

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาการถ่ายเทความร้อนเชิงตัวเลขของการไหลในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส
แบบปั่นป่วนผ่านครีบทวีแบบแยกตัว

NUMERICAL HEAT TRANSFER STUDY OF TURBULENT SQUARE-DUCT
FLOW THROUGH DISCRETE V-SHAPED RIBS



T128576



๐๗
๖๔๗๕๓
๒๕๕๕

๓ en

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 128576
วัน เดือน ปี 5 11 2555

b. 12552989
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.๒๕๕๕

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ KMITL-2012-EN-D-058-147 มอนูญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NUMERICAL HEAT TRANSFER STUDY OF TURBULENT SQUARE-DUCT
FLOW THROUGH DISCRETE V-SHAPED RIBS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ **KMITL-2012-EN-D-058-147** ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2012

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น มิให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาการถ่ายเทความร้อนเชิงตัวเลขของการไหลในท่อ
สี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบปั่นป่วนผ่านครีบริบตัววีแบบแยกตัว

นักศึกษา

นายวาโย ช่างเจริญ

รหัสนักศึกษา

49069151

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

พ.ศ.

2555

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการตรวจสอบเชิงตัวเลขสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนสามมิติ ที่มีลักษณะการไหลแบบพัฒนาอย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วงของการไหลและการถ่ายเทความร้อน ในท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดตั้งครีบริบบางรูปตัววีแบบแยกตัว ทำมุมปะทะ 60° กับทิศทางการไหล ซึ่งเรียงแบบตรงกันบนพื้นผิวให้ความร้อนแบบปลั๊กความร้อนคงที่ ที่ผนังด้านบนและด้านล่าง ส่วนผนังด้านข้างทั้งสองด้านและครีบริบหมุนวน ซึ่งคล้ายกับการไหลในช่องหล่อเย็นของใบกังหันก๊าซ การคำนวณเชิงตัวเลขใช้ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม การคู่ควบของความเร็วและความดันใช้กระบวนการแบบ SIMPLE และสำหรับเทอมของการพาใช้แบบแผนการคำนวณแบบ QUICK โดยใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบที่มีอัตราการไหลในเทอมของเลขเรย์โนลด์ที่อยู่ในช่วง 10,000 ถึง 50,000 ผลลัพธ์ของการคำนวณเชิงตัวเลขโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG $k-\epsilon$ ภายใต้การตรวจสอบถึงความถูกต้องด้วยข้อมูลเชิงทดลอง ของการไหลผ่านครีบริบสี่เหลี่ยมจัตุรัสรูปตัววีแบบแยกตัว พบว่าสอดคล้องกันดีกับผลการทดลอง ซึ่งผลการคำนวณการไหลในท่อยาวที่ติดตั้งครีบริบนั้น แสดงให้เห็นถึง ลักษณะการไหลที่พัฒนาอย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วงของรูปร่างความเร็วและเลขนัสเซลท์ โดยเริ่มเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง $x/D=7-12$ เมื่อวัดจากทางเข้าท่อทดสอบ ผลการตรวจสอบอย่างละเอียดจากอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความสูงครีบริบต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของท่อ, BR ค่าอัตราส่วนระยะห่างระหว่างครีบริบต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของท่อ, PR และมุมปะทะของครีบริบกับทิศทางการไหล, α ที่ส่งผลต่อลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อน สำหรับการไหลแบบพัฒนาอย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วงในท่อที่ติดตั้งครีบริบร่วมกับการปรับปรุงครีบริบแล้ว พบว่าคู่ของกระแสสวนตามยาวที่หมุนสวนทางกันโดยเกิดจากการไหลผ่านครีบริบ เหนี่ยวนำให้เกิดการไหลตกกระทบบนผนัง นำไปสู่การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนตลอดช่วงท่อทดสอบ ซึ่งค่าสมรรถนะทางความร้อนสูงสุด (TEF_{max}) อยู่ในช่วง 1.58 ถึง 2.35 สำหรับครีบริบที่มีค่า $PR=0.15625$, $\alpha=60^\circ$ โดยที่ค่า BR อยู่ในช่วง 0.01 ถึง 0.047 เมื่อค่าอัตราส่วนของเลขนัสเซลท์และอัตราส่วนของตัวประกอบความเสียดทาน มีค่าอยู่ในช่วง 2.16 ถึง 4.83 และ 2.60 ถึง 8.36 เท่าเมื่อเทียบกับค่าจากท่อผิวเรียบตามลำดับ

| | |
|----------------|--|
| Thesis Title | Numerical Heat Transfer Study of Turbulent Square-duct Flow Through Discrete V-shaped Ribs |
| Student | Mr. Wayo Changcharoen |
| Student ID. | 49069151 |
| Degree | Doctor of Engineering |
| Program | Mechanical Engineering |
| Year | 2012 |
| Thesis Advisor | Assoc.Prof.Dr. Pongjet Promvonge |

ABSTRACT

The thesis presents a numerical investigation on turbulent periodic flow and heat transfer characteristics in a three dimensional square-duct fitted with inline 60° V-shaped discrete thin ribs placed repeatedly on two opposite heated walls. The isothermal-flux condition is applied only to the upper and lower duct walls while the two insulated sidewalls and ribs are unheated, similar to internal passage cooling of gas turbine blades. The computations are based on the 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 50,000. The numerical results obtained from using the RNG $k-\epsilon$ turbulence model are validated with available square-rib measured data and are found to agree well with measurements. The computation reveals that the ribbed duct flows show fully developed periodic and Nusselt number profiles at about $x/D=7-12$ downstream of the test section inlet. Effects of different rib-height to duct-diameter ratios, BR , rib-pitch to duct-diameter ratios, PR , and different attack angles, α , on thermal and flow characteristics for periodic ribbed duct flows based on modified ribs are deeply investigated. It is found that a pair of counter-rotating vortices (P-vortex) caused by the ribs can induce impingement/attachment flows repeatedly on the duct walls leading to greater increase in the heat transfer over the test duct. The maximum thermal performance is in a range of 1.58 to 2.35 for the rib with $PR=0.15625$, $\alpha=60^\circ$ and $BR=0.01$ to 0.047, whereas the heat transfer rate and the friction factor ratios are ranging from 2.16 to 4.83 and 2.60 to 8.36 times above the smooth duct, depending on BR and Re values, respectively.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่อง การศึกษาการถ่ายเทความร้อนเชิงตัวเลขของการไหลในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบปั่นป่วนผ่านครีบทวีแบบแยกตัว สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากความกรุณาและการให้คำปรึกษาที่มีคุณค่าจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์ ซึ่งผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ สำหรับคำแนะนำเพิ่มเติมทำให้วิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของผู้วิจัยที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกๆ เรื่อง ขอขอบคุณ รศ.ดร.สมิทธิ เอี่ยมสอาด, ผศ.ดร.สมชาย ศรีพัฒนะพิพัฒน์ และ ดร.วิชาติา เจษฎารัตนชัย ที่กรุณาให้คำแนะนำที่ดีแก่ผู้วิจัย ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือทางด้านอุปกรณ์และสถานที่สำหรับการวิจัย ขอขอบคุณ พี่ๆ น้องๆ จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง แลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานครทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือผู้วิจัยในทุกๆ ด้าน ทำให้ผู้วิจัยสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้สำหรับคุณงามความดีอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน ที่ได้มอบวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีแก่ผู้วิจัย

วาโย ช่างเจริญ

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | I |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | II |
| กิตติกรรมประกาศ..... | III |
| สารบัญ..... | IV |
| สารบัญตาราง..... | VIII |
| สารบัญรูป..... | IX |
| รายการคำย่อและสัญลักษณ์..... | XVII |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... | 4 |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย..... | 4 |
| 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย..... | 5 |
| 1.5 ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย..... | 6 |
| 1.6เค้าโครงวิทยานิพนธ์..... | 6 |
| บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 7 |
| 2.1 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยใช้วิธีการติดตั้งแผ่นกัน..... | 7 |
| 2.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง..... | 7 |
| 2.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณเชิงตัวเลข..... | 8 |
| 2.2 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนด้วยการติดตั้งแผ่นกันเจาะรู..... | 9 |
| 2.3 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนด้วยการติดตั้งครีบบ..... | 10 |
| 2.3.1 ครีบบรูปแบบต่างๆ..... | 10 |
| 2.3.2 ครีบบรูปตัววี..... | 23 |
| บทที่ 3 สมการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง..... | 30 |
| 3.1 สมมติฐานของการไหลและสมการควบคุม..... | 30 |
| 3.2 การไหลแบบปั่นป่วนและอิทธิพลของความปั่นป่วนในสมการนาเวียร์-สโตกส์..... | 31 |
| 3.3 การไหลแบบปั่นป่วนที่มีผนังเป็นขอบเขต..... | 34 |
| 3.4 พลังงานจลน์ปั่นป่วนและการสูญเสียของพลังงานจลน์ปั่นป่วน..... | 35 |
| 3.5 แบบจำลองความปั่นป่วน $k-\epsilon$ | 36 |
| 3.5.1 แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ $k-\epsilon$ มาตรฐาน..... | 36 |
| 3.5.2 แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k-\epsilon$ | 38 |
| 3.6 แบบจำลองความปั่นป่วน $k-\omega$ | 41 |
| 3.6.1 แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ $k-\omega$ มาตรฐาน..... | 41 |
| 3.6.2 แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ SST $k-\omega$ | 44 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับอาจารย์และบุคลากรของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | | |
|---------|---|----|
| 3.7 | การวิเคราะห์บริเวณใกล้เคียงสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนที่มีผนังเป็นขอบเขต | 49 |
| 3.7.1 | การจำลองการไหลใกล้เคียงด้วยวิธีการปฏิบัติการเสริมที่ผนัง | 49 |
| 3.7.2 | การจำลองการไหลใกล้เคียงด้วยฟังก์ชันผนังเสริม | 51 |
| 3.7.3 | เงื่อนไขค่าขอบของแบบจำลองความปั่นป่วน | 52 |
| 3.8 | การจำลองการถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบปั่นป่วน | 53 |
| 3.8.1 | แบบจำลอง $k-\epsilon$ มาตรฐานและแบบ $k-\omega$ | 53 |
| 3.8.2 | แบบจำลอง RNG $k-\epsilon$ | 54 |
| 3.9 | การไหลแบบภายในและการถ่ายเทความร้อน | 54 |
| 3.9.1 | สภาวะการไหล | 54 |
| 3.9.2 | ตัวประกอบความเสียดทาน | 55 |
| 3.9.3 | สภาวะการถ่ายเทความร้อน | 55 |
| 3.9.4 | สภาวะการพัฒนาอย่างสมบูรณ์เชิงความร้อน | 56 |
| 3.9.5 | ค่าตัวประกอบของการเพิ่มทางความร้อน | 56 |
| 3.10 | การคำนวณการไหลแบบชั่วเป็นช่วง | 56 |
| 3.10.1 | การไหลชั่วเป็นช่วงเชิงความเร็ว | 57 |
| 3.10.2 | การไหลชั่วเป็นช่วงเชิงความร้อน | 58 |
| 3.11 | รูปแบบทั่วไปของสมการควบคุมการไหล | 59 |
| 3.12 | สมการแปลงรูป | 59 |
| 3.12.1 | การประมาณค่าเทอมของการพา | 61 |
| 3.12.2 | การแปลงรูปสมการโมเมนตัม | 62 |
| 3.12.3 | การแปลงรูปสมการความต่อเนื่อง | 63 |
| 3.12.4 | การคู่ควบของความเร็วและความดัน | 64 |
| 3.13 | การหาค่าตอบของสมการแปลงรูป | 65 |
| 3.14 | โครงสร้างที่เชื่อมโยงกัน | 66 |
| บทที่ 4 | ความเหมาะสมของแบบจำลองความปั่นป่วน | 68 |
| 4.1 | เรขาคณิตของช่องทางไหลทดสอบ | 68 |
| 4.2 | พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหา | 69 |
| 4.3 | การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองความปั่นป่วน | 70 |
| 4.3.1 | การตรวจสอบความเป็นอิสระของผลเฉลยจากจำนวนกริตเซลล์ | 71 |
| 4.3.2 | เปรียบเทียบผลของแบบจำลองความปั่นป่วนกับผลการทดลอง การไหลในท่อเรียบ | 73 |
| 4.3.3 | เปรียบเทียบผลของแบบจำลองความปั่นป่วนกับผลการทดลอง การไหลผ่านครีบ | 74 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| บทที่ 5 ครีบบางรูปตัววีบนพื้นผิวให้ความร้อน | 80 |
| 5.1 สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วงของครีบต้นแบบ | 80 |
| 5.2 อิทธิพลของความหนาครีบ | 83 |
| 5.3 คำวิเคราะห์การไหลผ่านครีบบางที่ติดตั้งบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อน | 86 |
| 5.3.1 สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วงของการไหลผ่านครีบบาง | 86 |
| 5.3.2 โครงสร้างของสนามการไหลผ่านครีบบาง | 94 |
| 5.3.3 อิทธิพลของการจัดวางครีบบางรูปตัววี | 97 |
| 5.3.4 อิทธิพลค่า BR ของครีบบางที่มีการจัดวางแบบครีบตัววีแยกตัว ชิ้นส่วนการไหล | 102 |
| 5.3.5 อิทธิพลของค่า α ของครีบบางที่มีการจัดวางแบบครีบตัววีแยกตัว ชิ้นส่วนการไหล | 106 |
| 5.3.6 อิทธิพลของค่า PR ของครีบบางที่มีการจัดวางแบบครีบตัววีแยกตัว ชิ้นส่วนการไหล | 111 |
| 5.3.7 การหาค่าตัวแปรต่างๆ ที่เหมาะสมด้วยวิธีคำนวณซ้ำ | 116 |
| บทที่ 6 ครีบจัดรูปร่างรูปตัววีแบบแยกตัวบนพื้นผิวให้ความร้อน | 124 |
| 6.1 สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วงของครีบจัดรูปร่าง | 124 |
| 6.2 อิทธิพลของค่า BR ของครีบจัดรูปร่าง | 127 |
| 6.3 อิทธิพลของค่า PR ของครีบจัดรูปร่าง | 129 |
| 6.4 การหาค่าตัวแปรต่างๆ ที่เหมาะสมสำหรับครีบจัดรูปร่างด้วยวิธีคำนวณซ้ำ | 131 |
| 6.5 การเปรียบเทียบระหว่างครีบบางและครีบจัดรูปร่างของกรณีการหาค่า ตัวแปรต่างๆ ที่เหมาะสมแล้ว | 135 |
| บทที่ 7 ครีบบางรูปตัววีบนพื้นผิวหุ้มฉนวน | 138 |
| 7.1 สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วงของการจัดวางครีบบาง บนพื้นผิวหุ้มฉนวน | 138 |
| 7.1.1 ครีบจัดรูปร่าง | 139 |
| 7.1.2 ครีบบาง | 141 |
| 7.2 อิทธิพลของการจัดวางครีบบางรูปตัววี | 144 |
| 7.3 อิทธิพลค่า BR ของครีบบางที่มีการจัดวางแบบครีบตัววีแยกตัวชิ้นส่วนการไหล | 153 |
| 7.4 อิทธิพลค่า α ของครีบบางที่มีการจัดวางแบบครีบตัววีแยกตัวชิ้นส่วนการไหล | 157 |
| 7.5 อิทธิพลค่า PR ของครีบบางที่มีการจัดวางแบบครีบตัววีแยกตัวชิ้นส่วนการไหล | 162 |
| 7.6 การปรับปรุงครีบเพื่อเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน | 166 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| บทที่ 8 การปรับปรุงครีบบางรูปตัววีแยกตัวชี้ส่วนการไหลที่ติดตั้งบนพื้นผิวให้ความร้อน..... | 171 |
| 8.1 การปรับปรุงครีบบนพื้นผิวโดยลดจำนวนครีบ..... | 171 |
| 8.2 การปรับปรุงครีบบนพื้นผิวโดยลดจำนวนครีบร่วมกับแบบเปิดช่อง | 177 |
| 8.3 อิทธิพลของค่า <i>PR</i> ของการปรับปรุงครีบบนพื้นผิวโดยลดจำนวนครีบและแบบเปิดช่อง .. | 181 |
| 8.4 เปรียบเทียบค่า <i>TEF</i> ของกรณีการจัดวางครีบบนพื้นผิวให้ความร้อน | 185 |
| 8.5 โครงสร้างการไหลสำหรับการไหลผ่านครีบแบบครีบบนพื้นผิวแยกตัวชี้ส่วนการไหล | 186 |
| บทที่ 9 สรุปผลและข้อเสนอแนะ | 191 |
| 9.1 สรุปผล | 191 |
| 9.1.1 ความเหมาะสมของแบบจำลองความปั่นป่วน | 191 |
| 9.1.2 ครีบบนพื้นผิวให้ความร้อน | 191 |
| 9.1.3 ครีบบนพื้นผิวแบบแยกตัวบนพื้นผิวให้ความร้อน | 192 |
| 9.1.4 ครีบบนพื้นผิวแบบแยกตัวบนพื้นผิวหุ้มฉนวน | 192 |
| 9.1.5 การปรับปรุงครีบบนพื้นผิวที่ติดตั้งบนพื้นผิวให้ความร้อน | 193 |
| 9.2 ข้อเสนอแนะการพัฒนางานวิจัย | 193 |
| บรรณานุกรม | 194 |
| ภาคผนวก ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ | 203 |
| ประวัติผู้เขียน | 209 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.1 จำนวนของกริดเซลล์ที่ส่งผลต่อค่า Nu และ f | 72 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 1.1 การหล่อเย็นภายในช่องทางไหลของใบกังหันก๊าซ | 2 |
| 2.1 รูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นทางด้านท้ายครีบของ Prasad and Saini (1988) | 11 |
| 2.2 ครีบวางเอียงที่ใช้ในการตรวจสอบการถ่ายเทความร้อนโดย Gupta et al. (1993) | 12 |
| 2.3 ครีบตามขวางตัดยอดด้วยมุมค่าต่างๆ ในงานของ Karwa et al. (1999) | 13 |
| 2.4 ครีบรูปตัววีที่ใช้ในงานของ Momin et al. (2002) | 14 |
| 2.5 ครีบรูปลิ้มที่ใช้ในงานของ Bhagoria et al. (2002) | 14 |
| 2.6 รูปแบบครีบภายในท่อสี่เหลี่ยมของ Karwa (2003) | 16 |
| 2.7 รูปแบบครีบที่มีร่องของ Jaurker et al. (2006) | 17 |
| 2.8 รูปแบบการจัดวางครีบของ Karmare and Tikekar (2007) | 18 |
| 2.9 รูปแบบการจัดวางครีบของ Aharwal et al. (2008) | 18 |
| 2.10 รูปร่างและลักษณะการจัดเรียงครีบที่ใช้ในงานของ Gupta et al. (2008) | 19 |
| 2.11 รูปแบบครีบภายในท่อสี่เหลี่ยมของ Lee and Rhee (2009) | 20 |
| 2.12 รูปครีบที่ใช้วิเคราะห์ในงานของ Bopche and Tandale (2009) | 21 |
| 2.13 รูปครีบที่ใช้วิเคราะห์ในงานของ Hans et al. (2010) | 23 |
| 2.14 รูปครีบที่ใช้ในการวิเคราะห์ในงานของ Singh et al. (2011) | 24 |
| 2.15 รูปครีบที่ใช้ในงานของ Lu and Jiang (2006) | 26 |
| 2.16 รูปแบบครีบบนปีกเล็ก ในงานของ Tian et al. (2009) | 27 |
| 3.1 ตัวอย่างของรูปทรงเรขาคณิตที่ซ้ำเป็นช่วง | 57 |
| 3.2 ปริมาตรควบคุมสำหรับใช้อธิบายสมการแปลงรูป | 60 |
| 3.3 ปริมาตรควบคุมแบบ 1 มิติ | 62 |
| 4.1 ครีบรูปตัววีแบบแยกตัวหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ซึ่งติดตั้งบนพื้นผิวให้ความร้อนที่ผนัง ด้านบนและด้านล่างในช่องทางไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส | 68 |
| 4.2 ระยะและตำแหน่งการจัดวางครีบรูปตัววีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบแยกตัว | 69 |
| 4.3 (ก) โดเมนที่ใช้ในการคำนวณแบบเป็นโมดูล (ข) กริดเซลล์ที่มีความหนาแน่นสม่ำเสมอ และได้มีการปรับปรุงกริดเซลล์แล้ว | 71 |
| 4.4 อิทธิพลของจำนวนกริดเซลล์ต่อส่งผลต่อค่า Nu และ f ที่ $Re=15,000$ | 72 |
| 4.5 ค่าเลขนัสเซลล์เฉลี่ยของการถ่ายเทความร้อนในท่อผิวเรียบ | 73 |
| 4.6 ค่าตัวประกอบความเสียหายของการถ่ายเทความร้อนในท่อผิวเรียบ | 74 |
| 4.7 เปรียบเทียบค่า Nu_x / Nu_0 ระหว่างแบบจำลองความปั่นป่วนกับผลการทดลอง | 75 |
| 4.8 เปรียบเทียบการกระจายค่าเลขนัสเซลล์บนพื้นผิวให้ความร้อนที่เลขเรย์โนลด์ 15,000 (ก) ผลการทดลองของ SriHarsha et al. (2009) (ข) ผลการทำนายด้วย RNG $k-\epsilon$ | 76 |
| 4.9 เปรียบเทียบค่า Nu_x / Nu_0 ระหว่างแบบแผนการคำนวณกับผลการทดลอง | 77 |
| 4.10 เปรียบเทียบการกระจายอัตราส่วนเลขนัสเซลล์บนพื้นผิวด้านบนและด้านล่าง | 77 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--------|--|
| 4.11 | เปรียบเทียบการกระจายค่าเลขนัสเซลล์ตามทิศทางการไหลที่ตำแหน่ง $Z/D=1/4$ ระหว่างการคำนวณแบบเต็มความยาวช่องทางไหลและแบบเป็นโมดูล 78 |
| 5.1 | การกระจายค่า Nu_x/Nu_0 ที่ตำแหน่ง $Z/D=1/4$ สำหรับการคำนวณแบบเต็มความยาวช่องทางไหลและแบบเป็นโมดูล (ก) $Re=10,000$ (ข) $Re=25,000$ 81 |
| 5.2 | การเปรียบเทียบการกระจายค่า Nu_x/Nu_0 ตามทิศทางการไหลที่ $Z/D=1/4$ สำหรับการไหลแบบเต็มความยาวช่องทางไหลและแบบเป็นโมดูล ที่ $Re=10,000$ และ $BR=0.125$ 82 |
| 5.3 | อัตราส่วนของความเร็วตามแนวแกน x ต่อความเร็วเฉลี่ย (u/u_0) ในแต่ละตำแหน่งต่างๆ ที่ $Re=10,000$ และ $PR=0.625$ 82 |
| 5.4 | รูปครีบบที่มีอัตราส่วนของความหนาครีบ $s/D=0.0625$ และ $s/D=0.0125$ 84 |
| 5.5 | เส้นชั้นของการกระจายของเลขนัสเซลล์เฉพาะที่และเส้นทางเดินอนุภาคของไหลสำหรับการไหลผ่านครีบที่มีความหนา $s/D=0.0625$ และ $s/D=0.0125$ ที่เลขเรย์โนลด์ 15,000 84 |
| 5.6 | ค่า Nu/Nu_0 และค่า f/f_0 ของครีบที่มีความหนา $s/D=0.0625$ และ $s/D=0.0125$ 85 |
| 5.7 | ค่า TEF ของครีบที่มีความหนา $s/D=0.0625$ และ $s/D=0.0125$ 86 |
| 5.8 | ครีบบางในช่องทางไหลสำหรับกรณีการคำนวณการไหลแบบเต็มความยาวท่อ 87 |
| 5.9 | (ก) โดเมนที่ใช้ในการคำนวณแบบเป็นโมดูลของครีบบาง (ข) รูปของกริดเซลล์ที่ใช้ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลข..... 87 |
| 5.10 | การกระจายค่า Nu_x/Nu_0 ของครีบบางที่ $BR=0.0625$ ที่ตำแหน่ง $Z/D=1/4$ สำหรับการไหลแบบเต็มความยาวท่อและแบบเป็นโมดูลที่ $Re=10,000$ 88 |
| 5.11 | การกระจายค่า Nu_x/Nu_0 ของครีบบางที่ $BR=0.0625$ ที่ตำแหน่ง $Z/D=1/2$ สำหรับการไหลแบบเต็มความยาวท่อและแบบเป็นโมดูลที่ $Re=10,000$ 88 |
| 5.12 | การกระจายค่า Nu_x/Nu_0 ของครีบบางที่ $BR=0.125$ ที่ตำแหน่ง $Z/D=1/4$ สำหรับการไหลแบบเต็มความยาวท่อและแบบเป็นโมดูลที่ $Re=10,000$ 89 |
| 5.13 | การกระจายค่า Nu_x/Nu_0 ของครีบบางที่ $BR=0.125$ ที่ตำแหน่ง $Z/D=1/2$ สำหรับการไหลแบบเต็มความยาวท่อและแบบเป็นโมดูลที่ $Re=10,000$ 90 |
| 5.14 | การกระจายค่า u_i/u_0 ที่ $Z/D=1/4, Y/D=0.1875$ และ 0.50 ของครีบบางที่ $BR=0.0625$ สำหรับการไหลแบบเต็มความยาวท่อและแบบเป็นโมดูลที่ $Re=10,000$ 91 |
| 5.15 | การกระจายค่า u_i/u_0 ที่ $Z/D=1/4, y/D=0.1875$ และ 0.50 ของครีบบางที่ $BR=0.125$ สำหรับการไหลแบบเต็มความยาวท่อและแบบเป็นโมดูลที่ $Re=10,000$ 91 |
| 5.16 | การกระจายค่า u/u_0 ที่ $Z/D=1/4$ ของครีบบางที่ $BR=0.0625$ สำหรับการไหลแบบเต็มความยาวท่อและแบบเป็นโมดูลที่ $Re=10,000$ 92 |
| 5.17 | การกระจายค่า u/u_0 ที่ตำแหน่ง $Z/D=1/2$ ของครีบบางที่ $BR=0.0625$ สำหรับการไหลแบบเต็มความยาวท่อและแบบเป็นโมดูลที่ $Re=10,000$ 92 |
| 5.18 | การกระจายค่า u/u_0 เฉลี่ย ที่ตำแหน่ง $Z/D=1/4$ ของครีบบางที่ $BR=0.125$ สำหรับการไหลแบบเต็มความยาวท่อและแบบเป็นโมดูลที่ $Re=10,000$ 93 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 5.19 การกระจายค่า u/u_0 ที่ตำแหน่ง $Z/D=1/2$ ของครีบบางที่ $BR=0.125$ สำหรับ การไหลแบบเต็มความยาวท่อและแบบโมดูลที่ $Re=10,000$ | 93 |
| 5.20 สนามความเร็ว อุณหภูมิ และความดัน ที่แต่ละหน้าตัดของหนึ่งโมดูลสำหรับการไหล ผ่านครีบบางบนพื้นผิวให้ความร้อนที่ค่า $BR=0.0625$, $PR=0.625$ และ $Re=15,000$ | 95 |
| 5.21 รูปแบบการจัดวางครีบบางที่แตกต่างกัน 4 รูปแบบ..... | 97 |
| 5.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Nu/Nu_0 กับค่า Re สำหรับการจัดวางครีบบางทั้ง 4 แบบ..... | 98 |
| 5.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า ff_0 กับค่า Re สำหรับการจัดวางครีบบางทั้ง 4 แบบ..... | 98 |
| 5.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า TEF กับค่า Re สำหรับการจัดวางครีบบางทั้ง 4 แบบ..... | 99 |
| 5.25 การกระจายค่าเลขนัสเซลท์เฉพาะที่ และเส้นทางเดินอนุภาคในบริเวณระหว่างครีบ ของการจัดวางครีบบางทั้ง 4 รูปแบบ ที่ $Re=15,000$ | 100 |
| 5.26 เส้นทางเดินอนุภาค การไหลตกกระทบพื้นผิว และการกระจายค่าเลขนัสเซลท์ เฉพาะที่ สำหรับการจัดวางครีบบางทั้ง 4 รูปแบบ ที่ $Re=15,000$ | 101 |
| 5.27 การเปลี่ยนแปลงค่า Nu/Nu_0 กับค่า BR ตั้งแต่ 0.05-0.125 ที่ค่า $PR=0.625$ และ $\alpha=60^\circ$ | 102 |
| 5.28 การเปลี่ยนแปลงค่า ff_0 กับค่า BR ตั้งแต่ 0.05-0.125 ที่ค่า $PR=0.625$ และ $\alpha=60^\circ$ | 103 |
| 5.29 การเปลี่ยนแปลงค่า TEF กับค่า BR ตั้งแต่ 0.05-0.125 ที่ค่า $PR=0.625$ และ $\alpha=60^\circ$ | 103 |
| 5.30 เส้นทางเดินอนุภาคและการไหลตกกระทบพื้นผิว ของการเปลี่ยนค่า BR ที่ค่า $PR=0.625$ $Re=15,000$ และ $\alpha=60^\circ$ | 105 |
| 5.31 กราฟแสดงค่า Nu/Nu_0 กับค่า α ในช่วง 30° ถึง 75° ที่ค่า $BR=0.075$ และ $PR=0.625$ | 107 |
| 5.32 กราฟแสดงค่า ff_0 กับค่า α ในช่วง 30° ถึง 75° ที่ค่า $BR=0.075$ และ $PR=0.625$ | 107 |
| 5.33 กราฟแสดงค่า TEF กับค่า α ในช่วง 30° ถึง 75° ที่ค่า $BR=0.075$ และ $PR=0.625$ | 108 |
| 5.34 เส้นทางเดินอนุภาคและการไหลตกกระทบพื้นผิว ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่า α ที่ $BR=0.075$, $Re=15,000$ และ $PR=0.625$ | 110 |
| 5.35 ความสัมพันธ์ของค่า Nu/Nu_0 กับค่า PR ในช่วง 0.125 ถึง 0.75 ที่ $BR=0.075$ และ $\alpha=60^\circ$ | 112 |
| 5.36 ความสัมพันธ์ของค่า ff_0 กับค่า PR ในช่วง 0.125 ถึง 0.75 ที่ $BR=0.075$ และ $\alpha=60^\circ$ | 112 |
| 5.37 ความสัมพันธ์ของค่า TEF กับค่า PR ในช่วง 0.125 ถึง 0.75 ที่ $BR=0.075$ และ $\alpha=60^\circ$ | 113 |
| 5.38 เส้นทางเดินอนุภาคและการไหลตกกระทบพื้นผิว ของการเปลี่ยนแปลง PR ตั้งแต่ 0.125 ถึง 0.75 ที่ $BR=0.075$, $\alpha=60^\circ$ และ $Re=15,000$ | 114 |
| 5.39 ความสัมพันธ์ของ Nu/Nu_0 กับค่า BR ตั้งแต่ 0.00625 ถึง 0.0875 ที่ $PR=0.1875$ และ $\alpha=60^\circ$ | 117 |
| 5.40 ความสัมพันธ์ของ ff_0 กับค่า BR ตั้งแต่ 0.00625 ถึง 0.0875 ที่ค่า $PR=0.1875$ และ $\alpha=60^\circ$ | 117 |
| 5.41 ค่า TEF กับการเปลี่ยนแปลงค่า BR ตั้งแต่ 0.00625 ถึง 0.050 ที่ค่า $PR=0.1875$ และ $\alpha=60^\circ$ | 118 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้วยการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 5.42 ค่า Nu/Nu_0 และ ff_0 ที่ค่า BR ต่างๆ ทั้งในรูปแบบกราฟและสมการ ความสัมพันธ์ของครีบที่มีค่า $PR=0.1875$ และที่ค่า $\alpha=60^\circ$ | 119 |
| 5.43 เส้นทางเดินอนุภาคและการไหลตกกระทบพื้นผิว ของการเปลี่ยนแปลงค่า BR ตั้งแต่ 0.025 ถึง 0.0625 ที่ $PR=0.1875$, $\alpha=60^\circ$ และ $Re=15,000$ | 120 |
| 5.44 เส้นทางเดินอนุภาคของกรณี (ก) ครีบจัตุรัส $PR=0.6250$, $BR=0.0625$ (ข) ครีบบาง, $PR=0.1875$, $BR=0.0250$ ที่ $Re=15,000$ และ $\alpha=60^\circ$ | 121 |
| 5.45 เส้นทางเดินอนุภาคที่แสดงให้เห็นถึงการผสมของการไหลจากพื้นผิว กับการไหลหลักของกรณี (ก) ครีบจัตุรัส $PR=0.6250$, $BR=0.0625$ (ข) ครีบบาง, $PR=0.1875$, $BR=0.0250$ ที่ $Re=15,000$ และ $\alpha=60^\circ$ | 122 |
| 5.46 เส้นกระแสในแต่ละหน้าตัดของกรณี (ก) ครีบจัตุรัส $PR=0.6250$, $BR=0.0625$ (ข) ครีบบาง, $PR=0.1875$, $BR=0.0250$ ที่ $Re=15,000$ และ $\alpha=60^\circ$ | 122 |
| 6.1 ครีบจัตุรัสในช่องทางไหลสำหรับกรณีการคำนวณการไหลแบบเต็มความยาวท่อ..... | 124 |
| 6.2 (ก) โดเมนที่ใช้ในการคำนวณแบบเป็นโมดูลของครีบจัตุรัส (ข) รูปของกริดเซลล์ ที่ใช้ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลข..... | 125 |
| 6.3 การกระจายค่า Nu_x/Nu_0 ที่ตำแหน่ง $Z/D=1/2$ สำหรับกาแบบเต็มความยาว ช่องทางไหลและแบบเป็นโมดูลของครีบจัตุรัส ที่ $Re=10,000$ และ $PR=0.625$ | 125 |
| 6.4 การกระจายค่า u/u_0 ที่ตำแหน่ง $Z/D=1/2$ สำหรับการไหลแบบเต็มความยาว ช่องทางไหลและแบบเป็นโมดูลของครีบจัตุรัส ที่ $Re=10,000$ และ $PR=0.625$ | 126 |
| 6.5 การเปลี่ยนแปลงค่า Nu/Nu_0 กับค่า BR ตั้งแต่ 0.0125-0.0875 ที่ค่า $PR=0.625$ และ $\alpha=60^\circ$ | 127 |
| 6.6 การเปลี่ยนแปลงค่า ff_0 กับค่า BR ตั้งแต่ 0.0125-0.0875 ที่ค่า $PR=0.625$ และ $\alpha=60^\circ$ | 128 |
| 6.7 การเปลี่ยนแปลงค่า TEF กับค่า BR ตั้งแต่ 0.0125-0.0875 ที่ค่า $PR=0.625$ และ $\alpha=60^\circ$ | 128 |
| 6.8 ความสัมพันธ์ของค่า Nu/Nu_0 กับค่า PR ในช่วง $PR=0.125-0.75$ ที่ $BR=0.0375$ และ $\alpha=60^\circ$ | 129 |
| 6.9 ความสัมพันธ์ของค่า ff_0 กับค่า PR ในช่วง $PR=0.125-0.75$ ที่ $BR=0.0375$ และ $\alpha=60^\circ$ | 130 |
| 6.10 ความสัมพันธ์ของค่า TEF กับค่า PR ในช่วง $PR=0.125-0.75$ ที่ $BR=0.0375$ และ $\alpha=60^\circ$ | 130 |
| 6.11 ความสัมพันธ์ของ Nu/Nu_0 กับค่า BR ตั้งแต่ 0.00625 ถึง 0.05 ที่ $PR=0.1875$ และ $\alpha=60^\circ$ | 132 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 6.12 ความสัมพันธ์ของ ff_0 กับค่า BR ตั้งแต่ 0.00625 ถึง 0.05 ที่ $PR=0.1875$ และ $\alpha=60^\circ$ | 132 |
| 6.13 ความสัมพันธ์ของ TEF กับค่า BR ตั้งแต่ 0.00625 ถึง 0.05 ที่ $PR=0.1875$ และ $\alpha=60^\circ$ | 133 |
| 6.14 ค่า Nu/Nu_0 และ ff_0 ที่ค่า BR ต่างๆ ทั้งในรูปแบบกราฟและสมการ ความสัมพันธ์ | 134 |
| 6.15 เส้นทางเดินอนุภาคของกรณี (ก) ครีบบางที่ $PR=0.1875$ และ $BR=0.025$ (ข) ครีบจัตุรัสที่ปรับปรุงขึ้นที่ค่า $PR=0.1875$ และ $BR=0.03125$ พิจารณาที่ $Re=15,000$ และ $\alpha=60^\circ$ | 135 |
| 6.16 เส้นทางเดินอนุภาคที่แสดงให้เห็นถึงการผสมของการไหลจากพื้นผิวและการไหลหลักของกรณี (ก) ครีบบางที่ $PR=0.1875$ และ $BR=0.025$ (ข) ครีบจัตุรัสที่ปรับปรุงขึ้นที่ $PR=0.1875$ และ $BR=0.03125$ พิจารณาที่ $Re=15000$ และ $\alpha=60^\circ$ | 136 |
| 6.17 เส้นกระแสในแต่ละภาคตัดขวางของกรณี (ก) ครีบบางที่ $PR=0.1875$ และ $BR=0.025$ (ข) ครีบจัตุรัสที่ปรับปรุงขึ้นที่ $PR=0.1875$ และ $BR=0.03125$ พิจารณาที่ $Re=15,000$ และ $\alpha=60^\circ$ | 137 |
| 6.18 การเปรียบเทียบค่า TEF_{max} ของกรณีครีบบางและครีบสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ปรับปรุงขึ้น | 137 |
| 7.1 ครีบจัตุรัสแบบครีบตัววีแยกตัวชิ้นส่วนการไหล บนพื้นผิวหุ้มฉนวนที่ผนังด้านบนและด้านล่างในช่องทางไหลจัตุรัสสำหรับการคำนวณการไหลแบบเต็มความยาวท่อ | 139 |
| 7.2 (ก) ครีบจัตุรัสแบบครีบตัววีแยกตัวชิ้นส่วนการไหล บนพื้นผิวหุ้มฉนวนในช่องทางไหลจัตุรัสสำหรับการคำนวณการไหลแบบเป็นโมดูล (ข) กริดเซลล์ที่ใช้ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลข | 139 |
| 7.3 การกระจาย Nu_x/Nu_0 ที่ $Y/D=1/2$ และ $1/4$ สำหรับการไหลแบบเต็มความยาวช่องทางไหลและแบบเป็นโมดูลของครีบจัตุรัสที่ค่า $BR=0.0625$, $PR=0.625$ และ $Re=10,000$ | 140 |
| 7.4 ครีบบางแบบครีบตัววีแยกตัวชิ้นส่วนการไหล บนพื้นผิวหุ้มฉนวนที่ผนังด้านบนและด้านล่างในช่องทางไหลจัตุรัสสำหรับการคำนวณการไหลแบบเต็มความยาวท่อ | 141 |
| 7.5 (ก) ครีบบางแบบ ครีบตัววีแยกตัวชิ้นส่วนการไหล บนพื้นผิวหุ้มฉนวนในช่องทางไหลจัตุรัสสำหรับการคำนวณการไหลแบบเป็นโมดูล (ข) กริดเซลล์ที่ใช้ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลข | 141 |
| 7.6 การกระจาย Nu_x/Nu_0 ที่ $Y/D=1/2$ และ $1/4$ สำหรับการไหลแบบเต็มความยาวช่องทางไหลและแบบเป็นโมดูลของครีบบางที่ค่า $BR=0.0625$, $PR=0.625$ และ $Re=10,000$ | 142 |
| 7.7 การกระจาย u/u_0 สำหรับการไหลแบบเต็มความยาวท่อและแบบเป็นโมดูลที่ตำแหน่ง $Y/D=1/4$ ของครีบบางที่มีค่า $BR=0.0625$ และ $PR=0.625$ ที่ $Re=10,000$ | 143 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 7.8 การกระจาย u/u_0 สำหรับการไหลแบบเต็มความยาวท่อและแบบเป็นโมดูลที่ตำแหน่ง $Y/D=1/2$ ของครีบบางที่มีค่า $BR=0.0625$ และ $PR=0.625$ ที่ $Re=10,000$ | 143 |
| 7.9 การจัดวางครีบบางแบบสมมาตรบนพื้นผิวหุ้มฉนวนที่แตกต่างกัน 4 รูปแบบ | 144 |
| 7.10 อัตราส่วนของค่า Nu/Nu_0 กับค่า Re สำหรับการจัดวางครีบบางทั้ง 4 แบบ | 145 |
| 7.11 อัตราส่วนของค่า f/f_0 กับค่า Re สำหรับการจัดวางครีบบางทั้ง 4 แบบ | 146 |
| 7.12 ค่า TEF และ Re สำหรับการจัดวางครีบบางทั้ง 4 แบบ | 146 |
| 7.13 การกระจายค่าเลขนัสเซลล์เฉพาะที่และเส้นทางเดินอนุภาคในบริเวณระหว่างครีบบางของการจัดวางครีบบางทั้ง 4 รูปแบบ ที่ $Re=15,000$ | 147 |
| 7.14 เส้นทางเดินอนุภาค การไหลตกกระทบพื้นผิว และการกระจายค่าเลขนัสเซลล์ที่เกิดจากการจัดวางครีบบางทั้ง 4 รูปแบบ ที่ $Re=15,000$ | 149 |
| 7.15 เส้นทางเดินอนุภาค การไหลตกกระทบพื้นผิว และการกระจายค่าเลขนัสเซลล์เฉพาะที่ที่เกิดจากการจัดวางครีบบางแบบครีบบางตัววิแยกตัวซึ่งสวนการไหล และครีบบางตัวต่อเนื่องซึ่งสวนการไหล ที่ $Re=15,000$ | 150 |
| 7.16 เส้นทางเดินอนุภาค การไหลตกกระทบพื้นผิว และการกระจายค่าเลขนัสเซลล์เฉพาะที่ที่เกิดจากการจัดวางครีบบางแบบ ครีบบางตัววิแยกตัวซึ่งสวนการไหล ที่ $Re=15,000$ | 150 |
| 7.17 สนามความเร็ว อุณหภูมิ และความดัน ในแต่ละหน้าตัดของหนึ่งโมดูลสำหรับการไหลผ่านครีบบางบนพื้นผิวหุ้มฉนวนที่มีค่า $BR=0.0625$, $PR=0.625$ และ $Re=15,000$ | 151 |
| 7.18 ค่า Nu/Nu_0 กับค่า BR ตั้งแต่ 0.050 ถึง 0.125 ที่ค่า $\alpha=60^\circ$ และ $PR=0.625$ | 154 |
| 7.19 ค่า f/f_0 กับค่า BR ตั้งแต่ 0.050 ถึง 0.125 ที่ค่า $\alpha=60^\circ$ และ $PR=0.625$ | 154 |
| 7.20 ค่า TEF กับค่า BR ตั้งแต่ 0.050 ถึง 0.125 ที่ค่า $\alpha=60^\circ$ และ $PR=0.625$ | 155 |
| 7.21 เส้นทางเดินอนุภาคและการไหลตกกระทบพื้นผิว ของการเปลี่ยนค่าความสูงครีบบางที่ค่า $\alpha=60^\circ$, $PR=0.625$ และ $Re=15,000$ | 156 |
| 7.22 กราฟแสดงค่า Nu/Nu_0 กับค่า α ในช่วง 30° ถึง 75° ที่ค่า $BR=0.075$ และ $PR=0.625$ | 158 |
| 7.23 ค่า f/f_0 กับค่า α ในช่วง 30° ถึง 75° ที่ค่า $BR=0.075$ และ $PR=0.625$ | 159 |
| 7.24 ค่า TEF กับค่า α ในช่วง 30° ถึง 75° ที่ค่า $BR=0.075$ และ $PR=0.625$ | 159 |
| 7.25 เส้นทางเดินอนุภาคและการไหลตกกระทบพื้นผิวที่เกิดจากการเปลี่ยนค่ามุมปะทะของครีบบางที่ค่า $BR=0.075$ และ $PR=0.625$ และที่ค่า $Re=15,000$ | 160 |
| 7.26 ความสัมพันธ์ของค่า Nu/Nu_0 กับค่า PR ในช่วง $PR=0.25$ ถึง 0.75 ที่ $BR=0.075$ และ $\alpha=60^\circ$ | 162 |
| 7.27 ความสัมพันธ์ของค่า f/f_0 กับค่า PR ในช่วง 0.25 ถึง 0.75 ที่ $BR=0.075$ และ $\alpha=60^\circ$ | 163 |
| 7.28 ความสัมพันธ์ของค่า TEF กับค่า PR ในช่วง 0.25 ถึง 0.75 ที่ $BR=0.075$ และ $\alpha=60^\circ$ | 164 |
| 7.29 เส้นทางเดินอนุภาคและการไหลตกกระทบพื้นผิว ของการเปลี่ยนแปลง PR ตั้งแต่ 0.25 ถึง 0.75 ที่ $BR=0.075$, $\alpha=60^\circ$ และ $Re=15,000$ | 165 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 7.30 การเปลี่ยนแปลงค่า Nu/Nu_0 กับค่า BR ตั้งแต่ 0.05 ถึง 0.10 ที่ค่า $PR=0.625$ เปรียบเทียบระหว่างครีบบที่มีค่า $\alpha=45^\circ$ และ 60° | 167 |
| 7.31 การเปลี่ยนแปลงค่า ff_0 กับค่า BR ตั้งแต่ 0.05 ถึง 0.10 ที่ค่า $PR=0.625$ เปรียบเทียบระหว่างครีบบที่มีค่า $\alpha=45^\circ$ และ 60° | 167 |
| 7.32 การเปลี่ยนแปลงค่า TEF กับค่า BR ตั้งแต่ 0.05 ถึง 0.10 ที่ค่า $PR=0.625$ เปรียบเทียบระหว่างครีบบที่มีค่า $\alpha=45^\circ$ และ 60° | 168 |
| 7.33 เส้นกระแสในแต่ละหน้าตัดของที่ค่า $PR=0.625$, $BR=0.0625$ และ $Re=15,000$ ในกรณี (ก) $\alpha=60^\circ$ (ข) $\alpha=45^\circ$ | 169 |
| 7.34 ทางเดินของอนุภาคที่ตกกระทบบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อน ที่ค่า $PR=0.625$, $BR=0.0625$ และ $Re=15,000$ ในกรณี (ก) $\alpha=60^\circ$ (ข) $\alpha=45^\circ$ | 169 |
| 7.35 ทางเดินของอนุภาคครบรอบการหมุนที่ตกกระทบบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อน ที่ค่า $PR=0.625$, $BR=0.0625$ และ $Re=15,000$ ในกรณี (ก) $\alpha=60^\circ$ (ข) $\alpha=45^\circ$ | 170 |
| 8.1 การกระจายค่าเลขชี้สเกลต์เฉพาะที่บนพื้นผิวให้ความร้อน ของการจัดวางครีบบแบบ ครีบบตัววีแยกตัวชี้สวนการไหล ที่ค่า $BR=0.05$, $PR=0.1875$, $\alpha=60^\circ$ ที่ $Re=15,000$ | 171 |
| 8.2 การจัดวางครีบบแบบครีบบตัววีแยกตัวชี้สวนการไหลแบบ (ก) ครีบบวางเต็ม (ข) ครีบบวางบางส่วน | 172 |
| 8.3 การเปลี่ยนแปลงค่า Nu/Nu_0 กับค่า BR ตั้งแต่ 0.0125 ถึง 0.0875 ที่ค่า $PR=0.1875$ $\alpha=60^\circ$ เปรียบเทียบระหว่างครีบบแบบครีบบวางเต็มและแบบครีบบวางบางส่วน | 172 |
| 8.4 การเปลี่ยนแปลงค่า ff_0 กับค่า BR ตั้งแต่ 0.0125 ถึง 0.0875 ที่ค่า $PR=0.1875$, $\alpha=60^\circ$ เปรียบเทียบระหว่างครีบบแบบครีบบวางเต็มและแบบครีบบวางบางส่วน | 173 |
| 8.5 การเปลี่ยนแปลงค่า TEF กับค่า BR ตั้งแต่ 0.0125 ถึง 0.0875 ที่ค่า $PR=0.1875$, $\alpha=60^\circ$ เปรียบเทียบระหว่างครีบบแบบครีบบวางเต็มและแบบครีบบวางบางส่วน | 174 |
| 8.6 การกระจายค่าเลขชี้สเกลต์เฉพาะที่บนพื้นผิวให้ความร้อนของการจัดวางครีบบแบบ ครีบบวางเต็มและแบบครีบบวางบางส่วน ที่ค่า $BR=0.05$, $PR=0.1875$, $\alpha=60^\circ$ และ $Re=15,000$ | 175 |
| 8.7 ทางเดินอนุภาคและการไหลตกกระทบบนพื้นผิวให้ความร้อน ของการจัดวางครีบบแบบ ครีบบวางเต็มและแบบครีบบวางบางส่วน ที่ค่า $BR=0.05$, $PR=0.1875$, $\alpha=60^\circ$ และ $Re=15,000$ | 175 |
| 8.8 ทางเดินอนุภาคและการไหลตกกระทบบนพื้นผิวให้ความร้อนของการเปลี่ยนแปลงค่า BR ตั้งแต่ 0.0250 ถึง 0.0875 ที่ค่า $PR=0.1875$, $\alpha=60^\circ$ และ $Re=15,000$ | 176 |
| 8.9 การปรับปรุงการจัดวางครีบบแบบ (ก) ครีบบปลายวีติด (ข) ครีบบปลายวีแยก | 178 |
| 8.10 การเปลี่ยนแปลงค่า Nu/Nu_0 กับค่า BR ตั้งแต่ 0.0125 ถึง 0.0875 ที่ค่า $PR=0.1875$ $\alpha=60^\circ$ เปรียบเทียบระหว่างครีบบแบบครีบบปลายวีติดและแบบครีบบปลายวีแยก | 179 |
| 8.11 การเปลี่ยนแปลงค่า ff_0 กับค่า BR ตั้งแต่ 0.0125 ถึง 0.0875 ที่ค่า $PR=0.1875$ $\alpha=60^\circ$ เปรียบเทียบระหว่างครีบบแบบครีบบปลายวีติดและแบบครีบบปลายวีแยก | 179 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 8.12 การเปลี่ยนแปลงค่า TEF กับค่า BR ตั้งแต่ 0.0125 ถึง 0.0875 ที่ $PR=0.1875$ $\alpha=60^\circ$ เปรียบเทียบระหว่างครีบบนแบบครีบบลายวีติดและแบบครีบบลายวีแยก..... | 180 |
| 8.13 การกระจายค่าเลขนีสเซลล์เฉพาะที่บนพื้นผิวให้ความร้อนของการจัดวางครีบบนแบบครีบบลายวีติดและแบบครีบบลายวีแยกที่ $BR=0.05$, $PR=0.1875$, $\alpha=60^\circ$ และ $Re=15,000$ | 180 |
| 8.14 การกระจายค่า TEF และ TEF_{max} ของการจัดวางครีบบนแบบบลายวีแยกที่ $PR=0.1875$ และที่ค่า $\alpha=60^\circ$ | 181 |
| 8.15 การเปรียบเทียบการกระจายค่า TEF_{max} ของการปรับปรุงครีบบนแบบบลายวีแยก ที่มีกร เปลี่ยนค่า PR ตั้งแต่ 0.125 ถึง 0.250 ในช่วงค่า BR ต่างๆ ที่ค่า $\alpha=60^\circ$ | 182 |
| 8.16 การกระจาย Nu_x/Nu_0 ที่ $Z/D=1/2$ สำหรับการไหลแบบเต็มความยาวช่องทางไหล และแบบเป็นโมดูลของกรณีครีบบลายวีแยกที่ $BR=0.047$, $PR=0.15625$ และ $Re=10,000$ | 183 |
| 8.17 การกระจาย u/u_0 ที่ $Z/D=1/2$ สำหรับการไหลแบบเต็มความยาวช่องทางไหล และแบบเป็นโมดูลของกรณีครีบบลายวีแยกที่ $BR=0.047$, $PR=0.15625$ และ $Re=10,000$ | 183 |
| 8.18 การกระจายค่า TEF และ TEF_{max} ของการจัดวางครีบบนแบบบลายวีแยก ที่ $PR=0.15625$ และที่ค่า $\alpha=60^\circ$ | 184 |
| 8.19 ค่า Nu/Nu_0 และ ff_0 ที่ค่า BR ต่างๆ ทั้งในรูปแบบกราฟและสมการความสัมพันธ์ ของการจัดวางครีบบนแบบครีบบลายวีแยก ที่มีค่า $PR=0.15625$ และที่ค่า $\alpha=60^\circ$ | 184 |
| 8.20 การเปรียบเทียบการกระจายค่า TEF_{max} ของการจัดวางครีบบนแบบครีบบลายวีแยกตัว ชิ้นส่วนการไหลรวมกับการปรับปรุงครีบบนแบบต่างๆ ที่ค่า $\alpha=60^\circ$ | 186 |
| 8.21 การกระจายค่าเลขนีสเซลล์เฉพาะที่บนพื้นผิวให้ความร้อนและที่ค่าพื้นผิวที่เหมือนกัน ของ $\lambda_2 = -28,000$ ของครีบบนแบบที่ $BR=0.0625$, $PR=0.625$, $\alpha=60^\circ$ และ $Re=15,000$ | 187 |
| 8.22 การกระจายค่าเลขนีสเซลล์เฉพาะที่บนพื้นผิวให้ความร้อนและที่ค่าพื้นผิวที่เหมือนกัน ของ $\lambda_2 = -28,000$ ของครีบบนแบบที่ปรับปรุงแล้ว ที่ $BR=0.03125$, $PR=0.15625$, $\alpha=60^\circ$ และ $Re=15,000$ | 188 |
| 8.23 ค่าพื้นผิวที่เหมือนกันของค่า λ_2 ต่างๆ ของครีบบนที่ $\alpha=60^\circ$ และ $Re=15,000$ กรณี (ก) ครีบบนแบบที่ $BR=0.0625$ และ $PR=0.625$ (ข) ครีบบนแบบที่ ปรับปรุงแล้ว ที่ $BR=0.03125$ และ $PR=0.15625$ | 189 |

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 |
| e | ความสูงของครีป, 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 | เลขนิตเชลท์เฉลี่ย |
| Nu_0 | เลขนิตเชลท์ของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบ |
| P | เส้นรอบรูป, m |
| p | ความดันสถิต, Pa ; ระยะห่างระหว่างครีป, m |
| PR | อัตราส่วนระยะห่างระหว่างครีป, ($=p/D$) |
| Pr | เลขพรานด์ |
| q_s'' | ฟลักซ์ความร้อนระหว่างของไหลกับผิวท่อที่จุดใดๆ, W/m^2 |
| Re | เลขเรย์โนลด์, ($= \rho u_0 D / \mu$) |
| S_{ij} | เทนเซอร์ค่าเฉลี่ยของอัตราความเครียด, s^{-1} |
| s | ความหนาครีป, m |
| T | อุณหภูมิ, K |

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

| | |
|--------|---|
| 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 | ระยะทางที่วัดในช่วงการไหลพัฒนาอย่างสมบูรณ์, m |
| x | พิกัดบอกทิศทางการไหล |
| y^+ | ระยะไร่นิวที่วัดจากผนัง |

สัญลักษณ์กรีก

| | |
|---------------|---|
| Φ | ค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติใดๆ ของของไหล |
| Ω | เทนเซอร์ค่าเฉลี่ยของอัตราการหมุน, s^{-1} |
| Γ | การแพร่ทางความร้อน |
| α | มุมปะทะของครีบกับกระแสการไหล, degree ; |
| α | เลขพหุนามดียังผลผกผัน |
| ϕ | ค่าคุณสมบัติใดๆ ต่อหน่วยมวล |
| λ | ความหนืดที่สอง |
| μ | ความหนืดสัมบูรณ์, $N \cdot s / m^2$ |
| ε | อัตราการสูญเสียของความปั่นป่วน, m^2 / s^3 |
| ω | อัตราการสูญเสียจำเพาะ, s^{-1} |
| ρ | ความหนาแน่น, kg / m^3 |
| τ | ความเค้นเฉือน, N / m^2 |

ตัวห้อย

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันความต้องการพลังงานของประชากรโลกมีเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากมีการใช้พลังงานมากขึ้นตามความเจริญก้าวหน้าของแต่ละประเทศ ซึ่งมีการใช้พลังงานทั้งในด้านของการผลิตอุปกรณ์ต่างๆ ในชีวิตประจำวัน การคมนาคม และในภาคอุตสาหกรรมทั่วไป ระบบการถ่ายเทความร้อนมีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการถ่ายเทพลังงาน อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีหลายประเภทและสามารถพบเห็นได้โดยทั่วไปในงานเชิงวิศวกรรม เช่น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่างๆ ที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม หม้อไอน้ำรถยนต์ หม้อไอน้ำ เครื่องอุ่นอากาศด้วยแสงอาทิตย์ (solar air heater) ช่องหล่อเย็นของใบกังหันก๊าซ ฯลฯ หน้าที่สำคัญของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนคือ การนำเอาพลังงานความร้อนมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพและเกิดประโยชน์สูงสุด ดังนั้นการพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจึงเป็นเรื่องที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง ซึ่งในระบบต่างๆ ที่มีอุปกรณ์เพื่อใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อน ถ้าสามารถใช้อุปกรณ์ดังกล่าวได้อย่างเต็มประสิทธิภาพของอุปกรณ์นั้นๆ ก็จะเป็นการช่วยลดต้นทุนในส่วนของพลังงานได้

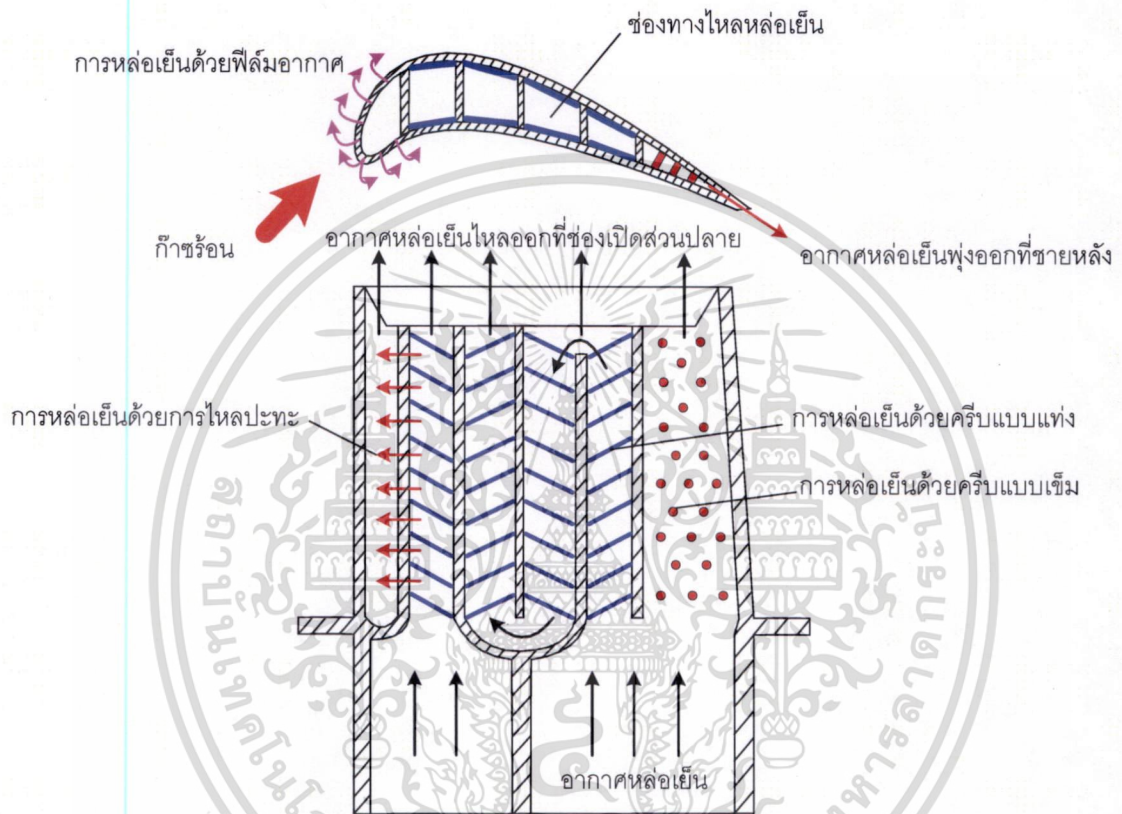
โดยทั่วไปวิธีการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยการพา สามารถแบ่งออกเป็นสองกลุ่มซึ่งประกอบด้วย วิธีที่ไม่ต้องการพลังงานจากภายนอกในการช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (passive technique) และวิธีที่ต้องการพลังงานจากภายนอกเพื่อช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (active technique) สำหรับวิธีแรกนั้นเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในทางอุตสาหกรรม โดยอาศัยการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนจากพื้นผิวที่มีการเพิ่มขึ้นงานเข้าไป หรือมีการปรับปรุงพื้นผิวในรูปแบบต่างๆ เช่น ติดตั้งแผ่นกั้น (baffle) ใช้ครีบริบทรงต่างๆ (ribs) หรือเรียกแบบย่อว่า “ครีบริบ” และใช้ปีกเล็ก (winglet) เป็นต้น ซึ่งการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยวิธีการเพิ่มขึ้นงาน จะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อน และเป็นตัวสร้างการไหลซึ่งก่อให้เกิดความปั่นป่วนทั่วทั้งสนามการไหล

ตัวอย่างที่น่าสนใจของการปรับปรุงพื้นผิวเพื่อเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยการพา คือ การนำไปใช้ในช่องหล่อเย็นของใบกังหันก๊าซ ซึ่งการออกแบบเครื่องยนต์ของเครื่องบินสมัยใหม่นั้นเงื่อนไขที่สำคัญอย่างหนึ่งของการออกแบบคือ ต้องการค่าอัตราส่วนแรงขับต่อน้ำหนักที่มีค่าสูง ในขณะที่ใช้ปริมาณเชื้อเพลิงต่ำ ซึ่งวิธีที่จะทำให้ได้ค่าอัตราส่วนแรงขับต่อน้ำหนักที่มีค่าสูงคือการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนของใบกังหันก๊าซ วิธีที่ให้ประสิทธิภาพดีก็คือการเพิ่มอุณหภูมิทางเข้ากังหัน แต่วิธีนี้จะส่งผลให้ใบกังหันมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นซึ่งอาจสร้างความเสียหายต่อใบกังหันได้ และเพื่อหลีกเลี่ยงจุดหลอมเหลวของโลหะที่ใช้ทำใบกังหัน โดยทั่วไปจะแก้ปัญหานี้โดยใช้วิธีการหล่อเย็นภายในช่องว่างของใบกังหัน

รูปที่ 1.1 แสดงตัวอย่างของการหล่อเย็นภายในช่องว่างของใบกังหัน โดยมีอากาศหล่อเย็นไหลจากฐานเข้าสู่ช่องว่างภายในและไหลออกสู่ช่องเปิดที่ตำแหน่งต่างๆ โดยทั่วไปรูปร่างหน้าตัดของช่องหล่อเย็นจะเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งต่างๆ จากชายหน้าไปยังชายหลังของแพนอากาศ เช่น รูปคล้ายลิ้ม รูปคล้ายสี่เหลี่ยมจัตุรัส หรือรูปสี่เหลี่ยมคางหมู ทั้งนี้ก็เพื่อให้สอดคล้องไปกับรูปทรงของแพนอากาศที่ใช้ทำใบกังหัน และเนื่องจากรูปทรงของตัวใบกังหันนั้นมีความซับซ้อน จึงส่งผลให้การหล่อเย็นที่ตำแหน่งใดๆ กระทำได้ยาก ดังนั้นจึงมีหลายวิธีที่ใช้เพื่อช่วยเพิ่มอัตราการพาความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายในช่องหล่อเย็นของใบกังหัน ซึ่งโดยทั่วไปการหล่อเย็นที่ชายหน้าของแพนอากาศจะใช้วิธีการหล่อเย็นด้วยการไหลปะทะ (impingement cooling) ร่วมกับการหล่อเย็นด้วยฟิล์มอากาศ (film cooling) ที่บริเวณชายหลังอาจจะใช้การหล่อเย็นด้วยครีบบางซี่ (pin fins) และบริเวณส่วนกลางซึ่งเป็นบริเวณส่วนใหญ่ของใบกังหันและมีหลายช่องทางไหล จะใช้การหล่อเย็นด้วยการปรับปรุงพื้นผิวในรูปแบบต่างๆ เช่น ติดตั้งครีบบางซี่ (ribs) พื้นผิวเป็นหลุม (dimpled surface) แถวของพื้นผิวยื่น (surface with arrays of protrusions) หรือพื้นผิวขรุขระ (surface roughness)



รูปที่ 1.1 การหล่อเย็นภายในช่องทางไหลของใบกังหันก๊าซ

สำหรับการปรับปรุงพื้นผิวในบริเวณส่วนกลางของใบกังหัน สังเกตได้ว่าช่องหล่อเย็นของใบกังหันมีหน้าตัดคล้ายสี่เหลี่ยมจัตุรัส ซึ่งจะเป็นเรื่องยากหากต้องการระบายความร้อนออกจากบริเวณมุมของช่องทางไหล นอกจากนี้อุปกรณ์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่างๆ ที่มีช่องทางไหลเป็นท่อกลม นั้น อาจมีข้อเสียตรงที่ต้องใช้พื้นที่สำหรับการติดตั้งมากกว่า เมื่อเทียบกับการใช้ท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยม ดังนั้นหากมีการใช้ท่อสี่เหลี่ยมมาแทนที่ท่อหน้าตัดวงกลม ก็จะเป็นการช่วยแก้ปัญหาเรื่องของพื้นที่ที่ใช้ติดตั้งได้ นอกจากนี้ยังพบว่าเครื่องอุณหอากาศด้วยแสงอาทิตย์นั้น ก็มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมด้วย และถึงแม้ว่าท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมจะมีข้อดีและมีการนำไปใช้กับงานในหลายรูปแบบก็ตาม แต่ก็ยังมีปัญหาสำคัญที่จะต้องได้รับการแก้ไขคือ การระบายความร้อนที่บริเวณมุมของท่อสี่เหลี่ยม ดังนั้นจึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจสำหรับการแก้ปัญหา ซึ่งในงานวิจัยนี้มีแนวทางสำหรับการแก้ปัญหาคือ การสร้างกลไกการไหลหมุนวนที่เกิดขึ้นจากการปรับปรุงพื้นผิว มาช่วยเพิ่มการพาความร้อนในบริเวณดังกล่าว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นงานหรือการปรับปรุงพื้นผิวนั้น ยังมีส่วนเพิ่มค่าความดันตกคร่อมให้กับระบบอีกด้วย ซึ่งจะเกี่ยวเนื่องกับการสูญเสียพลังงานมากขึ้น ดังนั้นในการสร้างหรือผลิตอุปกรณ์สำหรับแลกเปลี่ยนความร้อน จึงมีความจำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงประโยชน์ในเชิงเศรษฐศาสตร์ด้วย โดยทั่วไปนั้นจะเลือกใช้วิธีการใดในการปรับปรุงพื้นผิวเพื่อช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อน อาจพิจารณาได้จากค่าการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยการพาซึ่งอยู่ในเทอมของ Nu/Nu_0 ซึ่งแสดงถึงอัตราส่วนระหว่างเลขนัสเซลล์ท์ของช่องทางไหลที่มีการปรับปรุงพื้นผิว กับค่าเลขนัสเซลล์ท์จากท่อผิวเรียบ และการเพิ่มการสูญเสียความดันซึ่งแสดงในเทอมของ f/f_0 โดยที่เทอมนี้แสดงถึงค่าอัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานในช่องทางไหลที่มีการปรับปรุงพื้นผิว กับค่าตัวประกอบความเสียดทานจากท่อผิวเรียบ ดังนั้นจุดประสงค์หลักในการปรับปรุงพื้นผิวก็คือ เพื่อให้ได้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่มากที่สุดในขณะที่ให้ค่าความดันตกคร่อมน้อยที่สุด ซึ่งก็คือการให้ได้ค่าตัวประกอบของการเพิ่มทางความร้อน (thermal enhancement factor, TEF) หรือในบางครั้งเรียกว่าค่าสมรรถนะของการเพิ่มขึ้นทางความร้อนที่มีค่าสูงที่สุดนั่นเอง ซึ่งมีนิยามเป็นค่าอัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในช่องทางไหลที่มีการปรับปรุงพื้นผิว (h) กับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากท่อผิวเรียบ (h_0) โดยพิจารณาภายใต้สภาวะของการใช้กำลังปั๊มเดียวกันดังสมการ

$$TEF = \frac{h}{h_0} \bigg|_{pp} = \frac{Nu}{Nu_0} \bigg|_{pp} = (Nu/Nu_0)(f/f_0)^{1/3} \quad (1.1)$$

ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันมีนักวิจัยหลายท่าน มุ่งให้ความสนใจเกี่ยวกับการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนจากการไหลผ่านครีบบนผิวที่ถูกจัดวางเรียงกันเป็นแถว และมีลักษณะการวางครีบบนรูปแบบที่หลากหลายบนพื้นผิวให้ความร้อน ลักษณะการไหลหมุนวนที่เกิดขึ้นจากการไหลผ่านครีบบนดังกล่าวมีความซับซ้อนและน่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง การไหลผ่านแถวครีบบนนี้สามารถช่วยเพิ่มสัมประสิทธิ์การพาความร้อนได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการปรับปรุงพื้นผิวรูปแบบอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องจากกลไกของการไหลผ่านครีบบนก่อให้เกิดการไหลหมุนวนที่ปลดชั้นความหนาแบบราบเรียบ มีการไหลแบบปั่นป่วน เกิดการไหลแยกตัวแล้วตกกระทบบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อน ซึ่งนำไปสู่ค่าของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่สูงขึ้นในบริเวณที่มีการไหลตกกระทบบนนั้น

จากงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาและพัฒนาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในช่องทางไหลที่มีการติดตั้งครีบบนพื้นผิวให้ความร้อน โดยมีทั้งการตรวจสอบด้วยผลการทดลอง การคำนวณเชิงตัวเลข หรือใช้ทั้งสองวิธีมาวิเคราะห์ร่วมกัน ซึ่งต่างก็มีจุดมุ่งหมายคล้ายกันคือการทำ ความเข้าใจถึงกลไกการไหลจากสนามการไหลที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อน และความดันตกคร่อม ซึ่งได้รับอิทธิพลจากตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ศึกษา ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข มาศึกษาปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนดังกล่าว วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขนี้มีข้อดีอยู่หลายประการ ได้แก่ สามารถเห็นกลไกที่ซับซ้อนของการไหลซึ่งวิธีการทดลองนั้นอาจจะศึกษาได้ยาก นอกจากนี้ในการทดลองยังมีข้อจำกัดของอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง หากค่าตัวแปรที่ใช้ในการศึกษามีมากมายหลายค่าซึ่งถ้ามีความจำเป็นต้องศึกษาให้ครอบคลุมรอบด้านด้วยแล้ว การใช้วิธีการทดลองจากชุดอุปกรณ์จริง จะส่งผลให้มีความสิ้นเปลืองทั้งระยะเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ ค่าอุปกรณ์ ค่าวัสดุ และค่าเครื่องมือวัดต่างๆ ซึ่งถ้าหากต้องการความละเอียดมาก เครื่องมือที่ใช้ก็อาจมีราคาแพง และรวมทั้งมีการสิ้นเปลืองพลังงานและแรงงานที่ใช้ในการทดลองอีกด้วย ดังนั้นการเลือก

ใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขมาศึกษาปัญหาการไหลดังกล่าว ก็จะเป็นการช่วยแก้ปัญหาที่เกิดจากการทดลองได้ดี

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการไหล ที่มีลักษณะเป็นการไหลแบบปั่นป่วน 3 มิติ และการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ที่มีการติดตั้งครีบริบตัววีแบบแยกตัววางเรียงกันเป็นแถวโดยมีการจัดเรียงครีบริบในลักษณะต่างๆ ที่ผนังด้านบนและด้านล่าง ให้ความร้อนแบบพลั๊กซ์ความร้อนคงที่ ซึ่งคล้ายกับการไหลในช่องหล่อเย็นของใบกังหันก๊าซ จำลองการไหลและการถ่ายเทความร้อนโดยใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม FLUENT 6.3 ซึ่งเป็นโปรแกรมเชิงพาณิชย์ที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์การไหลและมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย และนอกจากนี้ความเข้าใจถึงกลไกของการไหลและการถ่ายเทความร้อนที่ได้รับจากการศึกษา ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการถ่ายเทความร้อนในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมอื่นๆ ได้อีกด้วย ดังนั้นวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ประกอบด้วย

- 1.2.1 เพื่อศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งได้มีการศึกษามาแล้วในอดีตทั้งในส่วนของ การทดลอง และการวิเคราะห์เชิงตัวเลข
- 1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลข กับผลการทดลองของนักวิจัยในอดีตด้วยการใช้แบบจำลองการไหลปั่นป่วนแบบ RNG $k-\epsilon$ และแบบ SST $k-\omega$ ของการไหลภายในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสทั้งในกรณีท่อผิวเรียบ และกรณีที่มีการติดตั้งครีบริบตัววีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบแยกตัว เพื่อหาแบบจำลองความปั่นป่วนที่เหมาะสม
- 1.2.3 เพื่อศึกษาด้วยการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของพฤติกรรมการไหล การถ่ายเทความร้อน ค่าความดันตกคร่อม และค่าตัวประกอบของการเพิ่มทางความร้อน ของการไหลภายในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสในกรณีที่มีจัดวางครีบริบตัววี ที่เกิดจากอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย อิทธิพลของเลขเรย์โนลด์ (Re) อิทธิพลของความหนาครีบริบ อิทธิพลของการจัดวางครีบริบแบบต่างๆ อิทธิพลของมุมปะทะ (α) ของครีบริบตัววี อิทธิพลของความสูงของครีบริบซึ่งพิจารณาในเทอมอัตราส่วนของ ความสูงครีบริบต่อความยาวบ่งลักษณะของช่องทางไหลหรือเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก ($e/D, BR$) อิทธิพลของระยะห่างระหว่างครีบริบ ซึ่งพิจารณาในเทอมอัตราส่วนของระยะห่างระหว่างครีบริบต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก ($p/D, PR$) และอิทธิพลของลักษณะการติดตั้งครีบริบ
- 1.2.4 เพื่อปรับปรุงครีบริบตัววี นำไปสู่ค่าตัวประกอบของการเพิ่มทางความร้อนที่สูงขึ้น
- 1.2.5 เพื่อสร้างสมการสหสัมพันธ์จากตัวแปรที่ทำการศึกษา และใช้ในการทำนายผลจากข้อมูลที่ได้ทำการวิเคราะห์ และเพิ่มความสะดวกสำหรับการนำไปใช้งานจริง ซึ่งยังสามารถนำไปใช้งานได้จริงในช่องหล่อเย็นของใบกังหันก๊าซและอุปกรณ์การถ่ายเทความร้อนรูปแบบอื่นๆ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล และการถ่ายเทความร้อนบนพื้นฐานของระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (finite volume method) ใช้ประโยชน์ด้านกา...
- เอกสารนี้เป็นเอกสารพื้นฐานของระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (finite volume method) ใช้ประโยชน์ด้านกา... ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.3.2 ศึกษาการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบคงตัว 3 มิติ ที่มีการไหลแบบปั่นป่วน และเป็น การไหลไม่อัดตัว (incompressible flow) ซึ่งมีความหนาแน่นคงที่โดยคำนวณแบบไม่คู่ควบ (non-coupled) สมบัติต่างๆ ของของไหลมีค่าคงที่ และไม่พิจารณาแรงวัตถุ ศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 10,000 ถึง 50,000 โดยมีอากาศเป็นของไหลทดสอบ
- 1.3.3 ใช้แบบจำลองความปั่นป่วน 2 แบบจำลองเพื่อเปรียบเทียบคือแบบ RNG $k-\epsilon$ และ SST $k-\omega$
- 1.3.4 การคู่ควบของความเร็วและความดันใช้กระบวนการวิธีแบบ SIMPLE
- 1.3.5 เทอมของการพาใช้แบบแผนการคำนวณแบบ QUICK
- 1.3.6 พิจารณาเฉพาะการพาความร้อนแบบบังคับ (forced convection)
- 1.3.7 ทำการวิจัยเฉพาะท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขอบเขตเป็นแบบระนาบสมมาตร (symmetry planes) ด้านซ้าย-ขวา และบน-ล่าง ให้ความร้อนแบบพลั๊กซ์ความร้อนคงที่ ที่ผนังด้านบนและด้านล่าง มีการคำนวณทั้งแบบการไหลเต็มความยาวช่องทางไหลทดสอบเพื่อตรวจสอบสถานะการเข้าสู่การไหลที่พัฒนาอย่างสมบูรณ์ ของการไหลและการถ่ายเทความร้อน และมีการคำนวณแบบการไหลซ้ำเป็นช่วง (periodic flow) โดยมีโดเมนการคำนวณอยู่ในช่วง 2 โมดูล เพื่อศึกษาการไหลและการถ่ายเทความร้อนในช่วงที่มีการไหลแบบพัฒนาอย่างสมบูรณ์แล้ว
- 1.3.8 ครีบบนที่ใช้ในการวิเคราะห์หิมะทั้งครีบนหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสและครีบบาง ซึ่งไม่สามารถนำความร้อนได้และมีการจัดวางครีบบนเป็นรูปตัววี
- 1.3.9 ศึกษาการไหลผ่านครีบบนรูปตัววีหน้าตัดบาง ($s/D = 0.0125$) ที่ถูกติดตั้งบนพื้นผิวให้ความร้อนทั้งด้านบน และด้านล่าง ซึ่งครีบบนที่ศึกษามีทั้งครีบบนเนื้อและครีบบนแยกตัว ทำมุมปะทะกับทิศทางไหล $\alpha = 30^\circ, 37.5^\circ, 45^\circ, 52.5^\circ, 60^\circ, 67.5^\circ$ และ 75° มีการศึกษาทั้งการไหลแบบตามกระแสการไหล (V-downstream) และทวนกระแสการไหล (V-upstream) โดยมีการจัดวางครีบบนตรงกัน (in-line) ค่า BR และค่า PR เปลี่ยนแปลงค่าหลายค่าเพื่อให้ได้ค่า TEF ที่สูงที่สุดและเหมาะสม
- 1.3.10 ศึกษาการไหลผ่านครีบบนรูปตัววีแบบแยกตัวหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ที่ถูกติดตั้งบนพื้นผิวให้ความร้อนทั้งด้านบนและด้านล่างของช่องทางไหล ตัวแปรที่ศึกษาเหมือนกับข้อที่ 1.3.9
- 1.3.11 ศึกษาการไหลผ่านครีบบนรูปตัววีแบบแยกตัวหน้าตัดบาง ที่ถูกติดตั้งบนพื้นผิวหุ้มฉนวนทั้งด้านบนและด้านล่างของช่องทางไหล ตัวแปรที่ศึกษาเหมือนกับข้อที่ 1.3.9
- 1.3.12 ปรับปรุงครีบบนจากผลการศึกษาในข้อ 1.3.9 ถึง 1.3.11
- 1.3.13 หาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องซึ่งนำไปสู่การใช้งานจริง

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1.4.1 รวบรวมข้อมูล ทำการศึกษาทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของการไหลผ่านครีบบนรูปแบบต่างๆ
- 1.4.2 กำหนดลักษณะของปัญหาและรูปร่างครีบบน โดยสร้างแบบจำลองการไหลบนโปรแกรมทางพลศาสตร์ของไหล พร้อมกับตรวจสอบจำนวนกริดเซลล์ที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเข้าถึงเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.4.3 ตรวจสอบแบบจำลองความปั่นป่วนที่เหมาะสมเทียบกับผลการทดลองของนักวิจัยในอดีตสำหรับการไหลผ่านครีบริบรูปตัววีที่ถูกติดตั้งในท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส
- 1.4.4 ดำเนินการคำนวณเชิงตัวเลขจากแบบจำลองการไหลสามมิติ โดยเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตามที่ระบุในวัตถุประสงค์ได้แก่ Re, BR, PR, α การจัดวางครีบลักษณะการติดตั้งครีบล และรูปแบบของครีบล
- 1.4.5 วิเคราะห์ผลที่ได้จากการคำนวณซึ่งแสดงค่าในรูปพารามิเตอร์ไร้หน่วย
- 1.4.6 สรุปผลการวิจัยและให้ข้อเสนอแนะเพิ่มเติมสำหรับการทำวิจัยต่อไปในอนาคต

1.5 ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย

- 1.5.1 ทำให้ทราบถึงอิทธิพลของค่าตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อสมรรถนะในการถ่ายเทความร้อนของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดตั้งครีบริบรูปตัววีทั้งแบบต่อเนื่องและแบบแยกตัว
- 1.5.2 เพื่อปรับปรุงและออกแบบครีบลภายในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสให้มีความเหมาะสม ทั้งในการประยุกต์ใช้งานในช่องหล่อเย็นของใบกังหันก๊าซและในอุปกรณ์การถ่ายเทความร้อน
- 1.5.3 เป็นองค์ความรู้และเป็นแนวทางเพื่อการวิจัยด้านการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสต่อไป
- 1.5.4 ประหยัดพลังงานและลดการใช้วัสดุในการสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งนำไปสู่การลดต้นทุนการผลิต

1.6 คำโครงวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 9 บท โดยที่ในบทที่ 1 ได้กล่าวถึงที่มาของงานวิจัย รวมถึงความสำคัญ วัตถุประสงค์ และขอบเขตของงานวิจัย บทที่ 2 กล่าวถึงวรรณกรรมปริทรรศน์ นำเสนอเกี่ยวกับผลงานวิจัยที่ได้มีการศึกษาและเผยแพร่มาแล้ว ซึ่งศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีการใช้แผ่นกันและใช้ครีบลในรูปแบบต่างๆ บทที่ 3 ได้นำเสนอสมการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับพลศาสตร์การไหลและการคำนวณเชิงตัวเลข บทที่ 4 นำเสนอการตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองความปั่นป่วนและนำเสนอกรณีศึกษาสำหรับครีบริบรูปตัววี

ผลจากการศึกษาและการวิเคราะห์เชิงตัวเลขนำเสนอในบทที่ 5 ถึงบทที่ 8 โดยบทที่ 5 ได้นำเสนอการวางครีบริบรูปตัววีหน้าตัดบางแบบแยกตัว ติดตั้งบนพื้นผิวให้ความร้อนที่ผนังด้านบนและด้านล่าง โดยศึกษาถึงโครงสร้างการไหล พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน และความดันตกคร่อม ซึ่งแสดงในรูปของตัวเลขนัสเซลท์ ค่าตัวประกอบความเสียหาย และค่า TEF รวมทั้งเส้นกระแสการไหลรูปแบบต่างๆ ต่อมาในบทที่ 6 ได้นำเสนอการวางครีบริบรูปตัววีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบแยกตัวติดตั้งบนพื้นผิวให้ความร้อนที่ผนังด้านบนและด้านล่าง เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบกับครีบลบางที่ได้นำเสนอไปในบทที่ 5 ส่วนในบทที่ 7 นั้นได้นำเสนอการวางครีบริบรูปตัววีหน้าตัดบางแบบแยกตัว ติดตั้งบนพื้นผิวหุ้มฉนวนที่ผนังด้านบนและด้านล่างเพื่อสร้างการไหลให้ปะทะกับพื้นผิวให้ความร้อนที่อยู่ตรงข้ามกันและเปรียบเทียบกับกรณีศึกษาในบทที่ 5 นอกจากนี้ผลการปรับปรุงลักษณะการจัดวางครีบลเพื่อให้ได้ค่า TEF ที่สูงขึ้นได้นำเสนอไว้ในบทที่ 8 และท้ายที่สุด ในบทที่ 9 ได้กล่าวสรุปถึงลักษณะการจัดวางครีบลและอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่ได้ศึกษามาแล้ว รวมทั้งสร้างสมการที่เกี่ยวข้องกับตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา เพื่อนำไปใช้กับงานทางอุตสาหกรรมและงานวิจัยในอนาคตต่อไป

บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากเนื้อหาในบทหน้าที่ผ่านมา ได้นำมาสู่เนื้อหาในบทนี้ซึ่งกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการไหลและการถ่ายเทความร้อนผ่านพื้นผิวให้ความร้อน ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวในรูปแบบต่างๆ เพื่อช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนจากผลงานของนักวิจัยในอดีตที่ผ่านมา ซึ่งได้มีการศึกษาทั้งการทดลอง การคำนวณเชิงตัวเลข หรือใช้ทั้งสองวิธีวิเคราะห์ร่วมกัน โดยเน้นถึงงานวิจัยที่ได้ศึกษาและวิเคราะห์เกี่ยวกับพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบความเสียดทานของการไหลผ่านแผ่นกั้นและการไหลผ่านครีบบรรูปแบบต่างๆ เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปวิเคราะห์การไหลและการถ่ายเทความร้อนในช่องทางไหลสี่เหลี่ยมจัตุรัสต่อไป

2.1 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยใช้วิธีการติดตั้งแผ่นกั้น

การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อด้วยการติดตั้งแผ่นกั้นซึ่งมีลักษณะเป็นครีบบที่มีหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมบาง โดยทั่วไปแผ่นกั้นนั้นอาจจะพิจารณาว่าเป็นครีบบสูงหน้าตัดบาง ถูกติดตั้งบนผนังของท่อ โดยมีการจัดวางทั้งแบบตรงและแบบเอียงเป็นอีกหนึ่งวิธีที่นำมาใช้ในกระบวนการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน โดยการไหลผ่านแผ่นกั้นจะรบกวนชั้นขีดผิวความร้อนทำให้บริเวณระหว่างแผ่นกั้นทั้งสองที่อยู่ติดกันเกิดการหมุนวนของการไหลและช่วยในการเพิ่มสัมประสิทธิ์การพาความร้อน โดยวิธีนี้จะทำให้อุปกรณ์ที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนมีขนาดเล็กลง ซึ่งเหมาะสมสำหรับอุปกรณ์ที่มีพื้นที่จำกัดในการใช้งานและต้องการความกะทัดรัด ดังนั้นในอดีตที่ผ่านมาจึงมีผู้ที่ศึกษาจากการศึกษาด้วยชุดทดลองจริง และศึกษาด้วยวิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลขดังนี้

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

Habib et al. (1994) ศึกษาด้วยการทดลองในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนและพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนแบบซ้ำเป็นช่วง สำหรับท่อที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นที่มีการจัดวางแบบเอียง จากผลการศึกษาพวกเขาสรุปว่าค่าความดันตกคร่อมและค่าการถ่ายเทความร้อน มีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีการเพิ่มความสูงของแผ่นกั้นและเลขเรย์โนลด์

Yilmaz (2003) ศึกษาผลของแผ่นกั้นเดี่ยวที่ทางเข้าต่อพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนและความดันตกคร่อม แผ่นกั้นถูกติดตั้งที่ผิวด้านบนของท่อที่มีการให้ความร้อนแบบพลักซ์ความร้อนคงที่ แผ่นกั้นมีค่าอัตราส่วนการขวางที่แตกต่างกัน 2 ค่า และมุมปะทะของของไหล 4 มุม ศึกษาในช่วงค่า

เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 7100-28,500 จากผลการทดลองพบว่าค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนซึ่งแสดงในรูปของเลขนัสเซลที่มีค่าเพิ่มขึ้น 1.39-2.43 เท่า เมื่อเทียบกับท่อเปล่า เมื่อค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้นค่าความดันตกคร่อมก็เพิ่มมากขึ้นด้วย โดยพบว่าค่าความดันตกคร่อมมีค่าเพิ่มมากขึ้นเท่ากับ 28.26-94.45 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่า เมื่อพิจารณาถึงค่าการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อม ในรูปของค่าสมรรถนะที่ได้จากการเพิ่มแผ่นกั้นเดี่ยวที่ทางเข้าของท่อ สรุปได้ว่าแผ่นกั้นเดี่ยวที่ทางเข้าไม่เป็นประโยชน์ต่อค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ถึงแม้ว่าจะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มมากขึ้น แต่ก็ให้ค่าความดันตกคร่อมที่เพิ่มมากขึ้นในอัตราส่วนที่มากกว่าค่าการถ่ายเทความร้อนมาก

2.1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณเชิงตัวเลข

Patankar et al. (1977) เป็นผู้ริเริ่มศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อวิเคราะห์การไหลและการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อ โดยจากการศึกษาพบว่าการไหลในช่วงพัฒนาอย่างสมบูรณ์มีพฤติกรรมการไหลแบบซ้ำเป็นช่วง ซึ่งมีลักษณะที่เหมือนกันและซ้ำกันทุกๆ โมดูล

Webb and Ramadhyani (1985) ได้นำแนวคิดการไหลแบบซ้ำเป็นช่วงของ Patankar et al. (1977) มาศึกษาพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนในช่องทางไหลขนาน ที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นโดยมีการจัดวางแบบเอียง

Cheng and Huang (1989) ทำการศึกษาในช่วงการไหลแบบราบเรียบของของไหลในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงตามทางเข้าของท่อโดยใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข สำหรับท่อแบบกึ่งไม่จำกัด (semi-infinite) ที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นทั้งแบบวางด้านเดียวและสองด้าน

Cheng and Huang (1991) ศึกษากรณีของการติดตั้งแผ่นกั้นตามขวางที่มีการจัดวางแบบไม่สมมาตร จากผลการศึกษาพบว่าตำแหน่งในการจัดวางแผ่นกั้นมีอิทธิพลต่อลักษณะการไหล โดยเฉพาะแผ่นกั้นที่มีความสูงมาก

ในช่วงแรกๆ ของงานวิจัยโดยใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข ส่วนมากศึกษาพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนโดยจำกัดวิธีการศึกษาเป็นแบบการไหล 2 มิติ อันเนื่องมาจากข้อจำกัดของคอมพิวเตอร์ที่ใช้ศึกษาและความซับซ้อนของการไหล แต่ต่อมาเมื่อคอมพิวเตอร์มีการพัฒนามากขึ้น จึงมีงานวิจัยที่ขยายการไหลไปสู่สนามการไหล 3 มิติ ซึ่งได้แก่

Lopez et al. (1996) ได้พยายามศึกษาพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อที่มีการติดตั้งแผ่นกั้น โดยมีการศึกษาแบบ 3 มิติ ด้วยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข ศึกษาในช่วงการไหลแบบราบเรียบ โดยกำหนดให้ผิวท่อด้านบนและด้านล่างมีการให้ความร้อนแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ ส่วนด้านข้างของท่อเป็นฉนวนความร้อน จากผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วนบ่งลักษณะท่อ (aspect ratio) มีอิทธิพลเพียงเล็กน้อยสำหรับค่าความดันตกคร่อม แต่ค่าความดันตกคร่อมจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความสูงของแผ่นกั้นและเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น

Guo and Anand (1997) ศึกษาพฤติกรรมในช่วงการเปลี่ยนแปลงตามทางเข้าของการถ่ายเทความร้อนแบบ 3 มิติ ในท่อที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นเดี่ยว

Bazdid-Tehrani and Naderi-Abadi (2004) ได้นำเสนอผลจากการศึกษาด้วยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขของพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อที่มีการเพิ่มแผ่นกั้นโดยมีการจัดวางแผ่นกั้นแบบตรงกัน จากการศึกษาพบว่าอัตราส่วนการขวางการไหลหรือความสูงของแผ่นกั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะส่งผลถึงพฤติกรรมกรรมการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและส่งผลให้ค่าสมรรถนะทางความร้อนลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยก่อนหน้าที่กล่าวถึงแผ่นกั้นที่มีการจัดวางแบบเยื้อง

Mousavi and Hooman (2006) ศึกษาพฤติกรรมกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นแบบเยื้อง ทั้งด้านบนและด้านล่างของช่องทางไหลขนาน โดยศึกษาอิทธิพลของเลขเรย์โนลด์ ค่าอัตราส่วนการขวางการไหลและเลขพรานด์ โดยอัตราส่วนระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นกำหนดให้มีค่าคงที่ จากผลการศึกษาพบว่าเงื่อนไขของกรรมการไหลแบบพัฒนาอย่างสมบูรณ์และเป็นการไหลแบบช้าเป็นช่วง ขึ้นอยู่กับค่าเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนการขวางการไหล โดยตัวแปรทั้งสองนี้จะส่งผลต่อค่าการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน นอกจากนี้ค่าเลขพรานด์ที่มีค่ามากจะส่งผลให้มีความยาวทางเข้ามากขึ้นด้วย จากงานวิจัยนี้สรุปได้ว่าเมื่อเพิ่มเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนการขวางการไหลจะส่งผลให้เลขนัสเซลที่มีค่าเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังส่งผลให้ค่าความดันตกคร่อมเพิ่มมากขึ้นด้วย โดยค่าอัตราส่วนการขวางการไหลระหว่าง 0.25-0.50 จะส่งผลอย่างมากถึงการเปลี่ยนแปลงค่าการถ่ายเทความร้อนและความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้น

นอกจากนี้ Promvong and Kwankaomeng (2010), Promvong et al. (2010a), และ Promvong et al. (2010b) ได้ศึกษาด้วยการคำนวณเชิงตัวเลขของกรรมการไหลแบบราบเรียบ โดยวิเคราะห์ถึงการถ่ายเทความร้อนและลักษณะการไหลที่เกิดจากอิทธิพลของมุมปะทะของแผ่นกั้นยาวต่อเนื่อง ซึ่งติดตั้งที่ผนังด้านบนและด้านล่างของช่องทางไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส และได้ศึกษาถึงกระแสน้ำตามยาวที่เกิดจากการไหลปะทะแผ่นกั้น และเหนี่ยวนำให้เกิดลำการไหลพุ่งกระแทกพื้นผิวให้ความร้อน ซึ่งนำไปสู่การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนอย่างมากในบริเวณการไหลตกกระแทกนั้น

2.2 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนด้วยการติดตั้งแผ่นกั้นเจาะรู

แผ่นกั้นที่มีการเจาะรูสามารถทำให้เกิดลำการไหล(jet) ซึ่งไหลไปกระแทกบริเวณพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและยังอาจช่วยลดความดันตกคร่อมลงได้ และส่งผลให้ค่าสมรรถนะทางความร้อนที่ดีขึ้น

Dutta et al. (1997) ทำการทดลองเกี่ยวกับแผ่นกั้นที่มีการเจาะรู โดยผลจากการทดลองพบว่าแผ่นกั้นที่มีการเจาะรู ให้ค่าการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อนที่มากกว่าเมื่อเทียบกับแผ่นกั้นที่ไม่มีมีการเจาะรู การติดตั้งแผ่นกั้นจะแนบไปกับผิวความร้อนโดยมีการจัดวางตามทิศทางการไหล ซึ่งพบว่าค่าการถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้นโดยมีค่าเป็น 5 เท่า เมื่อเทียบกับท่อเปล่า

Dutta, P. and Dutta, S. (1998) ได้ทำการศึกษาและรายงานเกี่ยวกับค่าการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อนโดยการเพิ่มแผ่นกั้นแบบเจาะรูและไม่เจาะรู พวกเขาศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของขนาดของแผ่นกั้น ตำแหน่งและการจัดวางแผ่นกั้น จากการศึกษาพบว่าแผ่นกั้นที่มีการเจาะรูจะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่าแผ่นกั้นที่ไม่เจาะรู เนื่องจากแผ่นกั้นที่มีการเจาะรูทำให้เกิดการกระแทกของลำการไหลไปสู่บริเวณพื้นผิวความร้อนซึ่งเป็นการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน อย่างไรก็ตามในกรณีของแผ่นกั้นเดี่ยว บริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนสูงและถูกจำกัดอยู่แค่บริเวณที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นเท่านั้น เมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของทิศทางการไหลของของไหล พวกเขาพบว่าการกำหนดทิศทางการไหลแบบไหลตามกระแสการไหล(downstream) ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่มากกว่าแบบทวนกระแสการไหล(upstream)

Yang and Hwang (2003) ศึกษาและเปรียบเทียบผลระหว่างแผ่นกั้นทั่วไปและแผ่นกั้นแบบพรุน โดยมีการศึกษาแบบ 2 มิติ สำหรับท่อขนานในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน โดยใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่จำกัดใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

2.3 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนด้วยการติดตั้งครีป

นอกจากการใช้แผ่นกันซึ่งมีลักษณะเป็นครีปสูงหน้าตัดบางแล้ว มีผู้วิจัยจำนวนมากให้ความสนใจกับการใช้ครีป ที่มีรูปร่างของหน้าตัดหลากหลายรูปแบบ และมีความสูงไม่มากนักเมื่อเทียบกับความสูงของแผ่นกัน(โดยทั่วไปจะมีความสูงครีปน้อยกว่า 10% ของช่องทางไหล) มาช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ซึ่งการใช้ครีปที่ติดตั้งตลอดแนวพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนนั้น จะสร้างการไหลรบกวนชั้นขีดผิวในบริเวณระหว่างครีปใกล้พื้นผิวถ่ายเทความร้อน ซึ่งเหมาะสำหรับการถ่ายเทความร้อนที่มีการไหลแบบปั่นป่วน โดยครีปที่ยาวต่อเนื่องและวางตั้งฉากกับทิศทางการไหล จะสร้างการไหลวนที่มีแกนการไหลตั้งฉากกับทิศทางการไหลและรบกวนบริเวณการไหลหลักน้อย ส่วนการไหลผ่านครีปที่ทำมุมปะทะต่างๆ กับทิศทางการไหลนั้น จะสร้างการไหลวนตามยาวไปทางด้านท้ายการไหล และก่อให้เกิดการรบกวนบริเวณการไหลหลัก ซึ่งพฤติกรรมการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนส่วนใหญ่จะเกิดบริเวณใกล้กับผิวความร้อน ข้อดีของครีปคือมีการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยที่ค่าความดันตกคร่อมไม่สูงมากนัก ซึ่งจะส่งผลให้ได้ค่าตัวประกอบทางความร้อนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

2.3.1 ครีปรูปแบบต่างๆ

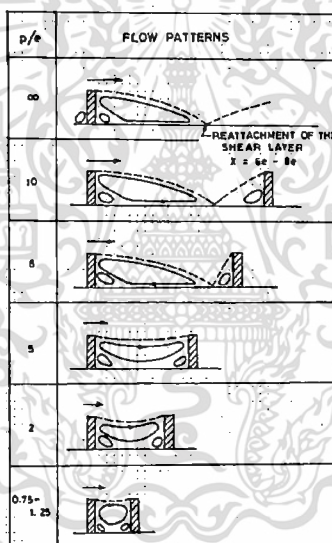
2.3.1.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง

Webb et al. (1971) พวกเขาได้นำเสนอพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อที่มีการติดตั้งครีปที่เรียงตัวซ้ำกัน

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°

Prasad and Saini (1988) ได้แสดงรูปแบบของการไหลที่ทางด้านท้ายครีบที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนของระยะห่างระหว่างครีบต่อความสูงครีบ (p/e) เนื่องจากการไหลแยกตัวทางด้านท้ายครีบดังรูปที่ 2.1 ซึ่งพวกเขาพบว่าจุดตกกระทบของชั้นการไหลเฉือน (shear layer) จะไม่เกิดขึ้นที่ค่า p/e น้อยกว่า 8 และค่าการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดเกิดขึ้นที่บริเวณการไหลตกกระทบพื้นผิว และถ้าค่า p/e มากกว่า 10 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนจะมีค่าลดลง



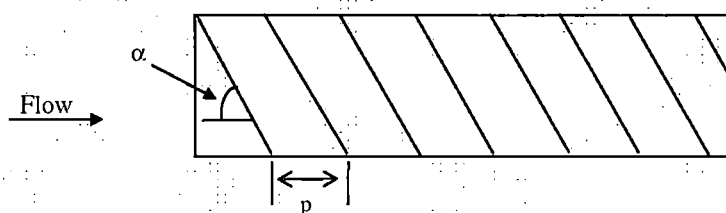
รูปที่ 2.1 รูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นทางด้านท้ายครีบในงานของ Prasad and Saini (1988)

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

Gupta et al. (1997) ตรวจสอบอิทธิพลของ e/D มุมปะทะ และเลขเรย์โนลด์ ต่อการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบความเสียหายในท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีครีบเป็นเส้นลวดหน้าตัดวงกลมติดตั้งบนแผ่นดูดซับความร้อน แสดงดังรูปที่ 2.2 ซึ่งพวกเขาพบว่าอัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงถึง 1.8 และตัวประกอบความเสียหายมีค่าเท่ากับ 2.7 เท่าเมื่อเทียบกับท่อผิวเรียบ และค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบความเสียหายเกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าในรูปแบบใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มีมุมปะทะ 60° และ 70° ตามลำดับ นอกจากนี้ค่า TEF สูงที่สุดเกิดขึ้นที่ $e/D=0.033$ ที่เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 14,000

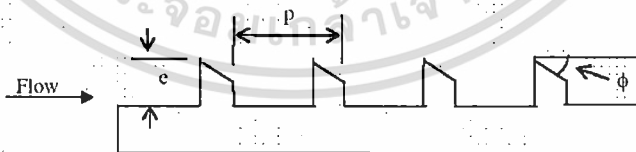


รูปที่ 2.2 ครีบบางเอียงที่ใช้ในการตรวจสอบการถ่ายเทความร้อนโดย Gupta et al. (1997)

งานวิจัยที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับค่าของความร้อนและสมรรถนะของหม้อน้ำในเชิงพาณิชย์สามารถศึกษาได้จากงานของ Farrell et al. (1991), Olsson and Sunden (1996) พวกเขาได้ศึกษาถึงอิทธิพลของครีบบาง พื้นผิวแบบหลุมและระยะห่างของครีบบางในท่อ จากผลการศึกษาพบว่าครีบบางให้ค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด

Olsson and Sunden (1997) ได้ศึกษาพฤติกรรมการไหลในท่อที่มีการติดตั้งครีบบางในลักษณะต่าง ๆ ด้วยการใช้ควัน (smoke-wire visualization) และ laser doppler anemometry (LDA) โดยทำการศึกษารูปร่างของครีบบางที่มีลักษณะแตกต่างกันออกไป ซึ่งประกอบด้วยครีบบางแบบขนาน ครีบบางแบบเอียง ครีบบางรูปตัววีแบบขนาน ครีบบางรูปตัววีแบบเอียงและครีบบางรูปตัววีแบบผสม (multiple) ที่ค่าเลขเรย์โนลด์น้อยกว่า 2000 พบว่าการเกิดการไหลหมุนวนชั้นที่สอง (secondary flow) ในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสจะให้ค่าที่เสถียรมากกว่าการเกิดในท่อขนานหรือท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้า

Liou and Chen (1998) ศึกษาการถ่ายเทความร้อนและพฤติกรรมการไหลในช่วงการไหลปั่นป่วนสำหรับท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการติดตั้งครีบบางแบบเจาะรู พวกเขาได้ทำการศึกษาทั้งครีบบางที่มีการติดตั้งที่พื้นและแบบไม่แนบกับพื้น โดยครีบบางทำจากอลูมิเนียม จากผลการทดลองพบว่าค่าเลขนัสเซิลท์ที่เพิ่มมากขึ้นมีค่าเท่ากับ 3 เท่า เมื่อเทียบกับท่อเปล่าที่ไม่มีการเพิ่มครีบบาง



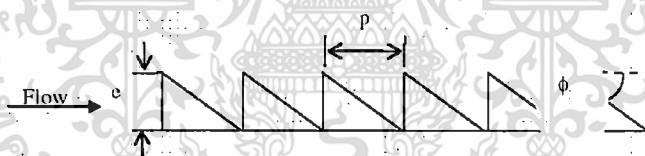
รูปที่ 2.3 ครีบบางตามขวางตัดยอดด้วยมุมค่าต่างๆ ในงานของ Karwa et al. (1999)

Karwa et al. (1999) ศึกษาด้วยการทดลองเพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของมุมตัดที่ยอดของครีบบาง (ϕ) และอัตราส่วนบ่งลักษณะของท่อต่อการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบความเสียดทาน ในท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีครีบบางตามขวางตัดยอดซึ่งติดตั้งที่ผนังด้านข้าง โดยเปรียบเทียบกับท่อผิวเรียบ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 จากการทดลองพบว่าในช่วงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ ครีบบางตัดยอดให้ค่าการเพิ่มของเลขแอสแตนต์และตัวประกอบความเสียดทาน เท่ากับ 2 เท่า และ 3 เท่า เมื่อเทียบกับท่อ

ผิวเรียบตามลำดับ โดยการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบความเสียดทานสูงสุดเกิดขึ้นที่ $\phi = 15^\circ$ การค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ahn (2001) ทำการศึกษาผลกระทบของครีบบรูปแบบต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทานในท่อสี่เหลี่ยม โดยทำการศึกษารูปทรงครีบ 5 ชนิด ได้แก่ ครีบบรูปสี่เหลี่ยม ครีบบรูปสามเหลี่ยม ครีบบวงกลม ครีบบครึ่งวงกลมทรงต่ำ และครีบบครึ่งวงกลมทรงสูง โดยทำการศึกษาที่ความสูงครีบต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก เท่ากับ 0.0476 อัตราส่วนระยะพิชต์ต่อความสูงครีบ เท่ากับ 8 และอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงเท่ากับ 2.33 จากการทดลองพบว่า แผ่นครีบบสามเหลี่ยมมีค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนดีที่สุด ตามด้วยครีบบสี่เหลี่ยม ส่วนครีบบวงกลมและครึ่งวงกลมมีสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนใกล้เคียงกัน โดยที่ค่าเลขเรย์โนลด์ 10,000 แผ่นครีบบสามเหลี่ยมมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าแผ่นเรียบ 3 เท่า ในช่วงค่าเลขเรย์โนลด์ 20,000 จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อค่าเลขเรย์โนลด์มีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพโดยรวมพบว่าแผ่นครีบบสามเหลี่ยมมีสมรรถนะเชิงความร้อนโดยรวมมากที่สุด ตามด้วยแผ่นครีบบสี่เหลี่ยม

Bhagoria et al. (2002) ศึกษาด้วยการทดลองหาความสัมพันธ์ของค่าระยะห่างระหว่างครีบบสัมพันธ์ (p/e) ความสูงครีบบสัมพันธ์ และมุมลิ้ม ต่อการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบของความเสียดทานในเครื่องอุ่นอากาศด้วยแสงอาทิตย์ที่มีการติดตั้งครีบบรูปลิ้ม ดังแสดงในรูปที่ 2.5 จากผลการทดลองพบว่าในช่วงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์และตัวประกอบความเสียดทานมีค่าสูงสุดเท่ากับ 2.4 และ 5.3 เท่าเมื่อเทียบกับท่อผิวเรียบตามลำดับ ค่าการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดได้มาจากค่ามุมลิ้มประมาณ 10° และ $p/e=7.57$ ซึ่งค่าตัวประกอบความเสียดทานมีค่าลดลงตามระยะห่างระหว่างครีบบที่เพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 2.5 ครีบบรูปลิ้มที่ใช้ในงานของ Bhagoria et al. (2002)

Cavallero and Tanda (2002) ตรวจสอบด้วยการทดลองผลของการถ่ายเทความร้อนในช่องทางไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีอัตราส่วนด้านยาวต่อด้านกว้างเท่ากับ 5 ซึ่งมีการติดตั้งครีบบต่อเนื่องและครีบบแบบแยกตัวบนพื้นผิวด้านล่าง โดยวางตั้งฉากกับทิศทางการไหลและให้ความร้อนแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ ทำการศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 8000 ถึง 35,000 วัดค่าการถ่ายเทความร้อนด้วยการวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวให้ความร้อนโดยใช้ ลิควิด คริสตอล (liquid crystal thermography) พวกเขาสรุปว่าที่ค่า $p/e=8$ ให้ค่าอัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดในบริเวณการไหลตกกระทบบนพื้นผิว และในกรณีของครีบบต่อเนื่องและครีบบแบบแยกตัวนั้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมีค่าเป็น 2 เท่าและ 3 เท่าของกรณีไม่มีการติดตั้งครีบบตามลำดับ

Won et al. (2003) ได้ทดลองศึกษาโครงสร้างการไหลโดยใช้เส้นลวดควัน (smoke wires) และการถ่ายเทความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรด ในช่องทางไหลที่มีค่าอัตราส่วนบ่งลักษณะเท่ากับ 4 ซึ่งมีครีบบวางเอียง 45° แบบสลับที่ผนังด้านบนและด้านล่าง ในช่วงเลขเรย์โนลด์ 270 ถึง 48,000 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่หวังกำไรใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

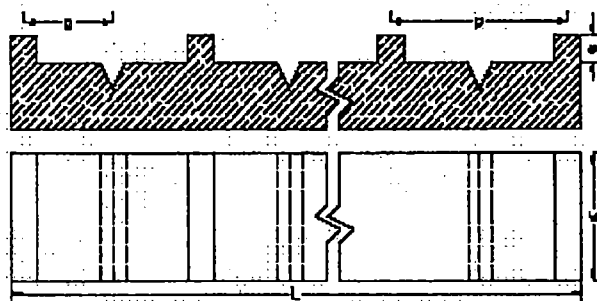
จากการทดลองพบว่าเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้นจะมีคู่ของกระแสวนขนาดเล็กเกิดขึ้นเป็นทวิคูณ และความเข้มขององค์ประกอบการไหลชั้นที่สอง ซึ่งเคลื่อนที่ตรงข้ามจากผนังด้านบนและด้านล่าง ส่งผลต่อรูปร่างของกระแสวน การเคลื่อนย้ายของความปั่นป่วนแบบ 3 มิติ และพฤติกรรมการไหลซึ่งสัมพันธ์กับค่าของเลขนัสเซลล์เฉพาะที่

Chandra et al.(2003) ศึกษาด้วยการทดลองของการถ่ายเทความร้อน ในช่องทางไหลที่มีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ซึ่งติดตั้งครีบบนผนังและวางตั้งฉากกับทิศทางการไหลบนผนังให้ความร้อน โดยมุ่งศึกษากรณีการติดตั้งครีบบนผนัง 4 กรณีคือ ติดตั้ง 1 ด้าน, 2 ด้านที่ตรงข้ามกัน, 3 ด้าน และ 4 ด้าน โดยกำหนดค่า $p/e=8$ และ $e/D=0.0625$ คงที่ตลอดการทดลอง วิเคราะห์ในช่วงเลขเรย์โนลด์ 10,000 ถึง 80,000 พวกเขาสรุปว่าการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบความเสียหายเพิ่มขึ้นกับการเพิ่มจำนวนด้านที่ติดตั้งครีบบนผนัง และค่า TEF สูงที่สุดเกิดขึ้นกับกรณีการติดตั้งครีบบน 2 ด้านที่ตรงข้ามกัน ซึ่งให้ค่า TEF อยู่ในช่วง 1.2 ถึง 1.7

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

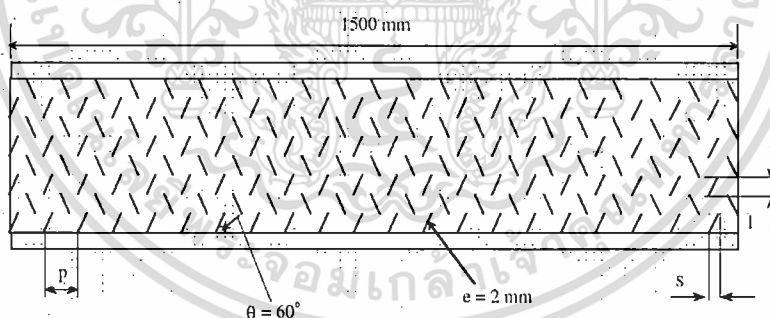
Sahu and Bhagoria (2005) ได้ตรวจสอบด้วยผลการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน โดยใช้ครีบบนผนังแบบแยกตัววางตั้งฉากกับทิศทางการไหลบนผนังผิวให้ความร้อนแบบพลาซิกซ์ ความร้อนคงที่ ในท่อหน้าตัดที่มีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างเท่ากับ 8, $D=44.44$ mm, $e/D=0.0338$ ใช้ค่า $p/e=6.67$, 13.33 และ 15 ในช่วงเลขเรย์โนลด์ 3000 ถึง 12,000 และวัดอุณหภูมิบนผนังผิวร้อน 6 ตำแหน่ง พวกเขาสรุปว่าค่า $p/e=13.33$ ให้สมรรถนะดีที่สุด และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนอยู่ในช่วง 1.25 ถึง 1.4 เท่า เมื่อเทียบกับท่อผิวเรียบ

Jaurker et al. (2006) ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียหายของแผ่นสี่เหลี่ยมในเครื่องอุณหอากาศด้วยแสงอาทิตย์ชนิดผิวครีบบนร่อง (rib-grooved) อยู่ในแนวตั้งฉากกับทิศทางการไหลโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล วัดการกระจายของอุณหภูมิที่ผิวให้ความร้อน ศึกษาในช่วงค่าเลขเรย์โนลด์ $Re=3000-21,000$ ความสูงครีบบนร่องต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (e/D) เท่ากับ 0.0181-0.0363 อัตราส่วนระยะห่างระหว่างครีบบนร่องต่อความสูงครีบบนร่อง เท่ากับ 4.5-10.0 และระยะร่องต่อระยะห่างระหว่างครีบบนร่อง เท่ากับ 0.3-0.7 โดยครีบบนร่องต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 2.7 จากการทดลองพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของแผ่นครีบบนร่อง จะมีค่ามากกว่าแผ่นครีบบนร่องอย่างเดียว และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนระยะห่างระหว่างครีบบนร่องต่อความสูงครีบบนร่องมีคาลดลง และมีค่าสูงสุดที่อัตราส่วนระยะห่างระหว่างครีบบนร่องต่อความสูงครีบบนร่องเท่ากับ 6 เมื่อระยะร่องต่อระยะห่างระหว่างครีบบนร่อง มีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าเลขนัสเซลล์ที่มีค่าสูงสุดเมื่อระยะร่องต่อระยะห่างระหว่างครีบบนร่องเท่ากับ 0.4 ส่วนค่าตัวประกอบเสียหายมีค่าสูงสุดเมื่อระยะร่องต่อระยะห่างระหว่างครีบบนร่องเท่ากับ 0.4 และค่า TEF สูงที่สุดเท่ากับ 1.8 ที่เลขเรย์โนลด์ 20,000



รูปที่ 2.7 รูปแบบครีบริบที่มีร่องของ Jaurker et al. (2006)

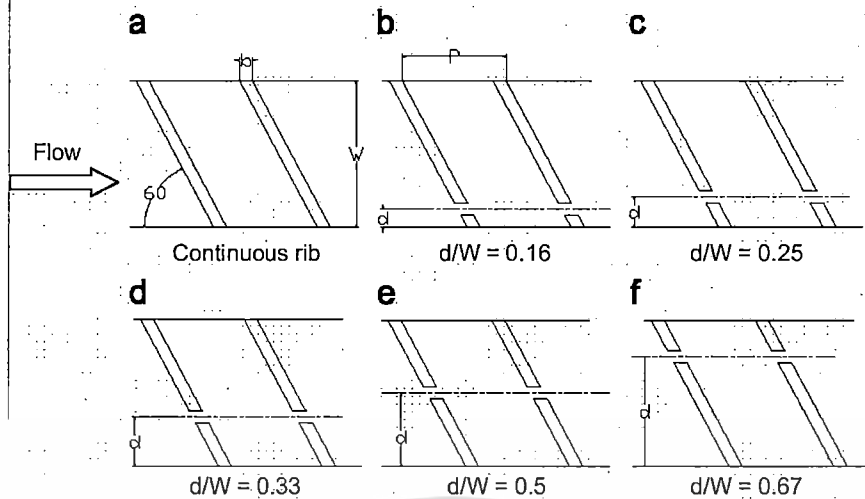
Amro et al. (2007) ศึกษาด้วยการทดลองของการไหลในช่องทางไหลหน้าตัดคล้ายสามเหลี่ยมที่มีปลายมน โดยจำลองการไหลที่ช่องหล่อเย็นด้านซ้ายหน้าของใบกังหันก๊าซ ซึ่งติดตั้งครีบริบต่อเนื่องทำมุมปะทะ 45° และ 60° กับทิศทางการไหล ครีบริบวางเรียงสลับกันที่ผนังด้านบนและด้านล่างของพื้นผิวให้ความร้อนโดยใช้ลวด คริสตอล สำหรับวัดค่าการถ่ายเทความร้อน ทำการศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 50,000 ถึง 200,000 จากผลการทดลองพบว่า ครีบริบที่ทำมุมปะทะ 60° ให้ค่าการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบความเสียหายที่สูงที่สุด โดยให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ที่สูงที่สุดมีค่าประมาณ 3 เท่าของท่อผิวเรียบ และครีบริบที่ทำมุมปะทะ 45° เหมาะสมที่สุดสำหรับนำไปใช้เพิ่มการถ่ายเทความร้อน ที่เลขเรย์โนลด์ 50,000 ให้ค่า TEF สูงที่สุดซึ่งมีค่าประมาณ 1.1 และมีแนวโน้มลดลงเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.8 รูปแบบการจัดวางครีบริบของ Karmare and Tikekar (2007)

Karmare and Tikekar (2007) ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบความเสียหายของแผ่นสี่เหลี่ยมในเครื่องอุณหอากาศด้วยแสงอาทิตย์ ที่มีครีบริบหน้าตัดวงกลมติดตั้งบนแผ่นให้ความร้อนดังแสดงในรูปที่ 2.8 โดยใช้เรอร์โมคัปเปิล วัดการกระจายของอุณหภูมิที่ผิวให้ความร้อน ศึกษาในช่วงค่าเลขเรย์โนลด์ $Re=4000-17,000$ ความสูงครีบริบต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (e/D) เท่ากับ 0.035-0.044 อัตราส่วนระยะห่างระหว่างครีบริบต่อความสูงครีบริบ (p/e) เท่ากับ 12.5-36 และค่า l/s อยู่ในช่วง 1-1.72 จากการทดลองสรุปพบว่า พารามิเตอร์ที่ศึกษาที่มีค่า $e/D=0.044$, $p/e=17.5$ และ $l/s=1.72$ ให้ค่าสมรรถนะดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้มีการใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าในรูปแบบใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 รูปแบบการจัดวางครีบบของ Aharwal et al. (2008)

Aharwal et al. (2008) ศึกษาด้วยการทดลองโดยใช้เรอร์โมคัปเปิลจำนวน 16 ตัว วัดการกระจายของอุณหภูมิที่ผิวให้ความร้อนหนึ่งด้านแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ ซึ่งมีครีบนำตัดสี่เหลี่ยมจัดเรียงตั้งอยู่ในช่องทางไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของช่อง (W/H) เท่ากับ 5.84 ค่า $p/e=10$ ค่า $e/D=0.0377$ ครีบบที่ใช้ศึกษาทำมุมปะทะ 60° กับทิศทางการไหล ซึ่งพวกเขาศึกษาอิทธิพลของความกว้างช่องเปิดครีบบสัมพันธ์ (g/e) และตำแหน่งของช่องเปิด (d/W) ในช่วง 0.25-2 และ 0.1667-0.667 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 3000-18,000 จากผลการทดลองสรุปได้ว่าค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์และตัวประกอบความเสียดทานอยู่ในช่วง 2.59 และ 2.87 เท่าของท่อผิวเรียบตามลำดับ และพบว่าค่า TEF มีค่าสูงที่สุดที่ $g/e=1.0$ และ $d/W=0.25$

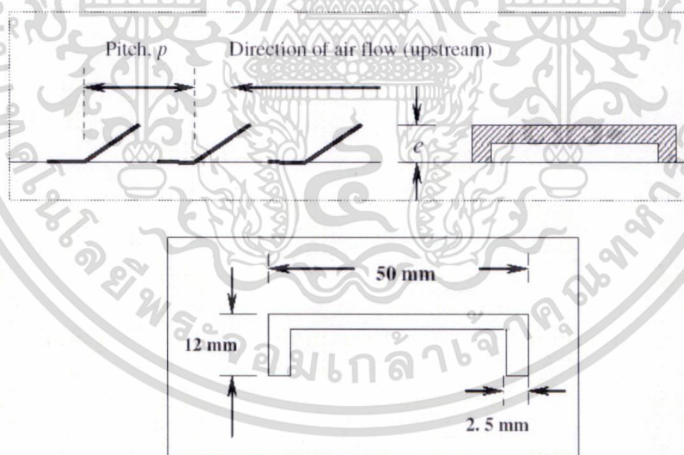
Varun et al. (2008) ศึกษาด้วยการทดลองโดยใช้เรอร์โมคัปเปิล จำนวน 15 ตัว วัดการกระจายของอุณหภูมิที่ผิวให้ความร้อนหนึ่งด้านแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ ของแผ่นในเครื่องให้ความร้อนสู่อากาศด้วยแสงอาทิตย์ ซึ่งมีครีบบเรียงเส้นซึ่งวางในลักษณะขนานกันไปและทำมุมปะทะ 60° ติดตั้งอยู่ในช่องทางไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า อัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของช่อง (W/H) เท่ากับ 10 ค่า p/e อยู่ในช่วง 3-8 ค่า $e/D=0.030$ ศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 2000-14,000 จากผลการทดลองสรุปได้ว่า $p/e=8$ ให้ค่า TEF สูงที่สุด

Promvongse and Thianpong (2008) ศึกษาด้วยการทดลองเกี่ยวกับอิทธิพลของการไหลผ่านครีบบที่มีหน้าตัดรูปทรงต่างๆ ที่วางตั้งฉากกับทิศทางการไหลในช่องทางไหลต่อการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทาน โดยครีบบที่ใช้ศึกษามีการจัดเรียงทั้งแบบตรงกันและแบบเยื้องกัน ซึ่งประกอบไปด้วยครีบบสามเหลี่ยมด้านเท่า ครีบบรูปสี่เหลี่ยมที่หันไปทางด้านท้ายการไหล และครีบบรูปสี่เหลี่ยม ซึ่งถูกติดตั้งบนผิวให้ความร้อนแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ที่ผนังด้านบนและด้านล่าง ช่องทางไหลมีอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของช่อง (W/H) เท่ากับ 15 ค่า $p/H=2$ และค่า $e/H=0.15$ ศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 4000-16,000 จากผลการทดลองสรุปได้ว่า ที่เงื่อนไขการไหลเดียวกันการจัดวางครีบบแบบตรงกัน ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบความเสียดทานสูงกว่าการจัดวางครีบบ

แบบเยื้องกัน และครีบริปูปลีที่หันไปทางด้านท้ายการไหลให้ค่าเลขนัสเซลท์และค่าตัวประกอบความเสียดทานสูงที่สุด ในขณะที่ครีบริปูสามเหลี่ยมวางเยื้องกันให้ค่า TEF สูงที่สุด

Aharwal et al. (2009) ศึกษาด้วยการทดลองต่อเนื่องจากงานเก่าโดยศึกษาให้ละเอียดยิ่งขึ้น สำหรับการไหลและการถ่ายเทความร้อนในช่องทางไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า อัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของช่อง (W/H) เท่ากับ 5.83 ค่า p/e อยู่ในช่วง 4-10 ค่า e/D อยู่ในช่วง 0.018-0.037 ครีบริปูที่ใช้ศึกษาทำมุมปะทะในช่วง $30^\circ-90^\circ$ กับทิศทางการไหลซึ่งพวกเขาศึกษาอิทธิพลของความกว้างช่องเปิดครีบริปูสัมพัทธ์ (g/e) และตำแหน่งของช่องเปิด (d/W) ในช่วง 0.5-2 และ 0.16-0.5 ตามลำดับ ศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 3000-18,000 จากผลการทดลองเพื่อวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ซึ่งพบว่าค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์และตัวประกอบความเสียดทานสูงสุดอยู่ในช่วง 2.83 และ 3.60 เท่าของท่อผิวเรียบตามลำดับ และพบว่าค่า TEF มีค่าสูงที่สุดที่ $g/e=1.0$, $d/W=0.25$ $p/e=8.0$ ที่มุมปะทะ 60° และ $e/D=0.037$

Bopche and Tandale (2009) ศึกษาการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทานของแผ่นสี่เหลี่ยมในเครื่องอุณหอากาศด้วยแสงอาทิตย์ ที่มีครีบริปูสร้างความปั่นป่วนติดตั้งบนแผ่นให้ความร้อนดังรูปที่ 2.12 โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลวัดการกระจายของอุณหภูมิที่ผิวให้ความร้อน ศึกษาในช่วงค่าเลขเรย์โนลด์ $Re=3000-18,000$ ความสูงครีบริปูต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (e/D) เท่ากับ 0.0186-0.03986 อัตราส่วนระยะพิชต์ต่อความสูงครีบริปู (p/e) เท่ากับ 6.67-57.14 และค่ามุมปะทะครีบริปูเท่ากับ 90° จากการทดลองพวกเขาสรุปว่า อัตราส่วนเลขนัสเซลท์และตัวประกอบความเสียดทานอยู่ในช่วง 2.82 และ 3.72 เท่าของท่อผิวเรียบตามลำดับ



รูปที่ 2.12 รูปครีบริปูที่ใช้วิเคราะห์ในงานของ Bopche and Tandale (2009)

Kumar et al. (2009) ทำการศึกษาด้วยการทดลองโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลจำนวน 17 ตัว วัดการกระจายของอุณหภูมิที่ผิวให้ความร้อนหนึ่งด้านแบบพลักซ์ความร้อนคงที่ของแผ่นให้ความร้อนสู่อากาศด้วยแสงอาทิตย์ ซึ่งมีครีบริปูตัว W ติดตั้งอยู่ในช่องทางไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า อัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของช่อง (W/H) เท่ากับ 8 ค่า $p/e=10$ ค่า e/D อยู่ในช่วง 0.0168-0.0338 ครีบริปูที่ใช้ศึกษาทำมุมปะทะในช่วง $30^\circ-75^\circ$ กับทิศทางการไหล ศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 3000-

15,000 จากผลการทดลองพวกเขาสรุปว่า ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์และตัวประกอบความเสียหายสูงสุดอยู่ในช่วง 2.16 และ 2.75 เท่าของท่อผิวเรียบตามลำดับ ซึ่งเกิดที่มุมปะทะ 60°

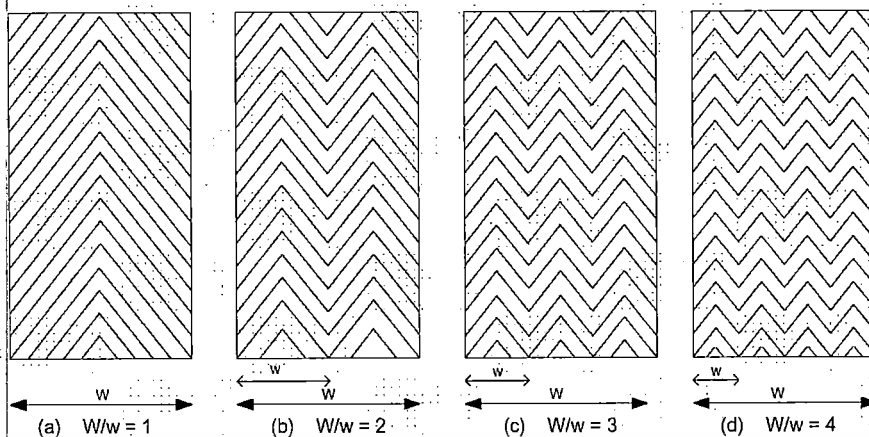
Eiamsa-ard and Promvong (2009) ได้ศึกษาเชิงทดลองของตัวสร้างความปั่นป่วนแบบ crib-ร่อง ยาวต่อเนื่องวางตั้งฉากกับทิศทางการไหล ซึ่งติดตั้งบนพื้นผิวให้ความร้อนในช่องทางไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า อัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของช่อง (W/H) เท่ากับ 10 ค่า p/e อยู่ในช่วง 6.6-13.3 ศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 3000-10,000 ซึ่ง crib-ร่อง ที่ใช้ศึกษามี 3 กรณีคือ cribสี่เหลี่ยม-ร่องสามเหลี่ยม cribสามเหลี่ยม-ร่องสี่เหลี่ยม และ cribสามเหลี่ยม-ร่องสามเหลี่ยม จากผลการทดลองพวกเขาสรุปว่า cribสามเหลี่ยม-ร่องสามเหลี่ยม ที่ค่า $p/e=6.6$ ให้ค่า TEF สูงที่สุดซึ่งที่เลขเรย์โนลด์ 3000 ให้ค่า TEF สูงที่สุดที่ค่าประมาณ 1.1

Thianpong et al. (2009) ศึกษาด้วยการทดลองเกี่ยวกับอิทธิพลของการไหลผ่าน cribรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า ที่วางตั้งฉากกับทิศทางการไหลในช่องทางไหลต่อการถ่ายเทความร้อนและความเสียหาย ซึ่งเป็นงานที่พัฒนามาจากงานของ Promvong and Thianpong (2008) โดย crib ที่ใช้ศึกษามีการจัดเรียงทั้งแบบตรงกันและแบบเอียงกัน และถูกติดตั้งบนผิวให้ความร้อนแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ ที่ผนังด้านบนและด้านล่าง ช่องทางไหลมีอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของช่อง (W/H) เท่ากับ 10 ค่า $p/H=1.33$ และค่า e/H อยู่ในช่วง 0.13-0.26 ศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 5000-22,000 จากผลการทดลองพวกเขาสรุปว่า cribที่ศึกษาให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์อยู่ในช่วง 1.8-4.0 เท่าของท่อผิวเรียบ แต่การจัดวาง cribแบบเอียงกันที่ค่า $e/H=0.13$ ให้ค่า TEF สูงที่สุด ซึ่งค่าสูงสุดของ TEF เกิดที่เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 5000 ซึ่งมีค่าประมาณ 1.34

Promvong et al. (2010c) ศึกษาด้วยการทดลองเกี่ยวกับอิทธิพลของการไหลผ่านปีกเล็ก (winglets) รูปสามเหลี่ยม 2 คู่ โดยทำมุมปะทะ 30° , 45° และ 60° เพื่อสร้างการไหลหมุนวนตามยาวผ่าน cribรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าที่วางตั้งฉากกับทิศทางการไหลในช่องทางไหล ต่อการถ่ายเทความร้อนและความเสียหายซึ่งเป็นงานที่พัฒนามาจากงานของ Thianpong et al. (2009) โดย crib ที่ใช้ศึกษามีการจัดเรียงทั้งแบบตรงกันและแบบเอียงกัน และถูกติดตั้งบนผิวให้ความร้อนแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ที่ผนังด้านบนและด้านล่าง ช่องทางไหลมีอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของช่อง (W/H) เท่ากับ 10 ค่า $p/H=1.33$ และค่า $e/H=0.13$ ศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 5000-22,000 จากผลการทดลองพวกเขาสรุปว่า อัตราส่วนตัวประกอบความเสียหายและเลขนัสเซลล์อยู่ในช่วง 2.2-5.5 และ 2.2-2.6 ตามลำดับ ซึ่งขึ้นอยู่กับมุมปะทะและเลขเรย์โนลด์ และการเรียง cribแบบสลับร่วมกับปีกเล็กที่มีมุมปะทะ 30° ให้ค่า TEF สูงที่สุด

Chompookham et al. (2010) ศึกษาด้วยการทดลองเกี่ยวกับอิทธิพลของการไหลผ่านปีกเล็ก (winglets) รูปสามเหลี่ยม 2 คู่ โดยทำมุมปะทะ 60° เพื่อสร้างการไหลหมุนวนตามยาวผ่าน cribรูปสี่เหลี่ยมที่ชี้ไปทางท้ายการไหลและสวนทางการไหล วางตั้งฉากกับทิศทางการไหลในช่องทางไหลที่ผนังด้านบนและด้านล่าง จัดเรียงทั้งแบบตรงกันและแบบเอียงกัน ต่อการถ่ายเทความร้อนและความเสียหายซึ่งคล้ายกับงานของ Promvong et al. (2010) โดย crib ที่ใช้ศึกษามีการจัดเรียงทั้งแบบตรงกันและแบบเอียงกัน และถูกติดตั้งบนผิวให้ความร้อนแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ที่ผนังด้านบนและด้านล่าง ช่องทางไหลมีอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของช่อง (W/H) เท่ากับ 10 ค่า $p/H=1.33$ และค่า $e/H=0.2$ ศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 5000-22,000 จากผลการทดลองพวกเขาสรุปว่า ลิมซึ่งชี้ไปทางด้านท้ายการไหลและวางแบบตรงกัน ให้ค่าเลขนัสเซลล์และตัวประกอบความเสียหายสูงสุด ในขณะที่ลิมซึ่งชี้ไปทางด้านท้ายการไหลและวางแบบเอียงกันให้ค่า TEF ดีที่สุด

ไม่มีกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 รูปครีบบนที่ผิวครีบบนในงานของ Hans et al. (2010)

Hans et al. (2010) ศึกษาด้วยการทดลองการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานในเครื่องอุ่นอากาศด้วยแสงอาทิตย์ ซึ่งมีครีบบนตัววีติดตั้งบนแผ่นดูดซับความร้อน ค่าพารามิเตอร์ที่ศึกษาคือ ช่องทางไหลมีอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของช่อง (W/H) เท่ากับ 8 ค่า $p/e=6-12$ และค่า $e/D=0.019-0.043$ มุมปะทะอยู่ในช่วง $30^\circ-75^\circ$ ศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 2000-20,000 โดยครีบบนที่ใช้ศึกษามีค่า W/w ในช่วง 1-10 ดังรูปที่ 2.13 จากผลการทดลองสรุปได้ว่าค่าการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดเกิดขึ้นที่ $W/w=6$ ค่าตัวประกอบความเสียดทานสูงที่สุดเกิดขึ้นที่ $W/w=10$ และมุมปะทะครีบบนที่ให้ค่าเลขนัสเซลท์และตัวประกอบความเสียดทานสูงที่สุดคือ 60° และที่ $p/e=8$.

Tanda (2011) ได้ตรวจสอบด้วยการทดลองผลของการถ่ายเทความร้อนในช่องทางไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีอัตราส่วนด้านยาวต่อด้านกว้างเท่ากับ 5. ซึ่งมีการติดตั้งครีบบนเอียงยาวต่อเนื่องทำมุมปะทะ 45° ศึกษาทั้งกรณีติดตั้งบนพื้นผิวด้านล่าง และติดตั้งบนพื้นผิวด้านบนและด้านล่าง ให้ความร้อนแบบพลักซ์ความร้อนคงที่ โดยมีการปรับเปลี่ยนค่า p/e ในช่วง 6.66-20 เพื่อหาค่าที่เหมาะสม ค่า $e/D=0.09$ ทำการศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 9000 ถึง 35,500 วัดค่าการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้ลิควิด คริสตอล ซึ่งเป็นการแสดงค่าด้วยแผนภาพการกระจายค่าเลขนัสเซลท์บนพื้นผิวให้ความร้อนที่ค่อนข้างละเอียด เขาสรุปว่าการติดตั้งครีบบนฝั่งให้ความร้อนเพียงด้านเดียวที่ค่า $p/e=13.33$ ให้ค่า TEF กว่าติดตั้งครีบบนทั้งสองด้าน ซึ่งให้ค่า TEF อยู่ในช่วง 1.25-1.45 และสำหรับกรณีการติดตั้งครีบบนทั้งสองด้านค่า $p/e=10$ ให้ค่า TEF สูงสุดซึ่งอยู่ในช่วง 1.02-1.20

Lanjewar et al. (2011a) ศึกษาด้วยการทดลองการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและค่าของความเสียดทานในเครื่องอุ่นอากาศด้วยแสงอาทิตย์ ซึ่งมีครีบบน W ติดตั้งบนแผ่นดูดซับความร้อน ซึ่งศึกษาทั้งกรณีครีบบน W หันตามการไหลและสวนทางการไหล ค่าพารามิเตอร์ที่ศึกษาคือช่องทางไหลมีอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของช่อง (W/H) เท่ากับ 8 ค่า $p/e=10$ และค่า $e/D=0.03375$ มุมปะทะอยู่ในช่วง $30^\circ-75^\circ$ ศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 2300-14,000 จากผลการทดลองสรุปได้ว่าครีบบน W ที่ไปหันตามการไหลและมีมุมปะทะ 60° ให้ค่า TEF ดีที่สุด ซึ่งที่เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 6000 มีค่า $TEF=1.98$.

Lanjewar et al. (2011b) ศึกษาด้วยการทดลองการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานในเครื่องอุ่นอากาศด้วยแสงอาทิตย์ ซึ่งมีครีบบน W ติดตั้งบนแผ่นดูดซับความร้อน ซึ่งศึกษากรณีครีบบน W หันตามการไหล ค่าพารามิเตอร์ที่ศึกษาคือช่องทางไหลมีอัตราส่วนความกว้าง W/H เท่ากับ 8 ค่า $p/e=10$ และค่า $e/D=0.03375$ มุมปะทะอยู่ในช่วง $30^\circ-75^\circ$ ศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 2300-14,000 จากผลการทดลองสรุปได้ว่าครีบบน W ที่ไปหันตามการไหลและมีมุมปะทะ 60° ให้ค่า TEF ดีที่สุด ซึ่งที่เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 6000 มีค่า $TEF=1.98$.

ต่อความสูงของช่อง(W/H) เท่ากับ 8 ค่า $p/e=10$ และค่า $e/D=0.018-0.03375$ มุมปะทะอยู่ในช่วง $30^\circ-75^\circ$ ศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 2300-14,000 จากผลการทดลองสรุปได้ว่าครีบริบ W มีมุมปะทะ 60° ให้ค่า TEF ดีที่สุด และมีค่าสูงสุดของอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์และตัวประกอบความเสียดทาน เท่ากับ 2.36 และ 2.01 เท่าของท่อผิวเรียบตามลำดับ

2.3.1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณเชิงตัวเลข

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

Ooi et al. (2002) ได้ศึกษาด้วยการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของสนามการไหลและการถ่ายเทความร้อนในช่องทางไหล 2 มิติ โดยเปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองความปั่นป่วน 2-layer $k-\epsilon$, S-A และ v^2-f ซึ่งพวกเขาได้สรุปว่าแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ $k-\epsilon$ ได้ค่าการถ่ายเทความร้อนไม่สอดคล้องกับค่าที่ได้จากการทดลอง ในขณะที่ S-A ให้ค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่า และแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ v^2-f ให้ค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด แต่มีจุดอ่อนคือ ให้ค่าเลขนัสเซลล์ท์ที่ไม่สอดคล้องกับค่าที่ได้จากการทดลอง ที่บริเวณใกล้ๆ ครีบริบซึ่งมีการไหลชั้นที่สองเกิดขึ้น

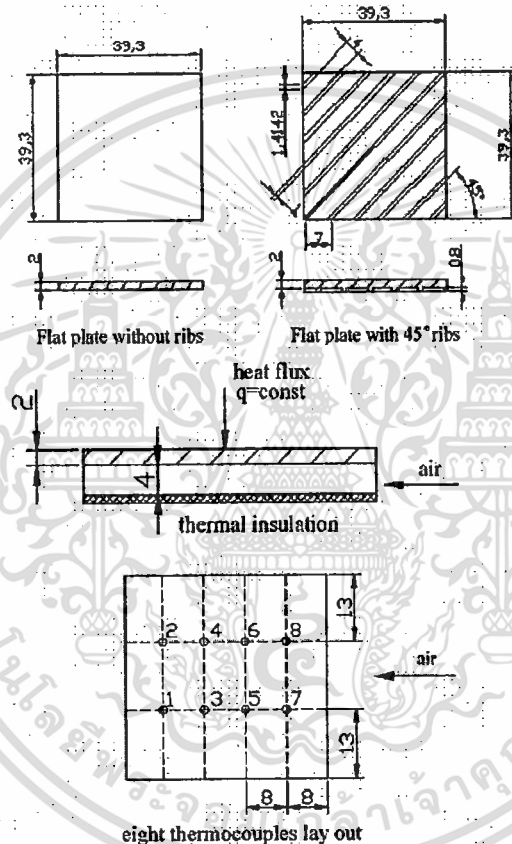
Wong et al. (2003) ได้ศึกษาด้วยการทดลองโดยใช้เรอร์โมคัปเปิล วัดการกระจายของอุณหภูมิที่ผิวเทียบกับค่าการวิเคราะห์เชิงตัวเลข โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ zonal $k-\epsilon$ ของการถ่ายเทความร้อนในช่องทางไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่ติดตั้งครีบริบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสยาวต่อเนื่องวางไขว้กันและทำมุมปะทะต่างๆ กับทิศทางการไหล บนผนังด้านล่างซึ่งให้ความร้อนแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ โดย $e/D=0.127$ วิเคราะห์ที่เลขเรย์โนลด์ 12,380 พวกเขาสรุปว่าผลการทดลองและการคำนวณเชิงตัวเลขสอดคล้องกันดี โดยที่มุมปะทะครีบริบที่เหมาะสมที่สุดอยู่ในช่วง 60° ถึง 70°

Iacovides et al. (2003) พวกเขาได้ศึกษาทั้งการทดลองและการคำนวณเชิงตัวเลข ของการไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อตรง ที่มีครีบริบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสวางเอียงทำมุมปะทะ 45° กับทิศทางการไหล ซึ่งวางแบบเอียงกันบนพื้นผิวให้ความร้อนแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ ทั้งผนังด้านบนและด้านล่าง ซึ่งวัดการเคลื่อนที่ของของไหลและการถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีการใช้ LDA และลิควิดคริสตอล ตามลำดับ และใช้แบบจำลองการไหลปั่นป่วน 2-layer $k-\epsilon$ พวกเขาสรุปว่าค่าความเร็วในสนามการไหลที่ได้จากเครื่องมือวัดและจากการคำนวณเชิงตัวเลขมีความสอดคล้องกัน แต่ค่าการถ่ายเทความร้อนที่ผนังนั้นค่าที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลข สูงกว่าอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองโดยเฉพาะในบริเวณด้านที่เล็กลงกลางระหว่างครีบริบ

Yang and Hwang (2004) ได้ตรวจสอบด้วยการคำนวณเชิงตัวเลขของลักษณะการถ่ายเทความร้อนในท่อหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีครีบริบยาวต่อเนื่องและครีบริบบแยกตัวติดตั้งบนผนังให้ความร้อนเพียงหนึ่งด้าน และพวกเขาได้สรุปว่าครีบริบบแยกตัวให้ลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่าครีบริบบต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่มีกรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Chaube et al. (2006) ได้ศึกษาด้วยการคำนวณเชิงตัวเลขโดยใช้โปรแกรม FLUENT 6.1 และเปรียบเทียบผลที่ได้กับการทดลองของ Tanda (2004) ที่มีการไหลผ่านแถวครีบริบเรียงตัวตามขวาง มีค่า $pe=13.3$, $p/H=2$ ที่ $Re=8900$ โดยเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ SST $k-\omega$ ซึ่งเหมาะสมกว่าแบบจำลองการไหลแบบอื่นๆ พวกเขาสรุปว่า การวิเคราะห์ด้วยการไหลแบบ 2 มิติ เข้ากันได้ดีกับผลของการทดลองเนื่องจากสามารถละทิ้งผลของการไหลชั้นที่สองได้ และในบริเวณระหว่างครีบริบ ค่าสูงสุดของการถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่และความเข้มของความปั่นป่วนเกิดขึ้นที่จุดตกกระทบบ และค่าการถ่ายเทความร้อนเริ่มเกิดซ้ำเป็นช่วงทางความร้อนระหว่างครีบริบตัวที่ 3 และ 4 ซึ่งสอดคล้องกับผลของการทดลอง



รูปที่ 2.15 รูปครีบริบที่ใช้ในงานของ Lu and Jiang (2006)

Lu and Jiang (2006) ศึกษาเปรียบเทียบผลการคำนวณเชิงตัวเลขกับการทดลอง ของการไหลและการถ่ายเทความร้อนในช่องทางไหล: 40 mm x 40 mm x 4 mm โดยมีครีบริบจัตุรัสหน้าตัด 1 mm x 1 mm ยาวต่อเนื่องวางเอียงทำมุมปะทะ 45° บนพื้นผิวให้ความร้อนแบบปลั๊กความร้อนคงที่บนผนังด้านล่าง ซึ่งในส่วนของการทดลองนั้นทำการวัดอุณหภูมิบนพื้นผิวให้ความร้อนโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล โดยมีจุดวัด 8 ตำแหน่ง ดังแสดงรายละเอียดของครีบริบและจุดวัดอุณหภูมิดังรูปที่ 2.15 และใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ SST $k-\omega$ และ RNG $k-\epsilon$ สำหรับการทำนายผลเชิงตัวเลข พวกเขาพบว่าแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ SST $k-\omega$ มีความสอดคล้องกันดีกับผลการทดลองมากกว่าแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG $k-\epsilon$ และนอกจากนี้พวกเขายังได้วิเคราะห์ด้วยการ

คำนวณเชิงตัวเลขของการไหลผ่านครีบที่ยาวต่อเนื่องโดยศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงมุมปะทะและระยะห่างระหว่างครีบ ซึ่งพวกเขาได้สรุปว่าครีบที่ทำมุมปะทะ 60° ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดในขณะที่ครีบซึ่งทำมุมปะทะ 0° ให้ค่าความเสียดทานต่ำที่สุด และครีบที่ทำมุมปะทะ 20° ให้ค่า TEF สูงที่สุดที่ระยะห่างระหว่างครีบ 1-2 mm โดยที่เลขเรย์โนลด์ 5500 มีค่า TEF สูงที่สุดเท่ากับ 1.55

Ryu et al. (2007) ศึกษาด้วยการคำนวณเชิงตัวเลข โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ $k-\omega$ มีสิ่งที่น่าสนใจคือ สำหรับการวิเคราะห์การไหล 2 มิติ ในเบื้องต้นพวกเขาได้เปรียบเทียบผลการคำนวณเชิงตัวเลขกับค่าที่ได้จากการทดลองจากเอกสารที่พวกเขาใช้อ้างอิง ซึ่งพบว่าสอดคล้องกันดีทั้งสนามการไหลและการถ่ายเทความร้อน และนอกจากนี้พวกเขาได้ศึกษาผลของการไหลและการถ่ายเทความร้อนสำหรับการไหลผ่านครีบที่วางบนผนังด้านล่าง 4 รูปแบบคือ ครีบสี่เหลี่ยมจัตุรัส ครีบสามเหลี่ยมหน้าจั่ว ครีบรูปครึ่งวงกลม และครีบรูปไซน์ โดยมีความสูงครีบ 20% ของความสูงช่องทางไหล และเปลี่ยนค่า ple หลายค่า ซึ่งพบว่าที่ค่า $ple=10$ ครีบสี่เหลี่ยมจัตุรัสให้ค่าเลขนัสเซลล์ต์และตัวประกอบความเสียดทานสูงที่สุด

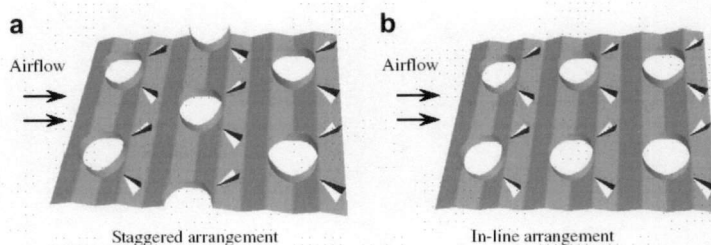
Kamali and Bineshi (2008) ศึกษาการไหลและการถ่ายเทความร้อนโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ SST $k-\omega$ วิเคราะห์การไหลในท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ซึ่งมีครีบยาวต่อเนื่องวางตั้งฉากกับทิศทางการไหลและมีหน้าตัด 4 รูปทรงคือ สี่เหลี่ยม สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยมคางหมูที่มีด้านสั้นหันไปทางการไหลและตรงข้ามกับทิศทางการไหล ซึ่งติดตั้งบนพื้นผิวให้ความร้อนเพียงหนึ่งด้าน ศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 8000-20,000 จากผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขพวกเขาสังเกตได้ว่าการเปรียบเทียบอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ต์ที่เกิดจาก ครีบสี่เหลี่ยมคางหมูที่มีด้านสั้นหันไปทางการไหล กับผลการทดลองจากเอกสารที่พวกเขาใช้อ้างอิงนั้นสอดคล้องกันดี ซึ่งกริดเซลล์ที่ไม่มีลักษณะเป็นรูปทรงสามเหลี่ยม และครีบรูปทรงดังกล่าวให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ต์และค่าตัวประกอบความเสียดทานสูงกว่าครีบรูปทรงอื่น

Stipattanapipat and Promvong (2009) แสดงการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนที่มีการไหลแบบราบเรียบ 2 มิติ ในช่องขนานที่ติดแผ่นกั้นรูปเพชรที่ผนังด้านบนและด้านล่างในแนวเอียง มีลักษณะการไหลแบบซ้ำเป็นช่วงโดยใช้เงื่อนไขขอบเขตที่ผนังคงที่ ในช่วงเลขเรย์โนลด์ 100-600 พบว่าเมื่อลดมุมที่ยอดรูปเพชรจะทำให้ค่าเลขนัสเซลล์ต์และตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้น และยังพบว่าทุกค่าเลขเรย์โนลด์ที่ใช้มุมยอดเพชรที่ 5° และ 10° ให้ค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนสูงกว่ามุมยอดเพชรที่ 0° (แผ่นกั้นแบน)

Tian et al. (2009) ศึกษาด้วยการคำนวณเชิงตัวเลขของการไหลและการถ่ายเทความร้อนของการไหลผ่านครีบแบบปีกเก็กรูปสามเหลี่ยมที่ติดตั้งบนพื้นผิวแบบลอนคลื่น ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบ-ท่อ ครีบที่ใช้มีการเรียงของครีบเป็น 3 แถว โดยศึกษาทั้งการเรียงครีบแบบวางตรงกันและเรียงแบบสลับซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.16 โดยจำลองการไหลแบบปั่นป่วน 3 มิติและใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG $k-\epsilon$ โดยในเบื้องต้นเขาได้เปรียบเทียบแบบจำลองการไหล 3 แบบจำลองซึ่งได้แก่ แบบจำลองการไหลแบบราบเรียบ แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ $k-\epsilon$ มาตรฐาน และแบบ RNG $k-\epsilon$ วิเคราะห์การไหลในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบ-ท่อ ที่มีพื้นผิวเป็นลอนคลื่นโดยเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Xin (1994) ซึ่งพวกเขาพบว่าแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG $k-\epsilon$ ให้ผลการทำนายดีที่สุด และจากผลการคำนวณได้แสดงให้เห็นถึงกระแสหลักซึ่งเป็นกระแสตามยาว และกระแสวนที่มุม (corner vortex) ที่เกิดจากการไหลผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ทำกำไรใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีกเล็ก นอกจากนี้การจัดวางปีกเล็กแบบตรงกันให้ค่าการเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน เฉพาะที่สูงกว่าการวางแบบเอียง



รูปที่ 2.16 รูปแบบครีบบนปีกเล็ก ในงานของ Tian et al. (2009)

Kumar and Saini (2009) ศึกษาด้วยการคำนวณเชิงตัวเลขของการไหลและการถ่ายเทความร้อน ของการไหลผ่านครีบบนเส้นลวดโค้งที่วางบนแผ่นให้ความร้อนของเครื่องอุ่นอากาศด้วยแสงอาทิตย์ โดยวิเคราะห์ราคาคณิตของครีบต่อการถ่ายเทความร้อน 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 โดยเปรียบเทียบแบบจำลองความปั่นป่วนหลายแบบจำลองกับค่าเลขนัสเซลล์ท์ของท่อผิวเรียบ จากสมการสหพันธ์ของ Dittus-Boelter ซึ่งพบว่าแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG $k-\epsilon$ ให้ค่าได้ใกล้เคียงมากที่สุด และจากการคำนวณเชิงตัวเลขพวกเขาสรุปว่า ค่า TEF สูงที่สุดได้เท่ากับ 1.7 สำหรับช่วงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการตรวจสอบ

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

2.3.2 ครีบริปูตัววี

2.3.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง

Han et al. (1991) พวกเขาได้ศึกษาความดันตกคร่อมและการถ่ายเทความร้อนในช่องทางไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ที่มีการติดตั้งครีบลากหลายรูปแบบทั้งผนังด้านบนและด้านล่างของพื้นผิวให้ความร้อน ที่มีค่า $p/e=10$ และอัตราส่วนความสูงครีบบต่อความยาวบ่งลักษณะของท่อ (e/D) เท่ากับ 0.0625 โดยทำการศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 15,000 ถึง 90,000 ซึ่งพบว่าครีบริปูตัววี ที่มีมุมปะทะ 45° และ 60° กับทิศทางการไหล ให้การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าครีบริปูตัววีอื่น และดีกว่าทิศทางการไหล

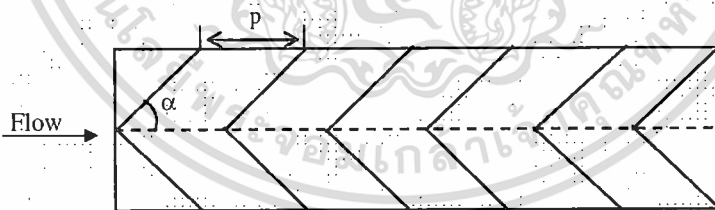
Lau et al. (1991) ตรวจสอบลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่มีการไหลปั่นป่วนในช่องทางไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดตั้งครีบริปูตัววีลากหลายรูปแบบ และได้แสดงว่าครีบริปูตัววี ที่มีมุมปะทะ 60° กับทิศทางการไหลและมีค่า $p/e=10$ ให้ค่าสมรรถนะทางความร้อนสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Taslim et al. (1996) ศึกษาพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนจากชุดท่อทดลองจริง โดยใช้ลิควิด คริสตอล เพื่อวิเคราะห์ค่าเลขนีสเซลที่ในแต่ละจุดในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการเพิ่มครีบริบตัววีและครีบบางไม่ต่อเนื่อง ที่มีการติดตั้งที่ผนังทั้งสองด้านที่ตรงข้ามกัน ค่าการกระจายตัวของเลขนีสเซลที่ค่าเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 15,500 ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นเนื่องจากการเกิดการไหลชั้นที่สอง(secondary flow) ขณะที่ช่องไหลกระทบกับผนังให้ความร้อน และค่าการถ่ายเทความร้อนลดลงเมื่อเกิดการสลายของการไหลชั้นที่สองที่ผนังของท่อ

Osson and Sunden (1998) ทำการศึกษารูปแบบการไหล ความดันตกคร่อม และการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมที่มีครีบริบ ค่าเลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 500-15,000 ค่าอัตราส่วนบ่งลักษณะของท่อสี่เหลี่ยม คือ 1:8 และครีบริบถูกติดตั้งกับผิวท่อที่อยู่ตรงข้ามกัน พวกเขาทดสอบครีบบางต่างๆ ซึ่งวางบนผิวท่อที่อยู่ตรงข้ามกันดังนี้คือ ครีบริบเอียงวางสลับกัน ครีบริบเอียงวางขนานกัน ครีบริบตัววีวางสลับกัน ครีบริบตัววีวางขนานกัน และครีบริบตัววีแบบต่อสลับทิศทางกัน การถ่ายเทความร้อนและความดันตกคร่อม ถูกแสดงด้วยตัวประกอบของการถ่ายเทความร้อนโคลเบิร์น (Colburn) และตัวประกอบความเสียดทานแพนนิ่ง(fanning) จากการทดลองพบว่าครีบริบตัววีวางสลับกันให้ค่าตัวประกอบของการถ่ายเทความร้อนโคลเบิร์น และค่าตัวประกอบความเสียดทานแพนนิ่งมากกว่าครีบริบอื่นๆ ในช่วงเลขเรย์โนลด์ 1000-2000

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



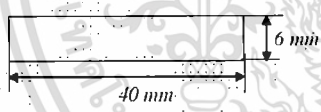
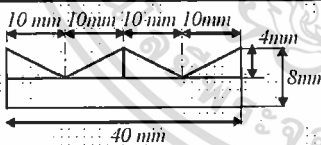
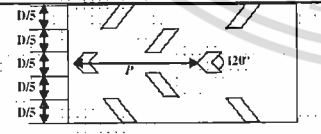
รูปที่ 2.4 ครีบริบตัววีที่ใช้ในงานของ Momin et al. (2002)

Buchlin (2002) ศึกษาด้วยการทดลองการพาความร้อนโดยเน้นศึกษาไปที่ครีบบางเจาะรูเป็นรูปตัววีซึ่งวางบนพื้นผิวให้ความร้อนแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ และใช้ลิควิด คริสตอล (thermochromic liquid crystals) กับพื้นผิวทดสอบโดยเปรียบเทียบค่าการถ่ายเทความร้อนกับครีบริบต่อเนื่องที่วางตั้งฉากกับทิศทางไหล ในช่วงเลขเรย์โนลด์ 30,000 ถึง 60,000 เขาพบว่าครีบบางเจาะรูไม่เกิดจุดร้อน(hot spot) ที่บริเวณด้านหลังครีบริบ ส่งผลให้มีค่าตัวประกอบของการเพิ่มทางความร้อนเฉพาะที่มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 3 และเกิดการไหลพัฒนาอย่างสมบูรณ์(fully developed flow) หลังจากครีบริบตัวที่ 5 ถึง 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่มีการตีพิมพ์ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Tanda (2004) ได้ตรวจสอบด้วยการทดลองผลของการถ่ายเทความร้อน ในช่องทางไหล หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีอัตราส่วนด้านยาวต่อด้านกว้างเท่ากับ 5 ซึ่งมีการติดตั้งครีบบนผนังที่มีลักษณะการวางที่แตกต่างกันคือ ครีบต่อเนื่องและครีบแบบแยกตัวที่วางตั้งฉากกับทิศทางการไหล ครีบรูปตัววีแบบแยกตัวที่ทำมุมปะทะ 45° และ 60° บนพื้นผิวด้านล่างและให้ความร้อนแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ โดยมีค่า $p/e=8$ และ 13 ทำการศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 8900 ถึง 36,000 วัดค่าการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้ลิควิด คริสตอล ซึ่งเป็นการแสดงค่าด้วยแผนภาพการกระจายเลขนัสเซลท์บนพื้นผิวให้ความร้อนที่ค่อนข้างละเอียด เขาสรุปว่าการกระจายตัวของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างครีบ สัมพันธ์กันอย่างมากกับรูปร่าง และเรขาคณิตของครีบ ค่าสูงสุดสัมพัทธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนอยู่ที่ด้านท้ายกระแสน้ำของแต่ละครีบ ในบริเวณการไหลตกกลับสู่พื้นผิว โดยภาพรวมแล้วรูปแบบครีบที่ใช้ศึกษาให้ค่าสมรรถนะทางความร้อน (TEF) อยู่ในช่วง 1.0 ถึง 1.6 และครีบรูปตัววีแบบแยกตัวให้ค่าสมรรถนะทางความร้อนสูงกว่าครีบแบบต่อเนื่อง

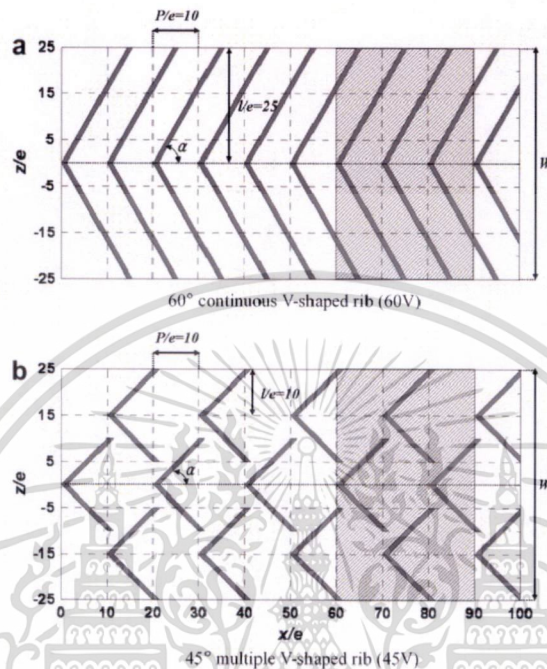
Wang et al. (2007) ทำการทดลองเพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนและความดันตกคร่อมของการไหลในช่องทางไหลหน้าตัดแคบขนาด $40 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$ และยาว 940 mm ซึ่งมีตัวสร้างการไหลหมุนวนตามยาวมีลักษณะเป็นครีบขนาด $10 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 1.1 \text{ mm}$ วางเป็นรูปตัววีแบบแยกตัวและทำมุมปะทะ 50° กับทิศทางการไหล ซึ่งศึกษาอิทธิพลของการจัดวางครีบบนผนังให้ ความร้อนเพียงด้านเดียว และ 2 ด้าน ศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 3000 ถึง 20,000 จากการทดลอง พวกเขาสรุปว่าการวางครีบบนผนังให้ความร้อนทั้ง 2 ด้าน ให้ค่าสมรรถนะของการถ่ายเทความร้อน สูงกว่าการจัดวางครีบเพียงด้านเดียว

| 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 2.10 รูปร่างและลักษณะการจัดเรียงครีบที่ใช้ในงานของ Gupta et al. (2008)

Gupta et al. (2008) ได้ศึกษาเชิงทดลองของการวัดการกระจายค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉพาะที่ ที่มีการไหลในช่องทางไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสซึ่งติดตั้งครีบที่ทำจากแผ่นกระจกทนความร้อน (Plexiglas) หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสติดตั้งที่ผนังด้านบนและด้านล่าง มีการให้ความร้อนแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ ซึ่งจำลองเป็นช่องหล่อเย็นของใบกังหันก๊าซ ศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 10,000-30,000 ลักษณะครีบที่ใช้ศึกษาประกอบด้วย ครีบยาวต่อเนื่องและรูปพื้นเหลี่ยมทำมุมปะทะ 90° กับทิศทางการไหล และครีบรูปตัววีแบบแยกตัวทำมุมปะทะ 60° กับทิศทางการไหล ซึ่งมี

รายละเอียดของพารามิเตอร์ที่ใช้ศึกษาแสดงดังรูปที่ 2.10 โดยใช้วิธีการถ่ายภาพรังสีอินฟราเรด (infrared thermography technique) วัดค่าการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวให้ความร้อนและแสดงในรูปแบบเส้นชั้น(contour plots) ซึ่งให้ค่าที่ค่อนข้างละเอียด จากผลการทดลองพวกเขาสรุปว่าการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนจากครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัวให้ค่าสูงกว่าครีบริบยาวต่อเนื่องและรูปพื้นเลื่อย



รูปที่ 2.11 รูปแบบครีบริบภายในท่อสี่เหลี่ยมของ Lee and Rhee (2009)

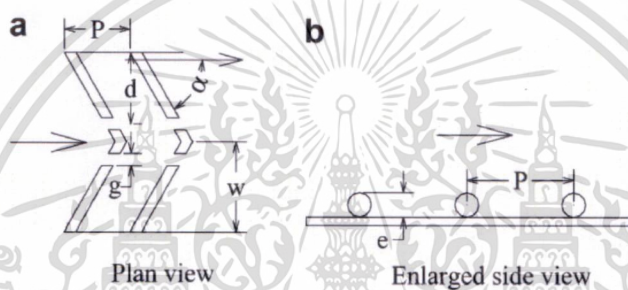
Lee and Rhee (2009) ศึกษาด้วยการทดลองเกี่ยวกับรูปแบบการไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมที่มีครีบริบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสรูปตัววีติดตั้งที่ผิวทำมุมปะทะ 60° แบบครีบริบเดี่ยวต่อเนื่อง และครีบริบรูปตัววีทำมุม 45° หลายครีบริบวางสลับแถว รูปแบบครีบริบแสดงในรูปที่ 2.11 โดยเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก(D) เท่ากับ 75, 50, 38.4 ค่าอัตราส่วนบ่งลักษณะของช่องทางไหล เท่ากับ 3, 5, 6.8 ค่า e/D เท่ากับ 0.04, 0.06, 0.078 และค่า $p/e=10$ โดยใช้เนฟธาซีนบริสุทธ์ (naphthalene sublimation) สำหรับวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและแสดงในรูปแบบของเส้นชั้น ผลการทดลองพบว่าครีบริบรูปตัววีทำมุม 60° แบบครีบริบเดี่ยวต่อเนื่องให้การถ่ายเทความร้อนมากกว่าครีบริบรูปตัววีทำมุม 45° แบบหลายครีบริบวางสลับแถว และการใช้กำลังงานของปั๊มสำหรับการไหลผ่านครีบริบรูปตัววีมุม 45° แบบหลายครีบริบวางสลับแถวจะใช้น้อยกว่าครีบริบรูปตัววีมุม 60° แบบครีบริบเดี่ยวต่อเนื่อง

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

เอกรสารนี้เป็นเอกรสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกรสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าสูงกว่าครีบบยาวต่อเนื่อง ในขณะที่ครีบบรูปตัววีแบบแยกตัวและมีการยกตัว ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนซึ่งสังเกตได้ว่าไม่แตกต่างกันกับกรณีไม่ยกตัว

Singh et al. (2011) ศึกษาด้วยการทดลองการถ่ายเทความร้อนที่ผิวให้ความร้อนหนึ่งด้านแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ ซึ่งมีครีบบหน้าตัดวงกลมติดตั้งอยู่ในช่องทางไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีการจัดเรียงดังแสดงในรูปที่ 2.14 ค่า p/e อยู่ในช่วง 4-12 ค่า e/D อยู่ในช่วง 0.015-0.043 ครีบบที่ใช้ศึกษาทำมุมปะทะ(α) 30° - 75° กับทิศทางการไหลซึ่งพวกเขาศึกษาอิทธิพลของความกว้างช่องเปิดครีบบสัมผัส(g/e) และตำแหน่งของช่องเปิด(d/w) ในช่วง 0.5-2 และ 0.2-0.8 ตามลำดับ ศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 3000-18,000 จากผลการทดลองสรุปได้ว่าค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์และตัวประกอบความเสียหายอยู่ในช่วง 3.04 และ 3.11 เท่าของท่อผิวเรียบตามลำดับ และค่าพารามิเตอร์ที่ให้ค่าตัวเลขนัสเซลท์และตัวประกอบความเสียหายที่สูงที่สุดคือ $d/w=0.65$, $g/e=1.0$, $p/e=8$, $\alpha=60^\circ$, และ $e/D=0.043$



รูปที่ 2.14 รูปครีบบที่ใช้ในการวิเคราะห์ในงานของ Singh et al. (2011)

2.3.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณเชิงตัวเลข

Kim and Lee (2007) ได้นำเสนอด้วยผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการไหลแบบปั่นป่วนและการถ่ายเทความร้อนเพื่อวิเคราะห์ค่าที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการออกแบบช่องทางไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ที่มีการติดตั้งครีบบรูปตัววีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ผนังด้านบนและด้านล่าง

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ว่ามีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาเกี่ยวข้องกับการไหล และการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ของการไหลผ่านครีบซึ่งมีการจัดวางในรูปแบบต่างๆ โดยให้ความสนใจกับลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากอิทธิพลของความสูงครีบ มุมปะทะ และอัตราส่วนระยะห่างระหว่างครีบ ซึ่งมีทั้งกรณีครีบยาวต่อเนื่องและตั้งฉากกับทิศทางการไหล ครีบยาวต่อเนื่องวางเอียง ครีบรูปตัววี ทั้งแบบยาวต่อเนื่องและแบบแยกตัว ซึ่งมีทั้งในส่วนของ การทดลองและการวิเคราะห์เชิงตัวเลข โดยภาพรวมนั้นสังเกตพบว่าครีบรูปตัววีทั้งแบบต่อเนื่องและแบบแยกตัว ที่ทำมุมปะทะค่าต่างๆ กับทิศทางการไหลและติดตั้งบนพื้นผิวให้ความร้อนนั้น ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบของการเพิ่มทางความร้อนสูงกว่าครีบรูปแบบอื่น และนอกจากนี้ในส่วนของ การวิเคราะห์เชิงตัวเลขที่มีการไหลแบบปั่นป่วนนั้น แบบจำลองความปั่นป่วนที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์การไหลและการถ่ายเทความร้อน มี 2 แบบจำลองที่เป็นที่นิยมกันในปัจจุบันคือ RNG $k-\epsilon$ และ SST $k-\omega$

แต่สำหรับการศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน และการไหลปั่นป่วนผ่านครีบบางรูปตัววีแบบแยกตัว ซึ่งติดตั้งที่ผนังด้านบนและด้านล่างของพื้นผิวให้ความร้อนแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ ในช่องทางไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ของกรณีการไหลแบบชั่วเป็นช่วงของความเร็วมืดและการถ่ายเทความร้อน ซึ่งเกิดขึ้นในบริเวณการไหลที่พัฒนาอย่างสมบูรณ์ ยังพบว่ามีงานศึกษาน้อยมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งกับการใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นที่การนำครีบบางรูปตัววีมาช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในช่องทางไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วนที่เหมาะสม เพื่อทำความเข้าใจถึงกลไกการไหลจากสนามการไหลที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อน และความดันตกคร่อม ซึ่งได้รับอิทธิพลจากตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ศึกษา ได้แก่ รูปทรงของครีบ ความสูงครีบ ระยะห่างระหว่างครีบ มุมปะทะ และลักษณะการจัดเรียงครีบ เพื่อนำไปสู่การหาค่า TEF ที่มีค่าสูงสุดและเหมาะสม และในท้ายที่สุดสามารถนำไปออกแบบสำหรับการใช้งานจริงได้ต่อไป

บทที่ 3

สมการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับการควบคุมการเคลื่อนที่ของของไหลและสมการพลังงานเพื่อวิเคราะห์ปัญหาของการไหลแบบปั่นป่วน โดยใช้ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมหรือไฟไนต์วอลุ่ม ซึ่งเป็นระเบียบวิธีที่มีอยู่ในซอฟต์แวร์ที่จำหน่ายกันอยู่ในระดับสากลและเป็นที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน โดยสามารถนำมาใช้วิเคราะห์ปัญหาการไหลผ่านรูปทรงที่มีความซับซ้อนได้ดี

3.1 สมมุติฐานของการไหลและสมการควบคุม

การคำนวณเชิงตัวเลขของการไหลและการถ่ายเทความร้อน ที่มีการติดตั้งครีบบนพื้นผิวให้ความร้อนในท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีสมมุติฐานของการไหลดังนี้

- (1) เป็นการไหลแบบปั่นป่วนและอัดตัวไม่ได้
- (2) การไหลและการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบคงตัว 3 มิติ
- (3) เป็นการไหลและการถ่ายเทความร้อนที่พัฒนาอย่างสมบูรณ์และซ้ำเป็นช่วง
- (4) สมบัติต่างๆ ของของไหลมีค่าคงที่
- (5) ไม่พิจารณาแรงโน้มถ่วง

สมการควบคุมการไหลประกอบไปด้วยสมการความต่อเนื่อง สมการโมเมนตัม (หรือเรียกว่าสมการนาเวียร์-สโตกส์) และสมการพลังงาน เมื่อพิจารณาภายใต้สมมุติฐานข้างต้น สมการดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังนี้

สมการความต่อเนื่อง

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

สมการโมเมนตัม

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

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 การไหลแบบปั่นป่วนและอิทธิพลของความปั่นป่วนในสมการนาเวียร์-สโตกส์

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

นอกจากนี้การไหลแบบปั่นป่วนนั้นจะเกิดการหมุนวนขนาดเล็กโดยมีขนาดที่แตกต่างกัน เช่น สำหรับการไหลขนาด 0.1m^2 ที่มีค่าเลขเรย์โนลด์สูงๆ จะมีการหมุนวนตั้งแต่ขนาด 10 จนถึง $100\ \mu\text{m}$ ซึ่งหากต้องการจำลองการไหลโดยวิธีเชิงตัวเลขที่ละเอียดเพียงพอนั้น จะต้องสร้างปริมาตรควบคุมจำนวนมาก (ในช่วง 10^9 ถึง 10^{12}) และความถี่ของความแปรเปลี่ยนสูงสุดจะอยู่ในย่าน $10\ \text{kHz}$ ซึ่งต้องใช้คาบเวลาการคำนวณในช่วง $100\ \mu\text{s}$ การจำลองปรากฏการณ์ของความปั่นป่วนแบบที่ขึ้นกับเวลาโดยตรงนั้นต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่มีความสามารถสูงมาก

หากทำการวัดค่าของความเร็วที่จุดใดจุดหนึ่งตลอดเวลาที่ยาวนานพอสมควร ในสนามการไหลปั่นป่วน ค่าของความเร็วสามารถเขียนได้เป็น

$$u_i = U_i + u'_i \quad (3.4)$$

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

$$\phi = \Phi + \phi' \quad (3.5)$$

โดยที่ ϕ แสดงถึงปริมาณสเกลาร์ เช่น ความดัน และพลังงาน

ค่า Φ คือค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติ φ ใดๆ ของของไหลและมีความสัมพันธ์ตามสมการ

$$\Phi = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \varphi(t) dt \quad (3.6)$$

Δt คือช่วงเวลาที่ยาวมากเพียงพอที่ครอบคลุมค่าความแปรเปลี่ยนที่ช้าที่สุดของคุณสมบัติการไหลนั้น(อันเนื่องมาจากการหมุนวนที่ใหญ่ที่สุด)

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

$$\overline{\varphi'} = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \varphi(t) dt = 0 \quad (3.7)$$

แทนค่าสมการที่ (3.4) และ (3.5) ลงในสมการความต่อเนื่องและสมการนาเวียร์-สโตกส์ หลังจากนั้นทำการเฉลี่ยตลอดทั้งสมการ โดยประยุกต์ใช้ร่วมกับสมการที่ (3.6) และ (3.7) จะได้สมการควบคุมสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (U_i) = 0 \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j U_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i' u_j'}) \quad (3.9)$$

เรียกกลุ่มสมการที่ (3.8) และ (3.9) นี้ว่าสมการนาเวียร์-สโตกส์เรย์โนลด์เฉลี่ย (Reynolds-averaged Navier-Stokes, RANS) หรือเรียกสมการที่ (3.9) ว่าสมการเรย์โนลด์ สังเกตได้ว่าสมการเรย์โนลด์นี้มีลักษณะเช่นเดียวกับสมการนาเวียร์-สโตกส์ แต่ผลของการเฉลี่ยนั้นทำให้เกิดพจน์ใหม่คือ $\frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i' u_j'})$ ซึ่งมีความหมายถึงการเคลื่อนย้ายหรือถ่ายโอนโมเมนตัม อันเนื่องมาจากความเร็วผันแปรนั้น โดยทั่วไปจะจัดเทอมนี้ไว้ด้านขวาของสมการเพื่อแสดงให้เห็นว่าเป็นความเค้นอันเนื่องมาจากความปั่นป่วน ซึ่งเทอม $-\rho \overline{u_i' u_j'}$ คือความเค้นอันเนื่องมาจากความปั่นป่วนและเรียกว่าความเค้นเรย์โนลด์ (Reynolds stress) การไหลปั่นป่วนโดยทั่วไปนั้นค่าความเค้นอันเนื่องมาจากความปั่นป่วนนี้จะมีค่าสูงกว่าความเค้นเนื่องจากความหนืดของของไหลอย่างมาก

สำหรับสมการ RANS นั้นพบว่าไม่สามารถแก้สมการหาค่าตอบได้ ในทางวิศวกรรมนั้น โดยทั่วไปจะให้ความสนใจกับค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติต่างๆ ของการไหลและของไหล และด้วยความซับซ้อนของความปั่นป่วนนั้น จะไม่พบสมการอย่างง่ายที่ใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าว ดังนั้นสมการของแบบจำลองความปั่นป่วน จึงมีบทบาทสำคัญซึ่งเกี่ยวข้องกับการพัฒนาวิธีในการคำนวณ เพื่อให้มีความถูกต้องในระดับที่เพียงพอและครอบคลุมปัญหาความปั่นป่วนโดยทั่วไปได้

แบบจำลองการไหลปั่นป่วนที่จะนำมาใช้วิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับงานวิจัยนี้ ถูกพัฒนาขึ้นจากสมมติฐานว่า อิทธิพลของความเค้นเรย์โนลด์ที่มีต่อการถ่ายเทโมเมนตัมในการไหลเฉื่อยนั้น คล้ายกับความเค้นอันเนื่องมาจากความหนืด ซึ่งเป็นสัดส่วนกับอัตราการเสียรูปของชิ้นส่วนของของไหลสำหรับของไหลแบบนิวโทเนียนและอัดไม่ได้ จะได้ว่า

$$\tau_{ij} = \mu s_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.10)$$

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

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (3.11)$$

โดยที่ μ_t คือค่าความหนืดที่เกิดจากความปั่นป่วน(turbulent viscosity) และค่า k คือพลังงานจลน์ต่อหน่วยมวลซึ่งมีสมการเป็น $k = 0.5(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$ และค่า δ_{ij} เรียกว่าไครเนคเกอร์เดลต้า (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

ค่า μ_t นั้นเป็นฟังก์ชันของค่า k และ ϵ โดยที่แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ $k-\epsilon$ นี้มีการสร้างสมการการเคลื่อนย้ายเพิ่มขึ้นมาอีก 2 สมการ คือสมการของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน(k) และสมการของอัตราการสลายตัวของพลังงานความปั่นป่วนนั้น(ϵ) โดยพิจารณาว่าสนามการไหลได้ก่อให้เกิดการเคลื่อนย้ายของการหมุนวนผ่านกระบวนการการพา การแพร่ อีกทั้งมีการสร้างใหม่อันเนื่องมาจากการเฉือนของกระแสการไหลหลักและการสลายตัว โดยแบบจำลองนี้ตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่าค่าของความหนืดปั่นป่วนนั้นเป็นแบบไอโซโทรปิก(isotropic) หรือกล่าวได้ว่าอัตราส่วนระหว่างความเค้นเรย์โนลด์ กับอัตราการเสียรูปของก้อนของไหลมีค่าเท่ากันไม่ว่าจะมองในทิศทางใด ซึ่งสมมติฐานนี้อาจไม่ถูกต้องนักสำหรับการไหลหลายรูปแบบ จึงเป็นผลให้การจำลองมีความคลาดเคลื่อนเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง

เพื่อนำไปสู่ความเข้าใจโดยรวมของแบบจำลองการไหลปั่นป่วนที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ในส่วนถัดไปจะกล่าวถึงลักษณะทั่วไปของการไหลในบริเวณที่ใกล้กับผนัง

3.3 การไหลแบบปั่นป่วนที่มีผนังเป็นขอบเขต

การไหลแบบปั่นป่วนนั้นได้รับอิทธิพลโดยตรงจากการมีอยู่ของผนัง สนามของความเร็วจลื่นได้รับอิทธิพลจากเงื่อนไขการไม่เลื่อนไหลซึ่งเกิดขึ้นที่ผนัง อย่างไรก็ตามความปั่นป่วนจะเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการมีอยู่ของผนังในรูปแบบที่ไม่ธรรมดา ซึ่งในบริเวณที่ใกล้กับผนังมากๆ นั้น การหน่วงจากความหนืดของของไหลจะลดความเร็วผันแปรในแนวสัมผัส ในขณะที่การหยุดชะงักของพลังงานจลน์จะลดความเร็วผันแปรในแนวตั้งฉาก และเมื่อห่างจากผนังมากขึ้นระดับความปั่นป่วนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยมีการสร้างพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนจากค่าเกรเดียนต์ขนาดใหญ่ของความเร็วจลื่นแบบจำลองการไหลในบริเวณที่ใกล้กับผนังนั้น จะส่งผลอย่างสำคัญต่อผลเฉลยที่ได้จากการคำนวณ นอกจากนี้ในบริเวณที่ใกล้กับผนังนั้นเกรเดียนต์ของค่าตัวแปรต่างๆ มีการเปลี่ยนแปลงสูงมาก

สำหรับการไหลปั่นป่วนที่มีผนังเป็นของแข็งเข้ามาเกี่ยวข้อง ระบบตัวแปรไร้มิติได้ถูกนำมาใช้เพื่อช่วยในการวิเคราะห์หาความเชื่อมโยงกับผลที่ได้จากการทดลอง สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนในช่องทางไหล ค่าเลขเรย์โนลด์จะคำนวณอ้างอิงจากความยาวบ่งลักษณะของช่องทางไหล (Re_D) ซึ่งมีค่าสูงมากและบอกเป็นนัยว่าเทอมของแรงเฉื่อยมีมากกว่าแรงเนื่องจากความหนืดอย่างยิ่ง

เพื่อความสะดวกสำหรับการวิเคราะห์การไหลที่ใกล้กับผนัง โดยทั่วไปการคำนวณค่าเลขเรย์โนลด์จะใช้ค่าระยะทาง y ซึ่งเป็นระยะห่างจากผนัง นำมาใช้เป็นค่าอ้างอิงของความยาวบ่งลักษณะ ($Re_y = Uy/\nu$) จะเห็นได้ว่าหากระยะทาง y นั้นมีขนาดอยู่ในย่านเดียวกับ Re_D การวิเคราะห์จะให้ผลได้ในลักษณะเดียวกับการใช้ค่าความยาวบ่งลักษณะของช่องทางไหล ซึ่งมีความหมายถึงแรงเฉื่อยจะมีอิทธิพลต่อการไหลที่บริเวณที่ไกลผนังออกไป และหากระยะทาง y ลดลงจนเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งหมายถึงที่ตำแหน่งใกล้ผนังค่าเลขเรย์โนลด์ก็จะลดลง ซึ่งจะมีที่ระยะ y ค่าหนึ่งมีค่าเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 1 นั้นหมายถึงอิทธิพลของแรงเฉื่อยจะมีเท่ากับแรงเฉื่อยและจะมีมากขึ้นเมื่อระยะใกล้กว่านี้

ที่บริเวณใกล้ผนังเช่นนี้จะไม่ได้รับอิทธิพลของกระแสการไหลที่ไกลออกไป ที่บริเวณนี้ค่าเฉลี่ยของความเร็ว U จะขึ้นอยู่กับระยะห่างจากผนัง y , ค่าของความหนาแน่น ρ , ความหนืด μ และค่าของความเค้นเฉือนที่ผนัง τ_w จากการวิเคราะห์มิติจะได้ว่า

$$u^+ = \frac{U}{u_\tau} = f\left(\frac{\rho u_\tau y}{\mu}\right) = f(y^+) \quad (3.12)$$

สมการที่ (3.12) นี้เรียกว่ากฎของผนัง (the law of the wall) ซึ่งประกอบไปด้วยกลุ่มของตัวแปรไร้มิติที่สำคัญ 2 กลุ่ม คือ u^+ และ y^+ โดยสเกลของความเร็วนำมาเทียบกับความเร็วจริงคือ u_τ ซึ่งกำหนดเท่ากับ $(\tau_w/\rho)^{1/2}$ และเรียกว่าความเร็วเสียดทาน (friction velocity)

โดยทั่วไปการไหลในบริเวณใกล้กับผนัง สามารถแบ่งชั้นการไหลออกได้เป็น 3 ชั้นย่อยตามค่า y^+ คือ ($y^+ = \rho u_\tau y / \mu$)

1. ชั้นด้านในสุดที่ติดกับผนังซึ่งเรียกว่าชั้นย่อยหนืด (viscous sublayer) นั้นมีค่า $y^+ < 5$ โดยมีการไหลเกือบจะเป็นการไหลแบบราบเรียบ และค่าความหนืดของของไหลจะมีบทบาทสำคัญต่อโมเมนตัมและการถ่ายเทความร้อน

2. ชั้นนอกสุดเรียกว่าชั้นการไหลแบบปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์ (fully turbulent region หรือ log-law region) มีค่า $y^+ > 60$ ซึ่งความปั่นป่วนจะมีบทบาทสำคัญต่อการไหล

3. ชั้นที่อยู่ระหว่างชั้นย่อยหนืดและชั้นการไหลแบบปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์ ซึ่งเรียกว่าชั้นบัฟเฟอร์ (buffer layer หรือ blending region) มีค่า $5 < y^+ < 60$ ซึ่งการไหลในชั้นนี้จะได้รับอิทธิพลจากความหนืดของของไหลและความปั่นป่วนทั้งสองกรณี

แบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้ในการศึกษานั้น มีความเกี่ยวข้องและเชื่อมโยงกับค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วนและการสูญเสียของค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วน ซึ่งจะได้นำเสนอในหัวข้อถัดไป

3.4 พลังงานจลน์ปั่นป่วนและการสูญเสียของพลังงานจลน์ปั่นป่วน

สำหรับการนำเสนอแบบจำลองความปั่นป่วนนั้น ในเบื้องต้นจะทำความเข้าใจเกี่ยวกับความหมายของพลังงานจลน์ต่อหน่วยมวล ณ ระยะเวลาหนึ่ง ๆ โดยมีสัญลักษณ์ $k(t)$ ซึ่งคือผลบวกของพลังงานจลน์อันเนื่องมาจากกระแสการไหลเฉลี่ย $K = 0.5(U^2 + V^2 + W^2)$ และพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน k นั่นคือ

$$k(t) = K + k \quad (3.13)$$

นอกจากนี้ค่าความเข้มข้นของความปั่นป่วน T_i นั้นเป็นค่าที่เชื่อมโยงกับค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วนกับพลังงานจลน์ของการไหลเฉลี่ย แสดงดังสมการ

$$T_i = \frac{\left(\frac{2}{3}k\right)^{1/2}}{U_{ref}} \quad (3.14)$$

สมการพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนถูกสร้างขึ้นจากขั้นตอนดังนี้

- (1) คุณสมบัติการเรย์โนลด์ด้วยความเร็วเฉลี่ยที่เหมาะสม (เช่น ทำการคุณสมบัติการเรย์โนลด์ในแนวแกน x ด้วยความเร็วเฉลี่ย U เป็นต้น) จากนั้นรวมผลคูณทั้งสามเข้าด้วยกัน
- (2) คุณสมบัติการนาเวียร์-สโตกส์ด้วยความเร็วผันแปรที่เหมาะสม (เช่น ทำการคุณสมบัติการนาเวียร์-สโตกส์ในแนวแกน x ด้วยความเร็วผันแปร u' เป็นต้น) จากนั้นรวมสมการทั้งหมดเข้าด้วยกัน

นำผลลัพธ์ที่ได้ในข้อ (2) ลบออกจากข้อ (1) เพื่อให้ได้ผลต่างซึ่งจะเป็นสมการพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน แสดงได้ดังนี้

$$\text{div}(\rho k \mathbf{U}) = \text{div}\left(-\overline{p' \mathbf{u}'} + 2\mu \overline{\mathbf{u}' s'_{ij}} - \rho \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i u'_j}\right) - 2\mu \overline{s'_{ij} \cdot s'_{ij}} - \rho \overline{u'_j u'_j} \cdot S_{ij} \quad (3.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ละเทอมสามารถอธิบายได้ดังนี้

การเคลื่อนย้าย k โดยการพา = การเคลื่อนย้าย k โดยความดัน + การเคลื่อนย้าย k โดยความเค้น
หนืด + การเคลื่อนย้าย k โดยความเค้นเรย์โนลด์ - อัตราการสูญเสีย
สลายของ k เนื่องจากความหนืด + อัตราการสร้าง k

โดยที่ค่า μ' คือเวกเตอร์ของความเร็วผันแปร พิจารณาสมการที่ (3.15) พบว่าเทอมของการ
สูญเสียของพลังงานเนื่องจากความหนืดซึ่งคือเทอม $-2\mu s'_{ij} \cdot s'_{ij}$ สามารถกระจายได้ดังนี้

$$-2\mu s'_{ij} \cdot s'_{ij} = -2\mu (s'^2_{11} + s'^2_{22} + s'^2_{33} + 2s'^2_{12} + 2s'^2_{13} + 2s'^2_{23})$$

ค้ดดังกล่าวนี้ติดลบซึ่งชี้ให้เห็นว่า การสูญเสียของพลังงานจลน์ปั่นป่วนนั้นเกิดจากงานของ
กระแสนวนที่เล็กที่สุด กระทำในรูปแบบของความเค้นอันเนื่องมาจากความหนืด อัตราการสูญเสีย
สลายในของไหลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรมีหน่วยในระบบ SI เป็น m^2/s^3 ค่านี้มีความสำคัญอย่างยิ่ง
ในการวิเคราะห์ทางด้านความปั่นป่วน โดยมีนิยามดังนี้

$$\varepsilon = 2\nu s'_{ij} \cdot s'_{ij} \quad (3.16)$$

เทอมนี้มีขนาดใหญ่พอๆ กับเทอมการสร้างความปั่นป่วน ในการไหลที่มีเลขเรย์โนลด์สูงนั้น
เทอม $2\mu s'_{ij}$ ในสมการที่ (3.15) ที่เกิดจากความหนืดนั้นจะมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับเทอม
 $-2\mu s'_{ij} \cdot s'_{ij}$ ที่เกิดจากความปั่นป่วน

แบบจำลองความปั่นป่วนที่ได้นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ ประกอบไปด้วยแบบจำลองความปั่นป่วน
RNG $k-\varepsilon$ และ SST $k-\omega$ ซึ่งเป็นแบบจำลองที่อยู่ในกลุ่ม $k-\varepsilon$ และ $k-\omega$ ตามลำดับ ดังนั้นในส่วนถัดไป
จะกล่าวถึงแบบจำลองในกลุ่ม $k-\varepsilon$ และกลุ่ม $k-\omega$ เพื่อนำไปสู่ความเข้าใจและเห็นภาพโดยรวมของ
แบบจำลองความปั่นป่วนเหล่านี้ ซึ่งเนื้อหาต่อไปที่จะได้กล่าวถึงนั้นอ้างอิงข้อมูลจาก FLUENT
Incorporated. (2006)

3.5 แบบจำลองความปั่นป่วน $k-\varepsilon$

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

3.5.1 แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ $k-\varepsilon$ มาตรฐาน

แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ $k-\varepsilon$ มาตรฐานเป็นแบบจำลองที่สมบูรณ์และมีรูปแบบที่ง่าย
ที่สุดของแบบจำลองความปั่นป่วนที่มี 2 สมการ ซึ่งนำเสนอโดย Launder and Spalding (1989)
แบบจำลองนี้ได้พัฒนาขึ้นร่วมกับผลการทดลองโดยมีสมมุติฐานว่า เป็นการไหลแบบปั่นป่วนอย่าง
สมบูรณ์ (การไหลที่เลขเรย์โนลด์สูง) และไม่พิจารณาอิทธิพลของความหนืดเชิงโมเลกุล ดังนั้นจึงมี
ความถูกต้องเพียงสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์เท่านั้น โดยทั่วไปสามารถสร้างสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านกา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเคลื่อนย้ายของคุณสมบัติทางด้านความปั่นป่วนได้แม้กระทั่งอัตราการสูญเสียของพลังงานจลน์ปั่นป่วน(ε) แต่สมการการเคลื่อนย้ายของ ε นี้ขึ้นอยู่กับตัวแปรไม่ทราบค่าจำนวนมากและไม่สามารถวัดค่าได้ แบบจำลอง k - ε แบบมาตรฐานจะมีสมการการเคลื่อนย้ายของพารามิเตอร์ 2 ตัว คือ k และ ε ซึ่งพัฒนามาจากพื้นฐานความรู้ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการที่ทำให้เกิดความเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เหล่านี้

สมการการเคลื่อนย้ายสำหรับ k และ ε ดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (3.17)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.18)$$

สมการที่ (3.17) และ (3.18) สามารถเขียนได้ในรูปทั่วไปคือ

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

โดยที่ G_k คือเทอมที่แสดงถึงการสร้างพลังงานจลน์ปั่นป่วน ซึ่งเทอมนี้มีนิยามโดย

$$G_k = -\overline{\rho u_i' u_j'} \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \quad (3.19)$$

การหาค่า G_k ในรูปแบบที่สอดคล้องกับสมมติฐานของ Boussinesq คือ

$$G_k = \mu_t S^2 \quad (3.20)$$

เมื่อค่า S คือค่าเทนเซอร์ของอัตราการเสียรูปเฉลี่ย และมีนิยามเป็น

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (3.21)$$

โดยที่

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \quad (3.22)$$

ค่า σ_k และ σ_ε คือเลขพรานด์ของความปั่นป่วน (turbulent Prandtl numbers) สำหรับ

ค่า k และ ε ตามลำดับ ซึ่งถูกกำหนดให้เป็นค่าคงที่สำหรับแบบจำลอง k - ε แบบมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า μ มีสมการดังนี้

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.23)$$

ค่า C_μ เป็นค่าตัวแปรไร้มิติซึ่งเป็นค่าคงที่ และในสมการ (3.17) และ (3.18) มีค่าคงที่ดังนี้

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

แต่ถึงแม้ว่าแบบจำลอง $k-\varepsilon$ มาตรฐานนั้น จะได้รับความนิยมอย่างมากมาใช้ในการนำไปใช้ในเชิงอุตสาหกรรมแต่ก็มีข้อจำกัดของการใช้งานอยู่พอสมควร แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ $k-\varepsilon$ มาตรฐาน ให้ผลการจำลองที่ไม่ดีในลักษณะการไหลดังต่อไปนี้

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

จะเห็นว่าแบบจำลองความปั่นป่วน $k-\varepsilon$ นั้นมีข้อเสียซึ่งอาจจะไม่เหมาะสมกับการไหลเป็นเกลียวและการไหลที่มีการพัฒนาอย่างสมบูรณ์ในท่อที่มีหน้าตัดไม่เป็นวงกลม ซึ่งเป็นลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นในงานวิจัยนี้

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

3.5.2 แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k-\varepsilon$

แบบจำลอง RNG $k-\varepsilon$ เป็นแบบจำลองที่พัฒนามาจากการใช้วิธีเชิงสถิติอย่างแม่นยำ ซึ่งเรียกว่าทฤษฎี Renormalization group, RNG นำเสนอโดย Yakhot and Orszag (1986) ซึ่งคล้ายกับแบบจำลอง $k-\varepsilon$ มาตรฐาน แต่ได้เพิ่มเติมต่างๆ เข้าไป ดังต่อไปนี้

- (1) ทฤษฎี RNG ให้สมการสำหรับการวิเคราะห์เลขพราวน์ต์ของความปั่นป่วน ในขณะที่แบบจำลอง $k-\varepsilon$ มาตรฐานจะใช้วิธีระบุเป็นค่าคงที่
- (2) แบบจำลอง RNG นั้นได้รวมอิทธิพลของการหมุนวน (rotation หรือ swirl) ต่อการไหลปั่นป่วน และเพิ่มความแม่นยำสำหรับการไหลหมุนวน
- (3) แบบจำลอง RNG ได้เพิ่มพจน์เข้าไปในสมการ ε ซึ่งมีส่วนสำคัญในการปรับปรุงความแม่นยำสำหรับการไหลที่เกิดความเครียดอย่างรวดเร็ว

- (4) ในขณะที่แบบจำลอง $k-\varepsilon$ มาตรฐานเป็นแบบจำลองสำหรับเลขเรย์โนลด์สูง แต่ทฤษฎี RNG ให้สมการการวิเคราะห์ที่ครอบคลุมสำหรับค่าความหนืดยังผล (μ_{eff}) ที่ใช้ในการคำนวณสำหรับอิทธิพลของเลขเรย์โนลด์ต่ำ ซึ่งผลของการคำนวณในลักษณะนี้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของการจำลองการไหลที่ใกล้กับผนัง

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

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (3.24)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon \quad (3.25)$$

ค่าความหนืดยังผล (μ_{eff}) โดยทั่วไปมีสมการเป็น

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (3.26)$$

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

$$\frac{\alpha - 1.3929}{\alpha_0 - 1.3929} \left| \frac{\alpha + 2.3929}{\alpha_0 + 2.3929} \right|^{0.6321} = \frac{\mu}{\mu_{eff}} \quad (3.27)$$

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

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta / \eta_0) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} k \quad (3.28)$$

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

อิทธิพลของ R_ε ของสมการ ε ในแบบจำลอง RNG สามารถเห็นได้ชัดเจนขึ้นเมื่อจัดรูปสมการที่ (3.25) ใหม่ โดยการแทนค่าจากสมการที่ (3.28) ลงในสมการที่ (3.25) จะได้

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon}^* \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.29)$$

เมื่อ
$$C_{2\varepsilon}^* = C_{2\varepsilon} + \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta / \eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \quad (3.30)$$

ในบริเวณที่อยู่ในชั้นของการไหลแบบปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์ ($\eta < \eta_0$) ค่า $C_{2\varepsilon}^* > C_{2\varepsilon}$ เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลอง $k-\varepsilon$ มาตรฐาน จากผลที่ได้ทำให้มีการทำลายค่า 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

$$d \left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\varepsilon \mu}} \right) = 1.72 \frac{\hat{\nu}}{\sqrt{\hat{\nu}^3 - 1 + C_\nu}} d\hat{\nu} \quad (3.31)$$

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

เมื่ออินทิเกรตสมการที่ (3.31) จะได้ค่าที่แม่นยำของการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนย้าย ที่เกิดจากอิทธิพลของความปั่นป่วนกับอิทธิพลของเลขเรย์โนลด์ (หรือในระดับการหมุนวนขนาดเล็ก) ซึ่งแบบจำลองนี้จะให้ผลการวิเคราะห์ที่ดีสำหรับการไหลที่เลขเรย์โนลด์ต่ำในบริเวณใกล้กับผนัง

ในกรณีการไหลที่เลขเรย์โนลด์สูง สมการที่ (3.31) จะเปลี่ยนไปเป็น

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.32)$$

โดยที่ค่า $C_\mu = 0.0875$ ซึ่งค่านี้ได้มาจากการทฤษฎี RNG และมีข้อสังเกตที่น่าสนใจว่าค่า C_μ นี้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงทดลองที่มีค่า $C_\mu = 0.09$ ในสมการแบบจำลอง $k-\varepsilon$ มาตรฐาน โดยทั่วไปแล้วอิทธิพลเนื่องจากความหนืดปั่นป่วนนั้นจะถูกคำนวณโดยใช้การคำนวณในกรณีเลขเรย์โนลด์สูงในสมการที่ (3.32) อย่างไรก็ตามเมื่อต้องการรวมอิทธิพลของการไหลที่เลขเรย์โนลด์ต่ำ แบบจำลอง RNG จะมีทางเลือกที่สามารถใช้ได้โดยคำนวณจากความสัมพันธ์ในรูปเอกสมการเชิงอนุพันธ์ดังได้แสดงในสมการที่ (3.31) การศึกษาเหล่านี้ ไม่นับว่าให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณในวิศวกรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าคงที่ในสมการของแบบจำลอง RNG แสดงได้ดังนี้

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

3.6 แบบจำลองความปั่นป่วน $k-\omega$

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

3.6.1 แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ $k-\omega$ มาตรฐาน

แบบจำลอง $k-\omega$ มาตรฐานตั้งอยู่บนพื้นฐานของแบบจำลอง Wilcox $k-\omega$ ซึ่งเสนอโดย Wilcox (1998) ซึ่งถูกปรับปรุงให้สอดคล้องกับอิทธิพลของการไหลที่เลขเรย์โนลด์ต่ำ การไหลอัดได้ และการกระจายการไหลเฉือน แบบจำลอง Wilcox สามารถทำนายการไหลเฉือนอิสระ ชั้นการไหลผสม การไหลผ่านระนาบ การไหลรอบวัตถุ และลำการไหลในแนวรัศมี และยังสามารถประยุกต์ให้ใช้ได้กับการไหลที่มีผนังเป็นขอบเขต แบบจำลอง $k-\omega$ มาตรฐาน คือแบบจำลองเชิงทดลองมีพื้นฐานมาจากสมการการเคลื่อนย้ายของค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วน (k) และอัตราการสูญเสียพลังงานจำเพาะ (specific dissipation rate), ω ซึ่งพิจารณาได้ในรูปของ $\omega = \varepsilon/k$ นอกจากนี้แบบจำลอง $k-\omega$ ได้เพิ่มเติมของการสร้างทั้งในสมการของ k และ ω เพื่อปรับปรุงความแม่นยำของแบบจำลองสำหรับการทำนายการไหลเฉือนอิสระ

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

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k \quad (3.33)$$

และ

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \omega U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega \quad (3.34)$$

ความหมายของแต่ละพจน์แสดงได้ดังนี้

- (1) ค่า G_k คือเทอมที่แสดงถึงการสร้างพลังงานจลน์ปั่นป่วน ซึ่งเทอมนี้ใช้นิยามเดียวกันกับแบบจำลอง $k-\varepsilon$
- (2) ค่าการแพร่กระจายยังผล (effective diffusivities) มีสมการดังนี้

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (3.35)$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \quad (3.36)$$

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

$$\mu_t = \alpha^* \frac{\rho k}{\omega} \quad (3.37)$$

สำหรับการแก้ปัญหาคาร์ไหลในช่วงเลขเรย์โนลด์ต่ำนั้น ค่าสัมประสิทธิ์ α^* จะไปหาค่าความหนืดปั่นป่วนซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดความแม่นยำสำหรับการไหลในช่วงเลขเรย์โนลด์ต่ำ ค่า α^* มีสมการดังนี้

$$\alpha^* = \alpha_\infty^* \left(\frac{\alpha_0^* + Re_t / R_k}{1 + Re_t / R_k} \right) \quad (3.38)$$

เมื่อ

$$Re_t = \frac{\rho k}{\mu \omega} \quad (3.39)$$

$$R_k = 6 \quad (3.40)$$

$$\alpha_0^* = \frac{\beta_t}{3} \quad (3.41)$$

$$\beta_t = 0.072 \quad (3.42)$$

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

(3) ค่า G_ω คือเทอมของการสร้างค่า ω ซึ่งแสดงโดย

$$G_\omega = \alpha \frac{\omega}{k} G_k \quad (3.43)$$

ในสมการที่ (3.43) นั้นค่า α กำหนดให้โดย

$$\alpha = \frac{\alpha_\infty}{\alpha^*} \left(\frac{\alpha_0^* + Re_t / R_\omega}{1 + Re_t / R_\omega} \right) \quad (3.44)$$

เมื่อค่า $R_\omega = 2.95$ และนอกจากนี้ค่า α^* และค่า Re_t หาค่าได้จากสมการ (3.38) และ เอกส(3.39) ตามลำดับ และสำหรับการไหลที่เลขเรย์โนลด์สูงนั้น แบบจำลอง $k-\omega$ จะใช้ค่า $\alpha = \alpha_\infty = 1.0$ การคำนวณที่แม่นยำยิ่งขึ้น อาจจำเป็นต้องมีการปรับปรุงสมการเหล่านี้ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(4) ค่าการสูญเสียของ k กำหนดโดย

$$Y_k = \rho \beta^* f_\beta \cdot k \omega \quad (3.45)$$

เมื่อ

$$f_\beta^* = \begin{cases} 1 & \chi_k \leq 0 \\ \frac{1 + 680 \chi_k^2}{1 + 400 \chi_k^2} & \chi_k > 0 \end{cases} \quad (3.46)$$

เมื่อ

$$\chi_k \equiv \frac{1}{\omega^3} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (3.47)$$

และ

$$\beta^* = \beta_i^* [1 + \zeta^* F(M_i)] \quad (3.48)$$

$$\beta_i^* = \beta_\infty^* \left(\frac{4/5 + (Re_i / R_\beta)^4}{1 + (Re_i / R_\beta)^4} \right) \quad (3.49)$$

$$\zeta^* = 1.5 \quad (3.50)$$

$$R_\beta = 8 \quad (3.51)$$

$$\beta_\infty^* = 0.09 \quad (3.52)$$

โดยที่ค่า Re_i กำหนดโดยสมการที่ (3.39)

(5) ค่าการสูญเสียของ ω กำหนดโดย

$$Y_\omega = \rho \beta f_\beta \omega^2 \quad (3.53)$$

เมื่อ

$$f_\beta = \frac{1 + 70 \chi_\omega}{1 + 80 \chi_\omega} \quad (3.54)$$

$$\chi_\omega = \left| \frac{\Omega_{ij} \Omega_{jk} S_{ki}}{(\beta_\infty^* \omega)^3} \right| \quad (3.55)$$

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.56)$$

เทนเซอร์ของอัตราความเครียด S_{ij} กำหนดโดยสมการที่ (3.22) และ

$$\beta = \beta_i \left[1 - \frac{\beta_i^*}{\beta_i} \zeta^* F(M_i) \right] \quad (3.57)$$

β_i^* ได้แสดงไว้ในสมการ (3.49) และค่า $F(M_i)$ คือฟังก์ชันของการอัดได้ มีสมการเป็น

$$F(M_i) = \begin{cases} 0 & M_i \leq M_{i0} \\ M_i^2 - M_{i0}^2 & M_i > M_{i0} \end{cases} \quad (3.58)$$

$$M_i^2 = 2 \frac{k}{a^2} \quad (3.59)$$

$$M_{i0} = 0.25 \quad (3.60)$$

$$a = \sqrt{\gamma RT} \quad (3.61)$$

ซึ่งจากเงื่อนไขในงานวิจัยนี้พบว่าค่า $F(M_i) = 0$

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

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

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

$$R_k = 6, \quad R_\omega = 2.95, \quad \zeta^* = 1.5, \quad M_{i0} = 0.25, \quad \sigma_k = 2, \quad \sigma_\omega = 2$$

3.6.2 แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ SST $k-\omega$

แบบจำลองการเคลื่อนย้ายของความเค้นเฉือน (shear-stress transport, SST) $k-\omega$ หรือเรียกว่า SST $k-\omega$ เสนอโดย Menter (1994) เป็นแบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้นจากสมการที่มีการผสมผสานกันอย่างดีและแม่นยำระหว่างแบบจำลอง $k-\omega$ ในบริเวณการไหลใกล้ผนังกับการไหลที่เป็นเอกสารถือเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิสระจากกระแสการไหลหลักของแบบจำลอง $k-\varepsilon$ ในสนามการไหลที่ไหลออกไปจากผนัง โดยทั่วไปจะมีความคล้ายคลึงกับ $k-\omega$ มาตรฐาน แต่ได้เพิ่มสิ่งต่างๆ เข้าไปดังต่อไปนี้

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

3.6.2.1 สมการการเคลื่อนย้ายของแบบจำลอง SST $k-\omega$

สมการการเคลื่อนย้ายของแบบจำลอง SST $k-\omega$ แสดงได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho k U_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \tilde{G}_k - Y_k \quad (3.62)$$

และ

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \omega U_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega \quad (3.63)$$

ความหมายของแต่ละพจน์ในสมการที่ (3.62) และ (3.63) สามารถแสดงได้ดังนี้

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

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (3.64)$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \quad (3.65)$$

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

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max \left[\frac{1}{\alpha^*}, \frac{SF_2}{a_1 \omega} \right]} \quad (3.66)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการวิจัยเพื่อวัตถุประสงค์ทางวิชาการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sigma_k = \frac{1}{F_1 / \sigma_{k,1} + (1 - F_1) / \sigma_{k,2}} \quad (3.67)$$

$$\sigma_\omega = \frac{1}{F_1 / \sigma_{\omega,1} + (1 - F_1) / \sigma_{\omega,2}} \quad (3.68)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ α^* กำหนดโดยสมการที่ (3.41) และฟังก์ชันของการผสมผสาน F_1 และ F_2 กำหนดโดย

$$F_1 = \tanh(\Phi_1^4) \quad (3.69)$$

$$\Phi_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right), \frac{4\rho k}{\sigma_{\omega,2} D_\omega^+ y^2} \right] \quad (3.70)$$

$$D_\omega^+ = \max \left[2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega,2}} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10} \right] \quad (3.71)$$

$$F_2 = \tanh(\Phi_2^2) \quad (3.72)$$

$$\Phi_2 = \max \left[2 \frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right] \quad (3.73)$$

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

$$D_\omega = 2(1 - F_1)\rho\sigma_{\omega,2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (3.74)$$

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

$$\tilde{G}_k = \min(G_k, 10\rho\beta^*k\omega) \quad (3.75)$$

เมื่อค่า G_k ถูกกำหนดให้มีความหมายเดียวกันกับแบบจำลอง $k-\omega$ มาตรฐาน

เอกสารนี้เป็น (3) ค่า \tilde{G}_ω คือเทอมของการสร้างค่า ω ซึ่งแสดงโดย นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G_\omega = \frac{\alpha}{V_1} G_k \quad (3.76)$$

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

$$\alpha_\infty = F_1 \alpha_{\infty,1} + (1 - F_1) \alpha_{\infty,2} \quad (3.77)$$

เมื่อ

$$\alpha_{\infty,1} = \frac{\beta_{i,1}}{\beta_\infty^*} \frac{\kappa^2}{\sigma_{\omega,1} \sqrt{\beta_\infty^*}} \quad (3.78)$$

$$\alpha_{\infty,2} = \frac{\beta_{i,2}}{\beta_\infty^*} \frac{\kappa^2}{\sigma_{\omega,2} \sqrt{\beta_\infty^*}} \quad (3.79)$$

เมื่อ κ มีค่าเท่ากับ 0.41:

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

$$Y_k = \rho \beta^* k \omega \quad (3.80)$$

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

$$Y_\omega = \rho \beta \omega^2 \quad (3.81)$$

สำหรับการแทนค่าคงที่นั้น ค่า β_i กำหนดโดย

$$\beta_i = F_1 \beta_{i,1} + (1 - F_1) \beta_{i,2} \quad (3.82)$$

ซึ่งค่า F_1 กำหนดโดยสมการที่ (3.69)

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่มีกรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\alpha_1 = 0.31, \quad \beta_{i,1} = 0.075, \quad \beta_{i,2} = 0.0828$$

ค่าคงที่ต่างๆ ที่นอกเหนือจากนี้ใช้ค่าเดียวกับแบบจำลอง $k-\omega$ มาตรฐาน

3.6.2.2 เงื่อนไขขอบที่ผนังของค่า ω

เงื่อนไขขอบที่ผนัง (Wall boundary conditions) สำหรับสมการ k ในแบบจำลอง $k-\omega$ ใช้เงื่อนไขเดียวกับการปฏิบัติการเสริมที่ผนัง ในแบบจำลอง RNG $k-\varepsilon$ (ดูหัวข้อ 3.7.1)

เงื่อนไขขอบที่ผนังของค่า ω ถูกระบุโดย

$$\omega_w = \frac{\rho(u^*)^2}{\mu} \omega^+ \quad (3.83)$$

ค่า ω^+ ของการไหลในชั้นย่อยหนืดหรือการไหลชั้นย่อยแบบราบเรียบ กำหนดโดย

$$\omega^+ = \min\left(\omega_w^+, \frac{6}{\beta_i (y^+)^2}\right) \quad (3.84)$$

เมื่อ

$$\omega_w^+ = \begin{cases} \left(\frac{50}{k_s^+}\right)^2 & k_s^+ < 25 \\ \frac{100}{k_s^2} & k_s^+ \geq 25 \end{cases} \quad (3.85)$$

และ

$$k_s^+ = \max\left(1.0, \frac{\rho k_s u^*}{\mu}\right) \quad (3.86)$$

เมื่อค่า k_s คือความสูงของความขรุขระ

ในบริเวณการไหลแบบปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์ ค่า ω^+ มีสมการเป็น

$$\omega^+ = \frac{1}{\sqrt{\beta_\infty^*}} \frac{du_{\text{turb}}^+}{dy^+} \quad (3.87)$$

ซึ่งได้นำไปสู่ค่า ω ของเซลล์ที่ผนัง ดังนี้

$$\omega = \frac{u^*}{\sqrt{\beta_\infty^*} \kappa y} \quad (3.88)$$

สำหรับกรณีของกริดเซลล์ที่ผนังถูกวางอยู่ในชั้นบัฟเฟอร์ แบบจำลองจะทำการผสมระหว่างค่า ω^+ ของการไหลในชั้นปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์กับการไหลในชั้นย่อยหนืด

3.7 การวิเคราะห์บริเวณใกล้ผนังสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนที่มีผนังเป็นขอบเขต

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

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

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

วิธีของฟังก์ชันผนังนั้นเป็นวิธีที่ประหยัดทรัพยากรทางคอมพิวเตอร์ และเป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับการคำนวณการไหลในบริเวณที่ใกล้กับผนังในเชิงอุตสาหกรรม แต่อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ไม่เหมาะสำหรับการไหลที่อยู่ในสภาวะการไหลบางกรณีดังนี้

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

จากสภาวะการไหลดังกล่าว สมมติฐานของการใช้ฟังก์ชันผนังนั้นจะไม่ถูกต้อง (ซึ่งพบว่าการไหลผ่านครีบูรูปตัววีที่เรียงตัวอย่างต่อเนื่องบนพื้นผิวให้ความร้อนนั้น มีลักษณะสอดคล้องกับการไหลในกรณีดังกล่าวข้างต้น) การแก้ปัญหาการไหลดังกล่าวนี้จะใช้วิธีการจำลองใกล้ผนัง ร่วมกับการใช้จำนวนกริดเซลล์ที่เหมาะสมในบริเวณใกล้กับผนัง โดยวิธีการนี้เรียกว่าการปฏิบัติการเสริมที่ผนัง (enhanced wall treatment)

ถึงแม้ว่าการปฏิบัติการเสริมที่ผนัง ถูกออกแบบให้มีความแม่นยำสำหรับการจำลองการไหลในบริเวณที่ใกล้กับผนัง แต่ยังคงต้องมีการสร้างกริดเซลล์ที่ใช้สำหรับการคำนวณอย่างสมบูรณ์ในบริเวณการไหลใกล้กับผนังที่ได้รับอิทธิพลของความหนืด ซึ่งเมื่อมีการใช้การปฏิบัติการเสริมที่ผนังเพื่อคำนวณการไหลในชั้นย่อยหนืด ค่า y^+ ที่ติดกับผนังควรมีค่าเท่ากับ 1 แต่อย่างไรก็ตาม อ้างอิงข้อมูลจาก FLUENT Incorporated. (2006) ค่า y^+ ที่มีค่าสูงกว่านี้และสามารถยอมรับได้คือ $y^+ < 4$ ถึง 5

3.7.1 การจำลองการไหลใกล้ผนังด้วยวิธีการปฏิบัติการเสริมที่ผนัง

วิธีการปฏิบัติการเสริมที่ผนัง อ้างอิงจาก FLUENT Incorporated. (2006) เป็นวิธีจำลองการไหลใกล้ผนังซึ่งใช้ในแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG $k-\epsilon$ โดยมีพื้นฐานมาจากแบบจำลองการไหลแบบ $k-\epsilon$ ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้จัดทำเนื้อหาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่สามารถใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

ไหล 2 ชั้น (two-layer model) ร่วมกับวิธีฟังก์ชันผนังเสริม (enhanced wall function) ซึ่งแบบจำลองการไหล 2 ชั้นนี้โดเมนการไหลทั้งหมดได้ถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ บริเวณที่ได้รับอิทธิพลของความหนืดกับบริเวณการไหลแบบปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์ และขอบเขตของทั้งสองบริเวณนั้นสามารถหาได้โดยการใช้ระยะทางจากผนัง ซึ่งเรียกว่าเลขเรย์โนลด์ปั่นป่วน, Re_y (turbulent Reynolds number) ซึ่งมีนิยามเป็น

$$Re_y = \frac{\rho y \sqrt{k}}{\mu} \quad (3.89)$$

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) ซึ่งเสนอโดย Wolfstein (1969) จะถูกนำมาใช้ ซึ่งมีเพียงสมการ k เท่านั้นที่ถูกใช้ในบริเวณนี้ โดยที่ค่าความหนืดปั่นป่วน, μ_t จะคำนวณจากสมการ

$$\mu_{t,2layer} = \rho C_\mu l_\mu \sqrt{k} \quad (3.90)$$

เมื่อ l_μ คือค่าบ่งชี้ลักษณะเชิงขนาด (length scale) คำนวณจากสมการที่เสนอโดย Chen and Patel (1988)

$$l_\mu = y C_\ell^* \left(1 - e^{-Re_y/A_\mu}\right) \quad (3.91)$$

นิยามของการไหล 2 ชั้น ผสมผสานกันอย่างราบรื่นกับการไหลที่เลขเรย์โนลด์สูง และค่าของ μ_t สำหรับการไหลด้านนอกมีสมการที่เสนอโดย Jongen (1992)

$$\mu_{t,enh} = \lambda_\epsilon \mu_t + (1 - \lambda_\epsilon) \mu_{t,2layer} \quad (3.92)$$

เมื่อค่า μ_t สำหรับการไหลที่เลขเรย์โนลด์สูงถูกกำหนดไว้ในแบบจำลอง $k-\epsilon$ และนอกจากนี้ฟังก์ชันการผสมผสาน (blending function), λ_ϵ ถูกกำหนดให้เท่ากับหนึ่งสำหรับบริเวณที่ไกลจากผนัง และมีค่าเท่ากับศูนย์สำหรับบริเวณที่อยู่ใกล้กับผนังมาก ซึ่งฟังก์ชันการผสมผสานมีสมการเป็น

$$\lambda_\epsilon = \frac{1}{2} \left[1 + \tanh\left(\frac{Re_y - Re_y^*}{A}\right) \right] \quad (3.93)$$

ค่าคงที่ A หาจากสมการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A = \frac{|\Delta Re_y|}{\tanh(0.98)} \quad (3.94)$$

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

$$\varepsilon = \frac{k^{3/2}}{l_\varepsilon} \quad (3.95)$$

ค่า l_ε คำนวณจากสมการ

$$l_\varepsilon = y C_l^* \left(1 - e^{-Re_y/A_\varepsilon}\right) \quad (3.96)$$

ถ้าโดเมนการไหลทั้งหมดอยู่ในบริเวณที่ได้รับอิทธิพลของความหนืด ($Re_y < 200$) ค่า ε จะไม่ได้คำนวณมาจากการแก้สมการการเคลื่อนย้าย แต่จะใช้ค่าในสมการที่ (3.95) ค่าคงที่ซึ่งอยู่ในสมการค่าข้างลักษณะเชิงขนาด มีดังนี้

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

3.7.2 การจำลองการไหลใกล้ผนังด้วยฟังก์ชันผนังเสริม

วิธีฟังก์ชันผนังเสริม (enhanced wall function) ซึ่งถูกใช้ในแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ SST $k-\omega$ เป็นวิธีที่สามารถนำไปใช้จำลองการไหลตลอดทั่วบริเวณที่ใกล้กับผนัง ซึ่งเสนอโดย Kader (1981) นั่นคือการไหลในชั้นย่อยหนืด ชั้นบัฟเฟอร์ และบริเวณการไหลแบบปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์ ซึ่งมีสมการที่สำคัญสำหรับกฎของผนังในสมการที่ (3.12) โดยการผสมผสานระหว่างชั้นการไหลแบบราบเรียบและปั่นป่วน ซึ่งมีสมการเป็น

$$u^+ = e^\Gamma u_{\text{lam}}^+ + e^{\frac{1}{\Gamma}} u_{\text{turb}}^+ \quad (3.97)$$

ฟังก์ชันการผสมผสานกำหนดโดย

$$\Gamma = -\frac{a(y^+)^4}{1+by^+} \quad (3.98)$$

ค่า $a=0.01, b=5$ ค่า u_{lam}^+ และ u_{turb}^+ คือกฎของผนังสำหรับการไหลแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วนตามลำดับ โดยที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$u_{\text{lam}}^+ = y^+ \left(1 + \frac{\alpha}{2} y^+ \right) \quad (3.99)$$

และ u_{turb}^+ คำนวณจาก

$$\frac{du_{\text{turb}}^+}{dy^+} = \frac{1}{\kappa y^+} [S^+(1 - \beta u^+ - \gamma (u^+)^2)]^{1/2} \quad (3.100)$$

เมื่อ

$$S^+ = \begin{cases} 1 + \alpha y^+ & \text{for } y^+ < y_s^+ \\ 1 + \alpha y_s^+ & \text{for } y^+ \geq y_s^+ \end{cases} \quad (3.101)$$

โดยที่ค่า $y_s^+ = 60$ และ

$$\alpha \equiv \frac{\nu_w}{\tau_w u^+} \frac{dp}{dx} = \frac{\mu}{\rho^2 (u^*)^3} \frac{dp}{dx} \quad (3.102)$$

$$\beta \equiv \frac{\sigma_t q_w u^+}{c_p \tau_w T_w} = \frac{\sigma_t q_w}{\rho c_p u^* T_w} \quad (3.103)$$

$$\gamma \equiv \frac{\sigma_t (u^*)^2}{2 c_p \tau_w} \quad (3.104)$$

3.7.3 เงื่อนไขค่าขอบของแบบจำลองความปั่นป่วน

เงื่อนไขค่าขอบของแบบจำลองความปั่นป่วนแบ่งได้เป็น เงื่อนไขค่าขอบที่ผนังและเงื่อนไขทางเข้า มีรายละเอียดของการกำหนดค่าดังนี้

3.7.3.1 เงื่อนไขค่าขอบที่ผนัง

สำหรับแบบจำลอง $k-\varepsilon$ สมการของค่า k ที่ถูกคำนวณในโดเมนของการไหลและรวมถึงเซลล์ที่ติดกับผนัง เงื่อนไขขอบของค่า k ที่ติดกับผนังมีสมการเป็น

$$\frac{\partial k}{\partial n} = 0 \quad (3.105)$$

เมื่อค่า n คือพิกัดของตำแหน่งที่ตั้งฉากกับผนัง

เทอมของการสร้างพลังงานจลน์, G_k และอัตราการสูญเสีย, ε ของเซลล์ที่ติดกับผนัง

ซึ่งเป็นเทอมของแหล่งกำเนิดในสมการ k ถูกคำนวณจากพื้นฐานของสมมติฐานความสมดุลเฉพาะที่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะโดยใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(local equilibrium hypothesis) ภายใต้สมมติฐานนี้ การสร้างค่า k และอัตราการสูญเสียของมัน ถูกสมมุติว่าเท่ากันในปริมาตรควบคุมที่ติดกับผนัง ดังนั้นการสร้างค่า k คำนวณได้จากสมการ

$$G_k = \tau_w \frac{\partial U}{\partial y} = \tau_w \frac{\tau_w}{\kappa \rho C_\mu^{1/4} k_P^{1/2} y_P} \quad (3.106)$$

ค่า ε คำนวณได้จากสมการ

$$\varepsilon_P = \frac{C_\mu^{3/4} k_P^{3/2}}{\kappa y_P} \quad (3.107)$$

สมการ ε ไม่ได้ถูกคำนวณที่เซลล์ที่ติดกับผนัง แต่แทนที่การคำนวณด้วยการใช้สมการที่ (3.95) และสังเกตได้ว่าเงื่อนไขขอบที่ผนังสำหรับการหาค่าผลเฉลี่ยของตัวแปร ซึ่งรวมทั้งความเร็วเฉลี่ย, อุณหภูมิ, k และ ε ถูกกำหนดโดยฟังก์ชันผนัง ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องระบุค่าเหล่านี้ที่ผนัง

3.7.3.1 เงื่อนไขทางเข้า

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

$$k = \frac{3}{2} (U_{ref} T_i)^2; \quad \varepsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{\ell}; \quad \ell = 0.07D \quad (3.108)$$

3.8 การจำลองการถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบปั่นป่วน

การถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบปั่นป่วน มีสมการที่จำลองขึ้นโดยใช้แนวคิดของความคล้ายคลึงของเรย์โนลด์ (Reynolds' analogy) ต่อการถ่ายเทโมเมนตัมของความปั่นป่วน ดังนั้นสมการพลังงานที่ถูกสร้างขึ้น สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (U_i (\rho E + p)) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (3.109)$$

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

3.8.1 แบบจำลอง $k-\varepsilon$ มาตรฐานและแบบ $k-\omega$

สำหรับการจำลองการถ่ายเทความร้อนของแบบจำลองความปั่นป่วน $k-\varepsilon$ มาตรฐานและแบบ $k-\omega$ นั้นค่า k_{eff} มีสมการคือ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่วารณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$k_{eff} = k + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \quad (3.110)$$

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

3.8.2 แบบจำลอง RNG $k-\varepsilon$

สำหรับการจำลองการถ่ายเทความร้อนของแบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k-\varepsilon$ นั้นค่า k_{eff} มีสมการคือ

$$k_{eff} = \alpha c_p \mu_{eff} \quad (3.111)$$

โดยที่ค่า α นั้นคำนวณได้จากสมการที่ (3.27) แต่สำหรับค่า α_0 นั้นคำนวณจากสมการ $\alpha_0 = 1/Pr = k/\mu c_p$

จะสังเกตได้ว่าค่า α เปลี่ยนแปลงไปตามค่า μ/μ_{eff} ดังที่ปรากฏอยู่ในสมการที่ (3.27) ซึ่งเป็นข้อดีของแบบจำลอง RNG $k-\varepsilon$ และมีหลักฐานบ่งชี้ว่าการวิเคราะห์โดยใช้สมการที่ (3.27) มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองเมื่อค่า Pr_t เปลี่ยนแปลงไปตามค่า Pr และความปั่นป่วน โดยที่สมการที่ (3.27) นี้ใช้งานได้ดีสำหรับค่า Pr ในช่วงที่กว้างมาก ซึ่งสามารถคำนวณการถ่ายเทความร้อนได้สำหรับการไหลในบริเวณเลขเรย์โนลด์ส์ต่ำ สมการที่ (3.27) นี้ทำนายผลการเปลี่ยนแปลงได้อย่างราบรื่นของเลขพรานด์ยังผลผกผันจากค่า $\alpha = 1/Pr$ ในบริเวณการไหลที่ได้รับอิทธิพลจากความหนืดของของไหลไปสู่ค่าของความปั่นป่วน ($\alpha = 1.393$) ในบริเวณการไหลปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์

3.9 การไหลแบบภายในและการถ่ายเทความร้อน

การไหลแบบภายใน เช่นการไหลในช่องทางไหล หรือการไหลในท่อที่มีหน้าตัดรูปแบบต่างๆ มีเนื้อหาพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการไหลแบบปั่นป่วนและการถ่ายเทความร้อนดังนี้

3.9.1 สถานะการไหล

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

สำหรับการไหลภายในนั้น เลขเรย์โนลด์สำหรับการไหลกำหนดโดย

$$Re = \frac{\rho u_0 D}{\mu} \quad (3.112)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ u_0 เป็นความเร็วเฉลี่ยภายในท่อ และ D คือความยาวบ่งลักษณะของช่องทางไหลหรือเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (hydraulic diameter) มีนิยามเป็น

$$D = \frac{4A_c}{P} \quad (3.113)$$

เมื่อค่า A_c และ P เป็นพื้นที่หน้าตัดและเส้นรอบรูปของหน้าตัดตามลำดับ

โดยทั่วไปสำหรับการไหลในท่อผิวเรียบ เลขเรย์โนลด์วิกฤติของการเปลี่ยนแปลงไปเป็นการไหลปั่นป่วน เริ่มต้นจาก $Re_D > 4000$ และความยาวของช่วงบริเวณทางเข้าสำหรับการปรับตัวหาได้จากสมการ

$$\left(\frac{L_c}{D}\right)_{\text{urb}} \approx 4.4 Re_D^{1/6} \quad (3.114)$$

3.9.2 ตัวประกอบความเสียดทาน

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

$$f_{Darcy} = \frac{(\Delta p / L) D}{\rho u_0^2 / 2} \quad (3.115)$$

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

$$f = \frac{f_{Darcy}}{4} \quad (3.116)$$

3.9.3 สภาวะการถ่ายเทความร้อน

ถ้าของไหลที่มีอุณหภูมิสม่ำเสมอไหลเข้าไปในท่อโดยมีอุณหภูมิแตกต่างจากอุณหภูมิที่ผิวแล้ว การพาความร้อนจะเกิดขึ้นและชั้นขีดผิวของความร้อนจะเริ่มก่อตัวขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าสภาวะที่ผิวของท่อคงที่โดยอาจเป็นอุณหภูมิผิว, T_s คงที่ หรือฟลักซ์ความร้อนที่ผิว, q_s'' คงที่ สภาวะพัฒนาอย่างสมบูรณ์เชิงความร้อน(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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ $q_s'' = h(T_s - T_m)$ เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประ (3.117) ในการคำนวณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ T_s คืออุณหภูมิพื้นผิว
 T_m คืออุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลที่หน้าตัดของช่องทางไหล

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

3.9.4 สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์เชิงความร้อน

เนื่องจากการพาความร้อนเกิดขึ้นจริงระหว่างผิวและของไหล นั่นคืออุณหภูมิของของไหลต้องเปลี่ยนแปลงตามระยะ x ซึ่งสภาวะการปรับตัวอย่างสมบูรณ์แล้วของอุณหภูมิจะไม่เคยเกิดขึ้นเลย ปรากฏการณ์นี้จะต้องจัดรูปใหม่ให้อยู่ในรูปไร้มิติของอุณหภูมิ เพื่อให้ได้เงื่อนไขของสภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์เชิงความร้อน

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

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{T_s - T}{T_s - T_m} \right] = 0 \quad (3.118)$$

โดยที่ T คืออุณหภูมิของไหลที่ตำแหน่งใดๆ

เงื่อนไขที่กำหนดให้สำหรับสมการ (3.118) ซึ่งจะเกิดขึ้นในช่องทางไหลอาจจะเป็นกรณี q_s'' คงที่หรือ T_s คงที่ก็ได้ เงื่อนไขที่ผิวแบบนี้เกิดขึ้นมากในทางวิศวกรรม เช่น ผนังท่อซึ่งได้รับความร้อนจากไฟฟ้าหรือผิวภายนอกที่ได้รับจากการแผ่รังสีอย่างสม่ำเสมอจะเป็นกรณีของ q_s'' คงที่ ส่วนกรณี T_s คงที่จะเกิดขึ้นถ้ามีการเปลี่ยนสถานะ (เนื่องจากการเดือดหรือการควบแน่น) เกิดขึ้นที่ผิวภายนอก

3.9.5 ค่าตัวประกอบของการเพิ่มทางความร้อน

Sripattanapipat and Promvongse (2009) นำเสนอค่าตัวประกอบของการเพิ่มทางความร้อนหรือค่าสมรรถนะของการเพิ่มขึ้นทางความร้อน, TEF ซึ่งคำนวณได้จาก

$$TEF = \frac{(Nu / Nu_o)}{(f / f_o)^{1/3}} \quad (1.1)$$

3.10 การคำนวณการไหลแบบชั่วเป็นช่วง

เพื่อต้องการลดจำนวนของกริดเซลล์และเวลาที่ใช้ในการคำนวณสำหรับการวิเคราะห์การไหล และการถ่ายเทความร้อนในช่วงที่มีการพัฒนาย่างสมบูรณ์ ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการคำนวณการไหลแบบชั่วเป็นช่วง ซึ่งสนใจทั้งการเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบซ้ำเป็นช่วง(periodic flow) ซึ่งการวิเคราะห์การไหลลักษณะนี้เกิดขึ้นเมื่อ รูปทรงทางเรขาคณิต และรูปแบบที่ต้องการหาค่าผลเฉลยของการไหลและการถ่ายเทความร้อน โดยธรรมชาติแล้วมีการซ้ำ เป็นช่วงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งการไหลแบบซ้ำเป็นช่วงสามารถแบ่งได้เป็น การไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความเร็ว และการไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความร้อน โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.10.1 การไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความเร็ว

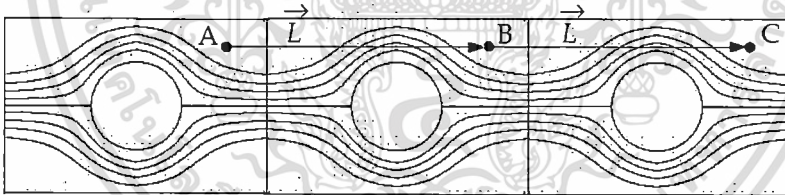
การไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความเร็วเป็นลักษณะการไหลเมื่อมีค่าความดันตกคร่อมเกิดขึ้นซ้ำๆ ขอบเขตการไหลตามแนวทิศทางการไหล โดยเกิดขึ้นกับการไหลที่พัฒนาอย่างสมบูรณ์ ลักษณะการไหลเช่นนี้มีการเปลี่ยนแปลงทางเรขาคณิตที่ซ้ำกันไปตามแนวทิศทางการไหล โดยมีรูปแบบของการไหลเกิดขึ้นซ้ำกับเป็นวงรอบ สภาวะการไหลที่ซ้ำเป็นช่วงนี้เกิดขึ้นหลังจากมีช่วงของความยาวขาเข้าที่เพียงพอ โดยขึ้นอยู่กับเลขเรย์โนลด์ของการไหลและรูปร่างทางเรขาคณิตของช่องทางไหล

3.10.1.1 นิยามของความเร็วมืดเมื่อมีการไหลซ้ำเป็นช่วง

สภาวะของการไหลซ้ำเป็นช่วงเกิดขึ้นเมื่อรูปแบบการไหลเกิดขึ้นซ้ำกันในช่วงการไหล L โดยมีค่าความดันตกคร่อมคงที่ในช่วงโมดูลของการไหลตามแนวทิศทางการไหล นิยามของการไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความเร็ว ถูกกำหนดโดยค่าของความเร็วย่อยนั้นจะซ้ำกันโดยตัวมันเอง ดังสมการ

$$u_i(\vec{r}) = u_i(\vec{r} + \vec{L}) = u_i(\vec{r} + 2\vec{L}) = \dots \quad i = 1, 2, 3 \quad (3.119)$$

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



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างของรูปทรงเรขาคณิตที่ซ้ำเป็นช่วง

จากรูปสามารถแสดงเป็นความสัมพันธ์ได้ว่า

$$\begin{aligned} u_A &= u_B = u_C & \tilde{p}_A &= \tilde{p}_B = \tilde{p}_C \\ v_A &= v_B = v_C & P_B - P_A &= P_C - P_B \end{aligned}$$

3.10.1.2 นิยามของความดันเมื่อมีการไหลซ้ำเป็นช่วง

สำหรับการไหลแบบมีความหนืด ค่าของความดันจะไม่ซ้ำเป็นช่วงตามนิยามของความเร็วดังในสมการที่ (3.119) แต่ค่าของความดันตกคร่อมช่วงของการไหลหรือโมดูลจะมีค่าเท่ากัน แสดงได้ดังสมการ

$$\Delta p = p(\bar{r}) - p(\bar{r} + \bar{L}) = p(\bar{r} + \bar{L}) - p(\bar{r} + 2\bar{L}) = \dots \quad (3.120)$$

ค่าเกรเดียนต์ของความดันเฉพาะที่สามารถแยกออกได้เป็นสองส่วนคือ ส่วนของเกรเดียนต์ที่ซ้ำเป็นช่วง, $\bar{\nabla} p(\bar{r})$ และส่วนของเกรเดียนต์ของการเปลี่ยนแปลงเชิงเส้น, $\beta \frac{\bar{L}}{|\bar{L}|}$ โดยแสดงได้ดัง

สมการ

$$\bar{\nabla} p(\bar{r}) = \beta \frac{\bar{L}}{|\bar{L}|} + \bar{\nabla} \tilde{p}(\bar{r}) \quad (3.121)$$

เมื่อค่า $\tilde{p}(\bar{r})$ คือความดันที่ซ้ำกันเป็นช่วง(periodic pressure) และค่า $\beta|\bar{r}|$ คือส่วนของการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นของความดัน โดยที่ค่าความดันที่ซ้ำกันเป็นช่วงคือผลต่างของความดันทางด้านซ้ายกับความดันที่ทางออกซึ่งเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้น และส่วนของการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นของความดันเป็นผลของแรงที่กระทำต่อของไหลในสมการโมเมนตัม ซึ่งค่า β นั้นจะเป็นค่าที่ไม่ทราบมาก่อนและได้ค่ามาจากการคำนวณซ้ำจนกระทั่งการไหลมีค่าของอัตราการไหลเชิงมวลเท่ากับค่าที่กำหนดไว้ตอนเริ่มต้น

3.10.2 การไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความร้อน

การไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความร้อนตามแนวทิศทางการไหล สามารถเกิดขึ้นได้สำหรับการระบุพลักซ์ความร้อนคงที่ที่ผนัง ในการไหลเช่นนี้ค่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิระหว่างขอบเขตที่ซ้ำเป็นช่วงจะมีค่าคงที่ และสัมพันธ์กับการเพิ่มความร้อนสุทธิจากขอบเขตของผนัง

เมื่อการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นซ้ำกันเป็นช่วง สนามอุณหภูมิจะมีความคล้ายคลึงกับสนามของความดันในกรณีของการไหลเป็นช่วงเชิงความเร็ว โดยมีสมการดังนี้

$$\frac{T(\bar{r} + \bar{L}) - T(\bar{r})}{L} = \frac{T(\bar{r} + 2\bar{L}) - T(\bar{r} + \bar{L})}{L} = \sigma \quad (3.122)$$

เมื่อค่า σ คือเกรเดียนต์ของอุณหภูมิ ซึ่งสามารถเขียนได้ในเทอมของการเพิ่มความร้อนทั้งหมดภายในโดเมน, Q ดังสมการ

$$\sigma = \frac{Q}{mc_p L} = \frac{T_{\text{bulk,exit}} - T_{\text{bulk,inlet}}}{L} \quad (3.123)$$

เมื่อค่า m คืออัตราการไหลเชิงมวลที่กำหนดให้

และค่า T_{bulk} มีนิยามโดย

$$T_{\text{bulk}} = \frac{\int T |\rho \vec{u} \cdot d\vec{A}|}{\int |\rho \vec{u} \cdot d\vec{A}|} \quad (3.124)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าในภาคใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ T_{bulk} อินทิเกรตตลอดพื้นที่หน้าตัดของโดเมนการไหลที่เข้าเป็นช่วง, A

3.11 รูปแบบทั่วไปของสมการควบคุมการไหล

สมการควบคุมการไหลทั้งหมดสามารถจัดรูปแบบใหม่และแสดงในรูปแบบมาตรฐานซึ่งได้รวมถึงเทอมของการพา(convection term) เทอมของการแพร่(diffusion term) และเทอมของการก่อกำเนิด(source term) สำหรับการไหล 3 มิติ แสดงได้ดังนี้

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho \phi \vec{u}) = \vec{\nabla} \cdot (\Gamma_{\phi} \vec{\nabla} \phi) + S_{\phi} \quad (3.125)$$

เมื่อ ϕ แสดงถึงตัวแปรแสดงคุณสมบัติใดๆ ของของไหล และเรียกสมการที่ (3.125) ว่า สมการการเคลื่อนย้ายของคุณสมบัติ ϕ ซึ่งพบว่าสามารถอธิบายการเคลื่อนย้ายของปริมาณทางฟิสิกส์ที่แตกต่างกันได้ คือเทอมของการพาอยู่ด้านซ้ายมือของสมการ เทอมของการแพร่ (Γ_{ϕ} คือสัมประสิทธิ์การแพร่) และเทอมของการก่อกำเนิด (S_{ϕ}) อยู่ด้านขวามือตามลำดับ โดยได้ซ่อนเทอมซึ่งไม่เหมือนกันไว้ในเทอมของการก่อกำเนิดนั่นเอง

สมการที่ (3.125) สามารถใช้เป็นจุดเริ่มต้นสำหรับขั้นตอนการคำนวณในวิธีปริมาตรสืบเนื่อง โดยกำหนด ϕ เท่ากับ 1 (สำหรับสมการความต่อเนื่อง) U , V และ W (สำหรับสมการโมเมนต์) i หรือ T (สำหรับสมการพลังงาน) และ k , ϵ หรือ k , ω (สำหรับสมการแบบจำลองความปั่นป่วน) และเลือกค่าที่เหมาะสมสำหรับสัมประสิทธิ์การแพร่ Γ_{ϕ} และเทอมของการก่อกำเนิด ซึ่งจะได้รูปแบบพิเศษของสมการอนุพันธ์ย่อย(Partial Differential Equations) ทั้ง 7 สมการ ประกอบด้วยสมการอนุรักษ์มวล สมการโมเมนต์มี 3 สมการ สมการพลังงาน และสมการแบบจำลองความปั่นป่วนมี 2 สมการ ทั้งนี้ขั้นตอนหลักของวิธีปริมาตรสืบเนื่องคือการอินทิเกรตสมการ (3.125) ทัวทั้งปริมาตรควบคุม(control volume, CV) 3 มิติ ซึ่งทำได้

$$\int_{CV} \vec{\nabla} \cdot (\rho \phi \vec{u}) dV = \int_{CV} \vec{\nabla} \cdot (\Gamma_{\phi} \vec{\nabla} \phi) dV + \int_{CV} S_{\phi} dV \quad (3.126)$$

การอินทิเกรตเชิงปริมาตรในเทอมที่สองด้านซ้ายมือคือเทอมการพา และในเทอมแรกทางขวามือคือเทอมของการแพร่ โดยสามารถเขียนได้ใหม่เป็นการอินทิเกรตเชิงพื้นผิวของปริมาตรควบคุม โดยประยุกต์ทฤษฎี Gauss' divergence กับสมการ (3.126) ทำให้สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\int_A \rho \phi \vec{u} \cdot d\vec{A} = \int_A \Gamma_{\phi} \vec{\nabla} \phi \cdot d\vec{A} + \int_{CV} S_{\phi} dV \quad (3.127)$$

3.12 สมการแปลงรูป

สมการที่ (3.127) นำไปใช้คำนวณสำหรับในแต่ละปริมาตรควบคุมหรือเซลล์ในโดเมนของการคำนวณ ดังรูปที่ 3.2 โดยใช้ระเบียบวิธีที่เรียกว่าระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่องหรือไฟไนต์วอลุ่ม เอกสารนี้เป็นสมการแปลงรูป(Discretised equation) ในแต่ละเซลล์แสดงได้ดังสมการไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณ ไม่ว่าจะเป็นการคำนวณเชิงเส้น อีกรวมทั้งห้ามมิให้เปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sum_f^{N_{faces}} \rho_f \bar{n}_f \phi_f \cdot \bar{A}_f = \sum_f^{N_{faces}} \Gamma_\phi \bar{\nabla} \phi_f \cdot \bar{A}_f + S_\phi V \quad (3.128)$$

เมื่อ

 N_{faces}

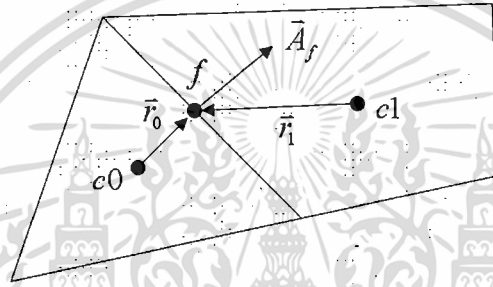
= จำนวนหน้าของผิวเซลล์ที่ล้อมรอบเซลล์

 ϕ_f = ค่าของ ϕ ที่ถูกพาผ่านผิวเซลล์ f $\rho_f \bar{n}_f \cdot \bar{A}_f$

= อัตราการไหลเชิงมวลที่ผ่านผิวเซลล์

 \bar{A}_f = เวกเตอร์พื้นที่ผิวของ f , $|\bar{A}_f| = |A_x \hat{i} + A_y \hat{j}|$ ในแบบ 2 มิติ $\bar{\nabla} \phi_f$ = เกรเดียนต์ของ ϕ ที่ผิวเซลล์ f V

= ปริมาตรของเซลล์



รูปที่ 3.2 ปริมาตรควบคุมสำหรับใช้อธิบายสมการแปลงรูป

สมการแปลงรูปที่ใช้ในการคำนวณเพื่อหาผลเฉลย มีรูปทั่วไปที่เหมือนกันดังแสดงไว้ในสมการที่ (3.128) โดยที่ในสมการนี้มีตัวแปรที่ไม่ทราบค่าคือ ϕ ที่ศูนย์กลางเซลล์และค่าของตัวแปรที่อยู่ล้อมรอบเซลล์นั้น โดยทั่วไปแล้วสมการนี้จะเป็นสมการแบบไม่เชิงเส้น(non-linear) การทำสมการนี้ให้เป็นเชิงเส้น(linearized) สามารถเขียนได้เป็น

$$a_p \phi = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (3.129)$$

เมื่อตัวห้อย nb แสดงถึงเซลล์ข้างเคียง ค่า a_p และ a_{nb} คือสัมประสิทธิ์ความเป็นเชิงเส้น (linearized coefficients) สำหรับค่า ϕ และ ϕ_{nb} ตามลำดับ ซึ่งจำนวนค่าข้างเคียง (ϕ_{nb}) ของแต่ละเซลล์ขึ้นอยู่กับลักษณะของกริดเซลล์ที่ใช้และโดยทั่วไปจะเท่ากับจำนวนผิวเซลล์ที่ล้อมรอบเซลล์นั้น

สมการเดียวกันนี้สามารถเขียนขึ้นได้สำหรับแต่ละเซลล์ในโดเมนการไหล ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ในกลุ่มของสมการพีชคณิตเหล่านี้จะถูกจัดเก็บในเมทริกซ์สัมประสิทธิ์ สำหรับกลุ่มของสมการเชิงเส้นเหล่านี้อาจกล่าวได้ว่า การสร้างระบบสมการแปลงรูปนี้ขึ้นมาเพื่อทำให้สมการทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนอยู่ในรูปของสมการพีชคณิตอย่างง่าย และสามารถนำไปใช้กับการคำนวณด้วยระบบคอมพิวเตอร์ได้ สมการแปลงรูปนี้จะถูกนำมาประกอบเป็นระบบสมการขนาดใหญ่ ซึ่งขนาดของสมการขึ้นอยู่กับจำนวนเซลล์ที่ถูกสร้างขึ้น ระบบสมการขนาดใหญ่นี้สามารถเขียนอยู่ในรูปของระบบเมทริกซ์ได้ และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการหาคำตอบของระบบเมทริกซ์ขนาดใหญ่จะใช้วิธีการแก้ระบบสมการเชิงเส้น ด้วยระเบียบวิธีการทำซ้ำ

โดยทั่วไปค่าของตัวแปร ϕ จะเป็นค่าที่ศูนย์กลางเซลล์ แต่อย่างไรก็ตามค่าที่ผิวเซลล์, ϕ_f ซึ่งต้องการคำนวณสำหรับเทอมของการพาในสมการที่ (3.128) จะได้มาจากการประมาณค่าที่ศูนย์กลางเซลล์ ทำได้โดยใช้วิธีการประมาณค่าต้นลม (upwind scheme) โดยอ้างอิงจาก FLUENT Incorporated.(2006) ซึ่งวิธีการประมาณค่าต้นลมคือวิธีที่ค่า ϕ_f ได้มาจากค่าของเซลล์ที่อยู่ต้นลม โดยสัมพันธ์กับทิศทางของความเร็วที่ตั้งฉาก u_n ของสมการที่ (3.128) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้ทั้งวิธีการประมาณค่าต้นลมอันดับหนึ่ง (first-order upwind, FOU), การประมาณค่าต้นลมอันดับสอง (second-order upwind, SOU) และแบบ QUICK เพื่อใช้เปรียบเทียบถึงความเหมาะสมของแต่ละวิธี ซึ่งผู้ที่สนใจรายละเอียดเพิ่มเติมสามารถอ่านได้จาก Versteeg and Malalasekera (2007) และสำหรับเทอมของการแพร่จะใช้ผลต่างศูนย์กลาง(central-differenced) ซึ่งโดยปกติแล้วมีค่าความแม่นยำอันดับสอง

3.12.1 การประมาณค่าเทอมของการพา

วิธีการประมาณค่า ϕ_f ซึ่งอยู่ในเทอมของการพาที่ใช้ในงานวิเคราะห์สำหรับงานวิจัยนี้ แสดงได้ดังต่อไปนี้

3.12.1.1 วิธีการประมาณค่าต้นลมอันดับหนึ่ง

สำหรับวิธีการประมาณค่าต้นลมอันดับหนึ่งนั้น ค่าที่ผิวเซลล์หาโดยการสมมติว่าค่าที่ศูนย์กลางเซลล์ของตัวแปรใดๆ ในสนามการไหล จะแสดงเป็นค่าเฉลี่ยของเซลล์และถือว่าเป็นค่าเดียวกันตลอดทั้งเซลล์ และปริมาณที่ผิวเซลล์นี้จะจะเป็นค่าเดียวกันกับค่าของเซลล์ ดังนั้นเมื่อใช้วิธีการประมาณค่าต้นลมอันดับหนึ่ง ค่าของผิวเซลล์ ϕ_f จะถูกกำหนดให้เท่ากับค่า ϕ ที่ศูนย์กลางเซลล์ของเซลล์ที่อยู่ต้นทางการไหล

3.12.1.2 วิธีการประมาณค่าต้นลมอันดับสอง

วิธีการประมาณค่าต้นลมอันดับสองนั้น ปริมาณที่ผิวเซลล์จะถูกคำนวณในระดับความแม่นยำที่สูงขึ้น โดยค่าที่ผิวเซลล์นั้นจะหาได้จากการใช้อนุกรมขยายของเทเลอร์ กระจายค่าของศูนย์กลางเซลล์รอบๆ จุดเซนทรอยด์ของเซลล์ ดังนั้นค่าที่ผิวเซลล์ ϕ_f ถูกคำนวณโดยใช้สมการดังนี้

$$\phi_{f,SOU} = \phi + \nabla\phi \cdot \vec{r} \quad (3.130)$$

เมื่อค่า ϕ และ $\nabla\phi$ คือค่าที่ศูนย์กลางเซลล์และค่าเกรเดียนต์ของ ϕ ที่ต้นทางการไหลของเซลล์ และ \vec{r} คือค่าเวกเตอร์บอกตำแหน่งจากจุดเซนทรอยด์ของเซลล์ต้นทางการไหลไปสู่จุดเซนทรอยด์ของผิวเซลล์ ซึ่งสมการนี้ต้องการค่าเกรเดียนต์ $\nabla\phi$ ในแต่ละเซลล์ และนอกจากนี้การหาค่าเกรเดียนต์ $\nabla\phi$ ยังได้ถูกนำไปใช้ในเทอมของการแพร่อีกด้วย ซึ่งหาได้จากทฤษฎี Green-Gauss โดยวิธีนี้เป็นวิธีการคำนวณค่าเกรเดียนต์ที่ศูนย์กลางเซลล์ c_0 มีสมการดังนี้

$$(\nabla\phi)_{c_0} = \frac{1}{V} \sum_f \phi_f \vec{A}_f \quad (3.131)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ () เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่มีกรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

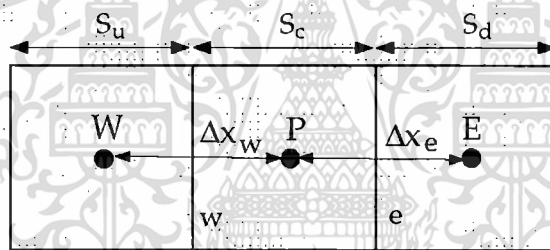
เมื่อค่า $\bar{\phi}_f$ คือค่า ϕ ของจุดเซนทรอยด์ของผิวเซลล์ ซึ่งผลรวมนี้เป็นการรวมตลอดทั่วทั้งผิวเซลล์ที่ล้อมรอบเซลล์นั้น โดยที่ค่า $\bar{\phi}_f$ นั้นคำนวณจากสมการ:

$$\bar{\phi}_f = \frac{\phi_{c0} + \phi_{c1}}{2} \quad (3.132)$$

3.12.1.3 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

$$\phi_e = \theta \left[\frac{S_d}{S_c + S_d} \phi_P + \frac{S_d}{S_c + S_d} \phi_E \right] + (1 - \theta) \left[\frac{S_u + 2S_c}{S_u + S_c} \phi_P - \frac{S_c}{S_u + S_c} \phi_W \right] \quad (3.133)$$



รูปที่ 3.3 ปริมาตรควบคุมแบบ 1 มิติ

เมื่อค่า $\theta=1$ สมการที่ (3.133) จะกลายเป็นสมการของการประมาณค่าในช่วงที่ศูนย์กลางอันดับสอง (central second-order interpolation) ในขณะที่ $\theta=0$ จะได้สมการของการประมาณค่าต้นลมอันดับสอง ซึ่งโดยทั่วไปสำหรับวิธีการประมาณค่าแบบ QUICK นั้นจะกำหนดให้ $\theta=1/8$

3.12.2 การแปลงรูปสมการโมเมนต์

สมการสำหรับการแปลงรูปสมการโมเมนต์ จะใช้สมการที่ (3.129) ยกตัวอย่างเช่น สมการโมเมนต์ในแนวแกน x จะกำหนดให้ $\phi = u$ ซึ่งจะได้

$$a_p u = \sum_{nb} a_{nb} u_{nb} + \sum p_f A \cdot i \quad (3.134)$$

สำหรับระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมจะพิจารณาอัตราเปลี่ยนแปลงความดัน เป็นเทอมแหล่งกำเนิด (source term) เนื่องจากความสัมพันธ์ที่ควบคู่กัน (couple relation) ระหว่างสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่รับประกันใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนุรักษมวลและสมการนาเวียร์-สโตกส์ด้วยตัวแปรความเร็ว ดังนั้นหากทราบค่าของความดันที่ถูกต้องแล้ว ผลเฉลยของสมการนาเวียร์-สโตกส์แบบอัตโนมัติจะต้องสอดคล้องกับสมการอนุรักษมวลด้วย

ถ้าค่าของสนามความดันและอัตราการไหลเชิงมวลนั้นทราบค่า สมการที่ (3.134) ก็จะสามารถแก้สมการหาค่าของสนามความเร็วได้ แต่ค่าของสนามความดันและอัตราการไหลเชิงมวลนั้นยังไม่ทราบค่ามาก่อนและจะต้องได้มาจากส่วนหนึ่งของผลเฉลย ซึ่งมีสิ่งสำคัญที่เกี่ยวข้องกับเรื่องของการเก็บค่าความดันและการแปลงรูปเทอมเกรเดียนต์ของความดัน โดยทั่วไปการหาค่าของสนามความดันจะใช้แบบแผนตำแหน่งร่วม (co-located scheme) ซึ่งเป็นการเก็บค่าของความเร็วและความดันที่ศูนย์กลางเซลล์ แต่อย่างไรก็ตามสมการที่ (3.134) ต้องการค่าของความดันที่ผิวเซลล์ที่อยู่ระหว่างเซลล์ c_0 และ c_1 ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ดังนั้นจึงต้องการแบบแผนการประมาณค่าในช่วงสำหรับการคำนวณค่าความดันที่ผิวเซลล์จากค่าที่ศูนย์กลางเซลล์

โดยทั่วไปแบบแผนในการประมาณค่าในช่วงของความดันที่ผิวเซลล์ สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ในสมการโมเมนตัม มีสมการเป็น

$$p_f = \frac{\frac{p_{c_0}}{a_{p,c_0}} + \frac{p_{c_1}}{a_{p,c_1}}}{\frac{1}{a_{p,c_0}} + \frac{1}{a_{p,c_1}}} \quad (3.135)$$

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

3.12.3 การแปลงรูปสมการความต่อเนื่อง

อินทิเกรตสมการความต่อเนื่องตลอดปริมาตรควบคุมดังรูปที่ 3.2 จะได้สมการแปลงรูปดังนี้

$$\sum_f^{N_{\text{faces}}} J_f A_f = 0 \quad (3.136)$$

เมื่อ $J_f = \rho u_n$ คือฟลักซ์ของมวลที่พุ่งผ่านผิว f โดยคำนวณจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าของความเร็วที่ผิว, \bar{u}_n กับค่าของความเร็วที่ศูนย์กลางเซลล์ และการประมาณค่าในช่วงของความเร็วที่ศูนย์กลางเซลล์ไปสู่ค่าที่ผิวเซลล์ในปัญหากระดานหมากรุกของความดัน จะมีวิธีการป้องกันการเกิดปัญหานี้โดยค่าของความเร็วที่ผิวจะไม่ได้คำนวณจากการเฉลี่ยแบบเชิงเส้น แต่จะทำการเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักโมเมนตัม (momentum-weighted averaging) ซึ่งตัวประกอบของการถ่วงน้ำหนัก จะมีพื้นฐานมาจากค่าสัมประสิทธิ์ a_p จากสมการที่ (3.129) 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
$$J_f = \hat{J}_f + d_f (p_{c0} - p_{c1}) \quad (3.137)$$

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

3.12.4 การคู่ควบของความเร็วและความดัน

หากทราบค่าสนามความดัน สมการโมเมนตัมที่แปลงรูปแล้วในสมการที่ (3.134) สามารถนำมาใช้ในการหาสนามการไหลได้ และถ้าสนามความดันมีความถูกต้องผลเฉลยของสนามการไหลที่คำนวณได้ก็จะเป็นไปตามกฎการอนุรักษ์มวล แต่ถ้าหากไม่ทราบค่าสนามความดันก็จำเป็นต้องหาวิธีการคำนวณค่าสนามความดัน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้กระบวนการวิธีแบบ SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ขั้นตอนการเดาและการแก้ไขค่าในการคำนวณหาค่าความดัน โดยอ้างอิงจาก FLUENT Incorporated. (2006) และสามารถอ่านเพิ่มเติมได้จาก Versteeg and Malalasekera (2007) ซึ่งในวิธีนี้จะเริ่มจากการเดาสนามความดัน ทำการหาคำตอบของสมการโมเมนตัมและสมการค่าแก้ของสนามความดันที่แปลงมาจากสมการความต่อเนื่อง เมื่อได้ค่าแก้ดังกล่าวแล้วนำมาปรับปรุงค่าของสนามความดันและสนามความเร็วได้ นำสนามความเร็วและสนามความดันที่ได้ใหม่นั้นไปใช้ในการป้อนเข้าในสมการโมเมนตัมและสมการค่าแก้ของความดันอีก และเมื่อทำซ้ำจนกระทั่งคำตอบทั้งหมดลู่เข้าก็จะได้สนามความเร็วและสนามความดันที่เป็นไปตามกฎการเคลื่อนย้ายโมเมนตัมและกฎการอนุรักษ์มวล

กระบวนการวิธีแบบ SIMPLE นั้น เริ่มต้นจากการเดาค่าสนามความดัน p^* ตลอดทั้งโดเมนการไหล จากนั้นจะทำการหาค่าฟลักซ์ที่ผิว J_f^* จากสมการที่ (3.137) ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$J_f^* = \hat{J}_f^* + d_f (p_{c0}^* - p_{c1}^*) \quad (3.138)$$

ซึ่งหากไม่สอดคล้องกับสมการความต่อเนื่อง จะดำเนินการแก้ไขโดยการนิยามเทอม J_f' ซึ่งเป็นผลต่างระหว่างค่าฟลักซ์ที่ผิวที่ถูกต้องกับค่าฟลักซ์ที่ผิวที่เดาขึ้น ดังนี้

$$J_f = J_f^* + J_f' \quad (3.139)$$

เพื่อให้สอดคล้องกับสมการความต่อเนื่อง วิธี SIMPLE จะตั้งสมมติฐานของเทอม J_f' ในรูป

$$J_f' = d_f (p'_{c0} - p'_{c1}) \quad (3.140)$$

เมื่อค่า p' คือค่าแก้ของความดัน

วิธีแบบ SIMPLE จะแทนค่าของสมการที่ (3.139) และ (3.140) ลงในสมการของความต่อเนื่องที่แปลงรูปแล้วคือสมการที่ (3.136) ซึ่งจะนำไปสู่สมการแปลงรูปของค่า p' ในเซลล์ ดังสมการ

$$a_p p' = \sum_{nb} a_{nb} p'_{nb} + b \quad (3.141)$$

เมื่อเทอมของแหล่งกำเนิด b คืออัตราการไหลสุทธิเข้าสู่เซลล์ แสดงได้ดังสมการ

$$b = \sum_f^{N_{faces}} J_f^* A_f \quad (3.142)$$

สมการค่าแก้ของความดัน (p') ดังในสมการที่ (3.141) สามารถแก้สมการได้โดยใช้วิธีระเบียบวิธีการทำซ้ำ และเมื่อได้ค่าของผลเฉลยแล้วค่าความดันของเซลล์และฟลักซ์ที่ผิวเซลล์ที่ถูกต้องคือ

$$p = p^* + \alpha_p p' \quad (3.143)$$

$$J_f = J_f^* + d_f (p'_{c0} - p'_{c1}) \quad (3.144)$$

โดยที่ค่า α_p คือตัวประกอบภายใต้การผ่อนคลาย (under-relaxation) สำหรับความดัน

3.13 การหาคำตอบของสมการแปลงรูป

ในหัวข้อที่ผ่านมาได้กล่าวถึงวิธีการแปลงรูปสมการควบคุมการไหล กระบวนการนี้ให้ผลลัพธ์เป็นระบบสมการพีชคณิตเชิงเส้นที่จำเป็นต้องแก้สมการเพื่อหาคำตอบ ความซับซ้อนและขนาดของกลุ่มสมการขึ้นอยู่กับมิติของปัญหา จำนวนของกริดเซลล์ และวิธีการแปลงรูป โดยทั่วไปการหาคำตอบของสมการพีชคณิตมีอยู่ 2 วิธีคือ วิธีตรงและวิธีอ้อมหรือเรียกว่าระเบียบวิธีการทำซ้ำ ตัวอย่างของวิธีตรงคือกฎของคราเมอร์ (Cramer's rule) และการกำจัดแบบเกาส์ (Gaussian Elimination) ซึ่งใช้ทรัพยากรของคอมพิวเตอร์ค่อนข้างมาก

ระเบียบวิธีการทำซ้ำมีพื้นฐานจากการประยุกต์ของลำดับขั้นตอนการแก้ปัญหาอย่างง่ายโดยเริ่มจากการเดาค่าของผลลัพธ์แล้วทำการคำนวณซ้ำจนนำไปสู่การลู่เข้าหาคำตอบ ซึ่งมีข้อดีคือเป็นวิธีการที่ประหยัดทรัพยากรของคอมพิวเตอร์ได้มาก ในงานวิจัยนี้หาคำตอบของระบบเมทริกซ์ขนาดใหญ่จากระเบียบวิธีที่มีอยู่ในโปรแกรม FLUENT 6.3 ซึ่งเป็นวิธีที่ตั้งอยู่บนพื้นฐานของการแก้ระบบสมการเชิงเส้นด้วยระเบียบวิธีการทำซ้ำแบบเกาส์-ไฮเซล (Gauss-Seidel method) ร่วมกับการใช้กริดผสมพีชคณิต (algebraic multigrid, AMG) เพื่อแก้ระบบสมการเชิงเส้นที่มีสมการคือ

$$a_{ij} x_j = b_i \quad (1.145)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระเบียบวิธีการทำซ้ำแบบเกาส์-ไซเดล สมการการกวาดแบบเดินหน้า (forward sweep) มีสมการเป็น

$$x_i^{k+1/2} = \left(b_i - \sum_{j<i} a_{ij} x_j^{k+1/2} - \sum_{j>i} a_{ij} x_j^k \right) / a_{ij} \quad (1.146)$$

เมื่อ $i=1, \dots, N$ และ N คือจำนวนของตัวแปร สำหรับสมการการกวาดแบบย้อนกลับ (backward sweep) มีสมการเป็น

$$x_i^{k+1} = \left(b_i - \sum_{j<i} a_{ij} x_j^{k+1/2} - \sum_{j>i} a_{ij} x_j^{k+1} \right) / a_{ij} \quad (1.147)$$

รายละเอียดของระเบียบวิธีการทำซ้ำและเนื้อหาต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับ AMG สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก FLUENT Incorporated. (2006) และ Versteeg and Malalasekera (2007)

เมื่อทำการคำนวณซ้ำจนค่าของตัวแปรต่างๆ ลู่เข้าสู่ผลลัพธ์ โดยมีค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้คือ ϵ ซึ่งเป็นเงื่อนไขของการหยุดการคำนวณซ้ำ แสดงดังสมการ

$$\left| \frac{x_i^{k+1} - x_i^k}{x_i^{k+1}} \right| \times 100 < \epsilon \quad (3.148)$$

3.14 โครงสร้างที่เชื่อมโยงกัน

กระแสวน (vortex) คือการเคลื่อนที่แบบหมุนวนของของไหลรอบบริเวณศูนย์กลาง สำหรับการแสดงให้เห็นภาพของกระแสวนในการไหลแบบ 3 มิติ นั้น มีหลายวิธีในการแสดงลักษณะของกระแสวนที่เกิดขึ้น ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการตรวจจับโครงสร้างที่เชื่อมโยงกัน (coherent structures) ที่มีพื้นฐานมาจากค่า λ_2 ซึ่งได้มีการนำเสนอไว้ในงานของ Jeong and Hussain (1995)

พวกเขาได้เสนอนิยามของกระแสวนในรูปแบบที่อ้างอิงนิยามของค่า λ_2 โดยแยกเทนเซอร์เกรเดียนต์ของความเร็ว (velocity gradient tensor), $\frac{\partial U_i}{\partial x_j}$ ออกเป็นสองส่วนดังสมการ

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.149)$$

เมื่อ

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.150)$$

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.151)$$

เมื่อเทนเซอร์ S_{ij} และ Ω_{ij} คือส่วนสมมาตรและส่วนไม่สมมาตรของเทนเซอร์เกรเดียนต์ของความเร็ว หรืออาจจะเรียกว่าเทนเซอร์ของอัตราการเสียรูป (rate of deformation tensor หรือ strain-rate tensor) และเทนเซอร์ของความวน (vorticity tensor) ตามลำดับ

พวกเขานิยามกระแสวนว่าเป็นบริเวณที่ถูกเชื่อมโยงกันเมื่อค่า $S_{ij}S_{ji} + \Omega_{ij}\Omega_{ji}$ มีค่าไอเกน (eigenvalues) 2 ค่าที่เป็นลบ เนื่องจากค่า $S_{ij}S_{ji} + \Omega_{ij}\Omega_{ji}$ เป็นจำนวนจริงและสมมาตร ดังนั้นจะมีค่าไอเกนเป็นจำนวนจริงเท่านั้น และเมื่อกำหนดให้ λ_1, λ_2 และ λ_3 เป็นค่าไอเกนของ $S_{ij}S_{ji} + \Omega_{ij}\Omega_{ji}$ โดยที่ $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$ ซึ่งถ้า λ_2 มีค่าเป็นลบที่จุดๆ หนึ่งในสนามการไหล ดังนั้นที่จุดๆ นั้นจะเป็นส่วนหนึ่งของแกนกระแสวน (vortex core)

โครงสร้างของการหมุนวนสามารถแสดงให้เห็นได้ในมุมมองของพื้นผิวที่ให้ค่าเหมือนกัน (iso-surface) ของค่าคงที่ λ_2 เมื่อค่านี้เป็นจำนวนจริงและมีค่าเป็นลบ



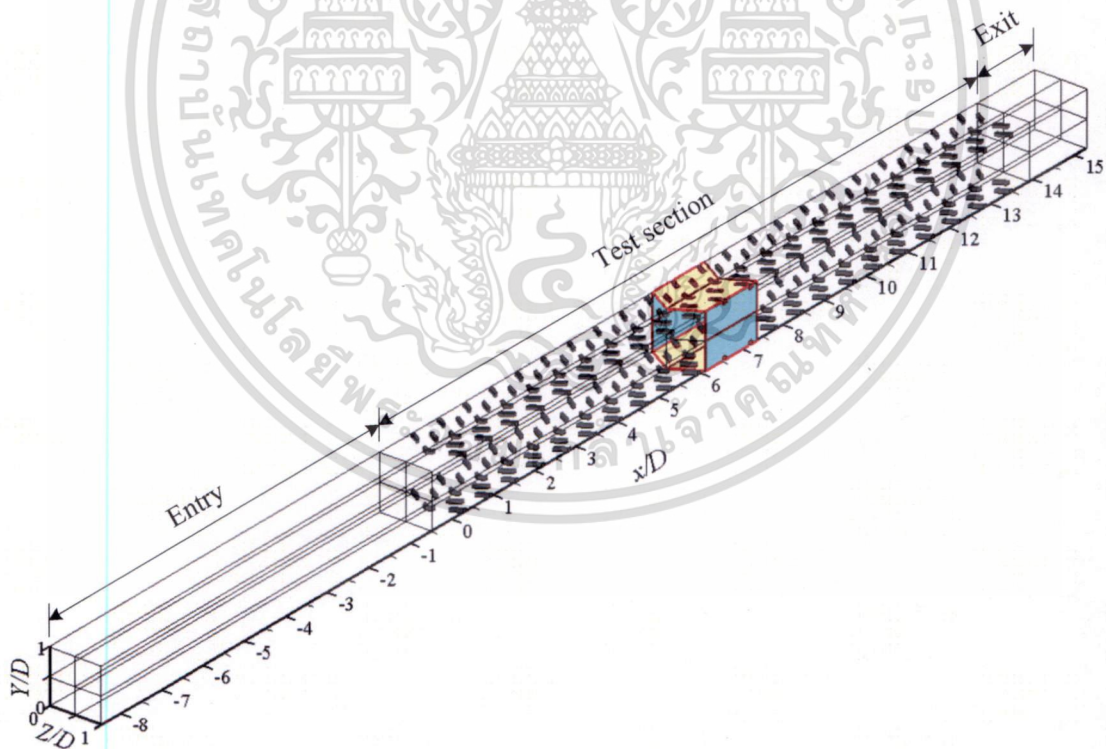
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ความเหมาะสมของแบบจำลองความปั่นป่วน

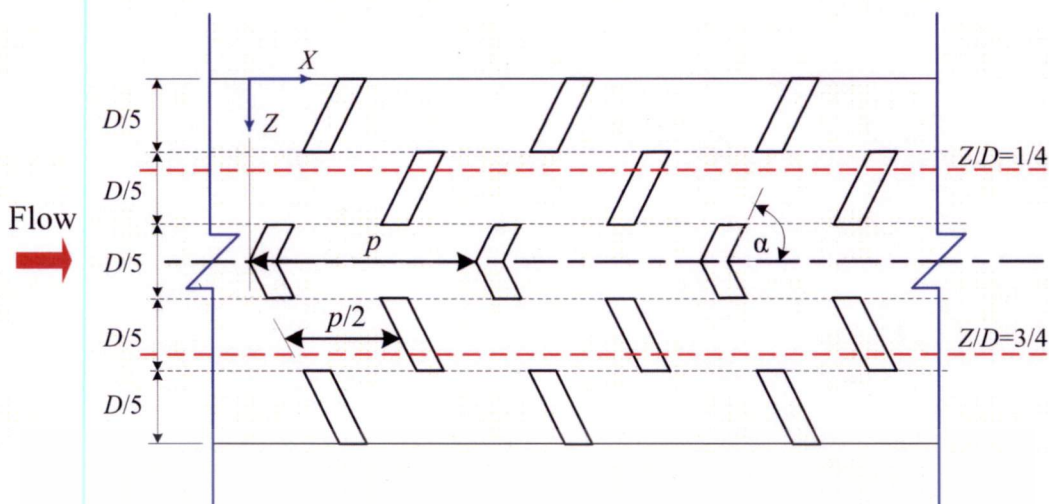
ถึงแม้ว่าการวิเคราะห์การไหลและการถ่ายเทความร้อนโดยใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข มีข้อดีอยู่หลายประการดังที่ได้กล่าวมาแล้ว แต่จะเป็นเรื่องดีหากได้แสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมและความน่าเชื่อถือของแบบจำลองความปั่นป่วนที่ได้นำมาใช้ ดังนั้นเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงการตรวจสอบหาแบบจำลองความปั่นป่วนที่เหมาะสม ระหว่างแบบจำลองความปั่นป่วน 2 แบบจำลองคือ RNG $k-\epsilon$ และแบบ SST $k-\omega$ โดยเปรียบเทียบกับสมการสหพันธ์ที่เกี่ยวข้องของค่าตัวประกอบความเสียหายและค่าการถ่ายเทความร้อนในท่อผิวเรียบ นอกจากนี้ยังได้แสดงการตรวจสอบค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบความเสียหายที่ได้จากการทดลองของงานวิจัยในอดีต ที่มีการไหลผ่านครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัวหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ติดตั้งบนผนังด้านบนและด้านล่าง ของพื้นผิวให้ความร้อนแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ในช่องทางไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ซึ่งวิเคราะห์บนพื้นฐานของจำนวนกริตเซลล์ที่เหมาะสม

4.1 เรขาคณิตของช่องทางไหลทดสอบ



รูปที่ 4.1 ครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัวหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ซึ่งติดตั้งบนพื้นผิวให้ความร้อนที่ผนังด้านบนและด้านล่างในช่องทางไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ระยะและตำแหน่งการจัดวางครีบบรูปตัววีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบแยกตัว

ขอบเขตของการคำนวณการไหลและการถ่ายเทความร้อน ได้นำข้อมูลมาจาก SriHarsha et al. (2009) ซึ่งพวกเขาได้ศึกษาเชิงทดลองการถ่ายเทความร้อนและการไหลผ่านครีบ ซึ่งทำมาจากแผ่นกระจกทนความร้อน (Plexiglas) ที่มีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสวางแบบแยกตัว และเรียงตัวกันอย่างต่อเนื่องแบบตรงกันบนแผ่นให้ความร้อนแบบพลักซ์ความร้อนคงที่ที่ผนังด้านบนและด้านล่าง ส่วนผนังด้านข้างถูกหุ้มฉนวน โดยช่องทางไหลทดสอบนั้นแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงทางเข้า ช่วงทดสอบ(ช่วงให้ความร้อน) และช่วงทางออก ดังแสดงเป็นคาร์ระยะไร่นวอยในรูปที่ 4.1 และตำแหน่งการจัดวางครีบบนพื้นผิวให้ความร้อนแสดงดังรูปที่ 4.2 โดยมีอากาศไหลเข้าช่องทางไหลที่อุณหภูมิห้อง รายละเอียดของช่องทางไหลและครีบบมีดังนี้

| | |
|--|-----------------------|
| หน้าตัดท่อ, กว้าง x สูง ($W \times H$) | = 0.04 m x 0.04 m |
| ความยาวบ่งลักษณะของหน้าตัดท่อ, $D=H$ | = 0.04 m |
| ความยาวช่วงทางเข้าส่วนทดลอง | = 0.32 m |
| ความยาวส่วนทดลอง | = 0.575 m |
| ความยาวช่วงทางออก | = 0.055 m |
| หน้าตัดครีบ, กว้าง x สูง ($s \times e$) | = 0.0025 m x 0.0025 m |
| อัตราส่วนความสูงครีบ e/D , BR | = 0.0625 |
| อัตราส่วนความหนาครีบ s/D | = 0.0625 |
| อัตราส่วนของระยะห่างระหว่างครีบ p/D , PR | = 0.625 |
| มุมปะทะ, α | = 60° |

4.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหา

พารามิเตอร์ต่างๆ ที่สนใจต่อการวิเคราะห์การไหลและการถ่ายเทความร้อนในงานวิจัยนี้ ประกอบไปด้วยตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) ตัวประกอบความเสียดทานพานิ่ง (f) เลขนัสเซลท์ (Nu) และตัวประกอบของการเพิ่มทางความร้อน (TEF) ซึ่งมีสมการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(1) เลขเรย์โนลด์

$$Re = \rho u_0 D / \mu \quad (3.112)$$

(2) ตัวประกอบความเสียดทานแฟนนิง

$$f = \frac{(\Delta p) D}{2 \rho L u_0^2} \quad (3.116)$$

เมื่อ Δp คือค่าความดันลด และ L คือความยาวหนึ่งช่วงการไหล

(3) ตัวเลขนัสเซิลท์เฉพาะที่

$$Nu_s = h_s D / k_a \quad (4.1)$$

(4) ตัวเลขนัสเซิลท์เฉลี่ย

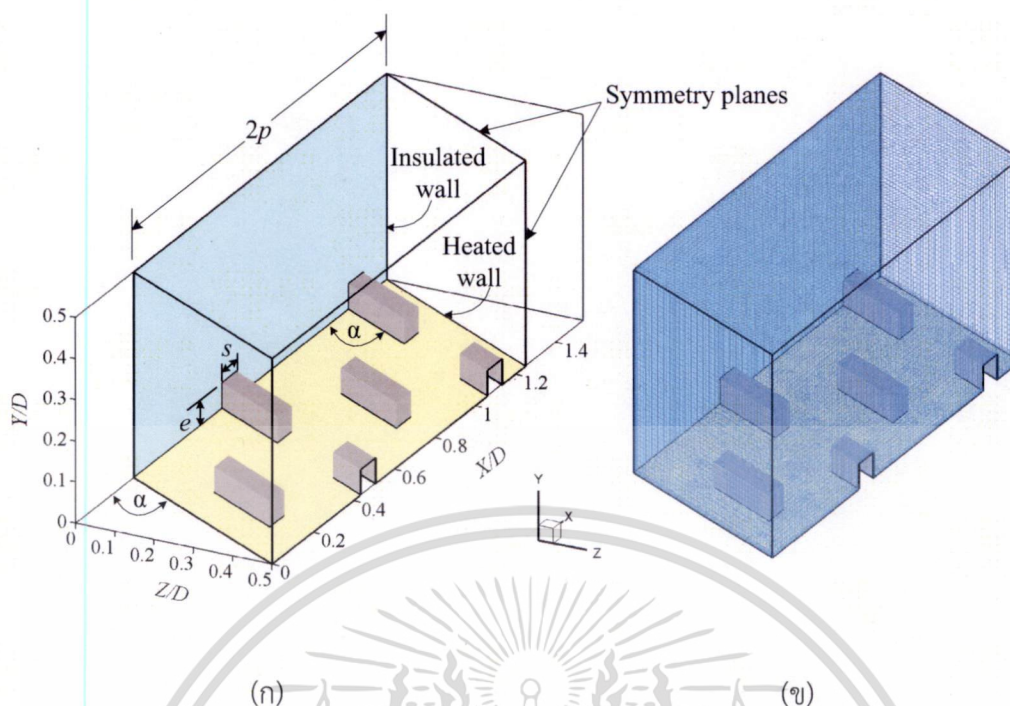
$$Nu = \frac{1}{A} \int Nu_s dA \quad (4.2)$$

(5) ตัวประกอบของการเพิ่มทางความร้อน

$$TEF = \left. \frac{h}{h_0} \right|_{pp} = \left. \frac{Nu}{Nu_0} \right|_{pp} = (Nu / Nu_0) (f / f_0)^{1/3} \quad (1.1)$$

4.3 การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองความปั่นป่วน

การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองความปั่นป่วนนั้น ในงานวิจัยนี้ได้นำผลการทดลองของ SriHarsha et al. (2009) มาใช้เปรียบเทียบ ซึ่งเงื่อนไขขอบเขตของการคำนวณใช้เงื่อนไขเดียวกันกับการทดลอง โดยคำนวณการไหลในช่วงพัฒนาอย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วง หรืออาจเรียกว่าการคำนวณแบบเป็นโมดูล มีโดเมนการไหลแบบสมมาตร(symmetry planes) ทั้งสองด้าน โดยได้แสดงรายละเอียดดังรูปที่ 4.3 (ก) ซึ่งเลือกใช้การวิเคราะห์เพียงหนึ่งในสี่ของหน้าตัดท่อโดเมนที่ใช้ในการคำนวณนั้นมีครีบบางในช่วงสองโมดูล ของไหลเป็นอากาศ มีค่า $Pr=0.707$ เงื่อนไขขอบของทุกพื้นผิวเป็นแบบไม่ลื่นไหล ครีบบั้มนวนวางบนพื้นผิวให้ความร้อนแบบพลักซ์ความร้อนคงที่ 2500 w/m^2 และผนังด้านข้างไม่ถ่ายเทความร้อน



รูปที่ 4.3 (ก) โดเมนที่ใช้ในการคำนวณแบบเป็นโมดูล (ข) กริดเซลล์ที่มีความหนาแน่นสม่ำเสมอและได้มีการปรับปรุงกริดเซลล์แล้ว

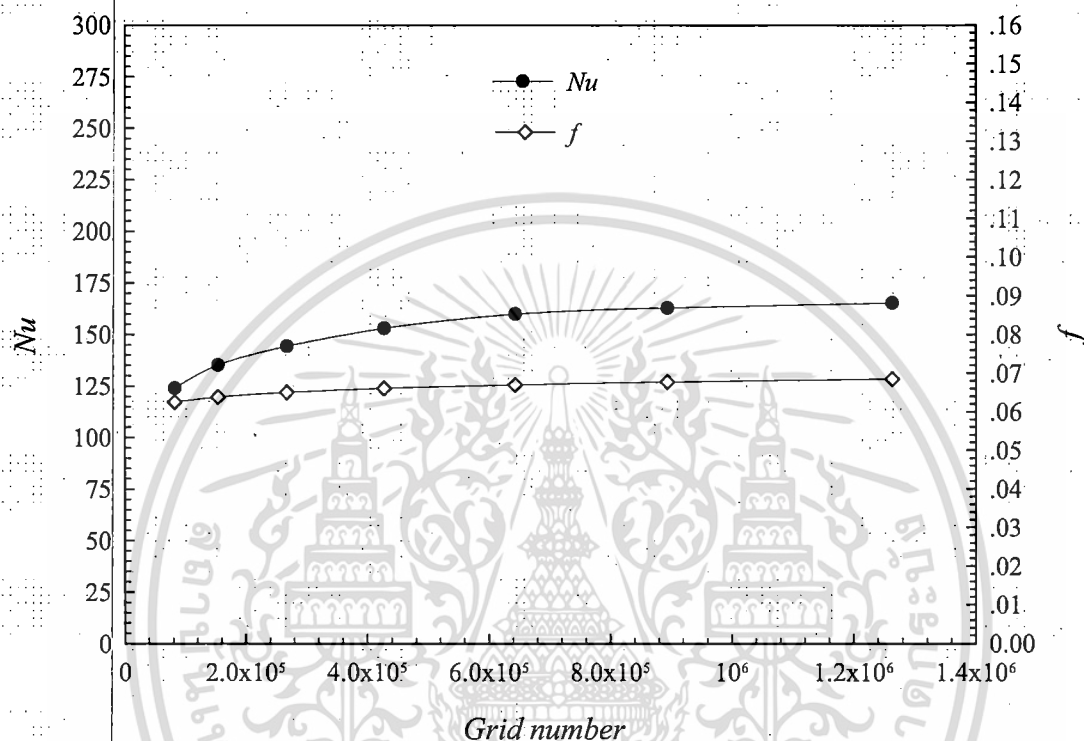
4.3.1 การตรวจสอบความเป็นอิสระของผลเฉลยจากจำนวนกริดเซลล์

สำหรับการวิเคราะห์การไหลเพื่อเปรียบเทียบกับงานของ SriHarsha et al. (2009) นั้น เริ่มจากการทดสอบความเป็นอิสระของผลเฉลยจากจำนวนกริดเซลล์ โดยในเบื้องต้นใช้โครงตาข่ายที่มีความหนาแน่นสม่ำเสมอทั่วทั้งโดเมนของการไหลโดยวิเคราะห์การไหลแบบเป็นโมดูล เปลี่ยนค่าจำนวนกริดเซลล์ตั้งแต่ 82,448 ถึง 1,263,400 กริดเซลล์ โดยในรูปที่ 4.3 (ข) เป็นรูปที่ใช้ตรวจสอบจำนวนกริดเซลล์ที่เป็นอิสระจากผลเฉลย จากการคำนวณค่าเลขนีสเซลล์เฉลี่ยและค่าตัวประกอบความเสียหายที่เลขเรย์โนลด์ 15,000 ซึ่งมีรายละเอียดแสดงดังในตารางที่ 4.1 และในรูปที่ 4.4 พบว่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าเลขนีสเซลล์เฉลี่ย และค่าตัวประกอบความเสียหายที่คำนวณจากจำนวนกริดเซลล์ 893,988 และ 126,3400 มีค่าเท่ากับ 1.47% และ 1.18% ตามลำดับ

จากข้อมูลที่ได้ข้างต้นกล่าวได้ว่า จำนวนกริดเซลล์ที่ทำให้ค่าของผลเฉลยเป็นอิสระจากจำนวนกริดเซลล์คือ 893,988 กริดเซลล์ แต่เมื่อหากนำจำนวนกริดเซลล์นี้มาใช้ในการคำนวณเชิงตัวเลขจะส่งผลให้สิ้นเปลืองพลังงาน เวลา และหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์เป็นอย่างมาก และเมื่อสังเกตค่าที่คำนวณได้ในรูปที่ 4.4 ประกอบกับค่าในตารางที่ 4.1 จะพบว่าในกรณีของค่าตัวประกอบความเสียหายนั้น มีจำนวนกริดเซลล์ที่ทำให้ค่าของผลเฉลยเป็นอิสระจากจำนวนกริดเซลล์คือ 267,552 ซึ่งให้ค่าแตกต่างกัน 1.60% เมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากจำนวนกริดเซลล์ 431,825 แต่สำหรับค่าตัวเลขนีสเซลล์เฉลี่ยนั้น จำนวนกริดเซลล์ที่ทำให้ค่าของผลเฉลยเป็นอิสระจากจำนวนกริดเซลล์คือ 893,988

ตารางที่ 4.1 จำนวนของกริดเซลล์ที่ส่งผลต่อค่า Nu และ f

| | | | | | | | |
|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
| Grid number | 82,448 | 153,770 | 267,552 | 431,825 | 643,072 | 893,988 | 126,3400 |
| Nu | 123.99 | 125.95 | 144.42 | 153.14 | 160.34 | 163.07 | 165.46 |
| f | 0.06236 | 0.06371 | 0.06493 | 0.06597 | 0.06690 | 0.06766 | 0.06846 |

รูปที่ 4.4 อิทธิพลของจำนวนกริดเซลล์ต่อส่งผลต่อค่า Nu และ f ที่ $Re=15,000$

เนื่องจากลักษณะการไหลในบริเวณใกล้กับพื้นผิวให้ความร้อนและครีบ มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรต่างๆ ของการไหลเป็นอย่างมาก ซึ่งควรมีการปรับปรุงกริดเซลล์ให้มีความหนาแน่นสูง ในบริเวณนี้ส่วนในบริเวณการไหลที่ห่างไกลออกไปจากพื้นผิวสามารถลดจำนวนกริดเซลล์ให้น้อยลงได้ แต่ยังคงให้ค่าของผลเฉลยที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้กริดที่มีลักษณะเป็นโครงตาข่ายแบบสม่ำเสมอ ร่วมกับการปรับปรุงกริดเซลล์ในบริเวณการไหลที่ใกล้กับพื้นผิว ให้ความร้อนและครีบ ซึ่งพบว่าหลังจากได้มีการปรับปรุงกริดเซลล์แล้วโดยใช้จำนวนกริดเซลล์จำนวน 214,593 กริดเซลล์ พบว่าค่าตัวเลขนัสเซลล์ต์เฉลี่ยและค่าตัวประกอบความเสียดทานที่เลขเรย์โนลด์ 15,000 คือ 158.75 และ 0.06244 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความคลาดเคลื่อนของเลขนัสเซลล์ต์เฉลี่ยกับค่าที่ได้จากกริดเซลล์ 893,988 มีค่าแตกต่างกัน 2.65% และค่าตัวประกอบความเสียดทานเมื่อเปรียบเทียบกับค่าจากกริดเซลล์ 267,552 มีค่าแตกต่างกัน 3.83% ตามลำดับ

สำหรับกริดเซลล์ที่ได้ปรับปรุงแล้วและเมื่อเพิ่มค่าจำนวนกริดเซลล์เป็น 427,644 พบว่าทั้งค่าตัวเลขนัสเซลล์ต์และค่าตัวประกอบความเสียดทานมีความแตกต่างเพียงเล็กน้อย กับค่าที่ได้จากกริดเซลล์จำนวน 214,593 ซึ่งจะเห็นได้จากการปรับปรุงกริดเซลล์ดังกล่าวโดยเลือกใช้กริดเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับราชการ เพื่องานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่าในรูปแบบใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

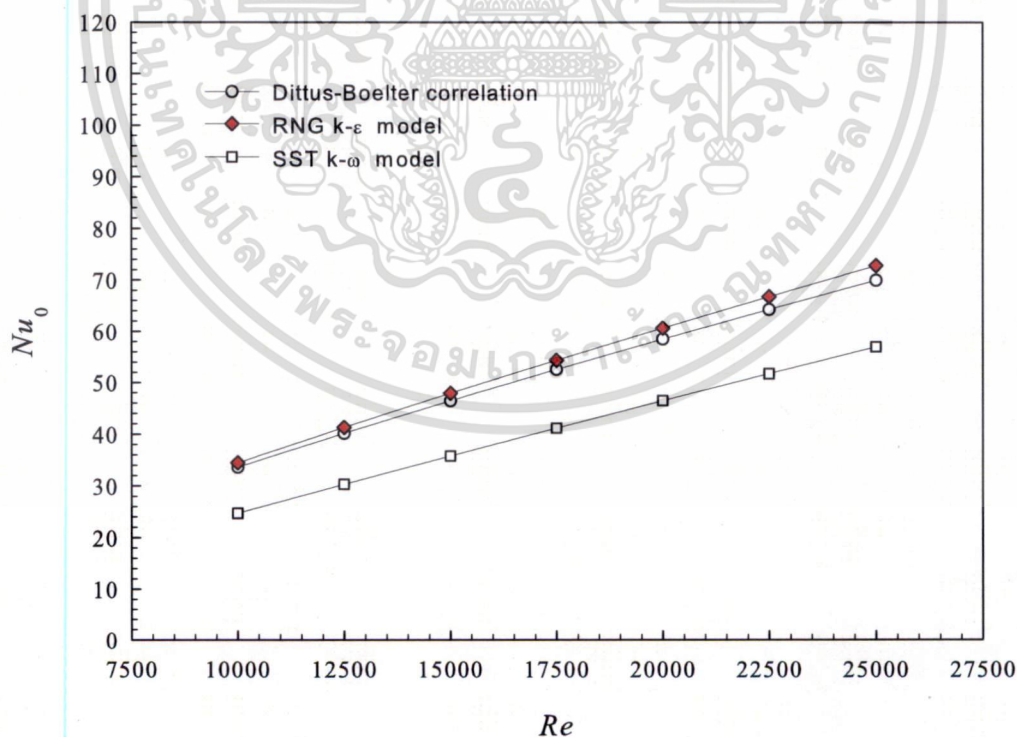
จำนวน 214,593 เป็นกริดเซลล์ที่ให้ค่าของผลเฉลยเป็นอิสระจากจำนวนกริดเซลล์ โดยสามารถลดจำนวนกริดเซลล์ลงได้ถึงประมาณ 4 เท่า เมื่อเทียบกับกรณีที่ยังไม่ได้ปรับปรุงกริดเซลล์ แต่ยังคงให้ค่าของผลเฉลยอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้เมื่อนำการปรับปรุงกริดเซลล์ลักษณะนี้ไปใช้วิเคราะห์เปรียบเทียบกับกริดในท่อผิวเรียบ และการไหลผ่านครีบริบตัววีโดยเปรียบเทียบกับผลการทดลอง รูปกริดเซลล์ที่ได้ทำการปรับปรุงแล้วแสดงดังรูปที่ 4.3 (ข)

4.3.2 เปรียบเทียบผลของแบบจำลองความปั่นป่วนกับผลการทดลองการไหลในท่อเรียบ

การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG $k-\varepsilon$ และ SST $k-\omega$ สำหรับการคำนวณการไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบ (ไม่ติดตั้งครีบริบ) โดยใช้กริดเซลล์ที่ได้ปรับปรุงแล้วและใช้วิธีการคำนวณแบบเป็นโมดูล ที่มีความยาวช่วงเท่ากับ $2p$ (2 โมดูล) วิเคราะห์การไหลในช่วงเลขเรย์โนลด์ 10,000 ถึง 25,000 และนำผลการคำนวณมาเปรียบเทียบกับสมการสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter ซึ่งมีแสดงไว้ใน Incropera and Dewitt (1996) เพื่อวิเคราะห์ค่าของเลขนัสเซลล์ สมการสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter แสดงได้ดังนี้

$$Nu_0 = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (4.3)$$

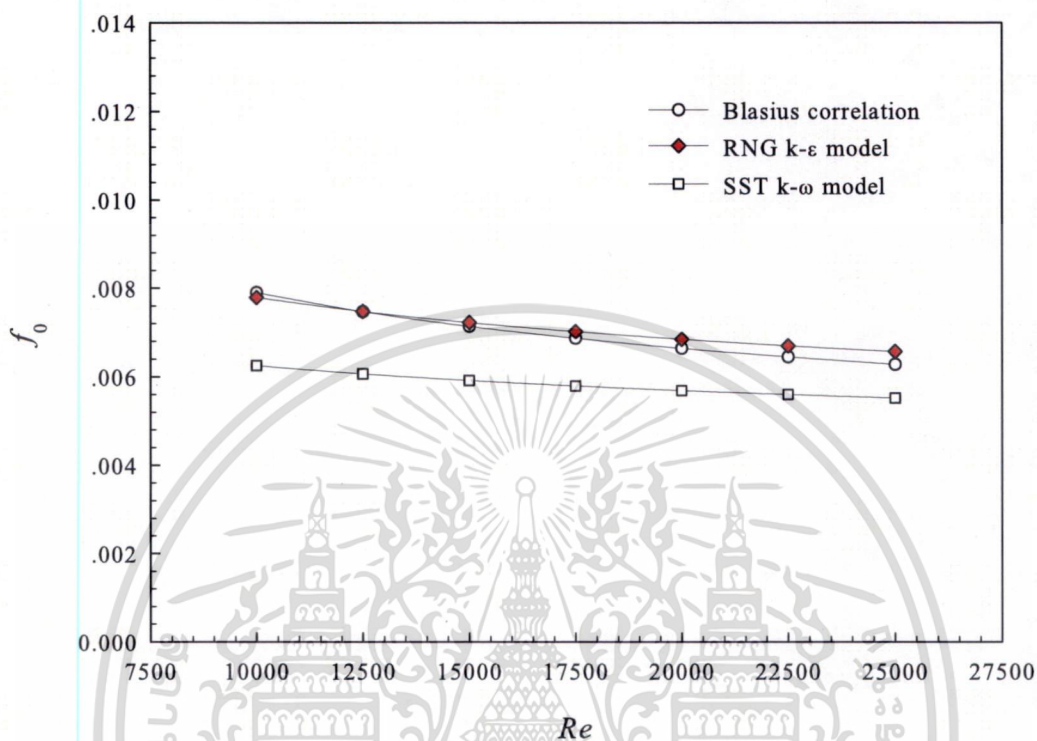
สมการนี้ได้รับการยืนยันจากผลการทดลองสำหรับช่วงของเงื่อนไขดังนี้คือ $0.7 \leq Pr \leq 160$, $Re \geq 10,000$ และ $L_e/D \geq 10$ โดยที่ L_e คือความยาวช่วงขาเข้า



รูปที่ 4.5 ค่าเลขนัสเซลล์เฉลี่ยของการถ่ายเทความร้อนในท่อผิวเรียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 4.5 ได้แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG $k-\epsilon$ สอดคล้องกันดีกับสมการสหสัมพันธ์ของ Dittus–Boelter มากกว่าแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ SST $k-\omega$ และที่เลขเรย์โนลด์ 25,000 ซึ่งให้ค่าคลาดเคลื่อนสูงที่สุดเท่ากับ 4.79% ตลอดช่วงเลขเรย์โนลด์ที่พิจารณา



รูปที่ 4.6 ค่าตัวประกอบความเสียดทานของการถ่ายเทความร้อนในท่อผิวเรียบ

นอกจากการเปรียบเทียบค่าของเลขนัสเซลล์ต์เฉลี่ยในท่อผิวเรียบแล้ว ยังได้เปรียบเทียบค่าตัวประกอบความเสียดทานอีกด้วย โดยเปรียบเทียบค่าของตัวประกอบความเสียดทานกับสมการสหสัมพันธ์ของ Blasius ดังแสดงไว้ในสมการที่ (4.4) และ (4.5)

$$f_0 = 0.079Re^{-0.25} \quad \text{เมื่อ} \quad Re \leq 2 \times 10^4 \quad (4.4)$$

$$f_0 = 0.046Re^{-0.20} \quad \text{เมื่อ} \quad Re > 2 \times 10^4 \quad (4.5)$$

ผลการเปรียบเทียบได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.6 ซึ่งสังเกตได้ว่าแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG $k-\epsilon$ สอดคล้องกับสมการสหสัมพันธ์ของ Blasius มากกว่าแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ SST $k-\omega$ และที่เลขเรย์โนลด์ 25,000 ซึ่งให้ค่าความคลาดเคลื่อนสูงที่สุดเท่ากับ 5.29% ตลอดช่วงเลขเรย์โนลด์ที่พิจารณา

4.3.3 เปรียบเทียบผลของแบบจำลองความปั่นป่วนกับผลการทดลองการไหลผ่านครีป

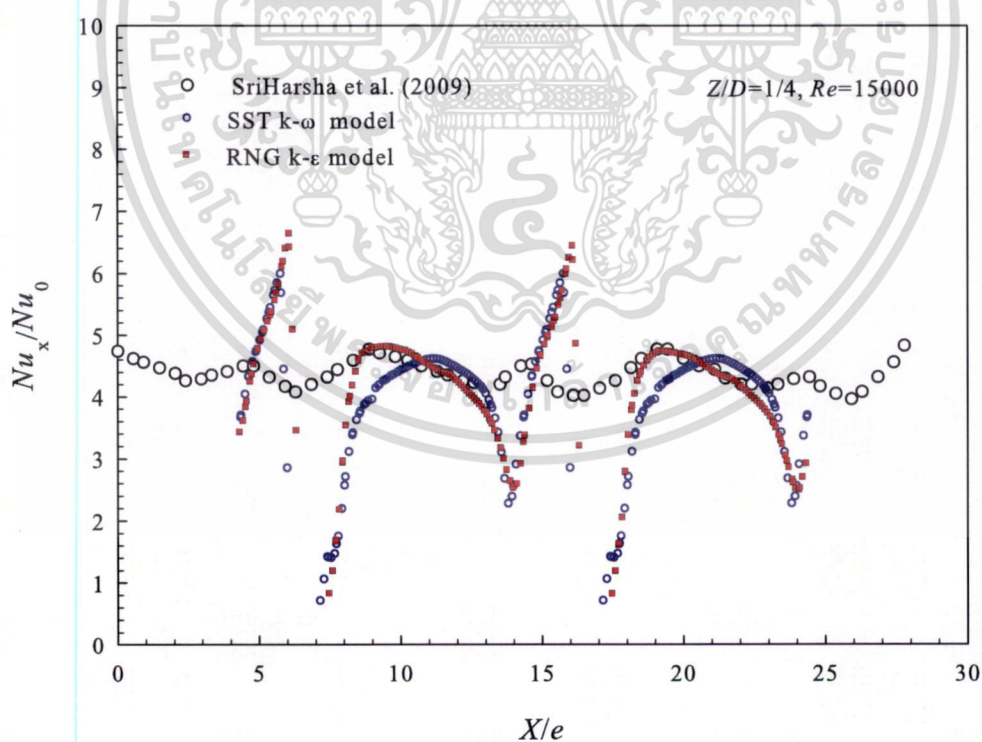
ในรูปที่ 4.7 แสดงผลการกระจายค่าของอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ต์ ซึ่งตำแหน่งของการวัดค่ามีจุดเริ่มต้นที่ปลายแหลมของครีปรูปตัววีไปตามทิศทางการไหล ด้วยตัวแปรบอกตำแหน่งไร้หน่วย X/e

เอกสารเป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของบริษัทฯ เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ซื้อได้เห็นใบเซอร์จะเห็นการตั้งค่า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

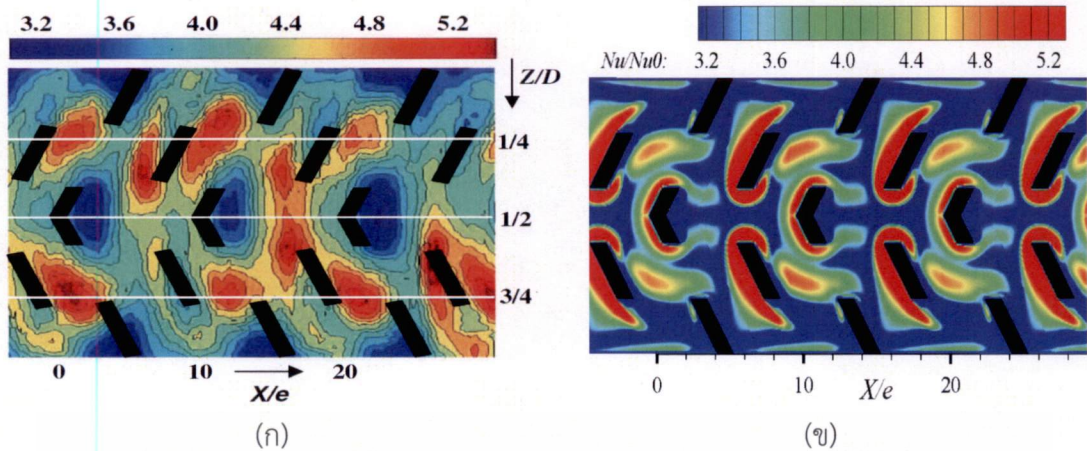
ในบริเวณการไหลที่อยู่ในช่วงการพัฒนาอย่างสมบูรณ์ (สามารถสังเกตตำแหน่งการวัดค่าได้จากรูปที่ 4.8) บนพื้นผิวให้ความร้อนที่ตำแหน่ง $Z/D=1/4$ เปรียบเทียบกันระหว่างผลการทำนายด้วยแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG $k-\epsilon$ และ SST $k-\omega$ ซึ่งคำนวณโดยใช้กริดเซลล์ที่ได้ปรับปรุงแล้วกับผลการทดลองของ SriHarsha et al. (2009) ซึ่งพวกเขาได้ใช้กล้องอินฟราเรดอ่านค่าการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวให้ความร้อนที่อยู่ตรงข้ามกับด้านที่ติดครีบ แล้วแปลงเป็นค่าของตัวเลขนัสเซลล์ท์ซึ่งวัดค่าในช่วงการไหลพัฒนาอย่างสมบูรณ์ที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ 15,000 โดยที่ค่า Nu_0 ที่ใช้เป็นตัวหารในทุกกรณีของการคำนวณเชิงตัวเลขนั้น ใช้ค่าที่ได้จากสมการที่ (4.3)

จากผลการคำนวณเชิงตัวเลขพบว่า ค่าอัตราส่วนของเลขนัสเซลล์ท์ที่ได้จากการทำนายผลด้วยแบบจำลอง RNG $k-\epsilon$ สอดคล้องกันดีกับผลการทดลอง ซึ่งจากการสังเกตค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์จากผลการทำนายเชิงตัวเลขโดยละเอียดพบว่าที่บริเวณแคบๆ ด้านหลังครีบที่แยกตัวออกมามีค่าต่ำที่สุด และถัดมามีค่าที่ใกล้เคียงอย่างยิ่งกับผลการทดลองซึ่งเป็นบริเวณจุดตกกระทบบของการไหลทางด้านหลังครีบที่แยกตัวออกมา แต่ในบริเวณกึ่งกลางระหว่างครีบหลักกับครีบที่แยกตัวออกมา ให้ต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดลองซึ่งเป็นบริเวณการไหลแยกตัวจากพื้นผิว และการทำนายผลเชิงตัวเลขให้ค่าสูงกว่าการทดลองในบริเวณด้านหน้าครีบที่แยกตัวออกมาซึ่งเป็นบริเวณการไหลตกกระทบบ ซึ่งในบริเวณการไหลแยกตัวจากครีบและบริเวณการไหลตกกระทบบด้านหน้าครีบนั้น การทดลองอาจจะไม่สามารถจับพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนได้อย่างละเอียดเท่ากับการทำนายผลเชิงตัวเลขจึงทำให้ได้ค่าที่แตกต่างกันในบริเวณนี้



รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบค่า Nu_x / Nu_0 ระหว่างแบบจำลองความปั่นป่วนกับผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบการกระจายค่าเลขนัสเซลท์บนพื้นผิวให้ความร้อนที่เลขเรย์โนลด์ 15,000
(ก) ผลการทดลองของ SriHarsha et al. (2009) (ข) ผลการทำนายด้วย RNG $k-\epsilon$

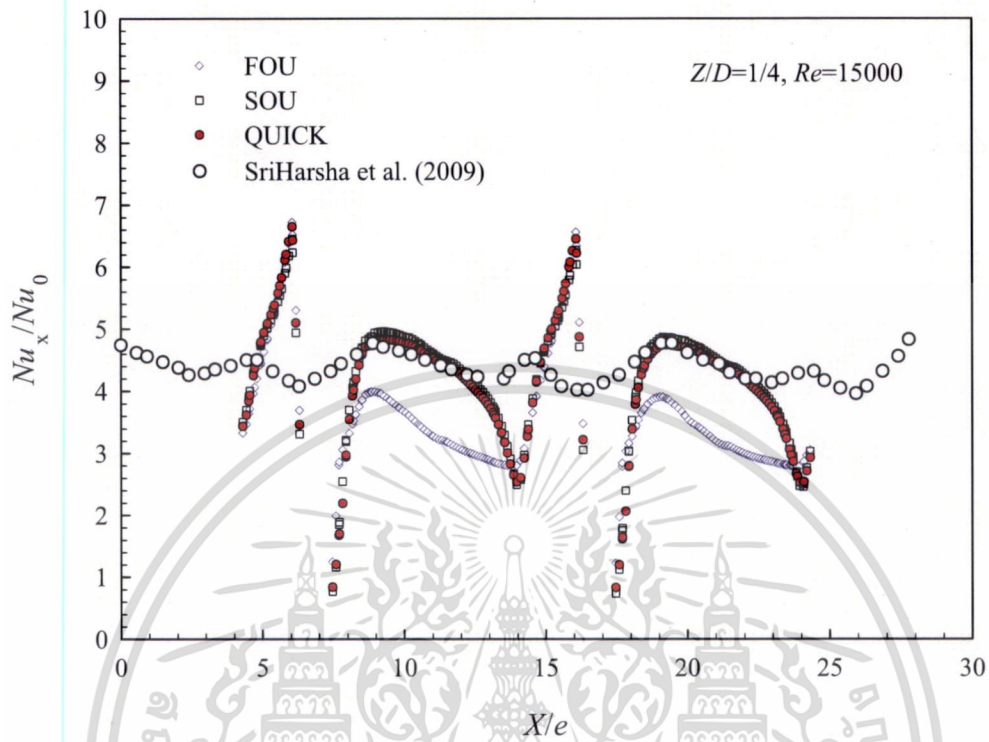
นอกจากนี้ในรูปที่ 4.8 ได้แสดงการกระจายค่าเลขนัสเซลท์บนพื้นผิวให้ความร้อนในรูปของเส้นชั้น(contour) ของแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG $k-\epsilon$ เปรียบเทียบกับผลการทดลองที่มีช่วงค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์เดียวกัน โดยภาพรวมพบว่าทั้งสองกรณีให้ค่าที่สอดคล้องกันเป็นอย่างดี และจากการคำนวณเชิงตัวเลขพบว่าค่า $y^+ < 4$

ถึงแม้ว่าทั้งแบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k-\epsilon$ และแบบจำลอง SST $k-\omega$ สามารถคำนวณการไหลในบริเวณเลขเรย์โนลด์ต่ำได้ แต่จากผลการวิเคราะห์ที่ได้ซึ่งพบว่าแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG $k-\epsilon$ ให้ผลการทำนายค่าการถ่ายเทความร้อนที่ใกล้เคียงกว่าแบบจำลอง SST $k-\omega$ ทั้งในกรณีของท่อผิวเรียบและการวิเคราะห์ค่าเลขนัสเซลท์บนพื้นผิวให้ความร้อนของกรณีการไหลผ่านครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัว ทั้งนี้มีสาเหตุเนื่องมาจากสมการการจำลองการถ่ายเทความร้อนที่คำนวณจากสมการที่ (3.109) นั้น ค่า k_{eff} ของแบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k-\epsilon$ มีสมการเป็น $k_{eff} = \alpha c_p \mu_{eff}$ ซึ่งได้แสดงไว้ในสมการที่ (3.111) โดยที่ค่า α คือเลขพรานด์ยังผลผกผันนั้นถูกคำนวณจากสมการที่ได้พัฒนาขึ้นมาจากทฤษฎี RNG ตามสมการที่ (3.27) สังเกตได้ว่าค่า α จะเปลี่ยนแปลงไปตามค่า μ/μ_{eff} ดังที่ปรากฏอยู่ในสมการที่ (3.27) ซึ่งเป็นข้อดีของแบบจำลอง RNG $k-\epsilon$ และมีหลักฐานบ่งชี้ว่าการใช้สมการที่ (3.27) มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองเมื่อค่า Pr_t เปลี่ยนแปลงไปตามค่า Pr และความปั่นป่วน ซึ่งสามารถคำนวณการถ่ายเทความร้อนได้ในบริเวณเลขเรย์โนลด์ต่ำ ในขณะที่เลขพรานด์ของความปั่นป่วนของแบบจำลอง SST $k-\omega$ ถูกกำหนดให้เป็นค่าคงที่ จึงส่งผลให้แบบจำลอง RNG $k-\epsilon$ มีค่าตัวเลขนัสเซลท์ที่คำนวณได้ใกล้เคียงผลการทดลองมากกว่าแบบจำลอง SST $k-\omega$

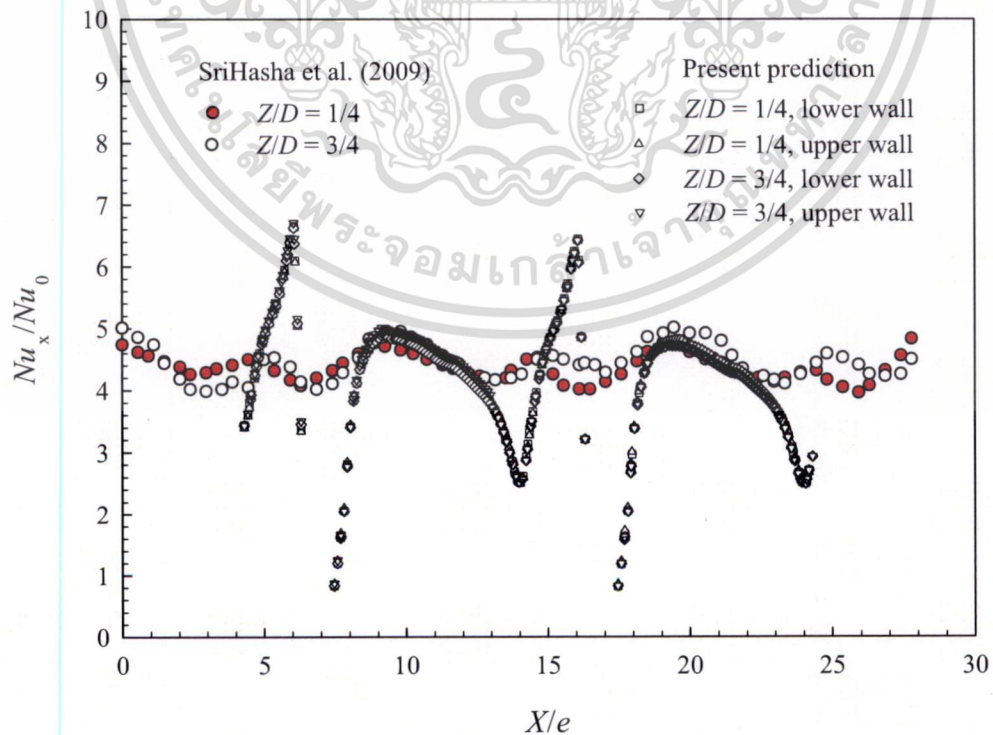
รูปที่ 4.9 แสดงผลของแบบแผนการคำนวณเทอมของการพาที่แตกต่างกัน ต่อค่าการกระจายเลขนัสเซลท์ที่ตำแหน่ง $Z/D=1/4$ ที่ค่าตัวเลขเลขเรย์โนลด์ 15,000 สังเกตพบว่าแบบแผนการคำนวณแบบ QUICK และ SOU ให้ค่าการกระจายเลขนัสเซลท์ที่ใกล้เคียงกันและสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการทดลอง แต่แบบแผนการคำนวณแบบ FOU นั้นให้ค่าการกระจายเลขนัสเซลท์ต่ำกว่าและไม่สอดคล้องกับผลการทดลอง โดยเฉพาะบริเวณด้านหลังครีบริบที่แยกตัวออกมา ซึ่งบ่งชี้ว่าสำหรับการไหลผ่านครีบริบดังกล่าวแบบแผนการคำนวณแบบ FOU ไม่เหมาะกับการนำมาใช้ทำนายผลเชิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเลข เมื่อพิจารณาโดยละเอียดพบว่าแบบแผนการคำนวณแบบ QUICK ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้แบบแผนการคำนวณแบบ QUICK ตลอดการคำนวณ



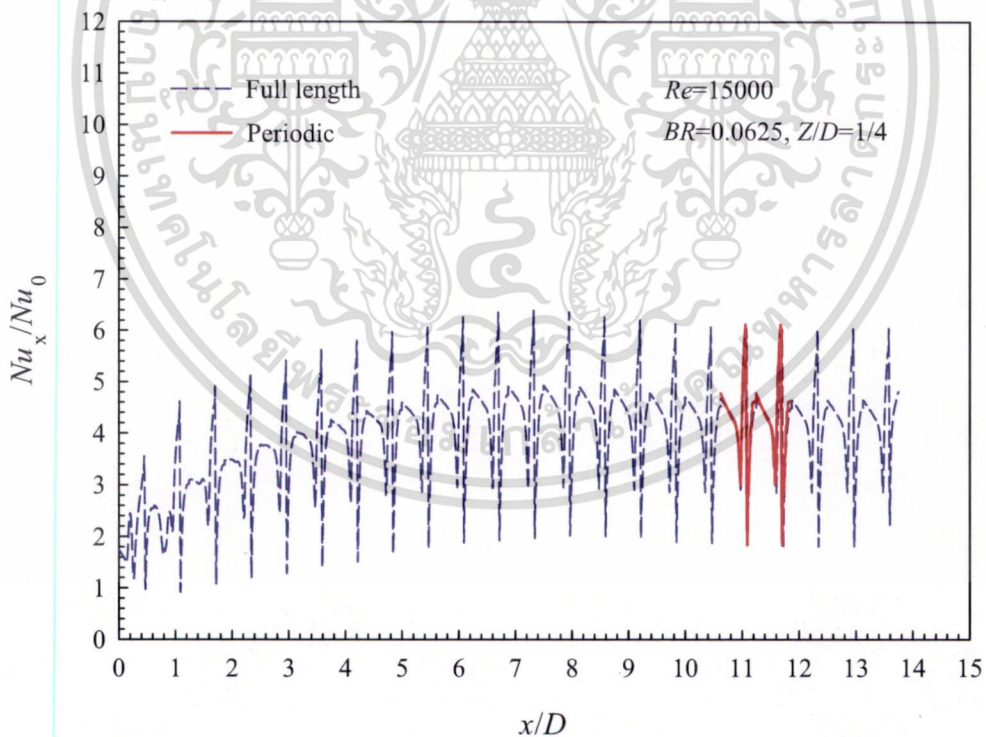
รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบค่า Nu_x / Nu_0 ระหว่างแบบแผนการคำนวณกับผลการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 4.10 เปรียบเทียบการกระจายค่า Nu_x / Nu_0 บนพื้นผิวด้านบนและด้านล่างของขั้วด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับผลการวิเคราะห์การไหลแบบเป็นโมดูล โดยวิเคราะห์ในกรณีที่มีการไหลเต็มหน้าตัดของช่องทางไหลสี่เหลี่ยมจัตุรัส ซึ่งใช้กริดเซลล์เป็นจำนวน 4 เท่าของการคำนวณแบบสมมาตร เพื่อศึกษาถึงผลของความสมมาตรต่อการถ่ายเทความร้อน โดยเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ตำแหน่ง $Z/D=1/4$ และ $3/4$ ซึ่งได้แสดงผลการเปรียบเทียบไว้ในรูปที่ 4.10 พบว่าการไหลมีความสมมาตรทั้งด้านบนและด้านล่าง ดังนั้นในการวิเคราะห์ถัดไปจากนี้จะเลือกใช้การคำนวณการไหลและการถ่ายเทความร้อนโดยวิเคราะห์การไหลแบบเป็นโมดูล และมีโดเมนการไหลแบบสมมาตรทั้งสองด้าน เพื่อเป็นการลดจำนวนกริดเซลล์ให้น้อยลง

การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนของตัวประกอบความเสียหาย ff/f_0 ที่เกิดขึ้นสำหรับการวิเคราะห์การไหลแบบเต็มความยาวช่องทางไหลที่ค่าเลขเรย์โนลด์ 15,000 ดำเนินการโดยคำนวณการไหลผ่านครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัววางเต็มความยาวช่องทางไหลช่วงทดสอบ และมีเงื่อนไขสอดคล้องกับการทดลอง โดยใช้รูปแบบของกริดเซลล์ที่ได้ปรับปรุงแล้วมาใช้ในช่วงที่มีการถ่ายเทความร้อน ซึ่งในรูปที่ 4.11 ได้แสดงผลการเปรียบเทียบการกระจายค่าเลขนัสเซลล์ตามทิศทางการไหลที่ตำแหน่ง $Z/D=1/4$ ระหว่างการคำนวณแบบเต็มความยาวช่องทางไหลและแบบเป็นโมดูล พบว่าค่าจากการทำนายผลเชิงตัวเลขให้ค่า $ff/f_0=7.3$ และค่าที่ได้จากการทดลองเท่ากับ 7 ซึ่งมีความคลาดเคลื่อน 4.3% ในขณะที่ค่า Nu_x/Nu_0 จากการทำนายผลเชิงตัวเลขเท่ากับ 3.6 และค่าจากการทดลองเท่ากับ 3.9 ซึ่งมีความแตกต่างกัน 7.4%



รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบการกระจายค่า Nu_x / Nu_0 ตามทิศทางการไหลที่ตำแหน่ง $Z/D=1/4$ ระหว่างการคำนวณแบบเต็มความยาวช่องทางไหลและแบบเป็นโมดูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ในรูปที่ 4.11 ได้แสดงให้เห็นว่าการกระจายค่าของเลขนัสเซลล์ที่ตำแหน่ง $Z/D = 1/4$ เข้าสู่สภาวะการถ่ายเทความร้อนแบบพัฒนาอย่างสมบูรณ์และช้าเป็นช่วง หลังจากค่า x/D ประมาณ 11.5 หรือโมดูลที่ 19 และเมื่อเปรียบเทียบการคำนวณเชิงตัวเลขแบบเป็นโมดูลกับการไหลแบบเต็มความยาวช่องทางไหล พบว่าค่าการกระจายของตัวเลขนัสเซลล์สอดคล้องกันดีในบริเวณที่เกิดการไหลพัฒนาอย่างสมบูรณ์และช้าเป็นช่วง ซึ่งการวิเคราะห์แบบเป็นโมดูลใช้กริดเซลล์เพียง 214,593

เพื่อลดการใช้จำนวนกริดเซลล์และเวลาในการคำนวณ รวมถึงความไม่สมมาตรของการไหลแบบ 3 มิติ ซึ่งมีอิทธิพลน้อยในสนามการไหล และยังคงให้ผลการทำนายเชิงตัวเลขอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีการวิเคราะห์การไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบเป็นโมดูลในช่วง 2 โมดูล ดังแสดงในรูปที่ 4.3 เพื่อคำนวณการไหลในช่วงการพัฒนาอย่างสมบูรณ์ มีโดเมนของการคำนวณแบบสมมาตรทั้งด้านบน-ล่าง และด้านซ้าย-ขวา ร่วมกับการใช้กริดเซลล์ที่ได้ปรับปรุงแล้ว ซึ่งสำหรับกรณีการจัดวางครีบทันแบบที่ได้ใช้ตรวจสอบข้างต้น จะมีจำนวนกริดเซลล์เท่ากับ 214,593 กริดเซลล์ โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG $k-\epsilon$ ร่วมกับแบบแผนการคำนวณแบบ QUICK มาช่วยในการทำนายผลเชิงตัวเลขเพื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อการไหลและการถ่ายเทความร้อนต่อไป และสำหรับกรณีการตรวจสอบสภาวะการเข้าสู่การไหลในช่วงพัฒนาอย่างสมบูรณ์ จะดำเนินการคำนวณโดยใช้โดเมนการไหลเต็มความยาวช่องทางไหล ดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยคำนวณแบบสมมาตรทั้งด้านบน-ล่าง และด้านซ้าย-ขวา และใช้ความหนาแน่นของกริดเซลล์เท่ากับกรณีของการคำนวณแบบเป็นโมดูลในช่วง 2 โมดูล

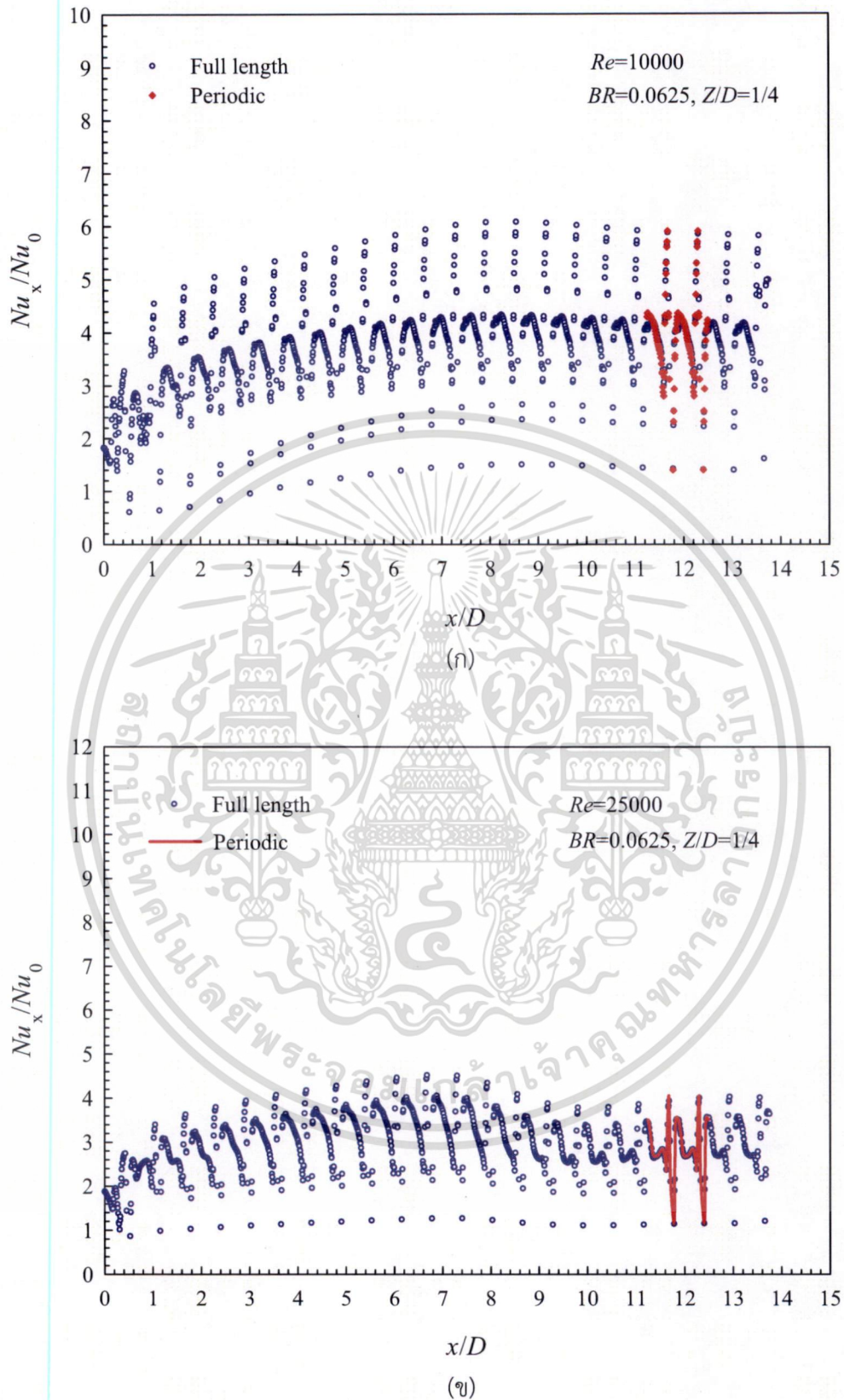
ครีบบางรูปตัววีบนพื้นผิวให้ความร้อน

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงการวิเคราะห์สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วงของการไหลและการถ่ายเทความร้อน ศึกษาในกรณีของการไหลแบบเต็มความยาวช่องทางไหล เปรียบเทียบกับการวิเคราะห์แบบเป็นโมดูล และถัดมาได้ศึกษาถึงอิทธิพลของค่าความหนาครีบ ลักษณะการจัดวางครีบ ความสูง มุมปะทะ และระยะห่างระหว่างครีบ ที่มีผลต่อการไหลและการถ่ายเทความร้อนของครีบบางรูปตัววีแบบแยกตัวซึ่งวางบนพื้นผิวให้ความร้อนแบบพลักซ์ความร้อนคงที่ ที่ผนังด้านบนและด้านล่างในช่องทางไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยศึกษาในกรณีของการวิเคราะห์แบบเป็นโมดูล และรวมถึงการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด เพื่อนำไปสู่การออกแบบสำหรับการนำไปใช้งานจริง

5.1 สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วงของครีบบางรูปตัววี

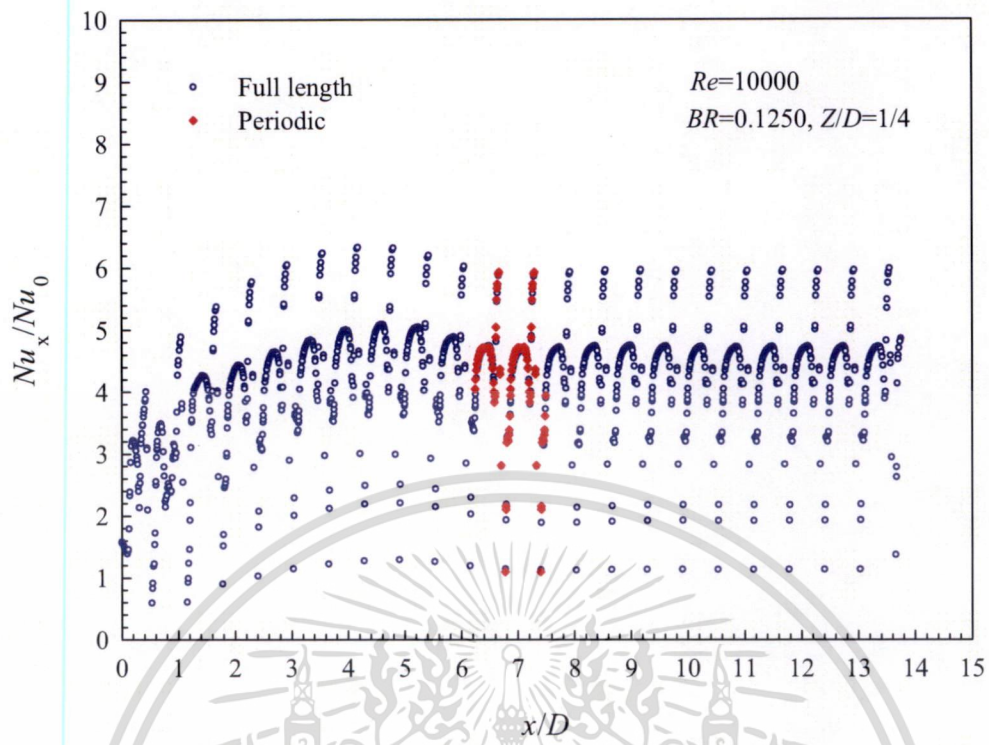
เพื่อก่อให้เกิดความเข้าใจถึงสภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์ ซึ่งมีรูปร่างของการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบเข้าเป็นช่วงภายในท่อที่ติดตั้งครีบบางรูปตัววี เริ่มต้นจากการศึกษาการไหลผ่านครีบบางรูปตัววีซึ่งเป็นครีบบางรูปตัววีที่ติดตั้งครีบบางรูปตัววี โดยพิจารณาการไหลในท่อที่ติดตั้งครีบบางรูปตัววีแบบแยกตัวทำมุมปะทะ 60° กับทิศทางการไหลและเรียงตัวซ้ำกันอย่างต่อเนื่อง บนพื้นผิวให้ความร้อนที่ผนังด้านบนและด้านล่าง ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้จากกราฟการกระจายค่า Nu_x/Nu_0 และ u/u_0 ตามแนวทิศทางการไหล ดังแสดงในรูปที่ 5.1 ถึง 5.3 โดยเป็นการแสดงค่า Nu_x/Nu_0 และ u/u_0 ของกรณีการคำนวณการไหลแบบเต็มความยาวช่องทางไหลร่วมกับแบบเป็นโมดูล และในทุกกรณีวัดค่าที่ตำแหน่ง $Z/D=1/4$ ที่ $PR=0.625$ และ $Re=10,000$ (ซึ่งเป็นค่าเริ่มต้นของ Re ที่ศึกษา)

สำหรับในรูปที่ 5.1 และ 5.2 แสดงการกระจายค่า Nu_x/Nu_0 ไปตามทิศทางการไหลที่ $Z/D=1/4$ ของครีบบางรูปตัววีที่ค่า $BR=0.0625$ และ 0.125 ตามลำดับ ซึ่งในทั้งสองกรณีมีความกว้างของครีบบางรูปตัววีเท่ากัน จากรูปที่ 5.1 พบว่ารูปร่างของค่า Nu_x/Nu_0 เริ่มปรากฏเข้าเป็นช่วงที่โมดูลที่ 2 หลังจากนั้นจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นและลดลงเล็กน้อยจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วงเชิงความร้อนที่โมดูลที่ 19 หรือที่ตำแหน่ง x/D ประมาณ 11.5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหลังจากตำแหน่งที่ x/D ประมาณ 11.5 นั้น แนวคิดของสภาวะการถ่ายเทความร้อนที่พัฒนาย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วงเชิงความร้อนนั้นถูกต้อง เนื่องจากค่า Nu มีค่าคงที่ไปตลอดการไหลตามความยาวท่อ และเมื่อเปรียบเทียบค่า ที่ $Re=10,000$ และ $25,000$ ของรูปที่ 5.1 (ก) และ (ข) กล่าวได้ว่าการเข้าสู่สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วงเชิงความร้อน เกือบจะเป็นอิสระกับค่า Re นอกจากนี้เมื่อพิจารณารูปที่ 5.1 และ 5.2 พบว่าเมื่อค่า BR เพิ่มขึ้นจาก 0.0625 ไปเป็น 0.125 ค่า Nu_x/Nu_0 เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและมีค่าสูงที่สุดที่โมดูลที่ 9 หรือ x/D ประมาณ 5 ก่อนที่จะลดลงและคงที่ในลักษณะเข้าเป็นช่วงที่โมดูลที่ 12 หรือ x/D ประมาณ 7 อย่างไรก็ตามรูปร่างของค่า Nu_x/Nu_0 สำหรับค่า $BR=0.0625$ ให้ค่าสูงที่สุดที่โมดูลที่ 14 หรือ x/D ประมาณ 8.5

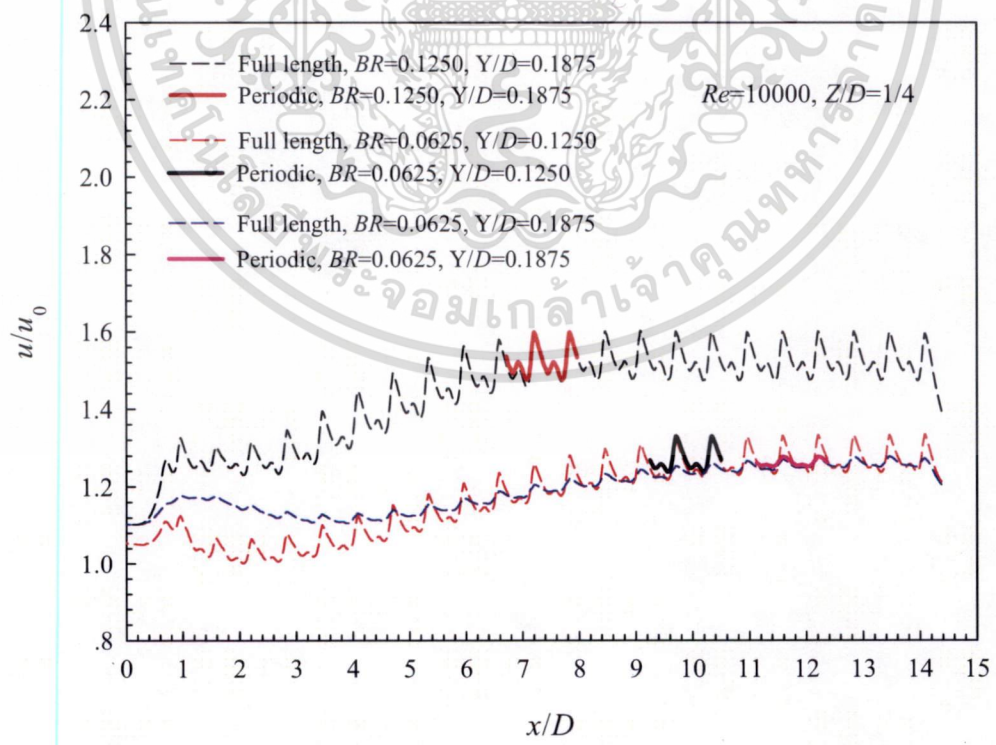


รูปที่ 5.1 การกระจายค่า Nu_x/Nu_0 ที่ตำแหน่ง $Z/D=1/4$ สำหรับการคำนวณแบบเต็มความยาว
ช่องทางไหลและแบบเป็นโมดูล (ก) $Re=10,000$ (ข) $Re=25,000$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 การเปรียบเทียบการกระจายค่า Nu_x / Nu_0 ตามทิศทางการไหลที่ $Z/D=1/4$ สำหรับการไหลแบบเต็มความยาวช่องทางไหลและแบบเป็นโมดูล ที่ $Re=10,000$ และ $BR=0.125$



รูปที่ 5.3 อัตราส่วนของความเร็วตามแนวแกน x ต่อความเร็วเฉลี่ย (u/u_0) ในแต่ละตำแหน่งต่างๆ ที่ $Re=10,000$ และ $PR=0.625$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

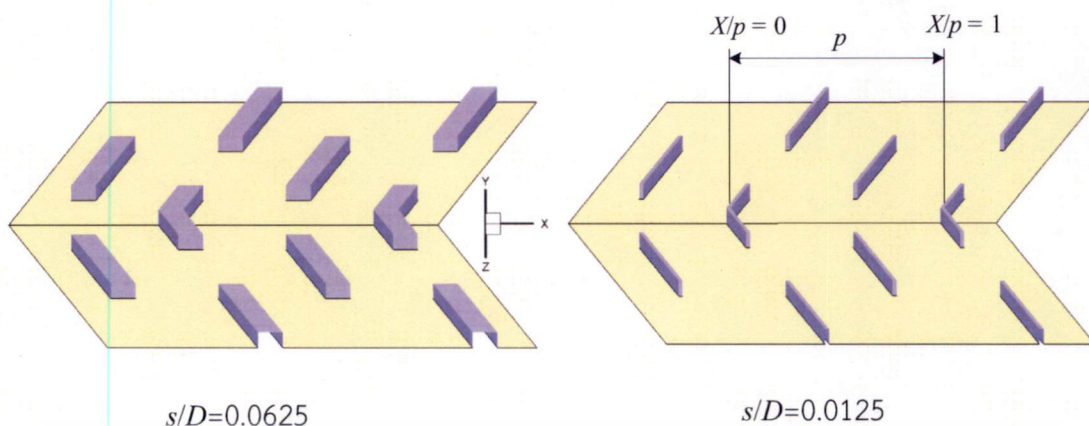
ในรูปที่ 5.3 แสดงรูปร่างของค่า u/u_0 ตามทิศทางการไหลในท่อทดสอบที่ติดตั้งครีบริบตัววีทั้งกรณีของ $BR=0.0625$ และ 0.125 จากรูปเห็นได้ว่ารูปร่างของค่า u/u_0 สำหรับกรณีของครีบริบที่มีค่า $BR=0.125$ ที่ตำแหน่ง $Y/D=0.1875$ และ $Z/D=1/4$ เริ่มช้าเป็นช่วงที่ไม่ดูลที่ 2 และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนเข้าสู่สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และช้าเป็นช่วงเชิงความเร็วที่ไม่ดูลที่ 12 หรือ x/D ประมาณ 7 ซึ่งคล้ายกับสภาวะการช้าเป็นช่วงเชิงความร้อน แต่อย่างไรก็ตามสำหรับครีบริบกรณี $BR=0.0625$ ที่ $Y/D=0.125$ และ 0.1875 รูปร่างของค่า u/u_0 ก็เริ่มปรากฏช้าเป็นช่วงที่ไม่ดูลที่ 2 หลังจากนั้นจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นและเข้าสู่สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และช้าเป็นช่วงเชิงความเร็วที่ไม่ดูลที่ 17 หรือ x/D ประมาณ 10-11 ซึ่งหมายถึงว่าเมื่อความสูงครีบริบเพิ่มขึ้นสามารถเหนี่ยวนำให้การไหลชั้นที่สองเข้าสู่สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และช้าเป็นช่วงทั้งของการไหลและการถ่ายเทความร้อนเร็วยิ่งขึ้น

ในงานวิจัยนี้พบว่า การเข้าสู่สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และช้าเป็นช่วงเชิงความร้อนเร็วกว่ากรณีของการไหลช้าเป็นช่วงเชิงความเร็วเล็กน้อย ดังนั้นแนวความคิดของรูปร่างการไหลและการถ่ายเทความร้อนที่พัฒนาย่างสมบูรณ์และช้าเป็นช่วง สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับการไหลในท่อที่มีการติดตั้งครีบริบและการไหลแบบปั่นป่วน ถ้าท่อทดสอบนั้นมีความยาวเพียงพอ และนอกจากนี้ยังได้สังเกตพบว่าคุณค่าเฉลี่ยของ u/u_0 ในบริเวณการไหลที่กำลังพัฒนาเข้าสู่การช้าเป็นช่วงมีค่าต่ำกว่ามากเมื่อเทียบกับค่าในช่วงที่พัฒนาย่างสมบูรณ์แล้ว แต่ในขณะที่ค่าเฉลี่ยของ Nu_x/Nu_0 ไม่ได้แตกต่างกันมากเมื่อเปรียบเทียบกันทั้งสองบริเวณ และเมื่อพิจารณาถึงเวลาที่ใช้ในการลู่อื่นและความแม่นยำของผลเฉลยแล้ว จะเป็นสิ่งที่ดีหากนำช่วงท่อแบบเป็นโมดูลมาใช้ในการคำนวณเชิงตัวเลข ของการไหลและการถ่ายเทความร้อนในสภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และช้าเป็นช่วง ดังนั้นในหัวข้อถัดไปจะนำการวิเคราะห์แบบเป็นโมดูลมาใช้ในการศึกษาต่อไป

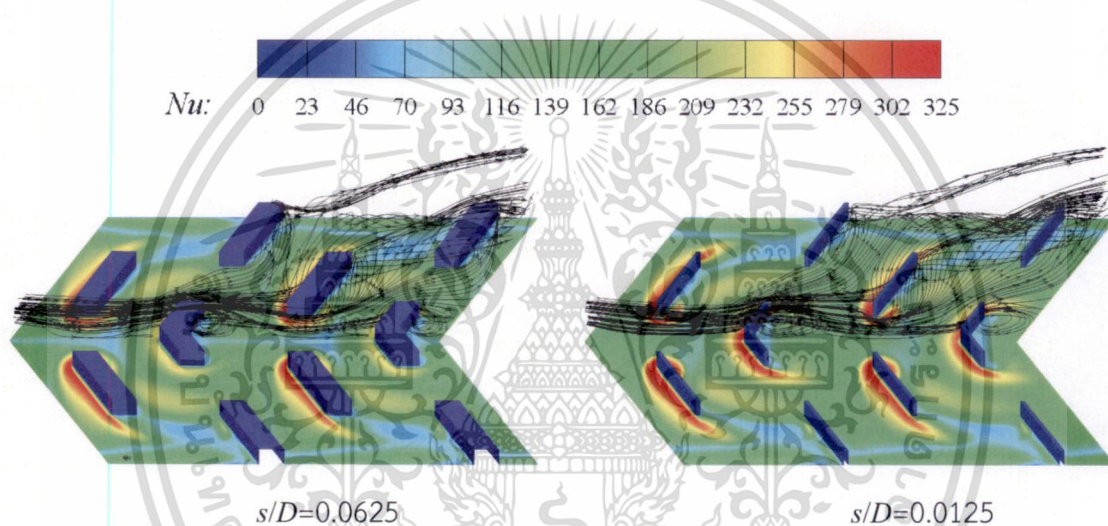
5.2 อิทธิพลของความหนาครีบริบ

การศึกษาอิทธิพลของความหนาครีบริบที่ส่งผลต่อค่าการถ่ายเทความร้อน ตัวประกอบความเสียดทาน และค่า TEF ด้วยการคำนวณการไหลแบบเป็นโมดูลนั้น ใช้ครีบริบที่มีความหนา 2 ค่าคือครีบริบที่มีอัตราส่วนของความหนาครีบริบ $s/D=0.0625$ ซึ่งเป็นครีบริบตันแบบที่มีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส และ $s/D=0.0125$ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าครีบริบบาง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.4

ในรูปที่ 5.4 นั้นทั้งในกรณีของครีบริบจัตุรัสและครีบริบบางมีครีบริบที่ถูกจัดเรียงอยู่ 2 โมดูล สำหรับการคำนวณการไหลแบบเป็นโมดูล ซึ่งในกรณีนี้ได้กำหนดตำแหน่งอ้างอิงไรหน่วยสำหรับใน 1 โมดูล โดยเริ่มต้นที่ $X/p=0$ ถึง $X/p=1$ เมื่อค่า p คือระยะห่างระหว่างครีบริบที่ซ้ำกันและอยู่ติดกัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ $10e$ (หรือ $PR=0.625$) โดยที่ครีบริบทั้งสองกรณีมีความสูงเท่ากันนั่นคือมีค่า $BR=0.0625$ และเรียงตัวซ้ำกันอย่างต่อเนื่องบนพื้นผิวให้ความร้อนที่ผนังด้านบนและด้านล่าง โดยที่ผนังด้านข้างหุ้มฉนวน ซึ่งครีบริบจัตุรัสที่ใช้นี้มีความสูง ระยะห่าง และลักษณะการจัดวางครีบริบรูปแบบเดียวกันกับการทดลองของ SriHarsha et al. (2009) ซึ่งได้รับการยืนยันด้วยผลการทดลองของ SriHarsha et al. (2009) และ Han and Zhang (1992) ว่าเป็นกรณีของลักษณะครีบริบที่ให้ค่าสมรรถนะดีที่สุด



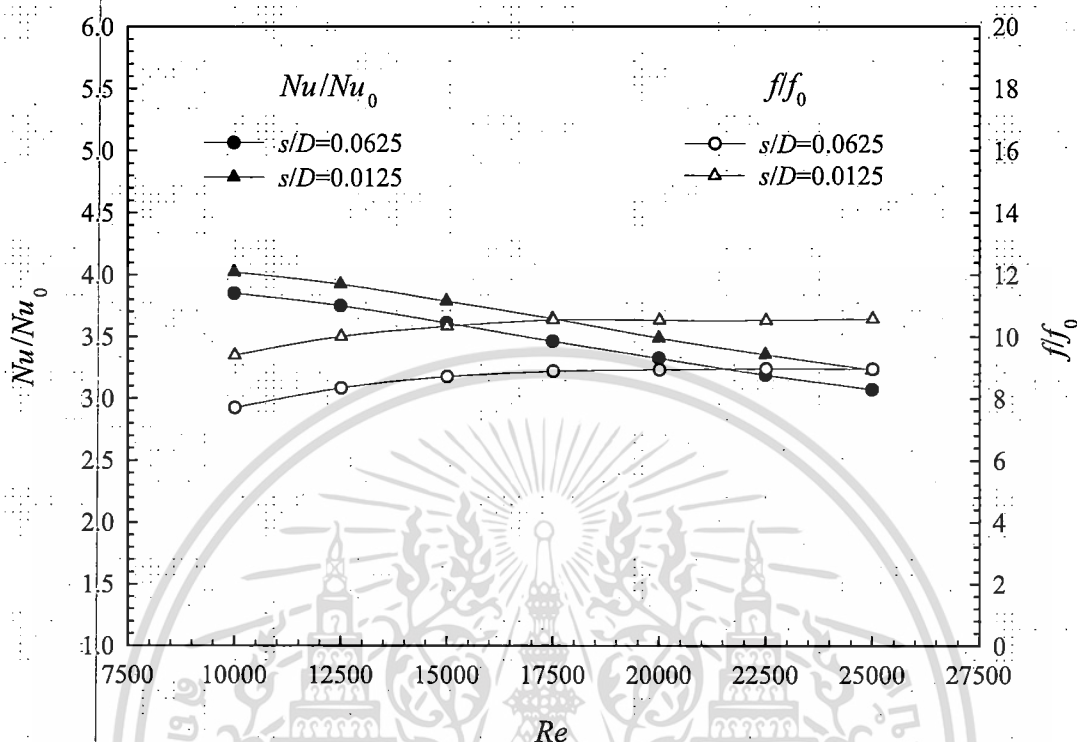
รูปที่ 5.4 รูปกริดที่มีอัตราส่วนของความหนากริด $s/D=0.0625$ และ $s/D=0.0125$



รูปที่ 5.5 เส้นชั้นของการกระจายของเลขนัสเซิลท์เฉพาะที่และเส้นทางเดินอนุภาคของไหลสำหรับการไหลผ่านกริดที่มีความหนา $s/D=0.0625$ และ $s/D=0.0125$ ที่เลขเรย์โนลด์ 15,000

เส้นชั้นของค่าเลขนัสเซิลท์เฉพาะที่บนพื้นผิวด้านล่างซึ่งติดตั้งกริดรูปตัววีที่ทำมุมปะทะ 60° กับทิศทางการไหล และมีค่า $BR=0.0625$ และ $PR=0.625$ ที่ $Re=15,000$ (เพื่อเปรียบเทียบกับกรณีศึกษาก่อนหน้านี้) ทั้งกรณีกริดจัตุรัสและกริดบาง แสดงในรูปที่ 5.5 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าเลขนัสเซิลท์เฉพาะที่ ที่มีค่าสูงและมีพื้นที่เป็นบริเวณกว้างบนพื้นผิวด้านล่างนั้น เกิดขึ้นที่บริเวณรอบๆ กริดรูปตัววีและกริดที่แยกตัวออกมา ส่วนค่าเลขนัสเซิลท์เฉพาะที่มีค่าต่ำจะอยู่ที่บริเวณด้านหน้าและรอบๆ กริดที่ติดกับผนังด้านข้าง ค่าสูงสุดของเลขนัสเซิลท์เฉพาะที่สังเกตพบที่เกิดขึ้นที่บริเวณการไหลตกกระทบบนผนังที่ด้านหน้ากริดรูปตัววีและกริดที่แยกตัวออกมา เมื่อพิจารณาโดยละเอียดสำหรับกริดจัตุรัสและกริดบางพบว่า ค่าสูงสุดของเลขนัสเซิลท์เฉพาะที่ของกริดบางนั้นมีบางบริเวณที่ให้ค่าสูงกว่ากรณีของกริดจัตุรัส ทั้งนี้เนื่องจากการใช้กริดบางสามารถเหนี่ยวนำการไหลหมุนวนหรือกระแสน้ำที่มีขนาดใหญ่กว่าในกรณีของกริดจัตุรัส ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้ในบริเวณด้านหลังกริดจากการแสดงด้วยเส้นกระแสการไหลในรูปที่ 5.5 ซึ่งเป็นไปตามความคาดหวังว่ากริดบางจะให้ค่าการเอกสถ่ายเทความร้อนสูงกว่ากริดจัตุรัส และนอกจากนี้ค่าสูงสุดของเลขนัสเซิลท์เฉพาะที่ ที่เกิดจากการไหลลารค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

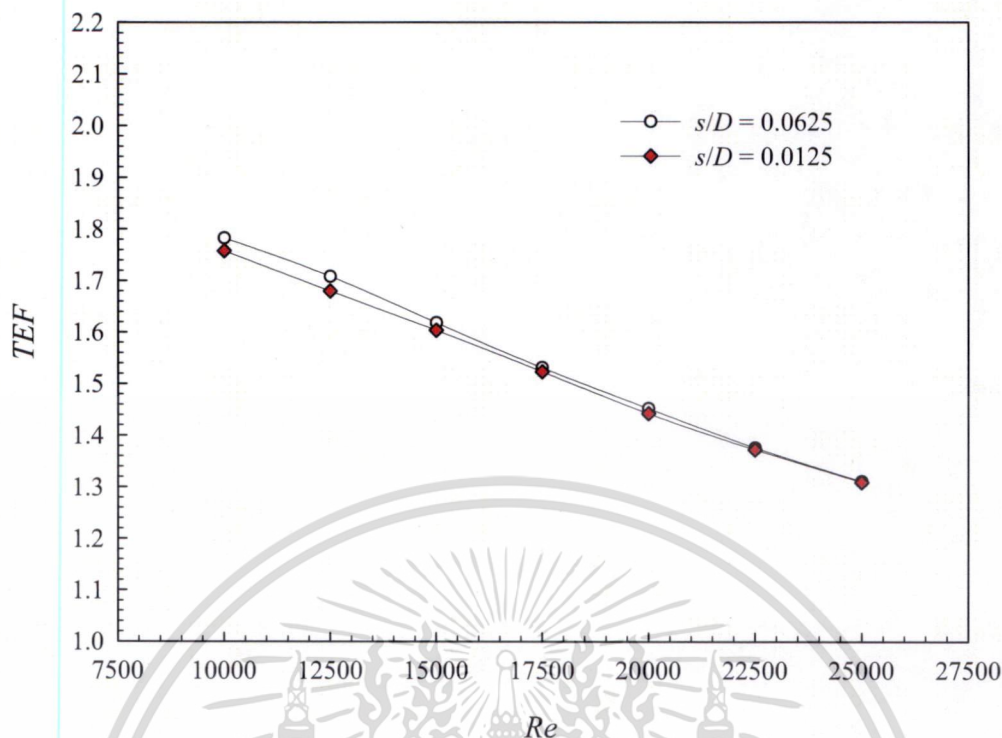
ผ่านครีบริบรูปตัววีมีค่าประมาณ 5 เท่าเมื่อเทียบกับท่อผิวเรียบ(รูปที่ 5.2) ซึ่งได้แสดงให้เห็นถึงข้อดีของการใช้ครีบริบที่เหนือกว่าท่อผิวเรียบสำหรับการถ่ายเทความร้อน



รูปที่ 5.6 ค่า Nu/Nu_0 และค่า ff_0 ของครีบริบที่มีความหนา $s/D=0.0625$ และ $s/D=0.0125$

การเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยของ Nu/Nu_0 และ ff_0 กับค่า Re สำหรับครีบริบจัตุรัสและครีบริบบางรูปตัววีแบบแยกตัว ที่ค่า $BR=0.0625$ แสดงดังในรูปที่ 5.6 จากรูปพบว่าค่า Nu/Nu_0 มีแนวโน้มลดลงเมื่อค่า Re เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่า ff_0 มีแนวโน้มที่ตรงข้ามกัน เมื่อเปรียบเทียบค่า Nu/Nu_0 สำหรับครีบริบจัตุรัสและครีบริบบางพบว่า ครีบริบบางให้ค่าสูงกว่าครีบริบจัตุรัสประมาณ 5% ในขณะที่ค่า ff_0 ของครีบริบบางสูงกว่าครีบริบจัตุรัสประมาณ 17% และขึ้นอยู่กับค่า Re ที่พิจารณา ดังนั้นกระแสสวนที่เหนี่ยวนำการไหลตกกระทบบังรูปที่ 5.5 ซึ่งเกิดจากการไหลผ่านครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัว มีบทบาทสำคัญสำหรับการดึงการไหลมาผสมและก่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้นจากผนังท่อ

นอกจากนี้สามารถสังเกตเห็นได้ว่า ครีบริบรูปตัววีให้ค่าเลขนัยสเซลท์สูงกว่าท่อผิวเรียบที่ทุกค่าของ Re และเมื่อพิจารณารูปที่ 5.6 โดยละเอียดจะพบว่าท่อที่ติดตั้งครีบริบบางให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบความเสียดทานอยู่ในช่วงประมาณ 3.3-4.0 และ 9.0-10.5 เท่าเมื่อเทียบกับท่อผิวเรียบตามลำดับ และขึ้นอยู่กับค่า Re ถึงแม้ว่าครีบริบจัตุรัสจะให้ค่าตัวประกอบความเสียดทานต่ำกว่าครีบริบบาง แต่ครีบริบบางก็ยังคงน่าสนใจกว่าเนื่องจากให้ค่า Nu สูงกว่า ในขณะที่ครีบริบทั้งสองกรณีมีค่า TEF ไม่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้ในรูปที่ 5.7 ดังนั้นในส่วนถัดไปของบทนี้จะมุ่งให้ความสนใจกับกรณีการไหลผ่านครีบริบบางเท่านั้น



รูปที่ 5.7 ค่า TEF ของครีบบางที่มีความหนา $s/D=0.0625$ และ $s/D=0.0125$

5.3 การวิเคราะห์การไหลผ่านครีบบางที่ติดตั้งบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อน

จากการศึกษาในหัวข้อก่อนหน้านี้ซึ่งพบข้อดีคือครีบบางให้ค่า Nu สูงกว่าครีบบางที่เรียงกันไหลเดียวกัน ดังนั้นในหัวข้อถัดไปจะศึกษาถึงสภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วงเชิงความเร็วและการถ่ายเทความร้อนสำหรับกรณีการไหลผ่านครีบบางโดยละเอียด

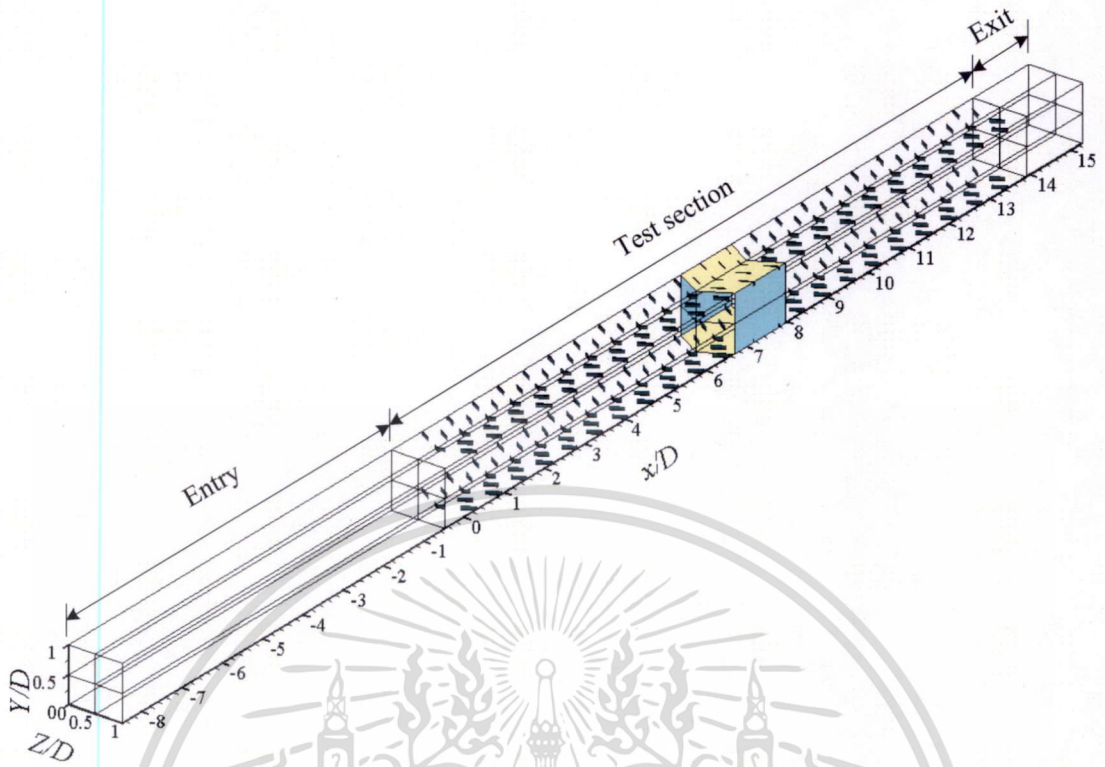
5.3.1 สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วงของการไหลผ่านครีบบาง

สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วงของการไหลผ่านครีบบาง ประกอบด้วยกรณีของการถ่ายเทความร้อนและกรณีของการไหล มีรายละเอียดดังนี้

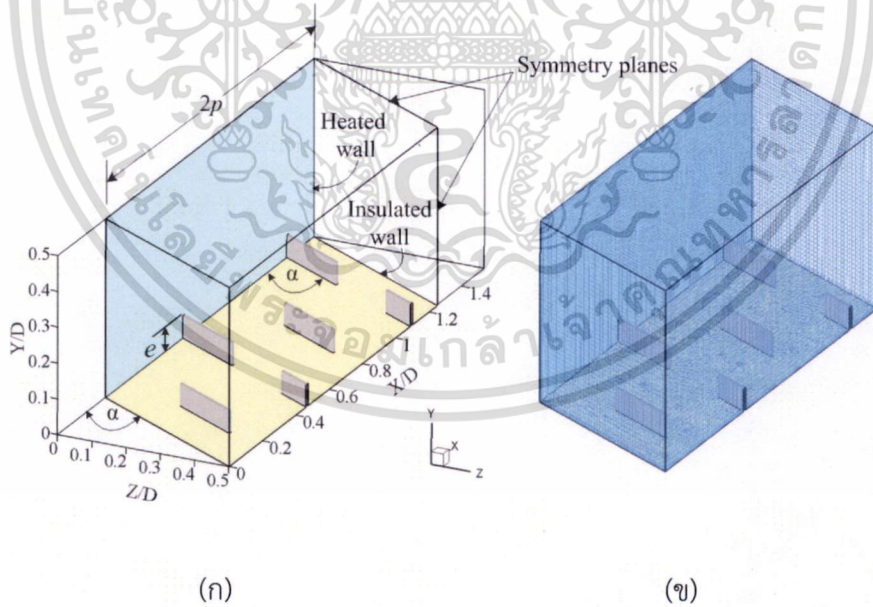
5.3.1.1 กรณีของการถ่ายเทความร้อน

การศึกษาสภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วงของการถ่ายเทความร้อน ที่มีการไหลภายในท่อที่ติดตั้งครีบบางนั้น วิเคราะห์โดยพิจารณาการไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อที่ติดตั้งครีบบางแบบแยกตัวซึ่งทำมุมปะทะ 60° กับทิศทางการไหลและเรียงตัวซ้ำกันอย่างต่อเนื่องที่ผนังด้านบนและด้านล่างดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.8 และในรูปที่ 5.9 แสดงโดเมนที่ใช้ในการคำนวณแบบเป็นโมดูลและรูปของกริดเซลล์ที่ใช้ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของครีบบาง เพื่อใช้คำนวณเปรียบเทียบในสภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วง ผลการวิเคราะห์แสดงดังกราฟของการกระจายค่า Nu_x/Nu_0 ตามแนวทิศทางการไหล ซึ่งเป็นการแสดงค่า Nu_x/Nu_0 ของกรณีการคำนวณการไหลแบบเต็มความยาวท่อกับแบบเป็นโมดูล และในทุกกรณีนั้นมีค่า $Re=10,000$ และ $PR=0.625$ ดังแสดงในรูปที่ 5.10 ถึง 5.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

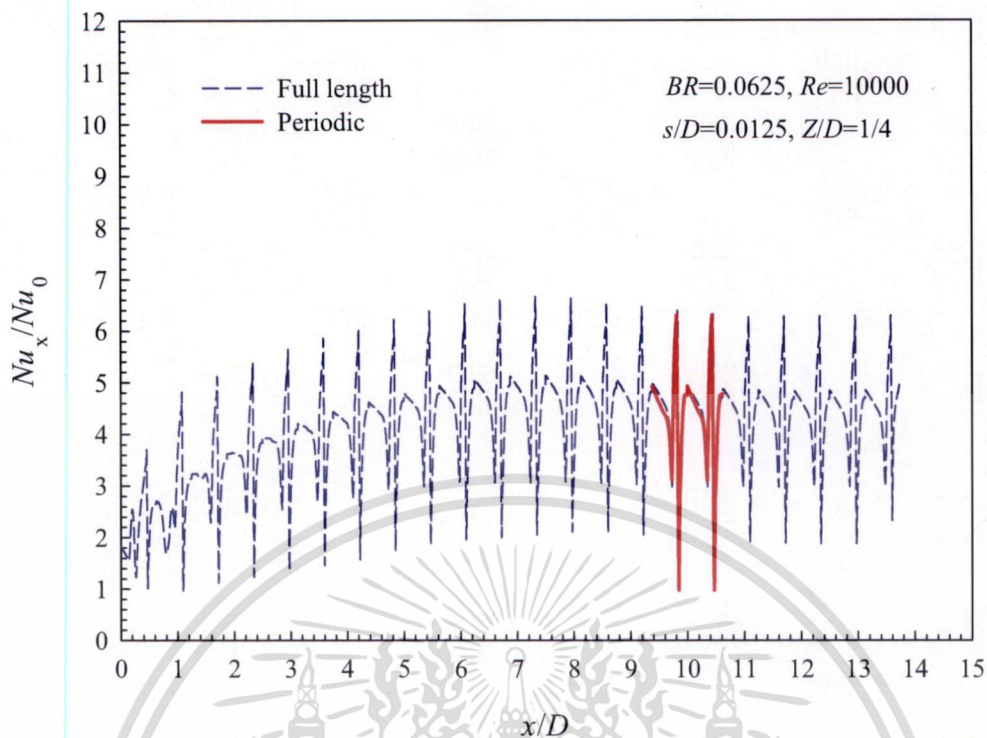


รูปที่ 5.8 ครีบบางในช่องทางไหลสำหรับกรณีการคำนวณการไหลแบบเต็มความยาวท่อ

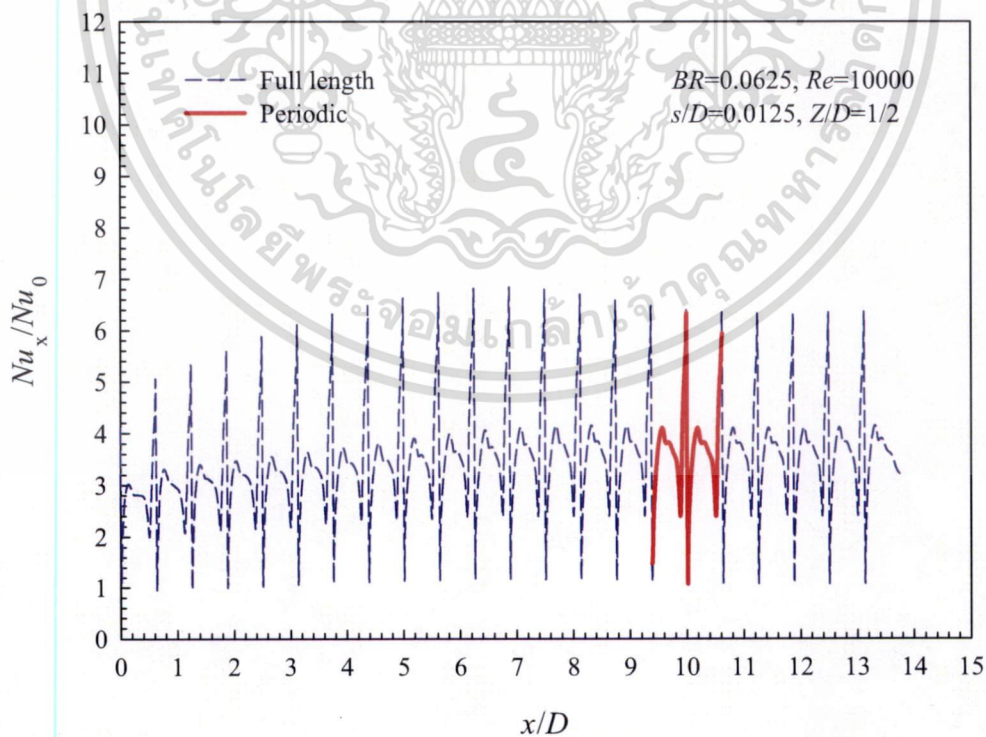


รูปที่ 5.9 (ก) โดเมนที่ใช้ในการคำนวณแบบเป็นโมดูลของครีบบาง (ข) รูปของกริดเซลล์ที่ใช้ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 การกระจายค่า Nu_x/Nu_0 ของครีบบางที่ $BR=0.0625$ ที่ตำแหน่ง $Z/D=1/4$ สำหรับการไหลแบบเต็มความยาวท่อและแบบเป็นโมดูลที่ $Re=10,000$

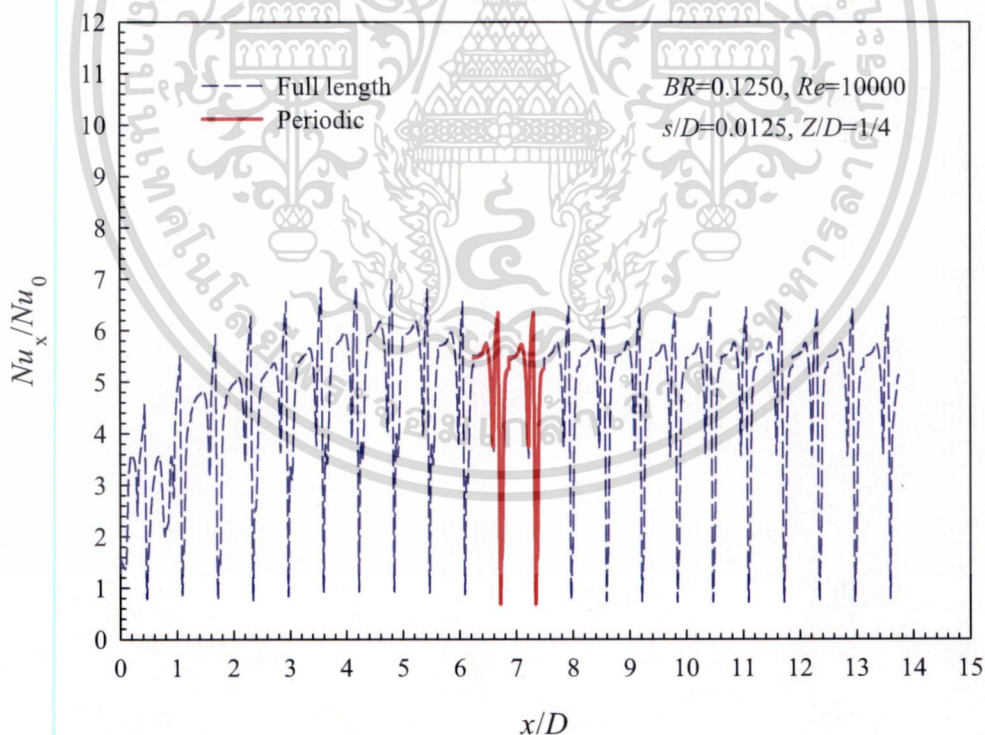


รูปที่ 5.11 การกระจายค่า Nu_x/Nu_0 ของครีบบางที่ $BR=0.0625$ ที่ตำแหน่ง $Z/D=1/2$ สำหรับการไหลแบบเต็มความยาวท่อและแบบเป็นโมดูลที่ $Re=10,000$

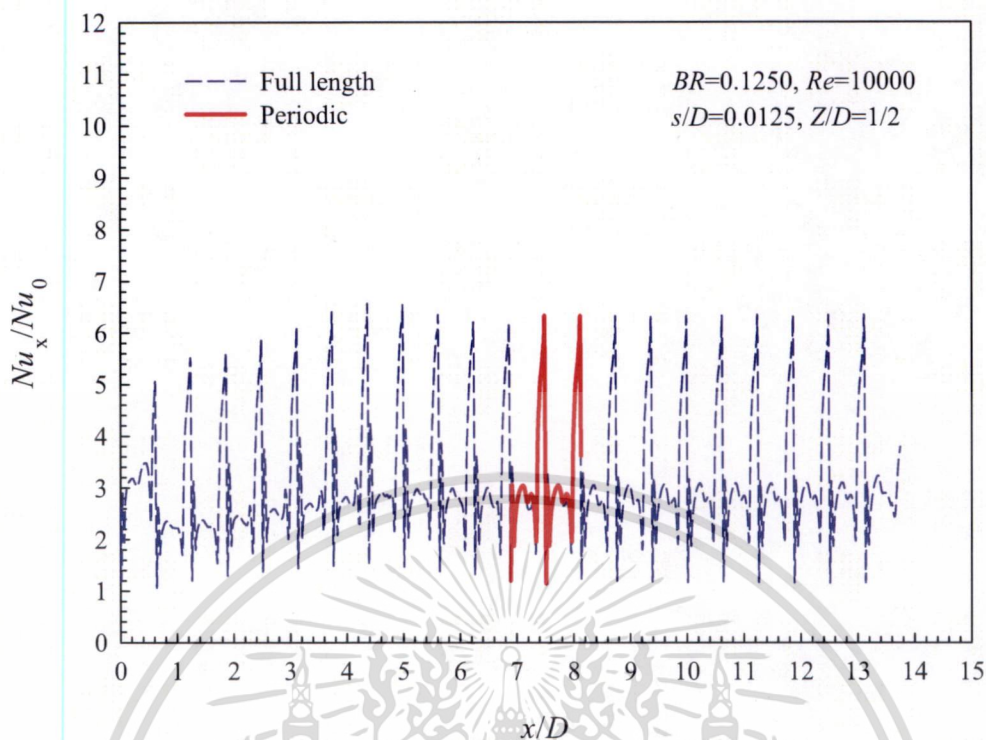
เอกสารนี้เป็นเอกสารของงานวิจัยที่สนับสนุนโดยโครงการวิจัยในชื่อ "การวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการนำเอาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้"

ในรูปที่ 5.10 และ 5.11 แสดงการกระจายค่า Nu_x/Nu_0 ไปตามทิศทางการไหล ที่ $Z/D=1/4$ และ $1/2$ ของครีบบางที่มีค่า $BR=0.0625$ ซึ่งเห็นได้ว่ารูปร่างของค่า Nu_x/Nu_0 เริ่มปรากฏซ้ำเป็นช่วงที่โมดูลที่ 2 หลังจากนั้นจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นและลดลงเล็กน้อยจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และซ้ำเป็นช่วงเชิงความร้อน ที่โมดูลที่ 17 หรือที่ตำแหน่ง x/D ประมาณ 10.5 ซึ่งตำแหน่งการเข้าสู่สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และซ้ำเป็นช่วงของกรณี $Z/D=1/4$ และ $1/2$ ไม่แตกต่างกัน แต่ครีบบางนั้นมีการเข้าสู่สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และซ้ำเป็นช่วงเชิงความร้อนก่อนครีบบางตัวเล็กกว่า ซึ่งสามารถสังเกตและเปรียบเทียบได้ระหว่างรูปที่ 5.10 และรูปที่ 5.1 ของกรณี $Z/D=1/4$

เมื่อความสูงของครีบบางเพิ่มขึ้นการเข้าสู่สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และซ้ำเป็นช่วงเชิงความร้อนมีแนวโน้มจะเกิดเร็วขึ้น ซึ่งสังเกตเห็นได้ในรูปที่ 5.12 และ 5.13 ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงการกระจายค่า Nu_x/Nu_0 ไปตามทิศทางการไหล ที่ $Z/D=1/4$ และ $1/2$ ของครีบบางที่มีค่า $BR=0.125$ ซึ่งจะเห็นได้ว่ารูปร่างของค่า Nu_x/Nu_0 เริ่มปรากฏซ้ำเป็นช่วงที่โมดูลที่ 2 หลังจากนั้นจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นและลดลงเล็กน้อยจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และซ้ำเป็นช่วง และสังเกตพบว่าที่ตำแหน่ง $Z/D=1/2$ ซึ่งเป็นตำแหน่งกึ่งกลางท่อนั้นเริ่มเข้าสู่สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และซ้ำเป็นช่วงช้ากว่าที่ตำแหน่ง $Z/D=1/4$ เล็กน้อย นั่นคือที่ $Z/D=1/2$ ค่า Nu_x/Nu_0 เข้าสู่สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และซ้ำเป็นช่วงที่โมดูลที่ 12 หรือที่ตำแหน่ง x/D ประมาณ 7.5 และตำแหน่งการเข้าสู่สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และซ้ำเป็นช่วงที่ $Z/D=1/4$ และ $BR=0.125$ ของครีบบางและครีบบางไม่แตกต่างกัน



รูปที่ 5.12 การกระจายค่า Nu_x/Nu_0 ของครีบบางที่ $BR=0.125$ ที่ตำแหน่ง $Z/D=1/4$ สำหรับการไหลแบบเต็มความยาวท่อและแบบเป็นโมดูลที่ $Re=10,000$

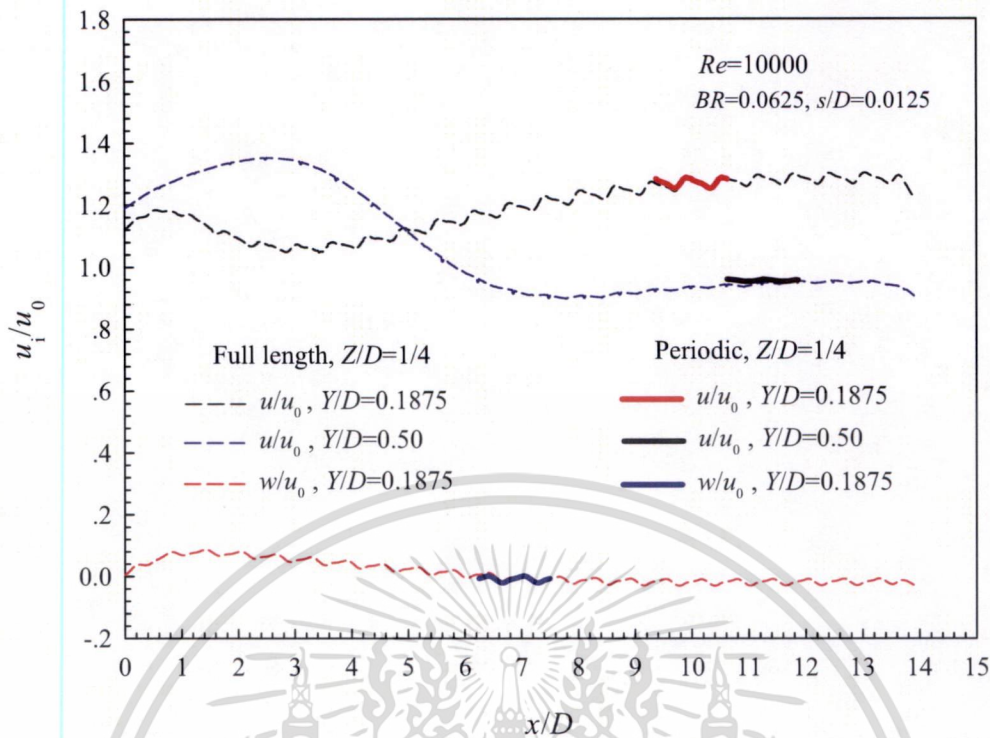


รูปที่ 5.13 การกระจายค่า Nu_x/Nu_0 ของครีบบางที่ $BR=0.125$ ที่ตำแหน่ง $Z/D=1/2$ สำหรับการไหลแบบเต็มความยาวท่อและแบบเป็นโมดูลที่ $Re=10,000$

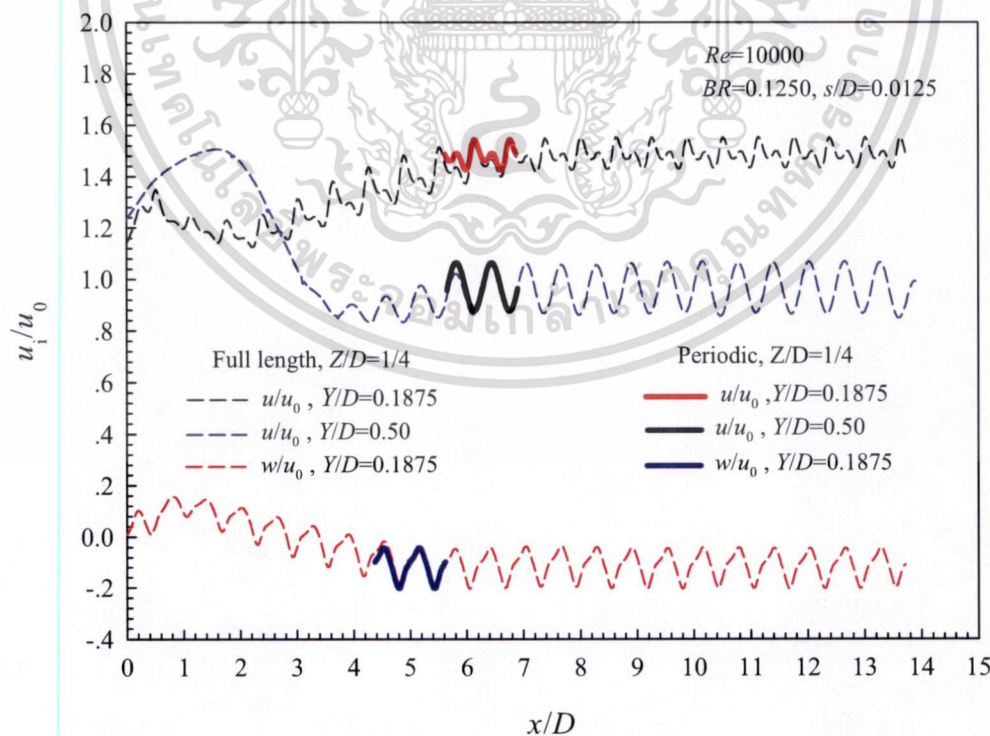
โดยภาพรวมแล้วสามารถกล่าวได้ว่า ครีบบางมีการเข้าสู่สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และช้าเป็นช่วงเชิงความร้อนก่อนครีบหนาเล็กน้อยสำหรับครีบที่มีความสูงไม่มากนัก และครีบบางมีค่า Nu_x/Nu_0 สูงกว่าครีบหนาที่สภาวะการไหลเดียวกัน

5.3.1.2 กรณีของการไหล

การศึกษาสภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และช้าเป็นช่วงเชิงความเร็ว พิจารณาในรูปที่ 5.14 และ 5.15 ซึ่งแสดงรูปร่างของค่า u_i/u_0 ซึ่งวัดค่าอย่างต่อเนื่องไปตามทิศทางการไหลในท่อทดสอบที่ติดตั้งครีบบางรูปตัววีทั้งกรณีของ $BR=0.0625$ และ 0.125 โดยที่ u_i แสดงถึงความเร็วย่อยในแต่ละแกน จากรูปของทั้งสองกรณีโดยภาพรวมพบว่า สำหรับค่าอัตราส่วนความเร็วย่อยในแนวแกน x ที่ตำแหน่งกึ่งกลางท่อ ($Y/D=0.5$) มีแนวโน้มเข้าสู่สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และช้าเป็นช่วงเชิงความเร็วช้าที่สุด และค่าอัตราส่วนความเร็วย่อยในแนวแกน Z ที่ตำแหน่ง $Y/D=0.1875$ เข้าสู่สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และช้าเป็นช่วงเชิงความเร็ว เร็วกว่าในแนวแกน x ที่ตำแหน่งเดียวกัน และครีบบางที่มีค่า $BR=0.125$ เข้าสู่สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และช้าเป็นช่วงเชิงความเร็ว เร็วกว่าครีบที่มีค่า $BR=0.0625$ ซึ่งสอดคล้องกับสภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และช้าเป็นช่วงเชิงความร้อน และนอกจากนี้ยังพบว่า การเข้าสู่สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และช้าเป็นช่วงเชิงความร้อนเร็วกว่ากรณีของการไหลเล็กน้อยสำหรับการไหลผ่านครีบบาง ซึ่งมีลักษณะที่สอดคล้องกันกับครีบหนา

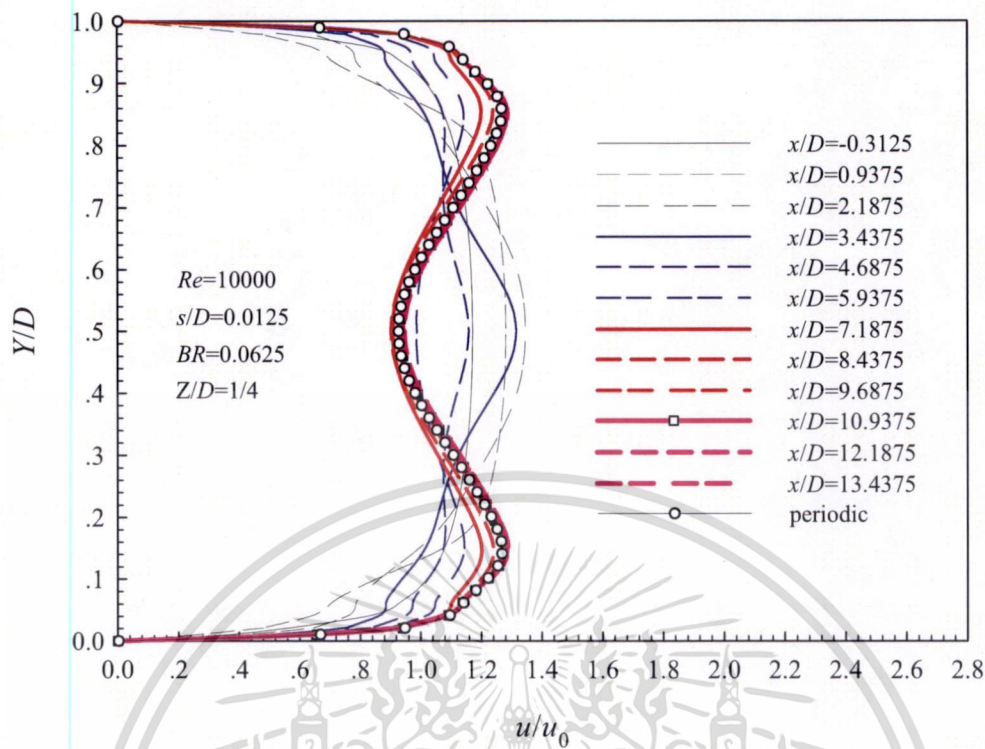


รูปที่ 5.14 การกระจายค่า u_i/u_0 ที่ $Z/D=1/4$, $Y/D=0.1875$ และ 0.50 ของครีบบางที่ $BR=0.0625$ สำหรับการไหลแบบเต็มความยาวท่อและแบบเป็นโมดูลที่ $Re=10,000$

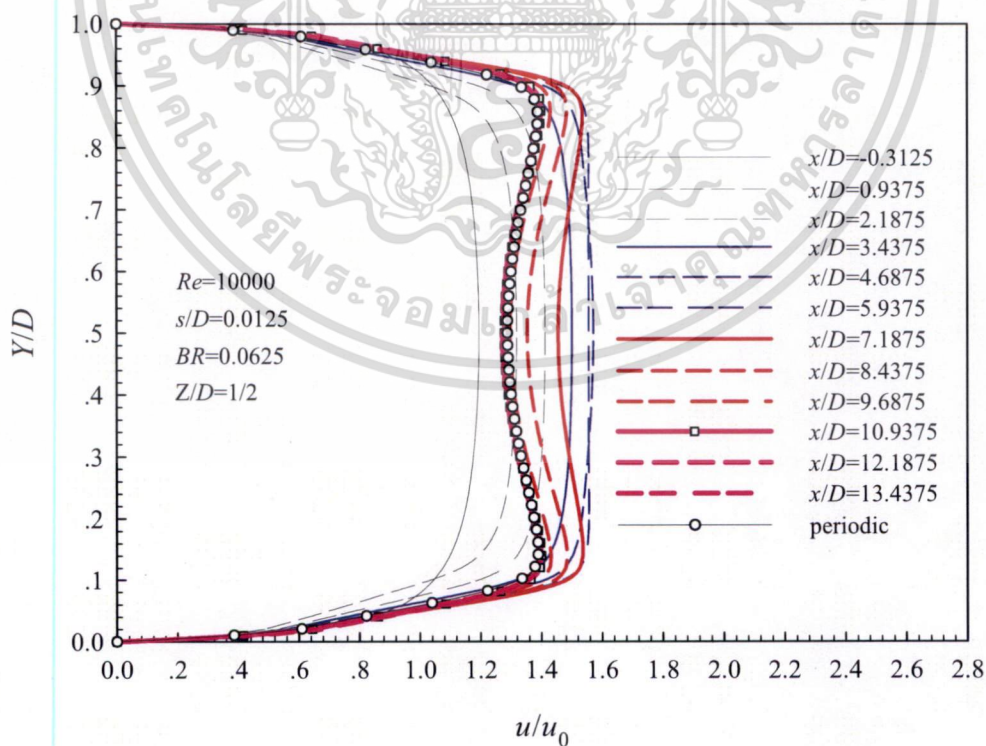


รูปที่ 5.15 การกระจายค่า u_i/u_0 ที่ $Z/D=1/4$, $y/D=0.1875$ และ 0.50 ของครีบบางที่ $BR=0.125$

เอกสารนี้เป็นเอกสารสำหรับการไหลแบบเต็มความยาวท่อและแบบเป็นโมดูลที่ $Re=10,000$ ซึ่งประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

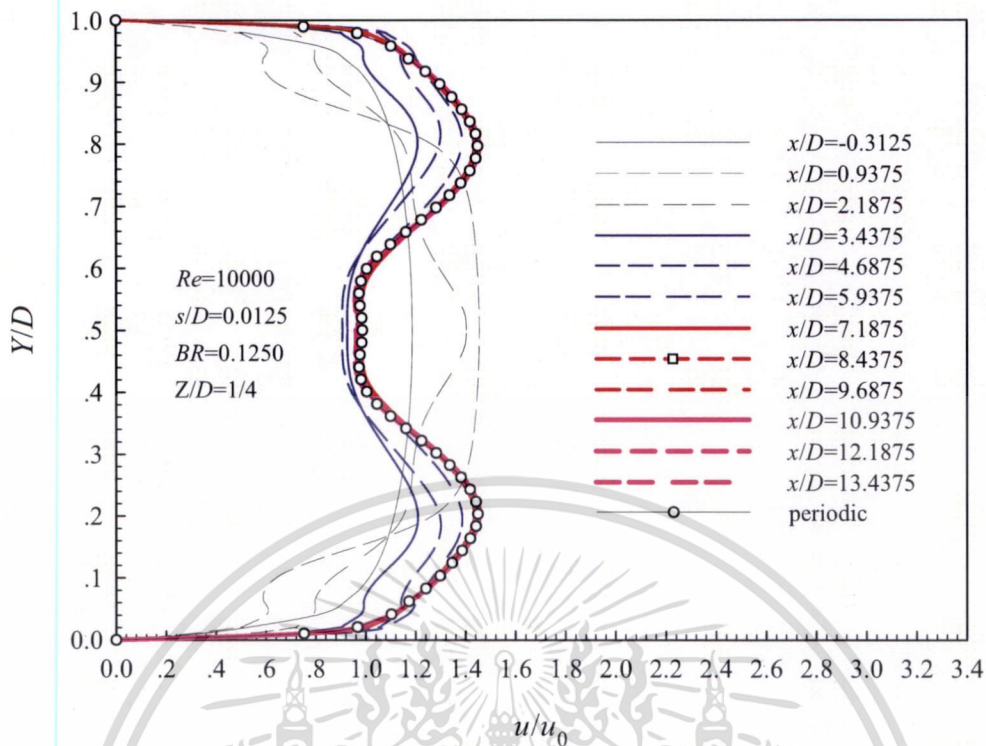


รูปที่ 5.16 การกระจายค่า u/u_0 ที่ $Z/D=1/4$ ของครีบบางที่ $BR=0.0625$ สำหรับการไหลแบบเต็มความยาวท่อและแบบเป็นโมดูลที่ $Re=10,000$

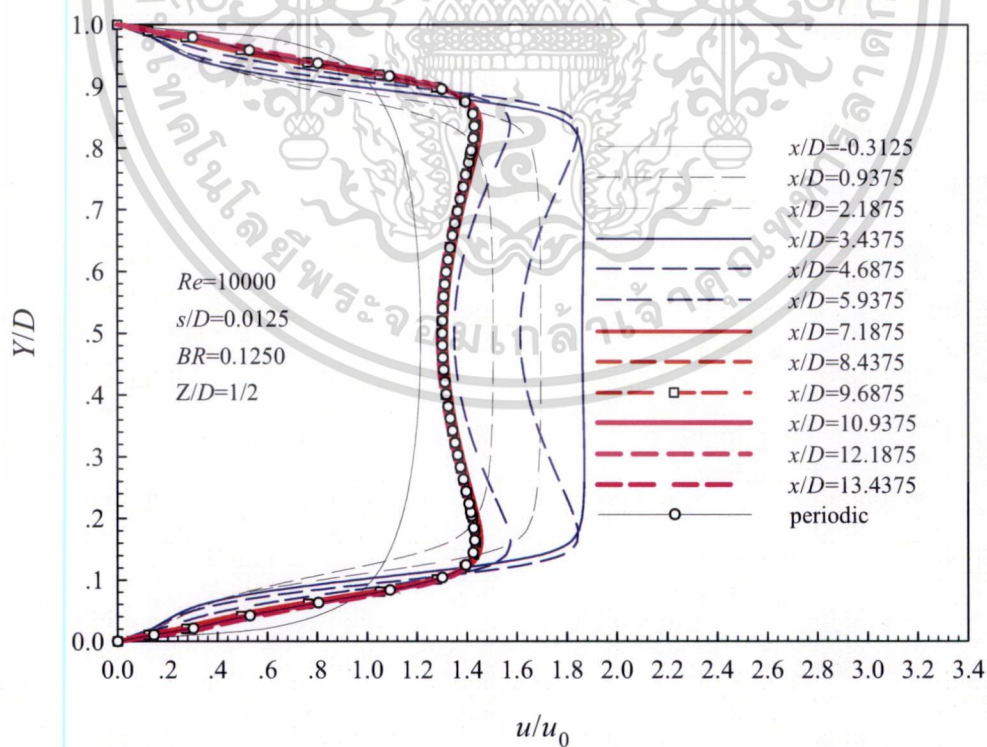


รูปที่ 5.17 การกระจายค่า u/u_0 ที่ตำแหน่ง $Z/D=1/2$ ของครีบบางที่ $BR=0.0625$ สำหรับการไหลแบบเต็มความยาวท่อและแบบโมดูลที่ $Re=10,000$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.18 การกระจายค่า u/u_0 เฉลี่ย ที่ตำแหน่ง $Z/D=1/4$ ของครีบบางที่ $BR=0.125$ สำหรับการไหลแบบเต็มความยาวท่อและแบบโมดูลที่ $Re=10,000$



รูปที่ 5.19 การกระจายค่า u/u_0 ที่ตำแหน่ง $Z/D=1/2$ ของครีบบางที่ $BR=0.125$ สำหรับการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารแบบเต็มความยาวท่อและแบบโมดูลที่ $Re=10,000$ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้การศึกษาสภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และช้าเป็นช่วงเชิงความเร็ว ที่มีกาลไหลภายในท่อที่ติดตั้งครีบบางนั้น ยังได้แสดงการกระจายค่าของ u/u_0 ในแต่ละโมดูลที่วัดค่าไปตามแนวทิศทางการไหล ซึ่งเป็นการแสดงค่า u/u_0 ของกรณีการคำนวณการไหลแบบเต็มความยาวท่อ และในทุกกรณีนั้นมีค่า $Re=10,000$ และ $PR=0.625$ ดังแสดงในรูปที่ 5.16 ถึง 5.19 ซึ่งสามารถเห็นได้ชัดเจนถึงการพัฒนารูปร่างของความเร็วจนเข้าสู่สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และช้าเป็นช่วงเชิงความเร็ว

ในรูปที่ 5.16 และ 5.17 แสดงการกระจายค่า u/u_0 ไปตามทิศทางการไหลของครีบบางที่มีค่า $BR=0.0625$ ซึ่งวัดค่าที่ตำแหน่ง $Z/D=1/4$ และ $1/2$ พบว่าการเข้าสู่สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และช้าเป็นช่วงเชิงความเร็ว ของทั้งสองตำแหน่งเกิดขึ้นที่ x/D ประมาณ 10:9 ซึ่งไม่แตกต่างกัน

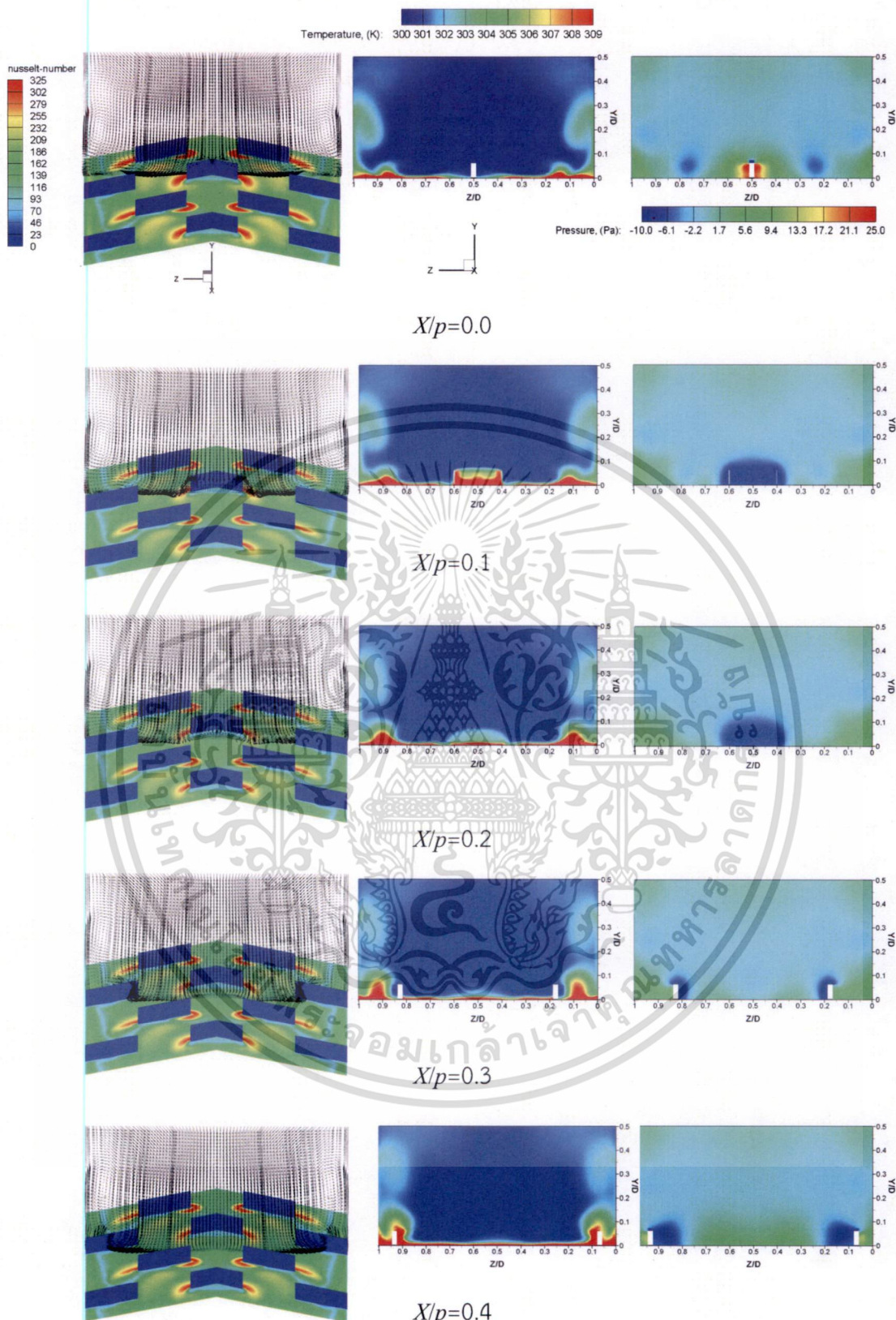
ในรูปที่ 5.18 และ 5.19 เป็นกราฟที่แสดงการกระจายค่า u/u_0 ไปตามทิศทางการไหล ที่มีค่า $BR=0.125$ ที่ตำแหน่ง $Z/D=1/4$ และ $1/2$ จะเห็นได้ว่าการวัดค่าที่ตำแหน่ง $Z/D=1/2$ (ซึ่งเป็นตำแหน่งกึ่งกลางท่อ) เข้าสู่สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และช้าเป็นช่วงเชิงความเร็วที่ค่า x/D ประมาณ 9.7 ช้ากว่าเล็กน้อยของการวัดค่าที่ตำแหน่ง $Z/D=1/4$ ซึ่งเข้าสู่สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และช้าเป็นช่วงเชิงความเร็วที่ x/D ประมาณ 8.4

โดยภาพรวมแล้วพบว่าครีบบางที่มีค่า $BR=0.125$ เข้าสู่สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และช้าเป็นช่วงเชิงความเร็วก่อนครีบบางที่มีค่า $BR=0.0625$ สำหรับการวิเคราะห์การไหลในแต่ละแบบ

5.3.2 โครงสร้างของสนามการไหลผ่านครีบบาง

โครงสร้างของการไหลในแต่ละหน้าตัดท่อ ที่ติดตั้งครีบบางรูปตัววีแบบแยกตัวทำมุมปะทะ 60° กับทิศทางการไหลและเรียงตัวแบบซ้ำกันที่ผนังด้านบนและด้านล่าง สามารถแสดงได้โดยการพิจารณาเวกเตอร์ของความเร็ว สนามอุณหภูมิ และสนามความดัน ของระนาบตัดขวางในตำแหน่งต่างๆ (อ้างอิงตามตำแหน่งในรูปที่ 5.4) ซึ่งแสดงในส่วนของครึ่งล่างของโมดูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ที่ $Re=15,000$ ในแต่ละตำแหน่งตามทิศทางการไหลเริ่มต้นที่ $X/p=0$ ถึง 0.9 โดยแบ่งเป็นช่วงละ 0.1 ดังแสดงรายละเอียดไว้ในรูปที่ 5.20

เวกเตอร์ของความเร็ว สนามอุณหภูมิ และสนามความดันที่แต่ละระนาบตัดขวาง ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้ครอบคลุมลักษณะทั้งหมดของอิทธิพลของครีบบางรูปตัววีแบบแยกตัวต่อกระแสการไหลหลัก โดยอิทธิพลต่างๆ เหล่านี้ได้รวมถึง การไหลแยกตัวของกระแสการไหลหลัก กระแสวนหรือการหมุนวน และการไหลชั้นที่สอง สามารถเห็นได้ชัดเจนถึงการไหลของสองกระแสวนตามยาวที่หมุนสวนทางกัน ซึ่งเกิดจากครีบบางที่ปรากฏบนผนังส่วนครึ่งล่างของท่อ การเกิดกระแสวนตามยาวสามารถช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อให้สูงขึ้นได้เนื่องจากความดันที่บริเวณการไหลด้านหลังครีบบางมีค่าต่ำ จึงเหนี่ยวนำให้มีการเคลื่อนย้ายของไหลจากแกนการไหลหลัก เกิดการหมุนวนเข้าสู่ผนังของพื้นผิวที่ถ่ายเทความร้อน ซึ่งการหมุนวนเหล่านี้จะไปพาความร้อนออกจากพื้นผิวแล้วเคลื่อนที่ขึ้นด้านบนโดยมีรูปแบบซ้ำกันอย่างต่อเนื่องในแต่ละโมดูล

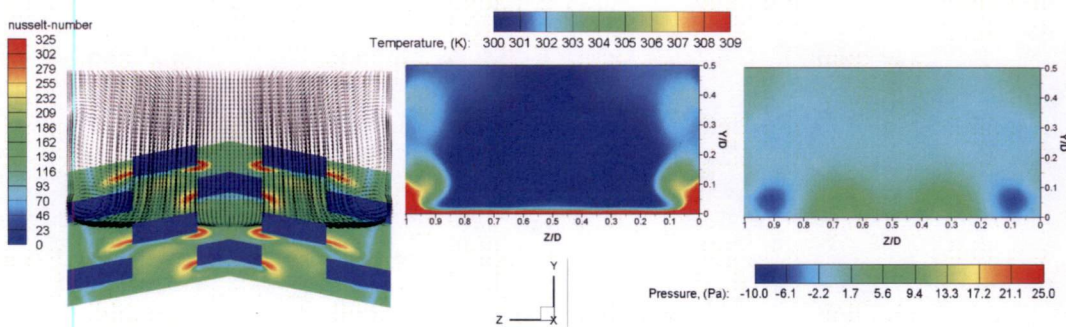


สนามความเร็ว

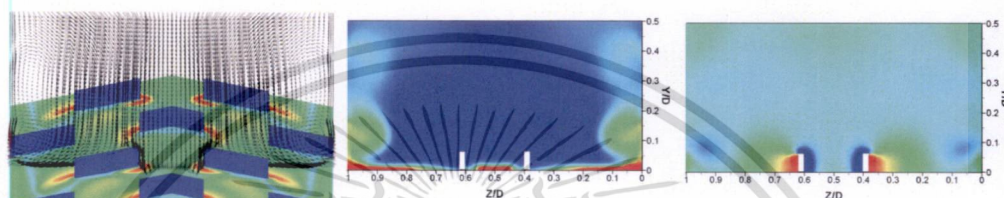
สนามอุณหภูมิ

สนามความดัน

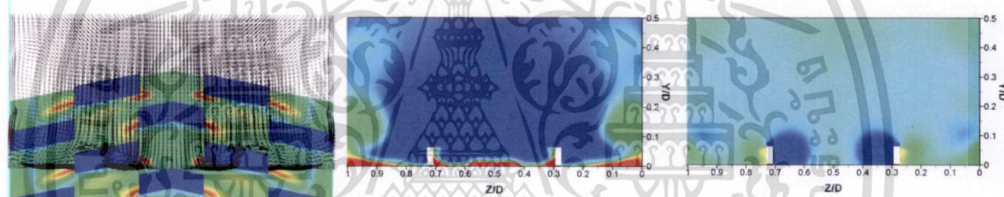
รูปที่ 5.20 สนามความเร็ว อุณหภูมิ และความดัน ที่แต่ละหน้าตัดของหนึ่งโมดูลสำหรับการไหลผ่าน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษารายงานไปก่อนขอตัวใหม่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ครีบบางบนพื้นผิวให้ความร้อนที่ค่า $BR=0.0625$, $PR=0.625$ และ $Re=15,000$ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



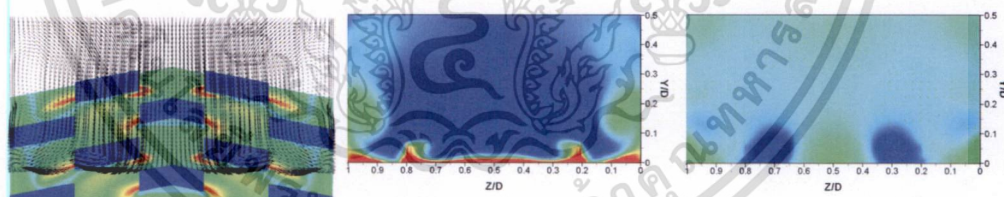
$X/p=0.5$



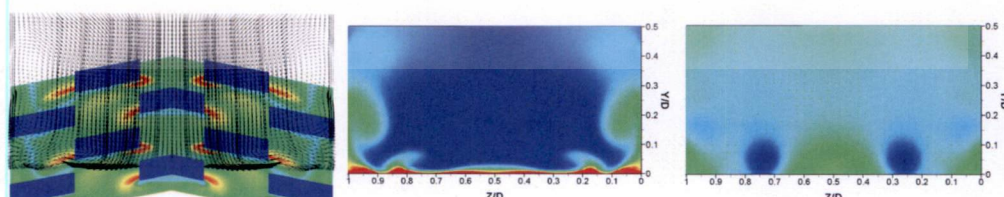
$X/p=0.6$



$X/p=0.7$



$X/p=0.8$



$X/p=0.9$

สนามความเร็ว

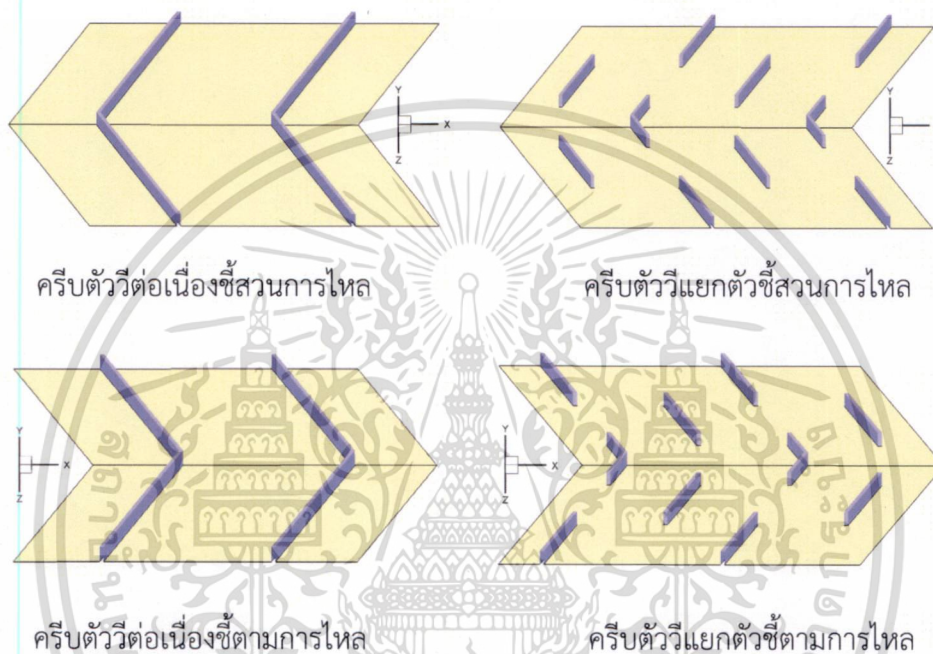
สนามอุณหภูมิ

สนามความดัน

รูปที่ 5.20 สนามความเร็ว อุณหภูมิ และความดัน ที่แต่ละหน้าตัดของหนึ่งโมดูลสำหรับการไหลผ่าน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปเผยแพร่โดยไม่ผ่านการคำ ตรีบบางบนพื้นผิวให้ความร้อนที่ค่า $BR=0.0625$, $PR=0.625$ และ $Re=15,000$ (ต่อ) ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

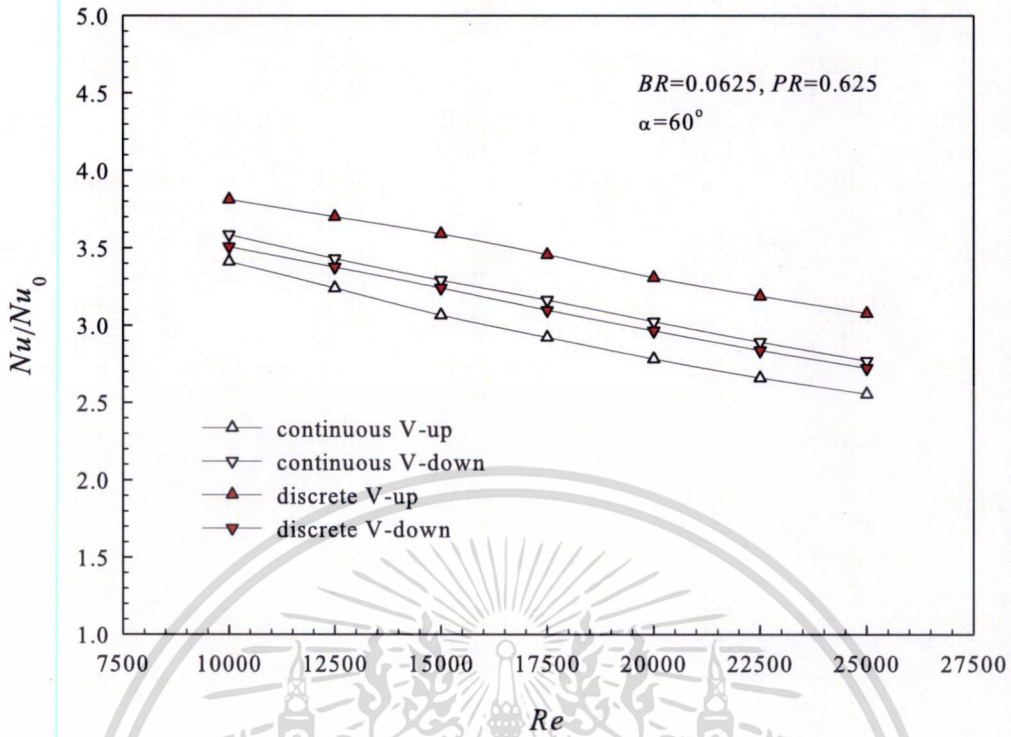
5.3.3 อิทธิพลของการจัดวางครีบบางรูปตัววี

จากการศึกษาในหัวข้อที่ผ่านมาได้พบว่า ครีบบางนั้นให้ค่า Nu สูงกว่าครีบบางจัตุรัสหรือครีบบางที่มีเงื่อนไขของการไหลเดียวกัน โดยมีลักษณะการจัดวางครีบบางรูปแบบเดียวกันกับในงานวิจัยของ SriHarsha et al. (2009) ซึ่งเหมาะสมสำหรับครีบบางจัตุรัส ในส่วนนี้ก่อให้เกิดข้อสงสัยว่าสำหรับการใช้ครีบบางร่วมกับการจัดวางครีบบางในลักษณะดังกล่าวนั้น เป็นการจัดเรียงครีบบางที่ให้ค่า TEF ที่สูงที่สุดหรือไม่ ดังนั้นในหัวข้อถัดไปจะดำเนินการศึกษาถึงลักษณะการจัดวางครีบบางที่เหมาะสมสำหรับครีบบาง

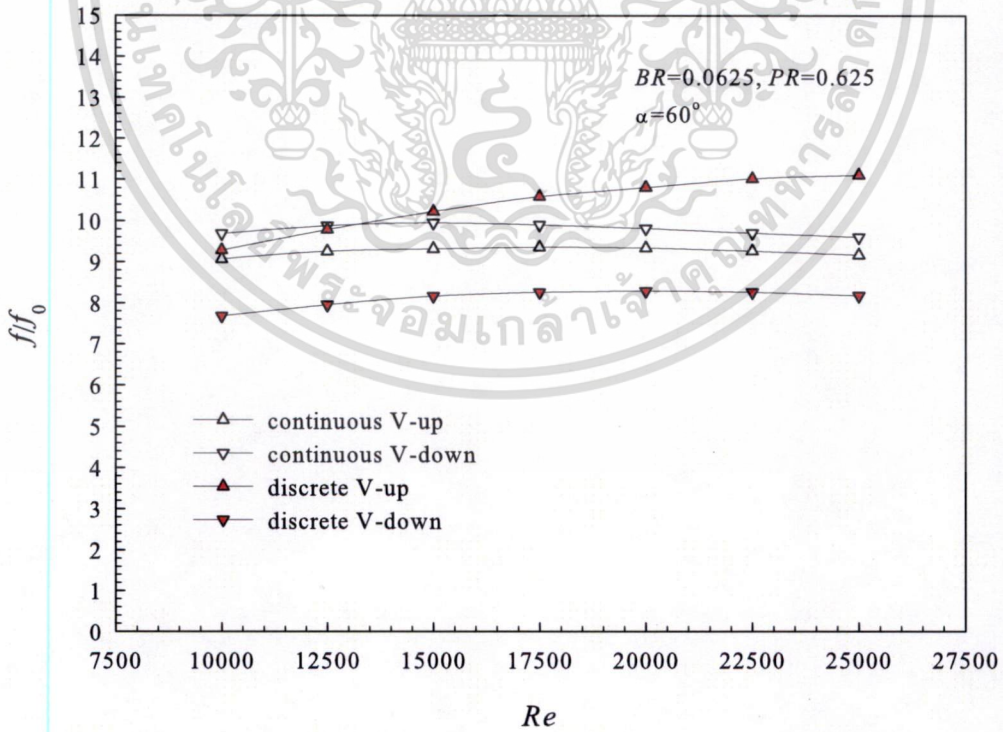


รูปที่ 5.21 รูปแบบการจัดวางครีบบางที่แตกต่างกัน 4 รูปแบบ

รูปที่ 5.21 แสดงรูปร่างของการจัดวางครีบบางแบบสมมาตรที่มีรูปแบบแตกต่างกัน 4 แบบ ซึ่งติดตั้งบนพื้นผิวให้ความร้อนที่ผนังด้านบนและด้านล่าง ในช่องทางไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส เพื่อนำไปใช้วิเคราะห์การเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อน ตัวประกอบความเสียหาย และนำไปสู่ค่า TEF ที่มีค่าสูงที่สุดและเหมาะสม โดยรูปแบบการจัดเรียงครีบบางประกอบไปด้วย ครีบบางตัววีต่อเนื่องขึ้นส่วนการไหล(continuous V-up), ครีบบางตัววีแยกตัวขึ้นส่วนการไหล(discrete V-up), ครีบบางตัววีต่อเนื่องขึ้นตามการไหล(continuous V-down) และครีบบางตัววีแยกตัวขึ้นตามการไหล(discrete V-down) ซึ่งใน ส่วนนี้จะกำหนดให้ค่ามุมปะทะ($\alpha=60^\circ$), ระยะห่างระหว่างครีบบาง($PR=0.625$) และความสูงครีบบาง($BR=0.0625$) มีค่าคงที่ โดยมีทิศทางการไหลไปตามแกน x และค่า Re ที่พิจารณาอยู่ในช่วง 10,000-25,000

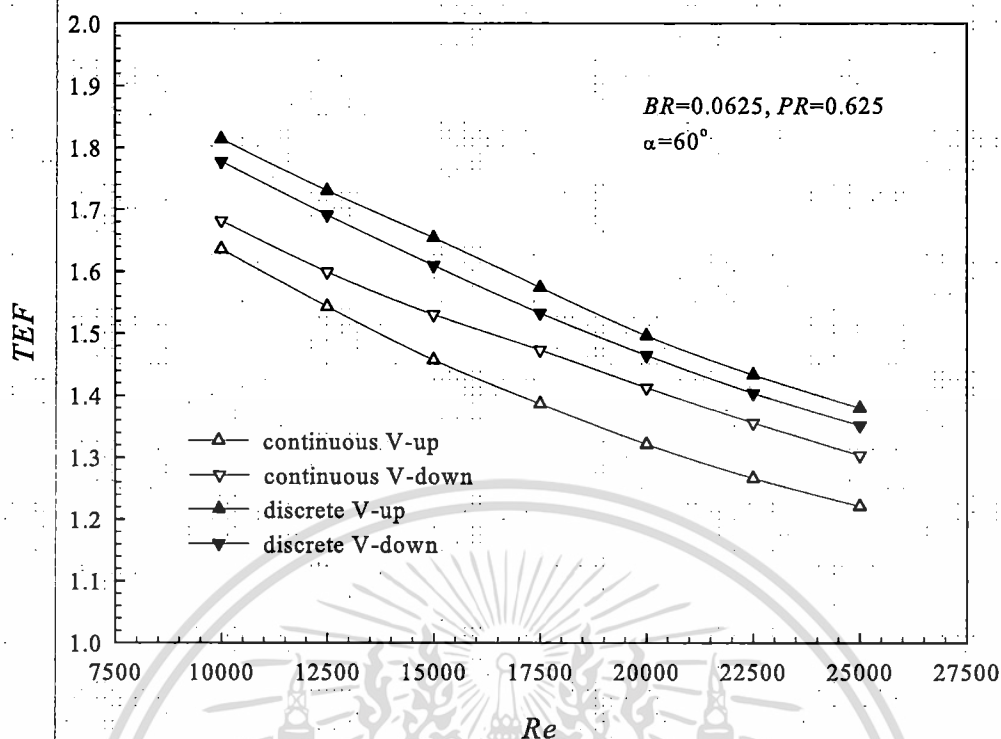


รูปที่ 5.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Nu/Nu_0 กับค่า Re สำหรับการจัดวางครีบทั้ง 4 แบบ



รูปที่ 5.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า f/f_0 กับค่า Re สำหรับการจัดวางครีบทั้ง 4 แบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



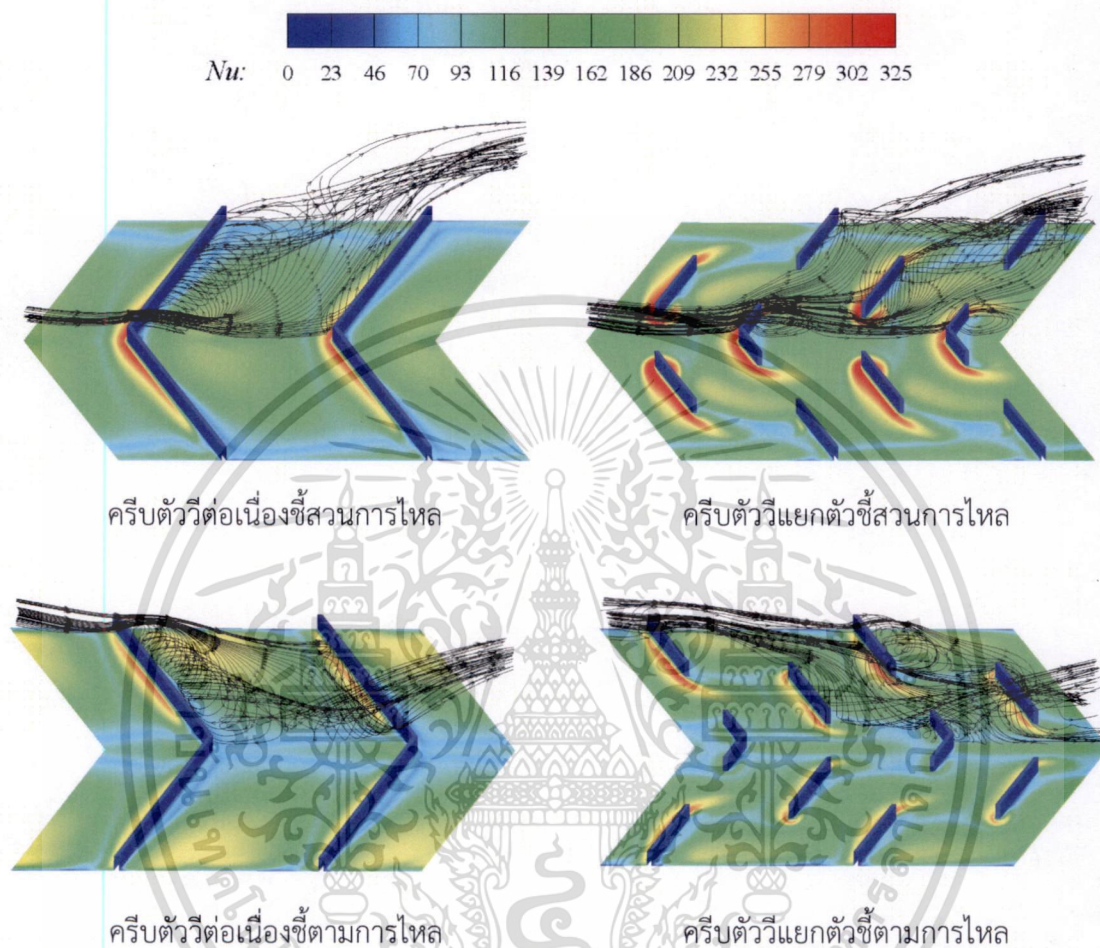
รูปที่ 5.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า TEF กับค่า Re สำหรับการจัดวางครีบทั้ง 4 แบบ

อิทธิพลของการจัดวางครีบบางรูปตัววีทั้ง 4 แบบ ที่ส่งผลต่อค่าการถ่ายเทความร้อน พิจารณาได้จากรูปที่ 5.22 ซึ่งเป็นกราฟของความสัมพัทธ์ระหว่างค่า Nu/Nu_0 กับค่า Re พบว่าการจัดวางครีบบางแบบ ครีบทวีแยกตัวขึ้นส่วนการไหล ให้ค่า Nu สูงที่สุดตลอดช่วงค่า Re ที่พิจารณา โดยมีค่า Nu/Nu_0 อยู่ในช่วง 3.08-3.81 และค่า Nu/Nu_0 มีแนวโน้มลดลงเมื่อ Re สูงขึ้น ในขณะที่การจัดวางครีบบางแบบครีบทวีต่อเนื่องขึ้นตามการไหล และครีบทวีแยกตัวขึ้นตามการไหลให้ค่าใกล้เคียงกัน และแบบครีบทวีต่อเนื่องขึ้นส่วนการไหลให้ค่า Nu/Nu_0 ต่ำที่สุดสำหรับการจัดวางครีบทั้ง 4 แบบ เมื่อพิจารณาการกระจายค่าเลขนี้สเซลที่บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนของการจัดวางครีบทั้ง 4 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 5.25 สังเกตพบว่สำหรับการจัดวางครีบบางแบบครีบทวีแยกตัวขึ้นส่วนการไหลนั้น ในบริเวณด้านหน้าครีบบางรูปตัววีและครีบทวีที่แยกตัวออกมา มีค่าเลขนี้สเซลที่เฉพาะที่สูงกว่ากรณีการจัดวางครีบบางแบบอื่นๆ

อิทธิพลของรูปแบบการจัดวางครีบบางรูปตัววีแบบแยกตัวบนพื้นผิวให้ความร้อนที่ส่งผลต่อค่า f/f_0 พิจารณาได้จากรูปที่ 5.23 ซึ่งเป็นกราฟของความสัมพัทธ์ระหว่างค่า f/f_0 กับค่า Re พบว่าการจัดวางครีบบางแบบครีบทวีแยกตัวขึ้นส่วนการไหล ให้ค่า f/f_0 มีแนวโน้มสูงกว่าการจัดวางครีบบางรูปทรงอื่น โดยมีค่า f/f_0 อยู่ในช่วง 9.29-11.11 ในขณะที่การจัดวางครีบบางแบบครีบทวีแยกตัวขึ้นตามการไหล ให้ค่า f/f_0 ต่ำที่สุดซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 7.68-8.18 ตลอดช่วง Re ที่พิจารณา

อิทธิพลของการจัดวางครีบบางรูปตัววีที่มีผลต่อค่า TEF พิจารณาได้จากรูปที่ 5.24 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า TEF กับค่า Re ในภาพรวมพบว่าการจัดวางครีบบางแบบครีบทวีแยกตัวขึ้นส่วนการไหล ให้ค่า TEF สูงที่สุดตลอดช่วง Re ที่พิจารณา และสูงกว่าการจัดวางครีบบางแบบครีบทวีแยกตัวขึ้นตามการไหลเล็กน้อย ในขณะที่การจัดวางครีบบางแบบครีบทวีต่อเนื่องขึ้นส่วนการไหล ให้ค่า

TEF น้อยที่สุด การจัดวางครีบบทัง 4 แบบสังเกตพบว่าค่า TEF มีแนวโน้มลดลงเมื่อ Re เพิ่มสูงขึ้น และการจัดวางครีบบทแบบครีบบทตัววีแยกตัวชี้สวนการไหลนั้นให้ค่า TEF สูงสุดคือ 1.81 ที่ $Re=10,000$ และมีค่าน้อยที่สุดคือ 1.38 ที่ $Re=25,000$

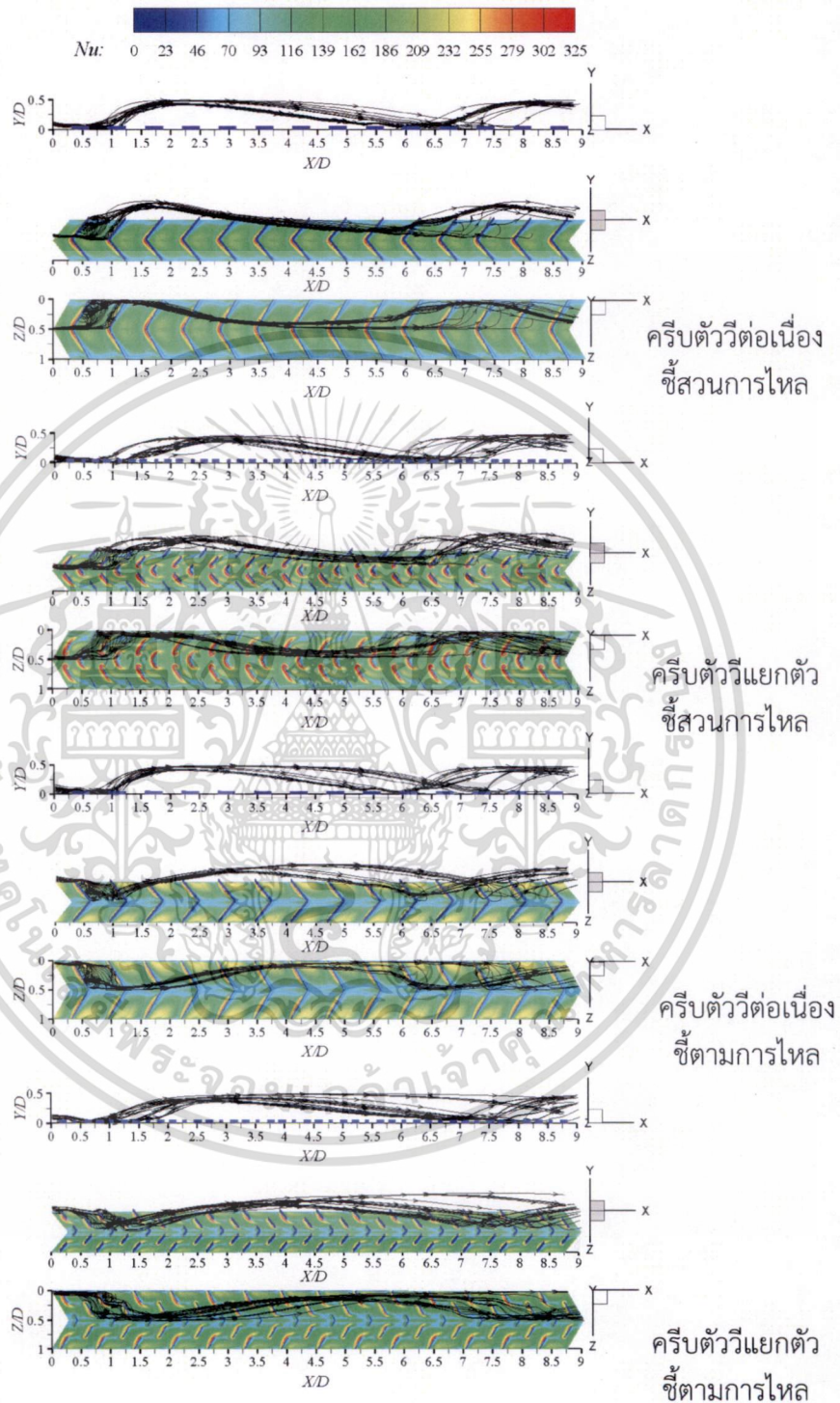


รูปที่ 5.25 การกระจายค่าเลขนี้สเซลท์เฉพาะที่ และเส้นทางการเดินอนุภาคในบริเวณระหว่างครีบบทของการจัดวางครีบบททั้ง 4 รูปแบบ ที่ $Re=15,000$

พิจารณารูปที่ 5.25 พบว่าการจัดวางครีบบทแบบครีบบทตัววีแยกตัวชี้สวนการไหล มีบริเวณที่ให้ค่าเลขนี้สเซลท์เฉพาะที่สูงกว่าการจัดวางครีบบทรูปแบบอื่น โดยเฉพาะบริเวณการไหลตกกระทบบทด้านหน้าของครีบบทตัววีและครีบบทที่แยกตัวออกมา แต่ในบริเวณการไหลแยกตัวทางด้านหน้าครีบบทที่ติดกับผนัง มีค่าเลขนี้สเซลท์เฉพาะที่ต่ำกว่าบริเวณอื่น นอกจากนี้ยังสามารถสังเกตเห็นได้ถึงลักษณะการไหลที่แตกต่างกันของการจัดวางครีบบทแบบครีบบทตัววีชี้สวนการไหล (V-up) และ ครีบบทตัววีชี้ตามการไหล (V-down) นั่นคือสำหรับการไหลผ่านครีบบทแบบครีบบทตัววีชี้สวนการไหล นั้นมีการแยกการไหลในบริเวณกลางท่อถูกเหนี่ยวนำให้ตกกระทบบทลงที่บริเวณด้านหน้าครีบบท แล้วหมุนวนเข้าสู่ด้านข้างของผนังท่อทั้งสองด้านแบบทวนเข็มนาฬิกาเมื่อมองสวนทางการไหล แต่การไหลผ่านครีบบทแบบครีบบทตัววีชี้ตามการไหลนั้น เกิดในทิศทางที่ตรงข้ามกันนั่นคือ มีการไหลจากด้านข้างมาสู่บริเวณกลางท่อแล้วเกิดการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมุ่นวนซึ่่นด้ำนบ่นบ่บตมข้มนนพิกนเมื่่มองสว่นทงกรไหล เนื่องกม้กรไหลแยกตัวจกพื้นผิวที่บริเวณกล่งท่จ้งส่งผลให้ม้ค้เลขน้สเซลท์เฉพกที่ต่ำกว่บริเวณอื่น



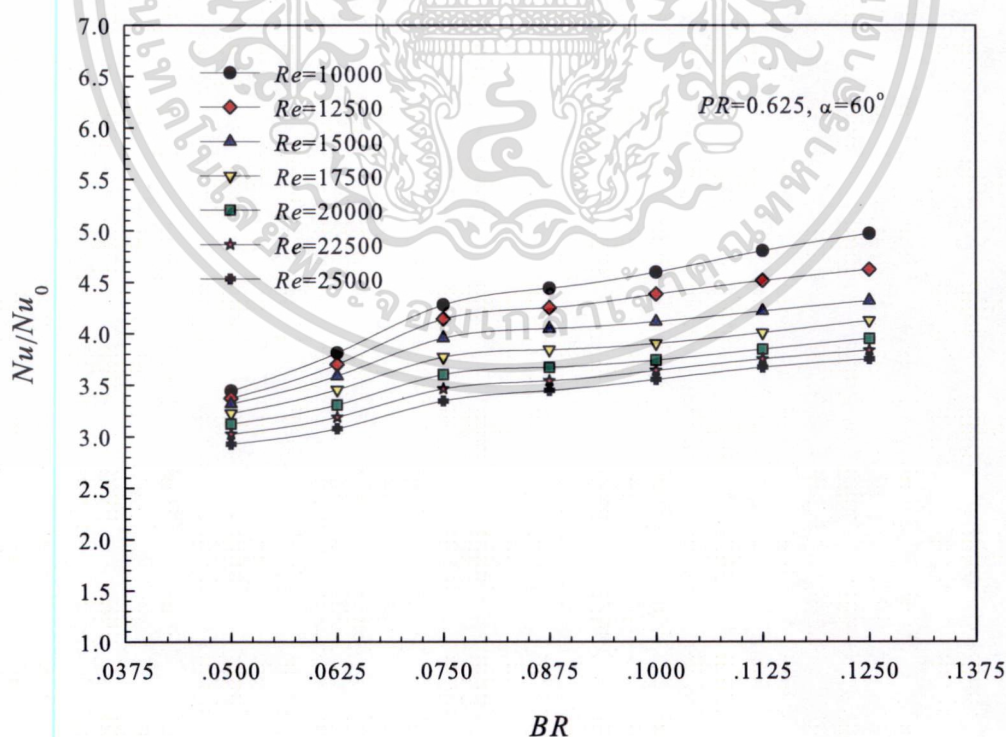
รูปที่ 5.26 เส้นทงเดินอนุภก การไหลตกรทบพื้นผิว และการกระจยค้เลขน้สเซลท์เฉพกที่ ส้ห้กรจัดว่งครีบท้ง 4 รูปบ่บ ที่ $Re=15,000$

เอกสาร์น้เป็นเอกสาร์ที่สงวนไว้ส้ห้กรใช้ทงน้เพื่อกศกษท่ท่นั้น ไม่อนุญตให้น้ไปใช้ประโยชน์ด้ำนกรค้ ไม่ว่กรณ้ใด ๆ ท้งล้ัน อีกร้ท้งห้มมีให้ตดเปล่งเนือห และต้องอ้งอิงถึงเจ้ของเอกสาร์ท้กร้ที่ม้กรน้ไปใช้

เมื่อพิจารณาเส้นทางเดินอนุภาค การไหลตกกระทบพื้นผิว และการกระจายเลขนัสเซลล์เฉพาะที่ ซึ่งเกิดจากการไหลผ่านครีบทั้ง 4 รูปแบบ ที่ค่า $Re=15,000$ ดังแสดงในรูปที่ 5.26 สังเกตพบว่าครีบบางแบบครีบทัววิแยกตัวชี้สวนการไหล ให้ระยะการไหลตกกระทบที่สั้นกว่าซึ่งบ่งบอกถึงเกลียวของกระแสที่มีความถี่สูง และมีการกระจายตัวของกระแสการไหลบนพื้นผิวให้ความร้อนเป็นบริเวณกว้าง จึงส่งผลให้ทั้งค่าการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบความเสียดทาน มีแนวโน้มสูงกว่าการไหลผ่านครีบบางรูปแบบอื่น และเมื่อพิจารณาที่ค่า TEF สามารถสรุปได้ว่าการจัดวางครีบบางแบบครีบทัววิแยกตัวชี้สวนการไหล มีความเหมาะสมต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด

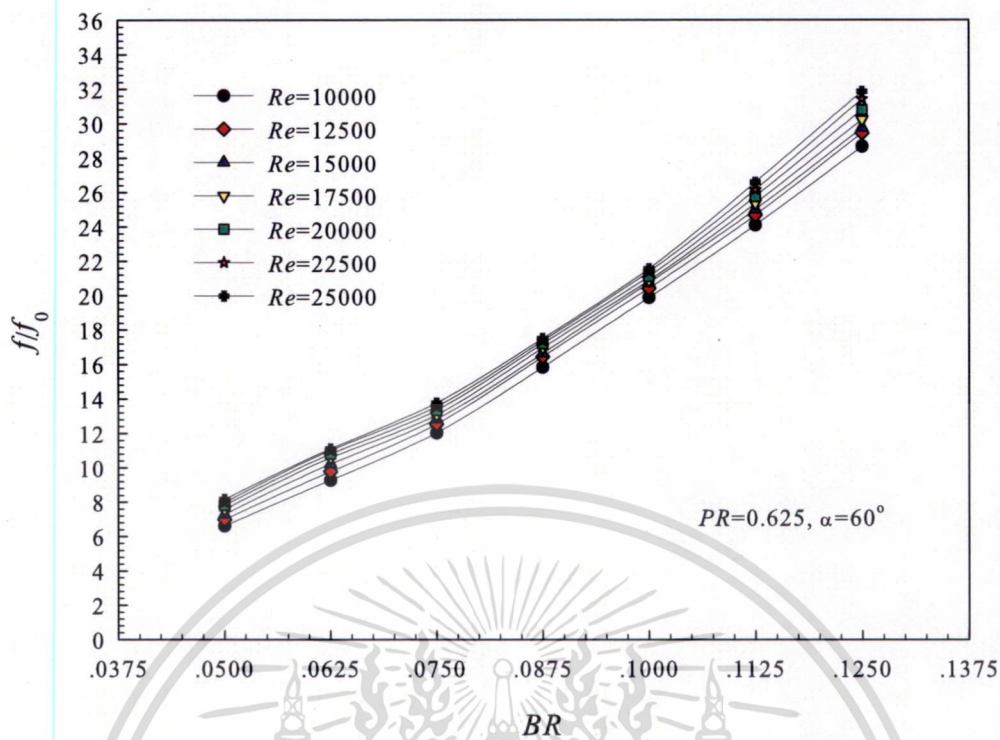
5.3.4 อิทธิพลค่า BR ของครีบบางที่มีการจัดวางแบบครีบทัววิแยกตัวชี้สวนการไหล

อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงค่าความสูงของครีบบางรูปตัววีแบบแยกตัวที่ส่งผลต่อค่าการถ่ายเทความร้อน ปรากฏได้จากรูปที่ 5.27 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่า Nu/Nu_0 ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่า BR ซึ่ง BR มีค่าเท่ากับ 0.050, 0.0625, 0.075, 0.0875, 0.10, 0.1125 และ 0.125 ที่ค่า Re ในช่วง 10,000-25,000 ในภาพรวมพบว่าเมื่อครีบบางมีความสูงเพิ่มขึ้น Nu/Nu_0 มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากความสูงของครีบบางที่เพิ่มขึ้นจะสร้างกระแสที่รุนแรงขึ้น และเพิ่มความเข้มของการหมุนวนในบริเวณการไหลตกกระทบที่เกิดขึ้นบริเวณด้านหลังครีบบาง จึงส่งผลให้ Nu/Nu_0 เพิ่มสูงขึ้น โดยที่ความสูงครีบบางที่ให้ค่า Nu/Nu_0 สูงที่สุดคือ $BR=0.125$ เมื่อเฉลี่ยค่าตลอดช่วง Re ที่พิจารณาจะมีค่าประมาณ 4.01 และครีบบางที่ให้ค่า Nu/Nu_0 ต่ำที่สุดคือ $BR=0.05$ โดยมีค่าเฉลี่ยตลอดช่วง Re ที่พิจารณาประมาณ 3.20 และสังเกตพบว่าเมื่อครีบบางมีความสูงตั้งแต่ค่า $BR=0.075$ ขึ้นไป ความชันของการเพิ่มค่า Nu/Nu_0 มีแนวโน้มลดลง

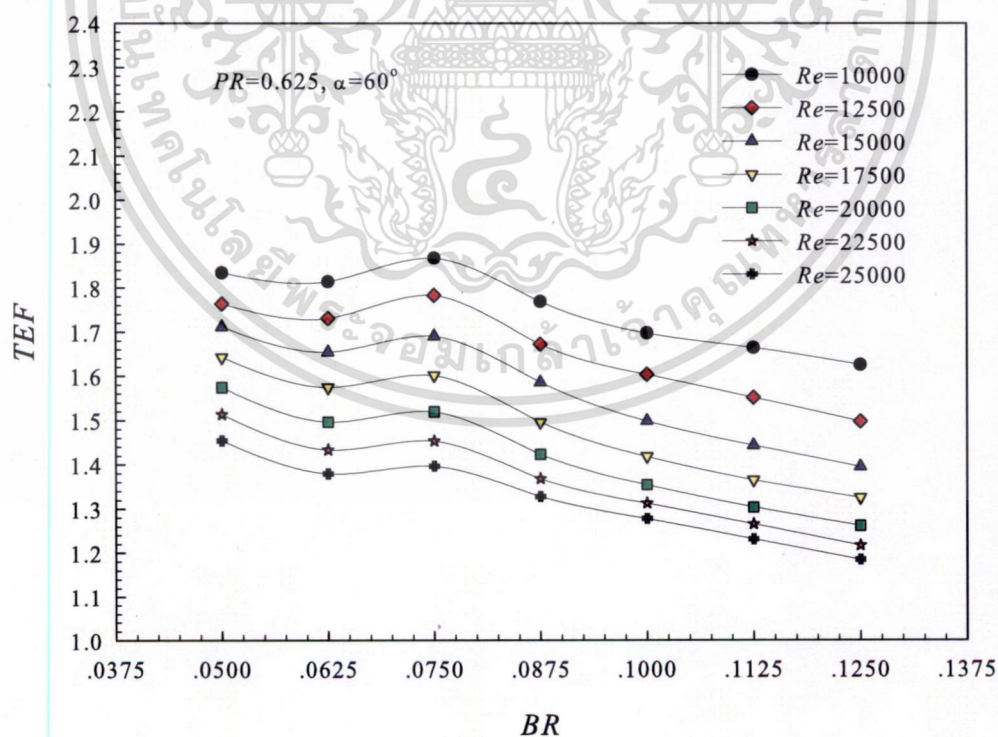


รูปที่ 5.27 การเปลี่ยนแปลงค่า Nu/Nu_0 กับค่า BR ตั้งแต่ 0.05-0.125 ที่ค่า $PR=0.625$ และ $\alpha=60^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.28 การเปลี่ยนแปลงค่า f/f_0 กับค่า BR ตั้งแต่ 0.05-0.125 ที่ค่า $PR=0.625$ และ $\alpha=60^\circ$



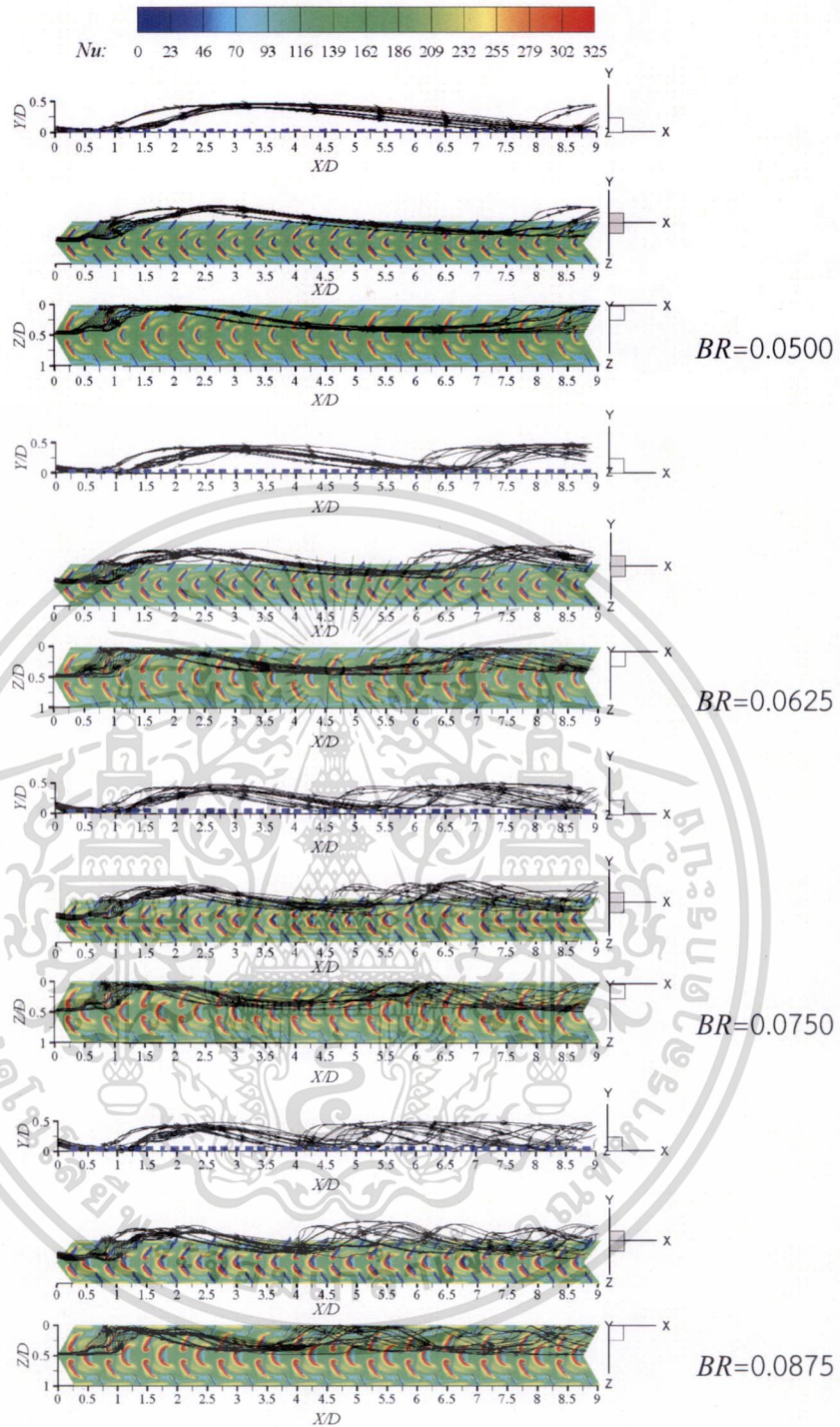
รูปที่ 5.29 การเปลี่ยนแปลงค่า TEF กับค่า BR ตั้งแต่ 0.05-0.125 ที่ค่า $PR=0.625$ และ $\alpha=60^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิทธิพลของค่า BR ที่ส่งผลต่อค่าตัวประกอบความเสียหาย พิจารณาได้จากรูปที่ 5.28 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า f/f_0 กับค่า BR ในภาพรวมพบว่าเมื่อครีบบมีความสูงเพิ่มขึ้นค่า f/f_0 มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากความสูงของครีบบที่เพิ่มสูงขึ้นจะไปขวางการไหล และเกิดกระแสน้ำที่รุนแรงและมีขนาดใหญ่ กระแสน้ำดังกล่าวจะไปขัดขวางการไหลหลัก ก่อให้เกิดค่าความดันตกคร่อมเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ f/f_0 เพิ่มสูงขึ้น และในทุกๆ ค่าของ BR ค่า f/f_0 มีแนวโน้มคงที่เมื่อ Re เพิ่มขึ้น โดยครีบบที่ให้ค่า f/f_0 สูงที่สุดคือ $BR=0.125$ เมื่อเฉลี่ยค่าตลอดช่วง Re ที่พิจารณา มีค่าประมาณ 29.70 และครีบบที่ให้ค่า f/f_0 ต่ำที่สุดคือ $BR=0.05$ โดยมีค่าเฉลี่ยตลอดช่วง Re ประมาณ 7.34 และสังเกตพบว่าเมื่อครีบบมีความสูงตั้งแต่ค่า $BR=0.075$ ขึ้นไป ความชันของการเพิ่มค่า f/f_0 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

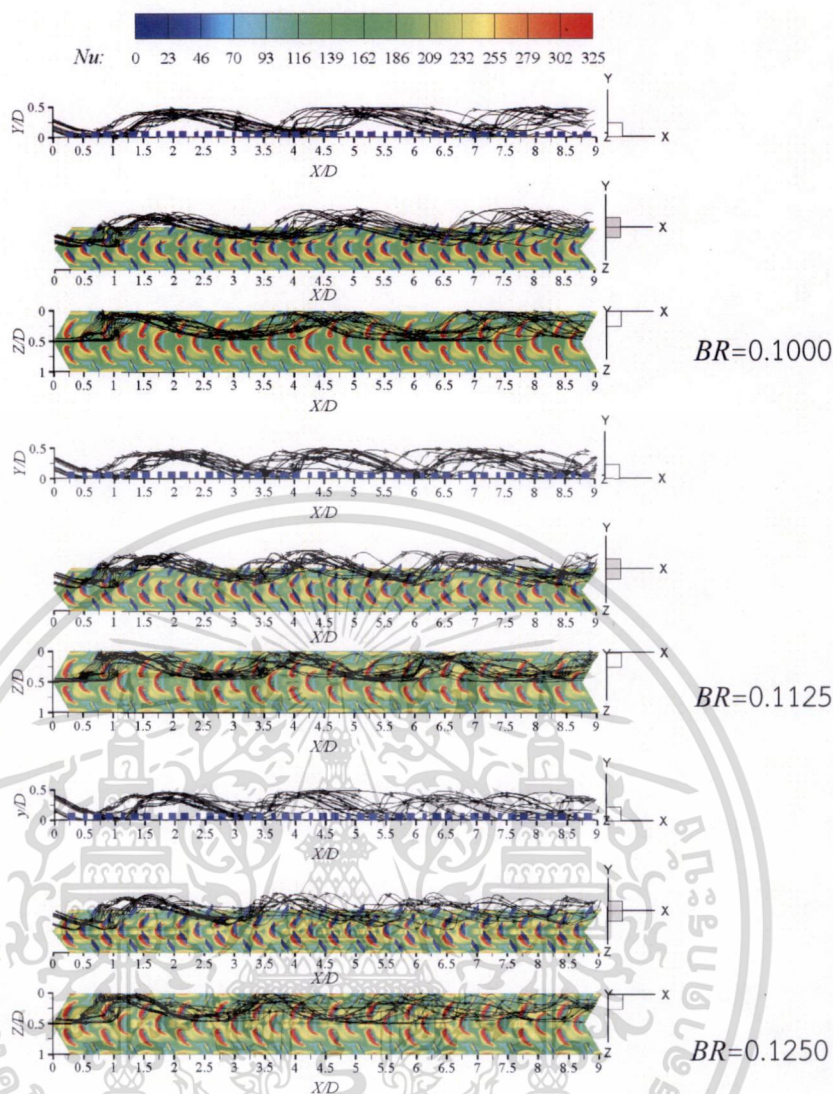
อิทธิพลของค่า BR ที่ส่งผลต่อค่า TEF พิจารณาได้จากรูปที่ 5.29 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า TEF ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่า BR ในภาพรวมพบว่าเมื่อครีบบมีความสูงเพิ่มขึ้นค่า TEF มีแนวโน้มลดลง และในทุกๆ ค่าของ BR นั้นค่า TEF มีแนวโน้มลดลงเมื่อ Re เพิ่มขึ้น โดยที่ครีบบที่ให้ค่า TEF สูงที่สุดคือ $BR=0.075$ ซึ่งเป็นผลมาจากค่า Nu/Nu_0 และ f/f_0 มีการเปลี่ยนแปลงความชันที่ตำแหน่งนี้ โดยสามารถสังเกตได้ในรูปที่ 5.27 และ 5.28 และเมื่อเฉลี่ยค่าตลอดช่วง Re ที่พิจารณาจะมีค่า TEF ประมาณ 1.58 และให้ค่าสูงสุดคือ 1.88 ที่ $Re=10000$ และความสูงครีบบที่ให้ค่า TEF ต่ำที่สุดคือ $BR=0.125$ โดยมีค่าเฉลี่ยตลอดช่วง Re ประมาณ 1.31 ทั้งนี้เนื่องจากเป็นกรณีที่ให้ค่า f/f_0 สูงที่สุด และเมื่อพิจารณาค่าที่วิเคราะห์ได้พบว่า ความสูงของครีบบที่น้ำจะมีความเหมาะสมมากที่สุดคือครีบบที่มีค่า $BR=0.075$ เนื่องจากให้ค่า TEF ใกล้เคียงกับครีบบที่มีค่า $BR=0.05$ แต่ให้ค่าเลขนี้สเซลท์เฉลี่ยสูงกว่าประมาณ 18% เมื่อเฉลี่ยค่าตลอดช่วง Re ที่พิจารณา

สำหรับการศึกษารายละเอียดของสนามการไหล ที่เกิดจากอิทธิพลของความสูงครีบบต่อการถ่ายเทความร้อนและความเสียหาย สามารถสังเกตได้จากเส้นทางเดินอนุภาค และการกระจายเลขนี้สเซลท์เฉพาะที่ ที่ค่า $Re=15,000$ ในรูปที่ 5.30 จากการสังเกตพบว่าเมื่อครีบบมีความสูงเพิ่มขึ้น ระยะการตกกระทบของกระแสการไหลบนพื้นผิวให้ความร้อนมีค่าลดลง ซึ่งระยะการตกกระทบที่สั้นลง สัมพันธ์กับค่า Nu/Nu_0 และ f/f_0 ที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งอธิบายได้ว่าเมื่อครีบบมีความสูงเพิ่มมากขึ้น ความดันของการไหลในบริเวณด้านหลังครีบบลดต่ำลงเป็นบริเวณกว้าง จึงส่งผลให้เกิดการเหนี่ยวนำของกระแสการไหลหลักซึ่งก่อให้เกิดการหมุนวนที่รุนแรง และจากลักษณะของครีบบที่เพิ่มสูงขึ้น จะบังคับให้การหมุนวนดังกล่าวลอยตัวสูงขึ้นไปสู่บริเวณกลางท่อ แล้วถูกเหนี่ยวนำอีกครั้งให้ตกลงสู่บริเวณพื้นผิวให้ความร้อนในระยะทางที่สั้นลง ในขณะที่เกลียวของการหมุนวนของกระแสน้ำตามยาวก็สั้นลงด้วย กระแสน้ำที่เกิดขึ้นจึงมีความเข้มของการหมุนมากขึ้นและรุนแรงขึ้นนั่นเอง



รูปที่ 5.30 เส้นทางเดินอุณหภูมิและการไหลตกกระทบพื้นผิว ของการเปลี่ยนค่า BR ที่ค่า $PR=0.625$
 $Re=15,000$ และ $\alpha=60^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

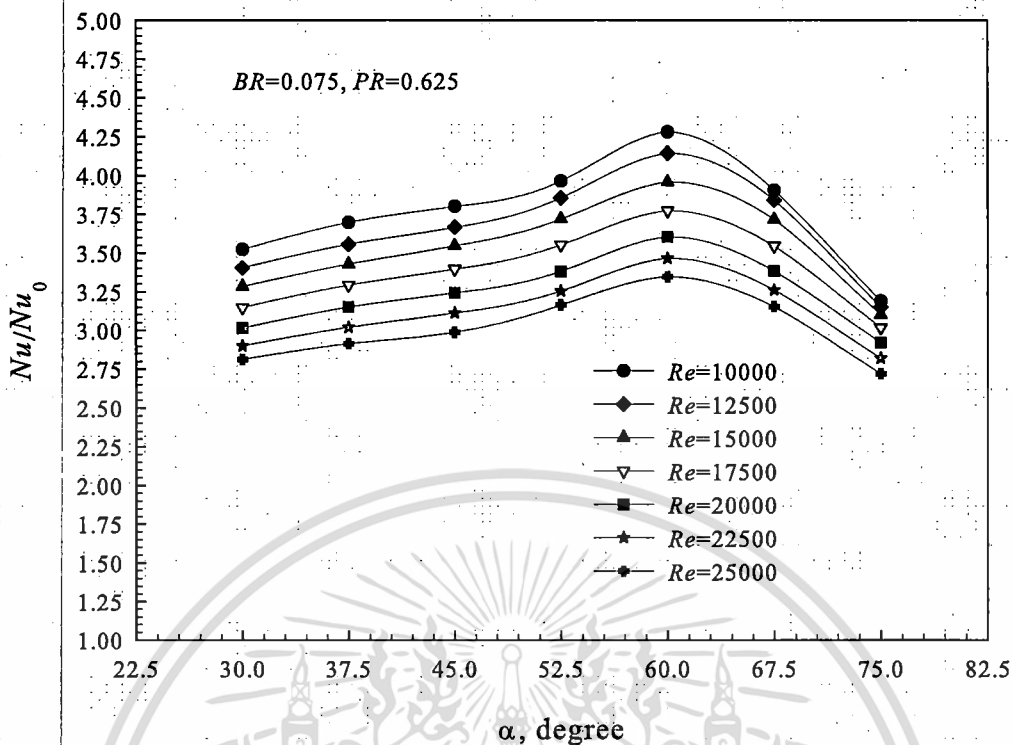


รูปที่ 5.30 เส้นทางการไหลและค่าการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว ของการเปลี่ยนค่า BR ที่ค่า $PR=0.625$ $Re=15,000$ และ $\alpha=60^\circ$ (ต่อ)

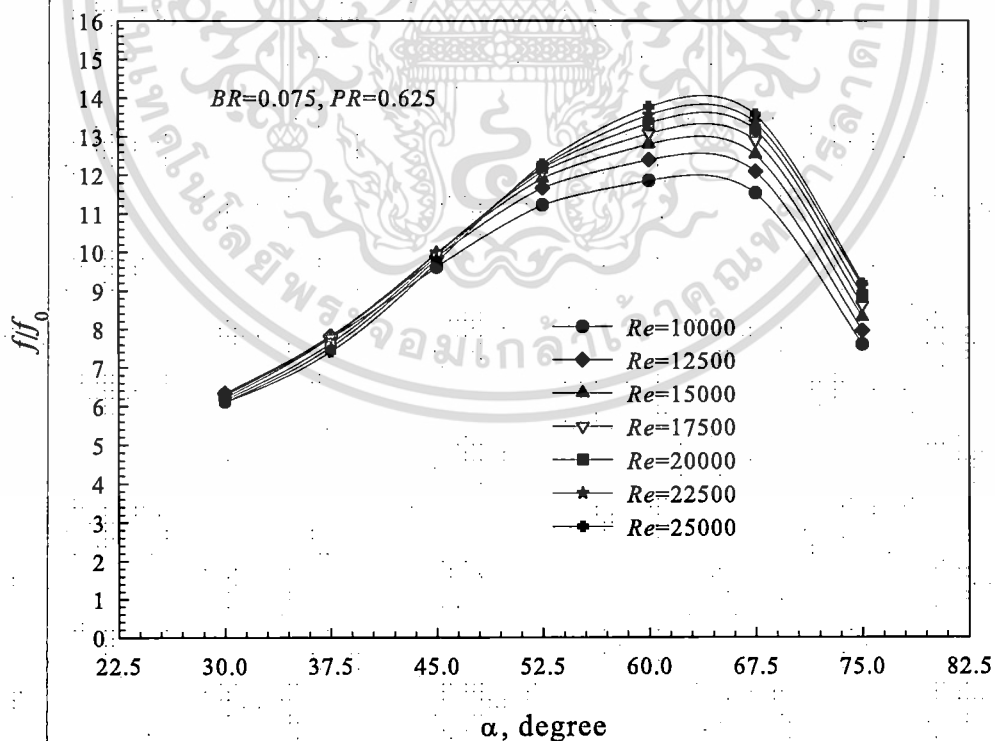
5.3.5 อิทธิพลของค่า α ของครีบบางที่มีการจัดวางแบบครีบบัวยี่แยกตัวซึ่งสวนการไหล

จากงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาได้แสดงให้เห็นถึง อิทธิพลอย่างเด่นชัดของมุมปะทะของครีบบัวยี่ที่ส่งผลต่อการไหลและการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน โดยสังเกตพบว่ามีหลายงานวิจัยที่บ่งบอกถึงมุมปะทะของครีบบัวยี่ที่ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดนั้นคือมุมปะทะที่มีขนาด 60° ได้แก่ในงานวิจัยของ Han et al. (1991), Lau et al. (1991), Gupta et al. (1993), Momin et al. (2002), Ebrahim Momin et al. (2002), Amro et al. (2007), Lee and Rhee (2009), Aharwal et al. (2009), Kumar et al. (2009) และ Hans et al. (2010) งานวิจัยโดยส่วนใหญ่ศึกษาด้วยวิธีการทดลอง ซึ่งยังขาดคำอธิบายว่าทำไมมุมปะทะค่านี้จึงส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนได้มากที่สุด ดังนั้นในหัวข้อถัดไปจึงได้พยายามศึกษาและอธิบายถึง อิทธิพลของมุมปะทะของการจัดวางครีบบัวยี่แยกตัวซึ่งสวนการไหลต่อการไหลและการถ่ายเทความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

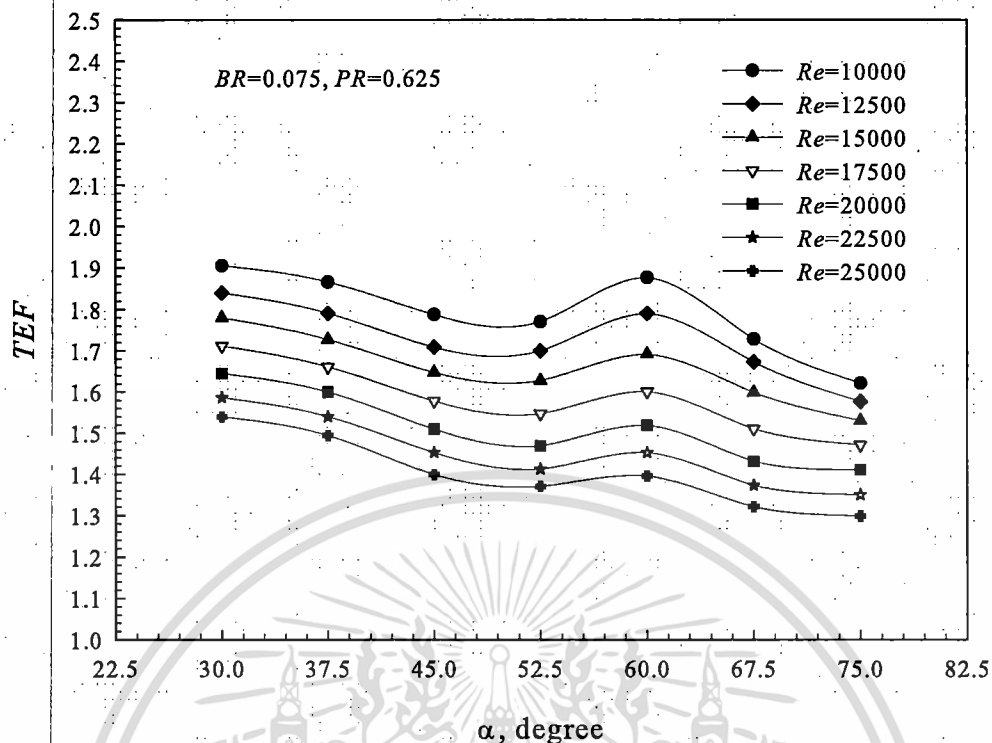


รูปที่ 5.31 กราฟแสดงค่า Nu/Nu_0 กับค่า α ในช่วง 30° ถึง 75° ที่ค่า $BR=0.075$ และ $PR=0.625$



รูปที่ 5.32 กราฟแสดงค่า f/f_0 กับค่า α ในช่วง 30° ถึง 75° ที่ค่า $BR=0.075$ และ $PR=0.625$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีคนนำไปใช้



รูปที่ 5.33 กราฟแสดงค่า TEF กับค่า α ในช่วง 30° ถึง 75° ที่ค่า $BR=0.075$ และ $PR=0.625$

การศึกษาถึงอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงความสูงของครีบเมื่อกำหนดให้มุมปะทะและระยะห่างระหว่างครีบคงที่ พบว่าครีบที่มีค่า $BR=0.075$ มีความเหมาะสมกว่าครีบที่มีความสูงค่าอื่นๆ ดังนั้นในกรณีการศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงค่ามุมปะทะของครีบที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อน ตัวประกอบความเสียดทาน และค่า TEF จึงเลือกใช้ครีบที่มีค่า $BR=0.075$ มาศึกษาโดยพิจารณาที่ค่า $PR=0.625$ และค่า Re อยู่ในช่วง 10,000 ถึง 25,000 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงค่ามุมปะทะของครีบ ที่มีผลต่อค่าการถ่ายเทความร้อน พิจารณาได้จากรูปที่ 5.31 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่า Nu/Nu_0 ที่เปลี่ยนแปลงค่าไปตามมุมปะทะของครีบ (α) คือ $\alpha=30.0^\circ$, 37.5° , 45.0° , 52.5° , 60.0° , 67.5° และ 75.0° ที่ค่า Re ต่างๆ ในภาพรวมพบว่าเมื่อครีบมีมุมปะทะเพิ่มขึ้นค่า Nu/Nu_0 มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นและมีค่าสูงที่สุดที่ค่า $\alpha=60^\circ$ หลังจากนั้นค่า Nu/Nu_0 มีแนวโน้มลดลง และในทุกๆ ค่า α ค่า Nu/Nu_0 มีแนวโน้มลดลงเมื่อ Re เพิ่มขึ้น โดยครีบที่ให้ค่า Nu/Nu_0 สูงที่สุดเกิดขึ้นที่ค่า $\alpha=60^\circ$ เมื่อเฉลี่ยค่าตลอดช่วง Re ที่พิจารณา มีค่าประมาณ 3.64 โดยมีค่า Nu/Nu_0 สูงที่สุดเท่ากับ 4.30 ที่ $Re=10,000$ และมุมปะทะครีบที่ให้ค่า Nu/Nu_0 ต่ำที่สุดคือ $\alpha=75^\circ$ โดยมีค่าเฉลี่ยตลอดช่วง Re ที่พิจารณาประมาณ 2.90

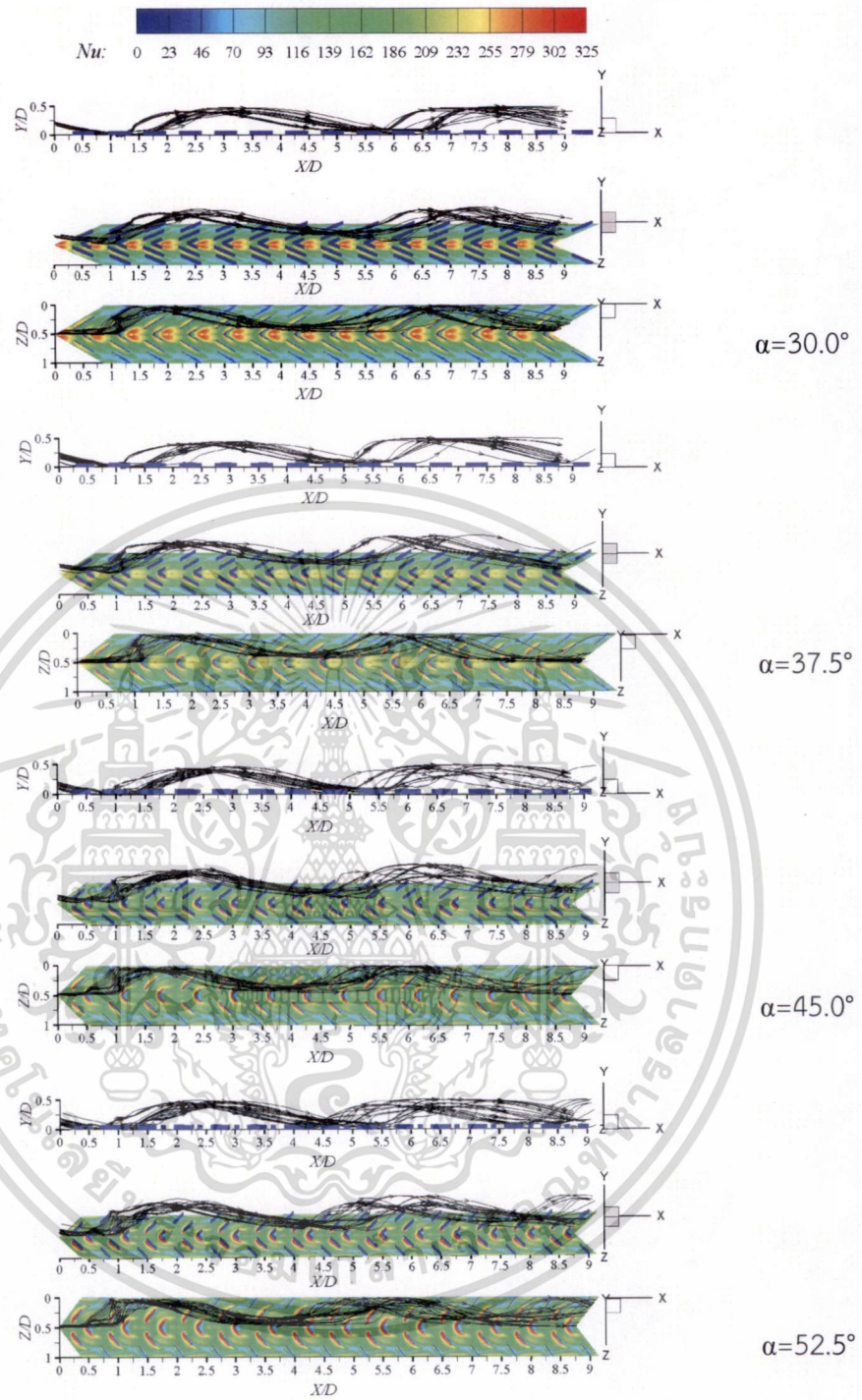
อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงค่า α ที่มีผลต่อค่าตัวประกอบความเสียดทาน พิจารณาได้จากรูปที่ 5.32 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่า f/f_0 ที่เปลี่ยนแปลงค่าไปตามค่า α ที่ค่า Re ต่างๆ กัน ในภาพรวมพบว่าแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงคล้ายคลึงกับการเปลี่ยนแปลงค่า Nu/Nu_0 ซึ่งมุมปะทะที่ให้ค่า f/f_0 สูงที่สุดคือ $\alpha=60^\circ$ โดยที่ค่า f/f_0 เมื่อเฉลี่ยค่าตลอดช่วง Re ที่พิจารณา มีค่าประมาณ 12.70 และมุมปะทะครีบที่ให้ค่า f/f_0 ต่ำที่สุดคือ $\alpha=30^\circ$ โดยมีค่าเฉลี่ยตลอดช่วง Re ประมาณ 6.10

สำหรับอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงค่ามุมปะทะของครีบที่มีผลต่อค่า TEF พิจารณาได้จาก รูปที่ 5.33 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่า TEF ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่า α ที่ค่า Re ต่างๆ กัน ในภาพรวม พบว่าเมื่อครีบมีมุมปะทะเพิ่มขึ้นค่า TEF มีแนวโน้มลดลง และในทุกๆ ค่ามุมปะทะของครีบ ค่า TEF มีแนวโน้มลดลงเมื่อ Re เพิ่มขึ้น โดยครีบที่มีมุมปะทะ $\alpha=30^\circ$ ให้ค่า TEF สูงที่สุดเมื่อเฉลี่ยค่าตลอด ช่วง Re ที่พิจารณามีค่าประมาณ 1.66 และให้ค่าสูงสุดคือ 1.90 ที่ค่า $Re=10,000$ ซึ่งเป็นผลมาจาก ค่า f/f_0 มีค่าต่ำกว่าครีบที่ทำมุมปะทะค่าอื่นๆ ในขณะที่มุมปะทะ $\alpha=60^\circ$ ให้ค่า TEF รองลงมาเมื่อ เฉลี่ยค่าตลอดช่วง Re ที่พิจารณาจะมีค่าประมาณ 1.56 และมุมปะทะครีบที่ให้ค่า TEF ต่ำที่สุดคือ $\alpha=75^\circ$ โดยมีค่าเฉลี่ยตลอดช่วง Re ที่พิจารณาจะมีค่าประมาณ 1.42

การศึกษาอิทธิพลของมุมปะทะที่ส่งผลต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบ ความเสียดทานนี้พบว่า มุมปะทะที่ให้ค่า Nu/Nu_0 และค่า f/f_0 สูงที่สุดคือค่า $\alpha=60^\circ$ ซึ่งผลที่ได้ สอดคล้องกับงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาซึ่งสาเหตุที่ $\alpha=60^\circ$ ให้ค่า Nu/Nu_0 และค่า f/f_0 สูงที่สุด สามารถ พิจารณาได้จากรูปที่ 5.34 ซึ่งเป็นรูปที่แสดงเส้นทางการเดินอนุภาคและการไหลตกกระทบพื้นผิว ที่เกิดจากการเปลี่ยนค่ามุมปะทะของครีบ ที่ค่า $BR=0.075$, $PR=0.625$ และ $Re=15,000$

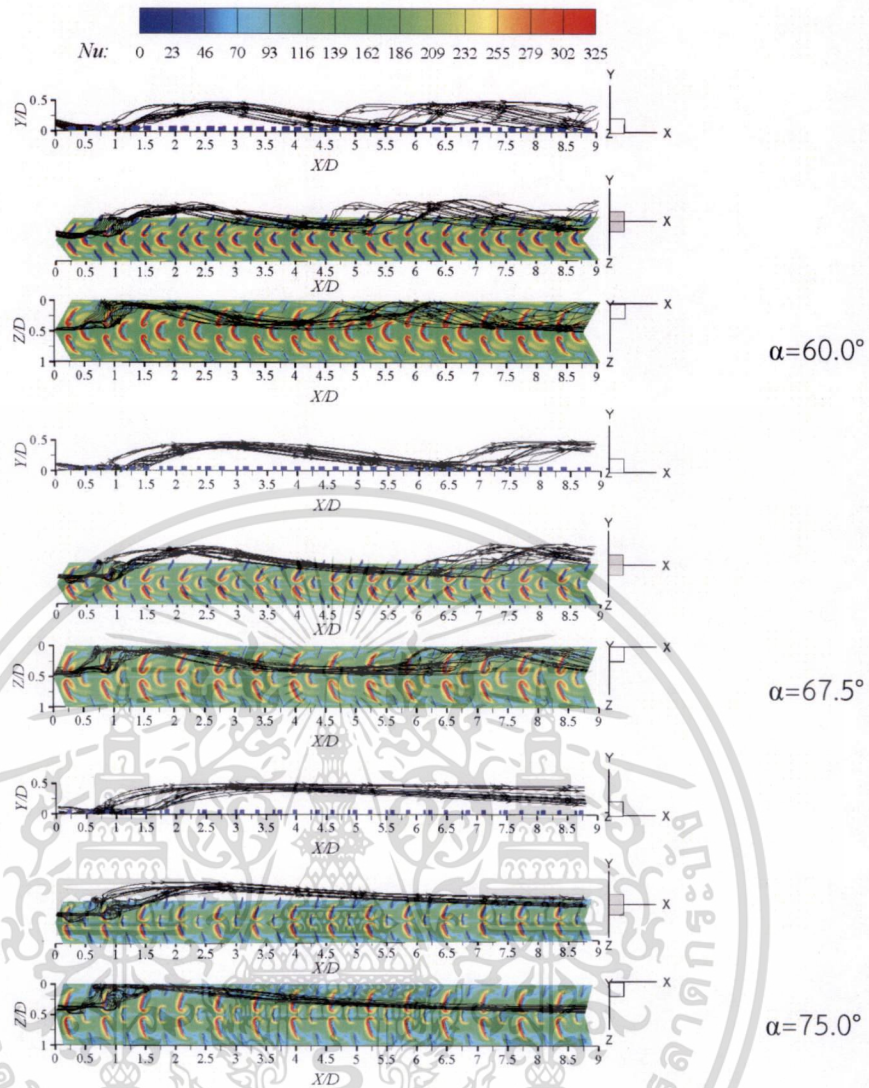
จากการสังเกตการไหลในรูปที่ 5.34 พบว่าเมื่อครีบมีมุมปะทะเพิ่มขึ้นโดยเริ่มต้นจาก $\alpha=30^\circ$ ระยะการตกกระทบของกระแสการไหลบนพื้นผิวให้ความร้อนมีค่าลดลง ซึ่งระยะการตกกระทบที่สั้น ลงสัมพันธ์กับค่า Nu/Nu_0 และ f/f_0 ที่เพิ่มสูงขึ้น แต่จากการสังเกตโดยละเอียดพบว่าระยะการไหล ตกกระทบพื้นผิวที่สั้นที่สุดเกิดที่มุมปะทะในช่วง 52.5° ถึง 60° แต่การไหลที่เกิดจาก $\alpha=60^\circ$ เมื่อตก กระทบลงสู่พื้นแล้วมีการกระจายตัวของกระแสตามยาวในบริเวณที่กว้างกว่า และไม่รวมตัวกันจึง ส่งผลให้ Nu/Nu_0 และ f/f_0 มีค่าสูงที่สุด แต่เมื่อมุมปะทะมีค่าเกินกว่า 60° แล้วระยะการไหลตกกระทบ พื้นผิวจะเพิ่มมากขึ้นและสัมพันธ์กับค่า Nu/Nu_0 และ f/f_0 ที่ลดลง โดยที่ลักษณะของระยะการไหลตก กระทบที่สั้นลงแล้วส่งผลให้ Nu/Nu_0 และ f/f_0 เพิ่มสูงขึ้นนี้คล้ายคลึงกับกรณีที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลของ การเพิ่มความสูงของครีบ ซึ่งการไหลที่ตกกระทบลงสู่บริเวณพื้นผิวให้ความร้อนในระยะทางที่สั้นลง ส่งผลให้เกลียวของการหมุนวนของกระแสตามยาวสั้นลงด้วย เมื่อเกลียวของการหมุนวนสั้นลงจะ ก่อให้เกิดความเข้มของการหมุนมากขึ้นและรุนแรงขึ้นนั่นเอง

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกราฟรูปที่ 5.31 ถึง 5.33 พบว่ามุมปะทะของครีบที่น่าจะมีความเหมาะสมมากที่สุดและควรนำไปพัฒนาต่อไปคือ ครีบที่มีมุมปะทะ $\alpha=60^\circ$ เนื่องจากให้ค่า TEF เฉลี่ยสูงที่สุดรองลงมาจากครีบที่มีค่า $\alpha=30^\circ$ ซึ่งมีค่า TEF เฉลี่ยแตกต่างกัน 6% โดยที่ Re ต่ำๆ ให้ค่า TEF ใกล้เคียงกัน แต่ครีบที่มีมุมปะทะ $\alpha=60^\circ$ ให้ค่า Nu/Nu_0 ตลอดช่วง Re ที่พิจารณาสูงที่สุดซึ่งสูง กว่าครีบที่ทำมุมปะทะ $\alpha=30^\circ$ ถึง 20% ซึ่งจุดมุ่งหมายที่สำคัญอย่างหนึ่งของงานวิจัยนี้คือการได้มาซึ่ง ค่า Nu/Nu_0 ที่มีค่าสูงที่สุดในขณะที่ค่า TEF สูงที่สุดและเหมาะสมด้วย และเนื่องจากเกิดกรณีที่มีค่า TEF ใกล้เคียงกันแต่ค่า Nu/Nu_0 แตกต่างกันอย่างเด่นชัด ดังนั้นจากเหตุผลดังกล่าวสำหรับการ ศึกษาถัดไป จึงเลือกใช้ครีบที่มีมุมปะทะ $\alpha=60^\circ$ ซึ่งให้ค่า Nu/Nu_0 สูงที่สุดมาพัฒนาต่อไปตลอด งานวิจัยนี้ และสำหรับการวิจัยในอนาคตจะพัฒนาครีบที่ทำมุมปะทะ $\alpha=30^\circ$ โดยเพิ่มการถ่ายเท ความร้อนให้สูงขึ้นด้วยการปรับปรุงครีบในลักษณะเป็นครีบยาวต่อเนื่อง ซึ่งน่าจะให้ค่า Nu/Nu_0 ที่สูงขึ้นซึ่งเป็นเรื่องที่น่าสนใจจากงานวิจัยนี้



รูปที่ 5.34 เส้นทางเดินอนุภาคและการไหลตกกระทบพื้นผิว ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่า α ที่ $BR=0.075$, $Re=15,000$ และ $PR=0.625$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

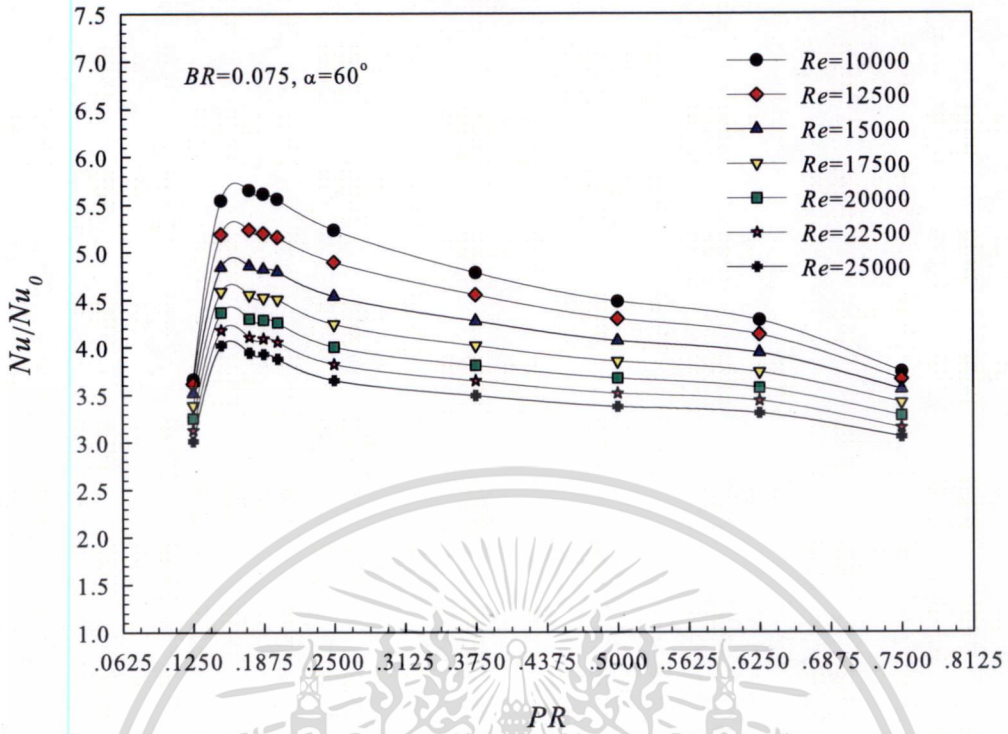


รูปที่ 5.34 เส้นทางเดินอนุภาคและการไหลตกกระทบพื้นผิว ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่า α ที่ $BR=0.075$, $Re=15,000$ และ $PR=0.625$ (ต่อ)

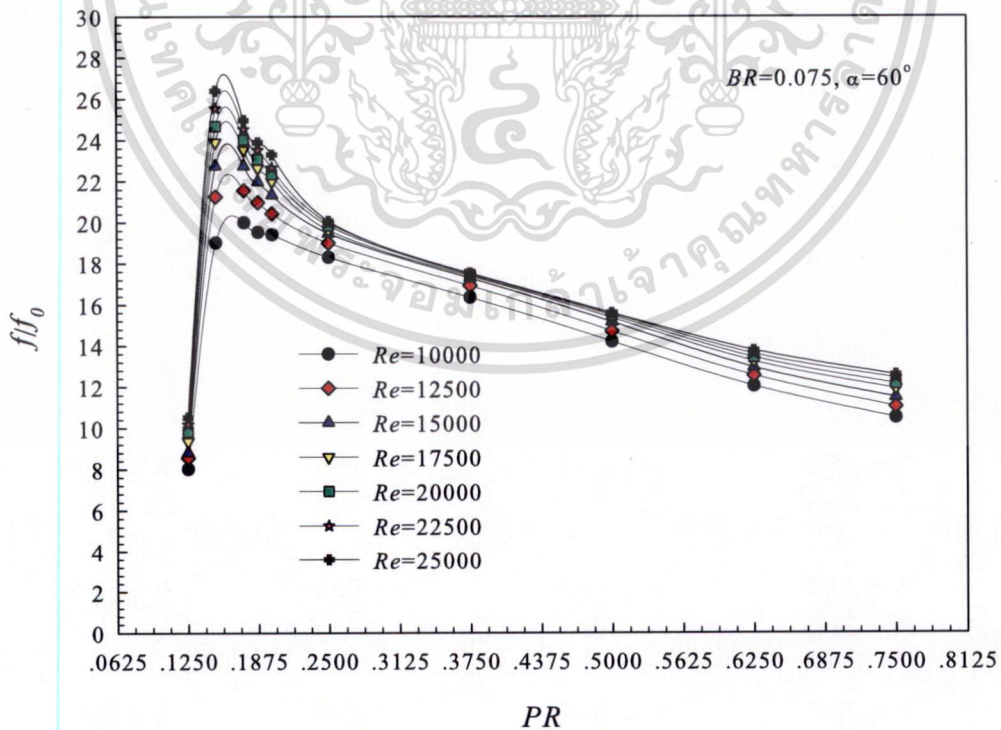
5.3.6 อิทธิพลของค่า PR ของครีบบางที่มีการจัดวางแบบครีบทัววีแยกตัวซึ่งสวนการไหล ในหัวข้อที่ผ่านมาซึ่งพบว่า ที่ค่า $BR=0.075$ และ $\alpha=60^\circ$ ให้ค่า Nu/Nu_0 ที่สูงที่สุดและมีค่า TEF ที่เหมาะสม โดยกำหนดให้ค่า $PR=0.625$ คงที่ ซึ่งค่า $PR=0.625$ นี้ได้มาจากการศึกษาในกรณีของครีบนาดัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ซึ่งก่อให้เกิดข้อสงสัยว่า ค่า $PR=0.625$ นี้ให้ค่า TEF ที่ดีที่สุดและเหมาะสมสำหรับครีบบางหรือไม่ ดังนั้นในส่วนถัดไปจะศึกษาถึงอิทธิพลของระยะห่างระหว่างครีบบางที่มีการจัดเรียงครีบบาง ครีบทัววีแยกตัวซึ่งสวนการไหล ที่ส่งผลต่อค่า Nu/Nu_0 , ffl_0 และ TEF

การศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงค่า PR ที่ส่งผลต่อค่า Nu/Nu_0 , ffl_0 และ TEF สำหรับการไหลผ่านครีบบางที่มี $\alpha=60^\circ$, $BR=0.075$ และ Re อยู่ในช่วง 10,000 ถึง 25,000 มีรายละเอียดดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

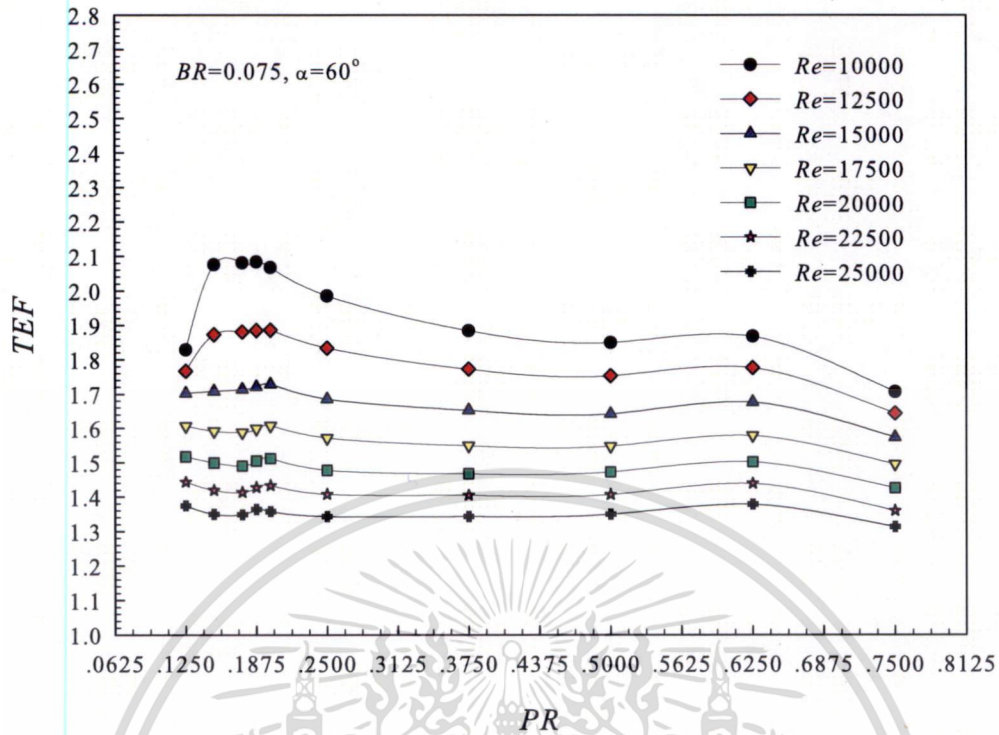


รูปที่ 5.35 ความสัมพันธ์ของค่า Nu/Nu_0 กับค่า PR ในช่วง 0.125 ถึง 0.75 ที่ $BR=0.075$ และ $\alpha=60^\circ$



รูปที่ 5.36 ความสัมพันธ์ของค่า f/f_0 กับค่า PR ในช่วง 0.125 ถึง 0.75 ที่ $BR=0.075$ และ $\alpha=60^\circ$

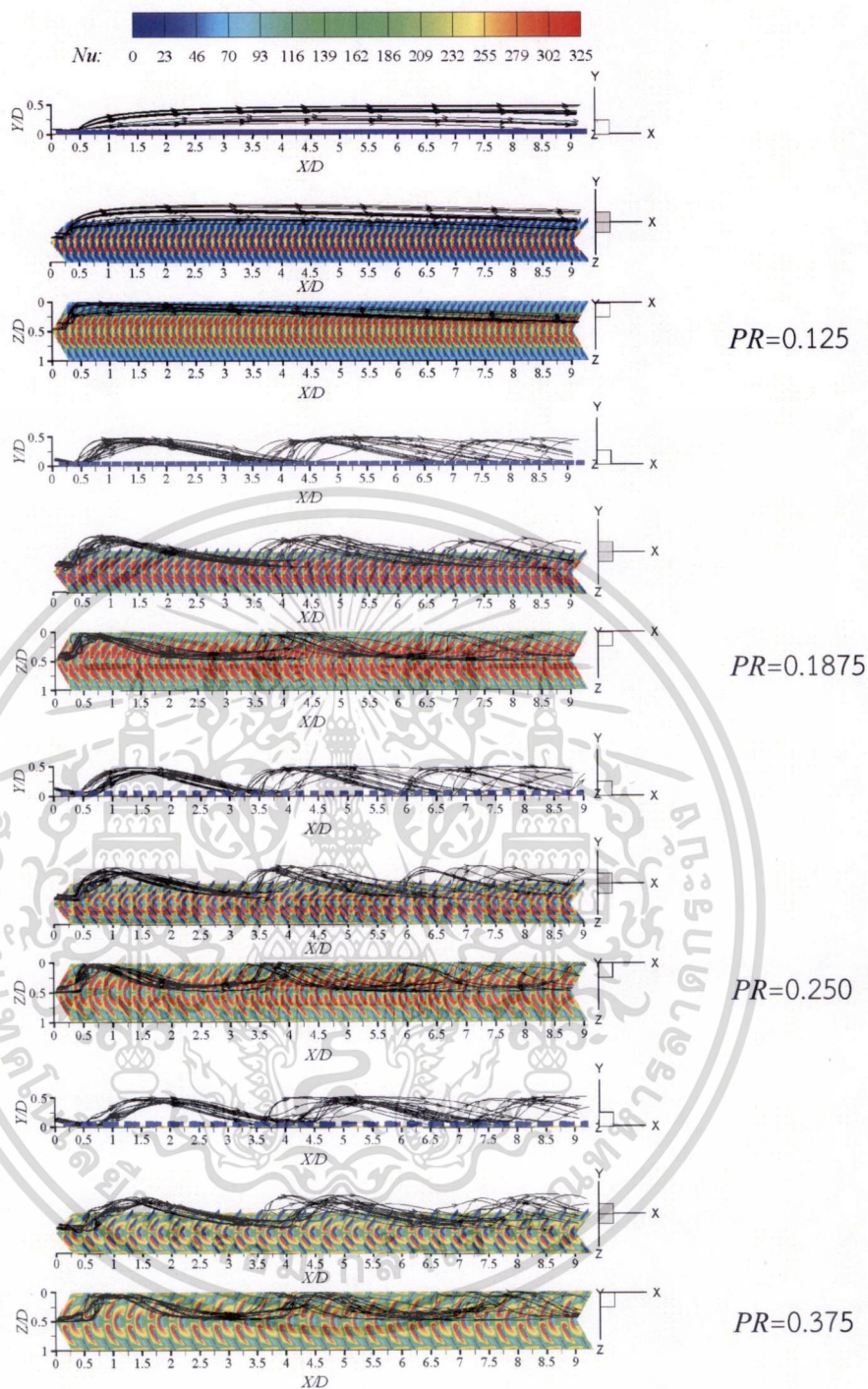
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.37 ความสัมพันธ์ของค่า TEF กับค่า PR ในช่วง 0.125 ถึง 0.75 ที่ $BR=0.075$ และ $\alpha=60^\circ$

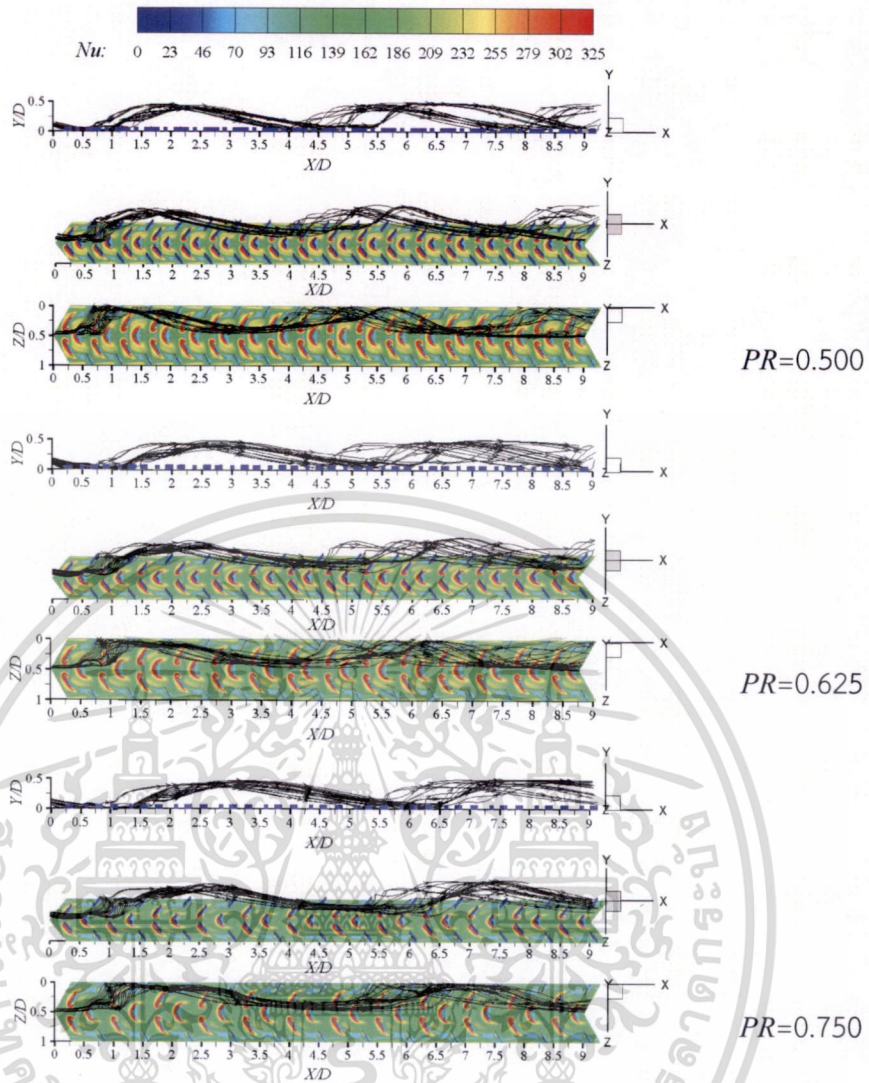
อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงค่า PR ที่มีผลต่อค่าการถ่ายเทความร้อน พิจารณาได้จากรูปที่ 5.35 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่า Nu/Nu_0 ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่า PR ในช่วง PR ตั้งแต่ 0.125 ถึง 0.75 ที่ค่า Re ต่างๆ กัน ในภาพรวมพบว่าเมื่อครีบบมีระยะห่างเพิ่มขึ้นค่า Nu/Nu_0 มีแนวโน้มลดลง และในทุกๆ ค่า PR ที่ศึกษานั้น ค่า Nu/Nu_0 มีแนวโน้มลดลงเมื่อ Re เพิ่มขึ้น โดยที่ค่า PR ที่ให้ค่า Nu/Nu_0 สูงที่สุดคือที่ค่า PR ที่อยู่ระหว่าง 0.1250 ถึง 0.250 ซึ่งค่า Nu/Nu_0 เกือบจะมีค่าคงที่ในช่วงนี้ โดยค่า PR ที่อยู่กึ่งกลางช่วงนี้คือ $PR=0.1875$ และที่ค่านี้เมื่อเฉลี่ยค่า Nu/Nu_0 ตลอดช่วง Re ที่พิจารณาจะมีค่าประมาณ 4.50 ซึ่งที่ค่า $PR=0.1875$ นี้ให้ค่า Nu/Nu_0 สูงที่สุดเท่ากับ 5.61 ที่ $Re=10,000$ และค่า PR ที่ให้ค่า Nu/Nu_0 ต่ำที่สุดคือ $PR=0.75$ โดยมีค่าเฉลี่ยตลอดช่วง Re ที่พิจารณามีประมาณ 3.30

สำหรับอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงค่า PR ที่มีผลต่อค่า ff_0 พิจารณาได้จากรูปที่ 5.36 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่า ff_0 ที่เปลี่ยนแปลงค่าไปตามค่า PR ที่ค่า Re ต่างๆ กัน ในภาพรวมพบว่าเมื่อครีบบมีค่า PR เพิ่มมากขึ้นค่า ff_0 มีแนวโน้มลดลงยกเว้นในช่วงที่ PR น้อยๆ และในทุกๆ ค่า PR นั้นค่า ff_0 มีแนวโน้มคงที่เมื่อ Re มีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ค่า PR ที่ให้ค่า ff_0 สูงที่สุดคือคือที่ค่า PR ที่อยู่ในช่วง 0.1250 ถึง 0.250 ซึ่งเมื่อสังเกตโดยละเอียดพบว่าที่ Re ต่ำนั้นค่า ff_0 สูงที่สุดอยู่ที่ $PR=0.15$ และเมื่อ Re เพิ่มขึ้น ff_0 สูงที่สุดจะเลื่อนมาอยู่ที่ $PR=0.175$ และเมื่อเฉลี่ยค่า ff_0 ที่ $PR=0.1875$ ตลอดช่วง Re ที่พิจารณาจะมีค่าประมาณ 21.80 และค่า PR ที่ให้ค่า ff_0 ต่ำที่สุดคือ $PR=0.75$ โดยมีค่าเฉลี่ยตลอดช่วง Re ประมาณ 11.48



รูปที่ 5.38 เส้นทางเดินอนุภาคและการไหลตกกระทบพื้นผิว ของการเปลี่ยนแปลง PR ตั้งแต่ 0.125 ถึง 0.75 ที่ $BR=0.075$, $\alpha=60^\circ$ และ $Re=15,000$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.38 เส้นทางเดินอนุภาคและการไหลตกกระทบพื้นผิว ของการเปลี่ยนแปลง PR ตั้งแต่ 0.125 ถึง 0.75 ที่ $BR=0.075$, $\alpha=60^\circ$ และ $Re=15000$ (ต่อ)

อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงค่า PR ที่มีผลต่อค่า TEF พิจารณาได้จากรูปที่ 5.37 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า TEF ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่า PR ที่ค่า Re ต่างๆ กัน ในภาพรวมพบว่าเมื่อครีบบมีค่า PR เพิ่มขึ้น ค่า TEF มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่มีค่าลดลงที่ค่า $PR=0.75$ ในขณะที่ทุกๆ ค่าของ PR ค่า TEF มีแนวโน้มลดลงเมื่อ Re เพิ่มขึ้น โดยที่ครีบบซึ่งให้ค่า TEF สูงที่สุดคือ $PR=0.1875$ เมื่อเฉลี่ยตลอดช่วง Re ที่พิจารณามีค่า $TEF=1.60$ และมีค่าสูงที่สุดคือ 2.08 ที่ $Re=10,000$ และเมื่อ Re เพิ่มขึ้นค่า TEF มีแนวโน้มคงที่ ในขณะที่ $PR=0.75$ ให้ค่า TEF ต่ำที่สุดเมื่อเฉลี่ยตลอดช่วง Re ที่พิจารณาคือ 1.45

จากรูปที่ 5.37 ซึ่งเมื่อพิจารณาโดยละเอียดพบว่าสำหรับค่า PR ที่มากกว่า 0.5 ค่า TEF สูงที่สุดจะเกิดขึ้นที่ $PR=0.625$ ซึ่งมีลักษณะสอดคล้องกับงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาที่พบว่าที่ $PR=0.625$ ให้ค่า TEF สูงที่สุดที่มีเงื่อนไขการไหลเดียวกัน แต่เมื่อลดค่า PR ให้น้อยกว่า 0.5 พบว่าค่า TEF มีค่าสูงที่สุดอีกครั้งหนึ่งที่ $PR=0.1875$ แต่ให้ค่า TEF สูงกว่าที่ $PR=0.625$ และเมื่อ

เปรียบเทียบกราฟรูปที่ 5.35 ถึง 5.37 พบว่าค่า PR ที่มีความเหมาะสมมากที่สุดคือ ครีบบที่มีค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

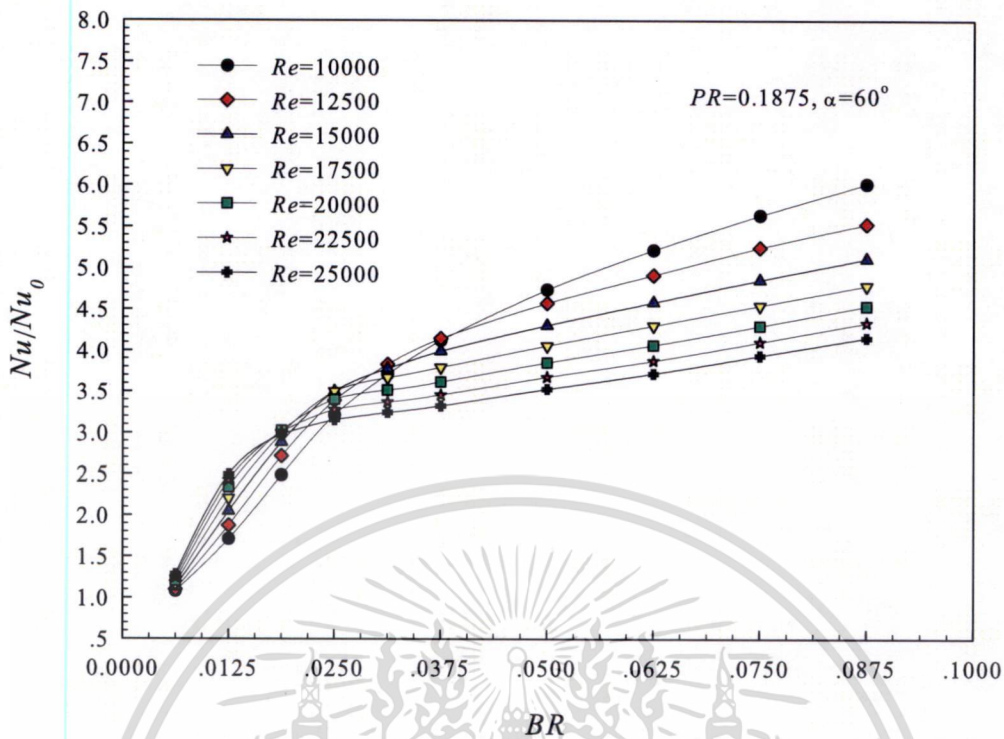
$PR=0.1875$ และนอกจากนี้ถึงแม้ว่าที่ $PR=0.125$ จะให้ค่า TEF ใกล้เคียงกับครีบที่มีค่า $PR=0.1875$ แต่เมื่อพิจารณาที่ค่า Nu/Nu_0 และ ff_0 พบว่ามีค่าน้อยมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งค่า ff_0 จึงส่งผลให้มีค่า TEF สูงมาก แต่ไม่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานเนื่องจากให้ค่า Nu/Nu_0 ต่ำกว่ามาก เมื่อเปรียบเทียบกับ PR ค่าอื่นๆ

การวิเคราะห์รายละเอียดของสนามการไหลที่เกิดจากอิทธิพลของค่า PR ต่อการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทาน สามารถสังเกตได้จากเส้นทางเดินอนุภาค และการกระจายเลขนัสเซลล์เฉพาะที่ ที่ค่า $Re=15,000$ ดังแสดงในรูปที่ 5.38 จากรูปพบว่าที่ค่า $PR=0.125$ ระยะเวลาไหลตกกระทบไกลเกินช่วงที่พิจารณาจึงเป็นสาเหตุให้มีค่า Nu/Nu_0 และ ff_0 มีค่าน้อยมาก แต่เมื่อค่า PR เพิ่มขึ้นจะมีระยะเวลาไหลตกกระทบพื้นผิวที่ใกล้เคียงกัน และมีค่าสั้นที่สุดซึ่งเกิดขึ้นที่ค่า PR ในช่วง 0.1875 ถึง 0.250 ด้วยเหตุผลที่ค่า PR ในช่วงนี้มีระยะเวลาไหลตกกระทบที่สั้นจึงส่งผลให้ค่า Nu/Nu_0 และ ff_0 มีค่าสูงในช่วงนี้ด้วย และเมื่อค่า PR มากกว่า 0.250 แล้วสังเกตพบว่าระยะเวลาไหลตกกระทบจะมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นจึงส่งผลให้ค่า Nu/Nu_0 และ ff_0 มีแนวโน้มลดลง

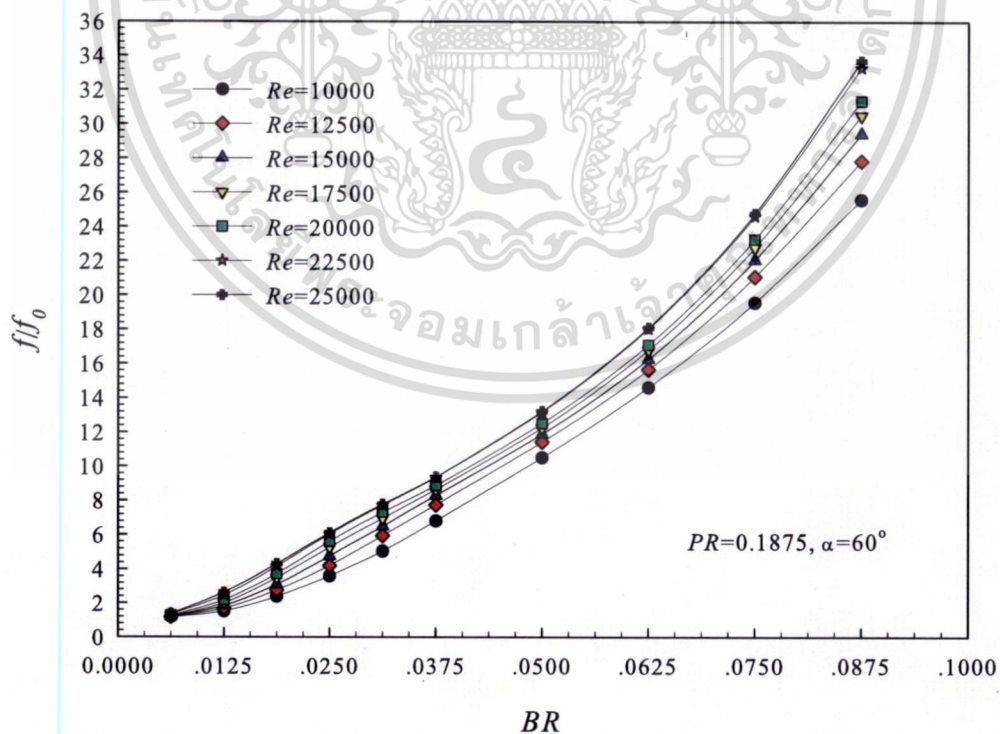
เมื่อพิจารณาการกระจายค่าเลขนัสเซลล์เฉพาะที่บนพื้นผิวให้ความร้อนที่ค่า $PR=0.1875$ และ 0.250 พบว่า มีค่าเลขนัสเซลล์เฉพาะที่สูงมากและเกือบจะสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นผิว ซึ่งแสดงถึงลักษณะที่ดีของการนำไปใช้เพิ่มการถ่ายเทความร้อน และเนื่องจากค่า $PR=0.1875$ ให้ค่า Nu/Nu_0 และ TEF สูงที่สุด ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าระยะห่างระหว่างครีบที่มีความเหมาะสมมากที่สุดคือ $PR=0.1875$ ที่ $BR=0.075$ และ $\alpha=60^\circ$

5.3.7 การหาค่าตัวแปรต่างๆ ที่เหมาะสมด้วยวิธีคำนวณซ้ำ

จากการศึกษาในหัวข้อต่างๆ ที่ผ่านมาสรุปลงได้ว่าการจัดวางครีบบางแบบครีบตัววิแยกตัวซึ่งสวนการไหล ที่มีค่า $BR=0.075$, $\alpha=60^\circ$ และ $PR=0.1875$ ให้ค่า TEF เมื่อเฉลี่ยตลอดช่วง Re ที่พิจารณามีค่า $TEF=1.60$ และมีค่าสูงที่สุดคือ 2.08 ที่เลขเรย์โนลด์ $10,000$ แต่เมื่อย้อนกลับไปพิจารณาวิธีที่ได้ดำเนินการมาพบว่า การวิเคราะห์เริ่มต้นด้วยการเปลี่ยนค่า BR โดยกำหนดให้ α และ PR คงที่ และเมื่อได้ค่า BR ที่เหมาะสมแล้ว จึงนำค่า BR ดังกล่าวไปใช้เพื่อวิเคราะห์หาค่า α ที่เหมาะสมโดยกำหนดให้ BR และ PR คงที่ และในท้ายที่สุดได้ศึกษาเพื่อหาค่า PR ที่เหมาะสมจากค่า BR และ α ที่ได้วิเคราะห์มาแล้วและกำหนดให้มีค่าคงที่ ซึ่งวิธีการที่ได้กล่าวมานี้ก่อให้เกิดข้อสงสัยว่าค่า $PR=0.1875$ ที่วิเคราะห์ได้ในขั้นตอนสุดท้ายนั้นมีค่า BR ที่เหมาะสมที่สุดซึ่งได้มาจากขั้นตอนแรกหรือไม่ เพื่อตอบคำถามดังกล่าวนี้จึงต้องดำเนินการคำนวณเชิงตัวเลขแบบคำนวณซ้ำอีกครั้งหนึ่งเพื่อวิเคราะห์หาค่า BR ที่เหมาะสมโดยกำหนดให้ค่า $\alpha=60^\circ$ และ $PR=0.1875$ มีค่าคงที่ ซึ่งเหตุผลที่เลือกใช้ค่า $\alpha=60^\circ$ และ $PR=0.1875$ นี้เนื่องจากค่า $\alpha=60^\circ$ ให้ค่า Nu/Nu_0 สูงกว่ามุมปะทะค่าอื่นๆ นอกจากนี้ค่า TEF มีแนวโน้มคงที่ ที่ค่า PR ในช่วง 0.15 ถึง 0.50 จึงมั่นใจได้ว่าการใช้วิธีคำนวณซ้ำอีกครั้งเพื่อหาค่า BR จะให้ค่ากลุ่มของตัวแปรต่างๆ ที่เหมาะสมที่สุดของการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงได้ต่อไป



รูปที่ 5.39 ความสัมพันธ์ของ Nu/Nu_0 กับค่า BR ตั้งแต่ 0.00625 ถึง 0.0875 ที่ $PR=0.1875$ และ $\alpha=60^\circ$

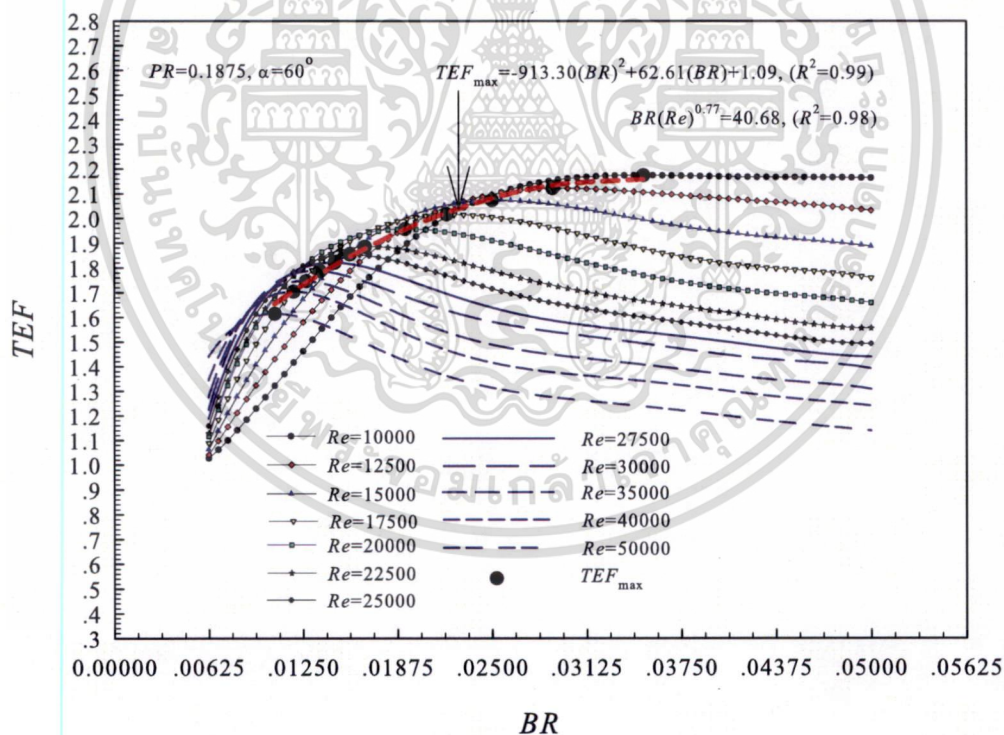


รูปที่ 5.40 ความสัมพันธ์ของ f/f_0 กับค่า BR ตั้งแต่ 0.00625 ถึง 0.0875 ที่ค่า $PR=0.1875$ และ $\alpha=60^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงค่าความสูงของครีบบางรูปตัววีแบบแยกตัว ที่ส่งผลต่อค่าการถ่ายเทความร้อนของกรณีการคำนวณซ้ำ พิจารณาได้จากรูปที่ 5.39 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่า Nu/Nu_0 ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่า BR ที่อยู่ในช่วง 0.00625 ถึง 0.0875 ที่ค่า Re ในช่วง 10,000-25,000 ในภาพรวมพบว่าเมื่อครีบมีความสูงเพิ่มขึ้น Nu/Nu_0 มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยครีบที่ให้ค่า Nu/Nu_0 สูงที่สุดคือ $BR=0.0875$ เมื่อเฉลี่ยค่าตลอดช่วง Re ที่พิจารณาจะมีค่าประมาณ 4.73 และครีบที่ให้ค่า Nu/Nu_0 ต่ำที่สุดคือ $BR=0.00625$ โดยมีค่าเฉลี่ยตลอดช่วง Re ที่พิจารณาจะมีค่าประมาณ 1.14 และสังเกตพบว่าที่ $Re=10,000$ เมื่อครีบมีความสูงตั้งแต่ 0.0375 ขึ้นไป ความชันของกราฟ Nu/Nu_0 มีแนวโน้มลดลง และเมื่อ Re เพิ่มขึ้นค่าความสูงครีบที่ทำให้ความชันของ Nu/Nu_0 มีแนวโน้มลดลงนั้นน้อยลงตามไปด้วย

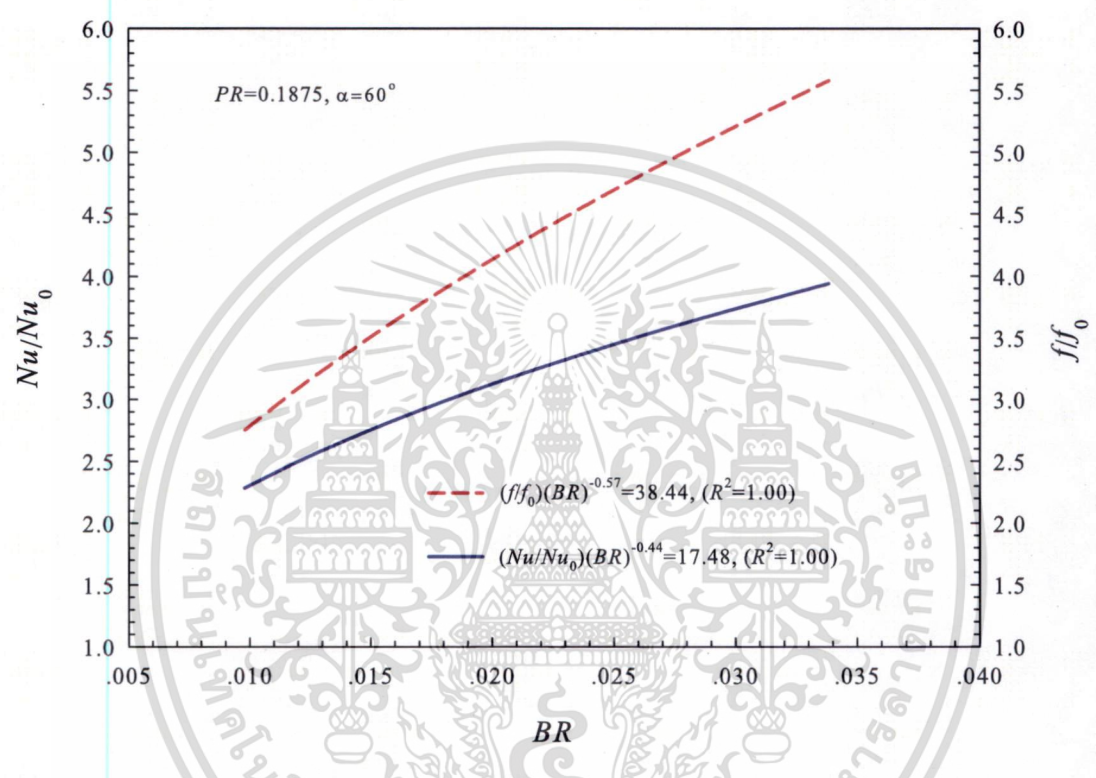
อิทธิพลของค่า BR ที่ส่งผลต่อค่าตัวประกอบความเสียดทาน พิจารณาได้จากรูปที่ 5.40 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า f/f_0 กับค่า BR ของกรณีการคำนวณซ้ำ ในภาพรวมพบว่าเมื่อครีบมีความสูงเพิ่มขึ้นค่า f/f_0 มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยครีบที่ให้ค่า f/f_0 สูงที่สุดคือ $BR=0.0875$ เมื่อเฉลี่ยค่าตลอดช่วง Re ที่พิจารณาจะมีค่าประมาณ 29.30 และครีบที่ให้ค่า f/f_0 ต่ำที่สุดคือ $BR=0.00625$ โดยมีค่าเฉลี่ยตลอดช่วง Re ประมาณ 1.26 และสังเกตพบว่าเมื่อครีบมีความสูงตั้งแต่ค่า $BR=0.050$ ขึ้นไปความชันของการเพิ่มค่า f/f_0 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.41 ค่า TEF กับการเปลี่ยนแปลงค่า BR ตั้งแต่ 0.00625 ถึง 0.050 ที่ค่า $PR=0.1875$ และ $\alpha=60^\circ$

อิทธิพลของค่า BR ที่ส่งผลต่อค่า TEF พิจารณาได้จากรูปที่ 5.41 ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า TEF ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่า BR ของกรณีการคำนวณซ้ำโดยขยายการพิจารณาค่า Re เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในช่วง 10,000 ถึง 50,000 และได้แสดงค่าสูงสุดของค่า TEF (TEF_{max}) ในแต่ละค่าของ Re และ BR ในรูปของเส้นกราฟและสมการความสัมพันธ์ ในภาพรวมสังเกตพบว่า เมื่อ Re เพิ่มมากขึ้นค่า TEF_{max} มีแนวโน้มลดลงและค่า BR ที่ให้ค่า TEF_{max} ในแต่ละค่าของ Re มีแนวโน้มลดลงด้วย ซึ่งเมื่อพิจารณาในรายละเอียดพบว่า ที่ $Re=10,000$ มีค่า TEF_{max} เท่ากับ 2.17 ที่ค่า $BR=0.035$ และที่ $Re=50,000$ มีค่า TEF_{max} ต่ำที่สุดเท่ากับ 1.61 ที่ค่า $BR=0.01$ ซึ่งกราฟที่ได้นี้มีประโยชน์สำหรับการนำไปใช้ออกแบบเพื่อหาค่า BR ที่ให้ค่า TEF_{max} ที่แต่ละ Re โดยที่ค่า $PR=0.1875$ และ $\alpha=60^\circ$ คงที่

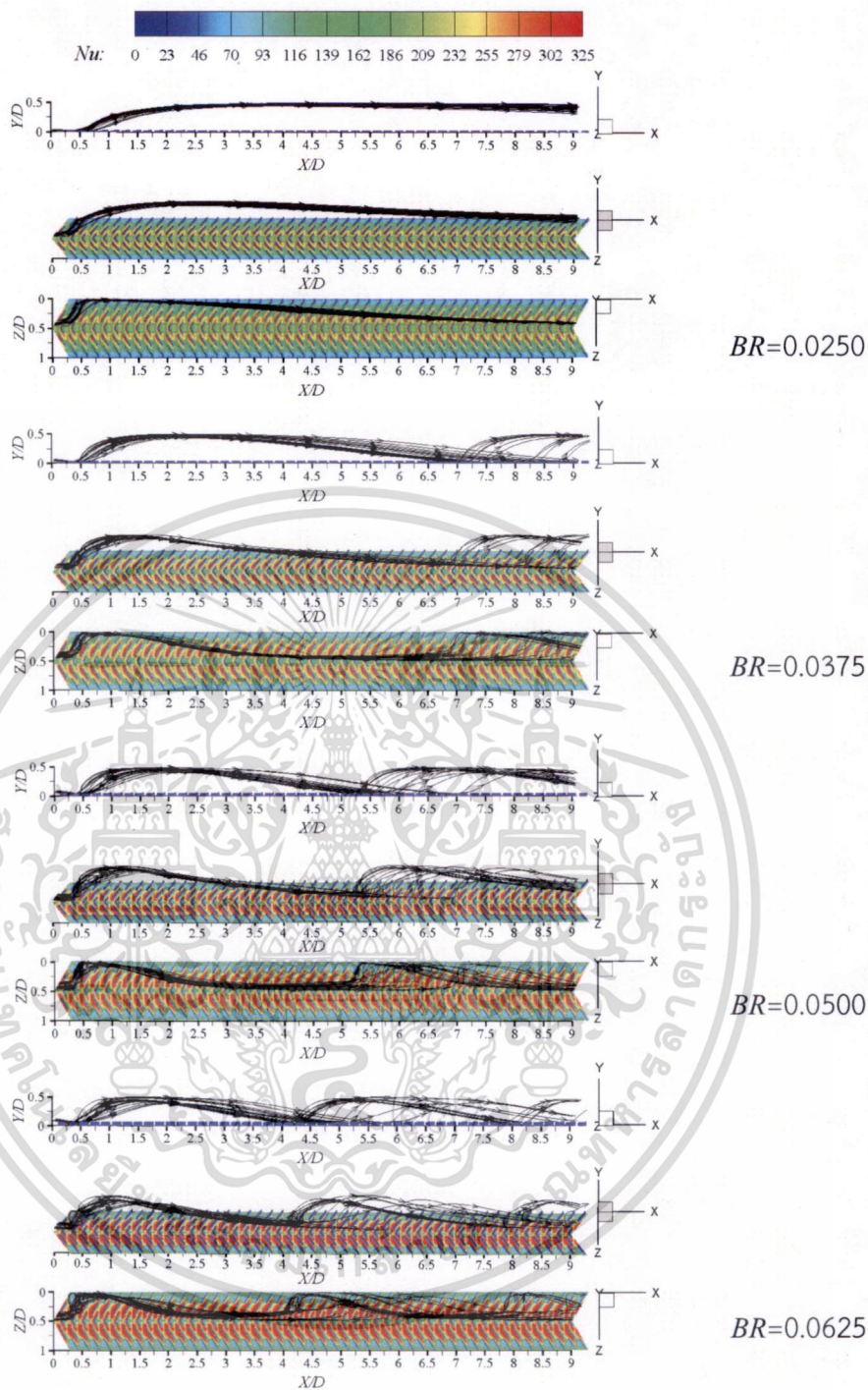


รูปที่ 5.42 ค่า Nu/Nu_0 และ f/f_0 ที่ค่า BR ต่างๆ ทั้งในรูปแบบกราฟและสมการความสัมพันธ์ของครีปที่มีค่า $PR=0.1875$ และที่ค่า $\alpha=60^\circ$

โดยทั่วไปสำหรับการนำกราฟที่วิเคราะห์ได้นี้ไปใช้งานเพื่อหาค่า TEF_{max} นั้น ในเบื้องต้นต้องทราบค่าของอัตราการไหลในช่วงที่ต้องการใช้งาน ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาค่า Re ได้ โดยที่ค่าเลขเรย์โนลด์ที่พิจารณาต้องอยู่ในช่วง 10,000 ถึง 50,000 และเมื่อรู้ค่า Re แล้วสามารถที่จะหาค่า BR และค่า TEF_{max} ได้จากกราฟหรือจากสมการที่แสดงไว้ในรูปที่ 5.41 (ที่ค่า $PR=0.1875$ และ $\alpha=60^\circ$ คงที่)

นอกจากนี้เมื่อทราบค่า BR แล้วยังสามารถคำนวณหรือหาค่า Nu/Nu_0 และ f/f_0 ที่ให้ค่า TEF_{max} ได้อีกด้วย โดยพิจารณาค่าจากกราฟหรือจากสมการในรูปที่ 5.42 ซึ่งค่า Nu/Nu_0 และ f/f_0 แสดงไว้ที่ค่าบนแกนตั้งทางด้านซ้ายและด้านขวาของกราฟตามลำดับ โดยที่ค่า Nu/Nu_0 อยู่ในช่วง 2.27 ถึง 3.90 และค่า f/f_0 อยู่ในช่วง 2.83 ถึง 5.76 สำหรับค่า BR ที่อยู่ในช่วง 0.01 ถึง 0.034 ซึ่งจะเห็นว่ามีความสะดวกสำหรับการนำไปใช้งานได้จริง

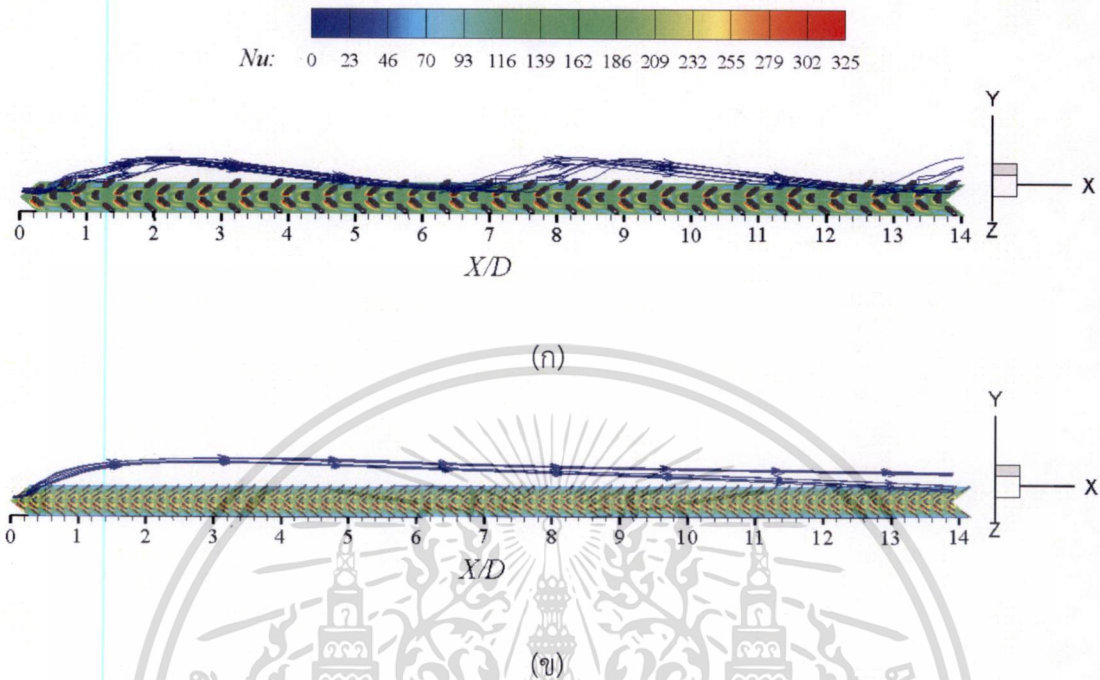
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.43 เส้นทางเดินอนุภาคและการไหลตกรกกระทบพื้นผิว ของการเปลี่ยนแปลงค่า BR ตั้งแต่ 0.025 ถึง 0.0625 ที่ $PR=0.1875$, $\alpha=60^\circ$ และ $Re=15,000$

การศึกษารายละเอียดของสนามการไหลที่เกิดจากอิทธิพลของความสูงครีบต่อการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานของกรณีการคำนวณซ้ำ สามารถสังเกตได้จากเส้นทางเดินอนุภาค และการกระจายเลขนัสเซลล์เฉพาะที่ ที่ค่า $Re=15,000$ ในรูปที่ 5.43 ของการเปลี่ยนแปลงค่า BR ตั้งแต่ 0.025 ถึง 0.0625 ที่ $PR=0.1875$, $\alpha=60^\circ$ โดยภาพรวมพบว่าเมื่อครีบบีความสูงเพิ่มขึ้น ระยะการตกไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระทบของกระแสการไหลบนพื้นผิวให้ความร้อนมีค่าลดลง และสังเกตเห็นว่ามีการกระจายค่าเลข
นัสเซิลท์เฉพาะที่ค่อนข้างสม่ำเสมอและมีค่าสูงทั่วทั้งพื้นผิวให้ความร้อน

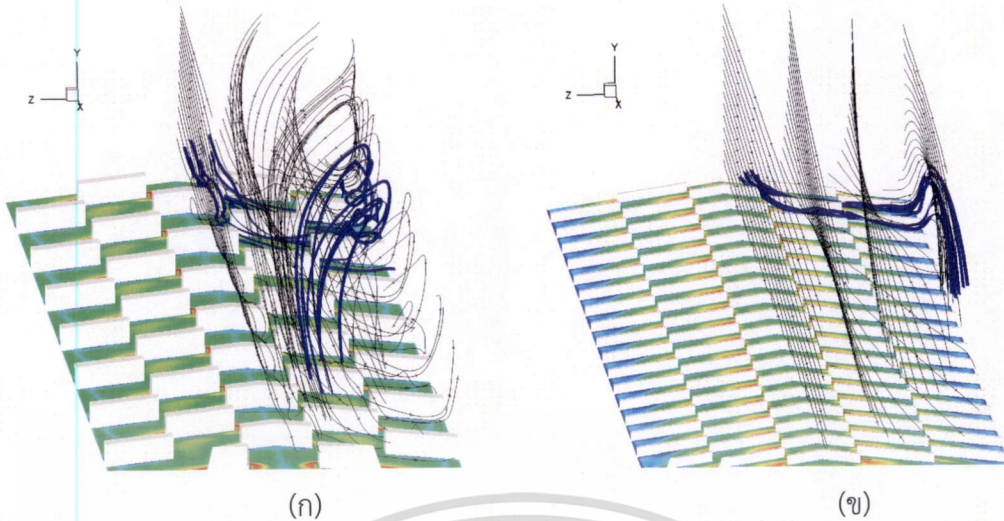


รูปที่ 5.44 เส้นทางเดินอนุภาคที่ $Re=15,000$ และ $\alpha=60^\circ$ ของกรณี (ก) ครีบจัตุรัส $PR=0.6250$, $BR=0.0625$ (ข) ครีบบาง, $PR=0.1875$, $BR=0.0250$

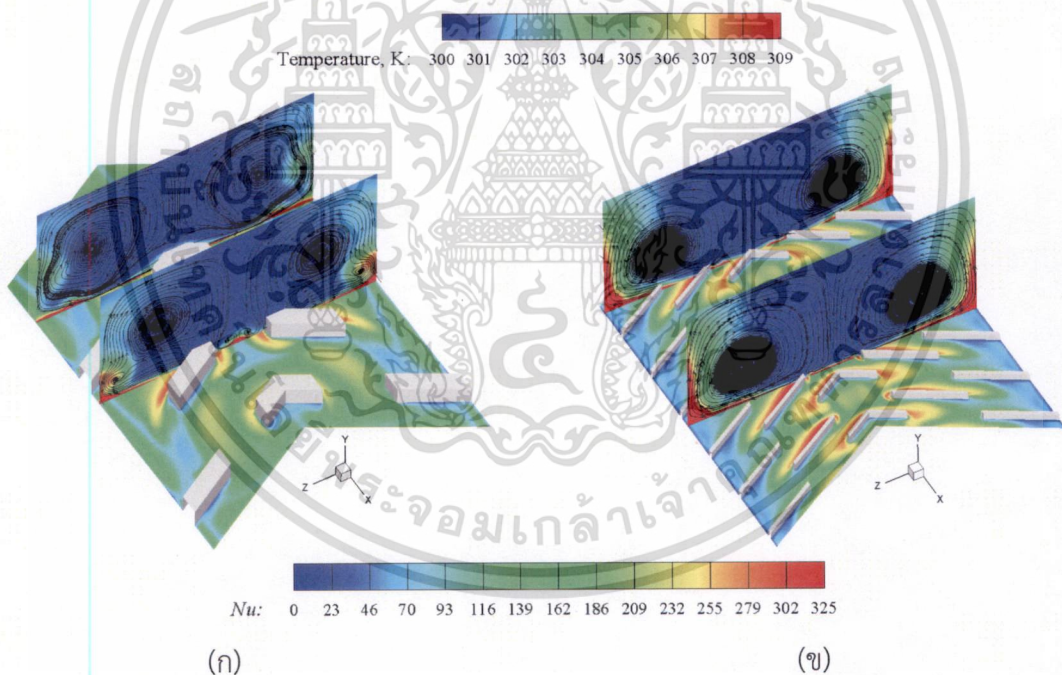
จากผลที่ได้วิเคราะห์ก่อนหน้านี้ เมื่อทราบค่า Re มาค่าหนึ่ง ยกตัวอย่างเช่นที่ $Re=15,000$ สามารถหาค่า BR ที่ให้ค่า TEF_{max} ได้จากรูปที่ 5.41 ซึ่งก็คือที่ $BR=0.025$ นั่นเอง และมีค่า TEF_{max} คือ 2.07 และหลังจากนั้น สามารถหาค่า Nu/Nu_0 และ ff_0 จากรูปที่ 5.42 ซึ่งพบว่าที่ $BR=0.0250$ ค่า Nu/Nu_0 มีค่าเท่ากับ 3.43 และ $ff_0=4.69$ และนอกจากนี้ยังได้แสดงเส้นทางเดินอนุภาคของของไหลไว้ในรูปที่ 5.44 โดยเปรียบเทียบระหว่างกรณี (ก) ครีบจัตุรัสที่ $PR=0.6250$ และ $BR=0.0625$ ซึ่งเป็นครีบต้นแบบและ (ข) ครีบบางที่ค่า $PR=0.1875$ และ $BR=0.0250$ ซึ่งทั้งสองกรณีพิจารณาที่ $Re=15,000$ และ $\alpha=60^\circ$ จากการสังเกตพบว่าการไหลตกกระทบพื้นผิวของกรณี (ข) เกินช่วงที่ได้แสดงไว้ ในขณะที่กรณี (ก) มีระยะการไหลตกกระทบพื้นผิวให้ความร้อนห่างกันที่ X/D ประมาณ 6.5

สำหรับในกรณี (ก) ของรูปที่ 5.44 นั้นเป็นครีบต้นแบบและมีหน้าตัดครีบเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ $PR=0.625$ และ $BR=0.0625$ ซึ่งผลจากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขที่ได้ในบทที่ 4 ที่พบว่าได้ค่า $Nu/Nu_0=3.6$ และ $ff_0=7.3$ และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าของครีบบางที่ได้พัฒนาขึ้นแล้วพบว่าค่า Nu/Nu_0 ของครีบบางลดลงเล็กน้อยที่ค่าประมาณ 4.7% ในขณะที่ค่า ff_0 ลดลง 35.8% ซึ่งเห็นได้ชัดว่าแนวทางที่ได้ดำเนินการมานั้นนำไปสู่ค่า ff_0 ที่ลดลงอย่างมากในขณะที่ Nu/Nu_0 ลดลงเล็กน้อย จึงส่งผลให้ TEF มีค่าสูงที่สุดที่ $Re=15,000$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.45 เส้นทางการไหลอนุภาคที่แสดงให้เห็นถึงการผสมของการไหลจากพื้นผิวกับการไหลหลักของกรณี (ก) ครีบริ้วจัตุรัส $PR=0.6250$, $BR=0.0625$ (ข) ครีบริ้วบาง, $PR=0.1875$, $BR=0.0250$ ที่ $Re=15,000$ และ $\alpha=60^\circ$



รูปที่ 5.46 เส้นกระแสในแต่ละหน้าตัดของกรณี (ก) ครีบริ้วจัตุรัส $PR=0.6250$, $BR=0.0625$ (ข) ครีบริ้วบาง, $PR=0.1875$, $BR=0.0250$ ที่ $Re=15,000$ และ $\alpha=60^\circ$

นอกจากการเปรียบเทียบในเชิงตัวเลขของกรณีครีบริ้วจัตุรัสต้นแบบกับครีบริ้วบางที่ได้ปรับปรุงขึ้นแล้ว ยังสามารถสังเกตเห็นถึงความแตกต่างของลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นของครีบริ้วทั้งสองกรณี ดังในรูปที่ 5.45 โดยแสดงให้เห็นถึงเส้นทางการไหลอนุภาคของของไหลและการผสมของการไหลจากพื้นผิวกับการไหลหลักของกรณี (ก) ครีบริ้วจัตุรัส $PR=0.6250$, $BR=0.0625$ และ (ข) ครีบริ้วบาง, $PR=0.1875$, $BR=0.0250$ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$BR=0.0250$ และทั้งสองกรณีพิจารณาที่ $Re=15,000$ และ $\alpha=60^\circ$ จากการสังเกตพบว่สำหรับการไหลผ่านครีบจัตุรัสของกระแสการไหลที่ออกจากพื้นผิวให้ความร้อน (ซึ่งแสดงเส้นทางการไหลด้วยริบิ้นของรูปที่ 5.45 (ก)) เกิดการไหลม้วนตัวเป็นเกลียวและมีทิศทางพุ่งเข้าสู่ผนังด้านข้างแล้วไหลขึ้นไปผสมกับการไหลหลัก หลังจากมีการไหลผสมกันแล้วจะเกิดการไหลวนม้วนตัวและเคลื่อนที่ลงสู่พื้นผิวให้ความร้อนอีกครั้ง โดยเกลียวของการหมุนวนของการไหลที่เกิดจากครีบจัตุรัสนั้นสังเกตเห็นได้ชัดเจนกว่า และมีระยะการไหลตกกระทบบนพื้นผิวของกรณีการไหลผ่านครีบบาง จึงเป็นสาเหตุให้ ค่า ff_0 ของครีบจัตุรัสสูงกว่าครีบบาง

สำหรับกรณีการไหลที่แสดงในแนวภาคตัดขวางท่อ และการกระจายค่าเลขนัสเซลล์เฉพาะที่ได้นำเสนอในรูปที่ 5.46 ซึ่งแสดงเส้นกระแสของของไหลในแต่ละหน้าตัดของกรณี (ก) ครีบจัตุรัส $PR=0.6250$, $BR=0.0625$ และ (ข) ครีบบาง, $PR=0.1875$ และ $BR=0.0250$ ทั้งสองกรณีพิจารณาที่ $Re=15,000$ และ $\alpha=60^\circ$ เนื่องจากครีบบางที่แสดงการไหลในรูปที่ 5.46 (ข) นั้นมีค่า PR น้อยกว่ากรณีของครีบจัตุรัส จึงมีเส้นกระแสการไหลที่เคลื่อนที่ออกจากพื้นผิวให้ความร้อนซึ่งอยู่ระหว่างครีบบางๆ เกิดการไหลผสมกับการไหลหลัก โดยเกิดการรวมตัวของเส้นกระแสการไหลเป็นจำนวนมากก่อนจะเคลื่อนที่พุ่งตกกระทบบนพื้นผิวให้ความร้อน ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ชัดเจนถึงความหนาแน่นหรือความเข้มของกระแสสวนในบริเวณแกนการหมุนของกรณีครีบบางมากกว่ากรณีของครีบจัตุรัส และบริเวณที่มีความเข้มและหนาแน่นสูงนี้อยู่ใกล้กับพื้นผิวถ่ายเทความร้อนมากกว่ากรณีของครีบจัตุรัสอีกด้วย จึงส่งผลให้ค่าเลขนัสเซลล์เฉพาะที่มีแนวโน้มมากกว่าโดยเฉพาะบริเวณแนวกลางท่อ

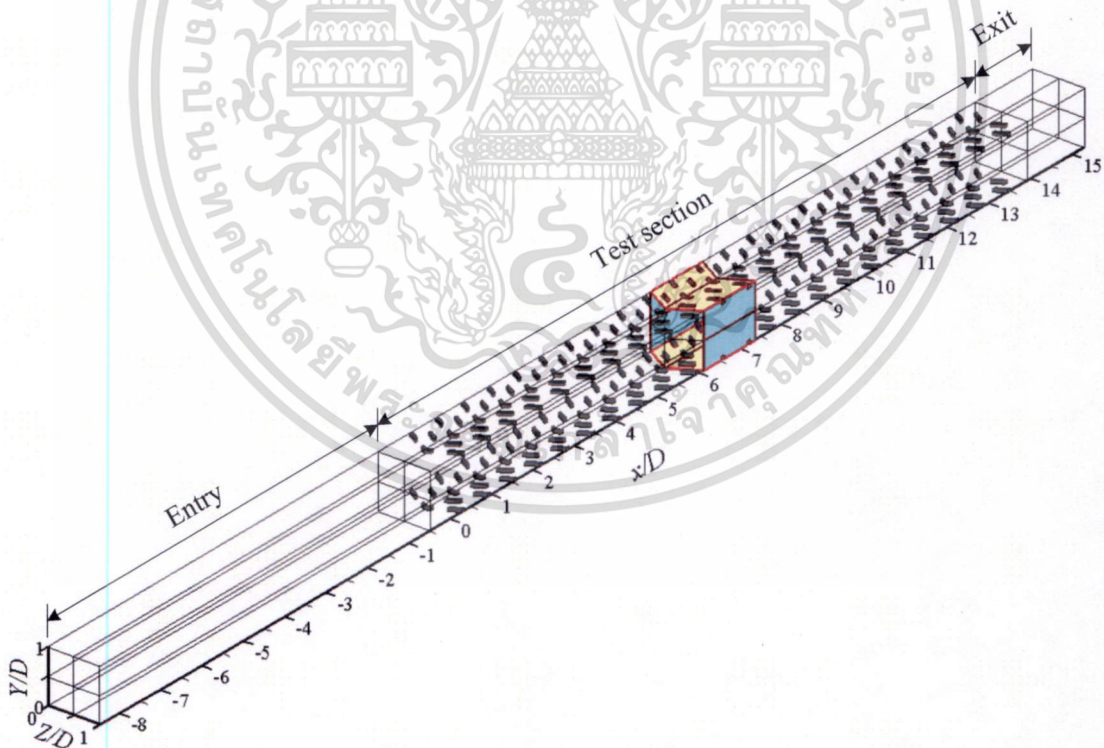
นอกจากนี้เมื่อสังเกตการกระจายค่าเลขนัสเซลล์เฉพาะที่บนพื้นผิวให้ความร้อน พบว่าที่บริเวณด้านหน้าของครีบบรูปตัววีและครีบที่แยกตัวออกมาของกรณีการไหลผ่านครีบบาง มีค่าเลขนัสเซลล์เฉพาะที่สูงกว่ากรณีการไหลผ่านครีบจัตุรัส แต่ที่บริเวณใกล้กับผนังท่อด้านข้างนั้นค่าเลขนัสเซลล์เฉพาะที่ของครีบบางต่ำกว่าของครีบจัตุรัส จึงทำให้มีค่า Nu/Nu_0 ของครีบบางต่ำกว่าครีบจัตุรัสเล็กน้อย ซึ่งที่บริเวณการไหลใกล้กับผนังท่อด้านข้างของครีบบางดังกล่าวนี้มีค่าเลขนัสเซลล์ต่ำกว่าบริเวณอื่น ซึ่งควรจะได้มีการปรับปรุงแก้ไขต่อไป

บทที่ 6

ครีบกัศจรรย์รูปตัววีแบบแยกตัวบนพื้นผิวให้ความร้อน

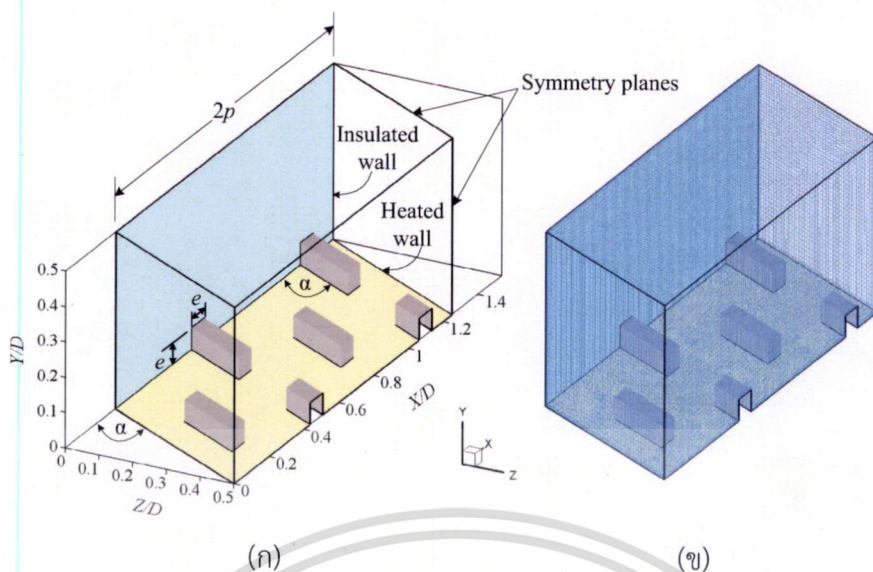
มีงานวิจัยเป็นจำนวนมากซึ่งใช้ครีบกัศจรรย์ที่มีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส มาช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อน และจากการศึกษาในบทที่แล้วถึงแม้ว่าครีบบางจะให้ค่า Nu สูงกว่าครีบกัศจรรย์ที่มีเงื่อนไขการไหลเดียวกัน ในขณะที่ครีบทั้งสองกรณีมีค่า TEF ไม่แตกต่างกัน แต่เมื่อพิจารณารูปที่ 5.7 ของบทที่ผ่านมาโดยละเอียด ซึ่งเป็นรูปที่แสดงการเปรียบเทียบค่า TEF ของครีบกัศจรรย์และครีบบางพบว่า ที่ค่า Re น้อยกว่า 15,000 ค่า TEF ของครีบกัศจรรย์มีค่าสูงกว่าครีบบางเล็กน้อย จึงก่อให้เกิดข้อสงสัยว่าหากดำเนินการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เหมาะสม ซึ่งเกี่ยวข้องกับการไหลและการถ่ายเทความร้อนของครีบกัศจรรย์ โดยมีเงื่อนไขการไหลและการถ่ายเทความร้อนเดียวกันกับครีบบางแล้ว ครีกรูปแบบใดจะให้ค่า TEF และมีลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสมกว่ากัน ดังนั้นในบทนี้จะมุ่งให้ความสนใจกับการวิเคราะห์การไหลและการถ่ายเทความร้อนของครีบกัศจรรย์ โดยใช้การจำลองครีกรูปแบบครีบกัศจรรย์ตัววีแยกตัวซึ่งสมการไหล และ $\alpha=60^\circ$ เพื่อตอบข้อสงสัยดังกล่าว

6.1 สถานะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วงของครีบกัศจรรย์

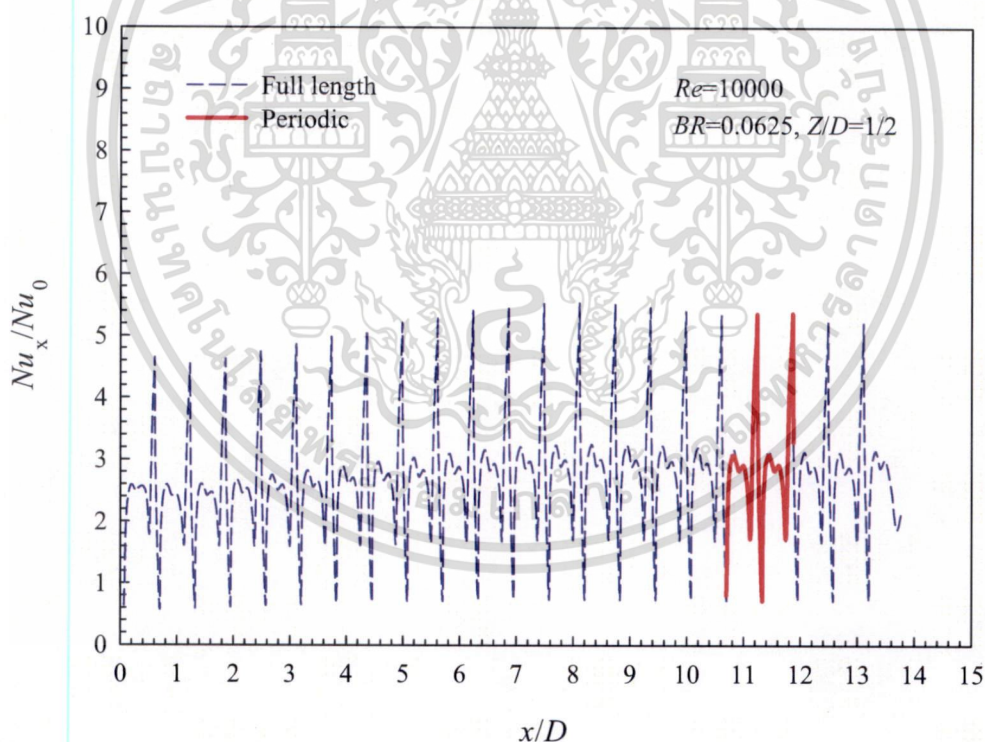


รูปที่ 6.1 ครีบกัศจรรย์ในช่องทางไหลสำหรับกรณีการคำนวณการไหลแบบเต็มความยาวท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

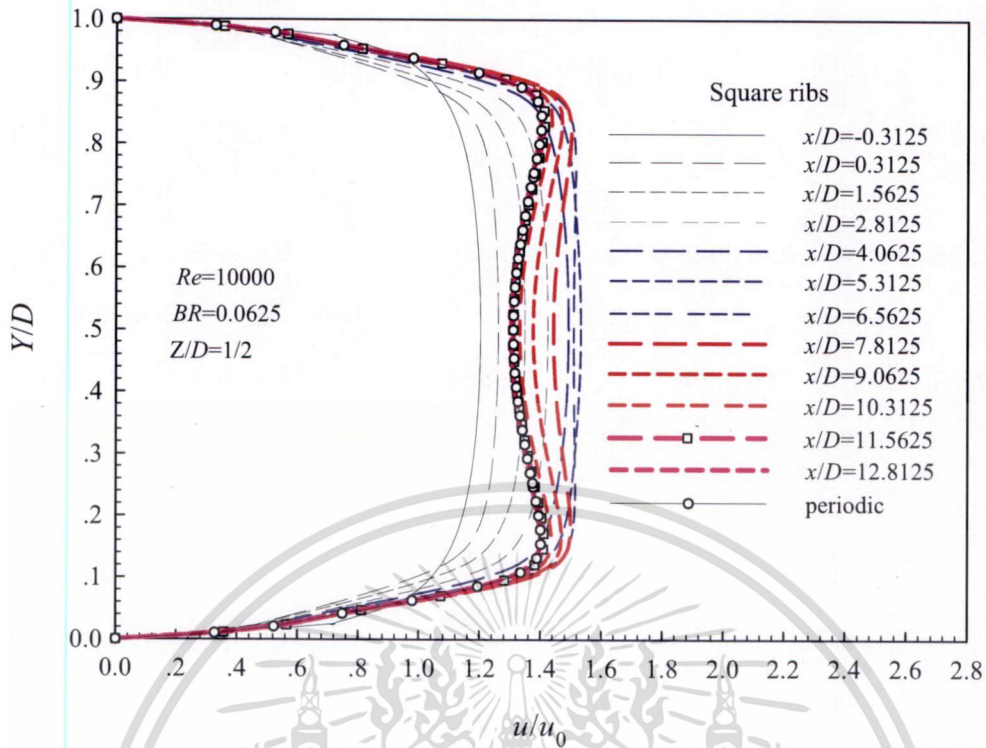


รูปที่ 6.2 (ก) โดเมนที่ใช้ในการคำนวณแบบเป็นโมดูลของครีบจัดเรียง (ข) รูปของกริดเซลล์ที่ใช้ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลข



รูปที่ 6.3 การกระจายค่า Nu_x / Nu_0 ที่ตำแหน่ง $Z/D=1/2$ สำหรับการไหลแบบเต็มความยาวช่องทางไหลและแบบเป็นโมดูลของครีบจัดเรียง ที่ $Re=10,000$ และ $PR=0.625$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



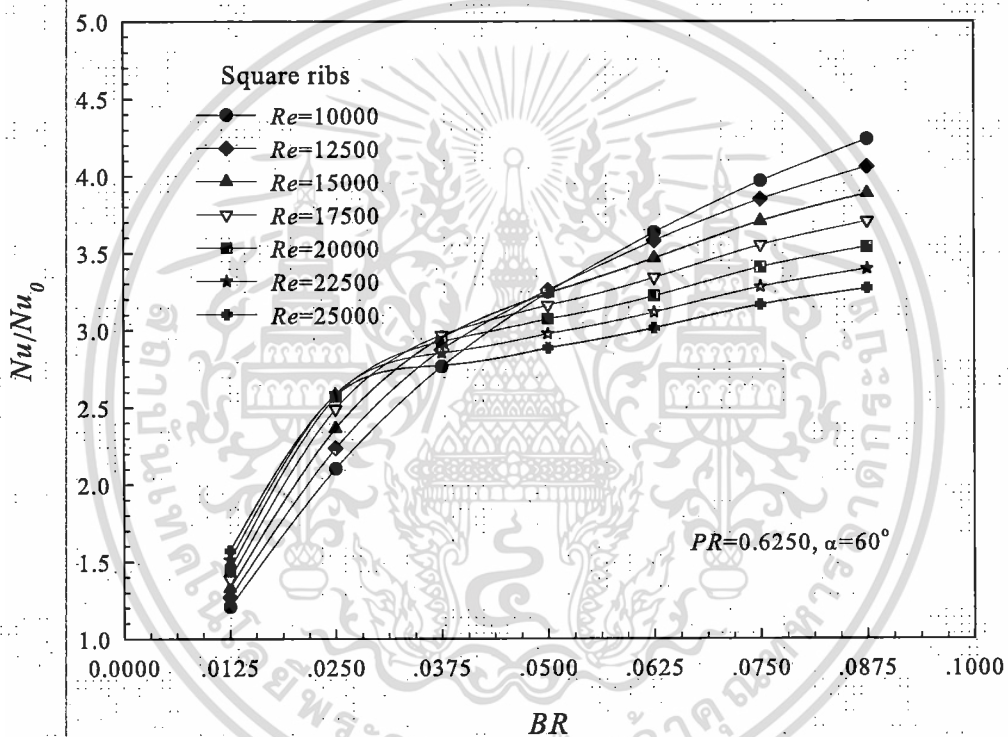
รูปที่ 6.4 การกระจายค่า u/u_0 ที่ตำแหน่ง $Z/D=1/2$ สำหรับการไหลแบบเต็มความยาวช่องทางไหล และแบบเป็นโมดูลของครีบริบที่ $Re=10,000$ และ $PR=0.625$

การศึกษาสภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และซ้ำเป็นช่วงของการไหลและการถ่ายเทความร้อน ที่มีกรไหลภายในท่อที่ติดตั้งครีบริบนั้น วิเคราะห์โดยพิจารณาการไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อที่ติดตั้งครีบริบตัววีแบบแยกตัวซึ่งทำมุมปะทะ 60° กับทิศทางการไหลและเรียงตัวซ้ำกันอย่างต่อเนื่องที่ผนังด้านบนและด้านล่างดังแสดงไว้ในรูปที่ 6.1 และในรูปที่ 6.2 แสดงโดเมนที่ใช้ในการคำนวณแบบเป็นโมดูล และรูปของกริดเซลล์ที่ใช้ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของครีบริบ ผลการวิเคราะห์แสดงดังกราฟของการกระจายค่า Nu_x/Nu_0 และ u/u_0 ตามแนวทิศทางการไหล ซึ่งเป็นการแสดงค่า Nu_x/Nu_0 และ u/u_0 ของกรณีการคำนวณการไหลแบบเต็มความยาวท่อพร้อมกับแบบเป็นโมดูล และในทุกกรณีนั้นพิจารณาที่ค่า $Re=10,000$, $PR=0.625$ และที่ $Z/D=1/2$ ซึ่งเป็นตำแหน่งกึ่งกลางท่อ ดังแสดงในรูปที่ 6.3 และ 6.4

ในรูปที่ 6.3 แสดงการกระจายค่า Nu_x/Nu_0 ไปตามทิศทางการไหล ซึ่งเห็นได้ว่ารูปร่างของค่า Nu_x/Nu_0 เริ่มปรากฏซ้ำเป็นช่วงที่โมดูลที่ 2 หลังจากนั้นจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นและลดลงเล็กน้อยจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และซ้ำเป็นช่วงเชิงความร้อน ที่โมดูลที่ 19 หรือที่ตำแหน่ง x/D ประมาณ 11.5 และในรูปที่ 6.4 แสดงการกระจายค่า u/u_0 ไปตามทิศทางการไหล ซึ่งเห็นได้ว่าการเข้าสู่สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และซ้ำเป็นช่วงเชิงความเร็ว เกิดที่ที่ตำแหน่ง x/D ประมาณ 11.5 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับการเข้าสู่สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และซ้ำเป็นช่วงเชิงความร้อน

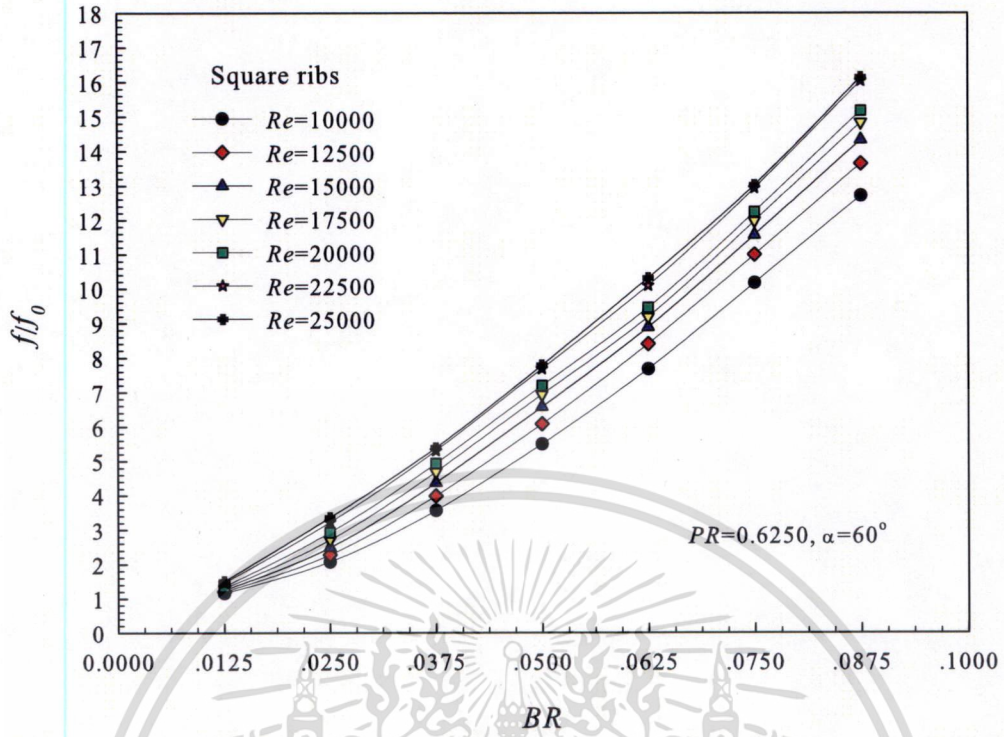
6.2 อิทธิพลของค่า BR ของครีบบัตุรัส

อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงค่าความสูงของครีบบัตุรัสรูปตัววีแบบแยกตัว ที่ส่งผลต่อค่าการถ่ายเทความร้อน พิจารณาได้จากรูปที่ 6.5 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่า Nu/Nu_0 ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่า BR ซึ่งค่า BR ที่ศึกษามีค่าเท่ากับ 0.0125, 0.025, 0.0375, 0.05, 0.0625, 0.075 และ 0.0875 ที่ค่า Re ในช่วง 10,000-25,000 ในภาพรวมพบว่าเมื่อครีบบัตุรัสมีค่า BR เพิ่มขึ้นค่า Nu/Nu_0 มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยที่ครีบบัตุรัสที่ให้ค่า Nu/Nu_0 สูงที่สุดคือ $BR=0.0875$ เมื่อเฉลี่ยค่าตลอดช่วง Re ที่พิจารณาจะมีค่าประมาณ 3.60 และครีบบัตุรัสที่ให้ค่า Nu/Nu_0 ต่ำที่สุดคือ $BR=0.0125$ โดยมีค่าเฉลี่ยตลอดช่วง Re ประมาณ 1.33 และสังเกตพบว่าเมื่อค่า Re เพิ่มสูงขึ้นค่า BR ของครีบบัตุรัสที่ทำให้ค่าความชันของการเพิ่มค่า Nu/Nu_0 มีแนวโน้มลดลงนั้นมีค่า BR อยู่ที่ค่าประมาณ 0.0375

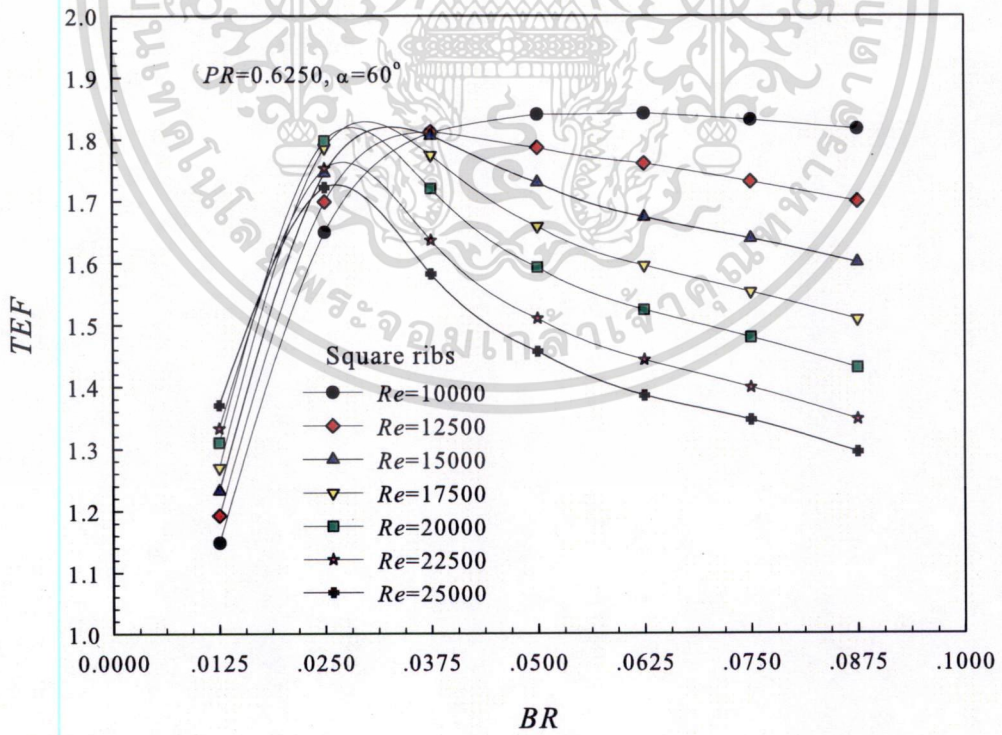


รูปที่ 6.5 การเปลี่ยนแปลงค่า Nu/Nu_0 กับค่า BR ตั้งแต่ 0.0125-0.0875 ที่ค่า $PR=0.625$ และ $\alpha=60^\circ$

อิทธิพลของค่า BR ของครีบบัตุรัสที่ส่งผลต่อค่าตัวประกอบความเสียดทาน พิจารณาได้จากรูปที่ 6.6 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า ff_0 กับค่า BR ในภาพรวมพบว่าเมื่อครีบบัตุรัสมีความสูงเพิ่มสูงขึ้นค่า ff_0 มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยครีบบัตุรัสที่ให้ค่า ff_0 สูงที่สุดคือ $BR=0.0875$ เมื่อเฉลี่ยค่าตลอดช่วง Re ที่พิจารณาจะมีค่าประมาณ 14.22 และครีบบัตุรัสที่ให้ค่า ff_0 ต่ำที่สุดคือ $BR=0.0125$ โดยมีค่าเฉลี่ยตลอดช่วง Re ประมาณ 1.28 และสังเกตพบว่าเมื่อครีบบัตุรัสมีความสูงตั้งแต่ค่า $BR=0.0375$ ขึ้นไปความชันของการเพิ่มค่า ff_0 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น



รูปที่ 6.6 การเปลี่ยนแปลงค่า f/f_0 กับค่า BR ตั้งแต่ 0.0125-0.0875 ที่ค่า $PR=0.625$ และ $\alpha=60^\circ$



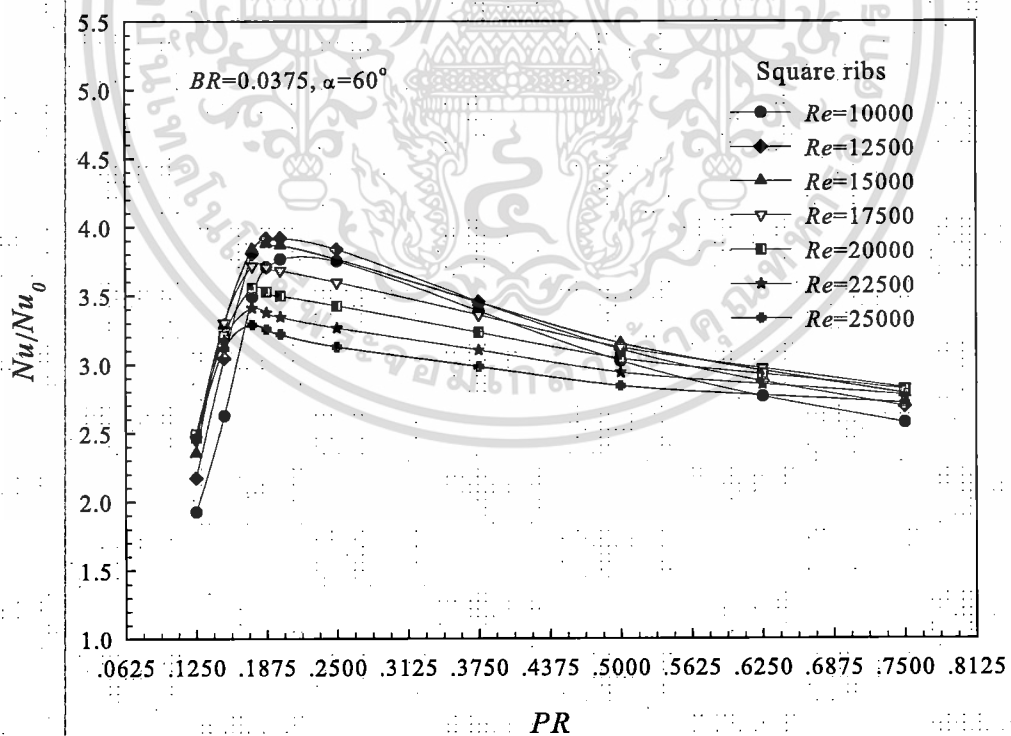
รูปที่ 6.7 การเปลี่ยนแปลงค่า TEf กับค่า BR ตั้งแต่ 0.0125-0.0875 ที่ค่า $PR=0.625$ และ $\alpha=60^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

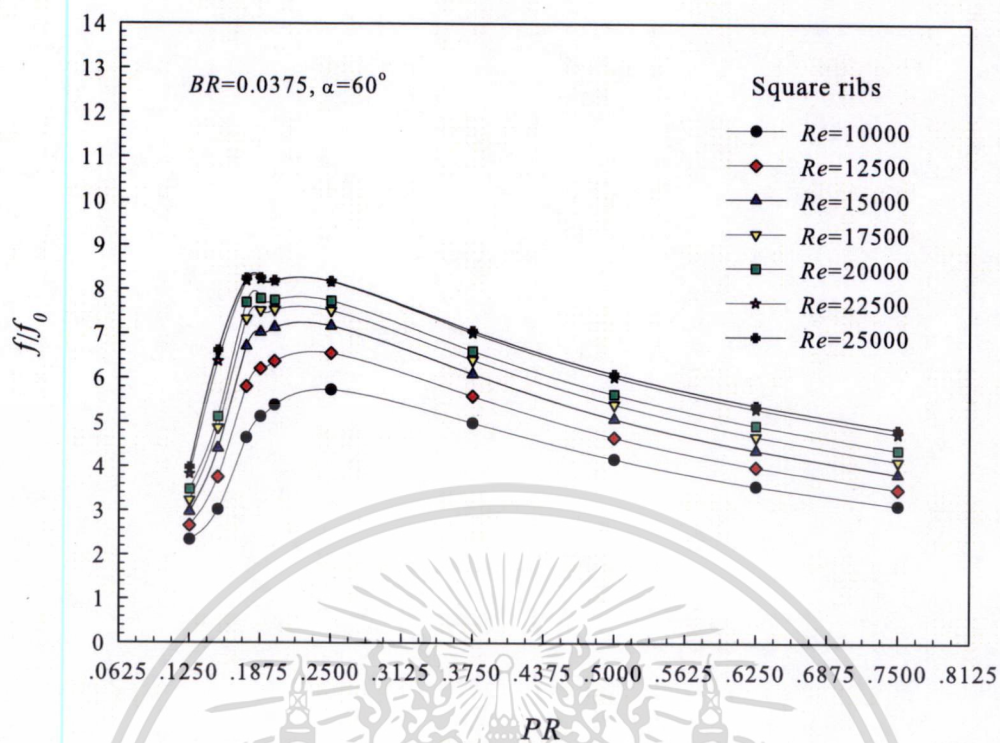
อิทธิพลของค่า BR ที่ส่งผลต่อค่า TEF พิจารณาได้จากรูปที่ 6.7 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า TEF ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่า BR ในภาพรวมพบว่าเมื่อครีบบมีความสูงเพิ่มขึ้นค่า TEF มีแนวโน้มลดลง และในทุกๆ ค่าของ BR นั้นค่า TEF มีแนวโน้มลดลงเมื่อ Re เพิ่มขึ้น โดยค่า BR ของครีบที่ให้ค่า TEF สูงที่สุดคือค่า BR ที่อยู่ระหว่างช่วง 0.025 ถึง 0.05 ซึ่งเป็นผลมาจากค่า Nu/Nu_0 และ ff_0 มีการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟที่มีค่า BR อยู่ในช่วงนี้ โดยสามารถสังเกตได้ในรูปที่ 6.5 และ 6.6 เมื่อเลือกค่า BR ซึ่งเป็นค่ากึ่งกลางของช่วง 0.025 ถึง 0.05 ซึ่งคือ $BR=0.0375$ และเฉลี่ยค่าตลอดช่วง Re ที่พิจารณาจะมีค่า TEF ประมาณ 1.68 และสำหรับค่า TEF สูงที่สุดคือ 1.84 ที่ $Re=10,000$ ซึ่งเกิดที่ค่า $BR=0.05$ นอกจากนี้ความสูงครีบที่ให้ค่า TEF ต่ำที่สุดคือ $BR=0.025$ โดยมีค่าเฉลี่ยตลอดช่วง Re ประมาณ 1.23 ทั้งนี้เนื่องจากเป็นกรณีที่ให้ค่า Nu/Nu_0 ต่ำที่สุด และเมื่อพิจารณาค่าที่วิเคราะห์ได้พบว่า ความสูงของครีบที่น่าจะมีความเหมาะสมมากที่สุดคือครีบที่มีค่า $BR=0.0375$ ทั้งนี้เนื่องจากค่าความชันของการเพิ่มค่า Nu/Nu_0 มีแนวโน้มลดลงที่ค่านี้ ดังนั้นในส่วนถัดไปจะเลือกค่า $BR=0.0375$ มาดำเนินการวิเคราะห์ถึงอิทธิพลของค่า PR ของครีบจัตุรัสต่อค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องต่อไป

6.3 อิทธิพลของค่า PR ของครีบจัตุรัส

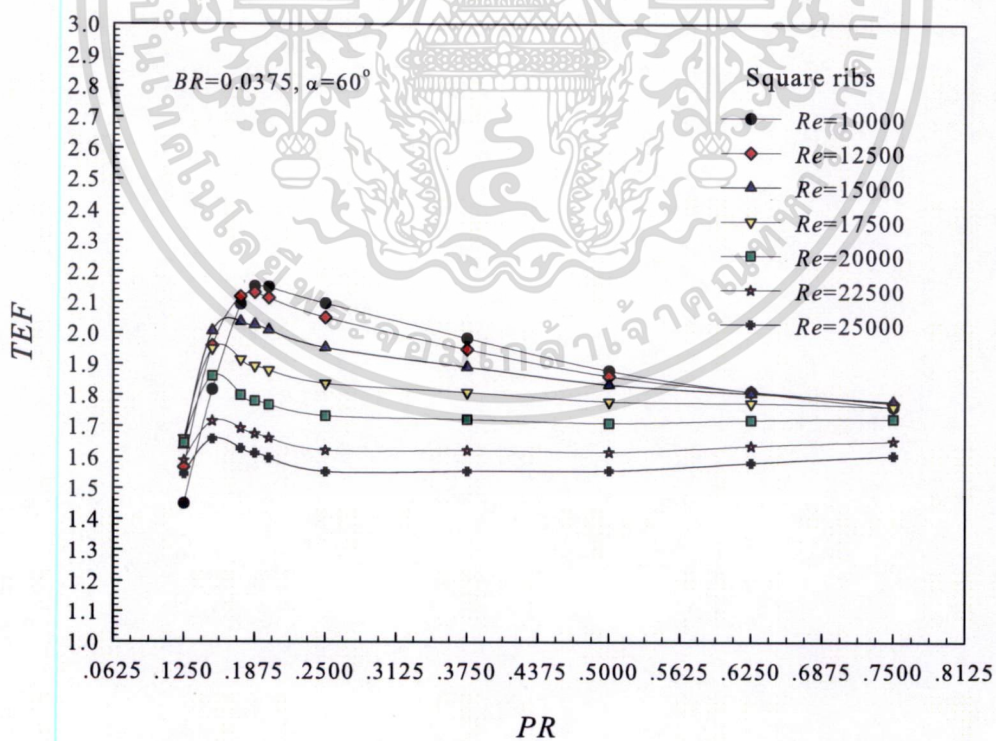
การศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงค่า PR ที่ส่งผลต่อค่า Nu/Nu_0 , ff_0 และ TEF สำหรับการไหลครีบจัตุรัสที่มี $\alpha=60^\circ$, $BR=0.0375$ และ Re อยู่ในช่วง 10,000-25,000 มีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 6.8 ความสัมพันธ์ของค่า Nu/Nu_0 กับค่า PR ในช่วง $PR=0.125-0.75$ ที่ $BR=0.0375$ และ $\alpha=60^\circ$



รูปที่ 6.9 ความสัมพันธ์ของค่า f/f_0 กับค่า PR ในช่วง $PR=0.125-0.75$ ที่ $BR=0.0375$ และ $\alpha=60^\circ$



รูปที่ 6.10 ความสัมพันธ์ของค่า TEF กับค่า PR ในช่วง $PR=0.125-0.75$ ที่ $BR=0.0375$ และ $\alpha=60^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงค่า PR ที่ส่งผลต่อค่าการถ่ายเทความร้อน พิจารณาได้จากรูปที่ 6.8 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่า Nu/Nu_0 ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่า PR ในช่วง PR ตั้งแต่ 0.125 ถึง 0.75 ที่ค่า Re ต่างๆ กัน ในภาพรวมพบว่าเมื่อครีบบมีระยะห่างเพิ่มขึ้นค่า Nu/Nu_0 มีแนวโน้มลดลง ยกเว้นในช่วงค่า PR ที่น้อยกว่า 0.1875 และในทุกๆ ค่า PR ที่ศึกษานั้น ค่า Nu/Nu_0 มีแนวโน้มลดลงเมื่อ Re เพิ่มขึ้น โดยที่ค่า PR ที่ให้ค่า Nu/Nu_0 สูงที่สุดคือที่ค่า $PR=0.1875$ เมื่อเฉลี่ยค่า Nu/Nu_0 ตลอดช่วง Re ที่พิจารณาจะมีค่าประมาณ 3.48 ซึ่งที่ค่า PR นี้ให้ค่า Nu/Nu_0 สูงที่สุดเท่ากับ 3.92 ที่ $Re=12500$ และค่า PR ที่ให้ค่า Nu/Nu_0 ต่ำที่สุดคือ $PR=0.125$ โดยมีค่าเฉลี่ยตลอดช่วง Re ที่พิจารณามีประมาณ 2.24

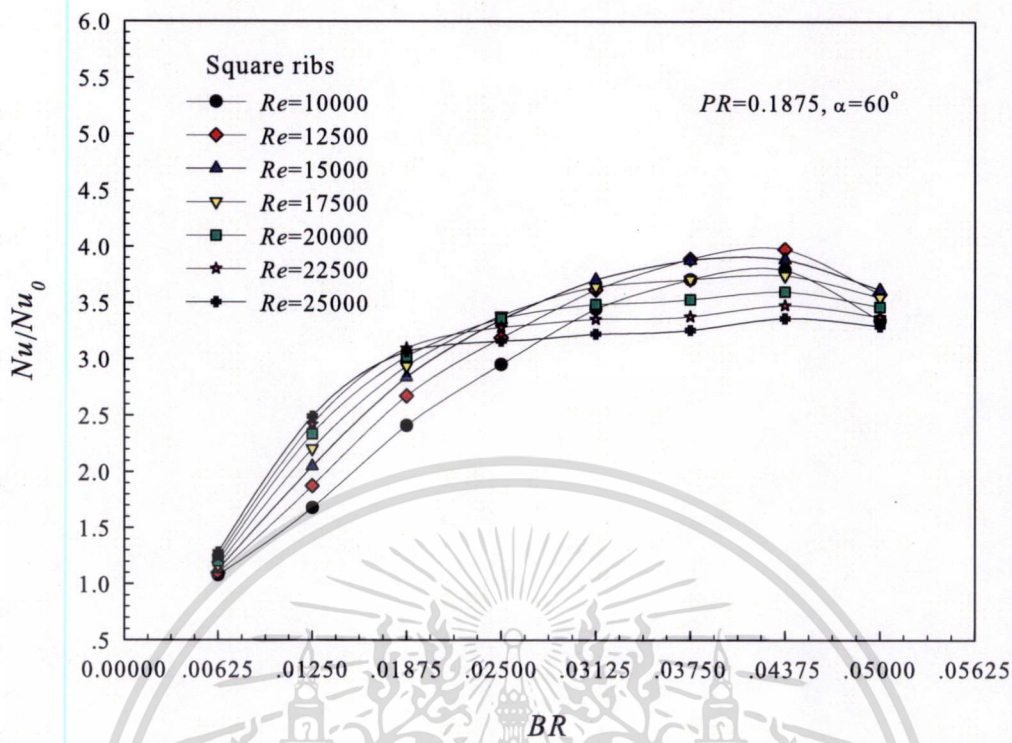
สำหรับอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงค่า PR ที่มีผลต่อค่า ff_0 พิจารณาได้จากรูปที่ 6.9 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่า ff_0 ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่า PR ที่ค่า Re ต่างๆ กัน ในภาพรวมพบว่าเมื่อครีบบมีค่า PR เพิ่มมากขึ้นค่า ff_0 มีแนวโน้มลดลงยกเว้นในช่วงที่ PR ที่น้อยกว่า 0.1875 โดยที่ค่า PR ที่ให้ค่า ff_0 สูงที่สุดคือที่ค่า $PR=0.1875$ ซึ่งเมื่อเฉลี่ยค่า ff_0 ที่ $PR=0.1875$ ตลอดช่วง Re ที่พิจารณาจะมีค่าประมาณ 6.92 และค่า PR ที่ให้ค่า ff_0 ต่ำที่สุดคือ $PR=0.125$ โดยมีค่าเฉลี่ยตลอดช่วง Re ประมาณ 3.10

อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงค่า PR ที่มีผลต่อค่า TEF พิจารณาได้จากรูปที่ 6.10 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า TEF ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่า PR ที่ค่า Re ต่างๆ กัน ในภาพรวมพบว่าเมื่อครีบบมีค่า PR เพิ่มขึ้น ค่า TEF มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่หลังจากค่า PR ประมาณ 0.1875 จะมีค่าลดลงและมีแนวโน้มคงที่ ในขณะที่ทุกๆ ค่าของ PR ค่า TEF มีแนวโน้มลดลงเมื่อ Re เพิ่มขึ้น โดยที่ครีบบซึ่งให้ค่า TEF สูงที่สุดคือ $PR=0.1875$ เมื่อเฉลี่ยตลอดช่วง Re ที่พิจารณา มีค่า $TEF=1.83$ และมีค่าสูงที่สุดคือ 2.08 ที่ $Re=10,000$ ในขณะที่ $PR=0.125$ ให้ค่า TEF ต่ำที่สุดเมื่อเฉลี่ยตลอดช่วง Re ที่พิจารณาคือ 1.53

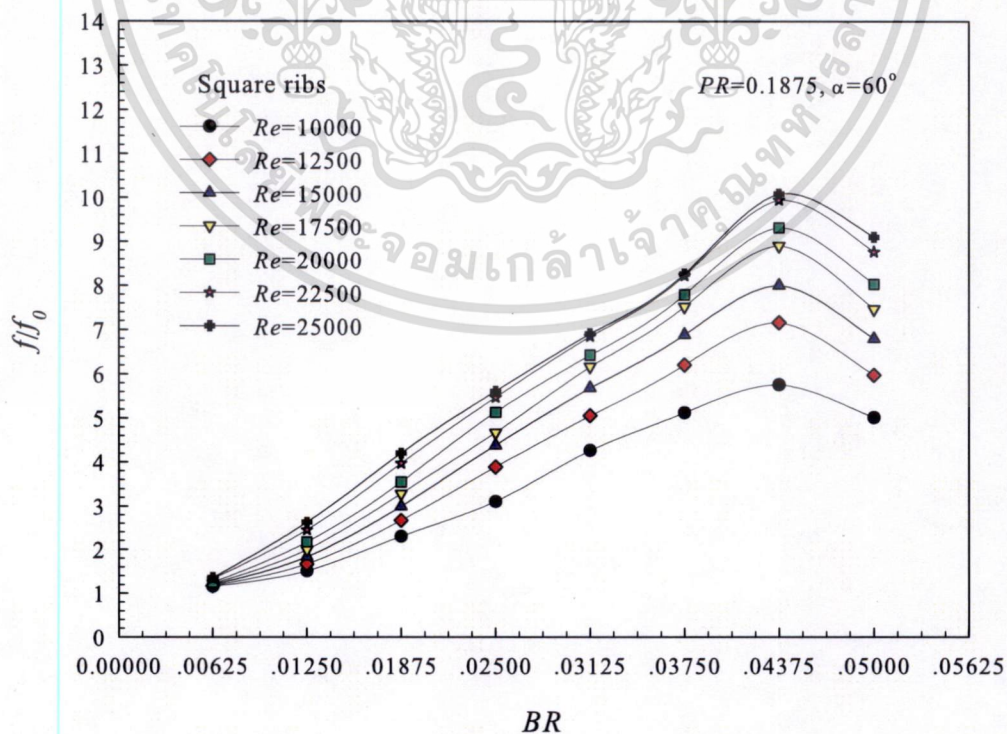
6.4 การหาค่าตัวแปรต่างๆ ที่เหมาะสมสำหรับครีบบจัดรูปด้วยวิธีคำนวณซ้ำ

จากการศึกษาในหัวข้อต่างๆ ที่ผ่านซึ่งพอจะสรุปได้ว่า การจัดวางครีบบบางแบบครีบบตัววิแยกตัวชิ้นส่วนการไหล ที่มีค่า $BR=0.0375$, $\alpha=60^\circ$ และ $PR=0.1875$ ให้ค่า TEF เมื่อเฉลี่ยตลอดช่วง Re ที่พิจารณามีค่า $TEF=1.83$ และมีค่าสูงที่สุดคือ 2.08 ที่ $Re=10,000$ ซึ่งสำหรับการวิเคราะห์ในส่วนถัดไปจะดำเนินการตรวจสอบว่า ที่ $PR=0.1875$ นั้นมีค่า $BR=0.0375$ ที่ให้ค่า TEF เหมาะสมและสูงที่สุดหรือไม่ โดยพิจารณาที่ค่า $\alpha=60^\circ$ คงที่

อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงค่าความสูงของครีบบจัดรูปตัววิแบบแยกตัว ที่ส่งผลต่อค่าการถ่ายเทความร้อนของกรณีการคำนวณซ้ำ พิจารณาได้จากรูปที่ 6.11 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่า Nu/Nu_0 ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่า BR ซึ่ง BR อยู่ในช่วง 0.00625 ถึง 0.05 ที่ค่า Re ในช่วง 10,000-25,000 ในภาพรวมพบว่าเมื่อครีบบมีความสูงเพิ่มขึ้น Nu/Nu_0 มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น แต่มีค่าลดลงหลังจากค่า $BR=0.04375$ โดยครีบบที่ให้ค่า Nu/Nu_0 สูงที่สุดคือ $BR=0.04375$ เมื่อเฉลี่ยค่าตลอดช่วง Re ที่พิจารณาจะมีค่าประมาณ 3.51 และครีบบที่ให้ค่า Nu/Nu_0 ต่ำที่สุดคือ $BR=0.00625$ โดยมีค่าเฉลี่ยตลอดช่วง Re ที่พิจารณาจะมีค่าประมาณ 1.40 และสังเกตพบว่าค่า BR ที่มีความชันของกราฟ Nu/Nu_0 มีแนวโน้มลดลง เมื่อ Re เพิ่มขึ้นนั้นมีค่าลดลง



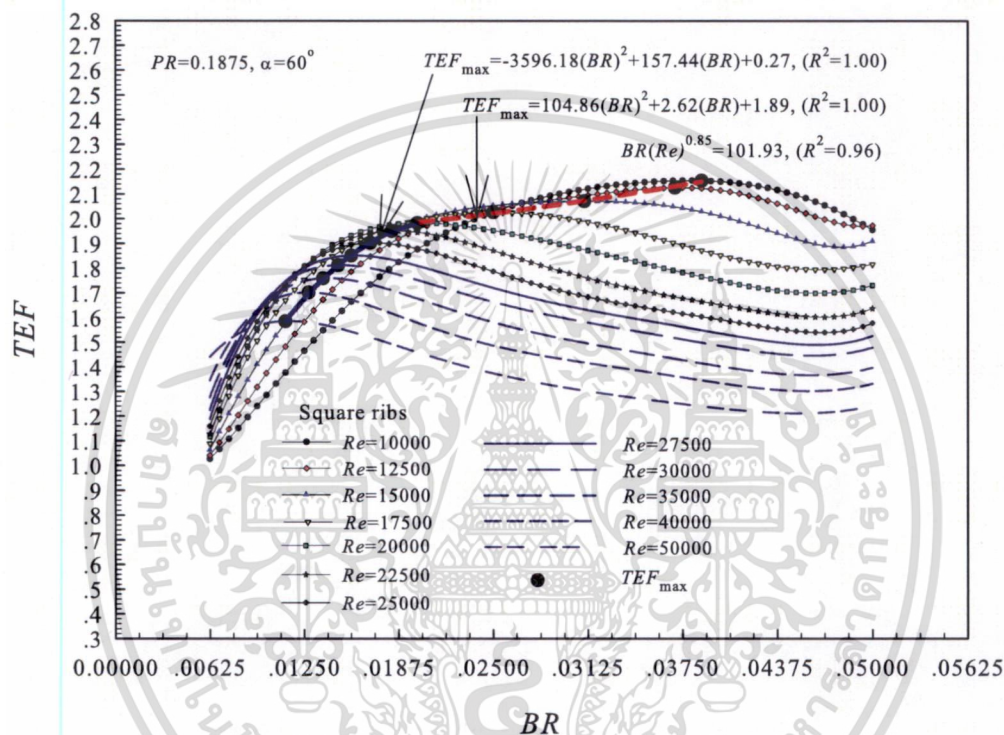
รูปที่ 6.11 ความสัมพันธ์ของ Nu/Nu_0 กับค่า BR ตั้งแต่ 0.00625 ถึง 0.05 ที่ $PR=0.1875$ และ $\alpha=60^\circ$



รูปที่ 6.12 ความสัมพันธ์ของ f/f_0 กับค่า BR ตั้งแต่ 0.00625 ถึง 0.05 ที่ $PR=0.1875$ และ $\alpha=60^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการอ้างอิงเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้
 ใจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

อิทธิพลของค่า BR ที่ส่งผลต่อค่าตัวประกอบความเสียดทาน พิจารณาได้จากรูปที่ 6.12 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า f/f_0 กับค่า BR ของกรณีการคำนวณซ้ำ ในภาพรวมพบว่าเมื่อครีบบีความสูงเพิ่มขึ้นค่า f/f_0 มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น แต่มีค่าลดลงหลังจากค่า $BR=0.04375$ โดยครีบบีที่ให้ค่า f/f_0 สูงที่สุดคือ $BR=0.04375$ เมื่อเฉลี่ยค่าตลอดช่วง Re ที่พิจารณาจะมีค่าประมาณ 7.46 และครีบบีที่ให้ค่า f/f_0 ต่ำที่สุดคือ $BR=0.00625$ โดยมีค่าเฉลี่ยตลอดช่วง Re ประมาณ 1.24 และสังเกตพบว่าเมื่อครีบบีความสูงตั้งแต่ค่า $BR=0.0375$ ขึ้นไปความชันของการเพิ่มค่า f/f_0 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่ Re มากกว่า 15,000



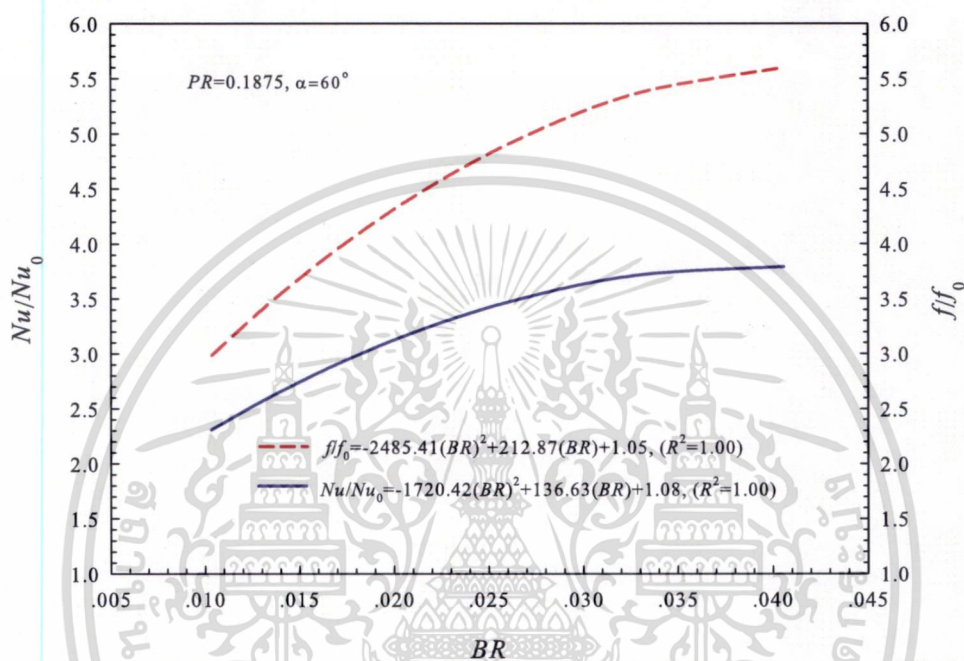
รูปที่ 6.13 ความสัมพันธ์ของ TEF กับค่า BR ตั้งแต่ 0.00625 ถึง 0.05 ที่ $PR=0.1875$ และ $\alpha=60^\circ$

อิทธิพลของค่า BR ที่ส่งผลต่อค่า TEF พิจารณาได้จากรูปที่ 6.13 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า TEF ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่า BR ของกรณีการคำนวณซ้ำโดยขยายการพิจารณาค่า Re ในช่วง 10,000-50,000 และได้แสดงค่าสูงสุดของค่า TEF ซึ่งเรียกว่า TEF_{max} ในแต่ละค่าของ Re และ BR ในรูปของเส้นกราฟและสมการความสัมพันธ์ ในภาพรวมสังเกตพบว่า เมื่อ Re เพิ่มมากขึ้นค่า TEF_{max} มีแนวโน้มลดลงและค่า BR ที่ให้ค่า TEF_{max} ในแต่ละค่าของ Re มีแนวโน้มลดลงด้วย ซึ่งเมื่อพิจารณาในรายละเอียดพบว่า ที่ $Re=10,000$ มีค่า TEF_{max} เท่ากับ 2.15 ที่ค่า $BR=0.0375$ และที่ $Re=50,000$ มีค่า TEF_{max} ต่ำที่สุดเท่ากับ 1.59 ที่ค่า $BR=0.011$ ซึ่งกราฟที่ได้นี้มีประโยชน์สำหรับการนำไปใช้ออกแบบเพื่อหาค่า BR ที่ให้ค่า TEF_{max} ที่แต่ละ Re โดยที่ค่า $PR=0.1875$ และ $\alpha=60^\circ$ คงที่

โดยทั่วไปสำหรับการนำกราฟที่วิเคราะห์ได้นี้ไปใช้งานเพื่อหาค่า TEF_{max} นั้น คล้ายกับกรณีการวิเคราะห์การไหลผ่านครีบบาง โดยในเบื้องต้นต้องทราบค่าของอัตราการไหลในช่วงที่ต้องการใช้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งาน ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาค่า Re ได้ และเมื่อรู้ค่า Re แล้วสามารถที่จะหาค่า BR และค่า TEF_{max} ได้จากกราฟหรือจากสมการที่แสดงไว้ในรูปที่ 6.13

นอกจากนี้เมื่อทราบค่า BR แล้ว ยังจะสามารถคำนวณหรือหาค่า Nu/Nu_0 และ ff_0 ที่ให้ค่า TEF_{max} ได้อีกด้วย โดยคำนวณค่าจากกราฟหรือจากสมการในรูปที่ 6.14 ซึ่งค่า Nu/Nu_0 และ ff_0 แสดงไว้ที่ค่าบนแกนตั้งทางด้านซ้ายและด้านขวาของกราฟตามลำดับ โดยที่ค่า Nu/Nu_0 อยู่ในช่วง 2.27 ถึง 3.80 และค่า ff_0 อยู่ในช่วง 3.04 ถึง 5.54 สำหรับค่า BR ที่อยู่ในช่วง 0.01 ถึง 0.04



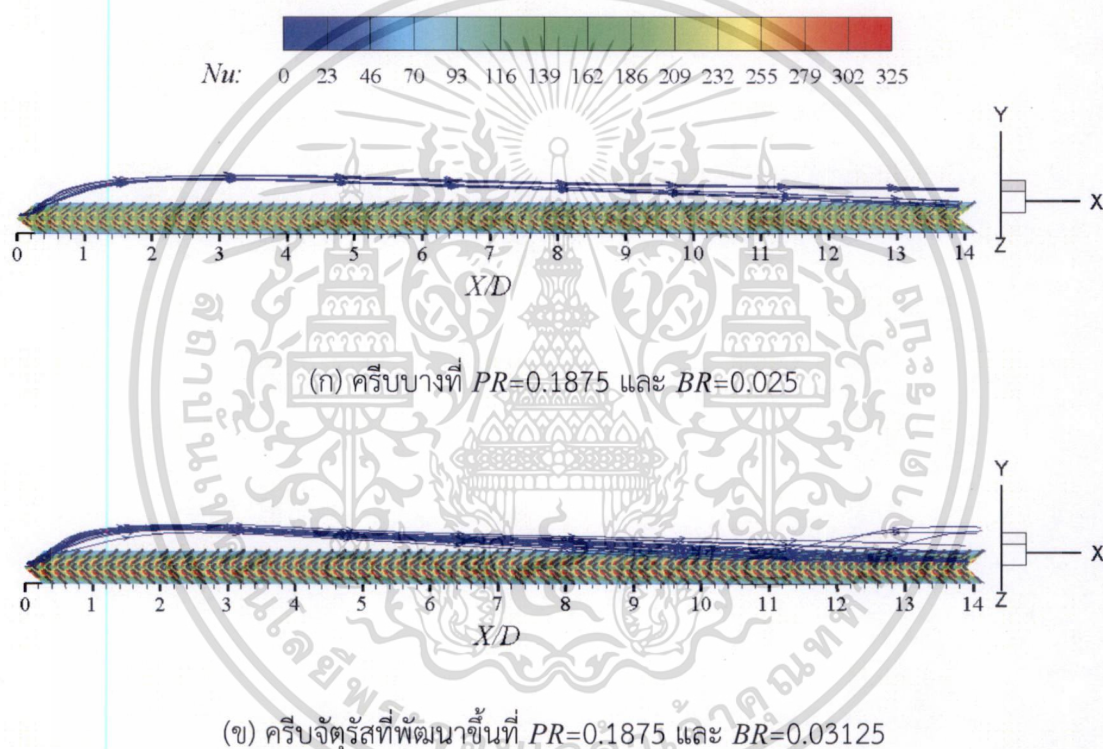
รูปที่ 6.14 ค่า Nu/Nu_0 และ ff_0 ที่ค่า BR ต่างๆ ทั้งในรูปแบบกราฟและสมการความสัมพันธ์

จากผลที่ได้วิเคราะห์ก่อนหน้านี้ เมื่อทราบค่า Re มาค่าหนึ่ง ยกตัวอย่างเช่นที่ $Re=15,000$ สามารถหาค่า BR ที่ให้ค่า TEF_{max} ได้จากรูปที่ 6.13 ซึ่งคือที่ $BR=0.03125$ นั่นเอง และมีค่า TEF_{max} คือ 2.07 และหลังจากนั้น สามารถหาค่า Nu/Nu_0 และ ff_0 จากรูปที่ 6.14 ซึ่งพบว่าที่ $BR=0.03125$ ค่า Nu/Nu_0 มีค่าเท่ากับ 3.59 และ $ff_0=5.12$

สำหรับครีบทันแบบที่มีหน้าตัดครีบทันเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ $PR=0.625$ และ $BR=0.0625$ ซึ่งผลจากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขที่ได้ในบทที่ 4 ที่พบว่าได้ค่า $Nu/Nu_0=3.6$ และ $ff_0=7.3$ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าของครีบทันจัตุรัสที่ได้หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแล้วพบว่าค่า Nu/Nu_0 ใกล้เคียงกัน ในขณะที่ค่า ff_0 ลดลง 29.86% ซึ่งเห็นได้ชัดว่าแนวทางที่ได้ดำเนินการมานั้นนำไปสู่ค่า ff_0 ที่ลดลงอยู่ในเกณฑ์ดี ในขณะที่ Nu/Nu_0 ไม่แตกต่างกัน จึงส่งผลให้ TEF มีค่าสูงที่สุดที่ $Re=15,000$

6.5 การเปรียบเทียบระหว่างครีบบางและครีบกจัดรัสของกรณีการหาค่าตัวแปรต่างๆ ที่เหมาะสมแล้ว

สำหรับการเปรียบเทียบระหว่างครีบบางและครีบกจัดรัส ของกรณีการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแล้ว โดยในส่วนแรกได้แสดงเส้นทางเดินอนุภาคของของไหล ซึ่งพิจารณาที่ $Re=15,000$ และ $\alpha=60^\circ$ โดยเปรียบเทียบระหว่างกรณี (ก) ครีบบางที่ $PR=0.1875$ และ $BR=0.025$ (ข) ครีบกจัดรัส $PR=0.1875$ และ $BR=0.03125$ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 6.15 ซึ่งในทั้งสองกรณีให้ค่า TEF_{max} ที่ $Re=15,000$ จากการสังเกตพบว่าลักษณะการไหลตกกระทบพื้นผิวของกรณีครีบกจัดรัสมีระยะการไหลตกกระทบพื้นผิวให้ความร้อนมีแนวโน้มสั้นกว่า เนื่องจากครีบกจัดรัสมีค่า BR สูงกว่าจึงส่งผลให้ค่า Nu/Nu_0 และ f/f_0 สูงกว่าครีบบางเล็กน้อยแต่มีค่า TEF_{max} ไม่ต่างกัน

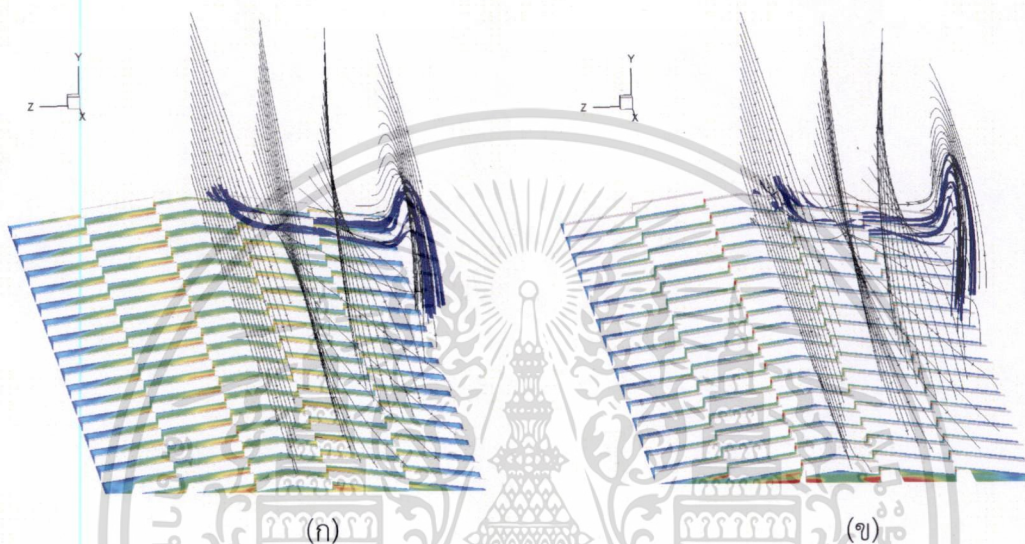


รูปที่ 6.15 เส้นทางเดินอนุภาคของกรณี (ก) ครีบบางที่ $PR=0.1875$ และ $BR=0.025$ (ข) ครีบกจัดรัสที่ปรับปรุงขึ้นที่ค่า $PR=0.1875$ และ $BR=0.03125$ พิจารณาที่ $Re=15,000$ และ $\alpha=60^\circ$

ในรูปที่ 6.16 ได้แสดงให้เห็นถึงเส้นทางเดินอนุภาคของของไหลและการผสมของการไหลจากพื้นผิวกับการไหลหลักของกรณี (ก) ครีบบางที่ $PR=0.1875$ และ $BR=0.025$ และ (ข) ครีบกจัดรัสที่ปรับปรุงขึ้นที่ $PR=0.1875$ และ $BR=0.03125$ ซึ่งทั้งสองกรณีพิจารณาที่ $Re=15,000$ และ $\alpha=60^\circ$ จากการสังเกตพบว่าทั้งสองกรณีมีลักษณะโดยรวมใกล้เคียงกัน

กรณีการไหลที่แสดงในแนวภาคตัดขวางทอ และการกระจายค่าเลขนัสเซลล์เฉพาะที่ได้นำเสนอในรูปที่ 6.17 ซึ่งแสดงเส้นทางเดินของอนุภาคของของไหลในแต่ละหน้าตัดของกรณีเดียวกันกับในรูปที่ 6.16 เนื่องจากครีบบางที่แสดงการไหลในรูปที่ 6.17 นั้น มีค่า BR น้อยกว่ากรณีของครีบกจัดรัสที่ปรับปรุงขึ้น จึงมีเส้นกระแสการไหลที่เคลื่อนที่ออกจากพื้นผิวให้ความร้อนซึ่งอยู่ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างครีบบางๆ เกิดการไหลผสมกับการไหลหลักโดยเกิดการรวมตัวของเส้นกระแสการไหลเป็นจำนวนมากก่อนจะเคลื่อนที่พุ่งตกกระทบพื้นผิวให้ความร้อน ดังนั้นจึงสังเกตเห็นได้ชัดเจนถึงความหนาแน่นหรือความเข้มของกระแสในบริเวณแกนการหมุนของกรณีครีบบางมากกว่ากรณีของครีบบัตุรัส และเมื่อสังเกตการกระจายค่าเลขนีสเซลล์เฉพาะที่บนพื้นผิวให้ความร้อนพบว่าที่บริเวณด้านหลังของครีบบัตุรัสและครีบบัตุรัสที่แยกตัวออกมา ของกรณีการไหลผ่านครีบบางมีค่าเลขนีสเซลล์เฉพาะที่สูงกว่ากรณีการไหลผ่านครีบบัตุรัสและมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ แต่ที่บริเวณใกล้กับผนังท่อด้านข้างนั้นค่าเลขนีสเซลล์เฉพาะที่ของครีบบัตุรัสทั้งสองกรณีคล้ายกันซึ่งมีค่าน้อยกว่าที่บริเวณกลางท่อ

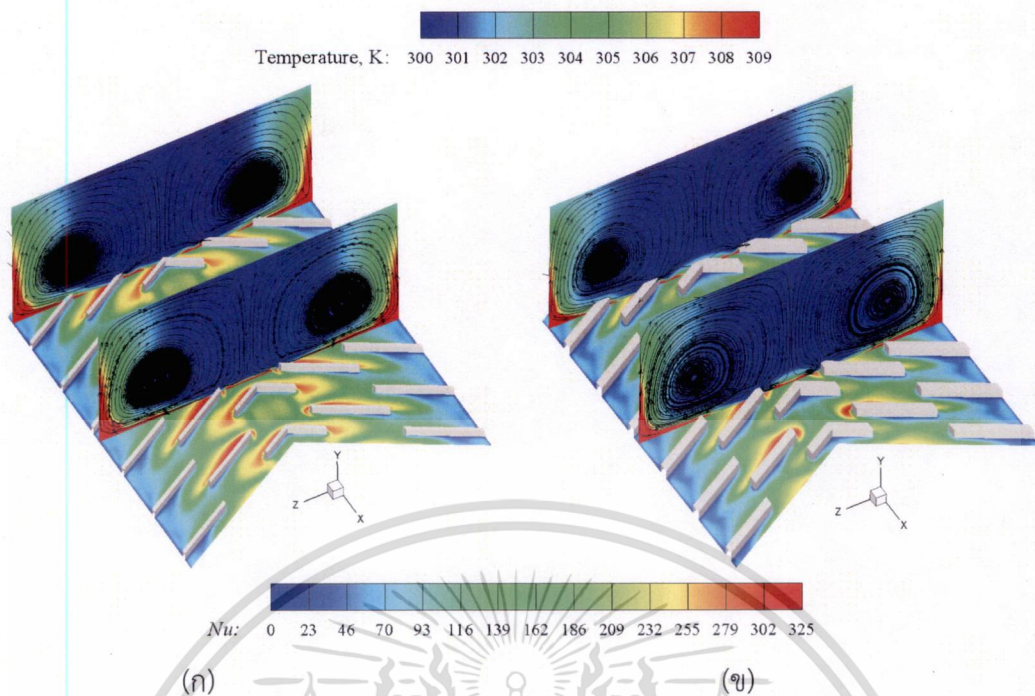


รูปที่ 6.16 เส้นทางเดินอนุภาคที่แสดงให้เห็นถึงการผสมของการไหลจากพื้นผิวและการไหลหลักของกรณี (ก) ครีบบางที่ $PR=0.1875$ และ $BR=0.025$ (ข) ครีบบัตุรัสที่ปรับปรุงขึ้นที่ $PR=0.1875$ และ $BR=0.03125$ พิจารณาที่ $Re=15000$ และ $\alpha=60^\circ$

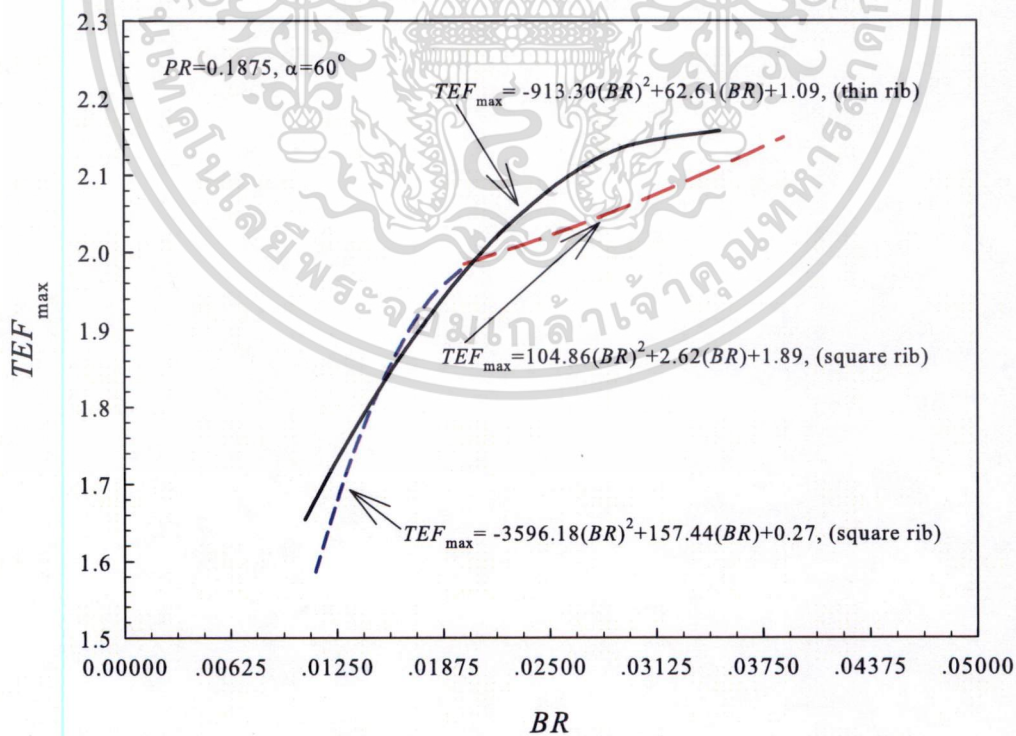
ถึงแม้ว่าครีบบางและครีบบัตุรัสที่ได้ปรับปรุงขึ้นจะให้ลักษณะที่ดีของการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ซึ่งเมื่อพิจารณาภายใต้ค่า TEF_{max} ในแต่ละค่าของ Re โดยภาพรวมพบว่าครีบบัตุรัสให้ค่า BR สูงกว่าครีบบางที่ Re ต่ำ แต่เมื่อ Re สูงขึ้นครีบบัตุรัสทั้งสองกรณีมีลักษณะที่ไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากเมื่อค่า Re เพิ่มสูงขึ้นค่า BR ที่ให้ค่า TEF_{max} จะลดลง และเมื่อพิจารณาภายใต้เงื่อนไขของการนำไปใช้งานจริงนั้นโดยทั่วไปอาจจะต้องกำหนดให้ค่า BR คงที่เพื่อความสะดวกต่อการใช้งาน ดังนั้นเมื่อพิจารณาที่ค่า BR คงที่พบว่าครีบบางมีแนวโน้มให้ค่า TEF_{max} มากกว่าครีบบัตุรัสที่ได้พัฒนาขึ้นโดยเฉพาะที่ค่า BR มากกว่า 0.02 โดยสามารถสังเกตเห็นได้จากรูปที่ 6.18 ซึ่งได้แสดงถึงการเปรียบเทียบค่า TEF_{max} ของกรณีครีบบางและครีบบัตุรัสที่พัฒนาขึ้น

ดังนั้นโดยภาพรวมกล่าวได้ว่า ครีบบางมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานจริงมากกว่าครีบบัตุรัส เนื่องจากครีบบางมีค่า TEF_{max} และ Nu/Nu_0 สูงกว่า ในส่วนถัดไปจะได้นำครีบบางไปวิเคราะห์เพื่อช่วยเพิ่มการพาความร้อนบนพื้นผิวให้ความร้อนและในบริเวณมุมของช่องทางไหลด้วยการติดตั้งครีบบนพื้นผิวหุ้มฉนวน โดยบังคับให้มีการไหลไปตกกระทบบนพื้นผิวให้ความร้อน ซึ่งสามารถนำไปใช้ในกรณีเฉพาะสำหรับงานที่ไม่สามารถติดตั้งครีบบนพื้นผิวให้ความร้อนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.17 เส้นกระแสในแต่ละภาคตัดขวางของกรณี (ก) ครีบบางที่ $PR=0.1875$ และ $BR=0.025$ (ข) ครีบจัตุรัสที่ปรับปรุงขึ้นที่ $PR=0.1875$ และ $BR=0.03125$ พิจารณาที่ $Re=15,000$ และ $\alpha=60^\circ$



รูปที่ 6.18 การเปรียบเทียบค่า TEF_{max} ของกรณีครีบบางและครีบสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ได้ปรับปรุงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

ครีบบางรูปตัววีบนพื้นผิวหุ้มฉนวน

จากการวิเคราะห์ที่ผ่านมา ได้ศึกษาในรายละเอียดถึงอิทธิพลของการจัดวางครีบบางและครีบบัศจรรย์ที่ได้ปรับปรุงขึ้น โดยมีการจัดวางครีบบางแบบครีบบัศจรรย์แยกตัวซึ่งส่วนการไหลบนพื้นผิวให้ความร้อน ซึ่งผลการวิเคราะห์นั้นพบว่าครีบบางและครีบบัศจรรย์ที่ได้พัฒนาขึ้น ให้ลักษณะที่ดีของการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนมากกว่าครีบบัศจรรย์ต้นแบบ และครีบบางมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานจริงมากกว่าครีบบัศจรรย์ แต่เมื่อพิจารณาในรายละเอียดถึงการกระจายค่าเลขนัสเซลล์เฉพาะที่ในบริเวณพื้นผิวให้ความร้อนที่อยู่รอบๆ ครีบบัศจรรย์กับผนังท่อหุ้มฉนวน พบว่าค่าเลขนัสเซลล์เฉพาะที่มีค่าน้อยกว่าที่บริเวณแนวกลางท่อซึ่งครีบบัศจรรย์ทั้งสองกรณีมีลักษณะคล้ายกัน ทั้งนี้เนื่องจากการไหลของไหลในบริเวณนี้มีความเร็วต่ำเพราะอยู่ใกล้กับมุมของท่อนำที่ดัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

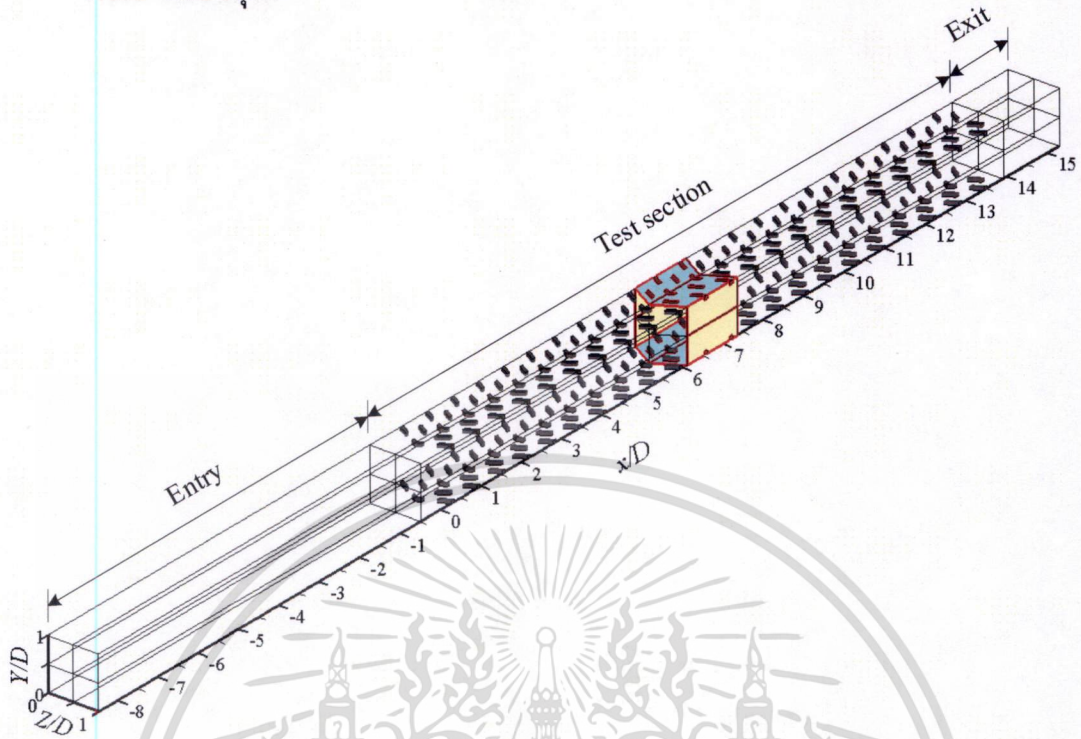
และเพื่อเป็นการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในบริเวณมุมของท่อนำสี่เหลี่ยมดังกล่าวนี้ หนึ่งในวิธีที่น่าจะช่วยแก้ปัญหาได้คือ การจัดวางครีบบัศจรรย์บนพื้นผิวหุ้มฉนวน แล้วให้มีการถ่ายเทความร้อนจากพื้นผิวที่ผนังด้านข้างทั้งสองข้าง โดยเมื่อมีการไหลมาปะทะครีบบัศจรรย์แล้วเกิดการไหลตกกระทบบนพื้นผิวให้ความร้อนดังกล่าว ซึ่งแนวคิดนี้ได้จากการสังเกตลักษณะการไหลผ่านครีบบัศจรรย์ตัววีซึ่งส่วนการไหล (V-up) นั้นมีกระแสการไหลในบริเวณกลางท่อถูกเหนี่ยวนำให้ไหลตกกระทบบนที่บริเวณด้านหน้าและระหว่างครีบบัศจรรย์แล้วหมุนวน พุ่งเข้าสู่ผนังด้านข้างของท่อทั้งสองด้านแบบทวนเข็มนาฬิกาเมื่อมองสวนทางการไหล ซึ่งการจัดวางครีบบัศจรรย์บนพื้นผิวหุ้มฉนวนนี้ น่าจะช่วยลดบริเวณที่ให้ค่าเลขนัสเซลล์เฉพาะที่ซึ่งมีค่าต่ำได้ และนอกจากนี้ลักษณะการจัดวางครีบบัศจรรย์ดังกล่าว ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการถ่ายเทความร้อนจากพื้นผิวบางชนิดที่ไม่สามารถติดตั้งแผ่นครีบบัศจรรย์ให้ความร้อนได้อีกด้วย

ดังนั้นเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงการศึกษาวิเคราะห์สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วงเชิงความเร็วและการถ่ายเทความร้อน ศึกษาในกรณีของการไหลแบบเต็มความยาวช่องทางไหลเปรียบเทียบกับการศึกษาวิเคราะห์แบบเป็นโมดูลของการจัดวางครีบบัศจรรย์บนพื้นผิวหุ้มฉนวน และถัดมาได้ศึกษาถึงลักษณะการจัดวางครีบบัศจรรย์ ความสูง มุมปะทะ และระยะห่างระหว่างครีบบัศจรรย์ ที่มีผลต่อการไหลและการถ่ายเทความร้อนในช่องทางไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยศึกษาในกรณีของการวิเคราะห์แบบเป็นโมดูล และรวมถึงการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดเพื่อนำไปสู่การใช้งานจริง

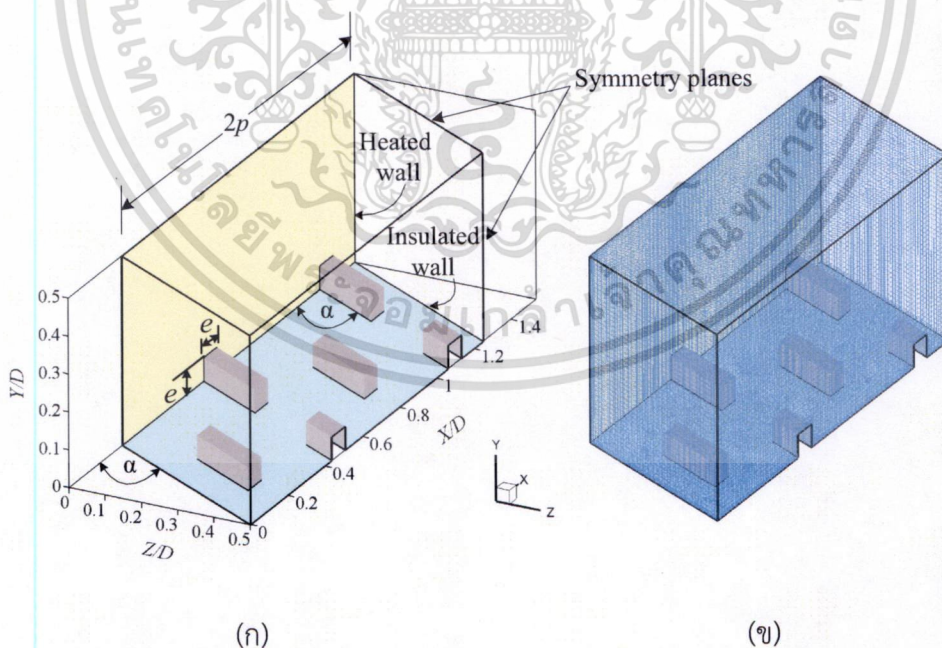
7.1 สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วงของการจัดวางครีบบางบนพื้นผิวหุ้มฉนวน

การศึกษาสภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วงเชิงความเร็วและการถ่ายเทความร้อน โดยพิจารณาการไหลในท่อที่ติดตั้งครีบบัศจรรย์ตัววีโดยมีการจัดวางแบบ ครีบบัศจรรย์แยกตัวซึ่งส่วนการไหล ซึ่งครีบบัศจรรย์ทำมุมปะทะ 60° กับทิศทางการไหลและเรียงตัวซ้ำกันอย่างต่อเนื่องบนพื้นผิวหุ้มฉนวน ที่ผนังด้านบนและด้านล่าง โดยศึกษาทั้งครีบบัศจรรย์และครีบบางโดยมีรายละเอียดดังนี้

7.1.1 ครีบบัศจรรย์

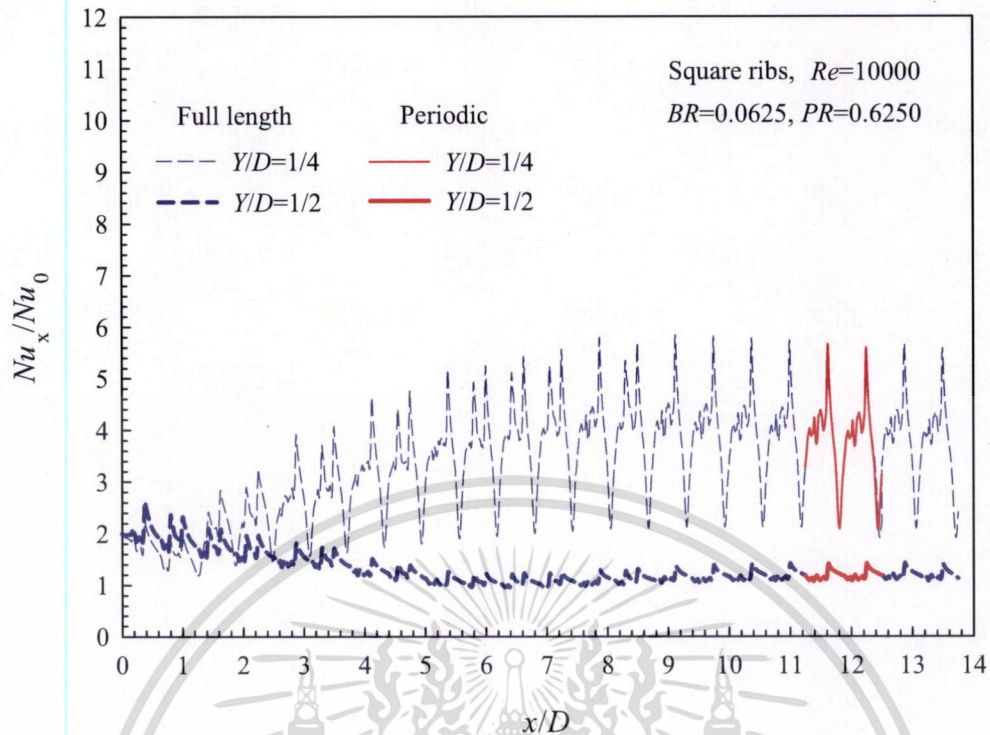


รูปที่ 7.1 ครีบบัศจรรย์แบบครีบทวีแยกตัวซึ่งส่วนการไหลบนพื้นผิวหุ้มฉนวนที่ผนังด้านบนและด้านล่าง ในช่องทางไหลจัตุรัสสำหรับการคำนวณการไหลแบบเต็มความยาวท่อ



รูปที่ 7.2 (ก) ครีบบัศจรรย์แบบ ครีบทวีแยกตัวซึ่งส่วนการไหล บนพื้นผิวหุ้มฉนวนในช่องทางไหลจัตุรัส สำหรับการคำนวณการไหลแบบเป็นโมดูล (ข) กริดเซลล์ที่ใช้ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ .

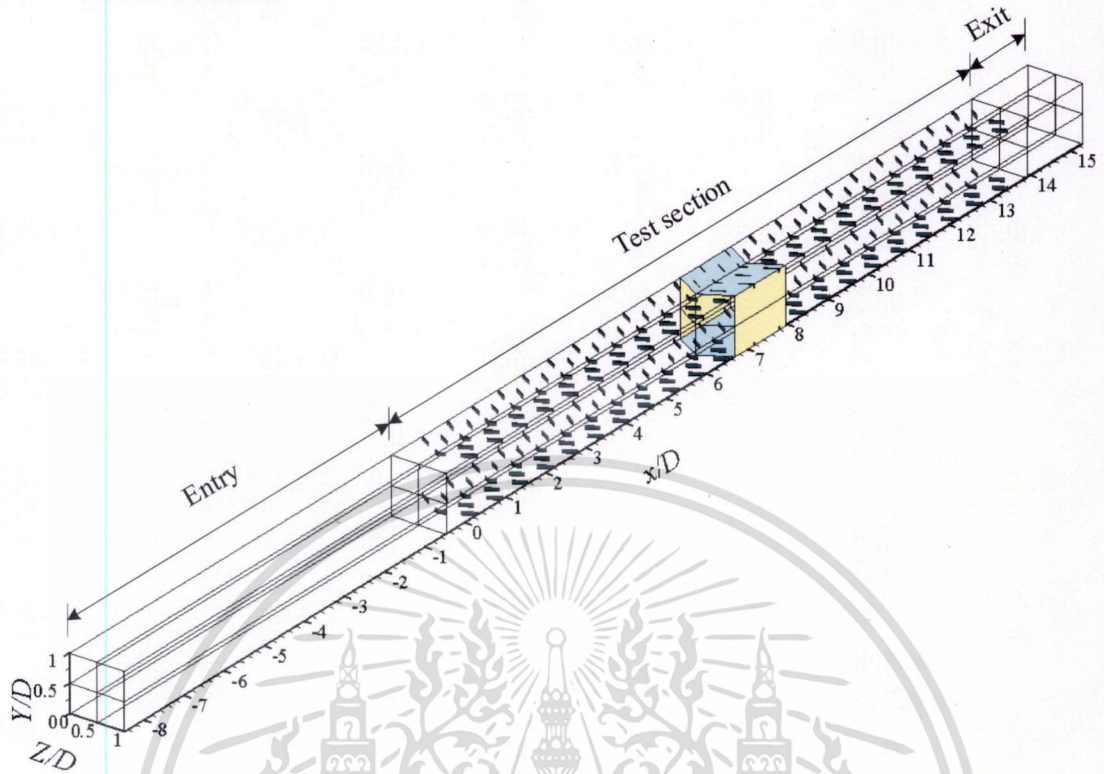


รูปที่ 7.3 การกระจาย Nu_x/Nu_0 ที่ $Y/D=1/2$ และ $1/4$ สำหรับการไหลแบบเต็มความยาวช่องทางไหลและแบบเป็นโมดูลของครีบจัตุรัสที่ค่า $BR=0.0625$, $PR=0.625$ และ $Re=10,000$

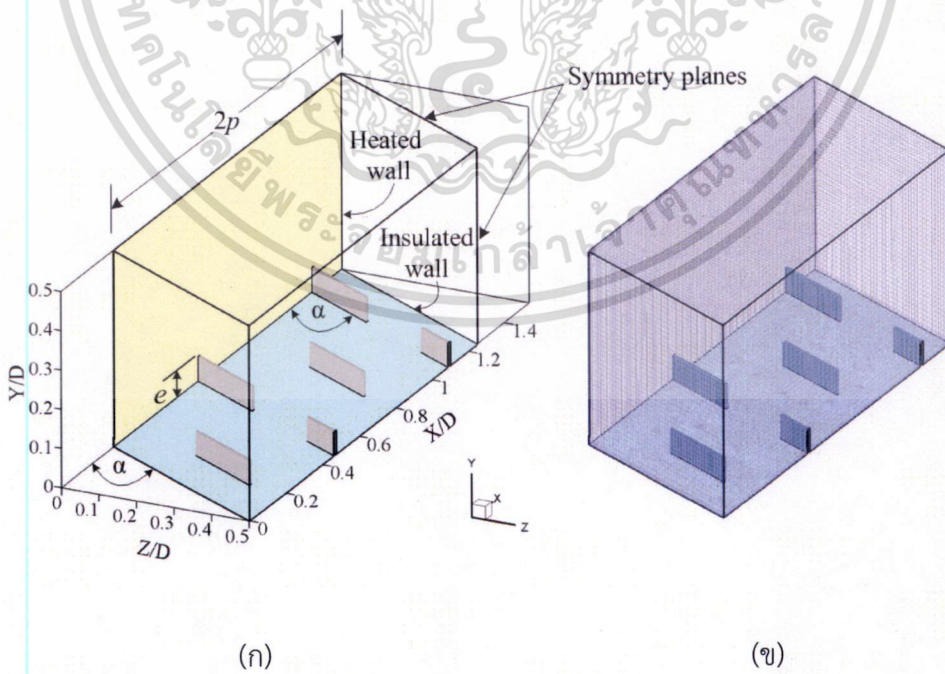
ช่องทางไหลสำหรับการจัดการจัดวางครีบจัตุรัสแบบ ครีบตัววิแยกตัวซึ่งสวนการไหล บนพื้นผิวหุ้มฉนวนที่ผนังด้านบนและด้านล่างในช่องทางไหลจัตุรัส ได้แสดงไว้ในรูปที่ 7.1 และในรูปที่ 7.2 นั้นได้แสดงโดเมนที่ใช้ในการคำนวณแบบเป็นโมดูลและกริดเซลล์ที่ใช้ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

รูปที่ 7.3 แสดงการกระจายค่า Nu_x/Nu_0 ไปตามทิศทางการไหลที่ $Y/D=1/4$ และ $1/2$ ของครีบจัตุรัสแบบ ครีบตัววิแยกตัวซึ่งสวนการไหล ที่ค่า $BR=0.0625$, $PR=0.625$ และ $Re=10000$ จากรูปพบว่าที่ $Y/D=1/4$ รูปร่างของค่า Nu_x/Nu_0 เริ่มปรากฏซ้ำเป็นช่วงที่โมดูลที่ 2 หลังจากนั้นจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นและลดลงเล็กน้อยจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และซ้ำเป็นช่วงเชิงความร้อน ที่โมดูลที่ 19 หรือที่ตำแหน่ง x/D ประมาณ 11.5 และแสดงให้เห็นว่าการเข้าสู่สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และซ้ำเป็นช่วงเชิงความร้อน เป็นตำแหน่งเดียวกันกับของกรณีการจัดการจัดวางครีบจัตุรัสแบบ ครีบตัววิแยกตัวซึ่งสวนการไหลบนพื้นผิวให้ความร้อน และแม้ว่าการวัดค่า Nu_x/Nu_0 ที่ $Y/D=1/4$ และ $1/2$ จะมีการเข้าสู่สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และซ้ำเป็นช่วงเชิงความร้อนที่ตำแหน่งเดียวกันก็ตาม แต่ที่ $Y/D=1/2$ ซึ่งเป็นตำแหน่งบริเวณแนวกลางท่อ มีค่า Nu_x/Nu_0 ต่ำกว่ามากและเริ่มปรากฏซ้ำเป็นช่วงที่โมดูลที่ 2 โดยมีค่าเฉลี่ยของ Nu_x/Nu_0 เท่ากับ 2 หลังจากนั้นจะค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และซ้ำเป็นช่วงเชิงความร้อน

7.1.2 ครีบบาง



รูปที่ 7.4 ครีบบางแบบครีบทวีแยกตัวซึ่งสวนการไหล บนพื้นผิวหุ้มฉนวนที่ผนังด้านบนและด้านล่าง ในช่องทางไหลจัดรูสำหรับการคำนวณการไหลแบบเต็มความยาวท่อ



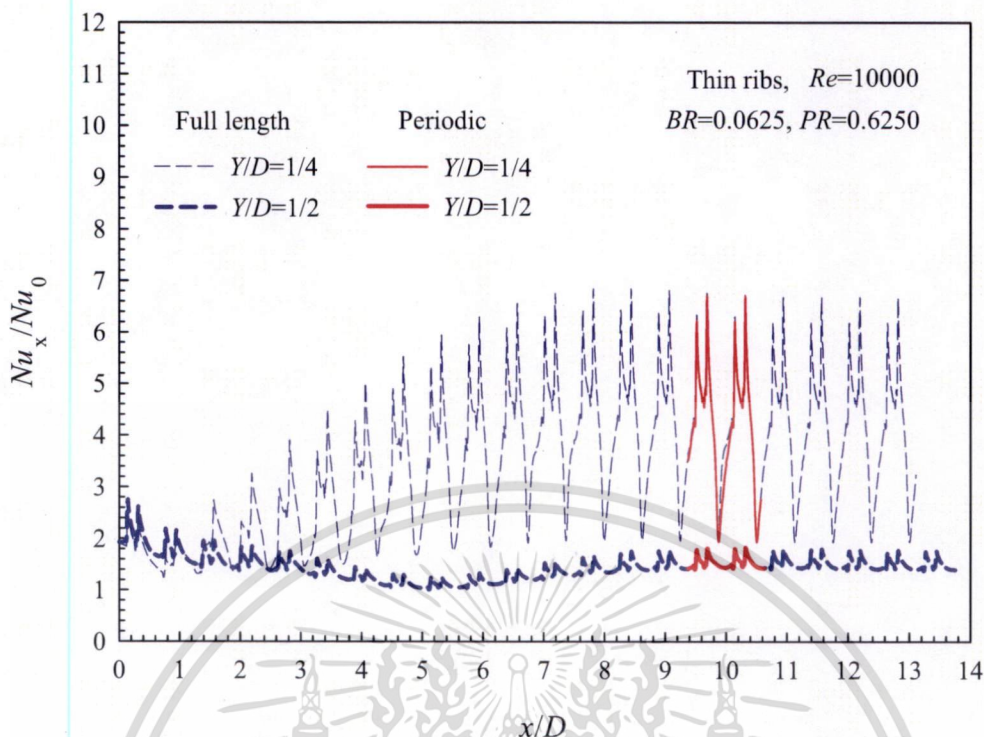
(ก)

(ข)

รูปที่ 7.5 (ก) ครีบบางแบบครีบทวีแยกตัวซึ่งสวนการไหล บนพื้นผิวหุ้มฉนวนในช่องทางไหลจัดรู

สำหรับการคำนวณการไหลแบบเป็นโมดูล (ข) กริดเซลล์ที่ใช้ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

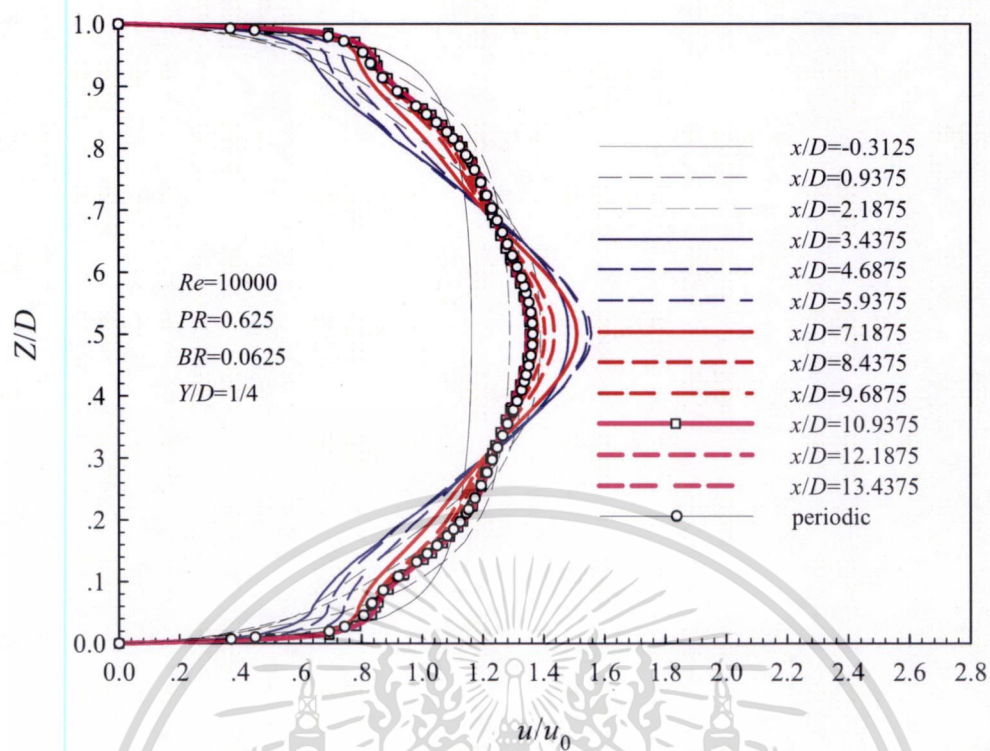
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



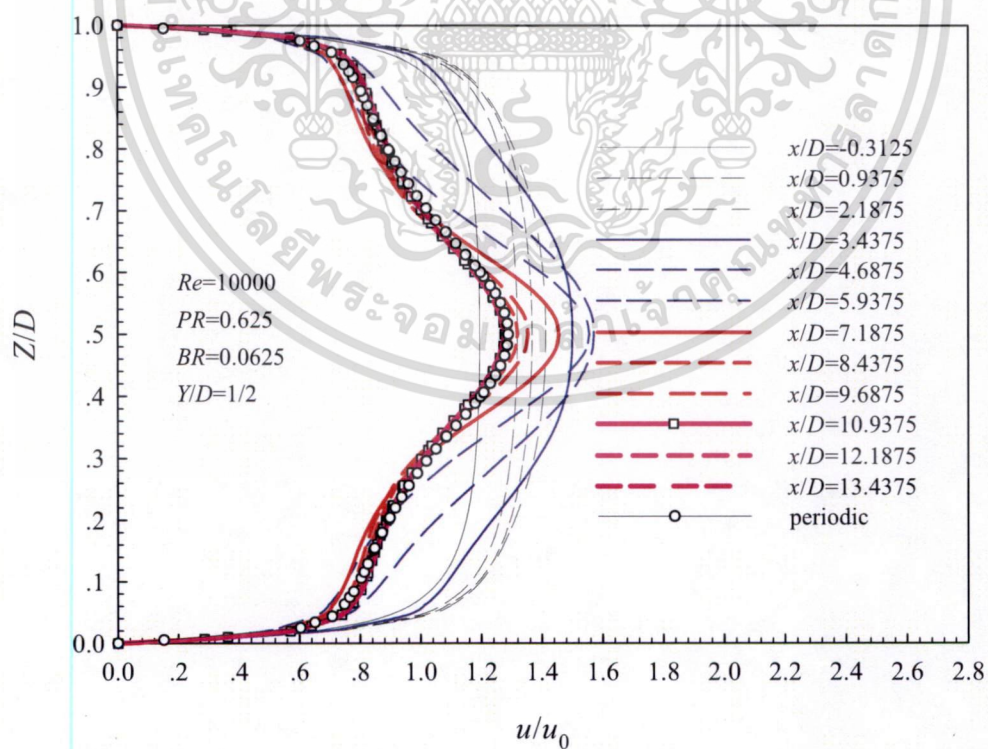
รูปที่ 7.6 การกระจาย Nu_x/Nu_0 ที่ $Y/D=1/2$ และ $1/4$ สำหรับการไหลแบบเต็มความยาวช่องทางไหลและแบบเป็นโมดูลของครีบบางที่ค่า $BR=0.0625$, $PR=0.625$ และ $Re=10,000$

ช่องทางไหลสำหรับกรณีการจัดวางครีบบางรูปตัววีแบบแยกตัวบนพื้นผิวหุ้มฉนวน ได้แสดงไว้ในรูปที่ 7.4 ซึ่งเป็นรูปที่แสดงครีบบางรูปตัววีแบบแยกตัว วางบนพื้นผิวหุ้มฉนวนที่ผนังด้านบนและด้านล่างในช่องทางไหลจัดรีส และรูปที่ 7.5 แสดงโดเมนที่ใช้ในการคำนวณแบบเป็นโมดูลและกริดเซลล์ที่ใช้ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

ในรูปที่ 7.6 แสดงการกระจายค่า Nu_x/Nu_0 ไปตามทิศทางการไหลที่ $Y/D=1/4$ และ $1/2$ ของครีบบางแบบแยกตัวที่ค่า $BR=0.0625$ และ $PR=0.625$ จากรูปสังเกตเห็นว่าที่ $Y/D=1/4$ รูปร่างของค่า Nu_x/Nu_0 เริ่มปรากฏซ้ำเป็นช่วงที่โมดูลที่ 2 หลังจากนั้นจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นและลดลงเล็กน้อยจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และซ้ำเป็นช่วงเชิงความร้อน ที่โมดูลที่ 17 หรือที่ตำแหน่ง x/D ประมาณ 10 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าครีบบางเข้าสู่สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และซ้ำเป็นช่วงเชิงความร้อนก่อนครีบจัดรีสเล็กน้อย และที่ $Y/D=1/4$ และ $1/2$ จะมีการเข้าสู่สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และซ้ำเป็นช่วงเชิงความร้อนที่ตำแหน่งเดียวกันและที่ $Y/D=1/2$ มีค่า Nu_x/Nu_0 ต่ำกว่ามากและเริ่มปรากฏซ้ำเป็นช่วงที่โมดูลที่ 2 โดยมีค่าเฉลี่ยของ Nu_x/Nu_0 เท่ากับ 2 หลังจากนั้นจะค่อยๆ ลดลงแล้วเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และซ้ำเป็นช่วงเชิงความร้อนและโดยภาพรวมสังเกตเห็นว่าครีบบางมีค่า Nu_x/Nu_0 สูงกว่าครีบจัดรีสที่มีเงื่อนไขเดียวกัน



รูปที่ 7.7 การกระจาย u/u_0 สำหรับการไหลแบบเต็มความยาวท่อและแบบเป็นโมดูลที่ตำแหน่ง $Y/D=1/4$ ของครีบบางที่มีค่า $BR=0.0625$ และ $PR=0.625$ ที่ $Re=10,000$



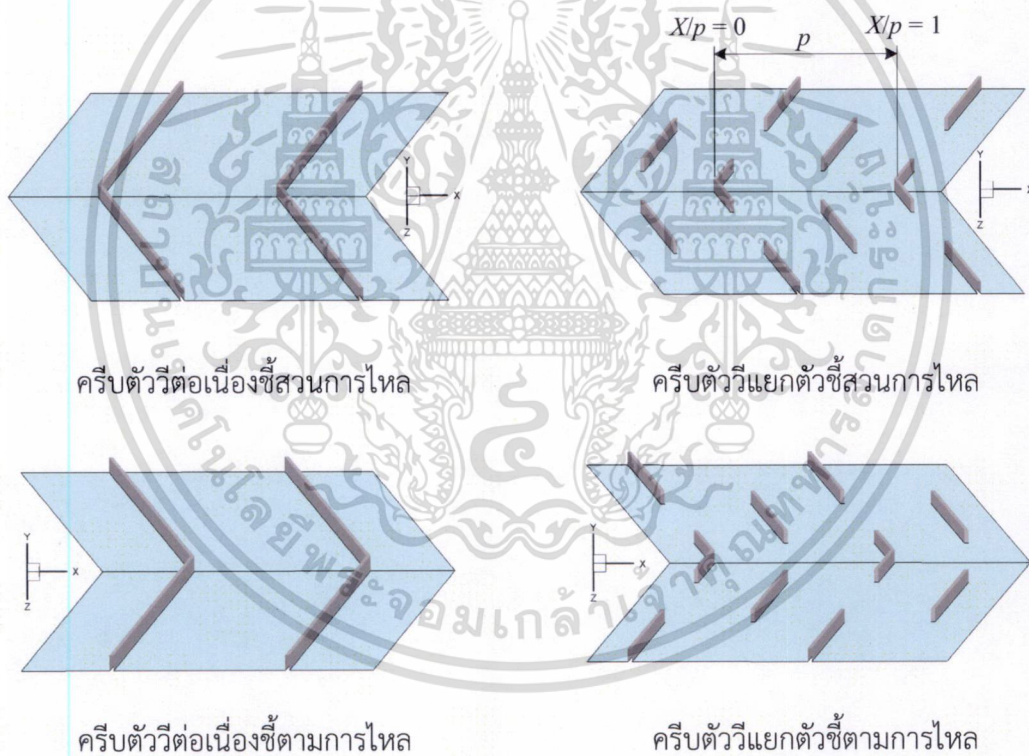
รูปที่ 7.8 การกระจาย u/u_0 สำหรับการไหลแบบเต็มความยาวท่อและแบบเป็นโมดูลที่ตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ $Y/D=1/2$ ของครีบบางที่มีค่า $BR=0.0625$ และ $PR=0.625$ ที่ $Re=10,000$ ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับครีบบางนั้น นอกจากการแสดงสภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วงเชิงความร้อนแล้ว ยังได้แสดงการกระจายค่าของ u/u_0 ในแต่ละโมดูลที่วัดค่าไปตามแนวทิศทางการไหลอีกด้วย ซึ่งเป็นการแสดงค่า u/u_0 ของกรณีการคำนวณการไหลแบบเต็มความยาวท่อดังแสดงในรูปที่ 7.7 และ 7.8 ซึ่งวัดค่าที่ตำแหน่ง $Z/D=1/4$ และ $1/2$ โดยสามารถเห็นได้ชัดเจนถึงการพัฒนารูปร่างของความเร็วจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วงเชิงความร้อน และพบว่าการเข้าสู่สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วงเชิงความร้อน ของทั้งสองตำแหน่งเกิดขึ้นที่ x/D ประมาณ 10.9 ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกัน

กรณีการจัดวางครีบบางบนพื้นผิวหุ้มฉนวน เมื่อเปรียบเทียบการเข้าสู่สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วงเชิงความร้อนและการถ่ายเทความร้อนแล้ว สังเกตพบว่าครีบบางเข้าสู่สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วงเชิงความร้อนก่อนการเข้าสู่สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วงเชิงความร้อนเล็กน้อย

7.2 อิทธิพลของการจัดวางครีบบางรูปตัววี

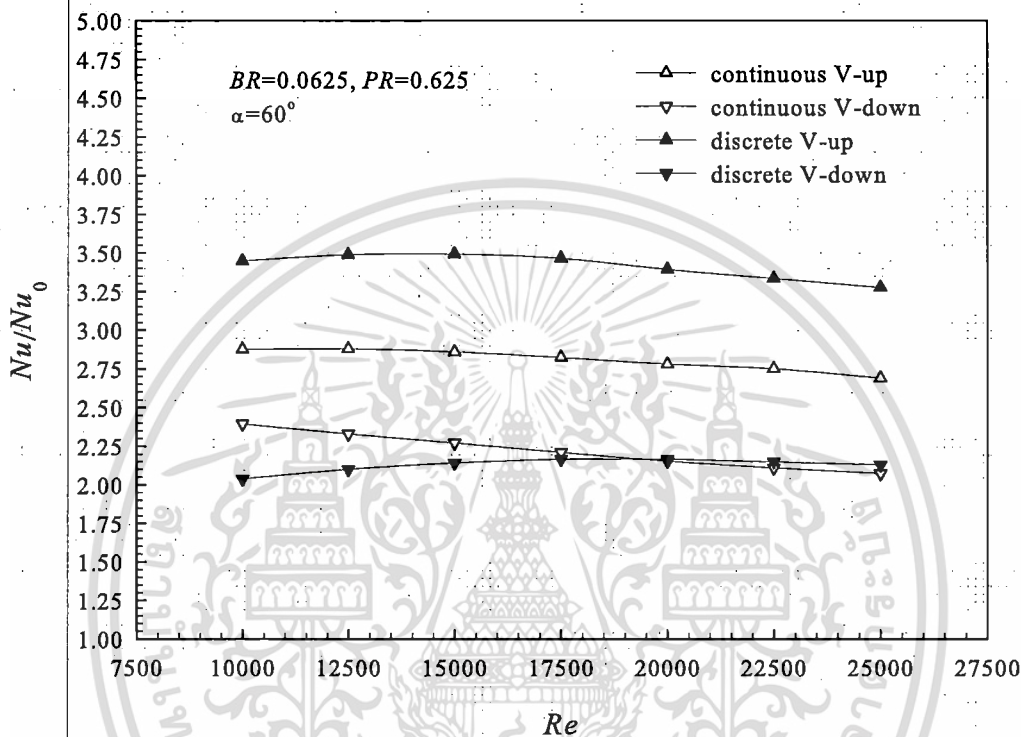


รูปที่ 7.9 การจัดวางครีบบางแบบสมมาตรบนพื้นผิวหุ้มฉนวนที่แตกต่างกัน 4 รูปแบบ

จากการศึกษาในหัวข้อที่ผ่านมาพบว่า การจัดวางครีบบางบนพื้นผิวหุ้มฉนวนนั้นให้ค่า Nu สูงกว่าครีบบางที่มีเส้นเอียงของการไหลเดียวกัน โดยใช้ลักษณะการจัดวางครีบบาง ครีบบางตัววีแยกตัว ซึ่งในส่วนนี้ก่อให้เกิดคำถามว่า สำหรับการใส่ครีบบางร่วมกับการจัดวางครีบบาง ลักษณะดังกล่าวนั้นจะเป็นการจัดเรียงครีบบางบนพื้นผิวหุ้มฉนวนที่เหมาะสมที่สุดหรือไม่ ดังนั้นในหัวข้อถัดไปจะศึกษาถึงลักษณะการจัดวางครีบบางที่เหมาะสมสำหรับครีบบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

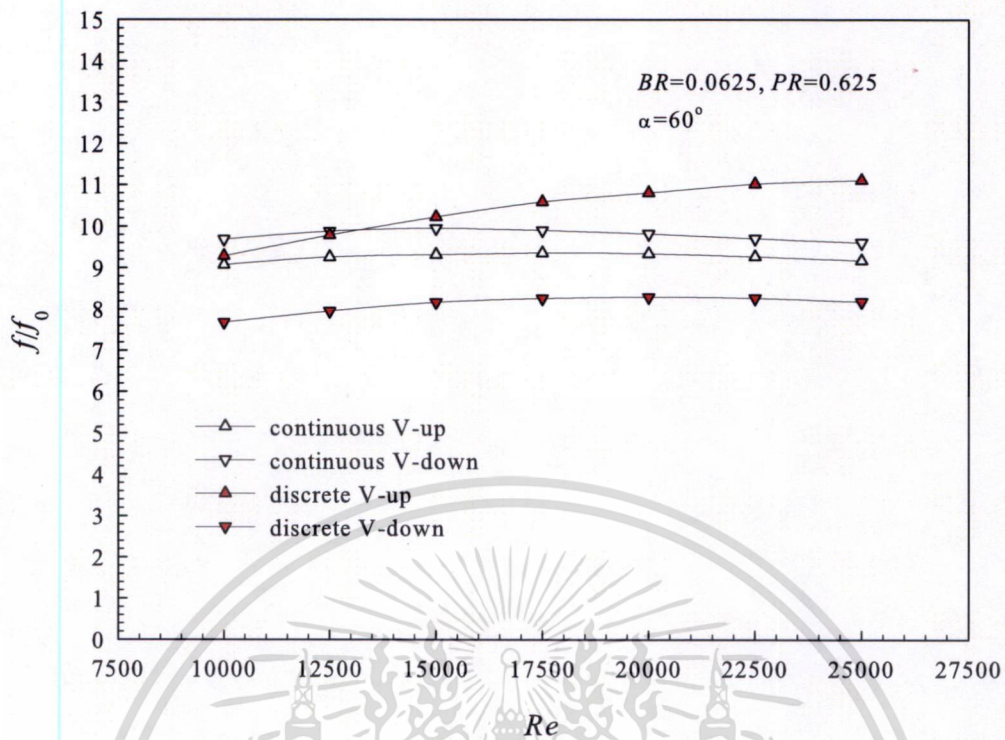
รูปที่ 7.9 แสดงรูปร่างของการจัดวางครีบริบตัววีแบบสมมาตร ที่มีรูปแบบแตกต่างกัน 4 แบบ บนพื้นผิวหุ้มฉนวน เพื่อนำไปใช้วิเคราะห์การเพิ่มค่าสมรรถนะของการถ่ายเทความร้อน ซึ่งประกอบไปด้วยการจัดวางครีบริบแบบ ครีบริบตัววีต่อเนื่องซี่สวนการไหล, ครีบริบตัววีต่อเนื่องซี่ตามการไหล, ครีบริบตัววีแยกตัวซี่สวนการไหล และครีบริบตัววีแยกตัวซี่ตามการไหล โดยกำหนดให้ค่ามุมปะทะ ($\alpha=60^\circ$) ระยะห่างระหว่างครีบริบ($PR=0.625$) และความสูงครีบริบ($BR=0.0625$) มีค่าคงที่



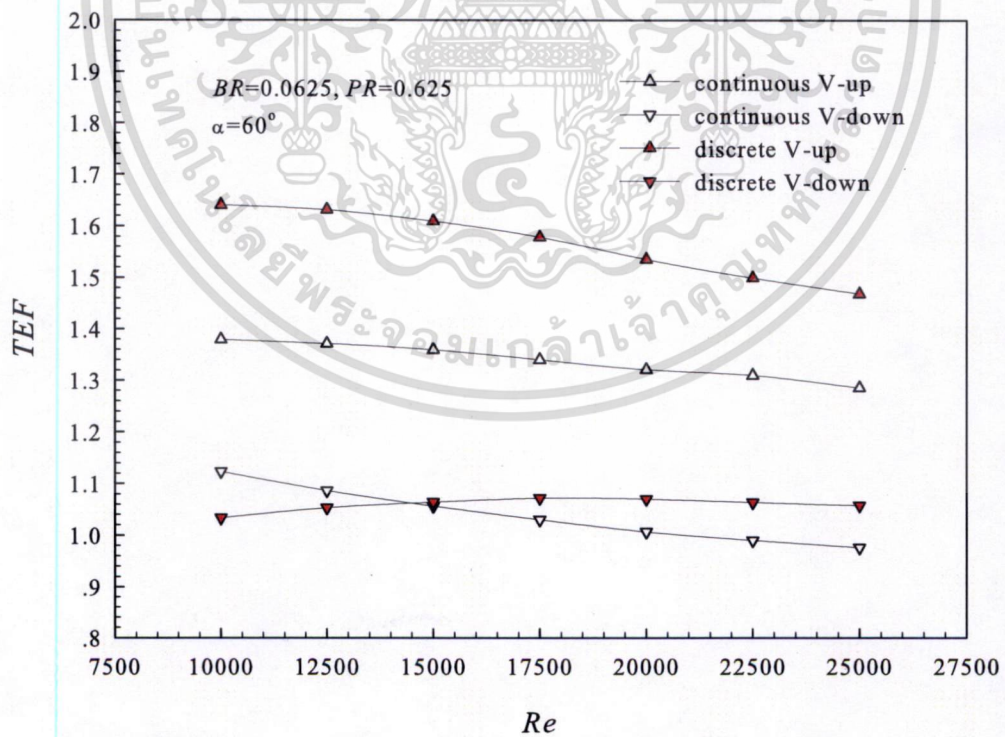
รูปที่ 7.10 อัตราส่วนของค่า Nu/Nu_0 กับค่า Re สำหรับการจัดวางครีบริบทั้ง 4 แบบ

อิทธิพลของการจัดวางครีบริบบางรูปตัววีทั้ง 4 แบบ ที่ส่งผลต่อค่าการถ่ายเทความร้อน พิจารณาได้จากรูปที่ 7.10 ซึ่งเป็นกราฟของความสัมพันธระหว่างค่า Nu/Nu_0 กับค่า Re พบว่าการจัดวางครีบริบทั้ง 4 แบบมีค่า Nu/Nu_0 มีแนวโน้มลดลงเมื่อ Re สูงขึ้น สำหรับการจัดวางครีบริบแบบ ครีบริบตัววีแยกตัวซี่สวนการไหล ให้ค่า Nu/Nu_0 สูงที่สุดตลอดช่วงค่า Re ที่พิจารณา โดยมีค่า Nu/Nu_0 อยู่ในช่วง 3.30-3.45 โดยเมื่อเฉลี่ยตลอดช่วง Re ที่พิจารณามีค่าประมาณ 3.4 และในขณะที่การจัดวางครีบริบแบบ ครีบริบตัววีต่อเนื่องซี่ตามการไหลและครีบริบตัววีแยกตัวซี่ตามการไหล ให้ค่าต่ำที่สุดและใกล้เคียงกันและมีค่าเฉลี่ยตลอดช่วง Re ที่พิจารณาประมาณ 2.2

อิทธิพลของรูปแบบการจัดวางครีบริบบางรูปตัววีแบบแยกตัว บนพื้นผิวให้ความร้อนที่ส่งผลต่อค่า f/f_0 พิจารณาได้จากรูปที่ 7.11 ซึ่งเป็นกราฟของความสัมพันธระหว่างค่า f/f_0 กับค่า Re พบว่าการจัดวางครีบริบแบบครีบริบตัววีแยกตัวซี่สวนการไหล ให้ค่า f/f_0 มีแนวโน้มสูงกว่าการจัดวางครีบริบรูปทรงอื่น โดยมีค่า f/f_0 อยู่ในช่วง 9.29-11.11 ในขณะที่การจัดวางครีบริบแบบครีบริบตัววีต่อเนื่องซี่ตามการไหล ให้ค่า f/f_0 ต่ำที่สุดซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 7.68-8.18 ตลอดช่วง Re ที่พิจารณา



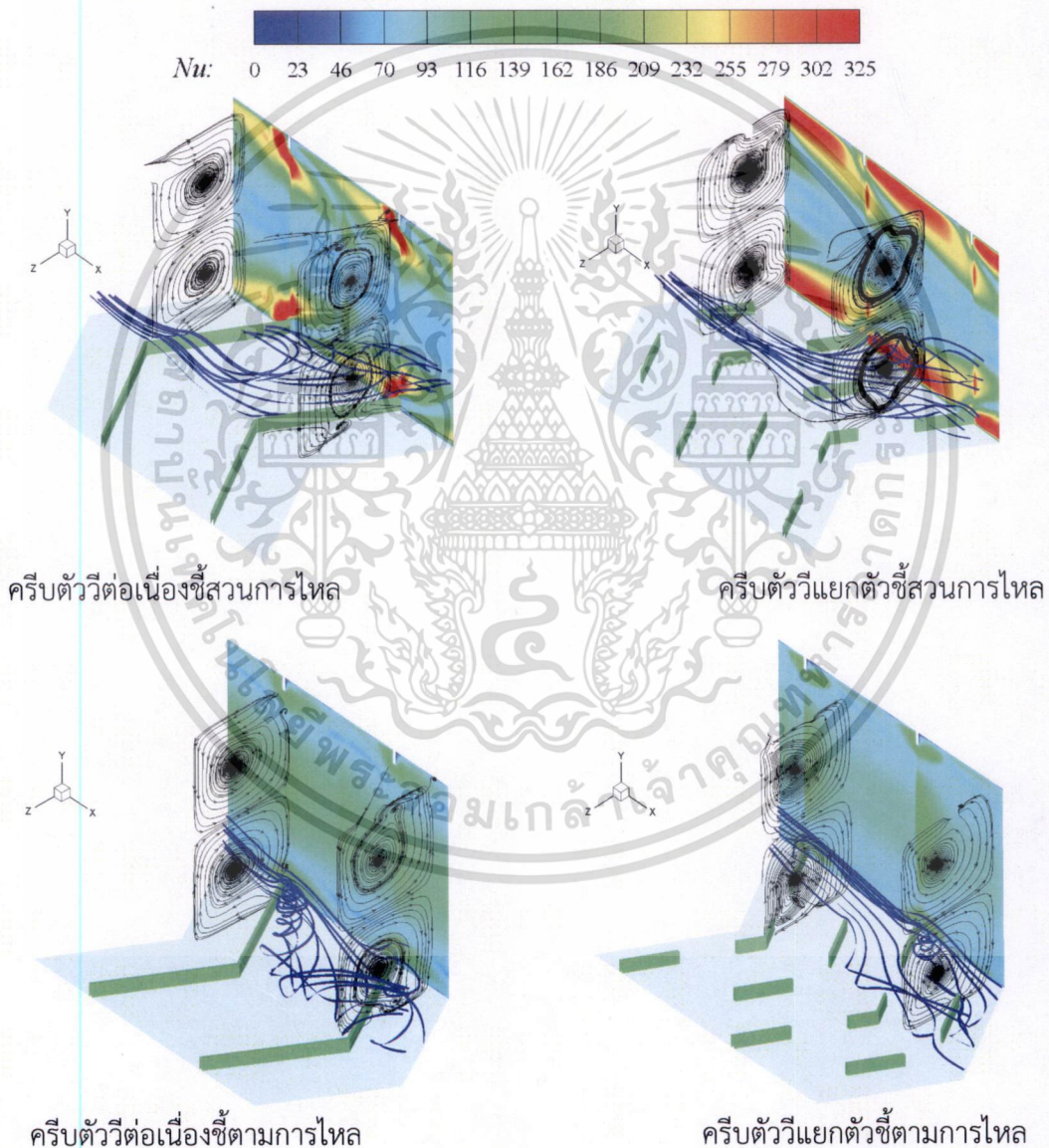
รูปที่ 7.11 อัตราส่วนของค่า f/f_0 กับค่า Re สำหรับการจัดวางครีบทั้ง 4 แบบ



รูปที่ 7.12 ค่า TEF และ Re สำหรับการจัดวางครีบทั้ง 4 แบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิทธิพลของการจัดวางครีบริบตัววีที่มีผลต่อค่า TEF พิจารณาได้จากรูปที่ 7.12 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า TEF กับค่า Re ในภาพรวมพบว่าการจัดวางครีบริบทั้ง 4 รูปแบบ สังกัดพบว่าค่า TEF มีแนวโน้มลดลงเมื่อ Re เพิ่มสูงขึ้น และการจัดวางครีบริบบนครีบริบตัววีแยกตัวชี้สวนการไหล ให้ค่า TEF สูงที่สุดตลอดช่วง Re ที่พิจารณา ซึ่งมีค่า TEF สูงที่สุดคือ 1.64 ที่ $Re=10,000$ และมิต่ำน้อยที่สุดคือ 1.47 ที่ $Re=25,000$ ในขณะที่การจัดวางครีบริบบนครีบริบตัววีแยกตัวชี้ตามการไหล และ ครีบริบตัววีต่อเนื่องชี้ตามการไหล ให้ค่า TEF น้อยที่สุด เมื่อพิจารณาค่า TEF สามารถสรุปได้ว่าการจัดวางครีบริบบนครีบริบตัววีแยกตัวชี้สวนการไหล มีความเหมาะสมต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด ภายใต้เงื่อนไขที่พิจารณา



รูปที่ 7.13 การกระจายค่าเลขนัสเซลล์เฉพาะที่และเส้นทางเดินอนุภาคในบริเวณระหว่างครีบริบของการจัดวางครีบริบทั้ง 4 รูปแบบ ที่ $Re=15,000$

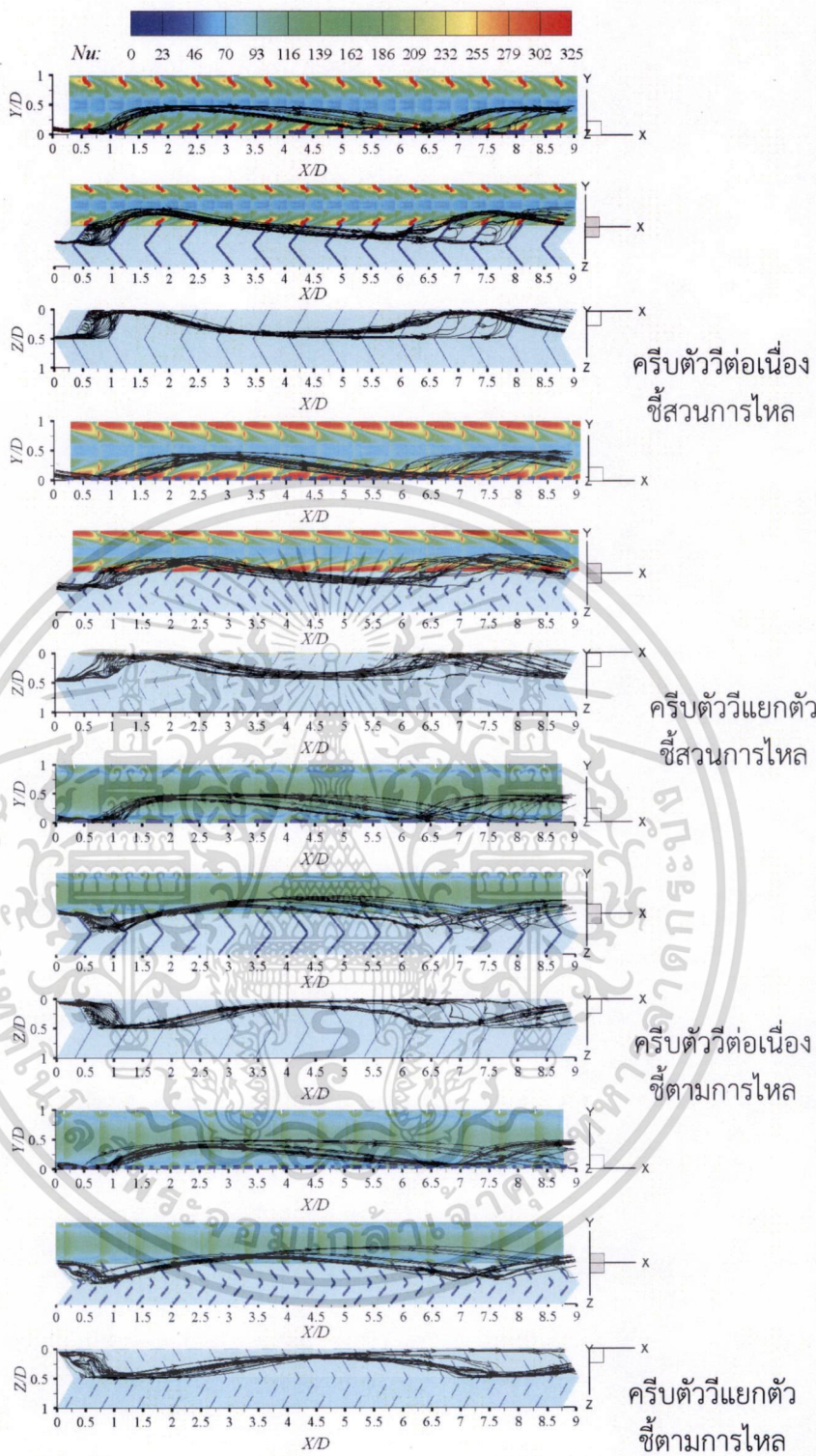
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากการจัดวางครีบบนพื้นผิวให้มีความร้อนสูงกว่ากรณีการจัดวางครีบบนพื้นผิวแบบอื่น ๆ ทั้งในกรณีการจัดวางครีบบนพื้นผิวให้ความร้อนและบนพื้นผิวหุ้มฉนวน เมื่อเปรียบเทียบภายใต้สภาวะเงื่อนไขการไหลเดียวกัน ซึ่งเมื่อพิจารณาที่ค่า Re ในช่วง 10,000 ถึง 25,000 พบว่าค่า Nu/Nu_0 ของการจัดวางครีบบนพื้นผิวให้ความร้อนอยู่ในช่วงตั้งแต่ 3.81 ถึง 3.08 โดยมีค่าลดลงเมื่อ Re เพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่การจัดวางครีบบนพื้นผิวหุ้มฉนวนมีค่าตั้งแต่ 3.45 ถึง 3.30 ตามลำดับ ถึงแม้ว่าที่ Re ต่ำนั้นการจัดวางครีบบนพื้นผิวหุ้มฉนวนจะมีค่า Nu/Nu_0 น้อยกว่าการจัดวางบนพื้นผิวให้ความร้อนก็ตาม แต่เมื่อ Re เพิ่มสูงขึ้นค่า Nu/Nu_0 กลับมีค่าลดลงเล็กน้อยในขณะที่ค่า Nu/Nu_0 ของกรณีการจัดวางครีบบนพื้นผิวให้ความร้อนลดลงอย่างรวดเร็ว จนส่งผลให้ค่า Nu/Nu_0 ที่ $Re=25,000$ ของกรณีการจัดวางครีบบนพื้นผิวหุ้มฉนวนสูงกว่าการจัดวางบนพื้นผิวให้ความร้อน และสำหรับค่า TEF นั้นพบว่า ค่า TEF ของการจัดวางครีบบนพื้นผิวให้ความร้อนอยู่ในช่วงตั้งแต่ 1.81 ถึง 1.38 โดยมีค่าลดลงเมื่อ Re เพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่การจัดวางครีบบนพื้นผิวหุ้มฉนวนมีค่าตั้งแต่ 1.64 ถึง 1.47 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงค่า TEF มีพฤติกรรมคล้ายคลึงกับการเปลี่ยนแปลงค่า Nu/Nu_0

ถึงแม้ว่าที่ Re ต่ำ การจัดวางครีบบนพื้นผิวหุ้มฉนวนจะให้ค่า Nu/Nu_0 และ TEF ไม่ดีเท่ากับการจัดวางครีบบนพื้นผิวให้ความร้อน แต่จากลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่า Nu/Nu_0 และค่า TEF ที่ค่อนข้างสม่ำเสมอและมีแนวโน้มลดลงช้ากว่าการจัดวางครีบบนพื้นผิวให้ความร้อน ดังนั้นการจัดวางครีบบนพื้นผิวหุ้มฉนวนจึงมีความเหมาะสมมากกว่าการจัดวางครีบบนพื้นผิวให้ความร้อนในช่วง Re สูงและให้ลักษณะที่ดีในช่วง Re ที่กว้างกว่า

พิจารณารูปที่ 7.13 พบว่าการจัดวางครีบบนพื้นผิวหุ้มฉนวน มีบริเวณที่ให้ค่าเลขนัสเซลล์เฉพาะที่สูงกว่าการจัดวางครีบบนพื้นผิวให้ความร้อน โดยเฉพาะบริเวณระหว่างครีบบนพื้นผิวให้ความร้อน แต่ในบริเวณแนวกลางของพื้นผิวให้ความร้อนมีค่าเลขนัสเซลล์เฉพาะที่ต่ำกว่าบริเวณอื่น นอกจากนี้ยังสามารถสังเกตเห็นได้ถึงลักษณะการไหลที่แตกต่างกันของการจัดวางครีบบนพื้นผิวหุ้มฉนวน และครีบบนพื้นผิวให้ความร้อน นั่นคือสำหรับการไหลผ่านครีบบนพื้นผิวหุ้มฉนวนนั้น มีการกระจายการไหลในบริเวณกลางท่อไหลไปปะทะครีบบนพื้นผิวให้ความร้อน แต่การไหลผ่านครีบบนพื้นผิวหุ้มฉนวนนั้น เกิดในทิศทางที่ตรงข้ามกันนั่นคือมีการไหลจากด้านข้างขนานกับพื้นผิวให้ความร้อนแล้วไหลมาตกกระทบบนพื้นผิวหุ้มฉนวน โดยไม่มีแนวการไหลพุ่งเข้าสู่พื้นผิวให้ความร้อน จึงส่งผลให้มีค่าเลขนัสเซลล์เฉพาะที่ต่ำกว่ากรณีการจัดวางครีบบนพื้นผิวให้ความร้อน และนอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกระแสสวนบนระนาบตัดขวางการไหลของครีบบนพื้นผิวหุ้มฉนวนพบว่าครีบบนพื้นผิวหุ้มฉนวนมีความเข้มการหมุนวนสูงกว่าครีบบนพื้นผิวให้ความร้อนใกล้เคียงกับมุมของท่อ

เมื่อพิจารณาเส้นทางเดินอนุภาค การไหลตกกระทบบนพื้นผิว และการกระจายค่าเลขนัสเซลล์เฉพาะที่ ที่เกิดจากการไหลผ่านครีบบนพื้นผิวหุ้มฉนวนที่ $Re=15,000$ ดังแสดงในรูปที่ 7.14 สังเกตพบว่าครีบบนพื้นผิวหุ้มฉนวนมีการกระจายตัวของการไหลตกกระทบบนพื้นผิวให้ความร้อนเป็นบริเวณกว้าง จึงส่งผลให้ทั้งค่า Nu/Nu_0 และ f/f_0 มีแนวโน้มสูงกว่าการไหลผ่านครีบบนพื้นผิวให้ความร้อน



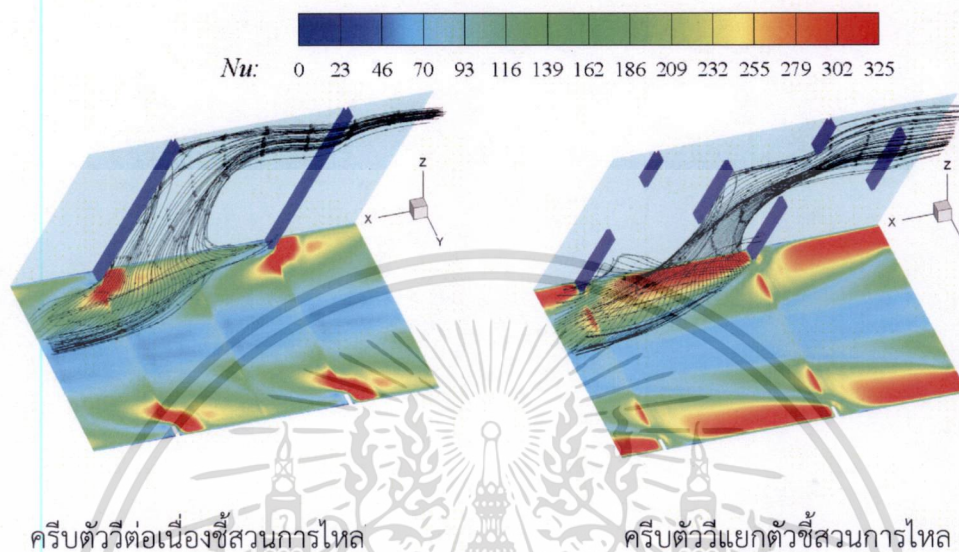
รูปที่ 7.14 เส้นทางเดินอนุภาค การไหลตกกระทบพื้นผิว และการกระจายค่าเลขนัสเซลท์ที่เกิดจากการจัดวางครีบทัง 4 รูปแบบ ที่ $Re=15,000$

จากการสังเกตพบว่าครีบทวีขึ้นสวนการไหล ให้ค่า Nu/Nu_0 และ TEF สูงกว่าครีบทวีขึ้นตามการไหล และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบลักษณะการไหลผ่านครีบทวีขึ้นสวนการไหลทั้ง 2 ชนิดซึ่งแสดงในรูปที่ 7.15 ที่ $Re=15,000$ เห็นได้ชัดว่าครีบทวีขึ้นสวนการไหลนั้น

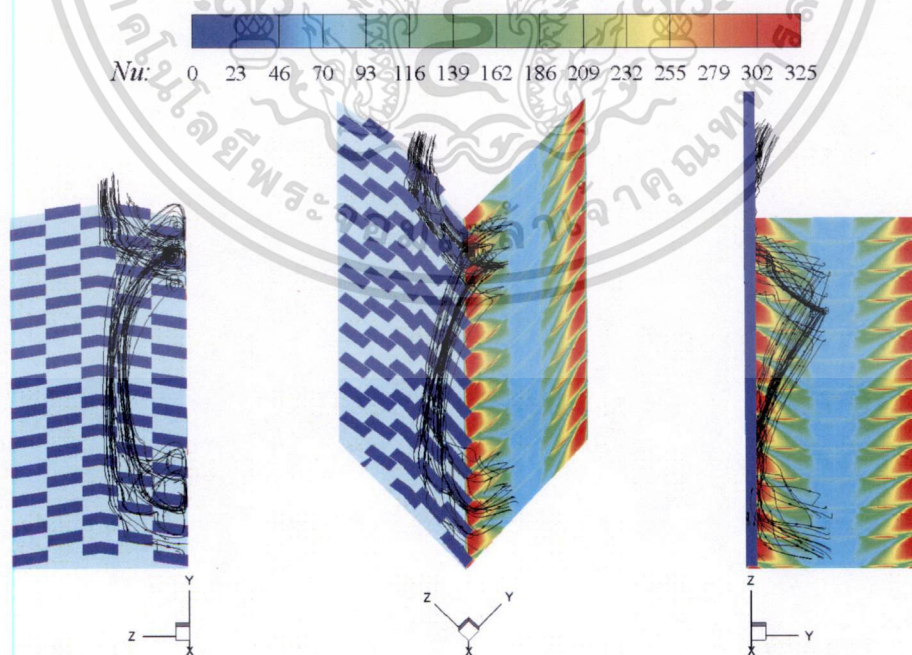
เอกลักษณะเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัวที่ปรากฏให้เห็นในรูปที่ 7.15 นี้ไม่ได้อยู่ที่เห็นเป็นบริเวณขึ้นตามการคำนวณที่ปรากฏในรูปที่ 7.15 นี้ แต่อยู่ที่การไหลวนที่เกิดขึ้นในบริเวณที่ครีบทวีขึ้นสวนการไหลนั้น

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในบริเวณระหว่างครีบบทที่ติดกับพื้นผิวให้ความร้อนมีค่าเลขนัสเซลท์เฉพาะที่สูงและกระจายเป็นบริเวณกว้าง ซึ่งเป็นผลมาจากมีการไหลกระทบครีบบทที่แยกตัวออกมา เกิดการเบี่ยงเบนทิศทางการไหลแล้วพุ่งชนพื้นผิวให้ความร้อน ซึ่งบริเวณที่ให้ค่าเลขนัสเซลท์เฉพาะที่สูงจะสัมพันธ์โดยตรงกับความสูงของครีบบทที่แยกตัวออกมา

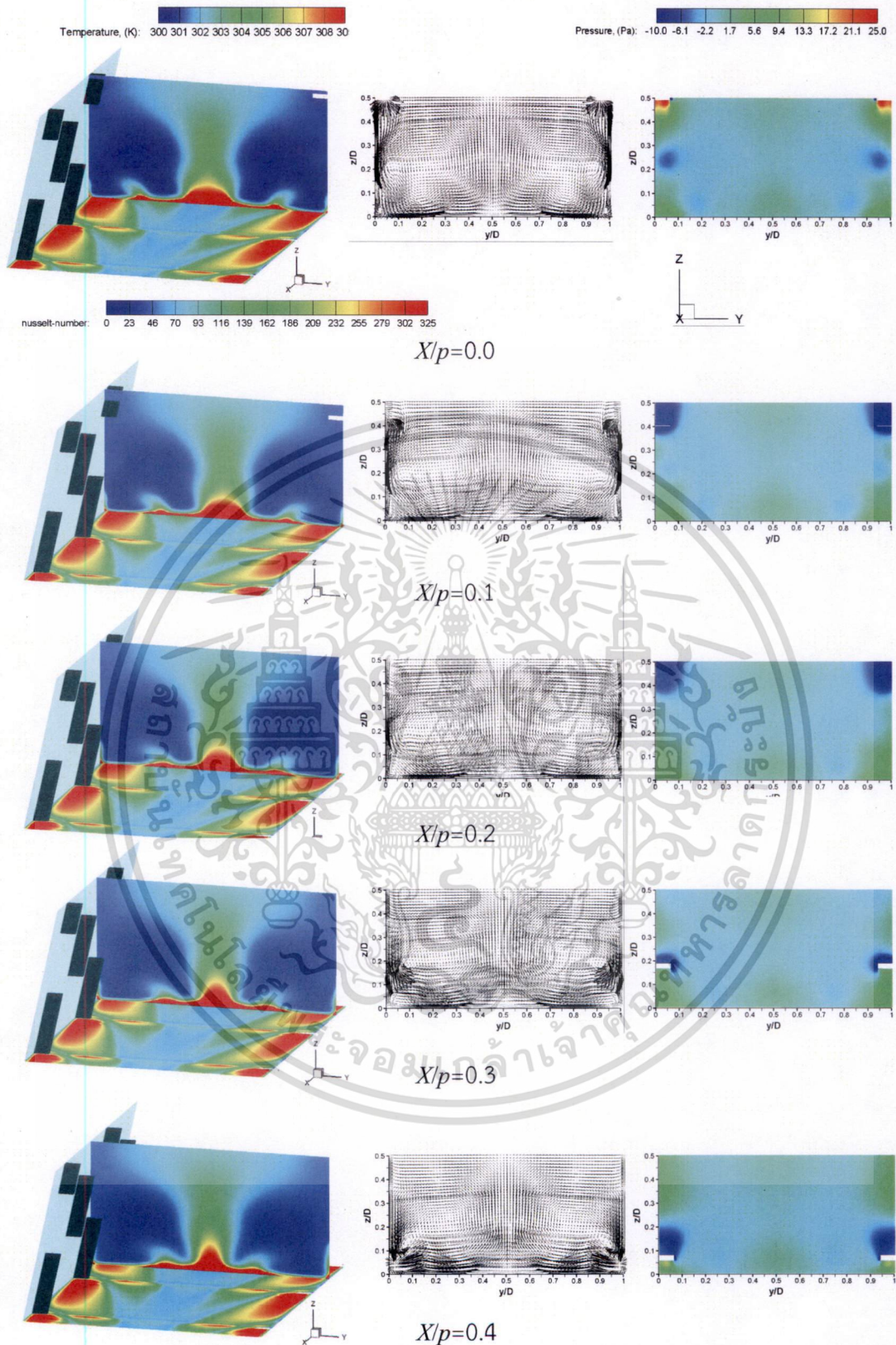


รูปที่ 7.15 เส้นทางการอนุภาค การไหลตกกระทบพื้นผิว และการกระจายค่าเลขนัสเซลท์เฉพาะที่เกิดจากการจัดวางครีบบทแบบครีบบทวีแยกตัวซึ่งสวนการไหล และครีบบทวีต่อเนื่องซึ่งสวนการไหล ที่ $Re=15,000$



รูปที่ 7.16 เส้นทางการอนุภาค การไหลตกกระทบพื้นผิว และการกระจายค่าเลขนัสเซลท์เฉพาะที่เกิดจากการจัดวางครีบบทแบบครีบบทวีแยกตัวซึ่งสวนการไหล ที่ $Re=15,000$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เกิดจากการจัดวางครีบบทแบบครีบบทวีแยกตัวซึ่งสวนการไหล ที่ $Re=15,000$ โดยขอสงวนสิทธิ์ในชื่อของเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



สนามอุณหภูมิ

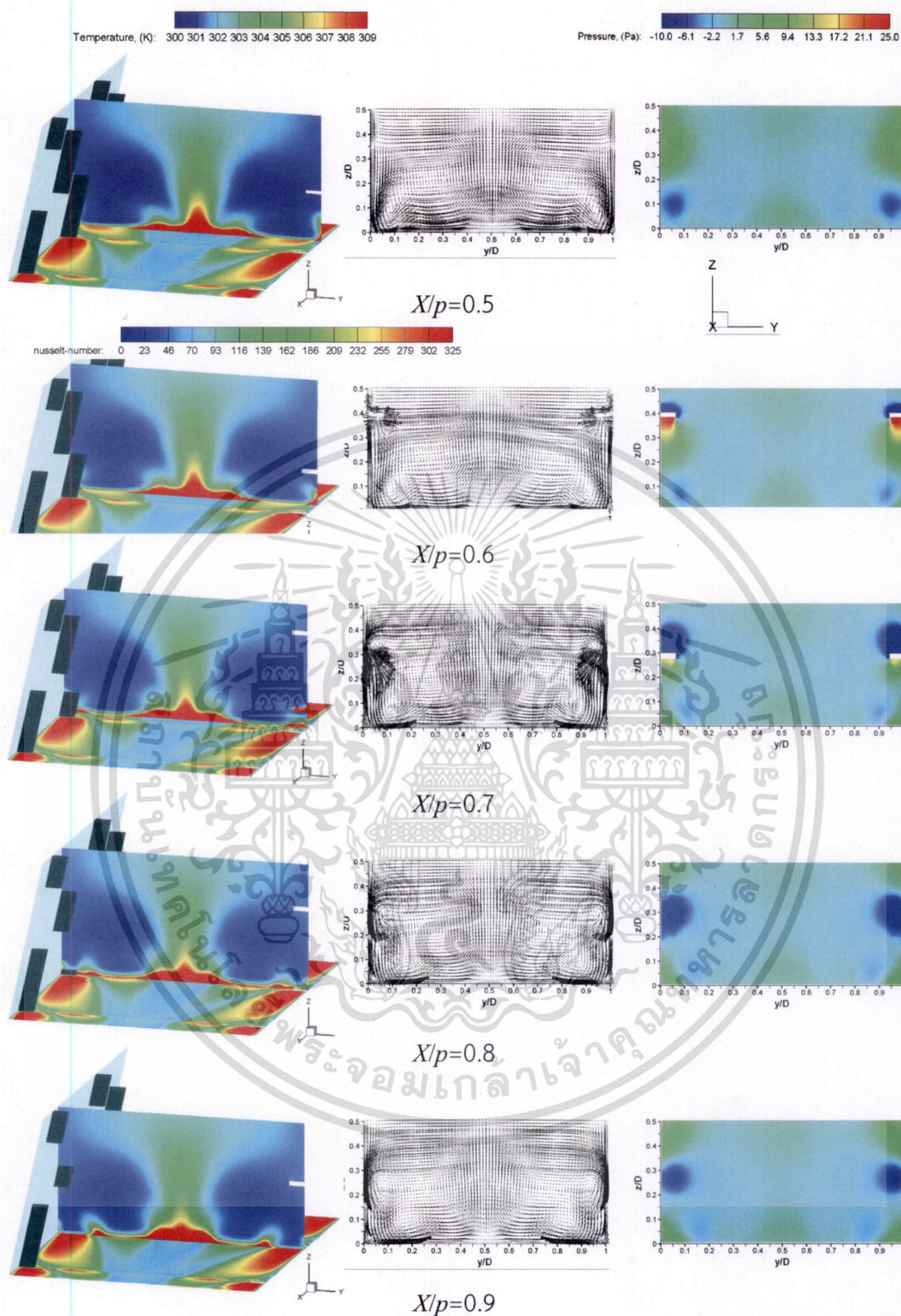
สนามความเร็ว

สนามความดัน

รูปที่ 7.17 สนามความเร็ว อุณหภูมิ และความดัน ในแต่ละหน้าตัดของหนึ่งโมดูลสำหรับการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



สนามอุณหภูมิ

สนามความเร็ว

สนามความดัน

รูปที่ 7.17 สนามความเร็ว อุณหภูมิ และความดัน ในแต่ละหน้าตัดของหนึ่งโมดูลสำหรับการไหลผ่านครีบบางบนพื้นผิวหุ้มฉนวนที่ค่า $BR=0.0625$, $PR=0.625$ และ $Re=15,000$ (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ยังได้แสดงเกลียวของกระแสวนและลักษณะการไหลพุ่งชนพื้นผิวให้ความร้อนในมุมมองต่างๆ ของการจัดวางครีบบางแบบครีบบั้วแยกตัวซี่สวนการไหล ที่ $Re=15,000$ ไว้ในรูปที่ 7.16 ซึ่งเห็นได้ชัดว่าเมื่อมองสวนทางกับทิศทางการไหล กระแสวนที่เกิดจากการไหลปะทะครีบบั้วติดตั้งบนพื้นผิวหุ้มฉนวนเกิดการเบี่ยงเบนทิศทางการไหล แล้วพุ่งเข้าสู่พื้นผิวให้ความร้อนที่ผนังด้านข้างในบริเวณระหว่างครีบบั้วที่ติดกับผนังท่อ ซึ่งลักษณะของการไหลเช่นนี้ส่งผลให้มีการถ่ายเทความร้อนมากขึ้นในบริเวณมุมของช่องทางไหลสี่เหลี่ยมจัตุรัส แต่ที่บริเวณแนวกลางพื้นผิวให้ความร้อน ค่าเลขนัสเซลท์เฉพาะที่จะมีค่าต่ำเนื่องจากกระแสวนที่ไหลตกระทบพื้นผิวให้ความร้อนเดินทางไปไม่ถึงและเกิดการไหลแยกตัวของกระแสวนจากพื้นผิวอีกด้วย

การพิจารณาการไหลระหว่างหนึ่งโมดูล โดยได้แสดงตำแหน่งระยะไร่นว้ยของการจัดวางครีบบางแบบ ครีบบั้วแยกตัวซี่สวนการไหล ในช่วงหนึ่งโมดูลไว้ในรูปที่ 5.4 และได้แสดงสนามความเร็วสนามอุณหภูมิ และสนามความดัน ที่เกิดขึ้นในแต่ละหน้าตัดระหว่างหนึ่งโมดูลที่ $Re=15,000$ ไว้ในรูปที่ 7.17 ซึ่งสังเกตได้ว่า บริเวณที่มีการไหลตกระทบพื้นผิวให้ความร้อน มีค่าการกระจายเลขนัสเซลท์เฉพาะที่สูงนั้นเกิดขึ้นในบริเวณใกล้กับมุมหรือรอยต่อของผนังท่อ ส่วนบริเวณกลางท่อซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดการไหลแยกตัวของกระแสวนนั้นจะห้ค่าการถ่ายเทความร้อนต่ำ และบริเวณนี้จะแคบลงได้ถ้าความสูงของครีบบั้วเพิ่มขึ้น

เวกเตอร์ของความเร็ว สนามอุณหภูมิ และสนามความดัน ที่แต่ละระนาบตัดขวางซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้ครอบคลุมลักษณะทั้งหมด ของอิทธิพลของครีบบางรูปตัววีแบบแยกตัวต่อกระแสการไหลหลัก โดยอิทธิพลต่างๆ เหล่านี้ได้รวมถึง การไหลแยกตัวของกระแสการไหลหลัก กระแสวนหรือการหมุนวน สามารถเห็นได้ชัดเจนถึงการไหลของสองกระแสวนตามยาวที่หมุนสวนทางกันซึ่งเกิดจากครีบบั้วที่ปรากฏบนผนังส่วนครึ่งล่างของท่อ ซึ่งการหมุนวนเหล่านี้จะไปพาความร้อนออกจากพื้นผิวแล้วเคลื่อนที่ขึ้นด้านบนโดยมีรูปแบบซ้ำกันอย่างต่อเนื่องในแต่ละโมดูล

7.3 อิทธิพลค่า BR ของครีบบางที่มีการจัดวางแบบครีบบั้วแยกตัวซี่สวนการไหล

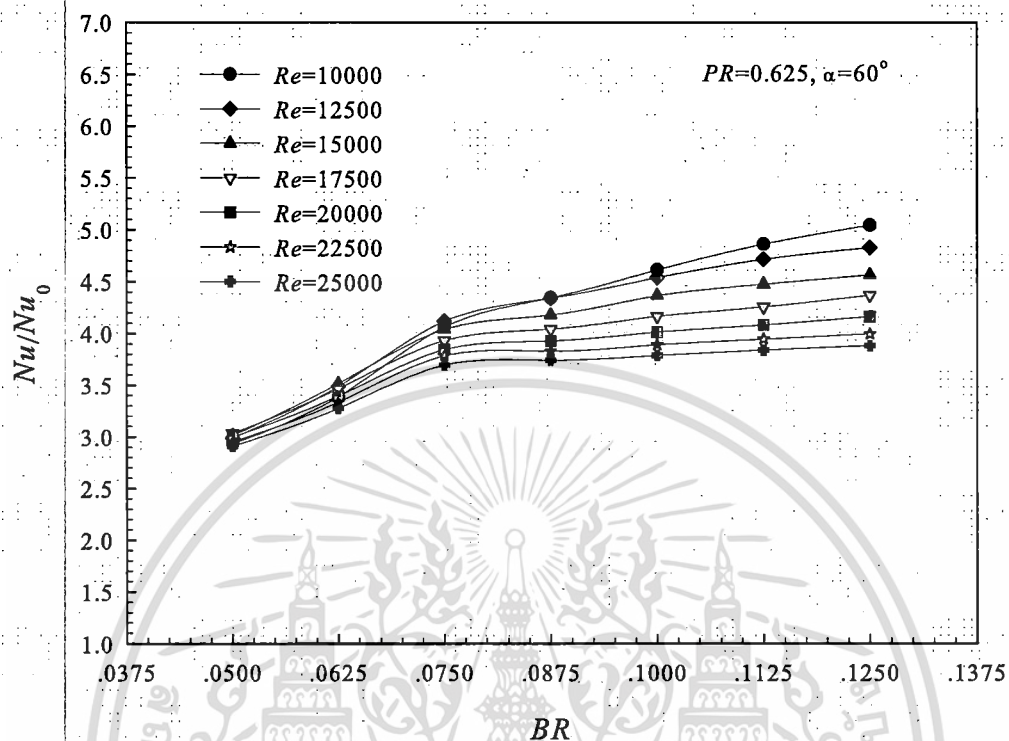
อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงค่าความสูงของครีบบางที่มีการจัดวางแบบ ครีบบั้วแยกตัวซี่สวนการไหล ซึ่งส่งผลต่อค่าการถ่ายเทความร้อน พิจารณาได้จากรูปที่ 7.18 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่า Nu/Nu_0 ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่า BR ซึ่ง BR มีค่าเท่ากับ 0.050, 0.0625, 0.075, 0.0875, 0.10, 0.1125 และ 0.125 ที่ค่า Re ในช่วง 10,000 ถึง 25,000 ในภาพรวมพบว่าเมื่อครีบบั้วมีความสูงเพิ่มขึ้น Nu/Nu_0 มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากความสูงของครีบบั้วที่เพิ่มขึ้นทำให้มีพื้นที่ปะทะการไหลเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้ Nu/Nu_0 เพิ่มสูงขึ้น โดยที่ครีบบั้วที่ให้ค่า Nu/Nu_0 สูงที่สุดคือ $BR=0.125$ เมื่อเฉลี่ยค่าตลอดช่วง Re ที่พิจารณาจะมีค่าประมาณ 4.23 และครีบบั้วที่ให้ค่า Nu/Nu_0 ต่ำที่สุดคือ $BR=0.05$ โดยมีค่าเฉลี่ยตลอดช่วง Re ประมาณ 2.86 และสังเกตพบว่าเมื่อครีบบั้วมีความสูงตั้งแต่ค่า $BR=0.075$ ขึ้นไปความชันของการเพิ่มค่า Nu/Nu_0 มีแนวโน้มลดลง

อิทธิพลของค่า BR ที่ส่งผลต่อค่าตัวประกอบความเสียดทาน พิจารณาได้จากรูปที่ 7.19 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า f/f_0 กับค่า BR ในภาพรวมพบว่าเมื่อครีบบั้วมีความสูงเพิ่มขึ้นค่า f/f_0 มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากความสูงของครีบบั้วที่เพิ่มสูงขึ้นก่อให้เกิดการขวางการไหลหลักจึงส่งผลให้ f/f_0 เพิ่มสูงขึ้น และในทุกๆ ค่าของ BR ค่า f/f_0 มีแนวโน้มคงที่เมื่อ Re เพิ่มขึ้น โดยครีบบั้วที่ให้ค่า f/f_0 สูงที่สุดคือ $BR=0.125$ เมื่อเฉลี่ยค่าตลอดช่วง Re ที่พิจารณาจะมีค่าประมาณ

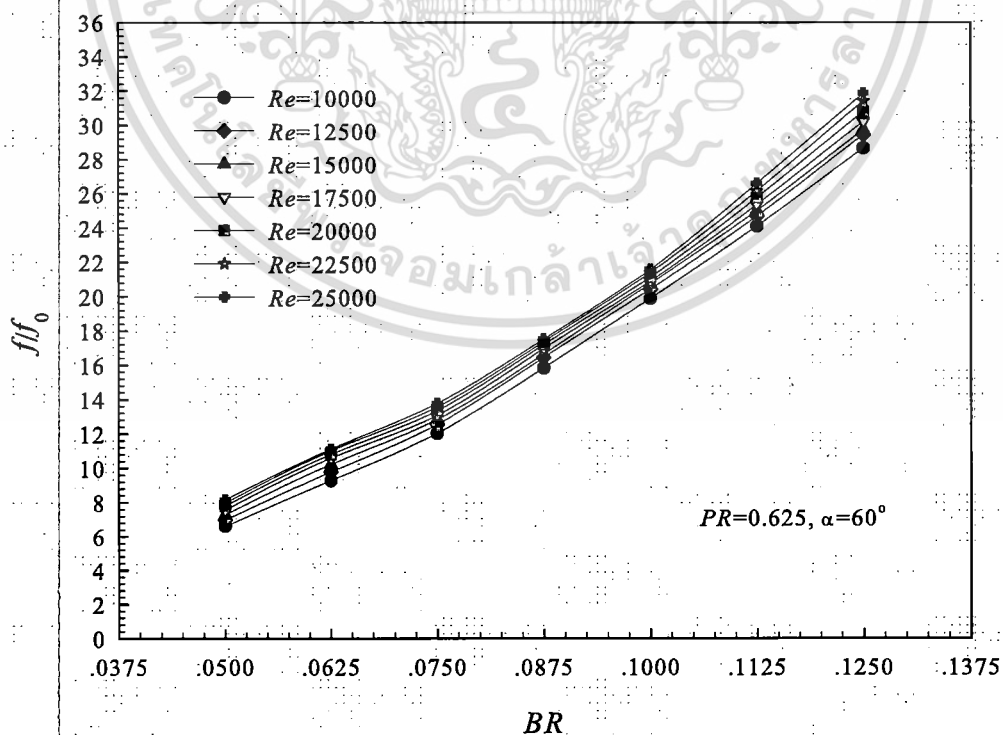
เอกส 29.70 และครีบบั้วที่ให้ค่า f/f_0 ต่ำที่สุดคือ $BR=0.05$ โดยมีค่าเฉลี่ยตลอดช่วง Re ประมาณ 7.34 และ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สังเกตพบว่าเมื่อครีมีค่าสูงตั้งแต่ค่า $BR=0.075$ ขึ้นไปความชันของการเพิ่มค่า ff_0 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

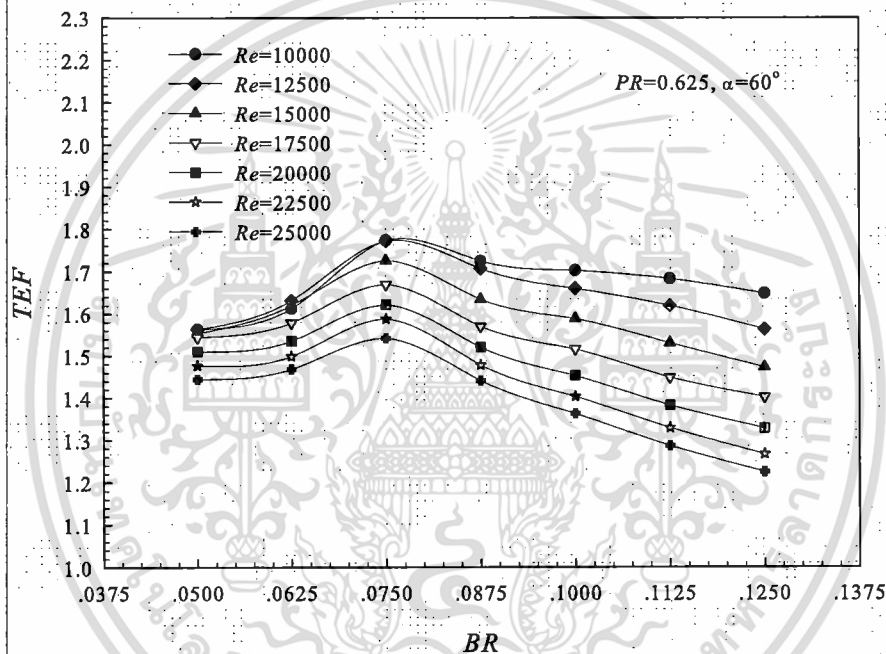


รูปที่ 7.18 ค่า Nu/Nu_0 กับค่า BR ตั้งแต่ 0.050 ถึง 0.125 ที่ค่า $\alpha=60^\circ$ และ $PR=0.625$



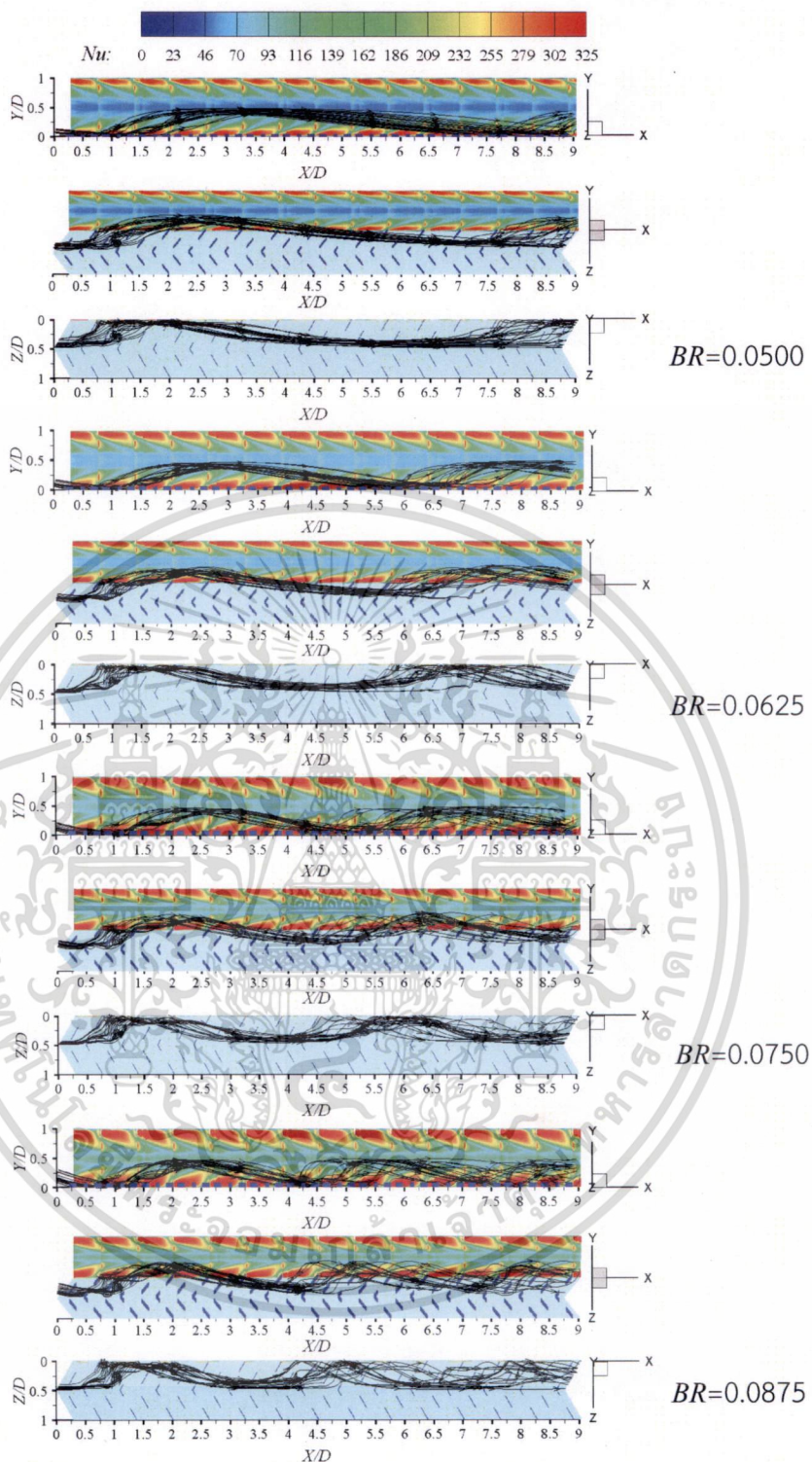
เอกสารนี้เป็นรูปที่ 7.19 ค่า ff_0 กับค่า BR ตั้งแต่ 0.050 ถึง 0.125 ที่ค่า $\alpha=60^\circ$ และ $PR=0.625$ ขีดด้านการศึกษา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณีนำไปใช้

อิทธิพลของค่า BR ที่ส่งผลต่อค่า TEF พิจารณาได้จากรูปที่ 7.20 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า TEF ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่า BR ในภาพรวมพบว่าเมื่อครีบมีความสูงเพิ่มขึ้นค่า TEF มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นและมีค่าสูงที่สุดที่ $BR=0.075$ ซึ่งเป็นผลมาจากค่า Nu/Nu_0 และ ff_0 มีการเปลี่ยนแปลงค่าของความชันที่ตำแหน่งนี้โดยสามารถสังเกตได้ในรูปที่ 7.18 และ 7.19 แต่หลังจากค่า $BR=0.075$ ค่า TEF จะมีแนวโน้มลดลง และในทุกๆ ค่าของ BR นั้นค่า TEF มีแนวโน้มลดลงเมื่อ Re เพิ่มสูงขึ้น และเมื่อเฉลี่ยค่าตลอดช่วง Re ที่พิจารณาจะมีค่า TEF ประมาณ 1.61 และให้ค่าสูงที่สุดคือ 1.77 ที่ $Re=10,000$ และค่า BR ที่ให้ค่า TEF ต่ำที่สุดคือ $BR=0.125$ โดยมีค่าเฉลี่ยตลอดช่วง Re ประมาณ 1.37 ทั้งนี้เนื่องจากเป็นกรณีที่ให้ค่า ff_0 สูงที่สุด และเมื่อพิจารณาค่าที่วิเคราะห์ได้พบว่า ความสูงของครีบที่น่าจะมีความเหมาะสมมากที่สุดคือครีบที่มีค่า $BR=0.075$ เนื่องจากให้ค่า TEF สูงที่สุด



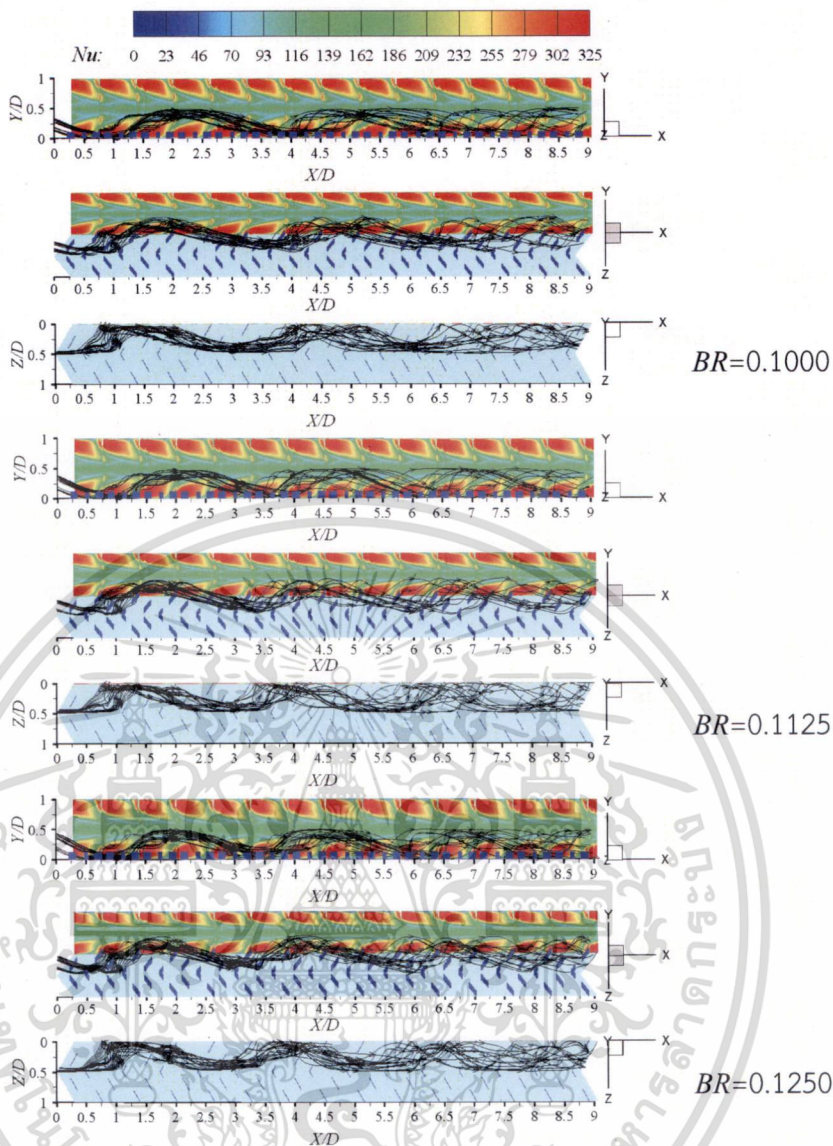
รูปที่ 7.20 ค่า TEF กับค่า BR ตั้งแต่ 0.050 ถึง 0.125 ที่ค่า $\alpha=60^\circ$ และ $PR=0.625$

สำหรับการศึกษารายละเอียดของสนามการไหล ที่เกิดจากอิทธิพลของความสูงครีบต่อการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทาน สามารถสังเกตได้จากเส้นทางเดินอนุภาค และการกระจายเลขนัสเซลล์เฉพาะที่ ที่ค่า $Re=15,000$ ในรูปที่ 7.21 จากการสังเกตพบว่าเมื่อครีบมีความสูงเพิ่มขึ้น ระยะการตกกระทบของกระแสการไหลบนพื้นผิวให้ความร้อนมีค่าลดลง ซึ่งระยะการตกกระทบที่สั้นลงสัมพันธ์กับค่า Nu/Nu_0 และ ff_0 ที่เพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้สังเกตพบว่าเมื่อครีบมีความสูงเพิ่มขึ้น บริเวณการกระจายเลขนัสเซลล์เฉพาะที่ซึ่งใกล้กับมุมของทอาก็จะมากขึ้นตาม แต่ยังคงมีค่าต่ำที่บริเวณแนวกลางทอ



รูปที่ 7.21 เส้นทางเดินอนุภาคและการไหลตกกระทบพื้นผิว ของการเปลี่ยนค่าความสูงครีปที่ค่า $\alpha=60^\circ$, $PR=0.625$ และ $Re=15,000$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.21 เส้นทางเดินอนุภาคและการไหลตกกระทบพื้นผิว ของการเปลี่ยนค่าความสูงครีบอกที่ค่า $\alpha=60^\circ$, $PR=0.625$ และ $Re=15,000$ (ต่อ)

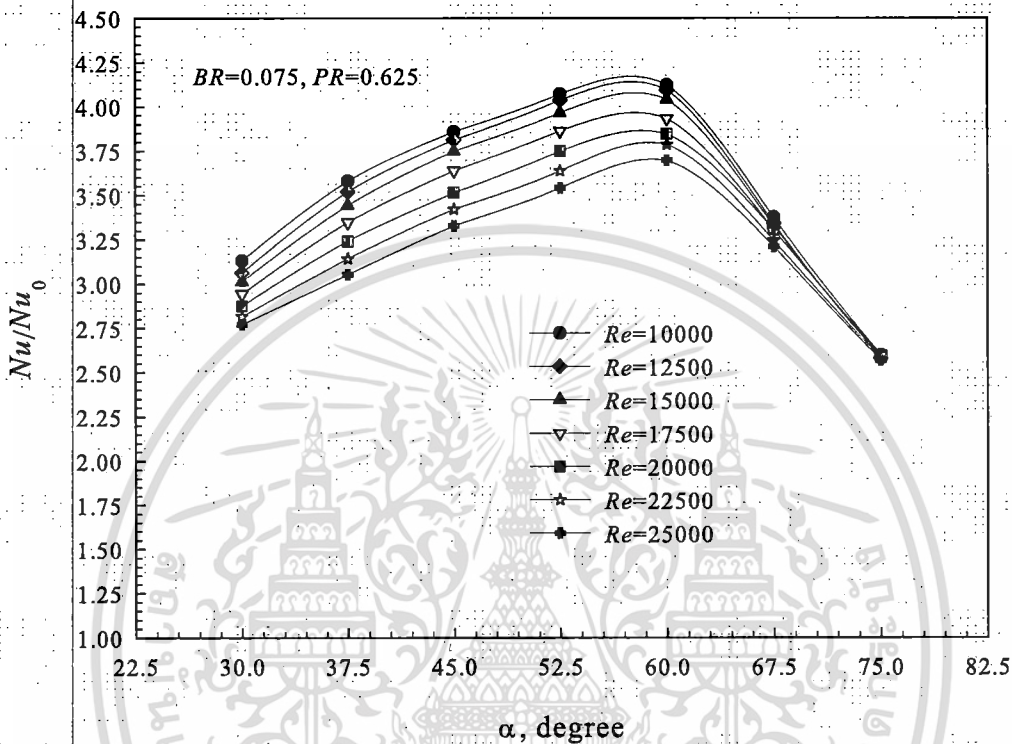
7.4 อิทธิพลค่า α ของครีบอกที่มีการจัดวางแบบครีบอกตัววีแยกตัวชี้สวนการไหล

จากการศึกษาถึงอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงความสูงของครีบอก เมื่อกำหนดให้มุมปะทะและค่า PR คงที่ พบว่าครีบอกที่มีค่า $BR=0.075$ มีความเหมาะสมกว่าครีบอกที่มีความสูงค่าอื่นๆ ดังนั้นในกรณีการศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงค่ามุมปะทะของครีบอก ที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนตัวประกอบความเสียดทาน และค่า TEF จึงเลือกใช้ครีบอกที่มีค่า $BR=0.075$ มาศึกษาโดยพิจารณาที่ค่า $PR=0.625$ และค่า Re อยู่ในช่วง 10,000 ถึง 25,000 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

สำหรับการศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงค่ามุมปะทะของครีบอก ที่มีผลต่อค่าการถ่ายเทความร้อน พิจารณาได้จากรูปที่ 7.22 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่า Nu/Nu_0 ที่เปลี่ยนแปลงค่าไปตามค่า α คือ $\alpha=30.0^\circ, 37.5^\circ, 45.0^\circ, 52.5^\circ, 60.0^\circ, 67.5^\circ$ และ 75.0° ที่ค่า Re ต่างๆ กัน ในภาพรวมพบว่าเมื่อครีบอกมีมุมปะทะเพิ่มขึ้นค่า Nu/Nu_0 มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นและมีค่าสูงที่สุดที่มุมปะทะ $\alpha=60^\circ$ หลังจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

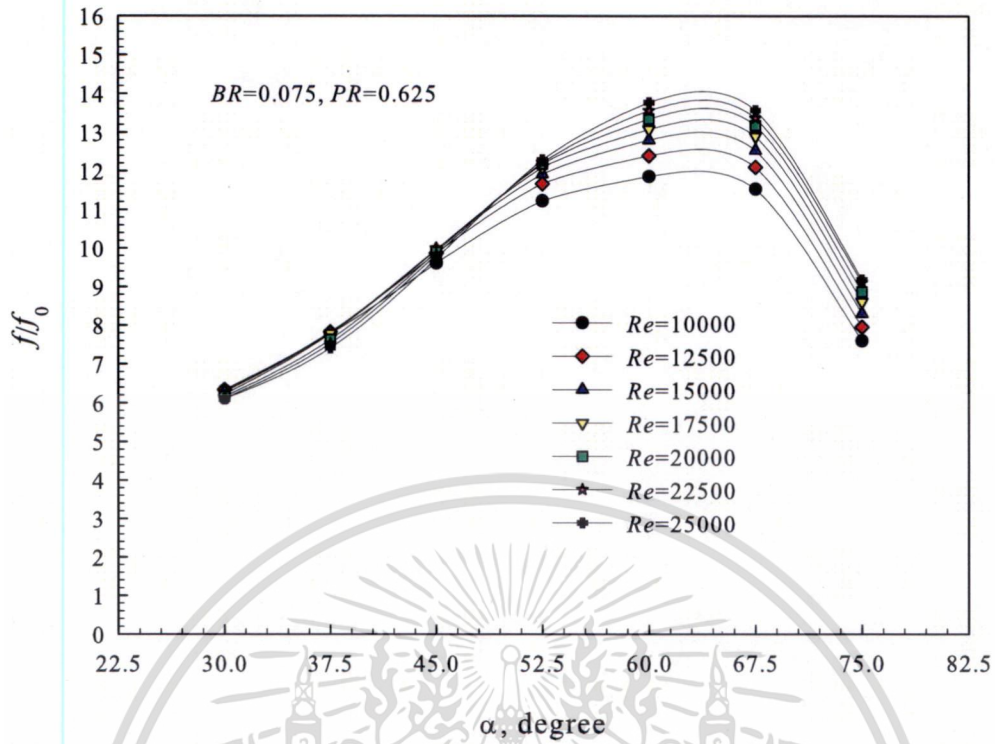
นั้นค่า Nu/Nu_0 มีแนวโน้มลดลง และในทุกๆ ค่าของมุมปะทะครีบ ค่า Nu/Nu_0 มีแนวโน้มลดลงเมื่อ Re เพิ่มขึ้น โดยครีบที่ให้ค่า Nu/Nu_0 สูงที่สุดเกิดขึ้นที่ค่ามุมปะทะ $\alpha=60^\circ$ เมื่อเฉลี่ยค่าตลอดช่วง Re ที่พิจารณาจะมีค่าประมาณ 3.80 โดยมีค่า Nu/Nu_0 สูงที่สุดเท่ากับ 4.12 ที่ $Re=10,000$ และมุมปะทะครีบที่ให้ค่า Nu/Nu_0 ต่ำที่สุดคือ $\alpha=75^\circ$ โดยมีค่าเฉลี่ยตลอดช่วง Re ที่พิจารณาประมาณ 2.48



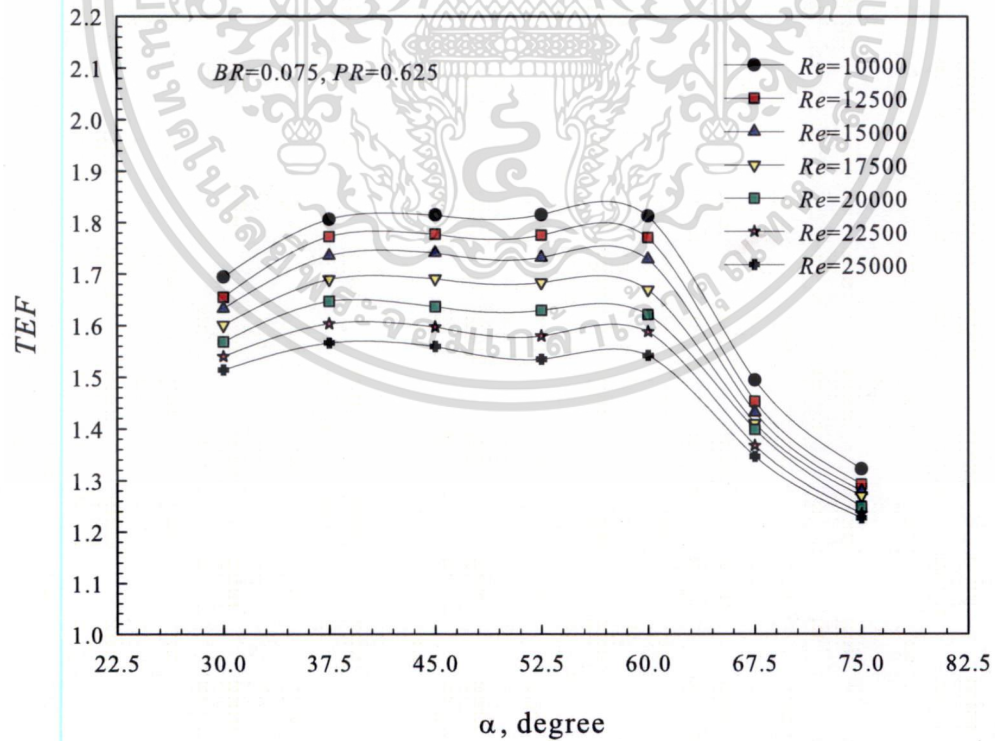
รูปที่ 7.22 กราฟแสดงค่า Nu/Nu_0 กับค่า α ในช่วง 30° ถึง 75° ที่ค่า $BR=0.075$ และ $PR=0.625$

อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงค่ามุมปะทะของครีบ ที่มีผลต่อค่าตัวประกอบความเสียดทาน พิจารณาได้จากรูปที่ 7.23 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่า f/f_0 ที่เปลี่ยนแปลงค่าไปตามมุมปะทะของครีบ (α) ที่ค่า Re ต่างๆ กัน ในภาพรวมพบว่ามีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงคล้ายคลึงกับการเปลี่ยนแปลงค่า Nu/Nu_0 ซึ่งมุมปะทะที่ให้ค่า f/f_0 สูงที่สุดคือ $\alpha=60^\circ$ โดยที่ค่า f/f_0 ที่มุมปะทะ $\alpha=60^\circ$ เมื่อเฉลี่ยค่าตลอดช่วง Re ที่พิจารณาจะมีค่าประมาณ 12.70 และมุมปะทะครีบที่ให้ค่า f/f_0 ต่ำที่สุดคือ $\alpha=30^\circ$ โดยมีค่าเฉลี่ยตลอดช่วง Re ประมาณ 6.10

อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงค่ามุมปะทะของครีบที่มีผลต่อค่า TEF พิจารณาได้จากรูปที่ 7.24 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่า TEF ที่เปลี่ยนแปลงค่า α ที่ค่า Re ต่างๆ กัน ในภาพรวมพบว่าเมื่อครีบบมีค่า α เพิ่มขึ้นค่า TEF มีแนวโน้มลดลง และในทุกๆ ค่า α ของครีบ ค่า TEF มีแนวโน้มลดลงเมื่อ Re เพิ่มขึ้น โดยที่ครีบที่มีมุมปะทะ α เท่ากับ 45° และ 60° ให้ค่า TEF สูงที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากัน โดยเมื่อเฉลี่ยค่าตลอดช่วง Re ที่พิจารณามีค่าประมาณ 1.63 และครีบที่มี $\alpha=60^\circ$ ให้ค่า TEF สูงสุดคือ 1.81 ที่ค่า $Re=10,000$ และมุมปะทะครีบที่ให้ค่า TEF ต่ำที่สุดคือ $\alpha=75^\circ$ โดยมีค่าเฉลี่ยตลอดช่วง Re ที่พิจารณาจะมีค่าประมาณ 1.22

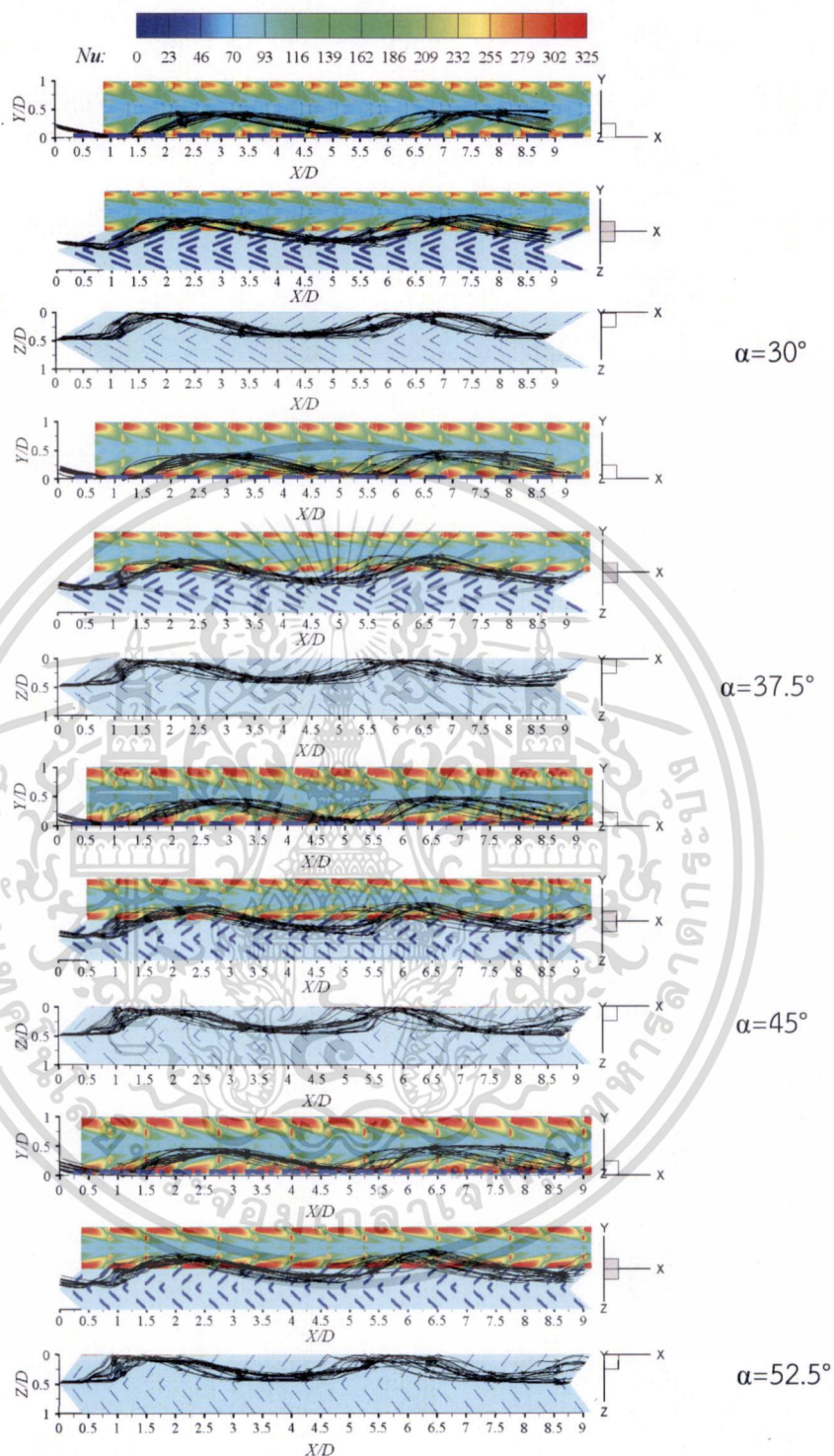


รูปที่ 7.23 ค่า f/f_0 กับค่า α ในช่วง 30° ถึง 75° ที่ค่า $BR=0.075$ และ $PR=0.625$



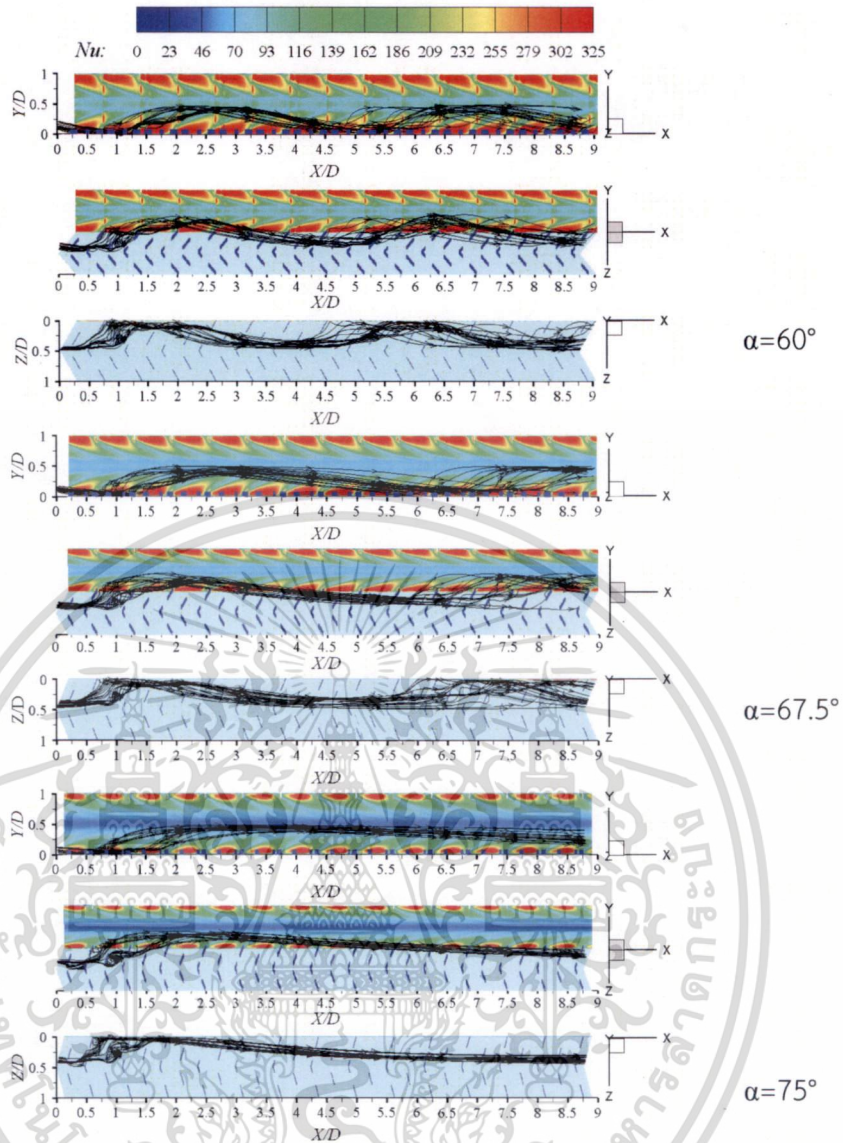
รูปที่ 7.24 ค่า TEF กับค่า α ในช่วง 30° ถึง 75° ที่ค่า $BR=0.075$ และ $PR=0.625$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.25 เส้นทางเดินอนุภาคและการไหลตกกระทบพื้นผิวที่เกิดจากการเปลี่ยนค่ามุมปะทะของ ครีที่ค่า $BR=0.075$ และ $PR=0.625$ และที่ค่า $Re=15,000$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.25 เส้นทางเดินอนุภาคและการไหลตกกระทบพื้นผิวที่เกิดจากการเปลี่ยนค่ามุมปะทะของ ครีบริที่ค่า $BR=0.075$ และ $PR=0.625$ และที่ค่า $Re=15,000$ (ต่อ)

จากการศึกษาอิทธิพลของมุมปะทะที่ส่งผลต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบความเสียดทานนี้พบว่า มุมปะทะที่ให้ค่า Nu/Nu_0 และค่า ff_0 สูงที่สุดคือมุมปะทะ $\alpha=60^\circ$ ซึ่งสาเหตุที่ $\alpha=60^\circ$ ให้ค่า Nu/Nu_0 และค่า ff_0 สูงที่สุด สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 7.25 ซึ่งเป็นรูปที่แสดงรายละเอียดของเส้นทางเดินอนุภาค และการไหลตกกระทบพื้นผิวที่เกิดจากการเปลี่ยนค่า α ของครีบริที่วางบนพื้นผิวหุ้มฉนวนที่มีค่า $BR=0.075$, $PR=0.625$ และ $Re=15,000$ จากการสังเกตพบว่าเมื่อครีบริมีมุมปะทะเพิ่มขึ้นโดยเริ่มต้นจาก $\alpha=30^\circ$ ระยะเวลาการตกกระทบของกระแสการไหลบนพื้นผิวหุ้มฉนวนมีแนวโน้มลดลง ซึ่งระยะเวลาการตกกระทบที่สั้นลงสัมพันธ์กับค่า Nu/Nu_0 และ ff_0 ที่เพิ่มสูงขึ้น แต่จากการสังเกตโดยละเอียดพบว่าระยะเวลาการไหลตกกระทบพื้นผิวที่สั้นที่สุดเกิดที่มุมปะทะในช่วง $52.5^\circ-60^\circ$ แต่การไหลที่เกิดจาก $\alpha=60^\circ$ เมื่อตกกระทบลงสู่พื้นแล้วมีการกระจายตัวของกระแสน้ำตามยาวในบริเวณที่กว้างกว่า และไม่รวมตัวกันจึงส่งผลให้ Nu/Nu_0 และ ff_0 มีค่าสูงที่สุด

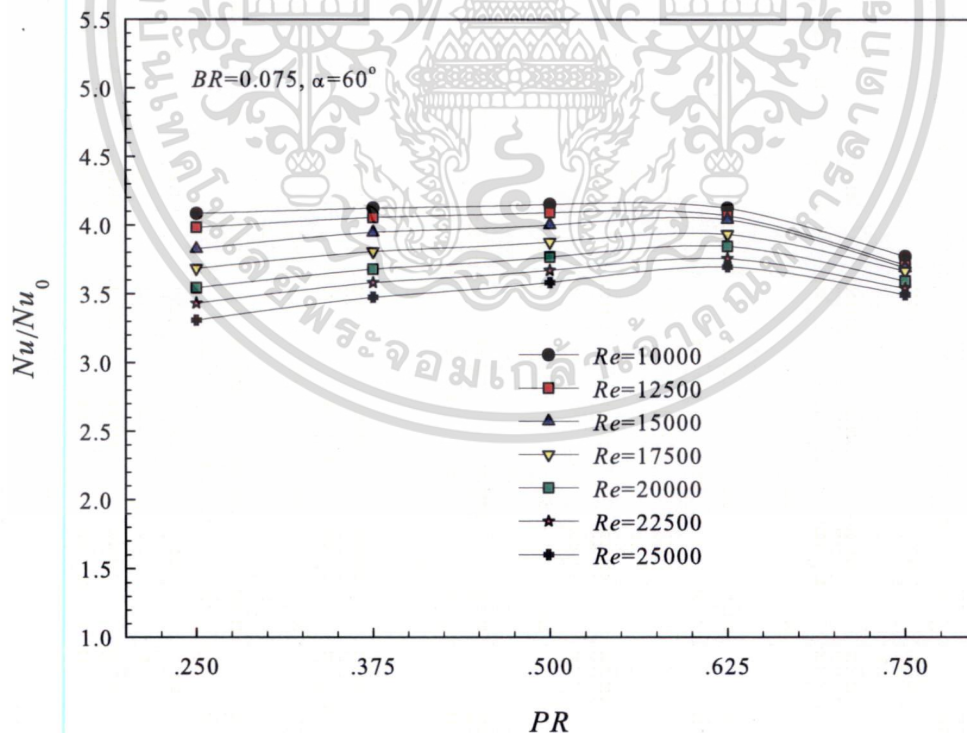
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
แต่เมื่อมุมปะทะมีค่ามากกว่า 60° แล้วระยะเวลาการไหลตกกระทบพื้นผิวจะเพิ่มมากขึ้นและสัมพันธ์กับค่า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Nu/Nu_0 และ f/f_0 ที่ลดลง และพบว่าที่ $\alpha=75^\circ$ มีระยะการไหลตกกระทบที่ไกลที่สุดและอยู่นอกช่วงที่พิจารณาและสัมพันธ์กับค่า Nu/Nu_0 และ f/f_0 ซึ่งมีแนวโน้มต่ำกว่าค่า α อื่นๆ

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบรูปที่ 7.22 ถึง 7.25 พบว่ามุมปะทะของครีบน้ำเงินที่น่าจะมีความเหมาะสมมากที่สุดคือ ครีบน้ำเงินที่มีค่า $\alpha=60^\circ$ เนื่องจากให้ค่า TEF สูงที่สุดและเท่ากับครีบน้ำเงินที่มีค่า $\alpha=45^\circ$ แต่ครีบน้ำเงินที่มีมุมปะทะ $\alpha=60^\circ$ ให้ค่า Nu/Nu_0 เมื่อเฉลี่ยค่าตลอดช่วง Re ที่พิจารณาสูงกว่าครีบน้ำเงินที่มีมุมปะทะ $\alpha=45^\circ$ ถึง 8.2% ซึ่งจุดมุ่งหมายที่สำคัญอย่างหนึ่งของงานวิจัยนี้คือการได้มาซึ่งค่า Nu/Nu_0 ที่มีค่าสูงที่สุดในขณะที่ค่า TEF สูงที่สุดและเหมาะสมด้วย และเนื่องจากเกิดกรณีที่ค่า TEF ใกล้เคียงกันแต่ค่า Nu/Nu_0 แตกต่างกัน ดังนั้นจากเหตุผลดังกล่าวในการศึกษาถัดไปจะเลือกใช้ครีบน้ำเงินที่มีมุมปะทะ $\alpha=60^\circ$ ซึ่งให้ค่า Nu/Nu_0 สูงที่สุดมาพัฒนาต่อไปในบทนี้

7.5 อิทธิพลค่า PR ของครีบน้ำเงินที่มีการจัดวางแบบครีบน้ำเงินตัววีแยกตัวชี้สวนการไหล

ในหัวข้อที่ผ่านมาซึ่งพบว่า ที่ค่า $BR=0.075$ และ $\alpha=60^\circ$ ให้ค่า Nu/Nu_0 และ TEF ที่สูงที่สุดและเหมาะสมโดยกำหนดให้ค่า $PR=0.625$ คงที่ ซึ่งค่า $PR=0.625$ นี้ได้มาจากการศึกษาในกรณีของครีบน้ำเงินตัววีเหลี่ยมจัตุรัส ซึ่งก่อให้เกิดข้อสงสัยที่ว่า ค่า $PR=0.625$ นี้ให้ค่า TEF ที่สูงที่สุดและเหมาะสมสำหรับการไหลผ่านครีบน้ำเงินที่วางบนพื้นผิวให้หุ้มฉนวนหรือไม่ ดังนั้นในส่วนถัดไปจะศึกษาถึงอิทธิพลของระยะห่างระหว่างครีบน้ำเงินที่มีการจัดเรียงครีบน้ำเงินแบบ ครีบน้ำเงินตัววีแยกตัวชี้สวนการไหล ที่ส่งผลต่อค่า Nu/Nu_0 , f/f_0 และ TEF



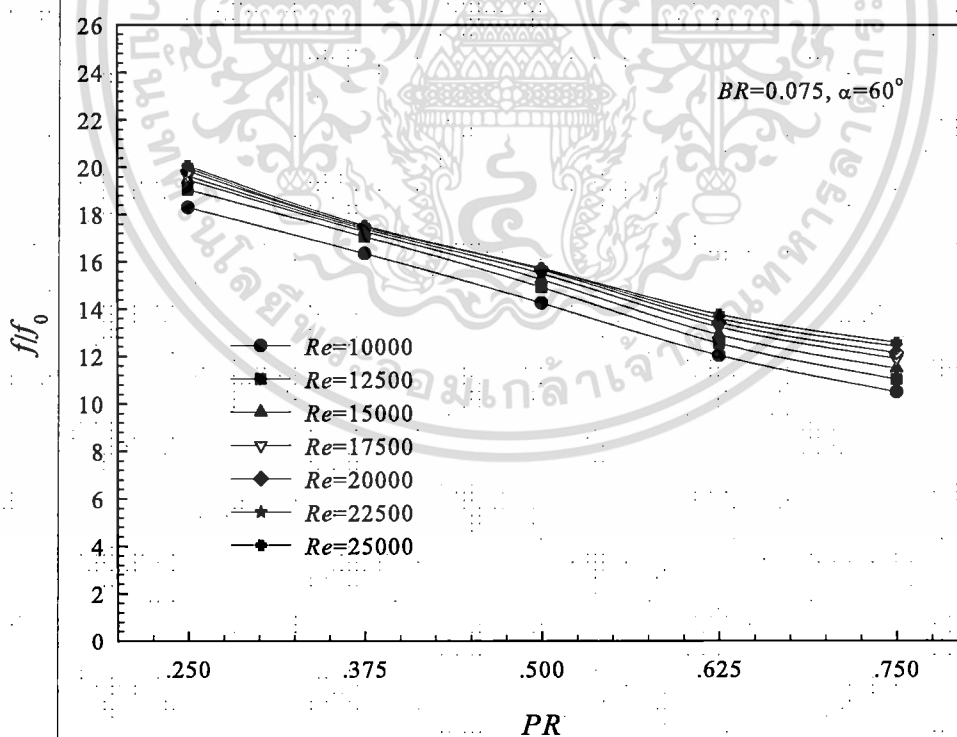
รูปที่ 7.26 ความสัมพันธ์ของค่า Nu/Nu_0 กับค่า PR ในช่วง $PR=0.25$ ถึง 0.75 ที่ $BR=0.075$ และ $\alpha=60^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

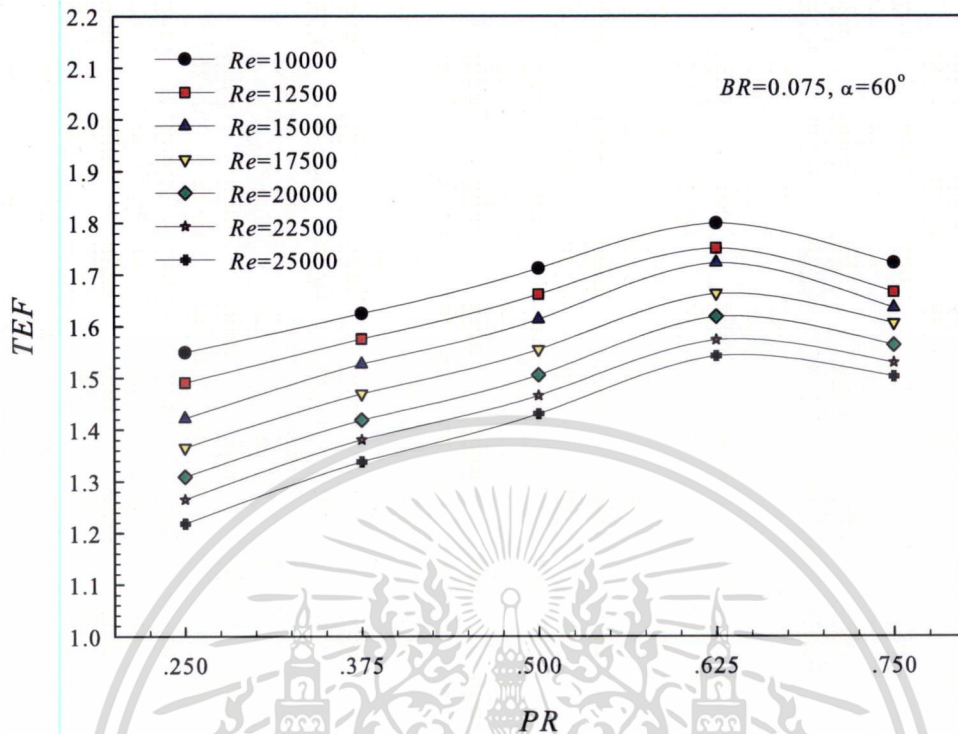
การศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงค่า PR ที่ส่งผลต่อค่า Nu/Nu_0 , ff_0 และ TEF สำหรับการไหลผ่านครีบบางที่วางบนพื้นผิวหุ้มฉนวน และมีค่า $\alpha=60^\circ$, $BR=0.075$ และ Re อยู่ในช่วง 10,000 ถึง 25,000 มีรายละเอียดดังนี้

อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงค่า PR ที่มีผลต่อค่าการถ่ายเทความร้อน พิจารณาได้จากรูปที่ 7.26 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่า Nu/Nu_0 ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่า PR ในช่วง PR ตั้งแต่ 0.25 ถึง 0.75 ที่ค่า Re ต่างๆ กัน ในภาพรวมพบว่าเมื่อครีบบมีระยะห่างเพิ่มขึ้นค่า Nu/Nu_0 มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น แต่หลังจากค่า $PR=0.625$ ค่า Nu/Nu_0 มีค่าลดลง และในทุกๆ ค่า PR ที่ศึกษานั้น ค่า Nu/Nu_0 มีแนวโน้มลดลงเมื่อ Re เพิ่มสูงขึ้น โดยที่ค่า PR ที่ให้ค่า Nu/Nu_0 สูงที่สุดคือที่ค่า $PR=0.625$ ซึ่งสอดคล้องกับกรณีการไหลผ่านครีบจัดรัศมีแบบ เมื่อเฉลี่ยค่า Nu/Nu_0 ตลอดช่วง Re ที่พิจารณาจะมีค่าประมาณ 3.80 ซึ่งที่ค่า $PR=0.625$ นี้ให้ค่า Nu/Nu_0 สูงที่สุดเท่ากับ 4:12 ที่ $Re=10,000$ และค่า PR ที่ให้ค่า Nu/Nu_0 ต่ำที่สุดคือ $PR=0.75$ โดยมีค่าเฉลี่ยตลอดช่วง Re ที่พิจารณามีประมาณ 3.49

อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงค่า PR ที่มีผลต่อค่า ff_0 พิจารณาได้จากรูปที่ 7.27 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่า ff_0 ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่า PR ที่ค่า Re ต่างๆ กัน ในภาพรวมพบว่าเมื่อครีบบมีค่า PR เพิ่มมากขึ้นค่า ff_0 มีแนวโน้มลดลง และในทุกๆ ค่า PR นั้นค่า ff_0 มีแนวโน้มคงที่เมื่อ Re มีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ค่า PR ที่ให้ค่า ff_0 สูงที่สุดคือที่ค่า $PR=0.250$ เมื่อเฉลี่ยค่า ff_0 ตลอดช่วง Re ที่พิจารณามีค่าประมาณ 19.10 และค่า PR ที่ให้ค่า ff_0 ต่ำที่สุดคือ $PR=0.75$ โดยมีค่าเฉลี่ยตลอดช่วง Re ประมาณ 11.48



รูปที่ 7.27 ความสัมพันธ์ของค่า ff_0 กับค่า PR ในช่วง 0.25 ถึง 0.75 ที่ $BR=0.075$ และ $\alpha=60^\circ$



รูปที่ 7.28 ความสัมพันธ์ของค่า TEF กับค่า PR ในช่วง 0.25 ถึง 0.75 ที่ $BR=0.075$ และ $\alpha=60^\circ$

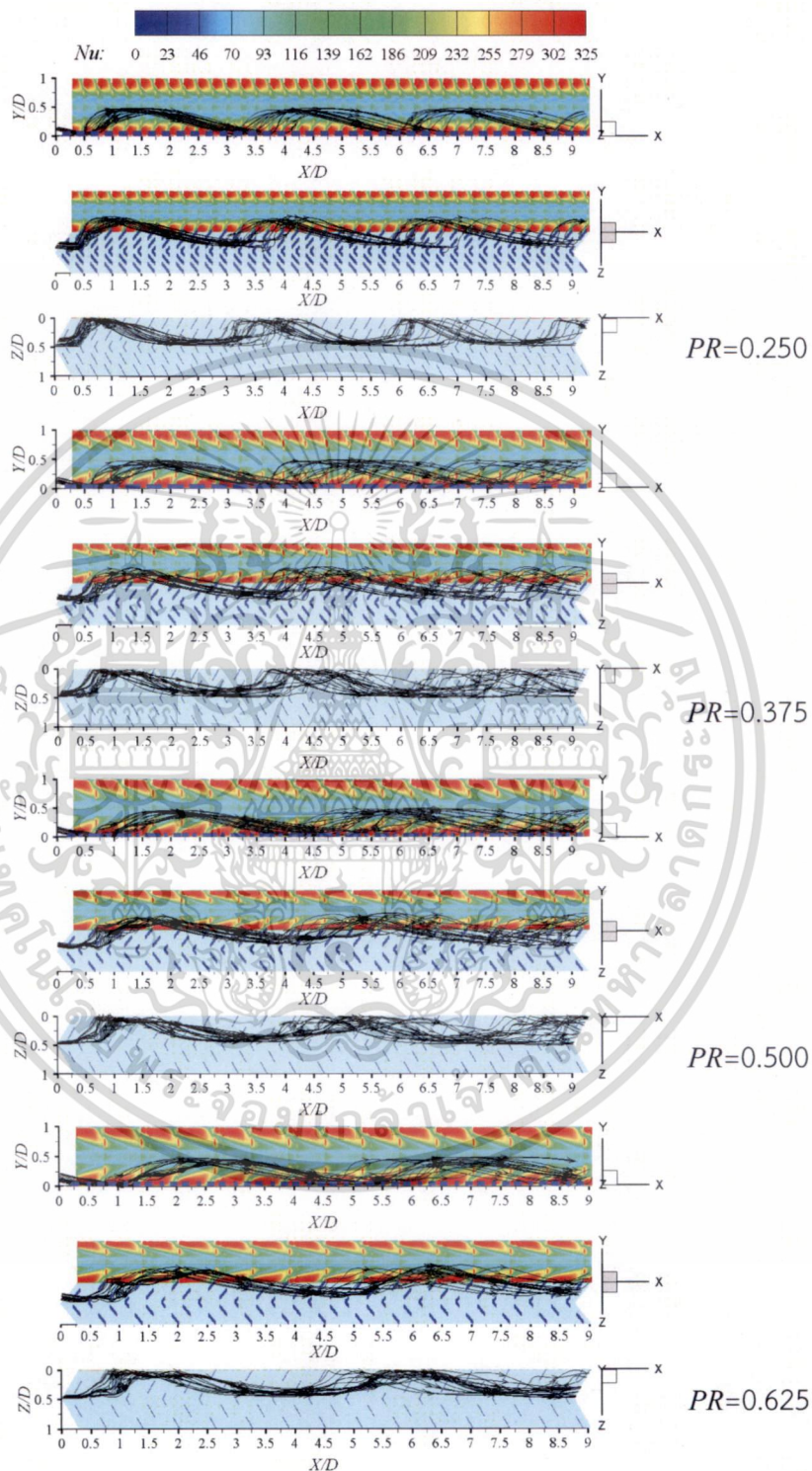
อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงค่า PR ที่มีผลต่อค่า TEF พิจารณาได้จากรูปที่ 7.28 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า TEF ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่า PR ที่ค่า Re ต่างๆ กัน ในภาพรวมพบว่าเมื่อครีบบางมีค่า PR เพิ่มขึ้น ค่า TEF มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่มีค่าลดลงที่ค่า $PR=0.625$ ในขณะที่ทุกๆ ค่าของ PR ค่า TEF มีแนวโน้มลดลงเมื่อ Re เพิ่มขึ้น โดยที่ครีบบางให้ค่า TEF สูงที่สุดคือ $PR=0.625$ เมื่อเฉลี่ยตลอดช่วง Re ที่พิจารณามีค่า $TEF=1.63$ และมีค่าสูงที่สุดคือ 1.81 ที่ค่า $Re=10,000$ และเมื่อ Re เพิ่มขึ้นค่า TEF มีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ $PR=0.25$ ให้ค่า TEF ต่ำที่สุดเมื่อเฉลี่ยตลอดช่วง Re ที่พิจารณาคือ 1.33

จากการวิเคราะห์สำหรับอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงค่า PR ที่ส่งผลต่อค่า TEF สำหรับการไหลผ่านครีบบางที่วางบนพื้นผิวหุ้มฉนวนค่า TEF สูงที่สุดจะเกิดขึ้นที่ $PR=0.625$ ซึ่งมีลักษณะสอดคล้องกับงานวิจัยในอดีตที่พบว่าที่ $PR=0.625$ ให้ค่า TEF สูงที่สุดที่มีเงื่อนไขการไหลเดียวกัน

สำหรับการวิเคราะห์รายละเอียดของสนามการไหลที่เกิดจากอิทธิพลของค่า PR ต่อการถ่ายเทความร้อนและความเสียหาย สามารถสังเกตได้จากเส้นทางเดินอนุภาค และการกระจายเลขนัสเซลล์เฉพาะที่ ที่ค่า $Re=15,000$ ดังแสดงในรูปที่ 7.29 จากรูปพบว่าเมื่อค่า PR เพิ่มสูงขึ้นระยะการไหลตกกระทบพื้นผิวหุ้มฉนวนมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ด้วยเหตุผลที่ค่า $PR=0.25$ มีระยะการไหลตกกระทบที่สั้นที่สุด จึงส่งผลให้ค่า f/f_0 มีค่ามากที่สุดในช่วงนี้ด้วย และเมื่อค่า PR เพิ่มขึ้นระยะการไหลตกกระทบจะมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นจึงส่งผลให้ค่า f/f_0 มีแนวโน้มลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

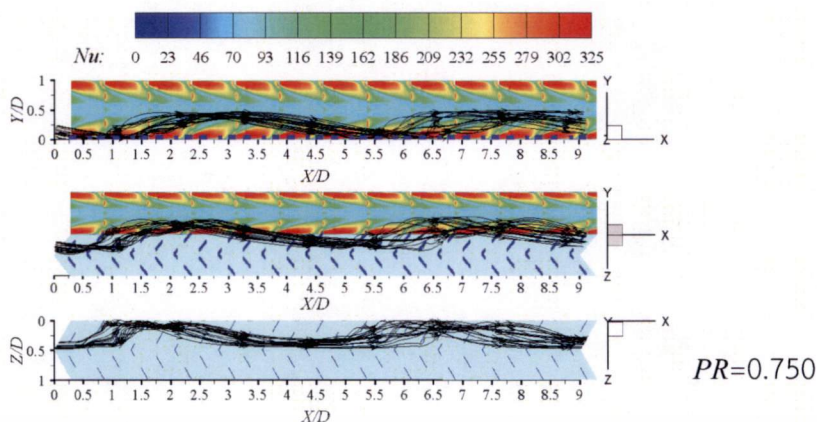
และเนื่องจากค่า $PR=0.625$ ให้ค่า Nu/Nu_0 และ TEF สูงที่สุด ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าระยะห่างระหว่างครีบที่มีความเหมาะสมมากที่สุดคือ $PR=0.625$ ที่ $BR=0.075$ และ $\alpha=60^\circ$



รูปที่ 7.29 เส้นทางเดินอนุภาคและการไหลตกกระทบพื้นผิว ของการเปลี่ยนแปลง PR ตั้งแต่ 0.25

ถึง 0.75 ที่ $BR=0.075$, $\alpha=60^\circ$ และ $Re=15,000$

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



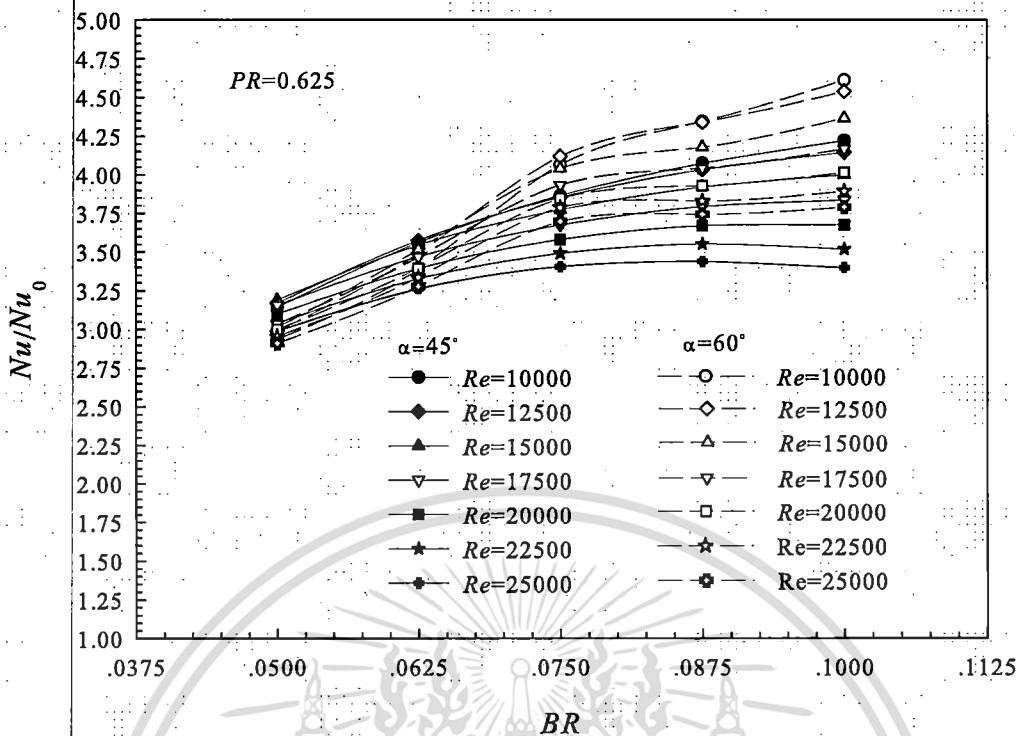
รูปที่ 7.29 เส้นทางเดินอนุภาคและการไหลตกกระทบพื้นผิว ของการเปลี่ยนแปลง PR ตั้งแต่ 0.25 ถึง 0.75 ที่ $BR=0.075$, $\alpha=60^\circ$ และ $Re=15,000$ (ต่อ)

7.6 การปรับปรุงครีบบเพื่อเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน

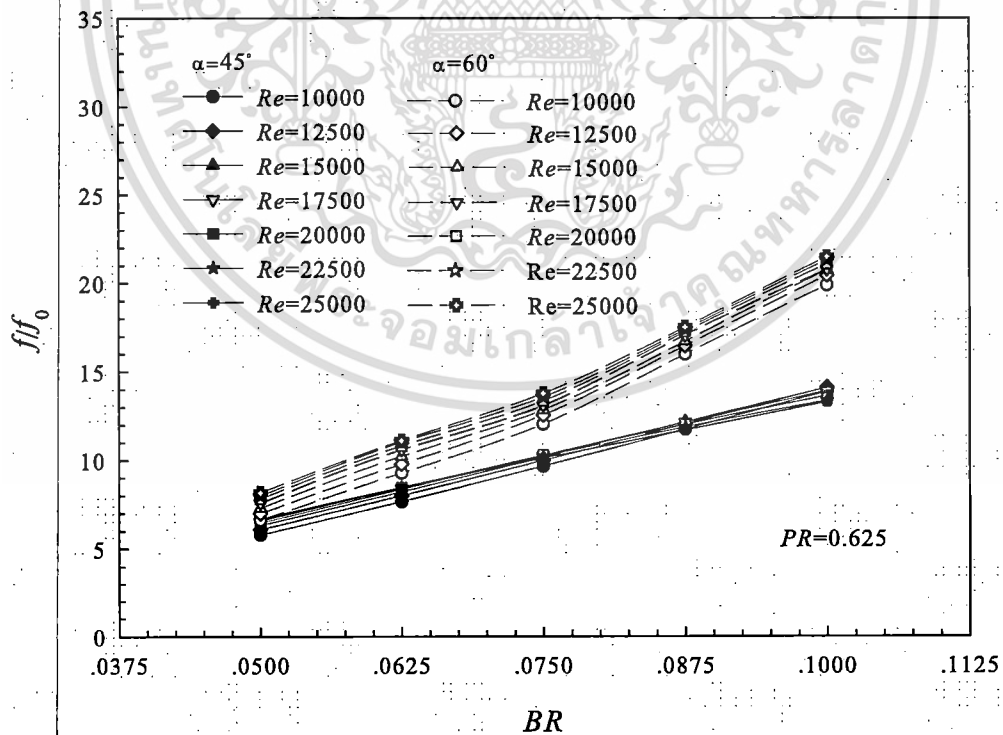
ในหัวข้อที่ผ่านมาสรุปได้ว่า ครีบบางรูปตัววิแบกตัวที่วางบนพื้นผิวหุ้มฉนวน ซึ่งมีค่า $BR=0.075$, $PR=0.625$ และค่า $\alpha=60^\circ$ นั้น เป็นกรณีที่ทำให้ค่า TEF สูงที่สุด โดยที่ค่า $Re=10,000$ นั้น ให้ค่า TEF สูงที่สุดเท่ากับ 1.81 เมื่อพิจารณาในรายละเอียดของข้อมูลที่ได้พบว่า ในกรณีของการเปลี่ยนแปลงค่ามุมปะทะที่ $\alpha=45^\circ$ และ $\alpha=60^\circ$ นั้น ให้ค่า TEF สูงที่สุดและมีค่าเฉลี่ยตลอดช่วง Re ที่พิจารณาเท่ากัน แต่ค่า Nu/Nu_0 และค่า f/f_0 ของ $\alpha=45^\circ$ น้อยกว่า $\alpha=60^\circ$ จึงมีแนวคิดว่าจะหากทำการปรับปรุงครีบบกรณี $\alpha=45^\circ$ ด้วยการเปลี่ยนแปลงค่า BR ของครีบบและกำหนดให้ค่า $PR=0.625$ คงที่ น่าจะช่วยเพิ่มค่า TEF ให้สูงขึ้นได้อีก ซึ่งเหตุผลที่กำหนดให้ค่า PR คงที่นั้นเนื่องจากสังเกตพบว่า ที่ $\alpha=60^\circ$ และ $BR=0.075$ นั้นค่า Nu/Nu_0 เปลี่ยนแปลงน้อยเมื่อค่า PR เปลี่ยนไป

ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการเปลี่ยนแปลงค่า BR ของครีบบที่มีค่า $\alpha=45^\circ$ และ $\alpha=60^\circ$ ที่ส่งผลต่อค่าการถ่ายเทความร้อน พิจารณาได้จากรูปที่ 7.30 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่า Nu/Nu_0 ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่า BR ที่ BR มีค่าเท่ากับ 0.050, 0.0625, 0.075, 0.0875 และ 0.10 พิจารณาค่า Re ในช่วง 10,000 ถึง 25,000 ในภาพรวมพบว่าที่ค่า BR ต่ำกว่า 0.0625 ค่า Nu/Nu_0 ของครีบบที่มีค่า $\alpha=45^\circ$ สูงกว่าครีบบที่มีค่า $\alpha=60^\circ$ แต่ที่ค่า BR มากกว่า 0.0625 นั้นมีลักษณะที่ตรงข้ามกัน และสังเกตพบว่าครีบบที่มีค่า $\alpha=45^\circ$ เมื่อครีบบมีความสูงตั้งแต่ค่า $BR=0.0625$ ขึ้นไป ความชันของการเพิ่มค่า Nu/Nu_0 มีแนวโน้มลดลง แต่ปรากฏการณ์เดียวกันนี้ เกิดที่ $BR=0.075$ ของครีบบที่มีค่า $\alpha=60^\circ$

ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการเปลี่ยนแปลงค่า BR ของครีบบที่มีค่า $\alpha=45^\circ$ และ $\alpha=60^\circ$ ที่ส่งผลต่อค่าตัวประกอบความเสียดทาน พิจารณาได้จากรูปที่ 7.31 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่า f/f_0 ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่า BR ในภาพรวมเห็นได้ชัดว่า ค่า f/f_0 ของครีบบที่มีค่า $\alpha=45^\circ$ ต่ำกว่าครีบบที่มีค่า $\alpha=60^\circ$ ของทุกค่า BR ที่พิจารณา ค่า f/f_0 ของครีบบที่มีค่า $\alpha=45^\circ$ มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อค่า Re เปลี่ยนแปลงไป



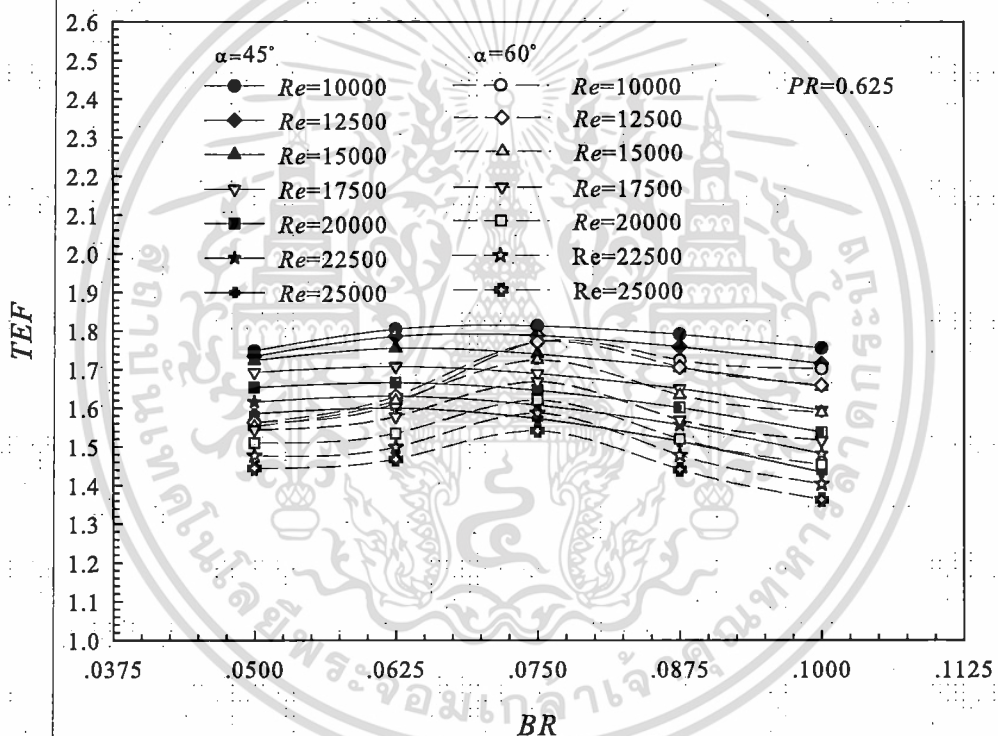
รูปที่ 7.30 การเปลี่ยนแปลงค่า Nu/Nu_0 กับค่า BR ตั้งแต่ 0.05 ถึง 0.10 ที่ค่า $PR=0.625$ เปรียบเทียบระหว่างครีปที่มีค่า $\alpha=45^\circ$ และ 60°



รูปที่ 7.31 การเปลี่ยนแปลงค่า f/f_0 กับค่า BR ตั้งแต่ 0.05 ถึง 0.10 ที่ค่า $PR=0.625$ เปรียบเทียบระหว่างครีปที่มีค่า $\alpha=45^\circ$ และ 60°

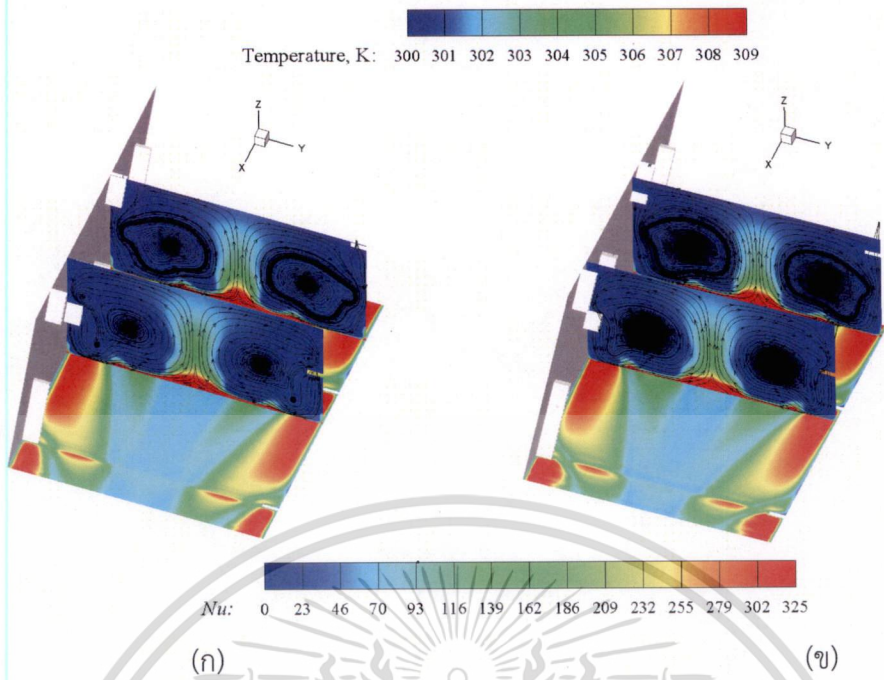
ผลการเปรียบเทียบอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงค่า BR ของครีบริที่มีค่า $\alpha=45^\circ$ และ $\alpha=60^\circ$ ที่ส่งผลต่อค่า TEF พิจารณาได้จากรูปที่ 7.32 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่า TEF ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่า BR ในภาพรวมพบว่าค่า TEF ของครีบริที่มีค่า $\alpha=45^\circ$ สูงกว่าครีบริที่มีค่า $\alpha=60^\circ$ ของทุกค่า BR ที่พิจารณาโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ค่า BR น้อยกว่า 0.075 และเมื่อพิจารณาค่า TEF ของครีบริที่มีค่า $\alpha=45^\circ$ พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่ $BR=0.0625$ หลังจากนั้นจะมีค่าลดลง ซึ่งสังเกตพบที่ $BR=0.0625$ มีค่า TEF สูงกว่าที่ BR ค่าอื่นๆ โดยเมื่อเฉลี่ยตลอดช่วง Re ที่พิจารณามีค่า $TEF=1.71$

ซึ่งจากผลการวิเคราะห์พบว่า ครีบริที่มีค่า $BR=0.0625$, $PR=0.625$ และที่ค่า $\alpha=45^\circ$ นั้นเป็นกรณีที่ทำให้ค่า TEF สูงที่สุดและที่ค่า $Re=10,000$ นั้น ให้ค่า $TEF=1.81$ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าครีบริที่มีค่า $BR=0.0625$, $PR=0.625$ และที่ค่า $\alpha=45^\circ$ มีความเหมาะสมต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนมากกว่ากรณีครีบริที่มีค่า $BR=0.075$, $PR=0.625$ และที่ $\alpha=60^\circ$ เนื่องจากให้ค่า TEF โดยรวมสูงกว่า ในขณะที่ค่า Nu/Nu_0 ใกล้เคียงกัน แต่ค่า f/f_0 ของ $\alpha=45^\circ$ น้อยกว่าค่าของ $\alpha=60^\circ$

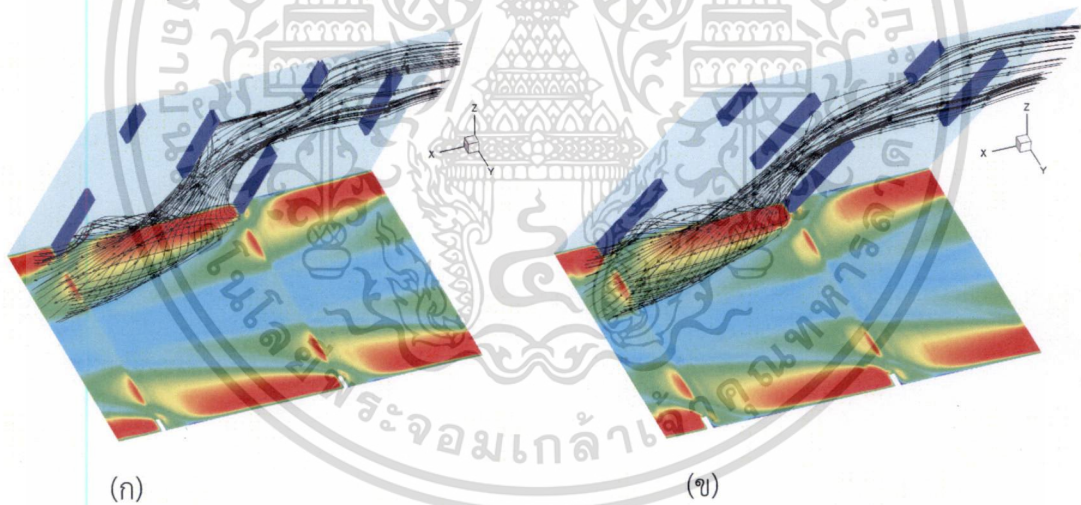


รูปที่ 7.32 การเปลี่ยนแปลงค่า TEF กับค่า BR ตั้งแต่ 0.05 ถึง 0.10 ที่ค่า $PR=0.625$ เปรียบเทียบระหว่างครีบริที่มีค่า $\alpha=45^\circ$ และ 60°

สำหรับกรณีการไหลที่แสดงในแนวภาคตัดขวางท่อ และการกระจายค่าเลขนีสเซลท์เฉพาะที่ได้นำเสนอไว้ในรูปที่ 7.33 ซึ่งแสดงเส้นทางเดินของอนุภาคของของไหลในแต่ละหน้าตัดที่ค่า $PR=0.625$, $BR=0.0625$ และ $Re=15,000$ ของกรณี (ก) $\alpha=60^\circ$ (ข) $\alpha=45^\circ$ ซึ่งทั้งสองกรณีนี้พบว่าให้ค่า Nu/Nu_0 ใกล้เคียงกัน แต่กรณี $\alpha=45^\circ$ มีค่า f/f_0 ต่ำกว่าจึงส่งผลให้ค่า TEF ของกรณี $\alpha=45^\circ$ สูงกว่ากรณี $\alpha=60^\circ$ โดยสามารถสังเกตเห็นได้ถึงความหนาแน่นหรือความเข้มข้นของกระแสนวนในบริเวณแกนการหมุนของแต่ละระนาบตัดขวางของการไหลของกรณี $\alpha=45^\circ$ มากกว่ากรณี $\alpha=60^\circ$ การที่สวมนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้



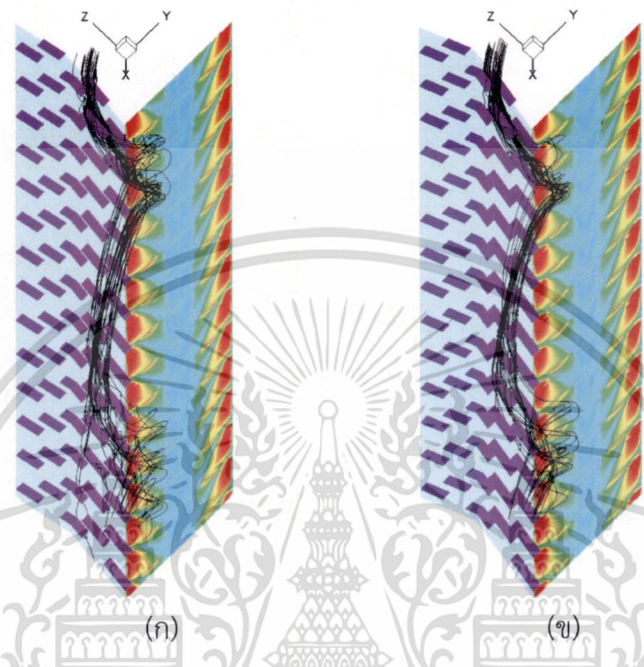
รูปที่ 7.33 เส้นกระแสในแต่ละหน้าตัดของที่ค่า $PR=0.625$, $BR=0.0625$ และ $Re=15,000$ ในกรณี (ก) $\alpha=60^\circ$ (ข) $\alpha=45^\circ$



รูปที่ 7.34 ทางเดินของอนุภาคที่ตกกระทบบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อน ที่ค่า $PR=0.625$, $BR=0.0625$ และ $Re=15,000$ ในกรณี (ก) $\alpha=60^\circ$ (ข) $\alpha=45^\circ$

และเมื่อพิจารณารูปที่ 7.34 ซึ่งได้แสดงทางเดินของอนุภาคที่ไหลตกกระทบบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อน สังเกตพบว่าเนื่องจากแนวเส้นกระแสที่ตกกระทบพื้นผิวให้ความร้อนของกรณี $\alpha=45^\circ$ นั้นเกิดจากมีแนวการไหลปะทะครีบบนที่บริเวณกลางท่อ แล้วไหลตกกระทบพื้นผิวให้ความร้อนที่อยู่ระหว่างครีบบนที่ติดกับพื้นผิวให้ความร้อนโดยตรง จึงส่งผลให้มีการกระจายค่าเลขนัสเซลท์เฉพาะที่บนพื้นผิวให้ความร้อนเป็นบริเวณกว้างกว่ากรณีครีบบน $\alpha=60^\circ$ เล็กน้อย ซึ่งกรณีครีบบน $\alpha=60^\circ$ นั้นมีเส้นกระแสบางส่วนไหลปะทะครีบบนที่แยกตัวออกมาก่อนจะไหลพุ่งชนพื้นผิวให้ความร้อน จึงเอกลักษณะเป็นเอกลักษณะวงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นสาเหตุให้ค่า f/f_0 มีค่าสูง และระยะการไหลตกกระทบของครีบทั้งสองกรณีแสดงไว้ในรูปที่ 7.35 ซึ่งพบว่าครีบทั้งสองกรณีมีระยะการไหลตกกระทบใกล้เคียงกัน แต่ครีบทำมุม $\alpha=45^\circ$ เมื่อตกกระทบบนพื้นผิวหุ้มฉนวนแล้วเบี่ยงเบนการไหลพุ่งเข้าชนพื้นผิวให้ความร้อน จะมีบริเวณของการกระจายตัวน้อยกว่าซึ่งสัมพันธ์กับความหนาแน่นหรือความเข้มของกระแสวน ในบริเวณแกนการหมุนของแต่ละระนาบตัดขวาง ตามที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 7.33



รูปที่ 7.35 ทางเดินของอนุภาคครีบรอบการหมุนที่ตกกระทบบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อน ที่ค่า $PR=0.625$, $BR=0.0625$ และ $Re=15,000$ ในกรณี (ก) $\alpha=60^\circ$ (ข) $\alpha=45^\circ$

จากผลการวิเคราะห์สามารถกล่าวโดยสรุปได้ว่าครีบที่มีค่า $BR=0.0625$, $PR=0.625$ และที่ค่า $\alpha=45^\circ$ มีความเหมาะสมต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสำหรับการไหลในช่องทางไหลสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยมีการจัดวางครีบแบบครีบตัววีแยกตัวซึ่งส่วนการไหลบนพื้นผิวหุ้มฉนวนซึ่งมีค่า TEF สูงที่สุดเท่ากับ 1.8 และถึงแม้ว่าการจัดวางครีบบนพื้นผิวหุ้มฉนวน มีจุดมุ่งหมายเพื่อสร้างการไหลตกกระทบบนพื้นผิวให้ความร้อนและทำให้มีการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในบริเวณมุมของท่อให้สูงขึ้น ซึ่งจากการศึกษาพบว่าการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้จริงในบริเวณดังกล่าว แต่ที่บริเวณแนวกึ่งกลางของพื้นผิวให้ความร้อนยังคงมีค่าการถ่ายเทความร้อนต่ำ เนื่องจากเกิดการไหลแยกตัวของกระแสวนในบริเวณนี้ และนอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบผลโดยรวมของค่า TEF ที่ได้รับกับกรณีการจัดวางครีบแบบครีบตัววีแยกตัวซึ่งส่วนการไหลบนพื้นผิวให้ความร้อนทั้งกรณีครีบจัตุรัสและครีบบางพบว่า การจัดวางครีบบนพื้นผิวให้ความร้อนให้ผลลัพธ์โดยรวมดีกว่าการจัดวางครีบบนพื้นผิวหุ้มฉนวน โดยเฉพาะกรณีครีบบางมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานจริงมากที่สุด ดังนั้นในบทถัดไปจะดำเนินการปรับปรุงกรณีการจัดวางครีบบางแบบครีบตัววีแยกตัวซึ่งส่วนการไหลบนพื้นผิวให้ความร้อนเพื่อเพิ่มค่า TEF ให้สูงยิ่งขึ้น

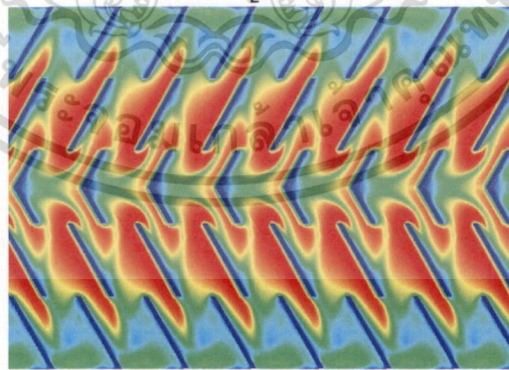
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 8

การปรับปรุงครีบบางรูปตัววีแยกตัวซี่สวนการไหลที่ติดตั้งบนพื้นผิวให้ความร้อน

จากการวิเคราะห์ที่ผ่านมา สำหรับการศึกษาการไหลผ่านครีบบางที่ติดตั้งบนพื้นผิวให้ความร้อน ในช่องทางไหลสี่เหลี่ยมจัตุรัส ได้ข้อสรุปว่าครีบบางมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานจริง มากกว่าครีบบางจัตุรัส แต่เมื่อพิจารณาในรายละเอียดถึงการกระจายค่าเลขนัสเซลล์เฉพาะที่ในบริเวณ พื้นผิวให้ความร้อนที่อยู่รอบๆ ครีบบางและใกล้กับผนังท่อหุ้มฉนวน สังเกตพบว่าค่าเลขนัสเซลล์เฉพาะที่มีค่าน้อยกว่าที่บริเวณแนวกลางท่อ ทั้งนี้เนื่องจากการไหลของของไหลในบริเวณนี้มีความเร็วต่ำ เพราะอยู่ใกล้กับมุมของท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส นอกจากนี้สำหรับครีบบางที่มีค่า BR ค่อนข้างสูง เช่นที่ $BR=0.05$ พบว่าในบริเวณด้านหลังครีบบางรูปตัววีจะมีค่าเลขนัสเซลล์เฉพาะที่ต่ำ โดยในบริเวณนี้สามารถสังเกตเห็นได้จากรูปที่ 8.1 ซึ่งเป็นรูปแสดงถึงการกระจายค่าเลขนัสเซลล์เฉพาะที่บนพื้นผิวให้ความร้อน ของกรณีการจัดวางครีบบางแบบครีบบางรูปตัววีแยกตัวซี่สวนการไหล ที่ค่า $BR=0.05$, $PR=0.1875$, $\alpha=60^\circ$ และ $Re=15,000$ ดังนั้นเพื่อเป็นการปรับปรุงการถ่ายเทความร้อนเพื่อให้ได้ค่า TEF ที่สูงขึ้น วิธีที่น่าจะช่วยแก้ปัญหานี้ได้คือการใช้วิธีปรับปรุงครีบบางในลักษณะต่างๆ โดยมีจุดประสงค์คือเพื่อเพิ่มค่า Nu/Nu_0 และลดค่า f/f_0 ซึ่งจะนำไปสู่ค่า TEF ที่เพิ่มสูงขึ้น สำหรับรายละเอียดของการวิเคราะห์นั้นจะศึกษาอิทธิพลของค่า BR โดยกำหนดให้ค่า $PR=0.1875$ และค่า $\alpha=60^\circ$ คงที่ ทั้งนี้จากการสังเกตในกรณีศึกษาที่ผ่านมาพบว่าค่า BR มีอิทธิพลต่อค่าการถ่ายเทความร้อนมากกว่าค่า PR

Nu : 0 23 46 70 93 116 139 162 186 209 232 255 279 302 325

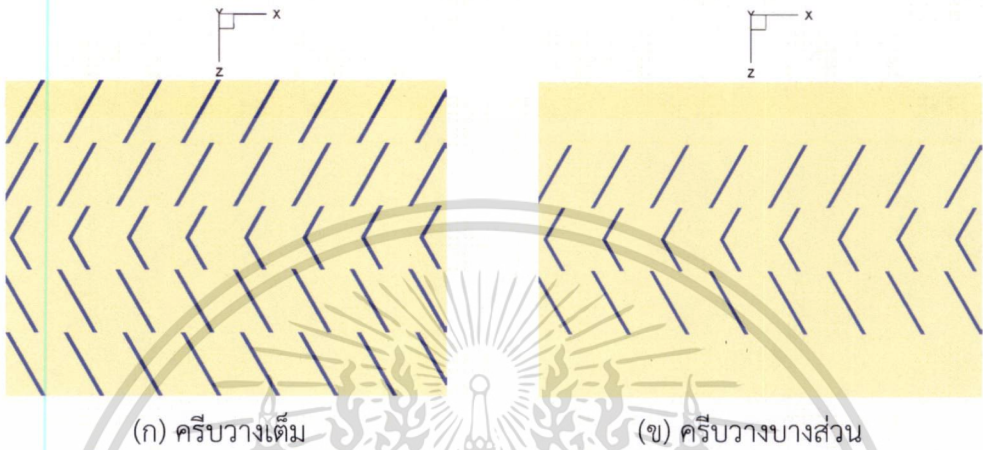


รูปที่ 8.1 การกระจายค่าเลขนัสเซลล์เฉพาะที่บนพื้นผิวให้ความร้อน ของการจัดวางครีบบางแบบครีบบางรูปตัววีแยกตัวซี่สวนการไหล ที่ค่า $BR=0.05$, $PR=0.1875$, $\alpha=60^\circ$ และที่ $Re=15,000$

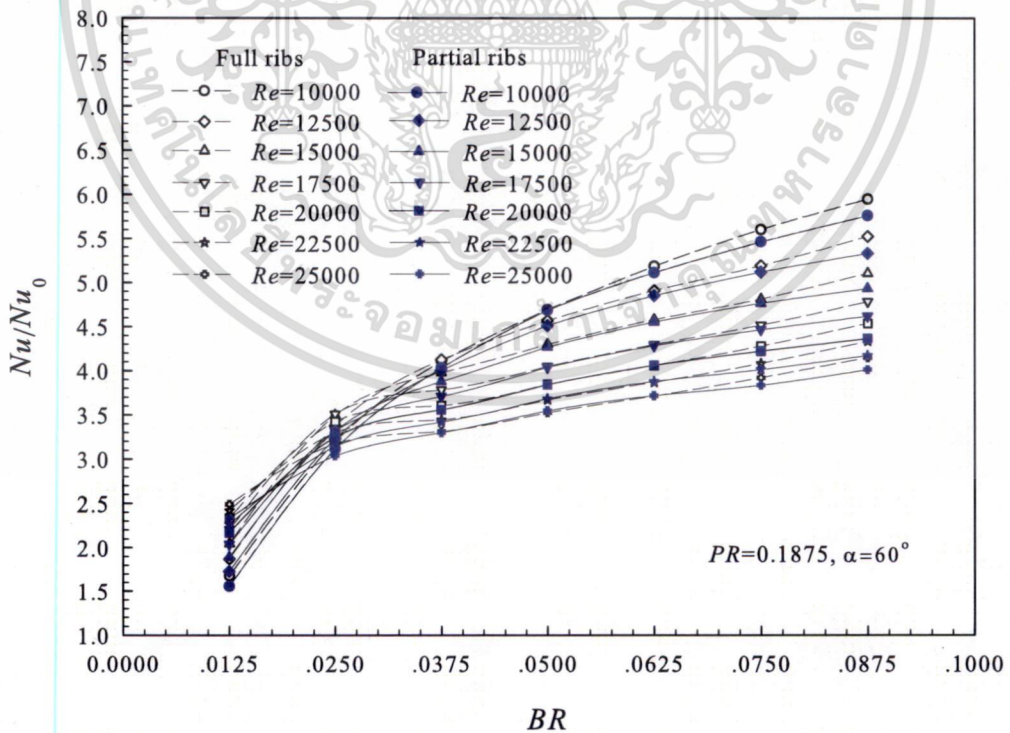
8.1 การปรับปรุงครีบบางโดยการลดจำนวนครีบบาง

การปรับปรุงครีบบางวิธีแรกนั้นได้แนวคิดจากการพิจารณารูปที่ 8.1 ซึ่งสังเกตพบว่าครีบบางที่อยู่ในบริเวณใกล้กับผนังท่อหุ้มฉนวนนั้น ค่าเลขนัสเซลล์เฉพาะที่มีค่าน้อยกว่าที่บริเวณแนวกลางท่อ ดังนั้นไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าหากนำครีบบทึบที่อยู่นี้ออกไป ดังแสดงในรูปที่ 8.2 (ข) น่าจะส่งผลดีต่อค่า TEF ซึ่งในรูปที่ 8.2 ได้แสดงการการจจัดวางครีบบทึบครีบบทึบตัววีแยกตัวซึ่งส่วนการไหล โดยที่แบบ (ก) คือการจจัดเรียงแบบครีบบางเต็ม (full ribs) ซึ่งคือการจจัดเรียงครีบบทึบแบบเต็มและ (ข) คือการจจัดเรียงแบบครีบบางบางส่วน (partial ribs) ซึ่งเป็นการนำครีบบทึบที่อยู่นี้บริเวณติดกับผนังท่อหุ้มฉนวนออกไป และยังคงเหลือครีบบทึบที่อยู่ในแนวกึ่งกลางพื้นผิวให้ความร้อน



รูปที่ 8.2 การจจัดวางครีบบทึบครีบบทึบตัววีแยกตัวซึ่งส่วนการไหลแบบ (ก) ครีบบางเต็ม (ข) ครีบบางบางส่วน

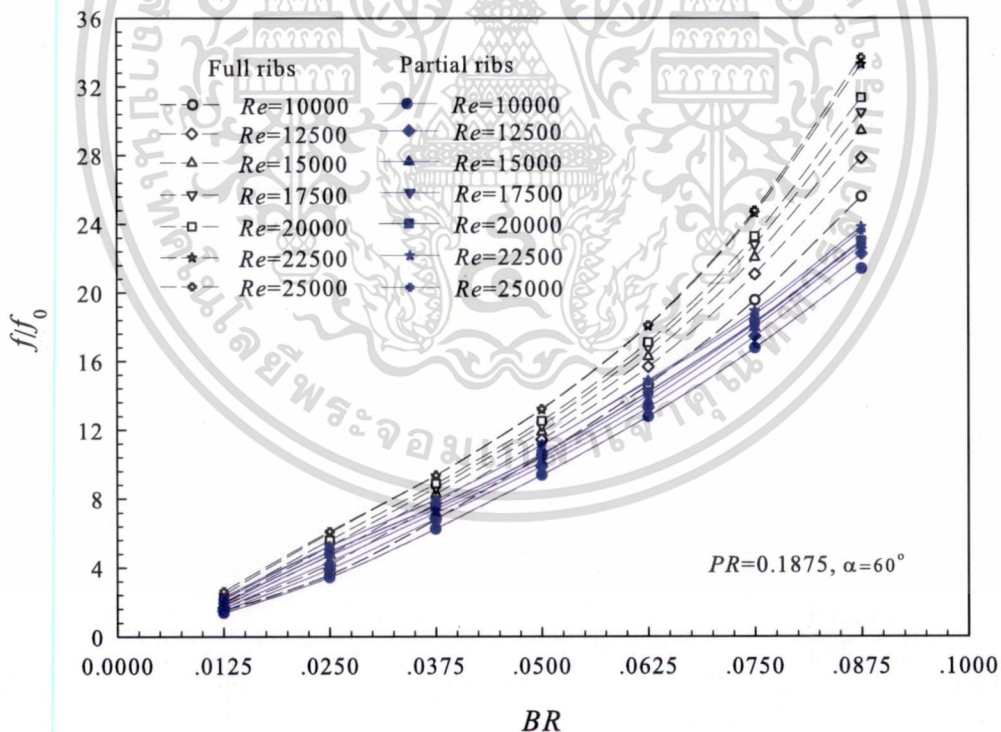


รูปที่ 8.3 การเปลี่ยนแปลงค่า Nu/Nu_0 กับค่า BR ตั้งแต่ 0.0125 ถึง 0.0875 ที่ค่า $PR=0.1875$ $\alpha=60^\circ$ เปรียบเทียบระหว่างครีบบทึบครีบบทึบตัววีแยกตัวและแบบครีบบางบางส่วน

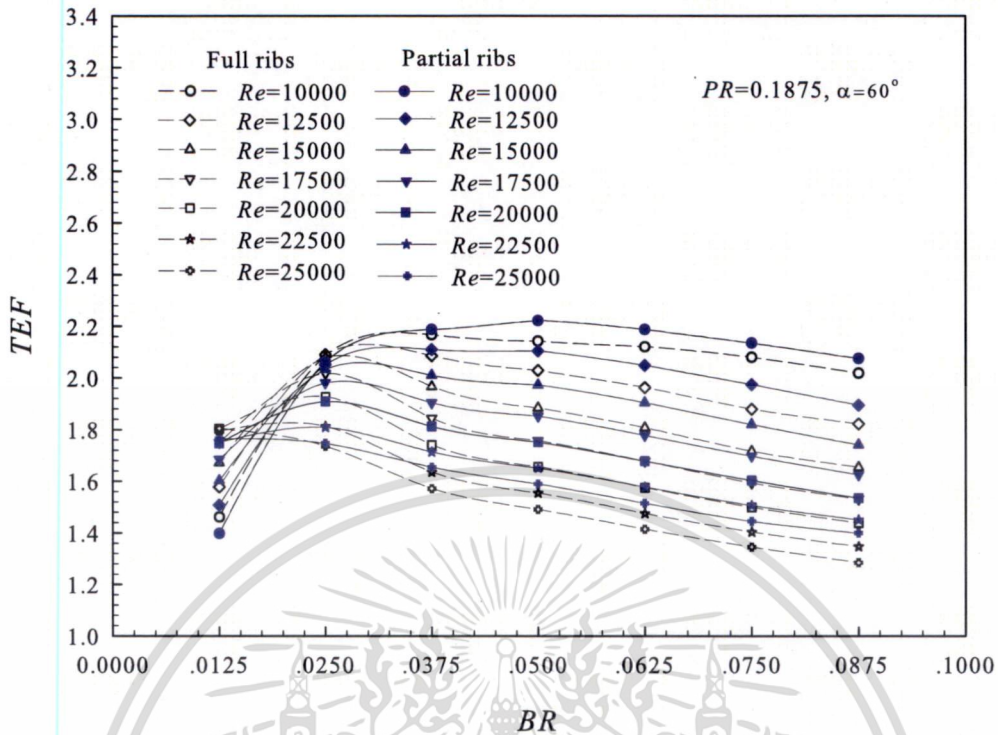
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้เห็นว่าไม่เหมาะสมขอคืนเอกสารนี้ทันที ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการเปรียบเทียบอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงค่า BR ของการปรับปรุงครีบแบบครีบวางเต็มและแบบครีบวางบางส่วน ที่ส่งผลต่อค่าการถ่ายเทความร้อน พิจารณาได้จากรูปที่ 8.3 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่า Nu/Nu_0 ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่า BR ศึกษาในช่วงที่ BR มีค่าเท่ากับ 0.0125 ถึง 0.0875 และพิจารณาค่า Re ในช่วง 10,000 ถึง 25,000 ในภาพรวมพบว่าการจัดวางครีบแบบ ครีบวางเต็มและแบบครีบวางบางส่วน ให้ค่า Nu/Nu_0 ใกล้เคียงกัน แต่การปรับปรุงครีบแบบครีบวางเต็ม มีค่าสูงกว่าเล็กน้อย โดยเฉพาะที่ค่า BR สูงและ Re ต่ำ และทั้งสองกรณีมีการเปลี่ยนแปลงความชันของค่า Nu/Nu_0 ในลักษณะที่มีแนวโน้มลดลงที่ค่า $BR=0.025$

ผลการเปรียบเทียบอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงค่า BR ของการปรับปรุงครีบแบบครีบวางเต็มและแบบครีบวางบางส่วน ที่ส่งผลต่อค่าตัวประกอบความเสียดทาน พิจารณาได้จากรูปที่ 8.4 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่า f/f_0 ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่า BR ในภาพรวมเห็นได้ชัดว่า ค่า f/f_0 ของการปรับปรุงครีบแบบครีบวางบางส่วนต่ำกว่าแบบครีบวางเต็ม โดยเฉพาะครีบที่มีค่า BR สูง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงครีบโดยการนำครีบที่อยู่บริเวณใกล้กับผนังท่อออกไปจะช่วยลดค่า f/f_0 ได้อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อพิจารณารูปที่ 8.4 โดยละเอียดพบว่า ที่ค่า $BR=0.0125$ ค่า f/f_0 ทั้งสองกรณีใกล้เคียงกัน แต่เมื่อค่า BR เพิ่มมากขึ้น ค่า f/f_0 เริ่มมีความแตกต่างกันมากขึ้นโดยมีค่าความแตกต่างกันสูงที่สุดที่ $BR=0.0875$ เมื่อเฉลี่ยค่า f/f_0 ตลอดช่วง Re ที่พิจารณาของทั้งสองกรณีพบว่า มีค่าแตกต่างกันประมาณ 24.3%



รูปที่ 8.4 การเปลี่ยนแปลงค่า f/f_0 กับค่า BR ตั้งแต่ 0.0125 ถึง 0.0875 ที่ค่า $PR=0.1875$, $\alpha=60^\circ$ เปรียบเทียบระหว่างครีบแบบครีบวางเต็มและแบบครีบวางบางส่วน



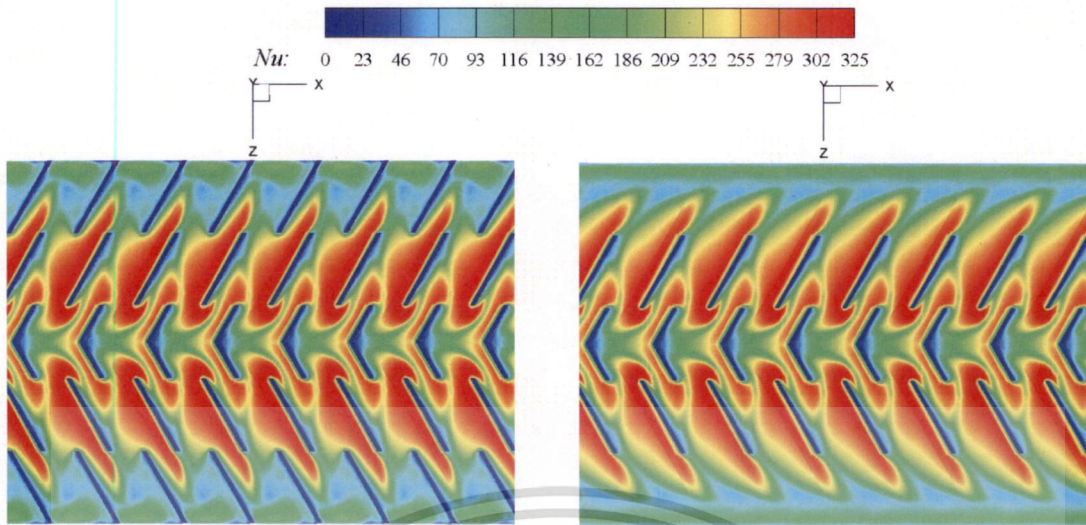
รูปที่ 8.5 การเปลี่ยนแปลงค่า TEF กับค่า BR ตั้งแต่ 0.0125 ถึง 0.0875 ที่ค่า $PR=0.1875$, $\alpha=60^\circ$ เปรียบเทียบระหว่างครีบแบบครีบบางเต็มและแบบครีบบางบางส่วน

สำหรับผลการเปรียบเทียบอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงค่า BR ของการปรับปรุงครีบแบบครีบบางเต็มและแบบครีบบางบางส่วน ที่ส่งผลต่อค่า TEF พิจารณาได้จากรูปที่ 8.5 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่า TEF ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่า BR ในภาพรวมเห็นได้ชัดว่าค่า TEF ของการปรับปรุงครีบแบบครีบบางบางส่วน สูงกว่าแบบครีบบางเต็ม โดยเฉพาะครีบที่มีค่า BR สูง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงครีบโดยการนำครีบที่อยู่บริเวณใกล้กับผนังท่อออกไปจะช่วยเพิ่มค่า TEF ได้ ทั้งนี้เนื่องจากค่า Nu/Nu_0 เกือบจะไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมแต่ค่า f/f_0 ลดลงจึงส่งผลให้ค่า TEF เพิ่มสูงขึ้น เมื่อพิจารณารูปที่ 8.5 โดยละเอียดพบว่า สำหรับกรณีของการปรับปรุงครีบแบบครีบบางบางส่วน ที่ค่า $BR=0.05$ มีค่า TEF สูงที่สุดเท่ากับ 2.22 ในขณะที่การจัดวางครีบแบบครีบบางเต็ม ที่ค่า $BR=0.0375$ มีค่า TEF สูงที่สุดเท่ากับ 2.17 นอกจากนี้ในช่วงที่ค่า BR และ Re มีค่าสูง ค่า TEF ของการจัดวางครีบทั้งสองกรณียังมีค่าแตกต่างกันมากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงครีบแบบครีบบางบางส่วนเหมาะสมสำหรับค่า BR และ Re ในช่วงดังกล่าวนี้

พิจารณารูปที่ 8.6 ซึ่งได้แสดงการเปรียบเทียบการกระจายค่าเลขนัสเซลล์เฉพาะที่บนพื้นผิวให้ความร้อนของการจัดวางครีบแบบครีบบางเต็มและแบบครีบบางบางส่วน ที่ค่า $BR=0.05$, $PR=0.1875$, $\alpha=60^\circ$ และ $Re=15,000$ จะเห็นได้ว่าการนำครีบที่อยู่ในบริเวณติดกับผนังท่อหุ้มฉนวนออกไป จะช่วยให้ค่าเลขนัสเซลล์เฉพาะที่ ที่อยู่บริเวณปลายครีบที่เหลื่อและใกล้กับผนังท่อ มีการกระจายตัวดีและมีบริเวณกว้างมากขึ้น แต่ในบริเวณใกล้กับพื้นผิวหุ้มฉนวนสังเกตเห็นว่า ค่าเลขนัสเซลล์เฉพาะที่ของการจัดวางครีบแบบครีบบางเต็มมีค่าสูงกว่าแบบครีบบางบางส่วน ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้ค่า Nu/Nu_0 ของทั้งสองกรณีมีความแตกต่างกันไม่มากนัก

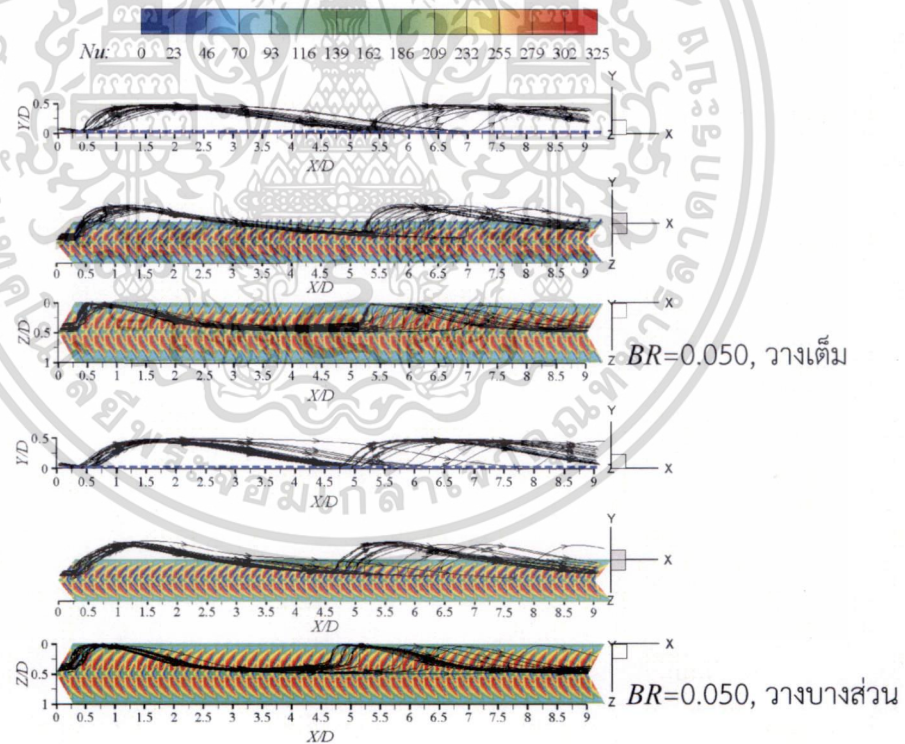
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ครีบบางเต็ม (ข) ครีบบางบางส่วน

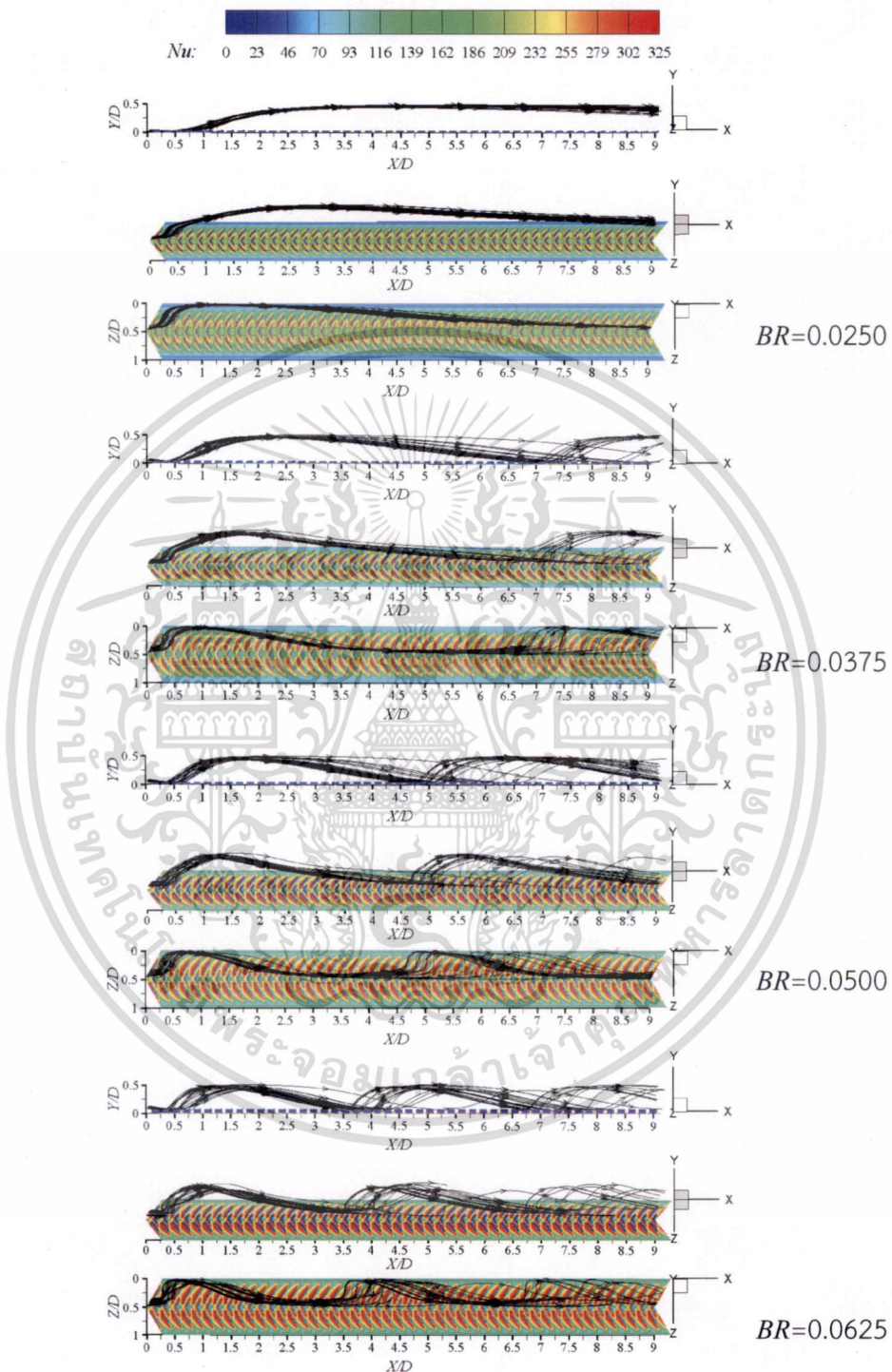
รูปที่ 8.6 การกระจายค่าเลขนัสเซลล์เฉพาะที่บนพื้นผิวให้ความร้อนของการจัดวางครีบบางแบบครีบบางเต็มและแบบครีบบางบางส่วน ที่ค่า $BR=0.05$, $PR=0.1875$, $\alpha=60^\circ$ และ $Re=15,000$



รูปที่ 8.7 ทางเดินอนุภาคและการไหลตกกระทบพื้นผิวให้ความร้อน ของการจัดวางครีบบางแบบครีบบางเต็มและแบบครีบบางบางส่วน ที่ค่า $BR=0.05$, $PR=0.1875$, $\alpha=60^\circ$ และ $Re=15,000$

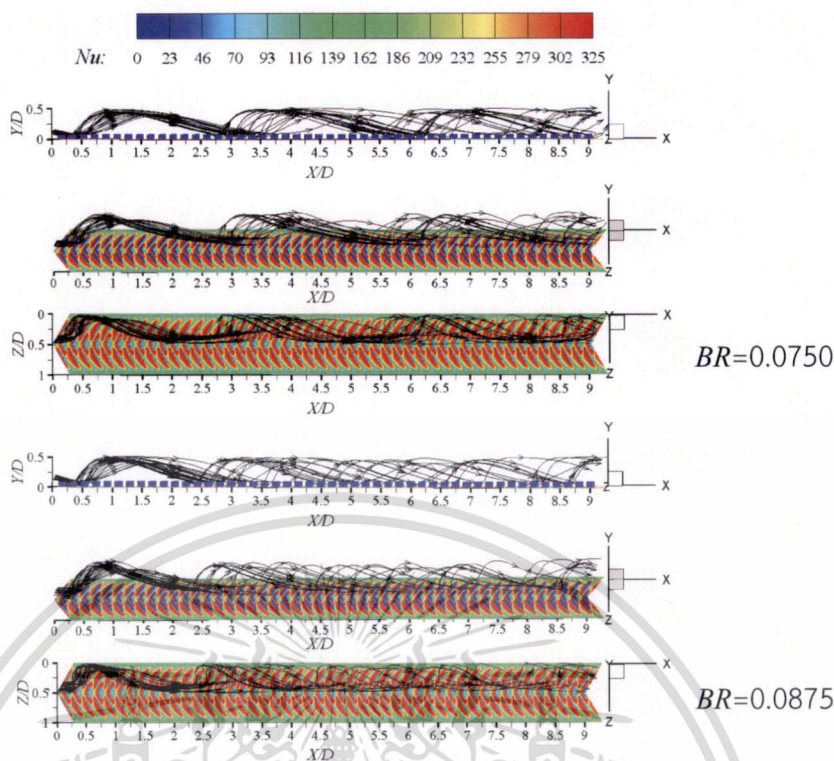
สำหรับเส้นทางเดินอนุภาคและการไหลตกกระทบพื้นผิวให้ความร้อน ที่แสดงค่าเลขนัสเซลล์เฉพาะที่ของการจัดวางครีบบางแบบครีบบางเต็ม และแบบครีบบางบางส่วนที่ค่า $BR=0.05$, $PR=0.1875$, $\alpha=60^\circ$ และ $Re=15,000$ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 8.7 ซึ่งสังเกตเห็นว่าการจัดวางครีบบางแบบ ครีบบางบางส่วนไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีระยะเวลาไหลตกกระทบในหนึ่งวงรอบสั้นกว่าแบบ ครีบบางเต็ม เล็กน้อยแต่เนื่องจากมีจำนวนครีบบทที่ ขวางการไหลมากกว่าจึงส่งผลให้หมีค่า f/f_0 ที่สูงกว่า



รูปที่ 8.8 ทางเดินอนุภาคและการไหลตกกระทบพื้นผิวให้ความร้อนของการเปลี่ยนแปลงค่า BR ตั้งแต่ 0.0250 ถึง 0.0875 ที่ค่า $PR=0.1875$, $\alpha=60^\circ$ และ $Re=15,000$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



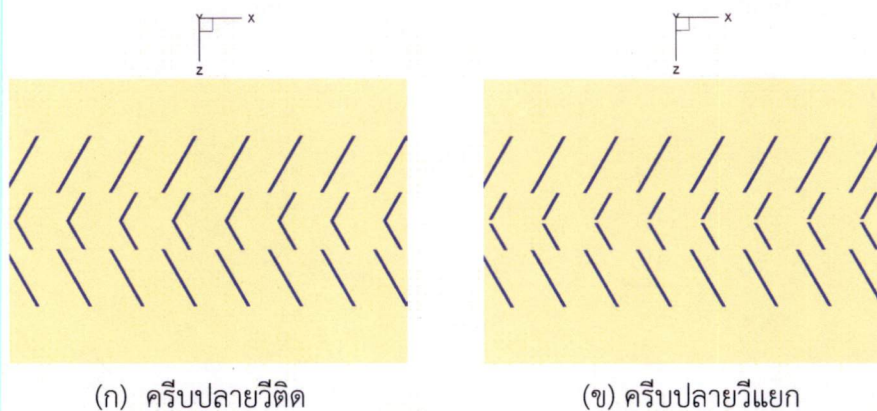
รูปที่ 8.8 ทางเดินอนุภาคและการไหลตกกระทบพื้นผิวให้ความร้อนของการเปลี่ยนแปลงค่า BR ตั้งแต่ 0.0250 ถึง 0.0875 ที่ค่า $PR=0.1875$, $\alpha=60^\circ$ และ $Re=15,000$ (ต่อ)

นอกจากนี้การแสดงผลทางเดินอนุภาค และการไหลตกกระทบพื้นผิวให้ความร้อนของการจัดวางครีบบางส่วน ที่ค่า $PR=0.1875$, $\alpha=60^\circ$ และ $Re=15,000$ ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าต่างๆ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 8.8 โดยภาพรวมพบว่าเมื่อครีบบางส่วนมีค่า BR มากขึ้นระยะการไหลตกกระทบพื้นผิวยิ่งสั้นลง และค่าการกระจายเลขนัสเซลท์เฉพาะที่ยิ่งมีค่าสูงขึ้น

8.2 การปรับปรุงครีบบนการลดจำนวนครีบรวมกับแบบเปิดช่อง

จากการปรับปรุงครีบบนวิธีแรก โดยการลดจำนวนครีบบนบริเวณที่ติดกับผนังท่อหุ้มฉนวนนั้น กล่าวโดยสรุปได้ว่าการปรับปรุงครีบบนลักษณะนี้ส่งผลให้ค่า f/f_0 ลดลงในขณะที่ค่า Nu/Nu_0 ใกล้เคียงค่าเดิมจึงส่งผลให้ค่า TEF เพิ่มสูงขึ้น และพบว่าการนำครีบบนที่อยู่ในบริเวณติดกับผนังท่อหุ้มฉนวนออกไป จะช่วยให้ค่าเลขนัสเซลท์เฉพาะที่ ที่อยู่บริเวณปลายครีบบนที่ใกล้กับผนังท่อมีการกระจายตัวดี และมีบริเวณกว้างมากขึ้น แต่ที่บริเวณด้านหลังครีบบนรูปตัววีที่อยู่ในแนวกลางท่อมีค่าเลขนัสเซลท์เฉพาะที่ต่ำกว่าที่บริเวณอื่น ดังนั้นการปรับปรุงครีบบนแบบถัดไปจะเพิ่มค่าเลขนัสเซลท์เฉพาะที่ในบริเวณนี้ให้สูงขึ้นโดยการเปิดช่อง หรือการแยกครีบบนรูปตัววีออกจากกันเท่ากับความหนาของครีบบน ดังได้แสดงไว้ในรูปที่ 8.9 (ข) ซึ่งรูปที่ 8.9 แสดงถึงการปรับปรุงการจัดวางครีบบนในกรณีของครีบบางส่วนซึ่งแบ่งได้เป็น (ก) ครีบบนปลายวิติด (attached V-tip) ซึ่งเป็นครีบบางส่วนแบบเดิม และ (ข) ครีบบนปลายวีแยก (detached V-tip)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

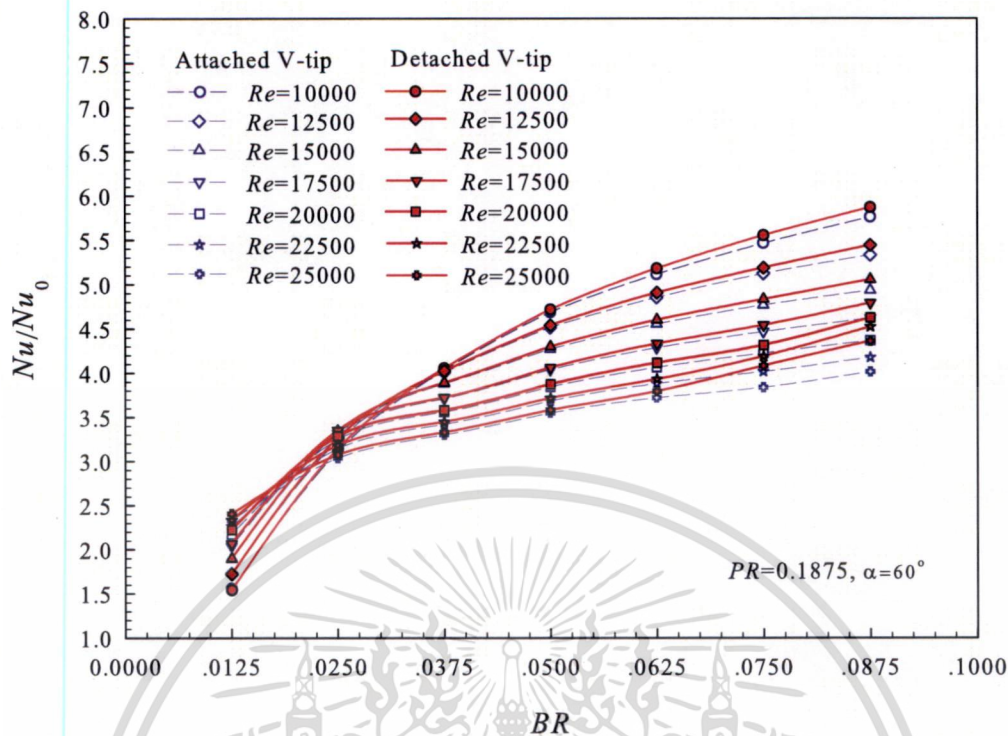


รูปที่ 8.9 การปรับปรุงการจัดวางครีบบน (ก) ครีบลายวีติด (ข) ครีบลายวีแยก

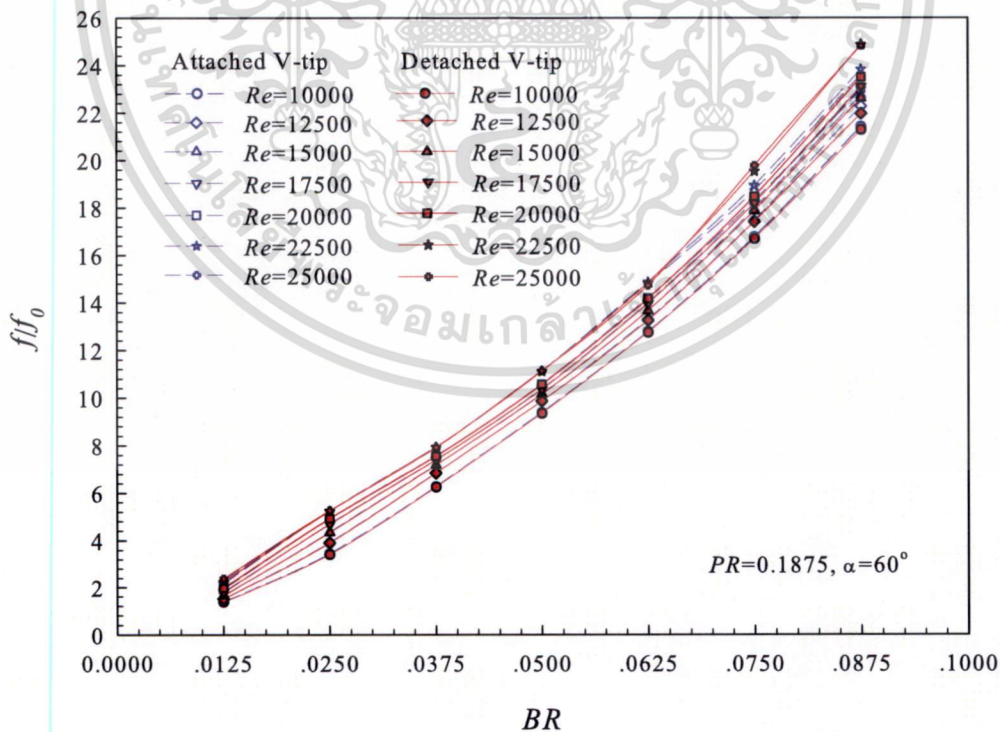
ผลการเปรียบเทียบอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงค่า BR ของการปรับปรุงครีบบนแบบครีบลายวีติดและแบบครีบลายวีแยก ที่ส่งผลต่อค่าการถ่ายเทความร้อน พิจารณาได้จากรูปที่ 8.10 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่า Nu/Nu_0 ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่า BR ศึกษาในช่วง BR มีค่าเท่ากับ 0.0125 ถึง 0.0875 และค่า Re ในช่วง 10,000 ถึง 25,000 ในภาพรวมพบว่าการจัดวางครีบบนแบบครีบลายวีติดและแบบครีบลายวีแยก ให้ค่า Nu/Nu_0 ใกล้เคียงกัน แต่การปรับปรุงครีบบนแบบครีบลายวีแยกสูงกว่าครีบลายวีติดที่ค่า BR สูง และยิ่งแตกต่างกันมากขึ้นที่ค่า BR และ Re สูงๆ ซึ่งที่ค่า $BR=0.0875$ และ $Re=25,000$ ค่า Nu/Nu_0 ของครีบบนแบบครีบลายวีแยกสูงกว่าแบบครีบลายวีติดอยู่ประมาณ 10% และทั้งสองกรณีมีการเปลี่ยนแปลงความชันของค่า Nu/Nu_0 ในลักษณะที่มีแนวโน้มลดลงที่ค่า $BR=0.025$

ผลการเปรียบเทียบอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงค่า BR ของการปรับปรุงครีบบนแบบครีบลายวีติดและแบบครีบลายวีแยก ที่ส่งผลต่อค่าตัวประกอบความเสียดทาน พิจารณาได้จากรูปที่ 8.11 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่า f/f_0 ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่า BR ในภาพรวมพบค่า f/f_0 ของการปรับปรุงครีบบนทั้งสองกรณีไม่แตกต่างกัน แต่ที่ค่า BR และ Re สูงๆ นั้นการปรับปรุงครีบบนแบบครีบลายวีแยก สูงกว่าแบบครีบลายวีติดเล็กน้อย

สำหรับผลการเปรียบเทียบอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงค่า BR ของการปรับปรุงครีบบนแบบครีบลายวีติดและแบบครีบลายวีแยก ที่ส่งผลต่อค่า TEF พิจารณาได้จากรูปที่ 8.12 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่า TEF ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่า BR ในภาพรวมพบค่า TEF ของการปรับปรุงครีบบนแบบครีบลายวีแยกสูงกว่าแบบครีบลายวีติดเล็กน้อย โดยเฉพาะครีบบนที่มีค่า BR และ Re สูง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงครีบบนโดยการแยกครีบบนรูปตัววีออกจากกันส่งผลไปในทางที่ดีขึ้น เมื่อพิจารณารูปที่ 8.12 โดยละเอียดพบว่า สำหรับกรณีของการปรับปรุงครีบบนแบบครีบลายวีแยก ที่ค่า $BR=0.05$ มีค่า TEF สูงที่สุดเท่ากับ 2.24 นอกจากนี้ในช่วงที่ค่า BR และ Re มีค่าสูง ค่า TEF ของการจัดวางครีบบนทั้งสองกรณียังมีค่าแตกต่างกันมากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงครีบบนแบบครีบลายวีแยก เหมาะสำหรับค่า BR และ Re ในช่วงดังกล่าวนี้



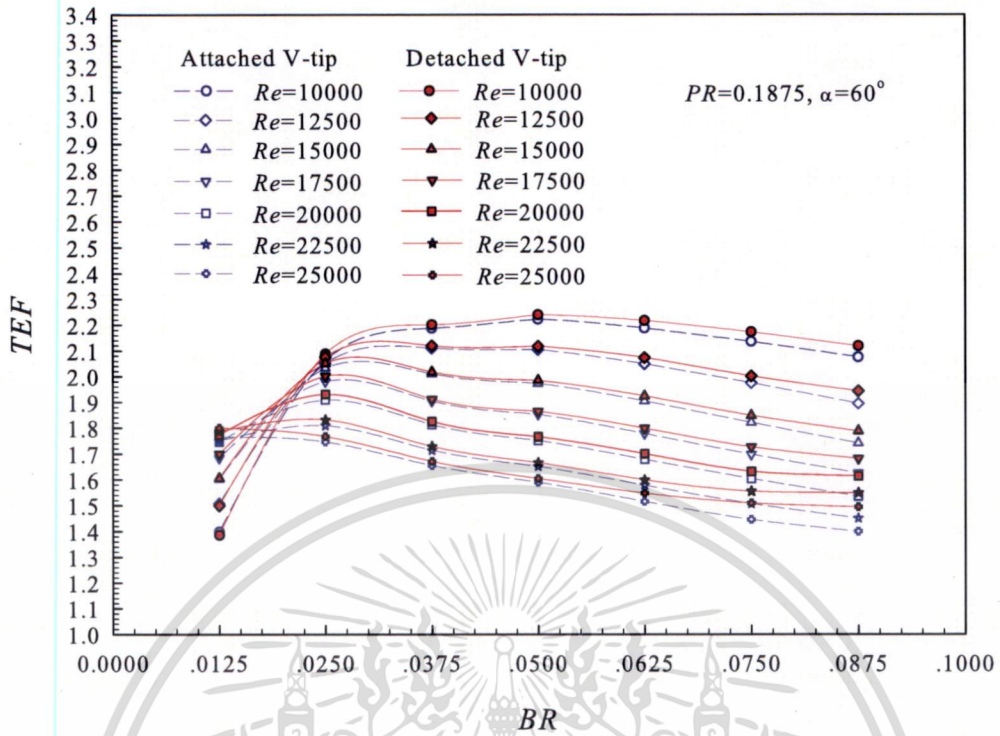
รูปที่ 8.10 การเปลี่ยนแปลงค่า Nu/Nu_0 กับค่า BR ตั้งแต่ 0.0125 ถึง 0.0875 ที่ค่า $PR=0.1875$ $\alpha=60^\circ$ เปรียบเทียบระหว่างครีบบนแบบครีบบลายวีติดและแบบครีบบลายวีแยก



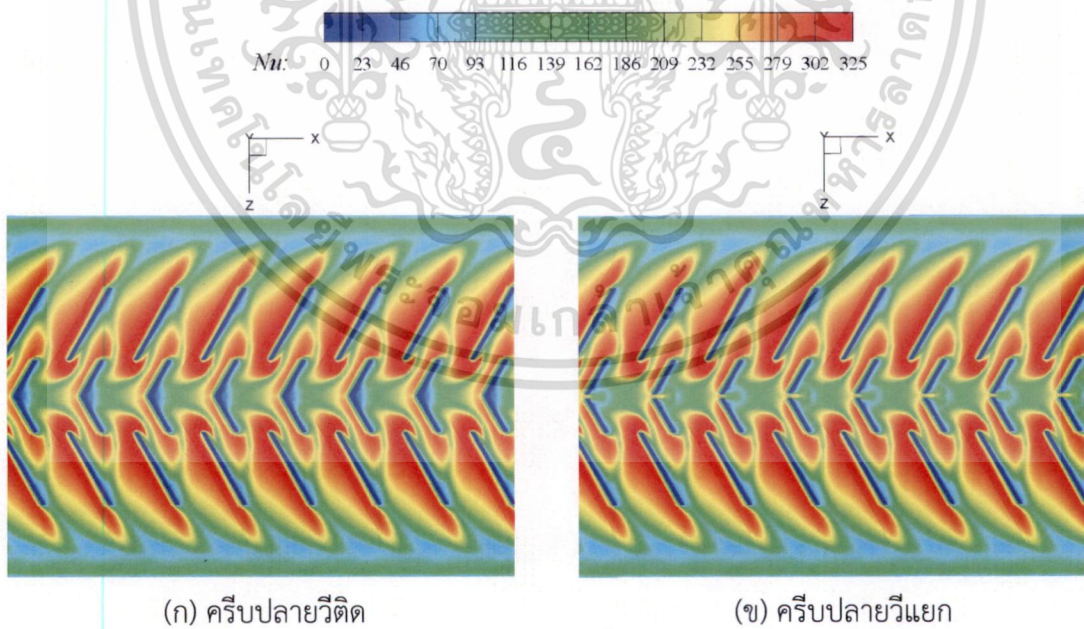
รูปที่ 8.11 การเปลี่ยนแปลงค่า f/f_0 กับค่า BR ตั้งแต่ 0.0125 ถึง 0.0875 ที่ค่า $PR=0.1875$ $\alpha=60^\circ$

เปรียบเทียบระหว่างครีบบนแบบครีบบลายวีติดและแบบครีบบลายวีแยก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับงานวิจัยในชื่อของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.12 การเปลี่ยนแปลงค่า TEF กับค่า BR ตั้งแต่ 0.0125 ถึง 0.0875 ที่ $PR=0.1875$ $\alpha=60^\circ$ เปรียบเทียบระหว่างครีบบนแบบครีบบนปลายวีติดและแบบครีบบนปลายวีแยก

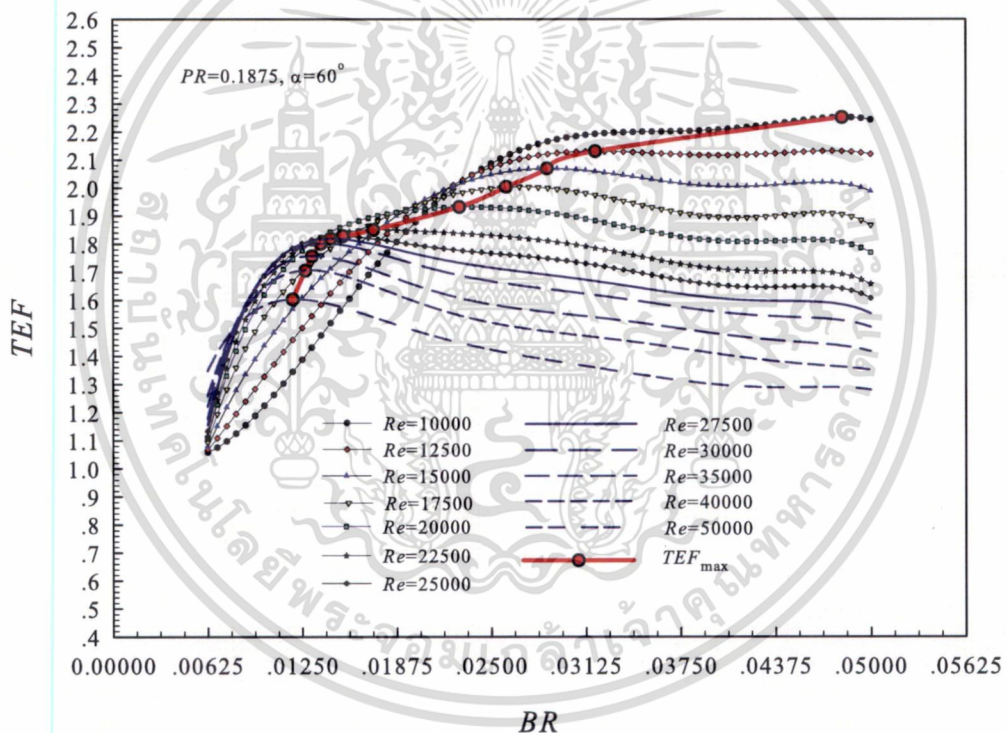


รูปที่ 8.13 การกระจายค่าเลขนัสเซิลท์เฉพาะที่บนพื้นผิวให้ความร้อน ของการจัดวางครีบบนแบบครีบบนปลายวีติดและแบบครีบบนปลายวีแยกที่ $BR=0.05$, $PR=0.1875$, $\alpha=60^\circ$ และ $Re=15,000$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณารูปที่ 8.13 ซึ่งได้แสดงการเปรียบเทียบการกระจายค่าเลขนัสเซลล์เฉพาะที่บนพื้นผิวให้ความร้อนของการจัดวางครีบบนแบบครีบบลายวีติดและแบบครีบบลายวีแยก ที่ค่า $BR=0.05$, $PR=0.1875$, $\alpha=60^\circ$ และ $Re=15,000$ จะเห็นได้ว่าการแยกครีบบรูปตัววีออกจากกัน จะช่วยให้ค่าเลขนัสเซลล์เฉพาะที่ ที่อยู่บริเวณด้านหลังครีบบรูปตัววีมีค่าสูงขึ้น และเหมาะสมกับครีบบรรณที่มีค่า BR และ Re สูง

อิทธิพลของค่า BR ที่ส่งผลต่อค่า TEF พิจารณาได้จากรูปที่ 8.14 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า TEF ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่า BR ที่ค่า $PR=0.1875$ และ $\alpha=60^\circ$ โดยขยายการพิจารณาค่า Re ในช่วง 10,000 ถึง 50,000 และได้แสดงค่าสูงสุดของค่า TEF_{max} ในแต่ละค่าของ Re และ BR ในรูปของเส้นกราฟ ในภาพรวมสังเกตเห็นว่า เมื่อ Re เพิ่มมากขึ้นค่า TEF_{max} มีแนวโน้มลดลงและค่า BR ที่ให้ค่า TEF_{max} ในแต่ละค่าของ Re มีแนวโน้มลดลงด้วย ซึ่งเมื่อพิจารณาในรายละเอียดพบว่า ที่ $Re=10,000$ มีค่า TEF_{max} เท่ากับ 2.24 ที่ค่า BR ประมาณ 0.048 และที่ $Re=50,000$ มีค่า TEF_{max} ต่ำที่สุดประมาณ 1.60 ที่ค่า $BR=0.012$



รูปที่ 8.14 การกระจายค่า TEF และ TEF_{max} ของการจัดวางครีบบนแบบครีบบลายวีแยก ที่ $PR=0.1875$ และที่ค่า $\alpha=60^\circ$

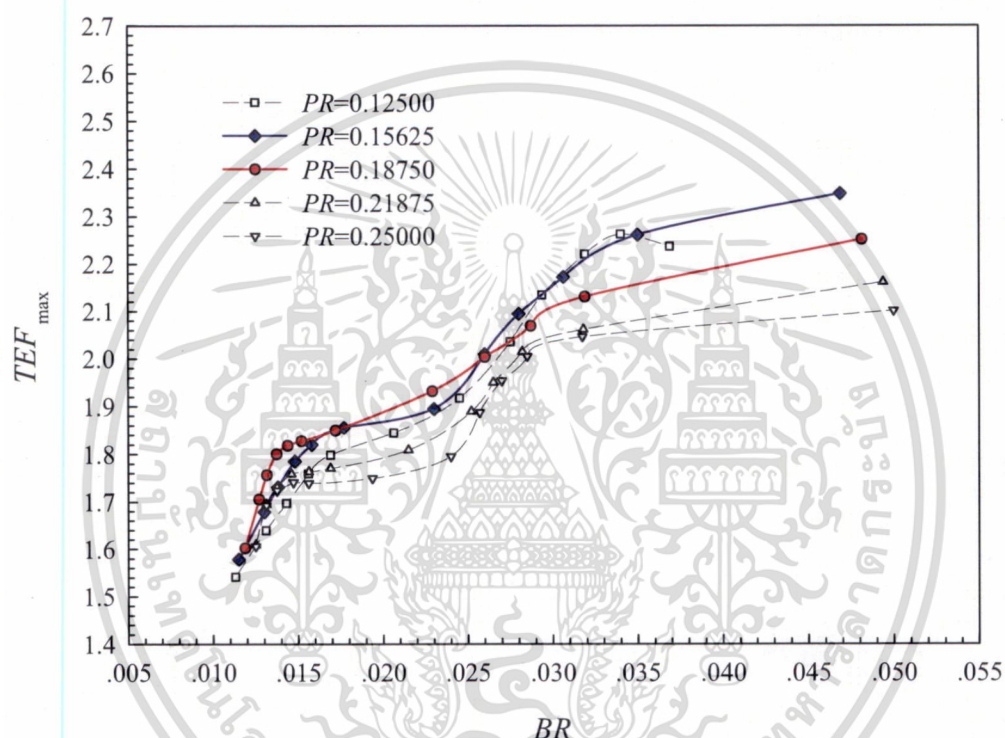
8.3 อิทธิพลของค่า PR ของการปรับปรุงครีบบนโดยการลดจำนวนครีบบนและแบบเปิดช่อง

ในหัวข้อที่ผ่านมาได้แสดงถึงการปรับปรุงครีบบนโดยการลดจำนวนครีบบนที่อยู่ในบริเวณที่ติดกับผนังท่อหุ้มฉนวนร่วมกับการการแยกครีบบนรูปตัววีออกจากกัน ของการจัดวางครีบบนแบบครีบบนตัววีแยกตัว ซึ่งส่วนการไหล ที่ค่า $PR=0.1875$ และ $\alpha=60^\circ$ โดยศึกษาถึงอิทธิพลของค่า BR ที่มีอิทธิพลต่อค่าตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งสามารถกล่าวโดยสรุปได้ว่า การปรับปรุงครีบบนดังกล่าวให้ลักษณะที่ดีของการเพิ่มค่า TEF แต่เมื่อมาพิจารณาโดยละเอียดพบว่าค่า PR ที่ใช้ในการวิเคราะห์นั้นเป็นค่าที่เหมาะสม

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

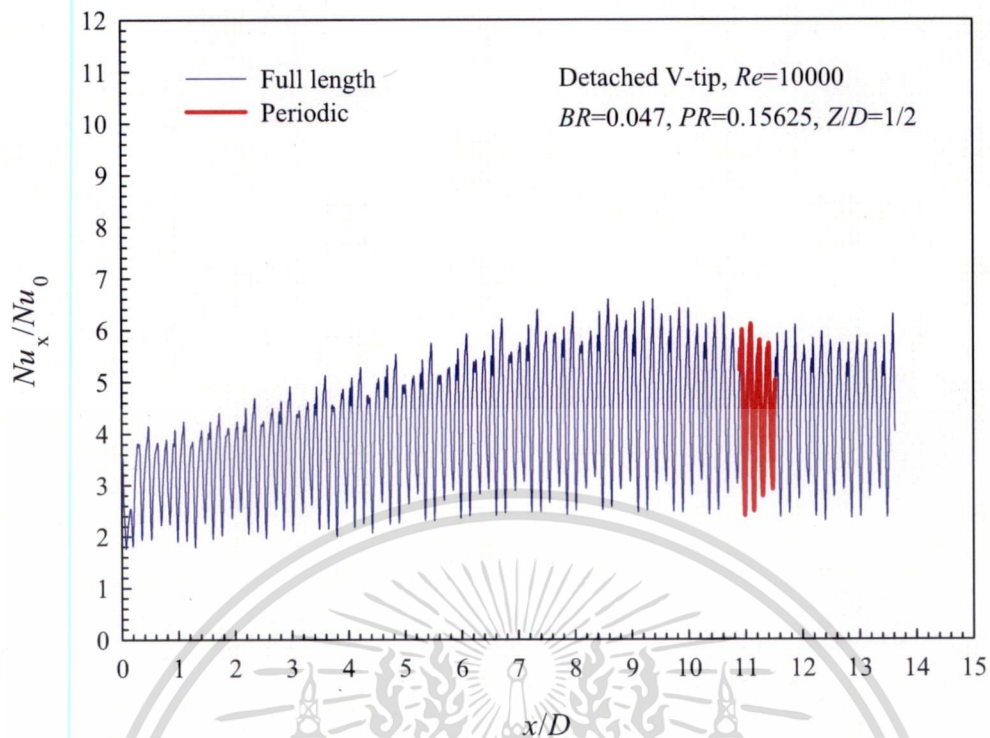
สำหรับกรณีที่ยังไม่ได้มีการปรับปรุงครีบบ ซึ่งก่อให้เกิดข้อสงสัยว่าค่า $PR=0.1875$ นี้เหมาะสมที่สุด สำหรับการใช้กับครีบบที่มีการปรับปรุงแล้วหรือไม่ ดังนั้นเพื่อเป็นการคลายข้อสงสัยดังกล่าวจึงต้อง ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของค่า PR สำหรับกรณีการปรับปรุงครีบบข้างต้น เพื่อให้ได้ค่า PR ที่เหมาะสม ที่สุด

สำหรับการศึกษาถึงอิทธิพลของค่า PR ในกรณีการปรับปรุงครีบบนั้นจะกำหนดให้ค่ามุมปะทะ $\alpha=60^\circ$ เป็นค่าคงที่และวิเคราะห์ในช่วงค่า PR เท่ากับ 0.125, 0.15625, 0.1875, 0.21875 และ 0.25 โดยในแต่ละค่า PR ที่ศึกษาจะมีการเปลี่ยนแปลงค่า BR เพื่อให้ได้ค่า TEF ที่มีค่าสูงสุด และ Re ที่ศึกษาอยู่ในช่วง 10,000 ถึง 25,000

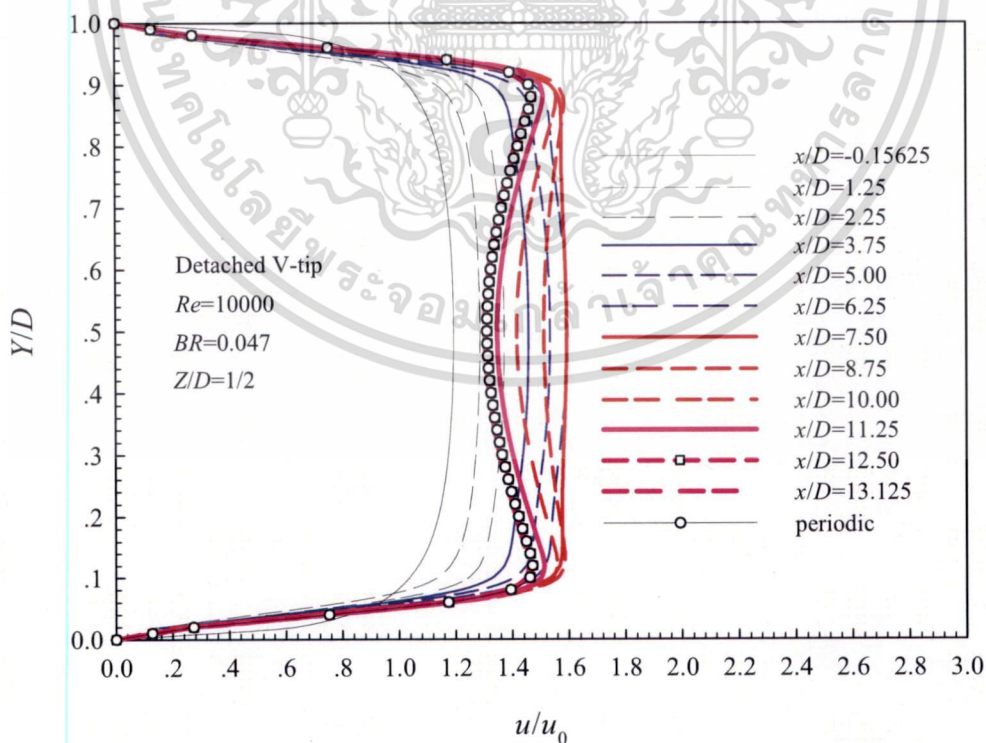


รูปที่ 8.15 การเปรียบเทียบการกระจายค่า TEF_{max} ของการปรับปรุงครีบบแบบปลายวีแยก ที่มีการ เปลี่ยนค่า PR ตั้งแต่ 0.125 ถึง 0.250 ในช่วงค่า BR ต่างๆ ที่ค่า $\alpha=60^\circ$

อิทธิพลของค่า BR ที่ส่งผลต่อค่า TEF_{max} ในแต่ละค่าของ PR พิจารณาได้จากรูปที่ 8.15 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า TEF_{max} ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่า BR ที่ค่า PR ตั้งแต่ 0.125 ถึง 0.250 และ $\alpha=60^\circ$ โดยพิจารณาค่า Re ในช่วง 10,000 ถึง 50,000 ของการปรับปรุงครีบบ แบบ ครีบบปลายวีแยก และได้แสดงค่าสูงสุดของค่า TEF_{max} ในแต่ละค่าของ PR ในรูปของเส้นกราฟ ในภาพรวมสังเกตพบว่า เมื่อ Re เพิ่มมากขึ้น (Re เริ่มต้นที่ 10,000 และมีค่าเพิ่มขึ้นในแนวทแยงจาก บนลงล่าง โดยสามารถสังเกตและเปรียบเทียบได้กับรูปที่ 8.14) ค่า TEF_{max} มีแนวโน้มลดลงและค่า BR ที่ให้ค่า TEF_{max} ในแต่ละค่าของ Re มีแนวโน้มลดลงด้วย และเมื่อพิจารณาที่ค่า BR คงที่พบว่า ค่า TEF_{max} มีแนวโน้มลดลงเมื่อค่า PR เพิ่มสูงขึ้น โดยที่ $PR=0.15625$ ให้ค่า TEF_{max} มีแนวโน้ม สูงกว่า PR ค่าอื่นๆ เมื่อพิจารณาในรายละเอียดพบว่า ที่ $Re=10,000$ มีค่า TEF_{max} เท่ากับ 2.35 ที่ค่า BR ประมาณ 0.047 และที่ $Re=50,000$ มีค่า TEF_{max} ต่ำที่สุดประมาณ 1.58 ที่ค่า $BR=0.012$

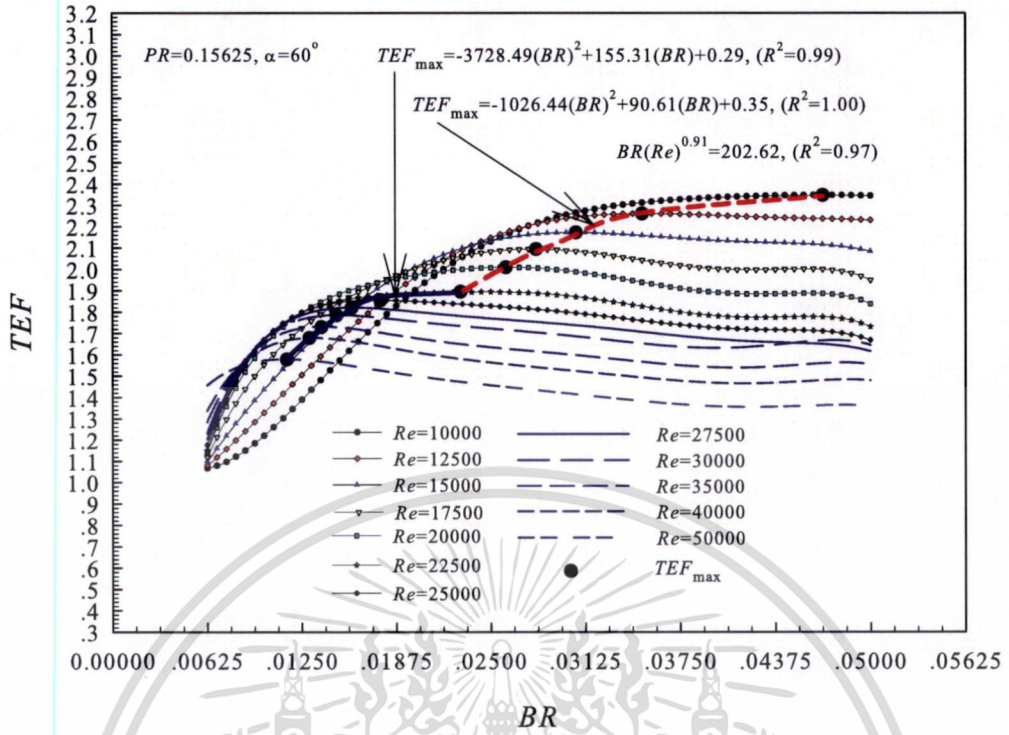


รูปที่ 8.16 การกระจาย Nu_x/Nu_0 ที่ $Z/D=1/2$ สำหรับการไหลแบบเต็มความยาวช่องทางไหลและแบบเป็นโมดูลของกรณีครีปปลายวีแยกที่ $BR=0.047$, $PR=0.15625$ และ $Re=10,000$

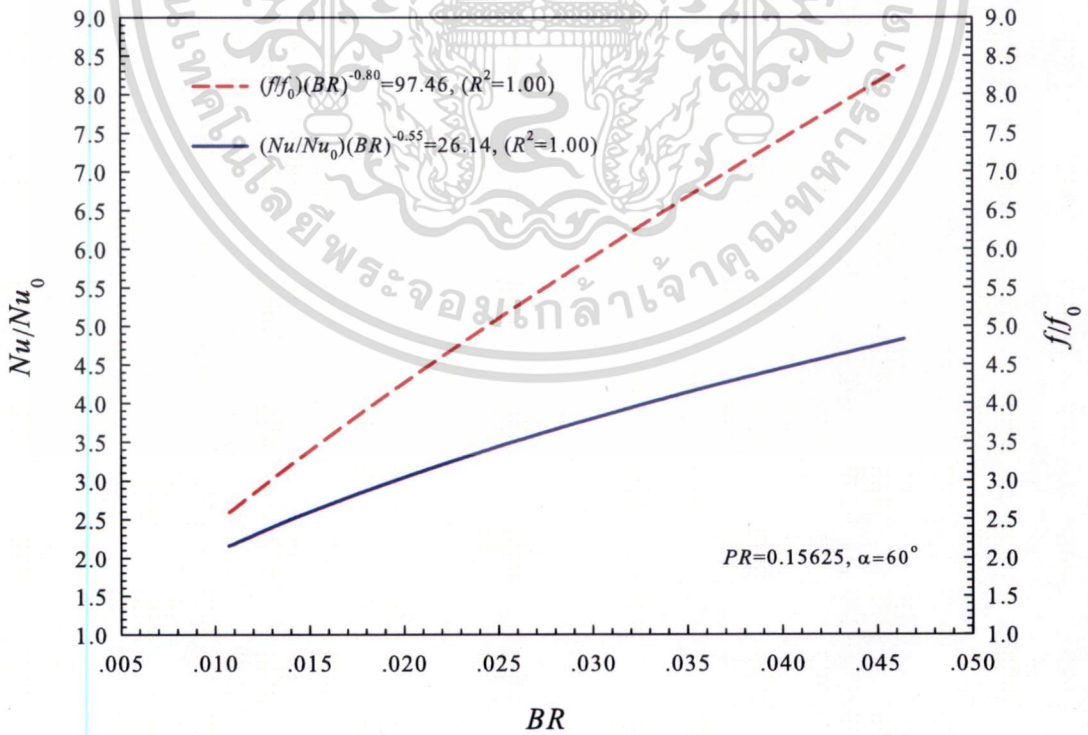


รูปที่ 8.17 การกระจาย u/u_0 ที่ $Z/D=1/2$ สำหรับการไหลแบบเต็มความยาวช่องทางไหลและแบบเป็นโมดูลของกรณีครีปปลายวีแยกที่ $BR=0.047$, $PR=0.15625$ และ $Re=10,000$

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.18 การกระจายค่า TEF และ TEF_{max} ของการจัดวางครีบบนปลายวีแยกที่ $PR=0.15625$ และที่ค่า $\alpha=60^\circ$



รูปที่ 8.19 ค่า Nu/Nu_0 และ f/f_0 ที่ค่า BR ต่างๆ ทั้งในรูปแบบกราฟและสมการความสัมพันธ์ของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อแจกจ่ายให้บุคลากรในหน่วยงานที่เกี่ยวข้องเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต หากต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 8.16 การกระจาย Nu_x/Nu_0 ที่ $Z/D=1/2$ สำหรับการไหลแบบเต็มความยาวช่องทางไหลและแบบเป็นโมดูลของกรณีครีบบลายวิแยกที่ $BR=0.047$, $PR=0.15625$ และที่ $Re=10,000$ ซึ่งเห็นได้ว่ารูปร่างของค่า Nu_x/Nu_0 เริ่มปรากฏเข้าเป็นช่วงที่โมดูลที่ 2 หลังจากนั้นจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นและลดลงเล็กน้อยจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วงเชิงความร้อน ที่ตำแหน่ง x/D ประมาณ 11.5 และตำแหน่งการเข้าสู่สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วงเชิงความเร็วช้ากว่าเล็กน้อยที่ตำแหน่ง x/D ประมาณ 12.5 ซึ่งสามารถสังเกตได้จากรูปที่ 8.17

สำหรับกรณีที่ $PR=0.15625$ ให้ค่า TEF_{max} มีแนวโน้มสูงกว่า PR ค่าอื่นๆ นั้น อิทธิพลของค่า BR ที่ส่งผลต่อค่า TEF พิจารณาได้จากรูปที่ 8.18 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า TEF ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่า BR ของกรณี $PR=0.15625$ ค่า Re ในช่วง 10,000 ถึง 50,000 และได้แสดง TEF_{max} ในแต่ละค่าของ Re และ BR ในรูปของเส้นกราฟและสมการความสัมพันธ์ ซึ่งสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า BR และ TEF_{max} ถูกแบ่งเป็นสองสมการที่ $Re=22,500$ ในภาพรวมสังเกตพบว่า เมื่อ Re เพิ่มมากขึ้นค่า TEF_{max} มีแนวโน้มลดลงและค่า BR ที่ให้ค่า TEF_{max} ในแต่ละค่าของ Re มีแนวโน้มลดลงด้วย ซึ่งเมื่อพิจารณาในรายละเอียดพบว่า ที่ $Re=10,000$ มีค่า TEF_{max} เท่ากับ 2.35 ที่ค่า $BR=0.047$ และที่ $Re=50,000$ มีค่า TEF_{max} ต่ำที่สุดเท่ากับ 1.58 ที่ค่า $BR=0.01$ ซึ่งกราฟนี้สามารถนำไปใช้ออกแบบเพื่อหาค่า BR ที่ให้ค่า TEF_{max} ที่แต่ละ Re โดยที่ค่า $PR=0.15625$ และ $\alpha=60^\circ$ คงที่

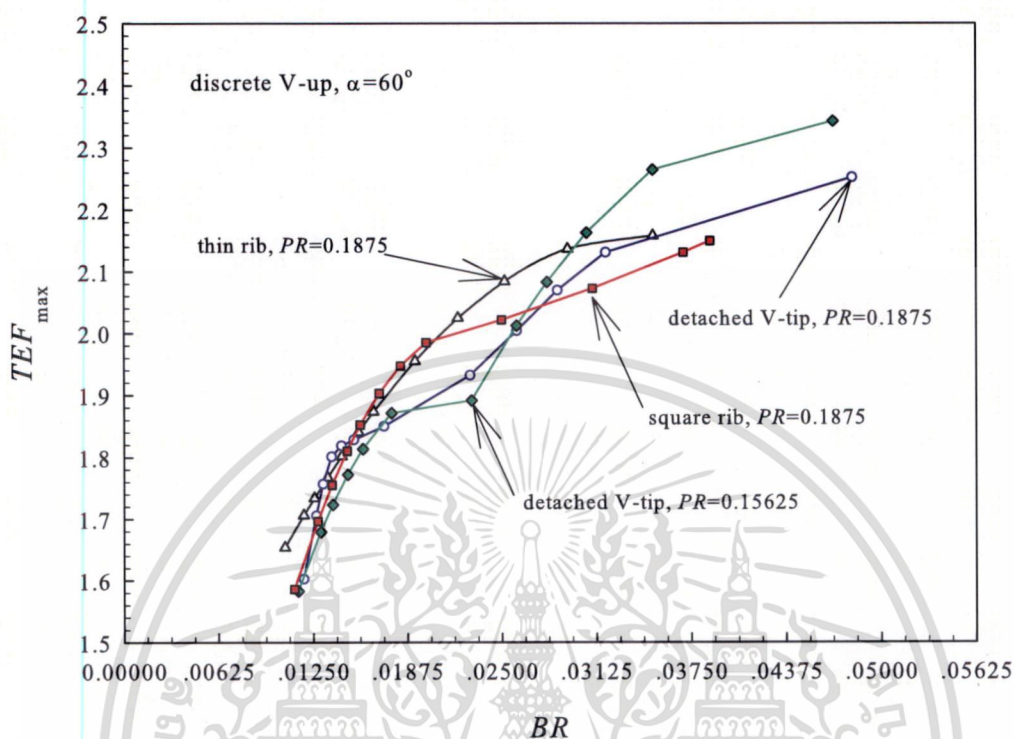
นอกจากนี้เมื่อทราบค่า BR ที่ให้ค่า TEF_{max} แล้ว ยังจะสามารถคำนวณหรือหาค่า Nu/Nu_0 และ ff_0 ที่ให้ค่า TEF_{max} ได้อีกด้วย โดยพิจารณาค่าจากกราฟหรือจากสมการในรูปที่ 8.19 ซึ่งค่า Nu/Nu_0 และ ff_0 แสดงไว้ที่ด้านบนแกนตั้งทางด้านซ้ายและด้านขวาของกราฟตามลำดับ โดยที่ค่า Nu/Nu_0 อยู่ในช่วง 2.16 ถึง 4.83 และค่า ff_0 อยู่ในช่วง 2.60 ถึง 8.36 สำหรับค่า BR ที่อยู่ในช่วง 0.01 ถึง 0.047

8.4 เปรียบเทียบค่า TEF ของกรณีการจัดวางครีบบนพื้นผิวให้ความร้อน

จากการศึกษาในหัวข้อต่างๆ ที่ผ่านมาสำหรับการวิเคราะห์การไหลผ่านครีบบาง ครีบบัวยวิแยกตัวชี้สวนการไหล ที่ค่า $\alpha=60^\circ$ ซึ่งวางบนพื้นผิวให้ความร้อน ตั้งแต่เริ่มต้นศึกษาซึ่งได้แก่ การวิเคราะห์การไหลผ่านครีบบาง ครีบบัวยวิแยกตัวชี้สวนการไหล จนกระทั่งถึงการปรับปรุงครีบบัวยวิแยกตัวชี้สวนการไหลร่วมกับแบบเปิดช่องที่ค่า $PR=0.15625$ นั้น เมื่อนำค่า TEF_{max} ของแต่ละกรณีมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกัน ที่ BR ค่าต่างๆ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8.20 ซึ่งเป็นรูปที่แสดงถึงการเปรียบเทียบการกระจายค่า TEF_{max} ของการจัดวางครีบบาง ครีบบัวยวิแยกตัวชี้สวนการไหล ร่วมกับการปรับปรุงครีบบัวยวิแยกตัวชี้สวนการไหลที่ค่า $\alpha=60^\circ$ เพื่อใช้วิเคราะห์ถึงรูปแบบการจัดวางครีบบัวยวิแยกตัวชี้สวนการไหลที่เหมาะสมที่สุด

จากการสังเกตผลการวิเคราะห์ที่ผ่านมามีค่าพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อการไหลและการถ่ายเทความร้อนที่เด่นชัดที่สุดคือค่า BR ซึ่งเมื่อค่า BR สูงขึ้น Nu/Nu_0 และ ff_0 มีแนวโน้มสูงขึ้น นอกจากนี้สำหรับการนำไปประยุกต์กับการใช้งานจริงนั้น โดยทั่วไปจะติดตั้งครีบบัวยวิแยกตัวชี้สวนการไหลที่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คงที่ ซึ่งควรจะเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดในช่วง Re ที่ทำการศึกษา ดังนั้นเมื่อพิจารณารูปที่ 8.20 โดยวิเคราะห์ที่แต่ละค่า BR คงที่ (เพื่อให้ได้ค่า Nu/Nu_0 สูงที่สุด) สังเกตพบว่าที่ค่า BR สูงกว่า 0.03 เส้นกราฟของครีบบัวยวิแยก(detached V-tip) ที่ $PR=0.15625$ ซึ่งเป็นกรณีการปรับปรุงครีบบัวยวิแยกตัวชี้สวนการไหลร่วมกับแบบเปิดช่องนั้น ให้ค่า TEF_{max} สูงกว่าครีบบัวยวิแยกตัวชี้สวนการไหล และเมื่อค่า BR

ต่ำกว่า 0.03 เส้นกราฟแบบครีบบาง(thin rib) ที่ $PR=0.1875$ ซึ่งเป็นกรณีครีบบางก่อนการปรับปรุงครีบนั้นให้ค่า TEF_{max} มีแนวโน้มสูงกว่าครีบบางอื่นๆ



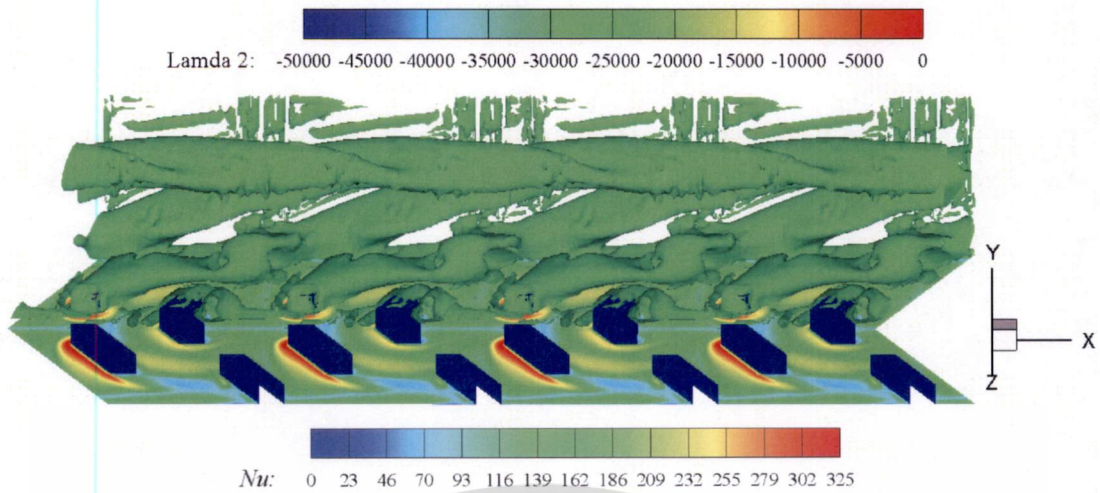
รูปที่ 8.20 การเปรียบเทียบการกระจายค่า TEF_{max} ของการจัดวางครีบบางแบบครีบบางตัวแยกตัวชิ้นส่วน การไหลรวมกับการปรับปรุงครีบบางรูปแบบต่างๆ ที่ค่า $\alpha=60^\circ$

แต่เมื่อพิจารณาที่ค่า Re เป็นหลัก ในการพิจารณาจากรูปที่ 8.20 โดยภาพรวมพบว่า ครีบบางแบบปรับปรุงแล้วที่ $PR=0.15625$ มีความเหมาะสมกว่าครีบบางรูปแบบอื่น สำหรับค่า Re น้อยกว่า 25,000 และเมื่อ Re มากกว่า 25,000 รูปแบบครีบบางทั้งหมดให้ลักษณะที่ใกล้เคียงกัน แต่การปรับปรุงครีบบางปลายวีแยกที่ $PR=0.15625$ มีค่า BR สูงกว่าเล็กน้อย ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าเมื่อพิจารณาที่ค่า Re เดียวกัน การปรับปรุงครีบบางปลายวีแยก ที่ $PR=0.15625$ มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการนำไปใช้งานจริง

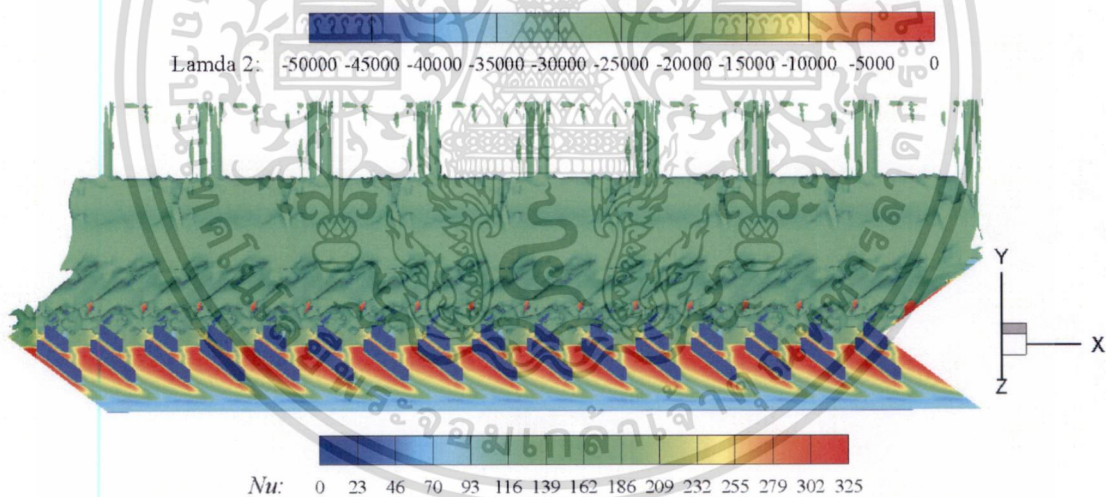
8.5 โครงสร้างการไหลสำหรับการไหลผ่านครีบบางแบบครีบบางตัวแยกตัวชิ้นส่วนการไหล

การแสดงโครงสร้างการไหลหมุนวน สำหรับการไหลผ่านครีบบางตัวแยกตัวชิ้นส่วนการไหลสามารถแสดงในรูปของเปลือกห่อหุ้มแกนกระแสวน มาใช้ในการอธิบายโครงสร้างการไหล เนื่องจากการแสดงผลในลักษณะดังกล่าวสามารถอธิบายบริเวณการไหลหมุนวน หรือโครงสร้างการไหลในภาพรวมได้ดีกว่า การนำเสนอรูปร่างการไหลหรือพฤติกรรมกรการไหลในรูปแบบอื่นๆ สำหรับโครงสร้างการไหลจะนำเสนอทั้งในส่วนของครีบบางที่เหลี่ยมจัตุรัสต้นแบบ และของครีบบางที่ปรับปรุงแล้วแบบปลายวีแยก ดังรูปที่ 8.21 และ 8.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.21 การกระจายค่าเลขนัสเซิลต์เฉพาะที่บนพื้นผิวให้ความร้อนและที่ค่าพื้นผิวที่เหมือนกันของ $\lambda_2 = -28,000$ ของครีบสี่เหลี่ยมจัดเรียงแบบที่ $BR=0.0625$, $PR=0.625$, $\alpha=60^\circ$ และ $Re=15,000$



รูปที่ 8.22 การกระจายค่าเลขนัสเซิลต์เฉพาะที่บนพื้นผิวให้ความร้อนและที่ค่าพื้นผิวที่เหมือนกันของ $\lambda_2 = -28,000$ ของครีบบางที่ปรับปรุงแล้วที่ $BR=0.03125$, $PR=0.15625$, $\alpha=60^\circ$ และ $Re=15,000$

รูปที่ 8.21 แสดงโครงสร้างการไหลของของไหลผ่านครีบสี่เหลี่ยมจัดเรียงแบบ โดยแสดงในรูปของค่าพื้นผิวที่เหมือนกัน (iso-surfaces) ที่ค่า $\lambda_2 = -28000$ ที่ $BR=0.0625$, $PR=0.625$, $\alpha=60^\circ$ และ $Re=15,000$ จากรูปจะเห็นได้ว่าเปลือกห่อหุ้มแกนกระแสน้ำซึ่งเกิดจากการไหลผ่านครีบสี่เหลี่ยมจัดเรียงแบบ จะเกิดที่บริเวณปลายของครีบบรูปตัววี และเห็นได้เด่นชัดที่บริเวณครีบและการไหลด้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

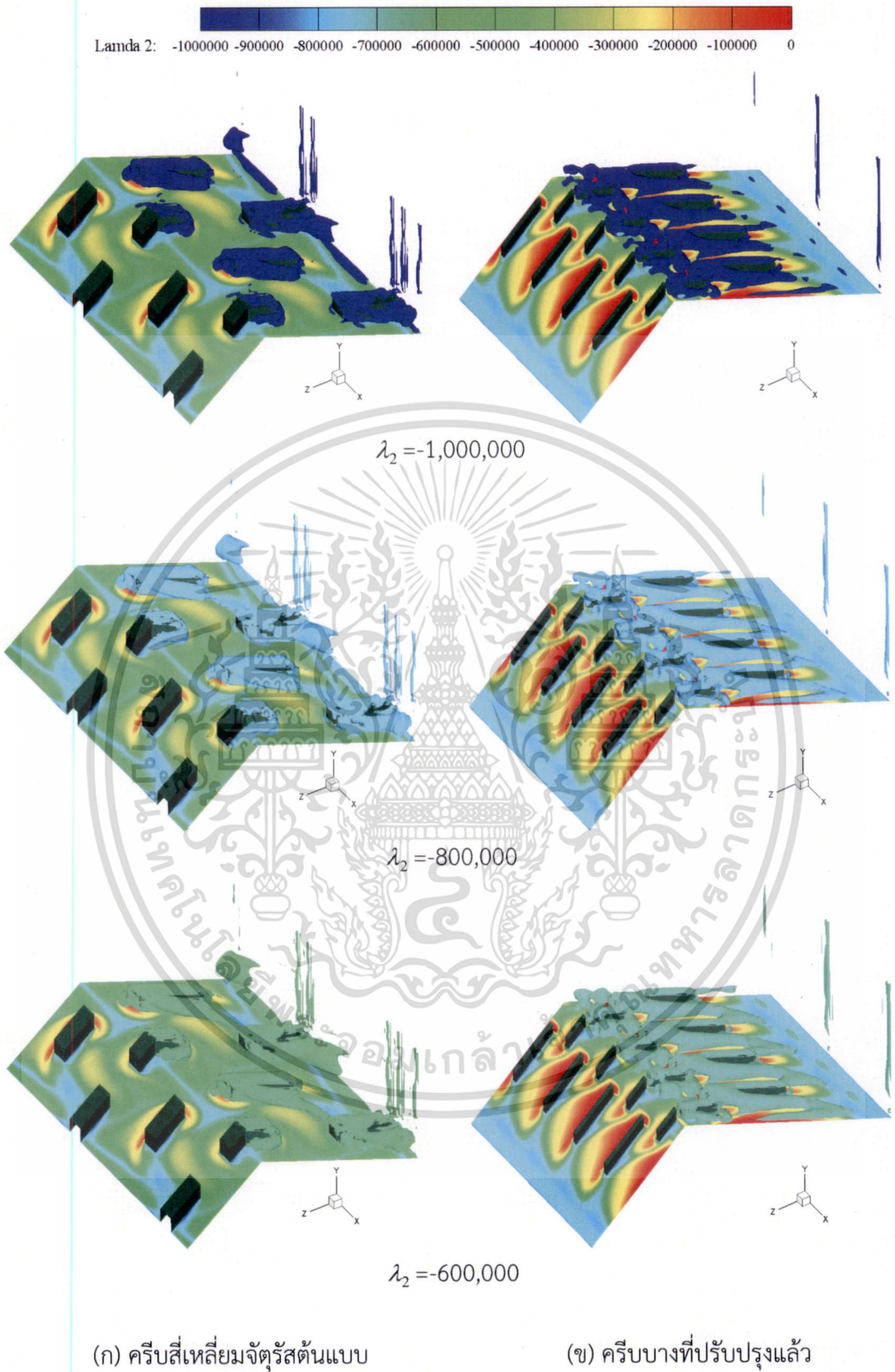
ท้ายครีบบนที่แยกตัวออกมา และไหลไปรวมตัวกับครีบบนที่ติดกับพื้นผิวหุ้มฉนวน หลังจากนั้นจะเกิดการรวมตัวแล้วไหลขึ้นไปรวมตัวที่ด้านบนโดยจะเกิดในลักษณะที่เหมือนกันในแต่ละโมดูล ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวคือการไหลซ้ำเป็นช่วง

รูปที่ 8.22 แสดงโครงสร้างการไหลของของไหลผ่านครีบบางที่ได้ปรับปรุงแล้ว โดยแสดงในรูปของค่าพื้นผิวที่เหมือนกันที่ค่า $\lambda_2 = -28000$ $BR=0.03125$, $PR=0.15625$, $\alpha=60^\circ$ และ $Re=15,000$ จากรูปจะเห็นได้ว่าเปลือกหุ้มแกนกระแสวนซึ่งเกิดจากการไหลผ่านครีบบางที่ได้ปรับปรุงแล้วนั้น จะเกิดที่บริเวณปลายของครีบบนและการไหลด้านท้ายครีบบนที่แยกตัวออกมา และไหลไปรวมตัวกับครีบบนที่ติดกับพื้นผิวหุ้มฉนวน หลังจากนั้นจะเกิดการรวมตัวแล้วไหลขึ้นไปรวมตัวที่ด้านบนกับแกนการหมุนขนาดใหญ่ ซึ่งจะเกิดในลักษณะที่เหมือนกันในแต่ละโมดูล และพบว่าแกนการหมุนเกิดขึ้นถี่และเด่นชัดกว่าของกรณีครีบบนสี่เหลี่ยมจัตุรัสต้นแบบ

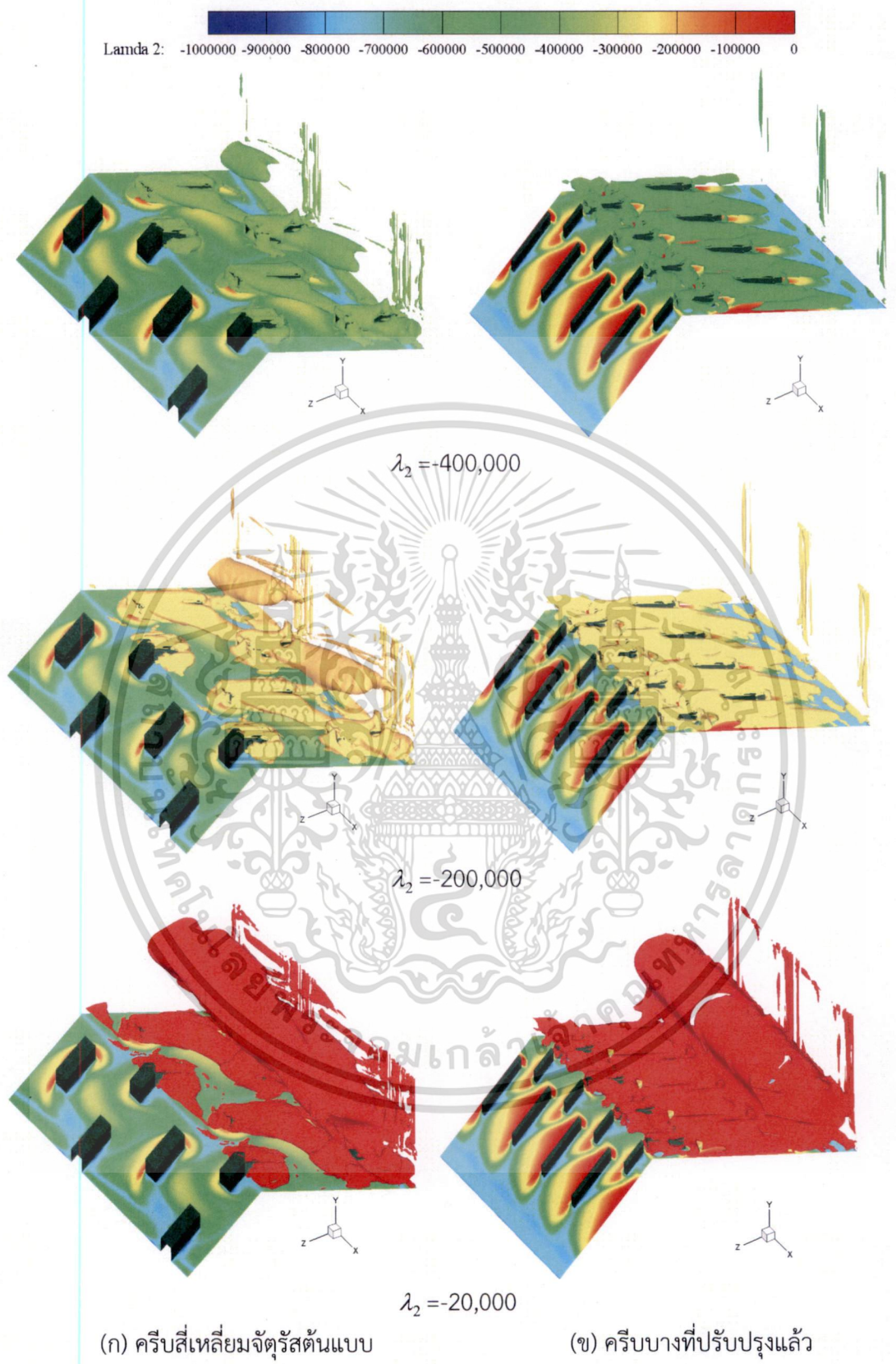
สำหรับการพิจารณารายละเอียดค่าพื้นผิวที่เหมือนกันของ λ_2 ค่าต่างๆ ที่แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างการไหลของของไหลผ่านครีบบนสี่เหลี่ยมจัตุรัสต้นแบบและครีบบางที่ปรับปรุงแล้ว โดยแสดงในรูปของค่าพื้นผิวที่เหมือนกัน ดังรูปที่ 8.23 ซึ่งเป็นรูปที่แสดงค่าพื้นผิวที่เหมือนกันของค่า λ_2 ต่างๆ ที่ $\lambda_2 = -1,000,000$, $-800,000$, $-600,000$, $-400,000$, $-200,000$ และ $-20,000$ ของครีบบนที่มีค่า $\alpha=60^\circ$ และ $Re=15,000$ ของกรณี (ก) ครีบบนสี่เหลี่ยมจัตุรัสต้นแบบที่ $BR=0.0625$ และ $PR=0.625$ (ข) ครีบบางที่ปรับปรุงแล้ว ที่ $BR=0.03125$ และ $PR=0.15625$

จากรูปจะเห็นได้ว่าเปลือกหุ้มแกนการไหลซึ่งเกิดจากการไหลผ่านครีบบนสี่เหลี่ยมจัตุรัสต้นแบบของกรณี (ก) ที่ค่า $\lambda_2 = -1,000,000$ เริ่มเกิดขึ้นที่บริเวณรอบๆ ครีบบนเท่านั้น และที่ค่า $\lambda_2 = -800,000$ เปลือกหุ้มแกนการไหลเริ่มขยายตัวมากขึ้นในบริเวณรอบๆ ครีบบน และเริ่มมีการเชื่อมโยงต่อกันจากครีบบนที่แยกตัวออกมากับครีบบนที่ติดกับผนังท่อหุ้มฉนวนตามทิศทางการไหล ที่ค่า $\lambda_2 = -600,000$ และเริ่มปรากฏเปลือกหุ้มแกนการไหลที่ด้านบนบริเวณมุมของช่องทางไหล และมีขนาดใหญ่ขึ้นที่ค่า $\lambda_2 = -400,000$ หลังจากนั้นเมื่อค่า $\lambda_2 = -200,000$ เปลือกหุ้มแกนการไหลบริเวณรอบๆ ครีบบนและที่ด้านบนของครีบบนที่ติดกับผนังท่อหุ้มฉนวนบริเวณมุมของช่องทางไหล เริ่มเชื่อมต่อกันและเปลือกหุ้มแกนการไหลด้านบนรวมเป็นชิ้นเดียวกันที่ $\lambda_2 = -20,000$

แต่สำหรับครีบบางที่ปรับปรุงแล้ว เปลือกหุ้มแกนการไหลเกิดขึ้นในบริเวณรอบๆ ครีบบนและบริเวณระหว่างครีบบนซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจน และมีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ และเชื่อมโยงถึงกันในบริเวณระหว่างครีบบนเหนือพื้นผิวให้ความร้อน เปลือกหุ้มแกนการไหลบริเวณรอบๆ ครีบบนและที่ด้านบนของครีบบนซึ่งติดกับผนังท่อหุ้มฉนวนบริเวณมุมของช่องทางไหลเชื่อมต่อกัน และรวมเป็นชิ้นเดียวกันที่ $\lambda_2 = -20,000$ นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นว่าเปลือกหุ้มแกนกระแสวนที่เกิดจากการไหลผ่านครีบบนที่ได้ปรับปรุงแล้วเกิดในบริเวณใกล้พื้นผิวมากกว่า ครอบคลุมเป็นบริเวณกว้างและเกิดขึ้นถี่กว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีครีบบนสี่เหลี่ยมจัตุรัสต้นแบบ จึงส่งผลให้ค่าการกระจายเลขชั้นสเซลล์เฉพาะที่มีค่าสูง ตัวประกอบความเสียดทานต่ำ และในที่สุดได้นำไปสู่ค่า TEF ที่มีค่าสูงที่สุดนั่นเอง



รูปที่ 8.23 ค่าพื้นผิวที่เหมือนกันของค่า λ_2 ต่างๆ ของครีบที่ $\alpha=60^\circ$ และ $Re=15,000$ กรณี (ก) ครีบสี่เหลี่ยมจัตุรัสต้นแบบที่ $BR=0.0625$ และ $PR=0.625$ (ข) ครีบบางที่ปรับปรุงแล้ว ที่ $BR=0.03125$ และ $PR=0.15625$ การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.23 ค่าพื้นผิวที่เหมือนกันของค่า λ_2 ต่างๆ ของครีบที่ $\alpha=60^\circ$ และ $Re=15,000$ กรณี (ก) ครีบสี่เหลี่ยมจัตุรัสต้นแบบที่ $BR=0.0625$ และ $PR=0.625$ (ข) ครีบบางที่ปรับปรุงแล้ว ที่เอกสารนี้เป็นเอกสาร $BR=0.03125$ และ $PR=0.15625$ (ต่อ) ภาษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 9

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้กล่าวถึงการสรุปผลการคำนวณเชิงตัวเลขและข้อเสนอแนะ จากการนำเสนอการวิเคราะห์การไหลในบทต่างๆ ที่ผ่านมา พร้อมทั้งได้นำเสนออิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ลักษณะการจัดวางครีบ และรวมถึงการปรับปรุงครีบที่ส่งผลต่อค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน

9.1 สรุปผล

ผลสรุปที่ได้จากการวิเคราะห์แบ่งตามบทที่ได้นำเสนอไปแล้วดังนี้

9.1.1 ความเหมาะสมของแบบจำลองความปั่นป่วน

การวิเคราะห์การไหลและการถ่ายเทความร้อนโดยใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข ที่มีการไหลแบบปั่นป่วน 3 มิติ จำลองการไหลในช่วงพัฒนาอย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วง มีโดเมนการไหลแบบสมมาตรที่ผนังด้านบน-ล่าง และด้านซ้าย-ขวา ในช่วง 2 โมดูล โดยในส่วนของวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขนั้น ใช้แบบแผนการคำนวณแบบ QUICK สำหรับเทอมของการพา การคำนวณของความเร็วจุดและความดันใช้วิธีแบบ SIMPLE วิเคราะห์ภายใต้จำนวนกริดเซลล์ที่เหมาะสม ซึ่งพบว่าแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG $k-\epsilon$ ให้ผลการทำนายค่าเลขนีสเซลล์และตัวประกอบความเสียดทานเหมาะสมและสอดคล้องกับผลการทดลองมากกว่าแบบจำลอง SST $k-\omega$ ทั้งในกรณีของการไหลในท่อผิวเรียบ และการไหลผ่านครีบรูปตัววีแบบแยกตัวหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ติดตั้งบนผนังด้านบนและด้านล่าง ของพื้นผิวให้ความร้อนแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ ในช่องทางไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

เนื่องจากในสมการการจำลองการถ่ายเทความร้อนนั้น ค่า k_{eff} ของแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG $k-\epsilon$ เป็นฟังก์ชันของเลขพรานด์ยัลผลผกผัน, α ซึ่งค่า α คำนวณจากสมการที่ได้พัฒนาขึ้นจากทฤษฎี RNG โดยค่า α จะเปลี่ยนแปลงไปตามค่า μ/μ_{eff} และมีหลักฐานบ่งชี้ว่าทฤษฎี RNG มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองเนื่องจากค่า Pr_t เปลี่ยนแปลงไปตามค่า Pr และความปั่นป่วน ในขณะที่เลขพรานด์ของความปั่นป่วนของแบบจำลอง SST $k-\omega$ ถูกกำหนดให้เป็นค่าคงที่

9.1.2 ครีบบางรูปตัววีบนพื้นผิวให้ความร้อน

กรณีการไหลผ่านครีบบางรูปตัววีแบบแยกตัว เมื่อวิเคราะห์การไหลแบบเต็มความยาวช่องทางไหลพบว่า การเข้าสู่สภาวะการพัฒนาอย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วงเชิงความร้อนเกิดขึ้นเร็วกว่ากรณีการไหลเข้าเป็นช่วงเชิงความเร็วเล็กน้อย และเมื่อความสูงครีบเพิ่มขึ้นสามารถเหนี่ยวนำให้มีการไหลเข้าสู่สภาวะการพัฒนาอย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วง ทั้งของการไหลและการถ่ายเทความร้อนเร็วยิ่งขึ้น โดยเริ่มเกิดการเข้าสู่สภาวะการพัฒนาอย่างสมบูรณ์ของทั้งสองกรณีที่ตำแหน่ง $x/D=7-12$ เมื่อวัดจากทางเข้าท่อทดสอบ

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของความหนาครีบพบว่า การไหลผ่านครีบรูปตัววีแบบแยกตัวหน้าตัดบาง มีความเหมาะสมต่อการถ่ายเทความร้อนมากกว่าครีบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยครีบบางมีการเข้าสู่สภาวะการพัฒนาอย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วงเชิงความร้อนก่อนครีบจัตุรัสเล็กน้อย และในสนามการไหลของครีบบางแสดงให้เห็นถึง การไหลของสองกระแสตามยาวที่หมุนสวนทางกัน ซึ่งกระแสตามยาวสามารถช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อให้สูงขึ้นได้เนื่องจาก ความดันที่

บริเวณการไหลด้านหลังครีบบีค่าต่ำ จึงเหนี่ยวนำให้มีการเคลื่อนย้ายของของไหลจากแกนการไหลหลัก เกิดการหมุนวนเข้าสู่ผนังของพื้นผิวถ่ายเทความร้อน ซึ่งการหมุนวนเหล่านี้จะไปพาความร้อนออกจากพื้นผิว แล้วเคลื่อนที่ขึ้นด้านบนโดยมีรูปแบบซ้ำกันอย่างต่อเนื่องในแต่ละโมดูล

ในกรณีรูปแบบการจัดเรียงครีบบีซึ่งประกอบไปด้วยแบบ ครีบทัววีต่อเนื่องซึ่งส่วนการไหล, ครีบทัววีแยกตัวซึ่งส่วนการไหล, ครีบทัววีต่อเนื่องซึ่งตามการไหล และครีบทัววีแยกตัวซึ่งตามการไหล เมื่อพิจารณาที่ค่า TEF พบว่าการจัดวางครีบบีแบบครีบทัววีแยกตัวซึ่งส่วนการไหล มีความเหมาะสมต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนมากที่สุดภายใต้เงื่อนไขการไหลเดียวกัน

ในการศึกษาอิทธิพลของค่ามุมปะทะที่ให้ค่า Nu/Nu_0 และ ff_0 สูงที่สุดคือ $\alpha=60^\circ$ เนื่องจากระยะการไหลตกกระทบพื้นผิวที่สั้นที่สุดเกิดที่มุมปะทะในช่วง 52.5° ถึง 60° แต่การไหลที่เกิดจาก $\alpha=60^\circ$ เมื่อตกกระทบลงสู่พื้นแล้วมีการกระจายตัวของกระแสตามยาวเป็นบริเวณกว้าง จึงส่งผลให้ Nu/Nu_0 และ ff_0 มีค่าสูงที่สุด

การปรับปรุงครีบบางที่มีการจัดวางครีบบีแบบครีบทัววีแยกตัวซึ่งส่วนการไหล โดยพิจารณาภายใต้ค่าพารามิเตอร์หลักคือ α , PR และ BR พบว่าค่าพารามิเตอร์ที่ให้ค่า TEF_{max} คือที่ $\alpha=60^\circ$, $PR=0.1875$ ส่วนค่า BR ที่ให้ค่า TEF_{max} นั้นจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่า Re โดยในงานวิจัยนี้ได้สร้างกราฟ TEF_{max} ซึ่งครอบคลุมค่า Re ในช่วง 10,000 ถึง 50,000 โดยมีค่า TEF_{max} อยู่ในช่วง 1.61 ถึง 2.17 (เมื่อ Re เพิ่มขึ้นค่า TEF_{max} จะลดลง) ซึ่งกราฟนี้ให้ความสะดวกสำหรับการนำไปใช้ออกแบบเพื่อหาค่า BR ที่ให้ค่า TEF_{max} ที่แต่ละ Re โดยมีค่า $PR=0.1875$ และ $\alpha=60^\circ$ คงที่

สำหรับการนำผลที่วิเคราะห์ที่ได้ไปใช้งานนั้น ในเบื้องต้นต้องทราบค่าของอัตราการไหลในช่วงที่ต้องการใช้งาน ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาค่า Re ได้ และเมื่อทราบค่า Re แล้วสามารถหาค่า BR และค่า TEF_{max} ได้จากกราฟหรือจากสมการที่แสดงไว้ในรูปที่ 5.41 นอกจากนี้เมื่อทราบค่า BR แล้วสามารถคำนวณหรือหาค่า Nu/Nu_0 และ ff_0 ที่ให้ค่า TEF_{max} ได้โดยพิจารณาค่าจากกราฟหรือจากสมการในรูปที่ 5.42 ซึ่งค่า Nu/Nu_0 และ ff_0 แสดงไว้ที่ค่าบนแกนตั้งทางด้านซ้ายและด้านขวาของกราฟตามลำดับ โดยที่ค่า Nu/Nu_0 อยู่ในช่วง 2.27 ถึง 3.90 และค่า ff_0 อยู่ในช่วง 2.83 ถึง 5.76 สำหรับค่า BR ที่อยู่ในช่วง 0.01 ถึง 0.034

9.1.3 ครีบบีจัดรูปตัววีแบบแยกตัวบนพื้นผิวให้ความร้อน

การพัฒนาครีบบีจัดรูปตัววีที่มีการจัดวางแบบครีบทัววีแยกตัวซึ่งส่วนการไหล มีลักษณะการพัฒนาครีบบีที่คล้ายคลึงกับครีบบาง ซึ่งพบค่าพารามิเตอร์ที่ให้ค่า TEF_{max} และเหมาะสมคือที่ $\alpha=60^\circ$, $PR=0.1875$ ส่วนค่า BR ที่ให้ค่า TEF_{max} นั้น จะเปลี่ยนแปลงไปตามค่า Re ในช่วง 10,000 ถึง 50,000 ซึ่งค่า TEF_{max} อยู่ในช่วง 1.59 ถึง 2.15 (เมื่อ Re เพิ่มขึ้นค่า TEF_{max} จะลดลง) ซึ่งให้ค่าน้อยกว่าครีบบางเล็กน้อย ส่วนค่า Nu/Nu_0 อยู่ในช่วง 2.27 ถึง 3.80 และค่า ff_0 อยู่ในช่วง 3.04 ถึง 5.54 สำหรับค่า BR ที่อยู่ในช่วง 0.01 ถึง 0.04 ดังนั้นโดยภาพรวมแล้วสรุปได้ว่าครีบบางมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานมากกว่าครีบบีจัดรูป

9.1.4 ครีบบางรูปตัววีบนพื้นผิวหมุนวน

การนำเสนอวิธีการติดตั้งครีบบางบนพื้นผิวหมุนวน เพื่อแก้ปัญหาเลขนัสเซลล์ที่มีค่าต่ำ ในบริเวณรอบๆ ครีบบีซึ่งติดกับมุมของผนังท่อ โดยพิจารณาภายใต้ค่าพารามิเตอร์หลักคือ BR , PR และ α สรุปได้ว่าครีบบีที่มีค่า $BR=0.0625$, $PR=0.625$ ที่ค่า $\alpha=45^\circ$ และมีการจัดวางครีบบีแบบครีบทัววีแยกตัวซึ่งส่วนการไหล บนพื้นผิวหมุนวนมีความเหมาะสมที่สุดต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีครีบบางไปใช้

สำหรับการไหลในช่องทางไหลสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยพิจารณาค่า Re ในช่วง 10,000 ถึง 25,000 ซึ่งพบว่าค่า TEF ในช่วง 1.6 ถึง 1.8 ส่วนค่า Nu/Nu_0 อยู่ในช่วง 3.3 ถึง 3.6 และค่า f/f_0 อยู่ในช่วง 7.7 ถึง 8.8 ถึงแม้ว่าการจัดวางครีบบนพื้นผิวหุ้มฉนวน จะช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้จริงในบริเวณการไหลตกกระทบบนพื้นผิวให้ความร้อนและในบริเวณมุมของช่องทางไหล แต่ที่บริเวณแนวกึ่งกลางของพื้นผิวให้ความร้อนยังคงมีการถ่ายเทความร้อนต่ำ เนื่องจากเกิดการไหลแยกตัวของกระแสในบริเวณนี้ และนอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบผลของค่า TEF ในกรณีการจัดวางครีบบนพื้นผิวแยกตัวซึ่งส่วนการไหล บนพื้นผิวหุ้มฉนวนและบนพื้นผิวให้ความร้อนของกรณีครีบบนพื้นผิว พบว่า การจัดวางครีบบนพื้นผิวให้ความร้อนให้ผลลัพธ์โดยรวมดีกว่า โดยเฉพาะกรณีครีบบางมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานมากที่สุด

9.1.5 การปรับปรุงครีบบางรูปตัววีแยกตัวซึ่งส่วนการไหลที่ติดตั้งบนพื้นผิวให้ความร้อน

การปรับปรุงครีบบางที่มีจัดวางครีบบนพื้นผิวแยกตัวซึ่งส่วนการไหล ด้วยการลดจำนวนครีบบนบริเวณที่ติดกับผนังท่อหุ้มฉนวนรวมกับการแยกครีบบนพื้นผิวออกจากกันเท่ากับความหนาครีบบนพื้นผิว โดยพิจารณาภายใต้ค่าพารามิเตอร์หลักคือ α , PR และ BR สรุปได้ว่าค่าพารามิเตอร์ที่ให้ค่า TEF_{max} และเหมาะสมคือที่ $\alpha=60^\circ$, $PR=0.15625$ ส่วนค่า BR ที่ให้ค่า TEF_{max} นั้น จะเปลี่ยนแปลงไปตามค่า Re ในช่วง 10,000 ถึง 50,000 ซึ่งค่า TEF_{max} อยู่ในช่วง 1.58 ถึง 2.35 (เมื่อ Re เพิ่มขึ้นค่า TEF_{max} จะลดลง) โดยที่ค่า Nu/Nu_0 อยู่ในช่วง 2.16 ถึง 4.83 และค่า f/f_0 อยู่ในช่วง 2.60 ถึง 8.36 สำหรับค่า BR ที่อยู่ในช่วง 0.01 ถึง 0.047

ดังนั้นโดยภาพรวมแล้วเมื่อใช้ค่า Re เป็นเกณฑ์ในการพิจารณา สรุปได้ว่าครีบบางที่ได้มีการปรับปรุงครีบบางที่ $\alpha=60^\circ$, $PR=0.15625$ มีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งาน เนื่องจากให้ค่า TEF_{max} สูงที่สุดโดยเฉพาะค่า Re ในช่วง 10,000 ถึง 25,000 และเมื่อ Re สูงกว่า 25,000 การใช้ครีบบางซึ่งยังไม่ได้ปรับปรุง ที่ $\alpha=60^\circ$, $PR=0.1875$ ให้ลักษณะที่ดีกว่าครีบบางแบบอื่นเล็กน้อย

9.2 ข้อเสนอแนะการพัฒนางานวิจัย

จากผลงานวิจัยที่ได้นำเสนอทำให้ทราบถึงข้อดีของการใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับพฤติกรรมการไหล ลักษณะการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อม เนื่องจากสามารถประหยัดเวลาที่ใช้ในการจำลองการไหล นอกจากนี้ยังสามารถลดต้นทุนสำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองได้อีกด้วย อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเป็นเพียงการทำนายถึงผลการจำลองที่มีความเป็นไปได้ สำหรับการนำผลการวิเคราะห์ที่ได้ศึกษาไปใช้งานจริงนั้นค่าสมรรถนะทางความร้อนที่ได้อาจขึ้นอยู่กับความถูกต้องและแม่นยำของเครื่องมือวัดอีกด้วย นอกจากนี้จะเห็นได้ว่างานวิจัยนี้ได้นำเสนอในส่วนของการไหลแบบเป็นขี้เป็นช่วง เนื่องจากช่องทางไหลในเชิงอุตสาหกรรมมีความยาวเพียงพอที่จะเกิดการไหลขี้เป็นช่วงได้

สำหรับแนวทางการพัฒนางานวิจัยต่อไปนั้น เมื่อพิจารณาครีบบางรูปตัววีที่ทำมุมปะทะ 30° กับทิศทางการไหล ให้ลักษณะที่น่าสนใจเนื่องจากมีแนวโน้มให้ค่าตัวประกอบความเสียหายต่ำกว่าครีบบางที่ทำมุมปะทะค่าอื่นๆ แต่ยังคงให้อัตราส่วนเลขนัสเซลท์ที่มีค่าต่ำอยู่ แต่หากใช้รูปแบบครีบบางที่ยาวต่อเนื่องเพื่อเพิ่มความเข้มของการไหลหมุนวน และวิเคราะห์หาค่าตัวแปรต่างๆ ที่เหมาะสม น่าจะให้ค่าสมรรถนะทางความร้อนสูงกว่ากรณีครีบบางรูปตัววีแบบแยกตัว ที่ทำมุมปะทะ 60° กับทิศทางการไหล ดังนั้นจึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจต่อการนำไปศึกษาในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- Aharwal, K.R. Gandhib, B.K. and Sainib, J.S. 2008. "Experimental investigation on heat-transfer enhancement due to a gap in an inclined continuous rib arrangement in a rectangular duct of solar air heater." **Renewable Energy**. 33: 585-596.
- Aharwal, K.R. Gandhi, Bhupendra K. and Saini, J.S. 2009. "Heat Transfer and Friction Characteristics of Solar Air Heater Ducts Having Integral Inclined Discrete Ribs on Absorber Plate." **International Journal of Heat and Mass Transfer**. 52: 5970-5977.
- Ahn, S.W. 2001. "The Effects of Roughness Types on Friction Factors and Heat Transfer in Roughened Rectangular Duct." **Int. Comm. Heat Mass Transfer**. 28: 933-942.
- Anderson, J. D. Degroote, J. Degrez, G. Dick, E. Grundmann, R. and Vierendeels, J. 1992. "Introduction to Computation Fluid Dynamics". Edited by Wendt, John F. New York: **Springer-Verlag**.
- Amro, M. Weiganda, B. Poser, R. and Schnieder, M. 2007. "An Experimental Investigation of the Heat Transfer in a Ribbed Triangular Cooling Channel." **International Journal of Thermal Sciences**. 46: 491-500.
- Bazdid-Tehrani, F. and Naderi-Abadi, M. 2004. "Numerical Analysis of Laminar Heat Transfer in Entrance Region of a Horizontal Channel with Transverse Fins." **Int. Commun. Heat Mass Transfer**. 31(2): 211-220.
- Berner, C. Durst, F. and McEligot, D.M. 1984. "Streamwise-periodic Flow around Baffles." in: **Proceedings of the 2nd International Conference on Applications of Laser Anemometry to Fluid Mechanics**. Lisbon, Portugal.
- Bhagoria, J.L. Saini, J.S. and Solanki, S.C. 2002. "Heat Transfer Coefficient and Friction Factor Correlations for Rectangular Solar Air Heater Duct Having Transverse Wedge-Shaped Rib Roughness on the Absorber Plate." **Renewable Energy**. 25: 341-369.
- Bopche, S.B. and Tandale, M.S. 2009. "Tandale Experimental investigations on heat transfer and frictional characteristics of a turbulator roughened solar air heater duct." **International Journal of Heat and Mass Transfer**. 52: 2834-2848.
- Buchlin, J.-M. 2002. "Convective Heat Transfer in a Channel with Perforated Ribs," **Int. J. Therm. Sci**. 41: 332-340.

- Cavallero, D. and Tanda, G. 2002. "An Experimental Investigation of Forced Convection Heat Transfer in Channels with Rib Turbulators by Means of Liquid Crystal Thermography." **Experimental Thermal and Fluid Science**. 26: 115–121.
- Chandra, P.R. Alexander, C.R. and Han, J.C. 2003. "Heat Transfer and Friction Behaviors in Rectangular Channels with Varying Number of Ribbed Walls." **International Journal of Heat and Mass Transfer**. 46: 481–495.
- Chapra, Steven C. and Canale, Raymond P. 1988. **Numerical methods for engineers**. Singapore: McGraw–Hill.
- Chaube, A. Sahoo, P.K. and Solanki, S.C. 2006. "Analysis of Heat Transfer Augmentation and Flow Characteristics due to Rib Roughness over Absorber Plate of a Solar Air Heater." **Renewable Energy**. 31: 317–331.
- Chen, H. C. and Patel, V. C. 1988. "Near-wall Turbulence Models for Complex Flows Including Separation." **AIAA Journal**. 26(6): 641–648.
- 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.
- Chompookham, T. Thianpong, Chinaruk. Kwankaomeng, Sutapat. and Promvonge, Pongjet. 2010. "Heat Transfer Augmentation in a Wedge-ribbed Channel Using Winglet Vortex Generators." **International Communications in Heat and Mass Transfer**. 37: 163–169.
- Dutta, S., Dutta, P., Jones, R.E. and Khan, J.A. 1997. "Experimental Study of Heat Transfer Coefficient Enhancement with Inclined Solid and 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 Promvonge, P. 2009. "Thermal Characteristics of Turbulent Rib-grooved Channel Flows." **International Communications in Heat and Mass Transfer**. 36: 705–711.

- Ebrahim Momin, A.-M. 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.
- Farrell, P. Wert, K. and Webb, R.L. 1991. "Heat Transfer and Friction Characteristics of Turbulator Radiator Tubes." **SAE Transactions**. (100): 218–230.
- Ferziger, J. H. and Peric, M. 2002. **Computational Methods for Fluid Dynamics**. Springer.
- FLUENT Incorporated. 2006. "FLUENT 6.3 User's Guide." **Fluent Incorporated Lebanon, NH, USA**.
- Founti, M.A. and Whitelaw, J.H. 1981. "Shell Side Flow in a Model Disc and Doughnut Heat Exchanger." **Tech. Report FS/81/37**, 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.
- 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, S.C. And Saini, J.S. 1997. "Thermohydraulic performance of solar air heaters with roughened absorber plates." **Solar Energy**. 61: 33–42.
- Gupta, A. SriHarsha, V. Prabhu, S.V. and Vedula, R.P. 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. and Zhang, Y.M. 1992. "High performance heat transfer ducts with parallel broken and V-shaped broken ribs." **International Journal of Heat and Mass Transfer**. 35: 513–523.
- Han, J.C. Zhang, Y.M. and Lee, C.P. 1991. "Augmented Heat Transfer in Square Channels with Parallel, Crossed, and V-shaped Angled Ribs." **ASME J. Heat Transfer**. 113: 590–596.
- Hans, V.S. Saini, R.P. and Saini, J.S. 2010. "Heat Transfer and Friction Factor Correlations for a Solar Air Heater Duct Roughened Artificially with Multiple V-ribs." **Solar Energy**. 84:898–911.

- Iacovides, Kelemenis, H. G. and Raisee, M. 2003. "Flow and Heat Transfer in Straight Cooling Passages with Inclined Ribs on opposite Walls: an Experimental and Computational Study." **Experimental Thermal and Fluid Science**. 27: 283–294.
- Incropera, Frank P. and Dewitt, David P. 1996. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. John Wiley & Sons, New York: 419–461.
- Jaurker, A.R. Saini, J.S. and Gandhi, B.K. 2006. "Heat Transfer and Friction Characteristics of Rectangular Solar Air Heater Duct Using Rib-grooved Artificial Roughness." **Solar Energy**. 80(8): 895–907.
- Jeong, Jinhee. and Hussain, Fazle. 1995. "On the Identification of a Vortex." **J. Fluid Mech.** 285: 69–94.
- Jongen, T. 1992. **Simulation and Modeling of Turbulent Incompressible Flows**. PhD Thesis. EPF Lausanne, Lausanne, Switzerland.
- Kader, B. 1981. "Temperature and Concentration Profiles in Fully Turbulent Boundary Layers." **Int. J. Heat Mass Transfer**. 24(9): 1541-1544.
- 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.
- Karmare, S.V. and Tikekar, A.N. 2007. "Heat transfer and friction factor correlation for artificially roughened duct with metal grit ribs." **International Journal of Heat and Mass Transfer**. 50: 4342–4351.
- Karmare, S.V. and Tikekar, A.N. 2010. "Analysis of Fluid Flow and Heat Transfer in a Rib Grit Roughened Surface Solar Air Heater Using CFD." **Solar Energy**. 84: 409–417.
- 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.
- Karwa, R. Solanki, S.C. and Saini, J.S., 1999. "Heat Transfer Coefficient and Friction Factor Correlations for the Transitional Flow Regime in Rib Roughened Rectangular Ducts." **International Journal of Heat and Mass Transfer**. 42: 1597–1615.
- 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, A. Bhagoria, J.L. and Sarviya, R.M. 2009. "Heat Transfer and Friction Correlations for Artificially Roughened Solar Air Heater Duct with Discrete W-shaped Ribs." **Energy Conversion and Management**. 50: 2106–2117.
- 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.
- Lanjewar, A. Bhagoria, J.L. and Sarviya, R.M. 2011a. "Heat Transfer and Friction in Solar Air Heater Duct with W-shaped Rib Roughness on Absorber Plate." **Energy**. 36: 4531-4541.
- Lanjewar, A. Bhagoria, J.L. and Sarviya, R.M. 2011b. "Experimental Study of Augmented Heat Transfer and Friction in Solar Air Heater with Different Orientations of W-Rib Roughness." **Experimental Thermal and Fluid Science**. 35: 986–995.
- Lau, S.C. Kukreja, R.T. and McMillin, R.D. 1991. "Effects of V-shaped rib arrays on turbulent heat transfer and friction of fully developed flow in a square channel." **International Journal of Heat and Mass Transfer**. 34 (7): 1605–1616.
- Lauder, B. E. and Shima, N. 1989. "Second-Moment Closure for the Near-Wall Sublayer: Development and Application." **AIAA Journal**, 27(10): 1319-1325.
- 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.
- Liou, T. M. and Chen, S. H. 1998. "Turbulent Heat and Fluid Flow in a Passage Disturbed by Detached Perforated Ribs of Different Heights." **Int. J. Heat Mass Transfer**. 41: 1795–1806.
- Liou, Tong-Miin. Chen, Shih-Hui. and ShihLiou, Kuan-Chen. 2002. "Numerical Simulation of Turbulent Flow field and Heat Transfer in a Two-dimensional Channel with Periodic Slit Ribs." **International Journal of Heat and Mass Transfer**. 45: 4493–4505.
- Lopez, J.R. Anand, N.K. and Fletcher, L.S. 1996. "Heat Transfer in a Three-dimensional Channel with Baffles." **Numer. Heat Transfer A**. 30: 189–205.
- Lu, B. and Jiang, P.-X. 2006. "Experimental and numerical investigation of convection heat transfer in a rectangular channel with angled ribs." **Experimental Thermal and Fluid Science**. 30: 513–521.
- Menter, F. R. 1994. "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications." **AIAA Journal**. 32(8): 1598-1605.

- 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.
- Olsson, C. O. and Sunden, B. 1996. "Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of Ten Radiator Tubes." **Int. J. Heat Mass Transfer**. 39: 3211–3220.
- Olsson, C. O. and Sunden, B. 1997. "Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of Ten Radiator Tubes." **Int. J. Heat Mass Transfer**. 39: 3211–3220.
- Olsson, C. O. and Sunden, B. 1998. "Experimental Study of Flow and Heat Transfer in Rib-Roughened Channels." **Exp. Thermal Fluid Sci**. 16: 349–365.
- Ooi, A. Iaccarino, G. Durbin, P.A. and Behnia, M. 2002. "Reynolds Averaged Simulation of Flow and Heat Transfer in Ribbed Ducts." **Int. J. Heat and Fluid Flow**. 23: 750–757.
- Patankar, S. V. Liu, C. H. and Sparrow, E. M. 1977. "Fully Developed Flow and Heat-Transfer in Ducts Having Streamwise-Periodic Variations of Cross-Sectional Area." **ASME J. Heat Transfer**. 99: 180–186.
- Peng, W. Jiang, Pei-Xue. Wang, Yang-Ping. and Wei, Bing-Yuan. 2011. "Experimental and Numerical Investigation of Convection Heat Transfer in Channels with Different Types of Ribs." **Applied Thermal Engineering**. 31: 2702–2708.
- Prasad, BN. and Saini, JS. 1988. "Effect of Artificial Roughness on Heat Transfer and Friction Factor in a Solar Air Heater". **Solar Energy**. 41: 555–60.
- Promvongse, P. Jedsadaratanachai, W. and Kwankaomeng, S. 2010a. "Numerical Study of Laminar Flow and Heat Transfer in Square Channel with 30° Inline Angled Baffle Turbulators." **Applied Thermal Engineering**. 30: 1292–1303.
- Promvongse, P. and Kwankaomeng, S. 2010. "Periodic Laminar Flow and Heat Transfer in a Channel with 45° Staggered V-baffles." **International Communications in Heat and Mass Transfer**. 37: 841–849.
- Promvongse, P. Sripattanapipat, S. and Kwankaomeng, S. 2010b. "Laminar Periodic Flow and Heat Transfer in Square Channel with 45° Inline Baffles on Two Opposite Walls." **International Journal of Thermal Sciences**. 49: 963–975.
- Promvongse, P. Chompookham, Teerapat. Kwankaomeng, Sutapat. and Tianpong, Chinaruk. 2010c. "Enhanced Heat Transfer in a Triangular Ribbed Channel with Longitudinal Vortex Generators" **Energy Conversion and Management**. 51: 1242–1249.

- Promvongse, P. and Thianpong, C. 2008. "Thermal Performance Assessment of Turbulent Channel Flows over Different Shaped Ribs." **International Communications in Heat and Mass Transfer**. 35: 1327–1334.
- Ryu, D.N. Choi, D.H. and Patel, V.C. 2007. "Analysis of Turbulent Flow in Channels Roughened by Two-dimensional Ribs and Three-dimensional Blocks. Part II: Heat Transfer." **Int. J. Heat and Fluid Flow**. 28: 1112–1124.
- Sahu, M.M. and Bhagoria, J.L. 2005. "Augmentation of Heat Transfer Coefficient by Using 90° Broken Transverse Ribs on Absorber Plate of Solar Air Heater." **Renewable Energy** 30: 2057–2063.
- Singh, S. Chander, Subhash. and Saini, J.S. 2011. "Heat Transfer and Friction Factor Correlations of Solar Air Heater Ducts Artificially Roughened with Discrete V-down Ribs." **Energy**. 36: 5053-5064.
- SriHarsha V. Prabhu, S.V. and Vedula, R.P. 2009. "Influence of Rib Height on the Local Heat Transfer Distribution and Pressure Drop in a Square Channel with 90° Continuous and 60° V-broken Ribs." **Applied Thermal Engineering**. 29: 2444–2459.
- Sripattanapipat, S. and P. Promvongse. 2009. "Numerical Analysis of Laminar Heat Transfer in a Channel with Diamond-shaped Baffles." **Int. Comm. Heat Mass Transfer** 36: pp: 32–38.
- Tanda, G. 2004. "Heat Transfer in Rectangular Channels with Transverse and V-shaped Broken Ribs." **International Journal of Heat and Mass Transfer**. 47: 229–243.
- Tanda, G. 2011. "Effect of Rib Spacing on Heat Transfer and Friction in a Rectangular Channel with 45° Angled Rib Turbulators on One/Two Walls." **International Journal of Heat and Mass Transfer**. 54: 1081–1090.
- Taslim, M.E. T. Li, T. and Kercher, D.M. 1996. "Experimental Heat Transfer and Friction in Channels Roughened with Angled, V-shaped, and Discrete Ribs on Two Opposite Walls." **ASME J. Turbomachinery**. 118: 20–28.
- Thianpong, C. Chompookham, T. Skullong, S. and Promvongse, P. 2009. "Thermal Characterization of Turbulent Flow in a Channel with Isosceles Triangular Ribs." **International Communications in Heat and Mass Transfer**. 36: 712–717.
- Tian, Liting; He, Yaling; Tao, Yubing. And Tao, Wenquan. 2009. "A Comparative Study on the Air-side Performance of Wavy Fin-and-tube Heat Exchanger with Punched Delta Winglets in Staggered and In-line Arrangements." **International Journal of Thermal Sciences**. 48: 1765–1776.

- Varun. Sainib, R.P. and Singal, S.K. 2008. "Investigation of Thermal Performance of Solar Air Heater Having Roughness Elements as a Combination of Inclined and Transverse Ribs on the Absorber Plate." **Renewable Energy**. 33: 1398–1405.
- Versteeg, H.K. and Malalasekera, W. 2007. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method, Second edition**. Pearson Education Limited, Edinburgh Gate, Harlow, Essex, England.
- Wang, Q.W. Chen, Qiuyang. Wang, Ling. Zeng, Min. Huang, Yanping. And Xiao, Zejun. 2007. "Experimental Study of Heat Transfer Enhancement in Narrow Rectangular Channel with Longitudinal Vortex Generators." **Nuclear Engineering and Design**. 237: 686–693.
- Webb, R.L. Eckert, E.R.G. 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.
- Wilcox, D. C. 1998; **Turbulence Modeling for CFD**. DCW Industries, Inc., La Canada, California.
- Wolfstein, M. 1969. "The Velocity and Temperature Distribution of One-Dimensional Flow with Turbulence Augmentation and Pressure Gradient." **Int. J. Heat Mass Transfer**, 12: 301-318.
- Won, S.Y. and Ligrani, P.M. 2004. "Comparisons of Flow Structure and Local Nusselt Numbers in Channels with Parallel and Crossed-rib Turbulators." **International Journal of Heat and Mass Transfer**. 47: 1573–1586.
- Won, S.Y. Mahmood, G.I. and Ligrani, P.M. 2003. "Flow Structure and Local Nusselt Number Variations in a Channel with Angled Crossed-rib Turbulators." **International Journal of Heat and Mass Transfer**. 46: 3153–3166.
- Wong, T.T. Leung, C.W. Li, Z.Y. and Tao, W.Q. 2003. "Turbulent Convection of Air-cooled Rectangular Duct with Surface-mounted Cross-ribs." **International Journal of Heat and Mass Transfer**. 46: 4629–4638.
- Yakhot, V. and Orszag, S. A. 1986. "Renormalization Group Analysis of Turbulence: I. Basic Theory." **Journal of Scientific Computing**. 1(1): 1-51.
- Yang, Y.T. and Hwang, C.W. 2004. "Numerical Calculations of Heat Transfer and Friction Characteristics in Rectangular Ducts with Slit and Solid Ribs Mounted on One Wall." **Numerical Heat Transfer Part A: Applications**. 45(4): 363–375.
- Yang, Y.T. and Hwang, C.Z. 2003. "Calculation of Turbulent Flow and Heat Transfer in a Porous-baffled Channel." **Int. J. Heat Mass Transfer**. 46 (5): 771–780.
- Yilmaz, M. 2003. "The Effect of Inlet Flow Baffles on Heat Transfer." **Int. Commun. Heat Mass Transfer**. 30 (8): 1169–1178.

จาร์วัตร เจริญสุข. พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล. คณะ
วิศวกรรมศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
พงษ์เจต พรหมวงศ์. 2542. การถ่ายเทความร้อน. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล. คณะ
วิศวกรรมศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. หน้า 167-
252.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณีนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและห้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Volume 38 Number 10

December 2011

ISSN 0735-1933

International Communications in
**HEAT and MASS
 TRANSFER**

Editor-in-Chief
 W.J. MINKOWICZ

Editors
 A.R. BALAKRISHNAN, P. CHENG, K. CRETE, C.P. GARGIROPOULOS, E. HAHNE,
 A.I. LEONTIEV, O.G. MARTYNEKO, L.W. ROSE, J. TAJME, H. YOSHIDA

Available online at www.sciencedirect.com

SciVerse ScienceDirect

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

International Communications in Heat and Mass Transfer 38 (2011) 1392–1399

Contents lists available at ScienceDirect
International Communications in Heat and Mass Transfer

journal homepage: www.elsevier.com/locate/ichmt

Numerical heat transfer study of turbulent square-duct flow through inline V-shaped discrete ribs[☆]

Pongjet Promwong ^{a,*}, Wayo Changcharoen, Sutapat Kwankameng, Chinarak Thanpong

^a *Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand*

ARTICLE INFO

Available online 9 August 2011

Keywords:
Periodic flow
Square duct
Turbulent flow
Heat transfer
V-discrete ribs

ABSTRACT

A numerical work has been conducted to examine turbulent periodic flow and heat transfer characteristics in a three-dimensional square-duct with inline 60° V-shaped discrete ribs placed on two opposite heated walls. The isothermal flux condition is applied only to the upper and lower duct walls while the two side walls are insulated, similar to internal passage cooling of gas turbine blades. The computations are based on the finite-volume method with the SIMPLE algorithm for handling the pressure-velocity coupling. Air is the working fluid with the flow rate in terms of Reynolds number ranging from 10,000 to 25,000. The numerical results are validated with available square-rib measured data and found to agree well with measurement. The computation reveals that the ribbed duct flow is fully developed periodic flow and heat transfer profiles at about $x/D = 7-11$ downstream of the inlet. Effects of different rib height to duct diameter ratios, h/D , on thermal characteristics for a periodic ribbed duct flow are investigated. It is found that point of maximum velocity (P) varies considerably (the ribs can induce impingement attachment flow on the walls leading to greater increase in heat transfer over their duct length) from the rise of h/D values leads to the increase in heat transfer and friction loss. The maximum thermal performance is attained 1.4 for the rib with $h/D = 0.0225$ where the heat transfer rate is about 40% above the smooth duct at lower Reynolds number.

© 2011 Elsevier Inc. All rights reserved.

1. Introduction

In the design of modern aircraft engines, high thrust-weight ratio and low fuel consumption rate are needed and used as the key criteria for the design. The way to achieve higher thrust-weight ratio of aircrafts is to increase the thermal efficiency of turbine. To reach this purpose, an effective way is to increase the turbine inlet temperature. However, to avoid the melting point of the turbine blade material, internal cooling of the gas turbine blades is required for the safe turbine operation.

Several techniques have been developed to enhance the heat transfer in internal duct cooling of the gas turbine blades. Ribs have been widely used in the design of turbine blades of jet engines. Many investigations have been conducted to evaluate the heat transfer enhancement in ribbed duct. Webb et al. [1] presented the heat transfer and friction behavior in duct with internal ribs. The skin friction [2], studied on pressure drop and heat transfer in a square channel with several rib configurations ($h/D = 10$ and $e/D = 0.0025$ for two walls and found that the 45° angled and 60° V-shaped ribs provide higher heat transfer than the 90° transverse ribs. The heat transfer and the friction factor were highest for the 60° compared to 45° and 90° amongst the angled and V-shaped ribs. Liu et al. [3] examined the influence of heat transfer characteristics in a square channel with various V-shaped ribs and presented that the 60° V-shaped ribs with $h/D = 10$ provides the highest thermal performance. Man and Zhang [4] investigated the heat transfer enhancement in a square channel with 60° V-shaped ribs on two opposite walls and observed that the rib with $h/D = 0.0025$ and $pe = 10$ provides higher heat transfer and performs better than the continuous ribs. Chandrasekhar et al. [5] reported thermal behavior in square channel with continuous ribs on one, two, three and four walls and observed that the heat transfer and friction factor increase with the rise in the number of ribbed walls. Prasadwar and Thangappan [6] studied the effect of various rib shapes (wedge, triangular and rectangular) on normal behaviors in a channel and showed that the staggered triangular ribs perform the best.

Tanaka [7] studied the thermal and flow behaviors in a channel with V-shaped continuous and broken ribs and found that the V-shaped ribs give higher thermal performance than the continuous ribs. Woon and Logan [8] carried out experimentally a comparison of heat transfer characteristics of channels with 45° parallel or crossed ribs and found that the 45° parallel ribs perform better than the 45° crossed ribs. Sridharan et al. [9] also provided local and average heat transfer in a square duct with 90° continuous and 60° V-shaped ribs on two opposite heated walls and found that the V-shaped ribs give higher thermal performance than the continuous ribs. Effects of 60° V-shaped baffles on thermal and friction characteristics in a channel were reported by Prasadwar [10]. Gupta et al. [11] examined the local heat transfer distribution in a square channel with continuous, parallel and broken ribs and reported that the heat transfer from the V-shaped ribs is higher

P. Promwong et al. / International Communications in Heat and Mass Transfer 38 (2011) 1392–1399

1392

Nomenclature

| | |
|----------------|---|
| A | convective heat transfer area, m ² |
| h/D | rib height ratio (h/D) |
| D | hydraulic diameter of square duct, (2H) |
| e | rib height, m |
| H | duct height, m |
| k | convective heat transfer coefficient, W m ⁻² K ⁻¹ |
| k _t | turbulent kinetic energy, (k = $\frac{3}{2}u'^2$) |
| k _w | thermal conductivity of air, W m ⁻¹ K ⁻¹ |
| L | duct length, m |
| Re | Reynolds number |
| s | rib pitch spacing or cyclic length of one module, m |
| P | static pressure, Pa |
| Pr | Prandtl number |
| Pe | pitch spacing ratio, P/D |
| Pe | Reynolds number, $(\rho u D)/\mu$ |
| T | temperature, K |
| TEF | thermal performance enhancement factor, $(Nu/Nu_0)/(f/f_0)^{1/3}$ |
| u | velocity component in x-direction, m/s |
| u' | fluctuation velocity in x-direction, m/s |
| u ₀ | mean or uniform velocity in smooth duct, m/s |
| x | rib thickness, m |
| z | coordinate direction |

Creek letter

| | |
|------------|---|
| μ | dynamic viscosity, kg s ⁻¹ m ⁻¹ |
| ν | thermal diffusivity |
| ϵ | dissipation rate |
| α | angle of attack, degree |
| ρ | density, kg m ⁻³ |

Subscript

| | |
|----|---------------|
| in | inlet |
| o | smooth duct |
| w | wall |
| pp | pumping power |

than that of the continuous and profiled ribs. Taniwari et al. [12] numerically studied thermal behaviors in turbulent square-duct flow through oblique discrete ribs mounted on one wall and found that considerable heat transfer enhancement is obtained due to a stronger secondary flow motion. Yang and Hwang [13] examined numerically heat transfer characteristics in a rectangular duct with slit and solid ribs on one wall and reported that the slit ribs perform better than the solid one. Kim and Lee [14] presented a numerical optimization procedure for design of a square channel with V-shaped square ribs extended on both walls to enhance turbulent heat transfer. In addition, influence of various angled continuous baffles (or thin ribs) placed on two walls of a square duct on heat transfer and flow characteristics were investigated numerically [15–17]. The investigation revealed that the sinusoidal vortex flows, caused by the angled baffles existed and helped to induce impingement jets on the duct walls leading to drastic increase in heat transfer rate.

Most of the investigations, cited above, have focused on heat transfer characteristics for rib height and spacing ratios for transverse, angled, V-shaped, continuous or broken square ribs. The study on turbulent periodic flows through V-shaped discrete ribs in a square duct has rarely been reported, especially for numerical work. In the present work, the numerical computations for 3D turbulent periodic flows over the 60°

V-discrete ribs (rib mounted repeatedly on two opposite heated walls of a square duct) are conducted with the main aim being to examine the changes in the flow structure and heat transfer characteristics.

2. Flow configuration

The flow system of interest is a horizontal square duct with V-shaped (or discrete) ribs repeatedly placed on the upper and lower duct walls as depicted in Fig. 1. The duct is divided into N sections (0.33 m), test section (0.75 m) and exit (0.65 m). The details of the fully ribbed duct in Fig. 1a are all similar to the ribbed duct of Subbarao et al. [18] where a middle of periodic duct showing its plan view and dimensions is depicted in Fig. 1b. The computational domain and grid in quarter module only due to symmetry is presented in Fig. 1c. The periodic flow inlet condition is attained a fully developed periodic flow and thermal condition where the velocity field and heat transfer pattern appears itself from one module to another. In the flow module, the air enters the duct at an inlet temperature, $T_0 = 300$ K and flows over the inline 60° V-discrete ribs where e and s are the rib height and thickness, respectively. All the square rib size and location on the duct module are similar to that [18] with the rib cross section of 0.0225–0.0225 m while the thin rib set to $x/D = 0.0125$. The duct height, H is 0.04 m and e/D is known as the blockage ratio. The axial pitch or spacing between the ribs is set to pe/H where pe/D is defined as the rib pitch ratio. $Pe = 0.025$. To investigate an effect of the rib height, the blockage ratio is varied in a range of $h/D = 0.025-0.025$ in the current computation.

3. Mathematical modeling

The numerical model for fluid flow and heat transfer in the square duct is developed under the following assumptions:

- Steady three-dimensional flow and heat transfer.
- The flow is periodic, fully developed, turbulent and incompressible.
- Constant fluid properties.
- Body forces, viscous dissipation and radiation heat transfer are ignored.

Based on the above assumptions, the duct flow is governed by the Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) equations and the energy equation. In the Cartesian tensor system these equations can be written as follows:

Continuity equation:

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

Momentum equation:

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

where ρ is the density of fluid, and u_i is a mean component of velocity in the direction x_i , P is the pressure, μ is the dynamic viscosity, and ν is a fluctuating component of velocity. Repeated indices indicate summation from one to three for 3-dimensional problems.

Energy equation:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

where Γ and Γ_t are molecular thermal diffusivity and turbulent thermal diffusivity, respectively and are given by

$$\Gamma = \mu / Pr \quad \text{and} \quad \Gamma_t = \mu / Pr_t \quad (4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

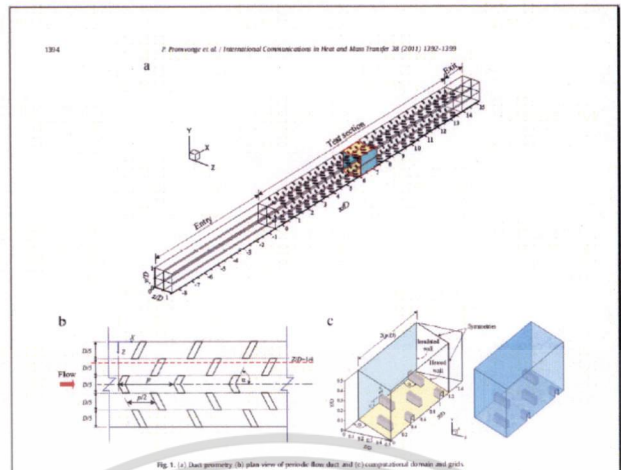


Fig. 1. (a) 3D perspective view of periodic rib duct, (b) plan view of periodic rib duct, and (c) computational domain and grid.

The Reynolds-averaged approach to turbulence modeling requires that its Reynolds stresses, $-\rho \overline{u_i u_j}$ (Eq. (2)) need to be modeled. The Boussinesq hypothesis relates the Reynolds stresses to the mean velocity gradients as seen in the equation below:

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

where k is the turbulent kinetic energy, as defined by $k = \frac{1}{2} \overline{u_i u_i}$, and μ_t is the turbulent viscosity. An advantage of one-equation approach is the relatively low computational cost associated with the computation of the turbulent viscosity, as given by $\mu_t = \rho C_\mu k^{1/2} l$. The RNG- $k-\epsilon$ model is an example of the two-equation models that use the Boussinesq hypothesis. The RNG- $k-\epsilon$ model is derived from the instantaneous Navier-Stokes equations using the "renormalization group" (RNG) method. The steady state transport equations are expressed as:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j k) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha \mu_t \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) = G_k - \epsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \epsilon) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha \mu_t \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} = 0 \quad (7)$$

In the above equations, α , and α_ϵ are the inverse effective Prandtl numbers for k and ϵ , respectively. $C_{1\epsilon}$ and $C_{2\epsilon}$ are constants. The effective viscosity μ_t is written by

$$\mu_t = \mu + \mu_t^* \quad (8)$$

where C_μ is a constant and set to 0.0945, derived using the RNG theory. All the governing equations were discretized by the QUICK numerical scheme, coupling with the SIMPLE algorithm and solved using a finite volume approach [18]. For closure of the equations, the RNG- $k-\epsilon$ model was used in the present study. The solutions were converged when the normalized residual values were less than 10^{-4} for all variables but less than 10^{-5} only for the energy equation.

Three key parameters of interest in the present work, namely, the Reynolds number, friction factor, Nusselt number and thermal performance enhancement factor. The Reynolds number is defined as:

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

The friction factor, f , is computed by pressure drop, ΔP , across the length of the periodic duct, L :

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

The local heat transfer is measured by the local Nusselt number which can be written as:

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

The area-average Nusselt number can be obtained by:

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

The thermal performance enhancement factor (TEF) is defined as the ratio of the heat transfer coefficient of an air-cooled surface, h , to that of a smooth surface, h_0 , at an equal pumping power and given by:

$$TEF = \frac{h}{h_0} = \left(\frac{Nu}{Nu_0} \right) \left(\frac{f_0}{f} \right)^{1/3} \quad (13)$$

where Nu_0 and f_0 stand for Nusselt number and friction factor for the smooth duct, respectively.

3.1. Grid independence

The computational domain is resolved by regular Cartesian elements. A grid independence procedure was implemented by using the Richardson extrapolation technique over grids with different numbers of cells, 214,593 and 427,144. It is found that the variation in Nu and f values for the inline $60^\circ V$ -discrete square rib at $Re = 0.0625$ and $Re = 15,000$ is marginal when increasing the number of cells from 214,593 to 427,144. Hence, there is no such advantage in increasing the number of cells beyond this value. Considering both convergent time and solution precision, the grid system of 214,593 cells was adopted for the current computation. For a full length duct, similar grid density was applied.

3.2. Boundary condition

For a full length ribbed duct, a uniform velocity is introduced at the inlet while a pressure outlet condition is applied at the exit. For a periodic flow module, periodic boundaries are used for the inlet and outlet of the flow domain and a constant mass flow rate of air with 300 K ($Pr = 0.707$) is assumed in the flow direction. The physical properties of the air have been assumed to remain constant at initial air temperature. Impenetrable boundary and no-slip wall conditions have been implemented over the duct walls as well as the rib surface apart from the enhanced wall treatment. The constant heat flux of two opposite heated walls is maintained at 25 kW/m^2 while the rib is assumed at adiabatic wall (high thermal resistance) condition.

4. Results and discussion

4.1. Validation

Verification of the heat transfer and friction factor of the smooth square duct with no rib is first performed by comparing with the values from previous correlations under a similar operating condition as shown in Fig. 2. The present numerical smooth duct result is found to be in excellent agreement with correlation solutions obtained from the open literature [19] for both the Nusselt number and the friction factor, within ± 5.3 and $\pm 4.8\%$ maximum deviations, respectively.

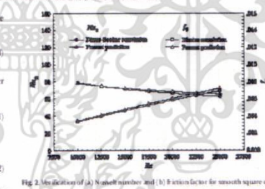


Fig. 2. The variation of (a) Nusselt number and (b) friction factor for smooth square duct.

The comparisons of the Nusselt number and friction factor for turbulent duct flows with constant heat flux conditions are as follows:

Correlation of Dittus-Boelter:

$$Nu_c = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad \text{for } Re \geq 10,000 \quad (14)$$

Correlation of Blasius:

$$f_c = 0.079 Re^{-0.25} \quad \text{for } Re \leq 2300 \quad (15a)$$

$$f_c = 0.046 Re^{-0.2} \quad \text{for } Re > 2300 \quad (15b)$$

Fig. 3 shows a comparison between the axial Nusselt number ratio, Nu_x/Nu_0 , distribution predicted by the RNG- $k-\epsilon$ model with various numerical schemes and measurements of Saitoh et al. [9] at location, $2D = 1.4$ and $Re = 15,000$. In the figure, it is visible that the predicted Nu_x/Nu_0 distributions are in excellent agreement with the measurements except for the area near the rib. The predicted results by higher-order numerical schemes, the second-order upwind scheme (SOU) and QUICK, are similar and agree well with measurements while the first-order upwind scheme (FOU) provides an under-predicted result, indicating that the use of FOU should be avoided. The axial Nu_x/Nu_0 profile prediction shows an undershooting in the middle region between the main V-rib and the discrete rib and an overshooting before reaching the discrete rib. Following the discrete rib, the predicted Nu_x/Nu_0 profile is dropped sharply in a small region behind the rib and then mimics the measurement very well until

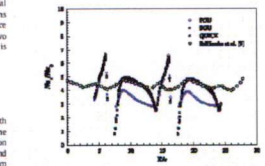


Fig. 3. Comparison between predicted Nu_x/Nu_0 and measured data for various numerical schemes at $2D = 1.4$, $Re = 15,000$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

entering the middle region again to complete the module. A close examination reveals that the areas of overshooting and undershooting are the areas of impingement attachment and separation flows, respectively while the measurement cannot capture both trends in these regions. It can be observed that the undershooting and overshooting levels are nearly the same leading to the predicted average $Nu_{s,rib}$ of 1.6 while the measured $Nu_{s,rib}$ is 3.5. Thus, the prediction deviation is found to be about 7.4% lesser. For pressure loss, the predicted $f_{D,rib}$ value across the full length duct is 7.3 while the measured $f_{D,rib}$ of Saitoh et al. [9] is 7.61 for $Re = 15,000$. Therefore, the discrepancy of the predicted $f_{D,rib}$ values is around 4.3% higher than measured data. Therefore, it is noted that the numerical results are slightly under-predicted for the heat transfer but over-predicted for the friction loss in comparison with measurements.

4.2. Fully developed periodic condition

Understanding of a fully developed periodic profile condition in the ribbed duct is needed before discussing the results. The fully developed periodic flow and heat transfer conditions in the duct mounted repeatedly with inline 60° V-discrete ribs can be displayed by considering the axial $Nu_{s,rib}$ and $f_{D,rib}$ distribution plots as depicted in Fig. 4a to c. Here the $Nu_{s,rib}$ and $f_{D,rib}$ distributions of a full length ribbed duct and a periodic ribbed duct are presented all at $Z/D = 1/4$ for $Re = 10,000$ and $PR = 0.625$.

Fig. 4a and b shows the axial $Nu_{s,rib}$ distributions at $Z/D = 1/4$ for the V-discrete ribs with $BR = 0.0625$ and 0.125 , respectively. In the figure, it is interesting to note that the axial $Nu_{s,rib}$ profile appears to be periodic at the 2nd module and then, gradually increases to become a fully developed periodic profile at the 19th module or at $x/D = 11.5$. This indicates that after the 19th module or at $x/D = 11.5$, the concept of fully developed periodic heat transfer condition is valid due to a constant $Nu_{s,rib}$ periodic profile throughout. Scrutinizing Fig. 4a and b reveals that when the rib height is increased from $BR = 0.0625$ to 0.125 , the axial $Nu_{s,rib}$ value increases faster and to peak at the 9th module (at $x/D = 5$) before reducing to a constant periodic value at the 12th module or at $x/D = 7$. However, the $Nu_{s,rib}$ profile for the rib with $BR = 0.0625$ provides the maximum value at the 14th module or at $x/D = 8.5$.

Fig. 4c displays the axial $f_{D,rib}$ profile along the tested duct for the V-discrete ribs with both $BR = 0.0625$ and 0.125 , as seen in the figure, that the $f_{D,rib}$ profile for the $BR = 0.125$ rib, at $Re = 0.1875$ and $Z/D = 1/4$ becomes periodic at the 2nd module and tends to increase to be fully developed periodic flow at the 12th module or at $x/D = 7$, similar to the periodic heat transfer condition. However, for the rib with $BR = 0.0625$ at $x/D = 0.125$ and 0.1875 , the $f_{D,rib}$ profile also appears to be periodic at the 2nd module and gradually increases to become a fully developed periodic flow around the 17th module (at $x/D = 10$ or 11). This means that the increase in rib height can induce quickly the secondary flow to be a fully developed periodic flow. In the present study, the periodic heat transfer is found to be a fully developed periodic faster than the periodic flow. Therefore, the concept of fully developed periodic flow and heat transfer profiles can be applied efficiently to turbulent flow through the ribbed ducts of sufficiently long. It can be observed that the mean $Nu_{s,rib}$ value in a developing periodic flow regime is much lower than that of a fully developed one while the average $Nu_{s,rib}$ is not much different for both the periodic regions. Again, with considering both convergent time and solution precision, only a fully developed periodic flow and heat transfer duct model is employed in the next comparison.

4.3. Effect of rib thickness

In order to investigate the rib thickness effect on flow and thermal characteristics, the V-discrete square ribs with $BR = 0.0625$ are replaced by air thin ribs at $Z/D = 0.0625$ on a fully developed periodic flow and heat transfer duct model as shown in Fig. 5a and b.

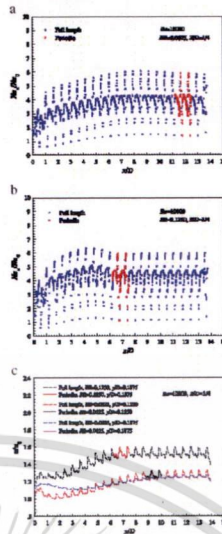


Fig. 4. Axial distributions of (a) $Nu_{s,rib}$, $BR = 0.0625$, (b) $Nu_{s,rib}$, $BR = 0.125$, and (c) $Nu_{s,rib}$, $BR = 0.0625$, for $Re = 10,000$ and $PR = 0.625$.

for the square and thin rib ducts, respectively. In the figure, the periodic flow duct consisting of 2 modules at which a single module considered, length begins at $X/D = 0$ and ends at $X/D = 1$ where p is pitch spacing distance between the consecutive ribs and set to 1.06 (or $PR = 0.625$). Both the ribs have the same height, $BR = 0.0625$ and are mounted respectively on the upper and lower heated walls only while sidewalls are insulated. Please keep in mind that the V-shape square rib width, orientation, pitch and height mentioned above provides the best thermal performance [4,9]. The local $Nu_{s,rib}$ contour for the lower duct wall fitted with the inline 60° V-discrete ribs with $BR = 0.0625$ and $PR = 0.625$ at $Re = 15,000$ is presented in Fig. 6a and b for the square and thin ribs, respectively. In the figure, it is apparent that the higher $Nu_{s,rib}$ velocity the lower wall.

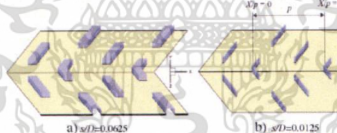
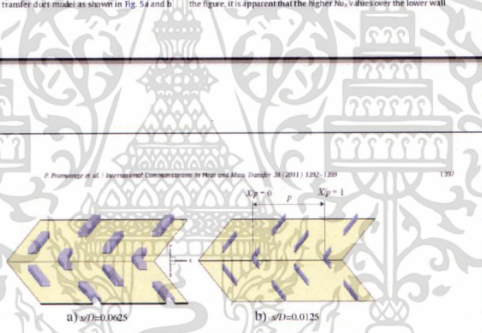


Fig. 5. Arrangement of V-discrete (a) square and (b) thin ribs in lower wall.

are seen to be in larger areas, especially in the vicinity of the V-rib and discrete-rib elements while the lower $Nu_{s,rib}$ is found in a region around the rib element near the sidewalls. The peak $Nu_{s,rib}$ values are observed at the impingement flow area in the wall in front of the V-rib and the discrete-rib elements. In scrutiny of the square and thin ribs, it is visible that the higher $Nu_{s,rib}$ values of the thin rib appear to be in larger region than those of the square one. This is because the use of the thin rib 'off' edge larger recirculation or vortex flow appearing behind the rib than that of the square rib as can be seen from the streamline plots in Fig. 6. Therefore, it is expected that the thin rib should provide higher heat transfer than the square one. The peak $Nu_{s,rib}$ values for both the V-discrete ribs are found to be about 5 times above those for the smooth duct with no rib. This indicates a merit of using the ribs over the smooth duct for enhancing heat transfer.

The variation of the average $Nu_{s,rib}$ and $f_{D,rib}$ values with Reynolds number for the V-discrete square and thin ribs at $BR = 0.0625$ is depicted in Fig. 7a and b, respectively. In the figure, it is worth noting that the $Nu_{s,rib}$ values tend to slightly decrease with the rise of Reynolds number while the $f_{D,rib}$ shows an opposite trend. The $Nu_{s,rib}$ value for the thin rib is seen to be higher than that for the square one at about 5% depending on Re values while the $f_{D,rib}$ value for the thin rib is some 17% above that for the square one. Thus, the vortex induced impingement flow (see Fig. 6) due to the V-discrete ribs as well as the role of better flow mixing brings in the augmentation of heat transfer from the duct wall. In addition, it can be noted that the V-discrete ribs provide higher $Nu_{s,rib}$ value than the smooth duct at all Re values. The scrutiny of Fig. 7 reveals that the duct with thin rib provides the heat transfer rate and friction factor of about 3.0–3.7 and 9.0–10.5 times over the duct with no rib, respectively, depending on the Re values.

Although the square rib yields lower friction loss, the thin rib is still in more consideration because of higher $Nu_{s,rib}$ value. Thus, the exact results will focus on the thin rib only.

4.4. Flow structure of thin rib

The flow structure in the duct mounted repeatedly with the inline 60° V-discrete thin rib can be displayed by considering the velocity vector and temperature field plots in transverse planes for $Re = 15,000$ in a lower half module as depicted in Fig. 8. 4 distinct axial locations, $X/D = 0.021$ (see $X/D = 1.2$ in the figure), 0.4 (see $X/D = 2.4$), 0.8 and 1.0 (see $X/D = 1.8$), respectively. The velocity vectors and temperature fields in transverse planes are the most notable characteristics of the effects of the V-discrete ribs on the impinging flow. These effects are: mainstream flow separation, recirculation vortex, and secondary flow. It is visible that two counter-rotating vortices or longitudinal vortex flows (caused by the rib appear on the lower part of duct). The separation of the longitudinal vortex flows can help to increase higher the heat transfer in the duct because of transporting the fluid from the core to the near wall regions.

4.5. Effect of blockage ratio, BR

Fig. 9a and b displays the variation of the average $Nu_{s,rib}$ ratio and friction factor ratio, $f_{D,rib}$ with different BRs of the V-discrete ribs at $PR = 0.625$ and various Re values, respectively. It is noted that both the $Nu_{s,rib}$ and $f_{D,rib}$ values tend to increase with the rise of BR values. This can be attributed to the fact that increasing the rib height can induce a larger recirculation zone behind the rib leading to higher vortices.

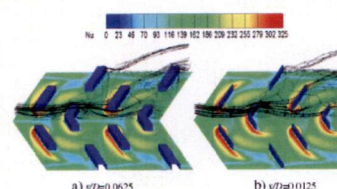


Fig. 6. Streamlines and $Nu_{s,rib}$ contours for V-discrete (a) square and (b) thin ribs at $Re = 15,000$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาติให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

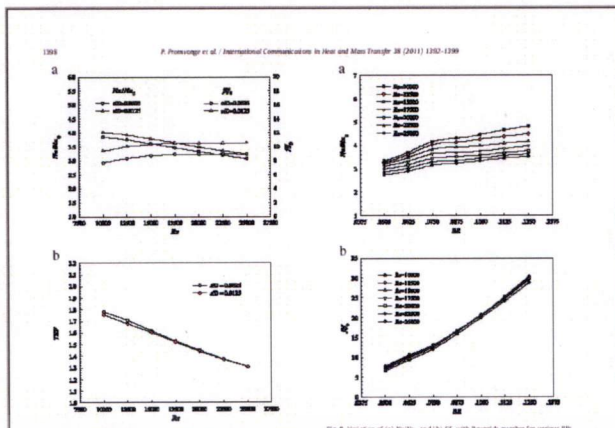


Fig. 7. Variation of (a) Nu, Nu , and (b) f , with Reynolds number for thin and square ribs.

Fig. 8. Variation of (a) Nu, Nu , and (b) f , with Reynolds number for various ribs.

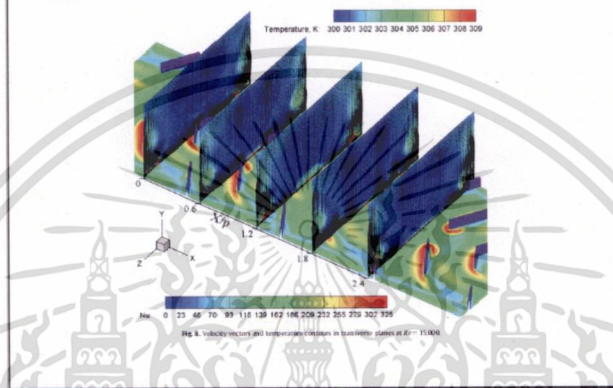


Fig. 8. Velocity vectors and temperature contours in a square duct with a rib.



Fig. 9. Variation of the TFF with Reynolds number for thin and square ribs.

strength and turbulence intensity of the flow, enhancing the heat transfer and pressure drop. The Nu and f show a decrease trend with increasing the Re while the TFF is nearly independent, especially for higher Re value. The rib with $RR = 0.125$ gives the highest Nu and f , while the one with $RR = 0.025$ provides the lowest. The Nu and f values for the duct with ribs appear to be about 2.7–4.2 and 6.5–20.5 times above those for the duct with no rib depending on the Re and Re values. Closer inspection reveals that for $RR = 0.075$, the gradient of Nu and f is nearly double while that of TFF shows a steeper increase.

Fig. 10 shows the variation of the TFF for the V-groove ribbed square duct. It is visible that the TFF tends to decrease with the Re in RR and f values for $RR = 0.075$. The rib with $RR = 0.025$ provides the highest TFF of about 1.81 at the lowest Re but the one with $RR = 0.05$ yields the highest TFF for $Re > 15,000$. The TFF of the ribs is seen to vary between 1.18 and 1.21, depending on the Re and Re values, indicating higher thermal performance over the smooth duct with no rib.

5. Conclusions

Turbulent periodic flow and thermal characteristics in a square duct equipped respectively with nine V-groove ribs are investigated numerically. The blood duct flow is found to be fully developed periodic flow and heat transfer profiles at about $x/D = 7-11$ downstream of the inlet. The F -vector flow caused by the ribs helps to induce impingement flows on the duct wall leading to greater increase in the heat transfer rate. The heat transfer in the duct with the ribs is about 2.60–3.70% higher than the smooth duct with no rib. However, the heat transfer augmentation is related to the enlarged friction loss ranging from 8 to 10.5 times above the smooth duct. Both the thin and square ribs provide nearly similar thermal performance while the thin rib yields higher Nu and f values. The TFF for the V-groove thin rib is much higher than unity

and its maximum value is about 1.8 at $RR = 0.075$. The heat transfer rate for the rib with $RR = 0.075$ is 3–4 fold above that for the smooth duct while the friction loss is about 12–13 times.

References

- [1] H. J. Kim, S. C. Lee, H. J. Lee, Heat transfer and friction in turbulent flow through a square duct with a rib, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 14 (1971) 1473–1477.
- [2] J. C. Han, S. A. Zang, C. F. Lee, Augmented heat transfer square channels with periodic vortex and V-shaped ribs, *ASME Journal of Heat Transfer* 113 (1991) 998–1006.
- [3] S. C. Lee, H. J. Kim, H. J. Lee, Effects of V-shaped ribs on turbulent heat transfer and friction of fully developed flow in a square channel, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 34 (7) (1991) 1925–1936.
- [4] J. C. Han, H. J. Kim, High performance heat transfer square channel with periodic ribs and V-shaped ribs, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 35 (1992) 1317–1329.
- [5] F. A. Choudhry, C. A. Gnanapavan, J. C. Han, Heat transfer and friction behavior in rectangular channels with varying number of ribbed walls, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 46 (2003) 491–505.
- [6] P. Promwong, C. Thangjai, Detailed performance assessment of various channel flow over a ribbed channel, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 33 (7) (2006) 1127–1138.
- [7] C. Lando, Heat transfer on rectangular channels with transverse and V-shaped ribbed ribs, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 47 (2004) 229–243.
- [8] S. W. Park, P. A. Ligrani, Comparison of flow structure and heat transfer in channels with parallel and cross-ribbed ribs, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 47 (2004) 1073–1086.
- [9] V. Sri Lakshmi, S. V. Prasad, G. V. Venkata, Influence of rib height on the local heat transfer distribution and pressure drop in a square channel with 90° conduction and 45° V-shaped ribs, *Applied Thermal Engineering* 20 (1) (2000) 203–210.
- [10] P. Promwong, Heat transfer and pressure drop in a channel with multiple 90° V-shaped ribs, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 37 (2010) 343–350.
- [11] A. Gupta, V. Venkata, S. V. Prasad, Heat transfer and friction in a square channel with 90° conduction, 90° V-shaped ribs, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53 (2010) 3973–3984.
- [12] K. Tanaka, H. Ina, K. Ishida, K. Suzuki, Numerical analysis on heat transfer and friction in square channel with 45° ribbed ribs on two opposite walls, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 46 (2003) 811–823.
- [13] T. Yang, C. Hwang, Numerical simulation of heat transfer and friction characteristics in rectangular ducts with rib and solid rib mounted square wall, *Numerical Heat Transfer Part A: Applications* 40 (1) (2001) 307–323.
- [14] K. X. Kim, Y. M. Lee, Design optimization of internal cooling passage with V-shaped ribs, *Numerical Heat Transfer Part A: Applications* 51 (1) (2007) 1105–1118.
- [15] P. Promwong, S. Udomsakdeekun, Periodic Laminar Flow and Heat Transfer in a Channel with 45° V-shaped Ribs, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 37 (2010) 943–948.
- [16] P. Promwong, S. Udomsakdeekun, S. Udomsakdeekun, Laminar periodic flow and heat transfer in square channel with 45° ribbed ribs on two opposite walls, *International Journal of Thermal Sciences* 48 (2009) 190–195.
- [17] P. Promwong, W. Jiradonchai, S. Udomsakdeekun, Numerical study of laminar flow and heat transfer in square channel with 90° ribbed walls, *Applied Thermal Engineering* 24 (2009) 1242–1253.
- [18] S. V. Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill, New York, 1980.
- [19] S. Incropera, F. P. Dewitt, *Introduction to Heat Transfer*, 5th edition, John Wiley & Sons Inc, 2006.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ประวัติส่วนตัว :

ชื่อ-สกุล นายวาโย ช่างเจริญ

วัน เดือน ปีเกิด 7 กันยายน พ.ศ. 2517 ที่กรุงเทพมหานคร

ที่อยู่ 209/50 หมู่ 8 หมู่บ้านนลินญา ซอยสกลดี 5/1 ถนนสกลดี แขวงหนองจอก เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530 โทร. 089-6943589

ความชำนาญเฉพาะด้าน การวิเคราะห์การไหลและการถ่ายเทความร้อนโดยใช้ CFD

ประวัติการศึกษา :

พ.ศ. 2542 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขา วิศวกรรมการบินและอวกาศยาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2548 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ประสบการณ์การทำงาน

พ.ศ. 2550-ปัจจุบัน เป็นอาจารย์ประจำ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เลขที่ 140 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530