิเคราะห์ร่วมกับการทดลองจริง เพื่อที่จะเข้าใจถึงกลไกการไหลจากสนามการไหลที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อน และความดันตกคร่อม ซึ่งได้รับอิทธิพลจากตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ศึกษา Kellar และ Patankar [4] ศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนในช่องขนานที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นขวางยั้งจากผลการศึกษารูปได้ว่าการถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเพิ่มความสูงของแผ่นกั้นและทำการลดระยะห่างระหว่างแผ่น Patankar et al. [5] ศึกษาแบบการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบเป็นคาบของการไหลที่มีการพัฒนาเติมที่ Han และ Zhang [6] นำเสนอการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้นในท่อจัดด้วยครีบริบทั้งหมด 7 รูปทรงของครีบริบที่วางเว้นช่วงพบว่า

CST-61

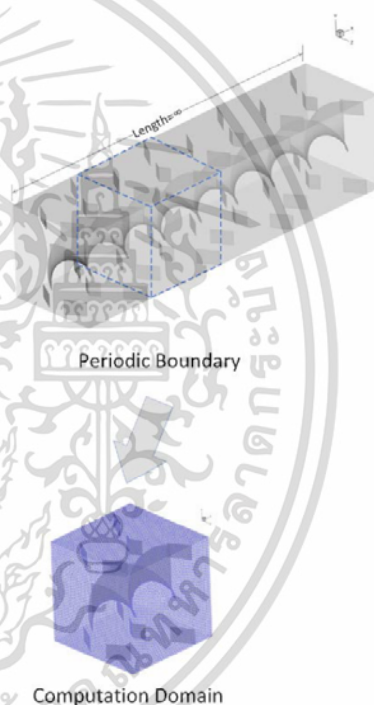
ครีบริบรูปร่างวงเว้นช่วงมุม 60° ให้การถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าท่อผิวเรียบ 4.5 เท่า และดีกว่าครีบริบวงต่อเนื่องการทดลองทั้งหมดได้ติดครีบริบที่ผนังสองด้าน และค่าความสูงครีบริบต่อความสูงท่อมีค่า $b/D = 0.0625$ และระยะพิทช์ต่อความสูงของครีบริบที่ค่า $L/b = 10$ Promvong *et al.* [7] ทำการทดลองเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วน 3 มิติในท่อจัดรูสที่ติดแผ่นกั้นวางเอียงที่เสียบทแยงกึ่งกลางท่อ ทำมุม 30° ด้วยอัตราส่วนการบล็อกการไหล (Blockage ratio, BR) เท่ากับ 0.1 - 0.3 ระยะห่างระหว่างแผ่นต่อความสูงของท่อหรือระยะพิทช์ $PR = 1$ และ 2 โดยการไหลแบบเป็นคาบเงื่อนไข พลิกซ์ความร้อนคงที่ที่ผนัง ในช่วง เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 4000 - 20000 และเมื่อมีการปรับค่าที่ได้จากการจำลองเชิงตัวเลขด้วยสมการสหสัมพันธ์ ทำให้ค่าเลขนัสเซลท์และตัวประกอบเสียดทาน เข้าใกล้ค่าที่ได้จากการทดลอง พบว่า ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ที่ได้มีค่าอยู่ระหว่าง 1.5 - 6.2 เท่า และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมีค่าอยู่ระหว่าง 2 - 55 เท่า เมื่อเทียบกับท่อจัดรูสผิวเรียบ โดยมีค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนอยู่ในช่วง 1.2 - 1.95

จากงานวิจัยที่ผ่านมา ยังไม่มีการศึกษาพฤติกรรม การไหล และค่าการถ่ายเทความร้อนภายในท่อโดยใช้ตัวสร้างความปั่นป่วนสองชนิด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอ แบบจำลอง การคำนวณเชิงตัวเลขสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนแบบ 3 มิติ โดยพิจารณาลักษณะการไหลเป็นคาบในท่อจัดรูสที่มีการติดตั้งแผ่น ครีบริบแยกรูปตัววี ด้านบนและด้านล่างของท่อ แบบปลายวิธี ทวนกระแสการไหลและไบบิตแบบต่อเนื่อง โดยศึกษาถึงผลของอัตราการบล็อกการไหล BR ที่มุมปะทะการไหล $\alpha = 60^\circ$ มีอิทธิพลต่อสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน พฤติกรรมการไหลและค่าความเสียดทานที่เกิดขึ้น

2. โครงสร้างการไหลและสมการที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดครีบริบวง

ระบบที่ให้ความสนใจเป็นท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสติดตั้งครีบริบแยกรูปตัววีด้านบนกับด้านล่างท่อ ทำมุมปะทะการไหล $\alpha = 60^\circ$ มีอัตราส่วนระหว่างระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นต่อความสูงของท่อ $PR = 1$ ทำมุมปะทะและมีอัตราส่วนระหว่างความสูงของแผ่นกั้นต่อความสูงของท่อ (BR) ในช่วง 0.00-0.15 ความสูงของท่อหน้าตัดจัดรูสที่ใช้ในการจำลองนี้มีค่า $H = 0.04m$ และติดไบบิตต่อเนื่องตรงกลางท่อ โดย $TR = 1$ สมมติท่อยาวมาก ดังแสดงไว้ในรูปที่ 1 ซึ่งพิจารณาการไหลเป็นแบบคาบ (periodic) มีการจัดวางแผ่นกั้นวางแบบปลายวิธีตามกระแสการไหล



รูปที่ 1 รูปทรงของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดตั้งครีบริบแยกรูปตัววีกับไบบิตต่อเนื่อง และโดเมนที่ใช้ใน

CST-61

การคำนวณโดยคิดการไหลแบบ periodic ที่มีการสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมแบบไม่สม่ำเสมอ

2.2 สมการควบคุม

สมการความต่อเนื่อง:

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

(1)

สมการโมเมนตัม:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

สมการพลังงาน:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma + \Gamma_r \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} \quad (3)$$

เมื่อ Γ และ Γ_r คือ การแพร่ทางความร้อน และการแพร่ทางความร้อนแบบปั่นป่วน ตามลำดับ กำหนดโดย

$$\Gamma = \mu / Pr \quad \text{และ} \quad \Gamma_r = \mu_t / Pr_t \quad (4)$$

การไหลแบบปั่นป่วนจำเป็นต้องมีเทอมของความเค้นของเรย์โนลด์ $-\rho \overline{u_i u_j}$ ในสมการที่ (2) ข้อสมมติฐานของบูสซิเนสก์เกี่ยวข้องกับความเค้นของเรย์โนลด์คือการวัดของความเร็วเฉลี่ย กำหนดโดย

$$-\rho \overline{u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij} \quad (5)$$

เมื่อ k คือ พลังงานจลน์ปั่นป่วน กำหนดโดย

$k = \frac{1}{2} \overline{u_i u_i}$ และ δ_{ij} คือ เดลต้าไครเนกเกอร์, μ_t คือ ความหนืดปั่นป่วน กำหนดโดย $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$

แบบจำลอง RNG $k-\varepsilon$ เป็นตัวอย่างของรูปแบบสมการที่ใช้สมมติฐานของบูสซิเนสก์ และมาจากสมการนาเวียร์-สโตก กำหนดโดย

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + G_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon \quad (7)$$

สมการข้างต้น α_k และ α_ε คือ ประสิทธิภาพผกผันของเลขพรานต์สำหรับ k และ ε ตามลำดับ $C_{1\varepsilon}$ และ $C_{2\varepsilon}$ คือค่าคงที่, ประสิทธิภาพของความหนืด μ_{eff} กำหนดโดย

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t = \mu + \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (8)$$

เมื่อ C_μ คือค่าคงที่ที่กำหนดเป็น 0.0845 ตาม

ทฤษฎี RNG

ในงานวิจัยไม่มีตัวแปรที่ให้ความสนใจอยู่ที่ 4 ตัวแปร คือ เลขเรย์โนลด์ ตัวประกอบเสียดทาน เลขนัสเซลและสมรรถนะเชิงความร้อน ซึ่งค่าเลขเรย์โนลด์นิยามโดย

$$Re = \rho u_0 D / \mu \quad (9)$$

ตัวประกอบเสียดทาน f คำนวณได้จากความดันตกคร่อม, ΔP ตลอดช่วงความยาว periodic ของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส, L

$$f = \frac{(\Delta P) D}{2 \rho u_0 L} \quad (10)$$

การถ่ายเทความร้อนในรูปของค่าการกระจายเลขนัสเซล ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$Nu_x = \frac{h_x D}{k} \quad (11)$$

ค่าเลขนัสเซลเฉลี่ยสามารถคำนวณได้จาก

$$Nu = \frac{1}{A} \int Nu_x dA \quad (12)$$

สมรรถนะเชิงความร้อน, TEF

$$TEF = \left(\frac{Nu}{Nu_0} \right) \left(\frac{L}{f_0} \right)^{1/3} \quad (13)$$

เมื่อ Nu_0 และ f_0 คือ เลขนัสเซลท์และตัวประกอบเสียดทานของท่อเปล่าผิวเรียบที่ไม่ได้มีการติดตั้งตัวสร้างความปั่นป่วนตามลำดับ

2.3 โดเมนและกริดที่ใช้ในการคำนวณ

สำหรับการไหลในท่อจัตุรัส โดเมนที่ใช้ในการคำนวณหาผลเฉลยเป็นเอลิเมนต์รูปทรงสี่เหลี่ยมและแบ่งกริดแบบไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform grid) โดยให้บริเวณใกล้ผิวท่อที่มีความละเอียดมากกว่า การหาผลกระทบบของกริดที่มีผลต่อคำตอบ ได้ทำการเปรียบเทียบผลเฉลยโดยใช้จำนวนของกริดที่แตกต่างกัน คือ ที่ 53400, 82500, 182400 และ 217000 พบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนกริดจาก 182400 เป็น 217000 ค่าเลขนัสเซลท์และตัวประกอบเสียดทานมีการเปลี่ยนแปลงเพียง 0.4 % ดังนั้นจึงเลือกจำนวนกริดเท่ากับ 182400 สำหรับการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

CST-61

2.4 เงื่อนไขขอบเขต

พิจารณาทางเข้าและทางออกเป็นแบบ periodic translation สมมติอากาศที่ 300 K และมีค่าเลขพรานด์ 0.7 ไหลเข้าด้วยอัตราการไหลเชิงมวลคงที่ รูปร่างความเร็วทางเข้าและทางออกเหมือนกันสมมติคุณสมบัติทางกายภาพของอากาศมีค่าคงที่ โดยอ้างอิงที่อุณหภูมิเฉลี่ยที่ทางเข้าเงื่อนไขขอบเขตไม่มีการลื่นไถลที่ผนัง (no-slip conditions) หรือความเร็วที่ผนังมีค่าเท่ากับศูนย์ เป็นผนังที่อยู่กับที่ (stationary wall) กำหนดให้ที่ ด้านบนและด้านล่าง ท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ 1500 W/m^2 และด้านข้างทั้งสองเป็นฉนวน ให้ครีบริบตัวแบบแยกตัวและไบบิตต่อเนื่องไม่มีการถ่ายเทความร้อน

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

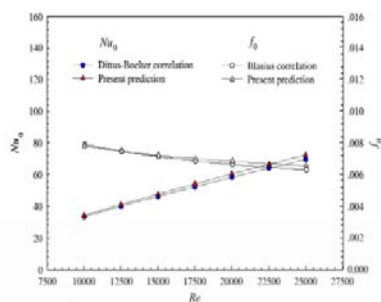
3.1 การพิสูจน์ความถูกต้องของท่อจัตุรัสผิวเรียบ

Promvong และ Changcharoen [8] ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทานของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบเปรียบเทียบกับผลเฉลยแม่นยำตรงตั้งรูปที่ 2 พบว่า

ค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทานมีความแตกต่างจากผลเฉลยแม่นยำตรงอยู่ในช่วง $\pm 5.3\%$ และ $\pm 4.8\%$ ตามลำดับ ผลเฉลยแม่นยำตรงของค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทานสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยมีฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ กำหนดโดย

$$\text{ผลเฉลยแม่นยำตรงของ Dittus-Boelter} \\ Nu_0 = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} \text{ สำหรับ } Re \geq 10,000 \quad (14)$$

$$\text{ผลเฉลยแม่นยำตรงของ Blasius} \\ f_0 = 0.079Re^{-0.25} \text{ สำหรับ } Re \leq 20,000 \quad (15) \\ f_0 = 0.046Re^{-0.2} \text{ สำหรับ } Re \leq N20,000 \quad (16)$$



รูปที่ 2 การตรวจสอบความถูกต้องของ การถ่ายเทความร้อนตัวประกอบเสียดทานของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบ

3.2 พฤติกรรมการไหล

รูปที่ 3 แสดงการไหลของอากาศผ่านสำหรับครีบริบแยกตัวและไบบิตวางมุมปะการไหลเท่ากับ 60° ที่ค่า $BR = 0.15$, $Re = 2000$ จากการพบว่า เมื่ออากาศไหลผ่านตัวสร้างความปั่นป่วนทั้งสองจะเกิดการหมุนวนอยู่สามจุด ได้แก่บริเวณตรงการซึ่งเกิดจากการนำการไหลของไบบิต และบริเวณที่ติดกับผิวด้านบนและด้านล่างของท่อซึ่งเกิดจาก ค่าความแตกต่างของความดันตกคร่อมที่บริเวณด้านหน้าและด้านหลัง ของแผ่นครีบริบเหนี่ยวนำให้เกิดการหมุนวนบริเวณด้านหลังครีบริบ และเกิดการกระแทกของกระแสการไหลที่บริเวณผนังทั้งสองด้านของท่อทำให้อากาศมีเวลาสัมผัสและแลกเปลี่ยนความร้อนกับผิวท่อมากขึ้น



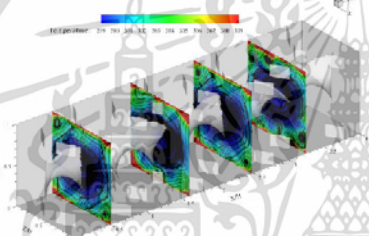
รูปที่ 3 โครงสร้างการไหลและขนาดขวางการไหลที่ $BR = 0.15$, $Re = 2000$

CST-61

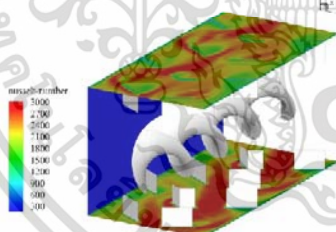
3.3 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน

ลักษณะโครงสร้างการไหลแบบปั่นป่วนที่แสดงไว้ในรูปที่ 3 จะทำให้อากาศที่มีอุณหภูมิตัวบริเวณกลางท่อกระจายตัวไปที่บริเวณที่ผนังท่อที่ได้รับพริกซ์ความร้อนโดยตรงซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 4 ส่งผลให้ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศที่บริเวณใกล้กับผนังท่อและอุณหภูมิของท่อมีความแตกต่างกันมาก ทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับท่อเปล่า

จากรูปที่ 5 แสดงความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของเลขนัสเซลที่ ซึ่งบริเวณตรงกลางของท่อจะมีค่าที่สูงกว่าบริเวณตรงมุมของท่อเนื่องจากกระแสการปั่นป่วนที่มากกว่า

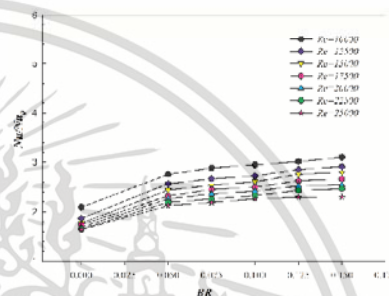


รูปที่ 4 การกระจายอุณหภูมิในระนาบขวางการไหล ที่ $BR=0.15, Re=2000$



รูปที่ 5 การกระจายเลขนัสเซล ที่ $BR=0.15, Re=2000$

รูปที่ 6 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าอัตราส่วนนัสเซลที่กับค่า BR ที่ค่า Re ต่างๆ พบว่าการติดตั้งไบบิตเพียงอย่างเดียว ($BR = 0.00$) จะได้อัตราส่วนนัสเซลที่ที่น้อยกว่าการติดตั้งครีบเพิ่มเข้าไปด้วยซึ่งหมายความว่า การติดตั้งครีบเข้าไป จะช่วยให้การถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวกับของไหลดีขึ้นกว่าการติดตั้งไบบิตเพียงอย่างเดียวถึง 30%-40% ของอัตราส่วนนัสเซลที่ที่ติดตั้งไบบิตเพียงอย่างเดียว



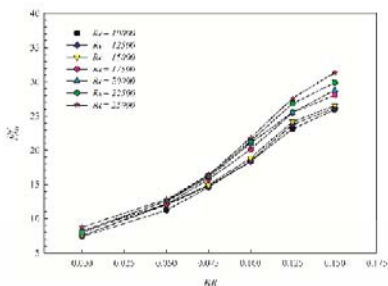
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนนัสเซลที่กับ BR ที่ค่า Re ต่างๆ

และยังสามารถสรุปได้อีกว่า เมื่อค่าเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้นค่าอัตราส่วนนัสเซลที่ก็จะลดลง และเมื่อทำการเพิ่มค่า BR ทำให้ค่าอัตราส่วนอัตราส่วนนัสเซลที่มีค่าเพิ่มขึ้น

3.4 การสูญเสียความดัน

สำหรับค่าความดันสูญเสียหรือค่าความดันตกคร่อมแสดงไว้ในรูปของอัตราส่วนของค่าความดันตกคร่อมกรณีเพิ่มแผ่นกันต่ออัตราส่วนค่าความดันตกคร่อมของท่อเปล่าดังรูปที่ 7 แสดงให้เห็นแน่ชัดว่าเมื่อมีการติดตั้งครีบเพิ่มเข้าไปการสูญเสียความดันที่เกิดขึ้นจะมีค่ามากยิ่งขึ้น และแสดงให้เห็นอีกว่าเมื่อค่า BR และ Re เพิ่มขึ้นการสูญเสียความดันก็จะเกิดขึ้นมากตามมาเช่นกัน

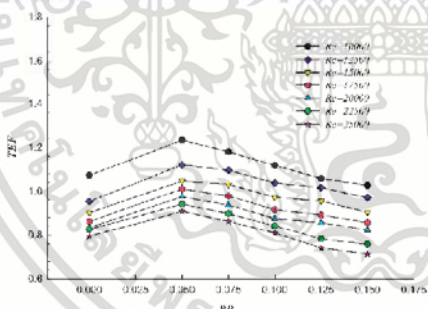
CST-61



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับ BR ที่ค่า Re ต่างๆ

3.5 สมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับ BR ที่ค่า Re ต่างๆ พบว่าการติดตั้งครีบบนเข้าไปสร้างความปั่นป่วนร่วมกับไบบิตในช่วงของ BR เท่ากับ 0.05-0.10 จะสามารถช่วยเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนได้มากถึง 10%-20% ของสมรรถนะทางความร้อนของการใช้ไบบิตเพียงอย่างเดียว แต่เมื่อค่า BR เพิ่มมากขึ้นเกินกว่า 0.10 แล้วค่าสมรรถนะทางความร้อนที่ได้จะต่ำกว่าการใช้ไบบิตเพียงอย่างเดียว สืบเนื่องจากเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของการสูญเสียความดันมีมากเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อน



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับ BR ที่ Re ต่างๆ

ดังนั้นค่า BR ที่ให้ค่าสมรรถนะทางความร้อนสูงที่สุดจากการใช้ไบบิต และครีบบนแยกตัวเป็นตัวสร้าง

ความปั่นป่วน คือ $BR=0.05$ ที่ $Re=10000$ จะให้ค่า $TEF=1.3$ และมีค่าการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้นถึง 2.75 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่า ($Nu/Nu_0 = 2.75$)

4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาพฤติกรรมการไหลและลักษณะการถ่ายเทความร้อนในท่อจัดรูส้อมีการติดตั้ง ตัวสร้าง ความปั่นป่วนสองชนิดคือไบบิตต่อเนื่องและครีบบนแยกตัวติดตั้งบนผิวผนังด้านบนและด้านล่างของท่อ ทำมุมปะทะการไหล 60° ที่อัตราส่วนระยะพิทช์เท่ากับ 1.00 ที่ค่า $BR = 0.05, 0.075, 0.10, 0.125$ และ 0.15 พบว่า

1.) กระแสการไหลที่เกิดขึ้น จะเกิดการหมุนวนสามจุดคือ การไหลหมุนวนตรงกลางที่เกิดจากการนำ การไหลของไบบิต และอีกสองจุดคือ การไหลหมุนวนที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของความดันตกกลมที่แตกต่างกันของหน้าครีบบนและหลังครีบบน การไหลหมุนวนนี้จะทำให้เกิดการกระแทกของกระแสการไหลที่บริเวณผนังท่อและช่วยกระจายอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำไปยังบริเวณใกล้เคียงกับผนังท่อส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น

2.) การใช้ไบบิตเพื่อสร้างความปั่นป่วนในการไหลเพียงอย่างเดียวจะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่น้อยกว่าการเพิ่มครีบบนเข้ามาช่วยสร้างความปั่นป่วน ซึ่งการใช้ไบบิตและครีบบนสร้างความปั่นป่วนร่วมกันจะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนมากกว่าการใช้ไบบิตเพียงมากถึง 10% และเมื่อค่า BR เพิ่มขึ้นการถ่ายเทความร้อนก็จะเพิ่มมากขึ้นตาม ซึ่งจะตรงข้ามกับเมื่อ Re เพิ่มขึ้นการถ่ายเทความร้อนจะลดลง ถึงแม้ว่าการเพิ่มครีบบนเข้ามาหรือการเพิ่มค่า BR ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้น ยังทำให้เกิดผลเสียตามมาคือ การสูญเสียความดันที่เพิ่มขึ้นตามค่า BR

3.) การติดตั้งครีบบนเข้าไปสร้างความปั่นป่วนร่วมกับไบบิตในช่วงของ BR เท่ากับ 0.05-0.10 จะสามารถช่วยเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนได้มากถึง 10%-20% ของสมรรถนะทางความร้อนของการใช้

CST-61

ไม่บิดเพียงอย่างเดียว แต่เมื่อค่า BR เพิ่มมากขึ้นเกินกว่า 0.10 แล้วค่าสมรรถนะทางความร้อนที่ได้จะต่ำกว่าการใช้ไม่บิดเพียงอย่างเดียวสืบเนื่องจากเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของการสูญเสียความดันมีมากกว่าเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อน ดังนั้นค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 1.3 และมีค่าการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้นที่มากที่สุดเท่ากับ 2.76 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่า ที่ $BR = 0.05, Re = 10000$

5.รายการคำย่อและสัญลักษณ์

A	พื้นที่การถ่ายเทความร้อนจากการพา, m^2
BR	อัตราส่วนการขางการไหล, (e/D)
D	เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส, m ($=H$)
E	พลังงานรวม, J
e	ระยะการติดขอบ, m
f	ตัวประกอบเสียดทาน
H	ความสูงของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส, m
k	พลังงานจลน์ของความปั่นป่วนต่อหน่วยมวล, J/kg
k_a	ค่าการนำความร้อนของอากาศ, $W/m \cdot K$
L	ความยาวของท่อ, m
Nu	เลขนิตเชลต์เฉลี่ย
P	เส้นรอบรูป, m
PR	อัตราส่วนระยะห่างระหว่างครีบ, (p/D)
Pr	เลขพรานด์
Re	เลขเรย์โนลด์
s	ความหนาครีบ, m
T	อุณหภูมิ, K
TEF	ค่าตัวประกอบของการเพิ่มทางความร้อน
u_x	ความเร็วย่อยในแนวแกน x_x , m/s
u'_x	ความเร็วย่อยผันแปรในแนวแกน x_x , m/s
u_0	ความเร็วเฉลี่ย, m/s

x พิกัดบอกทิศทางการไหล

y^+ ระยะไร้นิวส์ที่วัดจากผนัง

สัญลักษณ์กรีก

Φ	ค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติใดๆ ของของไหล
Ω	เทนเซอร์ค่าเฉลี่ยของอัตราการผลิต, s^{-1}
Γ	การแพร่ทางความร้อน
α	มุมปะทะของครีบบักระแสการไหล, degree
β	มุมการติดปลายวี่, degree
α	เลขพรานด์ที่ยังผลผกผัน
ϕ	ค่าคุณสมบัติใดๆ ต่อหน่วยมวล
λ	ความหนืดที่สอง
μ	ความหนืดสัมบูรณ์, $N \cdot s/m^2$
ε	อัตราการผลิตสลายของความปั่นป่วน, m^2/s^3
ω	อัตราการผลิตสลายจำเพาะ, s^{-1}
ρ	ความหนาแน่น, kg/m^3
τ	ความเค้นเฉือน, N/m^2

ตัวห้อย

0	ท่อผิวเรียบ (smooth duct)
a	อากาศ (air)
m	เฉลี่ย (mean)
pp	กำลังของปั๊ม (pumping power)
s	พื้นผิว (surface)
w	ผนัง (wall)

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Incropera, F. and Dewitt, P.D. 2007. Introduction to heat transfer, 6th edition, John Wiley & Sons.
- [2] Webb, R. L. 1992. Principles of Enhanced Heat Transfer, New York: John-Wiley & Sons.
- [3] Bejan, A. and Kraus, A.D. 2003. Heat transfer handbook, New Jersey: John-Wiley & Sons.

CST-61

- [4] Kelkar, K.M., and Patankar, S.V. (1987). Numerical prediction of flow and heat transfer in a parallel plate channel with staggered fins of different spacings, *ASME J. Heat Transfer*, vol.109 1987, pp.25 - 30.
- [5] Patankar. S.V., Liu. C.H. and Sparrow. E.M. (1977). Fully developed flow and heat transfer in ducts having stream wise-periodic variations of cross-sectional area, *ASME J. Heat Transfer*, vol.99 1977, pp.180–186.
- [6] Han, J.C., and Zhang, Y.M. (1992). High performance heat transfer ducts with parallel broken and V-shaped broken ribs, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol.35 1992, pp.513 – 523.
- [7] Promvong. P., Skullong. S., Kwankaomeng. S., Thianpong. C. (2012). Heat transfer in square duct fitted diagonally with angle-finned tape - Part 2 : Numerical study, *International Communication in Heat and Mass Transfer*, vol.39, May 2012, pp.625-633.
- [8] Promvong. P., Changcharoen W., Kwankaom-eng. S., Thianpong. C. (2011). Numerical heat transfer study of turbulent square-duct flow through inline V-shaped discrete ribs, *International Communication in Heat and Mass Transfer*, vol.38, December 2011, pp.1392-1399

ประวัติผู้เขียน

ประวัติส่วนตัว :

ชื่อ-สกุล นายธนทรัพย์ จันทร์ทรงกลด
วัน เดือน ปีเกิด 23 กันยายน พ.ศ. 2529
ที่อยู่ 199/31 หมู่ 9 หมู่บ้านล้านนาวิล ตำบลสันผีเสื้อ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่
 รหัสไปรษณีย์ 50300 โทร 084-0415989

ความชำนาญเฉพาะด้าน การวิเคราะห์การไหลและการถ่ายเทความร้อนโดยใช้ CFD

ประวัติการศึกษา :

พ.ศ. 2552 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขา
 วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ประสบการณ์การทำงาน

พ.ศ. 2558-ปัจจุบัน ที่ บริษัท นิสสัน มอเตอร์ เอเชีย แปซิฟิก จำกัด ที่จำกัด 99 ที่อยู่ 74/1
 หมู่ 2 ถนนบางนา-ตราด กม. 22 ตำบลศรีษะจรจะเข้ใหญ่ อำเภอบางเสาธง สมุทรปราการ 10570

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้