

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

**การศึกษาโดยใช้ซีเอฟดีเกี่ยวกับพฤติกรรมความร้อนของการไหลแบบราบเรียบ
ผ่านช่องขนานที่มีแผ่นกั้น**

**CFD STUDY ON THERMAL BEHAVIOR OF LAMINAR BAFFLED
CHANNEL FLOWS**



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....
วัน,เดือน,ปี.....

b. 114922012
i.

**ปริญญาโทนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2550**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาโดยใช้ซีเอฟดีเกี่ยวกับพฤติกรรมความร้อนของการไหลแบบราบเรียบ
ผ่านช่องขนานที่มีแผ่นกั้น

CFD STUDY ON THERMAL BEHAVIOR OF LAMINAR BAFFLED
CHANNEL FLOWS



ปริญญาโทนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2550

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาโดยใช้ซีเอฟดีเกี่ยวกับพฤติกรรมความร้อนของการไหลแบบราบเรียบผ่าน
ช่องขนานที่มีแผ่นกั้น

CFD STUDY ON THERMAL BEHAVIOR OF LAMINAR BAFFLED
CHANNEL FLOWS

ผู้จัดทำ

- | | |
|--------------------------|-----------------------|
| 1. นาย นิวัฒน์ สุกสาม | รหัสนักศึกษา 48015420 |
| 2. นาย ณัฐวิษณุ ทิละพงศ์ | รหัสนักศึกษา 48015725 |
| 3. นาย อติศักดิ์ ไม้แก้ว | รหัสนักศึกษา 48015742 |



อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร. พงษ์เจต พรหมวงศ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาโดยใช้ซีเอฟดีเกี่ยวกับพฤติกรรมความร้อนของการไหลแบบราบเรียบ
ผ่านช่องขนานที่มีแผ่นกั้น

นาย นิวัฒน์ สุขสาม	48015420
นาย ญัฐวิษณุ ทิยะพงศ์	48015725
นาย อติศักดิ์ ไผ่แก้ว	48015742
รศ.ดร. พงษ์เจต พรหมวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษา	
ปีการศึกษา 2550	

บทคัดย่อ

การเพิ่มสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนในช่องขนานที่มีอุณหภูมิผิวคงที่และมีการไหลแบบลามินาร์ สามารถทำได้โดยติดตั้งแผ่นกั้นที่ผนังของช่องขนานแบบวางเอียงกัน ซึ่งแผ่นกั้นที่ติดตั้งนั้นมีลักษณะแบบ แผ่นเรียบ, ปริซึม และ ไคมอนด์ โดยทำการศึกษาจากการสร้างแบบจำลองสองมิติจากการประยุกต์ใช้ ซีเอฟดี (พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ) โปรแกรม FLUENT ซึ่งแบบจำลองมีอัตราส่วนความสูงของแผ่นกั้นต่อความสูงของช่องขนานมีอัตราส่วนเท่ากับ 0.4 และ 0.5 โดยใช้กริดแบบสี่เหลี่ยม และเลือกใช้ solve แบบ SIMPLE ช่วงการไหลอยู่ระหว่างค่าเรย์โนลด์ส์ นัมเบอร์เท่ากับ 100 ถึง 1500 ผลที่ได้การติดตั้งแผ่นกั้นนี้จะไปขัดขวางการเกิดบาวนด์คาร์เลเยอร์ของการไหลและของความร้อน และทำให้เกิดการหมุนวนของการไหลบริเวณช่วงห่างระหว่างแผ่นกั้นเมื่ออัตราส่วนความสูงของแผ่นกั้นต่อความสูงของช่องขนาน และ ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์นัมเบอร์และค่าตัวประกอบความเสียดทานเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาค่าสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นจะเพิ่มขึ้นด้วย แผ่นกั้นแบบปริซึมและไคมอนด์ ที่มีมุม 5 องศา ให้ค่าสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนสูง

**CFD STUDY ON THERMAL BEHAVIOR OF LAMINAR BAFFLED
CHANNEL FLOWS**

Mr. Niwat Suksam 48015420

Mr. Nuttawit Teekapong 48015725

Mr. Adisak Phaikaew 48015742

Assoc. Prof. Dr. Pongjet Promvonge Advisor

Abstract

To increase thermal performance of laminar channel flow with isothermal walls, one of the techniques used is to place baffles on the channel walls with staggered arrangements. The baffle can be flat plate, prism and diamond shapes. A two dimensional flow model is introduced by using CFD (computational fluid dynamics) program, FLUENT. The parameter considered is baffle height to channel height ratio (blockage ratio, h/H) which is varied to be 0.4 and 0.5 in the present study. Computations are conducted by using rectangular grid and the discretised equations of momentums using power law scheme but using the third-order numerical scheme for the energy equation. All the equations are coupled by SIMPLE algorithm. The flow is based on Re ranging from 100 to 1500. It can be observed that the baffles interrupt the hydrodynamic and thermal boundary layers and form a recirculation zone between two adjacent baffles. The increases in blockage ratio and Reynolds number lead to the rise of Nusselt number, friction factor and thermal performance. The prism and diamond baffles with 5 degree angle provide the highest thermal performance.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเป็นเพราะผู้วิจัยได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท ได้ให้คำแนะนำ สั่งสอน ให้คำปรึกษา และถ่ายทอดประสบการณ์ ที่เป็นประโยชน์สำหรับการทำงานวิจัยฉบับนี้

ขอขอบคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้ รวมทั้งขอขอบคุณผู้วิจัยผู้เขียนตำราวิชาการทุกท่านในบทบรรณานุกรมที่เป็นแหล่งข้อมูลให้ความรู้ในทางค้ำทฤษฎีสำหรับปริญญาโทฉบับนี้

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เป็นอย่างสูงที่ได้สนับสนุนการทำปริญญาโทฉบับนี้

ขอขอบคุณ บิดา มารดา พี่น้องทุกคนที่คอยเป็นห่วงเป็นใยสำหรับการทำปริญญาโทฉบับนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VIII
สารบัญตาราง	XII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์	XIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย	4
บทที่ 2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	6
3.1 กฎการอนุรักษ์ของการเคลื่อนที่ของของไหล	6
3.1.1 สมการควบคุมของการไหลและการถ่ายเทความร้อน	6
3.1.1.1 การอนุรักษ์มวลในปัญหา 3 มิติ	8
3.1.1.2 อัตราการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของอนุภาคของไหล	10
3.1.1.3 สมการโมเมนตัมแบบ 3 มิติ	12
3.1.1.4 สมการพลังงานในระบบ 3 มิติ	15
3.1.2 สมการสถานะ	21
3.1.3 สมการนาเวียร์-สโตกส์ สำหรับของไหลแบบนิวโทเนียน	22
3.1.4 รูปแบบอนุรักษ์สำหรับสมการควบคุมของการไหลของของไหล	26
3.2 การพาความร้อนแบบบังคับสำหรับการไหลภายในท่อ	27
3.2.1 การไหลของของไหล	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ IV อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.1.1 สภาวะการไหล	27
3.2.1.2 ความเร็วเฉลี่ย (mean velocity)	28
3.2.1.3 รูปร่างของความเร็วของของไหลที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว	29
3.2.1.4 การเปลี่ยนแปลงความดันและตัวประกอบเสียดทานในการไหลแบบปรับตัวเต็มที่แล้ว	31
3.2.2 การถ่ายเทความร้อน	32
3.2.2.1 อุณหภูมิเฉลี่ย	33
3.2.2.2 สภาวะการปรับตัวเต็มที่แล้ว (Fully developed conditions)	34
3.2.3 การสมดุลของพลังงาน (Energy Balance)	37
3.2.3.1 กรณีฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ (Constant Surface Heat Flux)	38
3.2.3.2 กรณีอุณหภูมิที่ผิวคงที่ (Constant Surface Temperature)	39
3.2.4 สหพันธ์การพาความร้อน: การไหลแบบลามินาร์ในท่อกลม	41
3.2.4.1 ช่วงบริเวณปรับตัวเต็มที่แล้ว (Fully developed region)	41
3.2.5 สหพันธ์การพาความร้อน: ท่อที่ไม่กลม	43
3.2.6 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer Enhancement)	45
บทที่ 4 การกำหนดปัญหาและการตรวจสอบผลการคำนวณ	46
4.1 วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล	46
4.1.1 ขั้นตอนการประมวลผล	46
4.1.2 ขั้นตอนการประมวลผล	46
4.1.3 ขั้นตอนการแสดงผล	47
4.2 การกำหนดลักษณะของปัญหาที่ใช้ในการวิจัย	47
4.3 สมการควบคุมการไหลและการถ่ายเทความร้อน	50
4.4 ค่าเงื่อนไขขอบเขตในการคำนวณการไหลสองมิติ	51
4.5 การตรวจสอบ โปรแกรมที่ใช้กับผลเฉลยแม่นยำ (Exact solution)	52
บทที่ 5 ผลการจำลองและการวิจารณ์	54
5.1 ช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบ (Flat plate baffles)	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.1.1 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์	54
5.1.2 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าสัดส่วน h/H	58
5.1.3 ผลความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์์นัมเบอร์และค่านัสเซลท์นัมเบอร์ ของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบ	61
5.1.4 ผลความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ และค่านัสเซลท์นัมเบอร์ ช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบต่อช่องขนานผิวเรียบ	62
5.1.5 ผลความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ และค่าตัวประกอบความ เสียดทานของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบ	63
5.1.6 ผลความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ และค่าตัวประกอบความ เสียดทานของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบต่อช่องขนานผิวเรียบ	64
5.1.7 ผลความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ และค่าสมรรถนะการ แลกเปลี่ยนความร้อนของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบ	65
5.2 ช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบ ไดมอนด์ (Diamond Baffles)	66
5.2.1 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่ามุมของ ไดมอนด์	66
5.2.2 ผลความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์์นัมเบอร์และค่านัสเซลท์นัมเบอร์ ของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบ ไดมอนด์	69
5.2.3 ผลความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์์นัมเบอร์และค่านัสเซลท์นัมเบอร์ ของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบ ไดมอนด์ต่อช่องขนานผิวเรียบ	70
5.2.4 ผลความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ และค่าตัวประกอบ ความเสียดทานของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบ ไดมอนด์	71
5.2.5 ผลความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ และค่าตัวประกอบความ เสียดทานของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบ ไดมอนด์ต่อช่องขนานผิวเรียบ	72
5.2.6 ผลความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ และค่าสมรรถนะการ แลกเปลี่ยนความร้อนของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบ ไดมอนด์	73
5.3 ช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึม (Prism Baffles)	74
5.3.1 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่ามุมของปริซึม	74
5.3.2 ผลความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์์นัมเบอร์และค่านัสเซลท์นัมเบอร์ ของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึม	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3.3 ผลความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์์นัมเบอร์และค่านัสเซลท์นัมเบอร์ ของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึมต่อช่องขนานผิวเรียบ	78
5.3.4 ผลความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ และค่าตัวประกอบ ความเสียดทานของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึม	79
5.3.5 ผลความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ และค่าตัวประกอบความ เสียดทานของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึมต่อช่องขนานผิวเรียบ	80
5.3.6 ผลความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ และค่าสมรรถนะ การแลกเปลี่ยนความร้อนของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึม	81
5.4 การเปรียบเทียบผลการจำลองของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นประเภทต่างๆที่สัดส่วน ความสูงแผ่นกั้นต่อความสูงของช่องขนาน (h/H) เท่ากัน	82
5.4.1 ค่านัสเซลท์นัมเบอร์ที่สัดส่วน h/H เท่ากับ 0.4	82
5.4.2 ค่านัสเซลท์นัมเบอร์ที่สัดส่วน h/H เท่ากับ 0.5	83
5.4.3 ค่าตัวประกอบความเสียดทานที่สัดส่วน h/H เท่ากับ 0.4	84
5.4.4 ค่าตัวประกอบความเสียดทานที่สัดส่วน h/H เท่ากับ 0.5	85
5.4.5 ค่าสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนที่สัดส่วน h/H เท่ากับ 0.4	86
5.4.6 ค่าสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนที่สัดส่วน h/H เท่ากับ 0.5	87
บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ	88
6.1 สรุปผลการจำลอง	88
6.2 ข้อเสนอแนะ	89
เอกสารอ้างอิง	90
ภาคผนวก บทความที่ทำการวิจัย	91
ประวัติผู้เขียน	101

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1 ชิ้นส่วนของของไหลสำหรับกฎการอนุรักษ์	7
3.2 การไหลของมวลเข้าและออกชิ้นส่วนของไหล	9
3.3 องค์ประกอบของความเค้นบนผิวหน้าทั้งสามทิศทาง ของชิ้นส่วนของไหล	13
3.4 องค์ประกอบของความเค้นในทิศทาง x	13
3.5 องค์ประกอบของเวกเตอร์ฟลักซ์ความร้อน	17
3.6 การก่อตัวของบาวนด์รีเลเซอร์ของการไหลแบบลามินาร์ในท่อกลม	27
3.7 สมดุลแรงบนอีลิเมนต์ dx สำหรับการไหลแบบลามินาร์ที่ก่อตัวเต็มที่ในท่อกลม	29
3.8 การก่อตัวของบาวนด์รีเลเซอร์ทางความร้อนในท่อกลม	32
3.9 การเปลี่ยนแปลงตามแกนของ h สำหรับการไหลภายในท่อ	36
3.10 ปริมาตรควบคุมสำหรับการไหลภายในท่อ	37
3.11 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนแบบต่างๆ	45
4.1 แบบจำลองการไหลของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบ	47
4.2 แบบจำลองการไหลของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบโคมอนด์	48
4.3 แบบจำลองการไหลของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึม	48
4.4 ลักษณะกริดที่ใช้ในการจำลองการไหลภายในช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบ	49
4.5 ลักษณะกริดที่ใช้ในการจำลองการไหลภายในช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบโคมอนด์	49
4.6 ลักษณะกริดที่ใช้ในการจำลองการไหลภายในช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึม	50
4.7 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทของช่องขนานผิวเรียบ ระหว่างผลเฉลยแม่นยำตรงกับผลที่ได้จากการจำลอง	52
4.8 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวประกอบความเสียดทานของช่องขนานผิวเรียบ ระหว่างผลเฉลยแม่นยำตรงกับค่าที่ได้จากการจำลอง	53
5.1 แสดงเวกเตอร์ความเร็วภายในช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบ ที่มีสัดส่วน $h/H = 0.4$ พิจารณาผลกระทบจากค่า Re	55
5.2 แสดงเส้นทางการอุณหภูมิกภายในช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบ ที่มีสัดส่วน $h/H = 0.4$ พิจารณาผลกระทบจากค่า Re	56
5.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทเฉพาะที่ภายในช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบ ที่มีสัดส่วน $h/H = 0.4$ พิจารณาผลกระทบจากค่า Re	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.4 แสดงเวกเตอร์ความเร็วภายในช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบ ที่มีค่า $Re = 1500$ พิจารณา ผลกระทบจากค่าสัดส่วน h/H	58
5.5 แสดงเส้นทางของอุณหภูมิกภายในช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบ ที่มีค่า $Re = 1500$ พิจารณาผลกระทบจากค่าสัดส่วน h/H	59
5.6 แสดงค่านัสเซิลท์นัมเบอร์เฉพาะที่ภายในช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบ ที่มีค่า $Re = 1500$ พิจารณาผลกระทบจากค่าสัดส่วน h/H	60
5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์กับนัสเซิลท์นัมเบอร์ ของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบ	61
5.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์และค่านัสเซิลท์นัมเบอร์ ของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบต่อช่องขนานผิวเรียบ	62
5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์และค่าตัวประกอบความเสียดทาน ของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบ	63
5.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ และค่าตัวประกอบความเสียดทาน ของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบต่อช่องขนานผิวเรียบ	64
5.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์กับค่าสมรรถนะการแลกเปลี่ยน ความร้อนของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบ	65
5.12 แสดงเวกเตอร์ความเร็วภายในช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบ ไคมอนด์ที่มีสัดส่วน $h/H = 0.5$ และ มีค่า $Re = 1500$ พิจารณาผลกระทบของมุมที่เปลี่ยนแปลง	66
5.13 แสดงเส้นทางของอุณหภูมิกภายในช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบ ไคมอนด์ที่มีสัดส่วน $h/H = 0.5$ และมีค่า $Re = 1500$ พิจารณาผลกระทบของมุมที่เปลี่ยนแปลง	67
5.14 แสดงค่านัสเซิลท์นัมเบอร์เฉพาะที่ภายในช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบ ไคมอนด์ที่มีสัดส่วน $h/H = 0.5$ และมีค่า $Re = 1500$ พิจารณาผลกระทบของมุมที่เปลี่ยนแปลง	68
5.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์กับนัสเซิลท์นัมเบอร์ ของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบ ไคมอนด์	69
5.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์และค่านัสเซิลท์นัมเบอร์ ของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบ ไคมอนด์ต่อช่องขนานผิวเรียบ	70
5.17 ผลความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ และค่าตัวประกอบความเสียดทาน ของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบ ไคมอนด์	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.18 แสดงสัมพัทธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์และค่าตัวประกอบความเสียดทานของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบโคมอนต์ต่อช่องขนานผิวเรียบ	72
5.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ และค่าสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบโคมอนต์	73
5.20 แสดงเวกเตอร์ความเร็วภายในช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึมที่มีสัดส่วน $h/H = 0.5$ และมีค่า $Re = 1500$ พิจารณาผลกระทบของมุมที่เปลี่ยนแปลง	74
5.21 แสดงเส้นทางการอุณหภูมิภายในช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึมที่มีสัดส่วน $h/H = 0.5$ และมีค่า $Re = 1500$ พิจารณาผลกระทบของมุมที่เปลี่ยนแปลง	75
5.22 แสดงค่านัสเซลท์นัมเบอร์เฉพาะที่ภายในช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึมที่มีสัดส่วน $h/H = 0.5$ และมีค่า $Re = 1500$ พิจารณาผลกระทบของมุมที่เปลี่ยนแปลง	76
5.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์กับนัสเซลท์นัมเบอร์ของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึม	77
5.24 แสดงสัมพัทธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์และค่านัสเซลท์นัมเบอร์ของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึมต่อช่องขนานผิวเรียบ	78
5.25 ผลความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ และค่าตัวประกอบความเสียดทานของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึม	79
5.26 แสดงสัมพัทธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์และค่าตัวประกอบความเสียดทานของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึมต่อช่องขนานผิวเรียบ	80
5.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ และค่าสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึม	81
5.28 แสดงการเปรียบเทียบค่านัสเซลท์นัมเบอร์ของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นประเภทต่างๆ ที่สัดส่วนความสูงแผ่นกั้นต่อความสูงของช่องขนาน (h/H) เท่ากับ 0.4	82
5.29 แสดงการเปรียบเทียบค่านัสเซลท์นัมเบอร์ของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นประเภทต่างๆ ที่สัดส่วน ความสูงแผ่นกั้นต่อความสูงของช่องขนาน (h/H) เท่ากับ 0.5	83
5.30 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวประกอบความเสียดทานของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นประเภทต่างๆ ที่สัดส่วนความสูงแผ่นกั้นต่อความสูงของช่องขนาน (h/H) เท่ากับ 0.4	84
5.31 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวประกอบความเสียดทานของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นประเภทต่างๆ ที่สัดส่วนความสูงแผ่นกั้นต่อความสูงของช่องขนาน (h/H) เท่ากับ 0.5	85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.32 แสดงการเปรียบเทียบค่าสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนของช่องขนานที่มีแผ่นกั้น ประเภทต่างๆที่สัดส่วนความสูงแผ่นกั้นต่อความสูงของช่องขนาน (h/H) เท่ากับ 0.4	86
5.33 แสดงการเปรียบเทียบค่าสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนของช่องขนานที่มีแผ่นกั้น ประเภทต่างๆที่สัดส่วนความสูงแผ่นกั้นต่อความสูงของช่องขนาน (h/H) เท่ากับ 0.5	87



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 สมการควบคุมการไหลของของไหลแบบนิวโทเนียนอัดตัวได้	26
3.2 ค่า Nu_p และ f สำหรับการไหลแบบลามินาร์ที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว ในท่อ พื้นที่หน้าตัดต่างๆ กัน	44



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

A_c	พื้นที่หน้าตัดของท่อ
A_s	พื้นที่ผิวท่อทั้งหมด
C	ค่าความร้อนจำเพาะ
C_f	สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน
C_p	ค่าความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่
C_v	ค่าความร้อนจำเพาะที่ความปริมาตรคงที่
D_h	เส้นผ่าศูนย์กลางไฮดรอลิก
E	พลังงาน
e	อัตราการผลิตรูปร่างเชิงเส้นของชิ้นส่วนของไหล
f	ตัวประกอบความเสียดทาน
f_o	ตัวประกอบความเสียดทานของช่องขนานผิวเรียบ
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง
H	ความสูงของช่องขนาน
h	ความสูงของแผ่นกั้น; เอนทาลปี; สัมประสิทธิ์การพาความร้อน
i	พลังงานความร้อนภายใน
k	ค่าการนำความร้อน
L	ความยาวของท่อ
m	อัตราการไหลของมวล
Nu	นัสเซลต์นัมเบอร์
Nu_o	นัสเซลต์นัมเบอร์ของช่องขนานผิวเรียบ
P	ความดัน; เส้นรอบรูป
Pr	พราน์นัมเบอร์
q	อัตราการถ่ายเทความร้อน
q_s	ฟลักซ์ความร้อนระหว่างของไหลกับผิวท่อที่จุดใดๆ
R	ค่าคงที่ของแก๊ส
Re	เรย์โนลด์นัมเบอร์
r	รัศมีท่อ
S	เทอมของการสร้างหรือสูญหาย
T	อุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

T_m	อุณหภูมิเฉลี่ย
T_s	อุณหภูมิผิว
t	เวลา
u	ความเร็วในแนวแกน x
u_m	ความเร็วเฉลี่ย
v	ความเร็วในแนวแกน y ; ปริมาตรจำเพาะ
w	ความเร็วในแนวแกน z
$X_{fd,h}$	ความยาวช่วงบริเวณทางเข้าสำหรับการปรับตัวของการไหล
$X_{fd,t}$	ความยาวช่วงบริเวณทางเข้าสำหรับการปรับตัวของความร้อน
Φ	ฟังก์ชันการสลายตัว
α	ค่าการฟุ้งกระจายของความร้อน
ϕ	ค่าคุณสมบัติใดๆ ต่อ หน่วยมวล; มุมของแผ่นกั้นแบบโคมอนต์ และ ปริซึม
η	สมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อน
λ	ความหนืดที่สอง
μ	ความหนืดสัมบูรณ์
ρ	ความหนาแน่น
τ	ความตึงเฉือนเนื่องจากความหนืด

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันความต้องการด้านพลังงานของประเทศมีแนวโน้มสูงขึ้นเพราะกาใช้พลังงานมีมากขึ้นตามความเจริญของประเทศเพื่อใช้ในการผลิตและสร้างอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในชีวิตประจำวัน การพัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนับเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญอย่างหนึ่ง สำหรับใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไป ทั้งกิจการขนาดย่อมจนกระทั่งถึงอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีอุปกรณ์การใช้งานประเภทแลกเปลี่ยนความร้อน หากสามารถใช้อุปกรณ์ดังกล่าวได้อย่างเต็มความสามารถของอุปกรณ์ ก็จะสามารถช่วยลดต้นทุนการผลิตทางด้านพลังงานได้ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนดังกล่าวที่ใช้กันมีอยู่หลายประเภท แต่โดยทั่วไปจะมีหลักการเดียวกัน คือ การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการไหลมี 2 ชนิดที่ไหลตามกันหรือไหลสวนทางกันโดยที่ไม่จำเป็นต้องให้ของไหลทั้ง 2 ชนิดผสมกัน ซึ่งกระบวนการดังกล่าวพบได้โดยทั่วไปในงานเชิงวิศวกรรม เช่น หม้อน้ำรถยนต์ คอนเดนเซอร์เครื่องปรับอากาศ หม้อต้มต่างๆและอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในอุตสาหกรรมทั่วไป ทั้งหมดเป็นตัวอย่างของการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลร้อนและของไหลเย็น และหน้าที่ที่สำคัญของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนก็คือการนำเอาพลังงานความร้อนมาใช้อย่างมีประสิทธิภาพและให้เกิดประโยชน์สูงสุด

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการใช้งานหลายรูปแบบและมีการใช้งานอย่างกว้างขวางทั้งในงานอุตสาหกรรมและงานพาณิชย์ โดยมีตั้งแต่ขนาดเล็กที่สุด ได้แก่ ตัวระบายความร้อนในอุปกรณ์สร้างภาพอินฟราเรด ระบบจรวดนำวิถี จนถึงขนาดใหญ่ ได้แก่ หม้อไอน้ำ คอนเดนเซอร์ และชุดระบายความร้อนจากน้ำหล่อเย็น ความหลากหลายของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนครอบคลุมทุกชนิด รูปทรง และ การจัดวางทางเรขาคณิตของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยส่วนใหญ่ จะทำหน้าที่ให้ความสะดวกแก่การถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลสองชนิดที่มีอุณหภูมิที่แตกต่างกัน โดยกระบวนการถ่ายเทความร้อนจากของไหลตัวหนึ่งไปสู่ของไหลอีกตัวหนึ่งจะต้องมีผลต่างสุทธิของอุณหภูมิ ในขณะที่เกิดการถ่ายเทความร้อนนั้นของไหลที่ร้อนจะมีอุณหภูมิลดลง ส่วนของไหลเย็นจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามอุณหภูมิสูงสุดของของไหลเย็นสามารถจะขึ้นไปถึงได้นั้นจะต้องต่ำกว่าอุณหภูมิสูงสุดของของไหลร้อนเสมอ ในทำนองเดียวกันอุณหภูมิต่ำสุดของของไหลร้อนจะต้องมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิสูงสุดของของไหลเย็นเสมอ กล่าวคือจะต้องมีความแตกต่างคือของอุณหภูมิของของไหลทั้งสองเพื่อเป็นตัวขับเคลื่อนการถ่ายเทความร้อนไปสู่ของไหลเย็น ซึ่งเป็นไปตามกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ ในทำนองเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เดียวกันจะต้องมีการใช้พลังงานส่วนหนึ่งในการทำให้ของไหลไหลผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งจะแสดงให้เห็นเป็นผลต่างความดันระหว่างทางเข้าและทางออกของอุปกรณ์

โดยทั่วไปสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนจะสัมพันธ์กับการสูญเสียความดันเนื่องจากแรงเสียดทาน การปรับปรุงสมรรถนะทางความร้อนมักจะทำให้เกิดการสูญเสียแรงดันที่เพิ่มขึ้นสำหรับการสูญเสียแรงดันที่เกิดขึ้นบางครั้งก็จะไม่คุ้มค่าเนื่องจากพลังงานกลที่ต้องจ่ายไปจะมีมูลค่ามากกว่าการถ่ายเทพลังงานความร้อน

งานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในช่องขนาน ได้แก่การไหลของอากาศ ความเร็วของอากาศ ตัวครีบในช่องขนาน ค่าความสูงของช่องขนานที่สัมพันธ์กับความสูงของช่องขนานและการจัดวางครีบแต่ละตัว เพื่อช่วยให้อากาศทำการถ่ายเทความร้อนได้ดีขึ้น วิธีที่สามารถใช้ศึกษาค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ได้ เช่น วิธีวิเคราะห์เพื่อหาผลเฉลยแม่นยำตรง(Exact solution) การสร้างแบบจำลองเพื่อทดสอบการไหลและการถ่ายเทความร้อนและระเบียบวิธีคำนวณเชิงตัวเลข สำหรับระเบียบวิธีคำนวณเชิงตัวเลขนี้ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เป็นตัวช่วยในการหาผลเฉลยปัญหาของการไหลและการถ่ายเทความร้อนหรือที่เรียกว่า ระเบียบวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล(Computational Fluid Dynamics; CFD) จะมีความสะดวกกว่าวิธีแรก เนื่องจากระบบสมการเชิงอนุพันธ์ที่ครอบคลุมปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบไม่เชิงเส้น(Non linear) จึงทำให้มีความยุ่งยากสำหรับการวิเคราะห์เพื่อหาผลเฉลยแม่นยำตรง ส่วนการสร้างแบบจำลองเพื่อทดสอบต้องใช้เวลามีค่าใช้จ่ายสูง ทำให้การเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขทำได้ในขอบเขตจำกัด

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีการคำนวณทางด้านพลศาสตร์ของไหลและการถ่ายเทความร้อนเป็นเครื่องมือสำหรับศึกษาค่าพารามิเตอร์ ได้แก่ ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynold number; Re) ค่าอัตราส่วนความสูงของครีบต่อความสูงของแบบจำลองการไหล (Blockage ratio; $Br=h/H$) และรูปแบบของครีบ เพื่อค้นหาผลของพารามิเตอร์เหล่านี้ที่สามารถช่วยส่งเสริมให้อากาศถ่ายเทความร้อนจากผิวช่องขนานที่มีครีบอยู่ภายในที่จัดวางแบบเอียงกันได้ดีขึ้น สำหรับผลการวิจัยที่เราได้สามารถใช้เป็นแนวทางหนึ่งในการออกแบบการจัดวางครีบให้มีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้นได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ศึกษาพฤติกรรมการไหลของอากาศ และการถ่ายความร้อนของช่องขนาน ในกรณีที่จัดวางครีบบนผนัง
2. วิเคราะห์ผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ ได้แก่ ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ (Re) รูปแบบของครีบบ ค่าอัตราส่วนความสูงของครีบบต่อความสูงของแบบจำลองการไหล (h/H) ที่มีผลต่อสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อน

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นฐานของระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite volume method)
2. ทำการคำนวณในแบบจำลองการไหลสองมิติที่มีการไหลแบบลามินาร์ในช่วงเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ 100 ถึง 1500
3. พิจารณาเฉพาะการพาความร้อนแบบบังคับ (Forced convection)
4. ผิวของช่องขนานมีอุณหภูมิคงที่
5. ครีบบนผนังเป็นแบบอะไดแบติก

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1.4.1 รวบรวมข้อมูล ทำการศึกษาทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของการไหลภายในช่องขนาน
- 1.4.2 กำหนดลักษณะของปัญหา และกำหนดลักษณะรูปร่างของครีบบและสร้างรูปจำลองบนโปรแกรมออกแบบทางพลศาสตร์ของไหลพร้อมกับเลือกขนาดและจำนวนกริดที่เหมาะสม
- 1.4.3 ตรวจสอบโปรแกรมกับผลเฉลยแม่นยำ (Exact solution) ทำการคำนวณเชิงตัวเลขในปัญหาที่ต้องการศึกษา
- 1.4.4 ทำการคำนวณเชิงตัวเลขจากแบบจำลองการไหลสองมิติ ที่ต้องการศึกษาโดยการเปลี่ยนแปลง ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตามที่ระบุในวัตถุประสงค์ได้แก่ ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ รูปแบบของครีบบ ค่าอัตราส่วนของครีบบต่อความสูงของแบบจำลองการไหล
- 1.4.5 วิเคราะห์ผลที่ได้จากการคำนวณ นำข้อมูลจากการคำนวณมาทำการวิเคราะห์ผลและแสดงค่าในรูปแบบพารามิเตอร์ไว้หน่วย
- 1.4.6 สรุปผลการวิจัยตามวัตถุประสงค์และข้อเสนอแนะที่ควรทำการวิจัยต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย

1.5.1 ทำให้ทราบผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของช่องขนานที่มีครีบ

1.5.2 เพื่อการพัฒนาและออกแบบครีบภายในช่องขนาน ในกรณีจัดวางครีบบนเขียงกันให้มีความเหมาะสม

1.5.3 เป็นองค์ความรู้เพื่อการวิจัยด้านการถ่ายเทความร้อนในช่องขนานต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันได้มีการศึกษาในเรื่องการปรับปรุงการถ่ายเทความร้อนของช่องขนานเพื่อที่จะหาวิธีในการลดต้นทุนในด้านพลังงาน และได้มีการค้นคว้ารูปแบบของการปรับปรุงการถ่ายเทความร้อนภายในช่องขนานให้มีความเหมาะสมและเกิดประสิทธิภาพสูงสุด งานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

S.S. Mousavi , K. Hooman [4] ศึกษาการไหลและการถ่ายเทความร้อนภายในช่องขนานที่มีครีบบนแผ่นเรียบวางเอียงกันภายในช่องขนาน ซึ่งได้กำหนดให้ค่าระยะห่างของครีบบนที่ และปรับเปลี่ยนอัตราส่วนความสูงของครีบบนต่อความสูงของแบบจำลองการไหล การศึกษาใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขโดยระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม ภายในแบบจำลองการไหลสองมิติ การไหลเป็นแบบราบเรียบและอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady flow) ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์อยู่ในช่วง 50-500 โดยใช้ความยาวจำเพาะของสมการเป็นความสูงของแบบจำลองการไหลหรือความสูงของช่องอากาศ ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มอัตราส่วนความสูงของครีบบนต่อความสูงของแบบจำลองการไหล เป็นการเพิ่มขนาดของกระแสหมุนวน ทำให้ความเร็วยังของแบบจำลองดีขึ้น

ชาญณรงค์ วันทา [3] ศึกษาถึงพารามิเตอร์ที่ช่วยส่งเสริม ให้อากาศถ่ายเทความร้อนจากชิพได้ดี ซึ่งพารามิเตอร์ที่นำมาศึกษาได้แก่ ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ ค่าอัตราส่วนความสูงของชิพต่อความสูงของแบบจำลองการไหล และค่าอัตราส่วนระยะห่างของชิพต่อความยาวของชิพ โดยจัดวางชิพแบบแถวเรียงตรงกันในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และนำวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลบนพื้นฐานระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม มาเป็นเครื่องมือในการศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการศึกษาดังกล่าว สำหรับผลของการศึกษา ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ ค่าอัตราส่วนความสูงของชิพต่อความสูงของแบบจำลองการไหล และค่าอัตราส่วนระยะห่างของชิพต่อความยาวของชิพในสภาวะการไหลคงตัว พบว่าการเพิ่มค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ในขอบเขตที่เหมาะสม ทั้งในการคำนวณสองมิติและสามมิติ สามารถทำให้ชิพมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้นได้

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 กฎการอนุรักษ์ของการเคลื่อนที่ของของไหล

ในบทนี้เราจะศึกษาสมการพื้นฐานทางคณิตศาสตร์สำหรับการไหลและการถ่ายเทความร้อน ที่ประกอบด้วย กฎการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม และพลังงาน [2] สิ่งนี้ได้นำไปสู่สมการควบคุมของการไหลรวมทั้งเงื่อนไขที่จำเป็นบางอย่างคือ เงื่อนไขเริ่มต้นและที่ขอบ เนื้อหาหลักที่ครอบคลุมในบทนี้ประกอบด้วย

- ระบบสมการ PDEs (Partial Differential Equations) ซึ่งควบคุมการไหลในพิกัดคาร์ทีเซียน (x, y, z)
- สมการสถานะ
- แนวคิดเกี่ยวกับความหนืดในรูปของ Newtonian ซึ่งนำไปสู่สมการ Navier – Stokes
- ความเหมือนกันในเชิงหลักการระหว่างสมการ PDEs ของ การไหลกับสมการการเคลื่อนย้าย (Transport Equations)

3.1.1 สมการควบคุมของการไหลและการถ่ายเทความร้อน

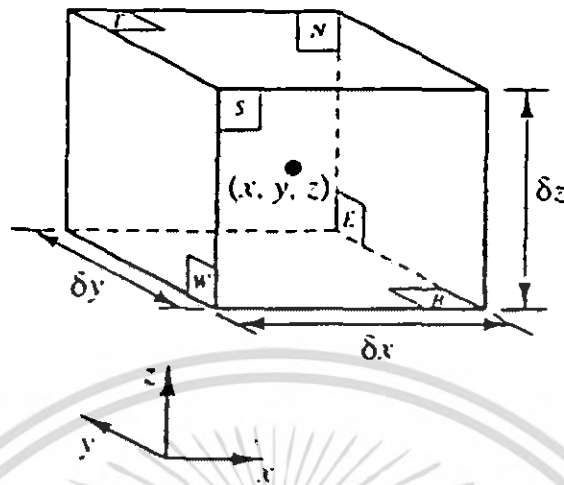
สมการควบคุมของการไหลของของไหลแทนถึงสมการทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายกฎการอนุรักษ์ทางฟิสิกส์ ดังนี้

- มวลของไหลไม่สูญหายไปไหน
- อัตราการเปลี่ยนแปลง โมเมนตัมเท่ากับผลรวมของแรงที่กระทำต่ออนุภาคของไหล (กฎข้อที่สองของนิวตัน)
- อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานเท่ากับผลรวมของอัตราการเพิ่มขึ้นของความร้อนกับอัตราของงานที่กระทำในอนุภาคของไหล (กฎข้อหนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์)

ของไหลจะถูกพิจารณาว่ามีความต่อเนื่องสำหรับการวิเคราะห์การไหลของของไหลที่ระดับมหภาค คือพิจารณาที่สเกลระดับ $1 \mu\text{m}$ ขึ้นไป โครงสร้างและการเคลื่อนที่ระดับโมเลกุลสามารถไม่นำมาพิจารณาได้ เราสนใจที่จะอธิบายพฤติกรรมของไหลในเทอมของคุณสมบัติในระดับมหภาค เช่น ความเร็ว ความดัน ความหนาแน่น อุณหภูมิ รวมทั้งอัตราการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติเหล่านี้ เป็นต้น สิ่งนี้อาจจะคิดเป็นค่าเฉลี่ยของกลุ่มโมเลกุลจำนวนมาก ดังนั้นจุดใดๆ ในของไหลนั้นจะมีคุณสมบัติของของไหลในระดับมหภาค ไม่ขึ้นกับอิทธิพลจากอนุภาคในระดับโมเลกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราพิจารณาชิ้นส่วนของไหลขนาดเล็กที่มีความยาวด้านเท่ากับ δx , δy และ δz ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 3.1 ชิ้นส่วนของของไหลสำหรับกฎการอนุรักษ์

ผิวหน้าทั้งหกด้านจะถูกแทนด้วย N, S, E, W, T, B ซึ่งแทนถึงทิศทางในแนวเหนือ ใต้ ตะวันออก ตะวันตก บน และล่าง ตามลำดับ ศูนย์กลางของชิ้นส่วนอยู่ที่ตำแหน่ง (x, y, z) เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นระบบของ มวล โมเมนตัม และพลังงานของชิ้นส่วนของไหล จะสามารถสร้างสมการของไหลของของไหลได้

คุณสมบัติของของไหลทั้งหมดจะเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งและเวลา ดังนั้นเราจำเป็นต้องเขียน $\rho(x, y, z, t)$, $p(x, y, z, t)$, $T(x, y, z, t)$ และ $u(x, y, z, t)$ สำหรับความหนาแน่น, ความดัน, อุณหภูมิและเวกเตอร์ความเร็ว ตามลำดับ เพื่อหลีกเลี่ยงความซับซ้อนในการเขียนคำสัญลักษณ์ แสดงคุณสมบัติดังกล่าว เราจะไม่ระบุตำแหน่งและเวลา เช่น ความดันที่ศูนย์กลาง (x, y, z) ของชิ้นส่วนของไหลที่เวลา t จะถูกแทนโดย p หรือการเปลี่ยนแปลงในทิศทาง x ของความดันที่ศูนย์กลาง (x, y, z) ที่เวลา t หนึ่งๆ จะถูกแทนโดย $\frac{\partial p}{\partial x}$ หลักการนี้จะถูกนำไปใช้สำหรับคุณสมบัติของไหลทั้งหมด

ชิ้นส่วนของไหลที่พิจารณานั้นมีขนาดเล็กมาก จนกระทั่งคุณสมบัติของไหลที่ผิวหน้าสามารถอธิบายได้อย่างแม่นยำด้วยสองพจน์แรกของสมการ Taylor ดังนั้น สำหรับตัวอย่างความดันที่ผิวหน้า e และ w ซึ่งทั้งคู่มีระยะห่างจากศูนย์กลางของชิ้นส่วนของไหลเท่ากับ $\frac{1}{2} \cdot \delta x$ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$p - \frac{\partial p}{\partial x} \cdot \frac{1}{2} \cdot \delta x \quad \text{และ} \quad p + \frac{\partial p}{\partial x} \cdot \frac{1}{2} \cdot \delta x$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1.1 การอนุรักษ์มวลในปัญหา 3 มิติ

ขั้นตอนแรกของการหาสมการอนุรักษ์มวลคือการพิจารณาถึงสมมูลมวลของชิ้นส่วนของไหลดังนี้

อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลใน
ชิ้นส่วนของไหล = อัตราการไหลสุทธิของมวล
ที่เข้าไปในชิ้นส่วนของไหล

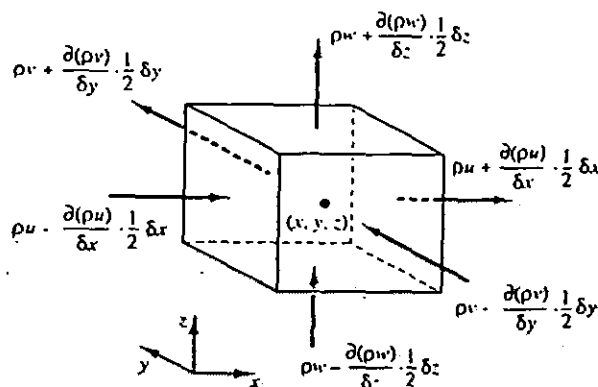
อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในชิ้นส่วนย่อยของของไหลคือ

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \delta x \delta y \delta z) = \frac{\partial \rho}{\partial t} \delta x \delta y \delta z \quad (3.1)$$

ต่อไปเราจำเป็นต้องหาอัตราการไหลโดยมวลผ่านพื้นผิวและชิ้นส่วนย่อยซึ่งถูกให้โดยผลคูณของความหนาแน่น พื้นที่และความเร็วในทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวนั้น จากรูปที่ 3.2 จะพบว่าอัตราการไหลสุทธิของมวลเข้าสู่ชิ้นส่วนย่อยผ่านพื้นผิวสามารถเขียนได้ ดังนี้

$$\begin{aligned} & \left(\rho u - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \delta y \delta z - \left(\rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \delta y \delta z \\ & + \left(\rho v - \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z - \left(\rho v + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z \\ & + \left(\rho w - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y - \left(\rho w + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y \end{aligned} \quad (3.2)$$

โดยการไหลเข้าสู่ชิ้นส่วนที่ทำให้มวลของชิ้นส่วนย่อยเพิ่มขึ้นถูกกำหนดให้เป็นบวก และมีค่าเป็นลบเมื่อมีการไหลออกจากชิ้นส่วนย่อย



รูปที่ 3.2 การไหลของมวลเข้าและออกชิ้นส่วนของไหล

อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลภายในชิ้นส่วนย่อยนั้น เท่ากับอัตราของมวลสุทธิจากการไหลออกผ่านพื้นผิวของชิ้นส่วนย่อย ซึ่งเมื่อย้ายข้างให้อยู่ในฝั่งเดียวกันเมื่อรวมกันแล้วจะหักล้างกันหมด เทอมทั้งหมดได้ถูกเรียบเรียงทางซ้ายของสมการและถูกหารด้วยปริมาตรของชิ้นส่วนย่อย $\Delta x \Delta y \Delta z$ ซึ่งจะได้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (3.3)$$

หรือในรูปแบบของเวกเตอร์

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (3.4)$$

สมการ 3.4 นี้ คือสมการอนุรักษ์มวล หรือสมการความต่อเนื่อง 3 มิติ แบบการไหลไม่คงตัวและอัดตัวได้ เทอมแรกทางซ้ายมือคืออัตราการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น (มวลต่อปริมาตร) ต่อเวลา เทอมที่สองอธิบายถึงการไหลสุทธิของมวลข้ามผ่านขอบเขตของปริมาตรเล็ก ๆ นั้น มันจะถูกเรียกเป็นเทอมของการพา

สำหรับของไหลที่อัดตัวไม่ได้ (เช่น ของเหลว) ความหนาแน่นมีค่าคงที่และสมการที่ 3.4 จะกลายเป็น

$$\text{div}(\mathbf{u}) = 0 \quad (3.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือในรูปแบบเต็ม

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.6)$$

3.1.1.2 อัตราการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของอนุภาคของไหล ในเทอมของจีนส่วนย่อยของไหล

ในกฎของการอนุรักษ์โมเมนตัมและพลังงานนั้น จะมีการกล่าวถึงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของอนุภาคของไหล คุณสมบัติแต่ละอย่างของอนุภาคจะเป็นฟังก์ชันของตำแหน่ง (x, y, z) ของอนุภาคและเวลา (t) ในการศึกษาที่เรากำหนดให้ค่าคุณสมบัติใดๆ ต่อหน่วยมวล ด้วยสัญลักษณ์ ϕ โดยการเปลี่ยนแปลงของ ϕ เทียบกับเวลาของอนุภาคของไหล $\frac{D\phi}{Dt}$ คือ

$$\frac{D\phi}{Dt} = \frac{\partial\phi}{\partial t} + \frac{\partial\phi}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial\phi}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial\phi}{\partial z} \frac{dz}{dt}$$

และโดยที่ $dx/dt = u$, $dy/dt = v$ และ $dz/dt = w$ หากแทนค่าดังกล่าวไปในสมการข้างบน จะได้ว่า

$$\frac{D\phi}{Dt} = \frac{\partial\phi}{\partial t} + u \frac{\partial\phi}{\partial x} + v \frac{\partial\phi}{\partial y} + w \frac{\partial\phi}{\partial z} = \frac{\partial\phi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \text{grad}\phi \quad (3.7)$$

$D\phi/Dt$ เป็นนิยามของอัตราการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ ϕ ต่อหน่วยมวล ในกรณีของสมการอนุรักษ์มวล เราสนใจที่จะพัฒนาสมการสำหรับอัตราการเปลี่ยนแปลงต่อหน่วยปริมาตร อัตราการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ ϕ สามารถถูกแปลงให้เป็นคุณสมบัติเชิงปริมาตรได้โดยการคูณความหนาแน่น ρ เข้าไปกับเทอม $D\phi/Dt$ ดังนั้น

$$\rho \frac{D\phi}{Dt} = \rho \left(\frac{\partial\phi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \text{grad}\phi \right) \quad (3.8)$$

รูปแบบนี้ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการอธิบายความเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติของไหล ในปริมาตรเล็กๆ ที่หยุดนิ่งหนึ่งๆ เป็นการนิยามความสัมพันธ์ระหว่าง: 1) อนุพันธ์ของคุณสมบัติ ϕ ของอนุภาคของไหล กับ 2) อัตราเปลี่ยนแปลงของ ϕ ในชิ้นส่วน หรือปริมาตรย่อยๆ ของไหลนั้น

ต่อไปนี้หากเราหันมาพิจารณากฎการอนุรักษ์ของมวล ค่าของมวลต่อหน่วยปริมาตร (ในที่นี้คือ ความหนาแน่น ρ) คือพารามิเตอร์ที่เรากำลังศึกษา เมื่อพิจารณาผลรวมของ: 1) อัตราการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นในปริมาตรเล็กๆ และ 2) ผลของการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากการพาในสมการอนุรักษ์มวล (3.4) ก็คือ

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u})$$

ดังนั้นรูปทั่วไปของ เทอมทั้งสองเทอมนี้ สำหรับคุณสมบัติใดๆ ของของไหล ϕ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\phi\mathbf{u}) \quad (3.9)$$

สมการที่ 2.9 เทอมแรก คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติ ϕ ต่อหน่วยปริมาตรบวกกับเทอมที่สอง คือการไหลสุทธิของ ϕ ต่อปริมาตรที่ออกจากชิ้นส่วนย่อยของไหล ซึ่งเราสามารถนำมาเขียนใหม่เพื่อให้ได้ภาพความสัมพันธ์ ระหว่างผลรวมของทั้งสองเทอมนี้กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของ ϕ ในอนุภาคของไหล ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\phi\mathbf{u}) = \rho \left[\frac{\partial\phi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \text{grad}\phi \right] + \phi \left[\frac{\partial\rho}{\partial t} + \text{div}(\rho\mathbf{u}) \right] = \rho \frac{D\phi}{Dt} \quad (3.10)$$

เทอม $\phi \left[\frac{\partial\rho}{\partial t} + \text{div}(\rho\mathbf{u}) \right]$ เท่ากับศูนย์เนื่องจากสมการอนุรักษ์มวล (3.4) จาก

ความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงใน (3.10) จะได้ว่า

อัตราการเพิ่มของ ϕ สำหรับชิ้นส่วนย่อยของไหล	+ อัตราการไหลสุทธิของ ϕ ที่ออกจากชิ้นส่วนย่อยของไหล	= อัตราการเพิ่มของ ϕ สำหรับอนุภาคของไหล
--	--	--

การเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมของอนุภาคของไหลทั้ง 3 ทิศทาง อ้างอิงแกนในพิกัดฉาก รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของพลังงานซึ่งเป็นปริมาณสเกลลาร์นั้น สามารถแทนพารามิเตอร์ ϕ และอัตราการเปลี่ยนแปลงของมันต่อหน่วยปริมาตร ตามที่นิยามไว้ใน (3.8) และ (3.10) สามารถแสดงได้ดังในตารางข้างล่างนี้

x-momentum	u	$\rho \frac{Du}{Dt}$	$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u u)$
y-momentum	v	$\rho \frac{Dv}{Dt}$	$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v u)$
z-momentum	w	$\rho \frac{Dw}{Dt}$	$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w u)$
Energy	E	$\rho \frac{DE}{Dt}$	$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \text{div}(\rho E u)$

รูปแบบที่ให้ไว้ในตารางข้างบนนี้จะถูกนำไปใช้ในการสร้างสมการอนุรักษ์โมเมนตัมและพลังงาน ดังที่จะแสดงรายละเอียดในหัวข้อถัดจากนี้

3.1.1.3 สมการโมเมนตัมแบบ 3 มิติ

กฎข้อที่สองของนิวตันกล่าวไว้ว่า “อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของอนุภาคของไหล เท่ากับผลรวมของแรง ที่กระทำต่ออนุภาค”

$$\text{อัตราการเพิ่ม โมเมนตัม} = \text{ผลรวมแรงที่กระทำ} \\ \text{ของอนุภาคของไหล} \quad \text{ต่ออนุภาคของไหล}$$

อัตราการเพิ่ม โมเมนตัมต่อหน่วยปริมาตรของอนุภาคของไหลในทิศ x , y และ z กำหนดได้โดย

$$\rho \frac{Du}{Dt} \quad \rho \frac{Dv}{Dt} \quad \rho \frac{Dw}{Dt} \quad (3.11)$$

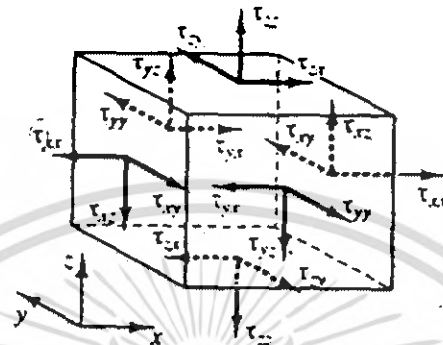
เราแบ่งประเภทของแรงที่กระทำต่ออนุภาคของไหลเป็นสองแบบ คือ

- แรงกระทำที่ผิว (Surface forces) ได้แก่ แรงเนื่องจากความดัน แรงเนื่องจากความหนืด
- แรงกระทำในปริมาตร (Body forces) ของชิ้นส่วนย่อยของของไหล ได้แก่ แรงโน้มถ่วง แรงหมุนหนีศูนย์กลาง แรงแม่เหล็กไฟฟ้า Coriolis Force

โดยทั่วไปเทอมของแรงกระทำที่ผิวจะถูกจัดกลุ่มแยกออกต่างหาก และเทอมของแรงกระทำภายในปริมาตรจะถูกพิจารณาเป็นเทอมของการเพิ่มและลด โมเมนตัมแยกออกมาอีกเทอมหนึ่ง

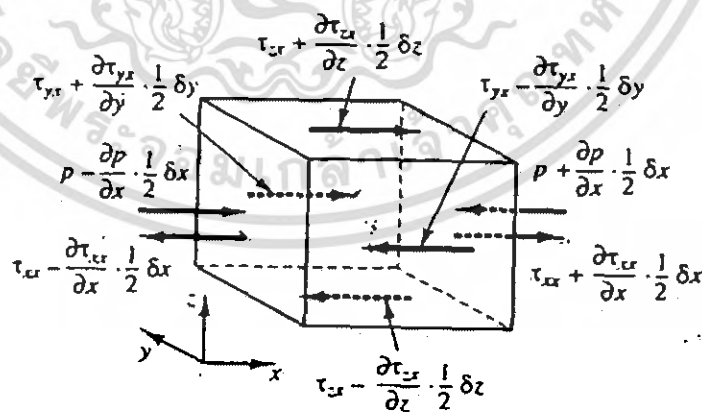
ความเค้นที่กระทำต่อชิ้นส่วนย่อยของของไหล สามารถนิยามได้ด้วยเทอมของความดัน และเทอมความเค้นย่อยเนื่องจากความหนืด μ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ความดันซึ่งมองว่าเป็นความเค้นตั้งฉาก ถูกแทนด้วย p ส่วนความเค้นเฉือนเนื่องจากความหนืดแทนโดย τ สัญลักษณ์ τ_{ij} ถูก

ประยุกต์ใช้เพื่อชี้ให้เห็นถึงทิศทางของความเค้นเนื่องจากความหนืด ตัวห้อย i และ j ใน τ_{ij} ชี้ให้เห็นถึงความเค้นย่อยที่กระทำในทิศทาง j บนพื้นที่ที่มีเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทาง i นั่นเอง



รูปที่ 3.3 องค์ประกอบของความเค้นบนผิวหน้าทั้งสามทิศทาง ของชิ้นส่วนของไหล

เริ่มแรกเราพิจารณาแรงกระทำในทิศทาง x เนื่องจากความเค้นและความเค้นย่อย τ_{xy} , τ_{yz} และ τ_{xx} ดังในรูปที่ 3.4 ขนาดของแรงที่กระทำบนพื้นผิวเกิดจากผลคูณของความเค้นและพื้นที่ และที่มีทิศทางเดียวกับแกนอ้างอิง โดยมีเครื่องหมายบวก และมีค่าเป็นเครื่องหมายลบเมื่อทิศทางตรงข้าม แรงสุทธิในทิศทาง x คือผลรวมของแรงย่อยที่กระทำบนชิ้นส่วนย่อยของไหล ในทิศทางดังกล่าว



รูปที่ 3.4 องค์ประกอบของความเค้นในทิศทาง x

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาผิวหน้าที่ E, W เราได้ว่า

$$\begin{aligned} & \left[\left(p - \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{2} \Delta x \right) - \left(\tau_{xx} - \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \frac{1}{2} \Delta x \right) \right] \Delta y \Delta z + \left[- \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{2} \Delta x \right) + \left(\tau_{xx} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \frac{1}{2} \Delta x \right) \right] \Delta y \Delta z \\ & = \left(- \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \right) \Delta x \Delta y \Delta z \end{aligned} \quad (3.12a)$$

แรงสุทธิในทิศทาง x บนผิวหน้า N, S ได้ว่า

$$- \left(\tau_{yx} - \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \frac{1}{2} \Delta y \right) \Delta x \Delta z + \left(\tau_{yx} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \frac{1}{2} \Delta y \right) \Delta x \Delta z = \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (3.12b)$$

แรงสุทธิในทิศทาง x บนผิวหน้า T, B ได้ว่า

$$- \left(\tau_{zx} - \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \frac{1}{2} \Delta z \right) \Delta x \Delta y + \left(\tau_{zx} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \frac{1}{2} \Delta z \right) \Delta x \Delta y = \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (3.12c)$$

ผลรวมแรงต่อหน่วยปริมาตรทั้งหมดเนื่องจากความเค้นที่ผิวหน้าจะเท่ากับผลรวมของ (3.1.2a), (3.1.2b) และ (3.1.2c) ที่หารด้วยปริมาตรสุทธิ

$$\frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad (3.13)$$

เทอมที่ปรากฏ ใน 3.13 นี้ยังไม่รวมการพิจารณาแรงกระทำภายในชิ้นส่วนของของไหล ซึ่งสามารถถูกรวมได้โดยการพิจารณาเป็นแหล่งสร้างหรือทำลายโมเมนตัม เป็นหน่วยของโมเมนตัมต่อปริมาตรต่อเวลาในทิศทาง x

ในขั้นตอนนี้สมการโมเมนตัมในทิศทาง x หาได้โดยการกำหนดให้อัตราการเปลี่ยนโมเมนตัมในทิศทาง x และ อนุภาคการไหล (3.11) เท่ากับผลรวมของแรงในทิศทาง x ที่กระทำต่อชิ้นส่วนของไหลโดยความเค้นที่ผิว บวกกับอัตราการสร้างหรือสูญสลายของโมเมนตัมในทิศทาง x เนื่องจากแรงภายในชิ้นส่วนของของไหลนั้นตามแนวแกน x

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (3.14a)$$

ในทำนองเดียวกันโมเมนต์ในทิศทาง y จะเขียนได้ว่า

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial(-p + \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \quad (3.14b)$$

และโมเมนต์ในทิศทาง z คือ

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial(-p + \tau_{zz})}{\partial z} + S_{Mz} \quad (3.14c)$$

ความดันมีลักษณะเป็นความเค้นอัดตั้งฉาก (Compressive normal stress) ซึ่งโดยทั่วไปมีเครื่องหมายเป็นลบ ในขณะที่ความเค้นตั้งฉากเนื่องจากความหนืดมีลักษณะเป็นความเค้นดึง (Tensile normal Stress) จะมีเครื่องหมายบวก

เทอมของการสร้างหรือสูญหายของโมเมนต์ $S_{Mx} = 0$, $S_{My} = 0$ และ S_{Mz} (3.14 a-e) คือแรงกระทำภายในของแต่ละทิศทาง ตัวอย่างเช่นแรงกระทำภายในเนื่องจากแรงโน้มถ่วงจะถูกกำหนดให้มีค่า

$$S_{Mx} = 0, S_{My} = 0 \text{ และ } S_{Mz} = -\rho g$$

3.1.1.4 สมการพลังงานในระบบ 3 มิติ

สมการพลังงานถูกหาได้จากกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ ที่กล่าวไว้ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานของอนุภาคของไหล เท่ากับอัตราการเพิ่มความดันแก่อนุภาคบวกกับอัตราการทำงานของอนุภาคการไหล

อัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงานของอนุภาคของไหลต่อหน่วยปริมาตร คือ

$$\rho \frac{DE}{Dt} \quad (3.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานที่กระทำโดยแรงบนพื้นผิว

อัตราการเกิดงานบนพื้นผิวของชิ้นส่วนของไหล จะเท่ากับผลคูณของแรงและความเร็วในทิศทางของแรง สำหรับแรงตามที่แสดงใน (3.12a – c) เฉพาะที่กระทำในทิศทาง x จะเกิดงานเท่ากับ

$$\begin{aligned} & \left[\left(pu - \frac{\partial(pu)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) - \left(\tau_{xx}u - \frac{\partial(\tau_{xx}u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) - \left(pu + \frac{\partial(pu)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) + \left(\tau_{xx}u + \frac{\partial(\tau_{xx}u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \right] \delta y \delta z \\ & + \left[- \left(\tau_{yx}u - \frac{\partial(\tau_{yx}u)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) + \left(\tau_{yx}u + \frac{\partial(\tau_{yx}u)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \right] \delta x \delta z \\ & + \left[- \left(\tau_{zx}u - \frac{\partial(\tau_{zx}u)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) + \left(\tau_{zx}u + \frac{\partial(\tau_{zx}u)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \right] \delta x \delta y \end{aligned}$$

ดังนั้นเมื่อลดรูปแล้ว อัตราการเกิดงานสุทธิบนพื้นผิวเหล่านี้ ในทิศทาง x คือ

$$\left[\frac{\partial[u(-p + \tau_{xx})]}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} \right] \delta x \delta y \delta z \quad (3.16a)$$

ส่วนประกอบย่อยของแรงเนื่องจากความเค้นพื้นผิวในทิศทาง y และ z ก็จะทำงานบนอนุภาคดังกล่าวเช่นกัน ในกระบวนการคิดแบบข้างต้นอัตราการเกิดงานบนอนุภาคของไหลเนื่องจากการทำงานโดยแรงเหล่านี้สามารถเขียนได้ ดังนี้

$$\left[\frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial[v(-p + \tau_{yy})]}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} \right] \delta x \delta y \delta z \quad (3.16b)$$

และ

$$\left[\frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial[w(-p + \tau_{zz})]}{\partial z} \right] \delta x \delta y \delta z \quad (3.16c)$$

อัตราการเกิดงานทั้งหมดต่อหน่วยปริมาตรของของไหลโดยแรงบนพื้นผิวทั้งหมด คือผลรวมของ (3.16 a – c) หากด้วยปริมาตร $\delta x \delta y \delta z$ เทอมของ p สามารถถูกจัดรวบรวมและเขียนในรูปแบบของไดเวอร์เจนต์ ดังนี้

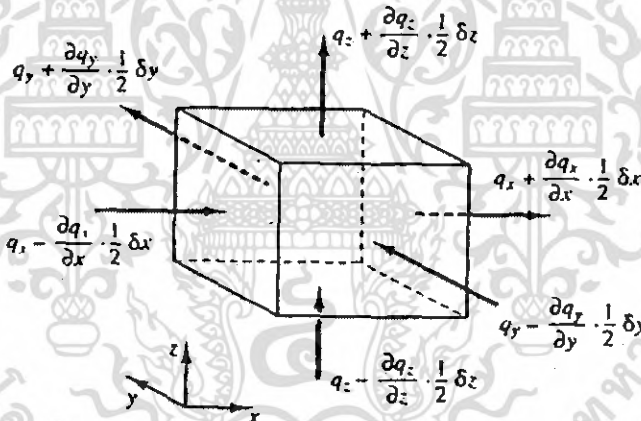
$$-\frac{\partial(up)}{\partial x} - \frac{\partial(vp)}{\partial y} - \frac{\partial(wp)}{\partial z} = -\text{div}(pu)$$

ดังนั้นอัตราการเกิดงานรวมทั้งหมดบนชิ้นส่วนของของไหลโดยความเค้นบนพื้นผิว มีหน่วยเป็น ปริมาณของพลังงานต่อหน่วยเวลาต่อหน่วยปริมาตร

$$\begin{aligned} [-\text{div}(pu)] + \left[\frac{\partial(ur_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(ur_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(ur_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(vr_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(vr_{yy})}{\partial y} \right. \\ \left. + \frac{\partial(vr_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(wr_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(wr_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(wr_{zz})}{\partial z} \right] \end{aligned} \quad (3.17)$$

ฟลักซ์เนื่องจากการนำความร้อน

เวกเตอร์ฟลักซ์ความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ q ประกอบด้วยองค์ประกอบย่อย 3 ส่วนคือ q_x, q_y, q_z (รูปที่ 3.5)



รูปที่ 3.5 องค์ประกอบของเวกเตอร์ฟลักซ์ความร้อน

อัตราการถ่ายเทความร้อนสุทธิที่ชิ้นส่วนของไหล เนื่องจากฟลักซ์ของความร้อนทิศทาง x ถูกกำหนดโดยผลต่างระหว่างอัตราความร้อนที่เข้าผ่านผิวหน้า W กับอัตราความร้อนที่ออกจากผิวหน้า E

$$\left[\left(q_x - \frac{\partial q_x}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) - \left(q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \right] \delta y \delta z = -\frac{\partial q_x}{\partial x} \delta x \delta y \delta z \quad (3.18a)$$

ในการทำงานเดียวกันอัตราการถ่ายเทความร้อนสุทธิของไหลเนื่องจากฟลักซ์ของความร้อนในทิศทาง y และ z คือ

$$-\frac{\partial q_y}{\partial y} \delta x \delta y \delta z \quad \text{and} \quad -\frac{\partial q_z}{\partial z} \delta x \delta y \delta z \quad (3.18b-c)$$

อัตราการความร้อนสุทธิที่เพิ่มขึ้นของอนุภาคของไหลต่อหน่วยปริมาตรครอบคลุมขอบเขตของชิ้นส่วนของไหล จะเท่ากับผลรวมของ(3.18a-c) หาค่าด้วยปริมาตร $\delta x \delta y \delta z$

$$-\frac{\partial q_x}{\partial x} - \frac{\partial q_y}{\partial y} - \frac{\partial q_z}{\partial z} = -\text{div } \mathbf{q} \quad (3.19)$$

กฎของ Fourier ของการนำความร้อนอธิบายความสัมพันธ์ของอัตราการถ่ายเทปริมาณความร้อนต่อพื้นที่ (Heat flux) กับ ความแตกต่างอุณหภูมิ ต่อหน่วยความยาว

$$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad q_y = -k \frac{\partial T}{\partial y} \quad q_z = -k \frac{\partial T}{\partial z}$$

สิ่งนี้สามารถเขียนในรูปแบบของเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$\mathbf{q} = -k \text{ grad } T \quad (3.20)$$

รวมสมการ (3.19) และ (3.20) ซึ่งจะได้ว่า อัตราการเพิ่มของความร้อนที่อนุภาคของไหลเนื่องจากการนำความร้อนผ่านพื้นผิวของชิ้นส่วนของของไหล

$$-\text{div } \mathbf{q} = \text{div}(k \text{ grad } T) \quad (3.21)$$

สมการพลังงาน

ในหัวข้อนี้เราจะมาถ่วงถึงพลังงานจำเพาะของของไหล ซึ่งแทนด้วย E พลังงานของของไหลถูกนิยามเป็นผลรวมของพลังงานความร้อนภายใน i , พลังงานจลน์ $\frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2)$ และพลังงานศักย์โน้มถ่วง โดยมองว่าชิ้นส่วนของไหลมีการสะสมพลังงานศักย์โน้มถ่วง พลังงานภายในอาจไม่มีการรวมเอาพลังงานศักย์เข้าไว้ในนิยามก็ได้ หากมองว่าวัตถุกำลังทำงานในขณะที่เคลื่อนที่ในสนามความโน้มถ่วงของโลกโดยงานในส่วนนี้เรียกว่า งานเนื่องจากน้ำหนักของวัตถุซึ่งเป็น source term ในสมการพลังงาน มีหน่วยเป็นพลังงานต่อหน่วยปริมาตรต่อหน่วยเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การอนุรักษ์พลังงานของชิ้นส่วนของไหล ทำให้โดยการกำหนดให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานของชิ้นส่วนของไหล (3.15) มีค่าเท่ากับ ผลรวมของการเกิดงานสุทธิบนชิ้นส่วนของไหล (3.17) และอัตราความร้อนสุทธิที่เพิ่มขึ้นของของไหลเนื่องจากฟลักซ์ความร้อน (3.21) และอัตราการเพิ่มของพลังงานเนื่องจากเทอมของ Source ดังนั้นสมการพลังงาน คือ

$$\rho \frac{DE}{Dt} = -\text{div}(pu) + \left[\frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zx})}{\partial z} \right] + \text{div}(k \text{ grad } T) + S_E \quad (3.22)$$

ในสมการ 3.22 เรามี $E = i + \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2)$

แม้ว่า (3.22) คือสมการพลังงานที่สมบูรณ์ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ พลังงานภายในที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิจากของไหล และพลังงานจลน์ที่สัมพันธ์กับความเร็วของของไหล เรามักจะพิจารณาพลังงานในแต่ละส่วนแยกจากกัน พลังงานจลน์ที่สัมพันธ์กับความเร็วของของไหลนั้นสามารถเขียนได้โดยการแปลงรูปของสมการโมเมนตัม กล่าวคือ ทำการคูณสมการโมเมนตัมในทิศทาง x (2.14 a) ด้วยความเร็ว u สมการโมเมนตัมในทิศทาง y ด้วยความเร็ว v และสมการโมเมนตัมในทิศทาง z (2.14c) ด้วยความเร็ว w และรวมผลลัพธ์เข้าด้วยกัน ก่อนทำการหารด้วย 2 สิ่งนี้ทำให้ได้สมการอนุรักษ์สำหรับพลังงานจลน์ดังข้างล่างนี้

$$\rho \frac{D\left[\frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2)\right]}{Dt} = -\mathbf{u} \cdot \text{grad } p + u \left(\frac{\partial\tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zx}}{\partial z} \right) + v \left(\frac{\partial\tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zy}}{\partial z} \right) + w \left(\frac{\partial\tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zx}}{\partial z} \right) + \mathbf{u} \cdot S_M \quad (3.23)$$

ทำการลบ (3.23) จาก (3.22) และนิยาม source term ขึ้นใหม่เป็น $S_i = S_E - \mathbf{u} \cdot S_M$ จึงทำให้ได้สมการพลังงานภายในดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \rho \frac{Di}{Dt} = & -p \operatorname{div} \mathbf{u} + \operatorname{div}(k \operatorname{grad} T) + \tau_{xx} \frac{\partial u}{\partial x} + \tau_{yx} \frac{\partial u}{\partial y} \\ & + \tau_{zx} \frac{\partial u}{\partial z} + \tau_{xy} \frac{\partial v}{\partial x} + \tau_{yy} \frac{\partial v}{\partial y} + \tau_{zy} \frac{\partial v}{\partial z} + \tau_{xz} \frac{\partial w}{\partial x} \\ & + \tau_{yz} \frac{\partial w}{\partial y} + \tau_{zz} \frac{\partial w}{\partial z} + S_i \end{aligned} \quad (3.24)$$

ในการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ เรามี $i = cT$, ซึ่ง c คือค่าความร้อนจำเพาะและ $\operatorname{div} \mathbf{u} = 0$ ซึ่งทำให้เราจัดเรียงสมการ(3.24) ไปในรูปของอุณหภูมิได้คือ

$$\begin{aligned} \rho c \frac{DT}{Dt} = & \operatorname{div}(k \operatorname{grad} T) + \tau_{xx} \frac{\partial u}{\partial x} + \tau_{yx} \frac{\partial u}{\partial y} + \tau_{zx} \frac{\partial u}{\partial z} \\ & + \tau_{xy} \frac{\partial v}{\partial x} + \tau_{yy} \frac{\partial v}{\partial y} + \tau_{zy} \frac{\partial v}{\partial z} + \tau_{xz} \frac{\partial w}{\partial x} + \tau_{yz} \frac{\partial w}{\partial y} \\ & + \tau_{zz} \frac{\partial w}{\partial z} + S_i \end{aligned} \quad (3.25)$$

สำหรับสมการไหลที่อัดตัวได้ (3.22) ถูกจัดรูปเป็นสมการสำหรับค่า enthalpy และเนื่องจากค่า enthalpy จำเพาะ h และค่า enthalpy จำเพาะสมบูรณ์ h_0 ของของไหลกำหนดได้โดย

$$h = i + p/\rho \quad \text{and} \quad h_0 = h + \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2)$$

รวมสองนิยามนี้กับนิยามของพลังงานจำเพาะ E เข้าด้วยกัน เราจะได้

$$h_0 = i + p/\rho + \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2) = E + p/\rho \quad (3.26)$$

แทนค่า (3.26) ไปในสมการ (3.22) และจัดเรียงเรียงบางอย่างทำให้ได้สมการพลังงานรวม

$$\frac{\partial(\rho h_o)}{\partial t} + \text{div}(\rho h_o \mathbf{u}) = \text{div}(k \text{ grad } T) + \frac{\partial p}{\partial t} + \left[\frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zx})}{\partial z} \right] + S_h$$

(3.27)

สมการ (3.24), (3.25) และ (3.26) ไม่ใช่สมการการอนุรักษ์พลังงานที่เพิ่มเติมเข้ามาใหม่ หากแต่เป็นอีกรูปแบบหนึ่งของสมการพลังงาน (3.22)

3.1.2 สมการสถานะ

การเคลื่อนที่ของของไหลใน 3 มิติถูกอธิบายโดยระบบของสมการอนุพันธ์ย่อย 5 สมการ คือ สมการอนุรักษ์มวล (3.4) สมการโมเมนตัมในทิศทาง x, y, z (3.14a - c) และสมการพลังงาน (3.24) ตัวไม่รู้ค่าประกอบด้วยตัวแปรทางเทอร์โมไดนามิกส์ 4 ตัวคือ ρ, p, i และ T โดยต่อไปนี้จะจับประเด็นไปที่การเชื่อมโยงทางเทอร์โมไดนามิกส์ระหว่างตัวแปร 4 ตัวนี้

เพื่อให้ช่วยต่อการทำความเข้าใจในเบื้องต้น ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทางเทอร์โมไดนามิกส์ต่างๆ จะอยู่ภายใต้สมมุติฐานของสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งหมายความว่าในปัญหาหนึ่งๆ ที่ถึงแม้ความเร็วของของไหลจะมีค่าสูง และมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติอย่างรวดเร็ว แต่ก็สมมุติให้ ของไหลสามารถปรับเปลี่ยนสถานะทางเทอร์โมไดนามิกส์ไปสู่สถานะใหม่อย่างรวดเร็ว จากตำแหน่งหนึ่งสู่ตำแหน่งหนึ่งเช่นกัน นั่นคือของไหลยังคงอยู่ในสถานะสมดุลตลอดเวลา มีเพียงเงื่อนไขขกเว้นบางอย่างกับการไหลที่เป็นแบบ Strong shockwave แต่บางกรณีการไหลประเภทนี้ก็สามารถใช้สมมุติฐานว่าของไหลอยู่ในสถานะสมดุลได้ โดยให้ผลการจำลองได้ดีพอสมควร

ด้วยสมมุติฐานดังกล่าว เราจึงสามารถอธิบายสถานะของสสารในสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ได้ โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ หากเรารู้ค่าตัวแปร 2 ตัว เราจะสามารถหา

ค่าตัวแปรตัวที่เหลือได้ ถ้าเราใช้ ρ และ T เป็นตัวแปรที่รู้ค่า เรามีสมการสถานะสำหรับความดัน p และพลังงานภายในจำเพาะ i

$$p = p(\rho, T) \quad \text{and} \quad i = i(\rho, T) \quad (3.28)$$

สำหรับก๊าซสมบูรณ์สมการสถานะของมันซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีคือ

$$p = \rho RT \quad \text{and} \quad i = C_v T \quad (3.29)$$

สมมุติฐานของสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์นี้ เมื่อนำมาใช้พิจารณาการไหลของของไหลที่อัดตัวได้ ยังช่วยเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างสมการพลังงานกับสมการอนุรักษ์มวล และสมการโมเมนตัม ปฏิสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับการไหลนี้ เกิดขึ้นเนื่องจากความร้อนนั้นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นตามสมการสถานะ

การไหลของของไหลและก๊าซที่ความเร็วต่ำประพุดคือเป็นของไหลที่อัดตัวไม่ได้ เมื่อไม่มีการแปรเปลี่ยนของความหนาแน่น ก็จะทำให้ไม่มีการเชื่อมโยงระหว่างสมการพลังงานกับสมการอนุรักษ์มวลและสมการโมเมนตัม ในกรณีเช่นนี้เราสามารถหาคำตอบของสมการโมเมนตัม คือสมการการไหลได้โดยง่าย โดยการพิจารณาเพียงสมการอนุรักษ์มวลและสมการโมเมนตัมเท่านั้น และสามารถหาคำตอบของสมการพลังงาน คือการกระจายอุณหภูมิได้โดยแยกเทศหลังจากได้คำตอบของสมการการไหลแล้ว

3.1.3 สมการนาเวียร์-สโตกส์ สำหรับของไหลแบบนิวโทเนียน

สมการควบคุมประกอบด้วยตัวที่ไม่รู้ค่าคือ ความเค้นเนื่องจากความหนืดในแนวแกนย่อย τ_{ij} ในการไหลของของไหลนั้น ค่าความเค้นหนืดสามารถถูกอธิบายได้โดยอัตราการเสีรูปร่างที่ตำแหน่งใดๆ (หรืออัตราความเครียด) ในการไหล 3 มิติอัตราการเสีรูปร่างที่ตำแหน่งใดๆ ประกอบด้วยอัตราการเสีรูปร่างเชิงเส้นและอัตราเสีรูปร่างเชิงปริมาตร

ก๊าซทุกชนิดโดยส่วนมากมีคุณสมบัติเป็นแบบ Isotropic ในขณะที่ของเหลวบางชนิดที่ประกอบด้วยโมเลกุลของโพลิเมอร์ ในจำนวนที่มากพออย่างมีนัยสำคัญอาจจะประพุดตัวเป็น Anisotropic หรือคุณสมบัติของความเค้นหนืดแบบขึ้นอยู่กับทิศทาง ซึ่งเป็นผลของการจัดเรียงตัวของโซ่โมเลกุลของโพลิเมอร์ ของไหลดังกล่าวอยู่นอกเหนือจากขอบเขตของหนังสือนี้และเราจะทำการศึกษาต่อไปโดยสมมุติว่าการไหลเป็น Isotropic

อัตราการเสีรูปร่างเชิงเส้นของชิ้นส่วนของไหลมี 9 องค์ประกอบใน 3 มิติ ในจำนวนนั้น มี 6 องค์ประกอบที่เป็นอิสระในของไหลแบบ Isotropic (Schlichting, 1979) ซึ่งถูกเขียนโดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์ e_{ij} ระบบการอ้างอิงในตัวห้อยต่อท้ายสัญลักษณ์ ซึ่งให้เห็นองค์ประกอบซึ่งเป็นระบบเดียวกับระบบอ้างอิงของความเค้น (ดูในหัวข้อ 3.1.4) มมององค์ประกอบของการเสีรูปร่างเชิงเส้นแบบตั้งฉากอยู่ 3 ตัว

$$e_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} \quad e_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} \quad e_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (3.30a)$$

มมององค์ประกอบของการเสีรูปร่างเชิงเส้นแบบเฉือนทั้ง 6 ด้านของชิ้นส่วนของไหลคือ

$$\begin{aligned} e_{xy} = e_{yx} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & e_{xz} = e_{zx} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ e_{yz} = e_{zy} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (3.30b)$$

การเสีรูปร่างเชิงปริมาตรถูกให้โดย

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \text{div } \mathbf{u} \quad (3.30c)$$

ในของไหลแบบ Newtonian ความเค้นเนื่องจากความหนืดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราของการเสีรูปร่างของของไหล ตามกฎที่ว่าด้วยความหนืดของนิวตันในปริภูมิ 3 มิติสำหรับของไหลที่อัดตัวได้นั้น การไหลจะมีความหนืดเชื่อมโยงอย่างแปรผันตามค่าพารามิเตอร์ 2 ตัว คือ 1) ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดที่หนึ่ง (Dynamic viscosity), μ ซึ่งจะเชื่อมโยงกับการเสีรูปร่างเชิงเส้นของของไหล และ 2) ความหนืดที่สอง, λ ที่จะเชื่อมโยงกับการเสีรูปร่างปริมาตร ดังนั้นเราจะมีองค์ประกอบย่อยของความเค้นอยู่ทั้งหมด 9 ตัว โดยมี 6 ตัวในนั้นไม่ขึ้นแก่กันหรือเรียกว่ามีระดับอิสระ (degree of freedom) เท่ากับ 6

$$\begin{aligned} \tau_{xx} &= 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \text{div } \mathbf{u} & \tau_{yy} &= 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} + \lambda \text{div } \mathbf{u} & \tau_{zz} &= 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} + \lambda \text{div } \mathbf{u} \\ \tau_{xy} = \tau_{yx} &= \mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) & \tau_{xz} = \tau_{zx} &= \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \tau_{yz} = \tau_{zy} &= \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (3.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพของความหนืดในส่วนที่สองนั้นไม่ชัดเจนนัก เนื่องจากผลของมันในทางปฏิบัติมีไม่มากนัก สำหรับก๊าซ การประมาณค่าที่ดีคือ $\lambda = -\frac{2}{3}\mu$ (Schlichting, 1979) และเนื่องจากเราสมมุติว่าของเหลวเป็นแบบที่อัดตัวไม่ได้ ซึ่งจากสมการอนุรักษ์มวลคือ $div \mathbf{u} = 0$ ดังนั้นความเค้นหนืดจะเป็น 2 เท่าของอัตราการเสียดรูปเชิงเส้น

แทนค่าความเค้นเฉือนข้างบน (3.31) ไปใน (3.14a – c) ทำให้ได้สมการซึ่งเรียกตามชื่อ Navier-Stokes ซึ่งเป็นนักวิทยาศาสตร์ในศตวรรษที่ 19 ที่ได้พยายามดังนี้

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda div \mathbf{u} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + S_{Mx} \quad (3.32a)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[2\mu \frac{\partial v}{\partial y} + \lambda div \mathbf{u} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + S_{My} \quad (3.32b)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[2\mu \frac{\partial w}{\partial z} + \lambda div \mathbf{u} \right] + S_{Mz} \quad (3.32c)$$

เราสามารถจัดเรียงเทอมของความเค้นหนืดใหม่ ดังข้างล่างนี้

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda div \mathbf{u} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ &+ \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} (\lambda div \mathbf{u}) = div(\mu grad \mathbf{u}) + S_{Mx} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเค้นหนืดในสมการที่เป็นองค์ประกอบในทิศทาง y และ z สามารถจัดใหม่ในลักษณะเดียวกัน เราจะสร้างสมการโมเมนตัมอย่างง่าย โดยการซ้อนเทอมของความเค้นหนืดในเทอมของการเพิ่มขึ้นของโมเมนตัม (source term) ดังนั้นจึงนิยามเทอมของการเพิ่มขึ้นของโมเมนตัมใหม่โดย

$$S_M = S_M + s_M \quad (3.33)$$

สมการ Navier-Stokes สามารถถูกเขียนในรูปแบบที่ใช้สำหรับการพัฒนาวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม ดังนี้

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad } \mathbf{u}) + S_{Mx} \quad (3.34a)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad } \mathbf{u}) + S_{My} \quad (3.34b)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad } \mathbf{u}) + S_{Mz} \quad (3.34c)$$

ถ้าเราใช้แบบจำลอง Newtonian สำหรับความเค้นหนืดในสมการพลังงานภายใน (3.24) เราจะได้

$$\rho \frac{Di}{Dt} = -p \text{div } \mathbf{u} + \text{div}(k \text{grad } T) + \Phi + S_i \quad (3.35)$$

ผลกระทบทั้งหมดเนื่องจากความเค้นหนืดในสมการพลังงานภายในนี้ สามารถเขียนได้ในเทอมของฟังก์ชันการสลายตัว (Dissipation function) Φ ซึ่งหลังจากการปรับรูปแบบสมการ สามารถแสดงได้ ดังนี้

$$\begin{aligned} \Phi = \mu \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right. \\ \left. + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right\} + \lambda (\text{div } \mathbf{u})^2 \end{aligned} \quad (3.36)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสลายตัวนี้เป็นค่าบวกเสมอเนื่องจากประกอบด้วยเทอมยกกำลังสอง และแทนถึงการก่อกำเนิดของพลังงานภายในอันเป็นผลมาจากการเสีรูปทรงของชิ้นส่วนของไหล อีกนัยหนึ่งคือเป็นตัวเลขตอนพลังงานจลน์จากการเคลื่อนที่ของอนุภาคของไหล และเปลี่ยนไปเป็นพลังงานภายในหรือความร้อน นั่นเอง

3.1.4 รูปแบบอนุรักษ์สำหรับสมการควบคุมของการไหลของของไหล

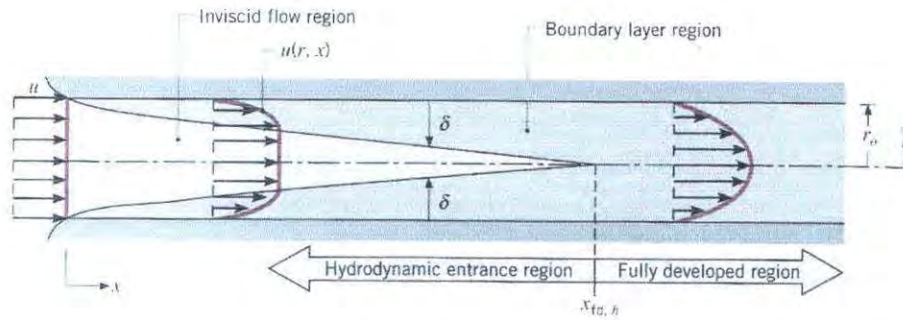
ตารางที่ 3.1 แสดงสมการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม และพลังงาน ในรูปแบบของไคเวอร์เจนท์ เป็นสมการแบบ 3 มิติที่ขึ้นกับเวลา ของของไหล Newtonian ที่อัดตัวได้

ตารางที่ 3.1 สมการควบคุมการไหลของของไหลแบบนิวโทเนียนอัดตัวได้

มวล	$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0$	(3.4)
โมเมนตัม x	$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad } u) + S_{Mx}$	(3.37a)
โมเมนตัม y	$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad } v) + S_{My}$	(3.37b)
โมเมนตัม z	$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad } w) + S_{Mz}$	(3.37c)
พลังงานภายใน	$\frac{\partial(\rho i)}{\partial t} + \text{div}(\rho i \mathbf{u}) = -p \text{div } \mathbf{u} + \text{div}(k \text{grad } T) + \Phi + S_i$	(3.38)
สมการสถานะ	$p = p(\rho, T) \text{ and } i = i(\rho, T)$	(3.28)
	$p = \rho RT \text{ and } i = C_v T$	(3.29)

เทอมการก่อกำเนิดของโมเมนตัม S_M และฟังก์ชันการสลายตัว ϕ แสดงใน 3.32 และ 3.36 ตามลำดับ เป็นที่น่าสนใจที่ว่าสมมุติฐานสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ในหัวข้อ 3.1.2 ทำให้ได้สมการการไหล (PDEs) 5 สมการและสมการพีชคณิต 2 สมการรวมเป็น 7 สมการ ต่อมาเราใช้แนวคิดของของไหล Newtonian ซึ่งอธิบายความเค้นหนืดในเทอมของความแตกต่างขององค์ประกอบความเร็วต่อหน่วยความยาว เป็นผลให้เกิดตัวไม่รู้ค่า 7 ตัว จำนวนที่เท่ากันของสมการและตัวที่ไม่รู้ค่าของระบบนี้ สามารถถูกแก้ปัญหาก็ ด้วยเงื่อนไขที่ขอบและค่าเริ่มต้น (Boundary and Initial condition)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 การก่อตัวของบาวนด์คาร์เลเยอร์ของการไหลแบบลามินาร์ในท่อกลม

3.2 การพาความร้อนแบบบังคับสำหรับการไหลภายในท่อ

การไหลภายในท่อ [1] นี้มีข้อแตกต่างจากการไหลผ่านภายนอก คือการไหลภายในท่อมียุบเขตจำกัดโดยที่ความหนาของบาวนด์คาร์เลเยอร์ไม่สามารถเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ได้ เพราะว่าเมื่อไหลไปได้ระยะหนึ่งบาวนด์คาร์เลเยอร์ก็ก่อตัวเต็มพื้นที่หน้าตัดของท่อจึงไม่สามารถขยายออกไปได้อีก รูปร่างของความเร็วจะมีลักษณะชัดเจนแน่นอนไม่เปลี่ยนแปลงต่อไปอีก ซึ่งการไหลลักษณะเช่นนี้เรียกว่า การไหลที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว (Fully developed flow) ส่วนการไหลก่อนหน้านั้นเรียกว่า การไหลที่กำลังปรับตัว (developing flow) และเรียกช่วงระยะของการไหลแบบนี้ว่า Hydrodynamic entrance region

3.2.1 การไหลของของไหล

3.2.1.1 สถานะการไหล

พิจารณาการไหลแบบลามินาร์ ในท่อกลมที่มีรัศมี r_0 ตามรูปที่ 3.6 สถานะการไหล สำหรับการไหลภายในท่อนั้น ต้องคำนึงถึงการขยายตัวของช่วงบริเวณทางเข้า (Entry region) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับว่าการไหลนั้นเป็นอย่างไร แบบลามินาร์ หรือเทอร์บูเลนต์ เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์สำหรับการไหลภายในท่อกลมกำหนดเป็น

$$Re_D \equiv \frac{\rho u_m D_h}{\mu} \quad (3-38)$$

ซึ่ง u_m เป็นความเร็วเฉลี่ยภายในท่อ

D_h เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic diameter) ของท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรย์โนลด์์นัมเบอร์วิกฤติ สำหรับช่วงการเปลี่ยนแปลงของการไหล จากลามินาร์เป็นเทอร์บูเลนต์ เริ่มต้นจาก

$$Re_{D,c} \approx 2300$$

และการไหลเป็นแบบเทอร์บูเลนต์เต็มที่ ที่ $Re_D \geq 4000$

สำหรับการไหลแบบลามินาร์ (คือ $Re_D \leq 2300$) ความยาวของช่วงบริเวณทางเข้าสำหรับการปรับตัวหาได้จากสมการ

$$\left(\frac{x_{fd,h}}{D_h}\right)_{lam} \approx 0.05 Re_D \quad (3.39)$$

สำหรับความยาวของช่วงบริเวณทางเข้าสำหรับการปรับตัวของช่องขนานหาได้จากสมการ

$$L_h = 0.011 D_h Re \quad (3.39a)$$

3.2.1.2 ความเร็วเฉลี่ย (mean velocity)

ข้อแตกต่างของการไหลภายในและการไหลภายนอกก็คือ เราไม่สามารถใช้ความเร็วของกระแสนิวตัน u_∞ ของของไหลได้ เนื่องจากความเร็วภายในท่อจะแปรเปลี่ยนทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัดของท่อ ดังนั้นจึงใช้ความเร็วเฉลี่ย u_m (Mean velocity) แทน โดยนิยามว่าความเร็วเฉลี่ยนี้คือความเร็วที่เมื่อคูณด้วยพื้นที่หน้าตัดของท่อและความหนาแน่นของของไหลแล้วจะเท่ากับอัตราการไหลของมวล ซึ่งได้

$$\dot{m} = \rho u_m A_C \quad (3.40)$$

ถ้าเป็นการไหลสถานะคงที่ ที่อัดตัวไม่ได้แล้ว ภายในท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่ ค่า \dot{m} และ u_m ย่อมมีค่าคงที่ตลอดความยาวท่อสำหรับท่อกลม ($A_C = \pi D^2 / 4$) ค่าของเรย์โนลด์์นัมเบอร์ลดลงเป็น

$$Re_D = \frac{4 \dot{m}}{\pi D \mu} \quad (3.41)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

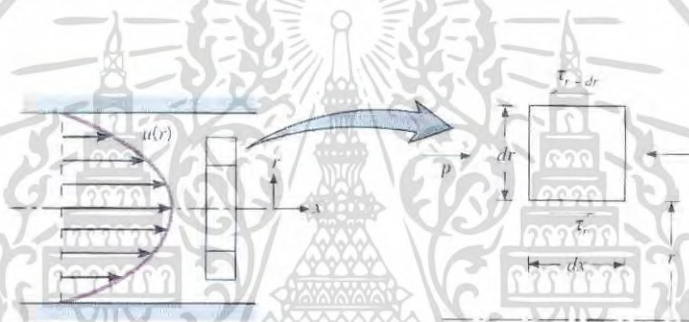
เพราะว่าค่า \dot{m} อาจหาได้จากกรอินทิเกรตของฟลักซ์มวล (ρu) ทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัด

$$\dot{m} = \int_{A_c} \rho u(r, x) dA_c \quad (3.42)$$

ดังนั้นสำหรับท่อกลม กรณีของไหลอัดตัวไม่ได้ แล้วจะได้

$$u_m = \frac{\int_{A_c} \rho u(r, x) dA_c}{\rho A_c} = \frac{2\pi\rho}{\rho\pi r_o^2} \int_0^{r_o} u(r, x) r dr = \frac{2}{r_o^2} \int_0^{r_o} u(r, x) r dr \quad (3.43)$$

ซึ่งจะหาค่า u_m ได้ทันที เมื่อรู้ Velocity profile, $u(r)$ ที่ตำแหน่งนั้น



รูปที่ 3.7 สมดุลแรงบนอิลิเมนต์ dx สำหรับการไหลแบบลามินาร์ที่ก่อตัวเต็มที่ในท่อกลม

3.2.1.3 รูปร่างของความเร็วของของไหลที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว

รูปทรงของความเร็วสามารถหาได้ สำหรับการไหลแบบลามินาร์ของของไหลที่คุณสมบัติคงที่ อัดตัวไม่ได้ ในช่วงที่ปรับตัวเต็มที่แล้วของท่อกลม (สำหรับเทอร์บูเลนซ์ ส่วนใหญ่ต้องอาศัยผลจากการทดลองเป็นหลัก) โดยทั่วไปจะเป็นฟังก์ชันของรัศมี

สิ่งสำคัญสำหรับเงื่อนไขข้างต้นก็คือ ค่าความเร็วในแนวรัศมีและการเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามแนวแกนทุกๆแห่งมีค่าเป็นศูนย์

$$v = 0 \text{ และ } \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) = 0$$

ดังนั้น ความเร็วตามแนวแกนจะมีค่าขึ้นอยู่กับ r เท่านั้น $[u(x, r) = u(r)]$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็วตามแนวแกนหาได้ จากการแก้สมการที่เหมาะสมของสมการ โมเมนต์ตามแนว x หรืออาจจะหาโดยคิดสมดุลของการอนุรักษ์โมเมนต์ก็ได้ตามรูปที่ 3.7

สำหรับอิทธิพันธ์ที่เฟอเรนเชียลรูปวงแหวนของรูปที่ 3.7 สามารถเขียนสมดุลของแรงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} & \tau_r (2\pi r dx) - \left\{ \tau_r (2\pi r dx) + \frac{d}{dr} [\tau_r (2\pi r dx)] dr \right\} \\ & + p(2\pi r dr) - \left\{ p(2\pi r dr) + \frac{d}{dx} [p(2\pi r dr)] dx \right\} = 0 \end{aligned}$$

$$\text{ซึ่งลดรูปเป็น } -\frac{d}{dr}(r\tau_r) = r \frac{dp}{dx} \quad (3.44)$$

จากกฎความหนืดของนิวตัน เราทราบว่า $\tau_r = \mu \frac{du}{dr}$

$$\text{ดังนั้น (3.64) จะเป็น } \frac{\mu}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{du}{dr} \right) = \frac{dp}{dx} \quad (3.45)$$

เพราะว่า $\frac{dp}{dx}$ นั้นไม่ขึ้นกับ r ดังนั้นเราสามารถอินทิเกรต (3.65) ได้

$$r \frac{du}{dr} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{dp}{dx} \right) \frac{r^2}{2} + C_1$$

$$\text{และ } u(r) = \frac{1}{\mu} \left(\frac{dp}{dx} \right) \frac{r^2}{4} + C_1 \ln r + C_2$$

จากเงื่อนไขที่ขอบได้ว่า $u(r_0) = 0$ และ $\partial u / \partial r|_{r=0} = 0$ จะได้

$$u(r) = -\frac{1}{4\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) r_0^2 \left[1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right] \quad (3.46)$$

ดังนั้น รูปทรงของความเร็วสำหรับการไหลแบบลามินาร์ที่ปรับตัวเต็มที่แล้วจะเป็น “พาราโบลาและจะสังเกตว่าการเปลี่ยนแปลงความดัน $\left(\frac{dp}{dx} \right)$ ต้องเป็นลบเสมอ ผลลัพธ์ที่กล่าวมานี้อาจใช้หาความเร็วเฉลี่ยได้ (u_m) โดยแทนสมการ (3.46) ใน (3.43) แล้วอินทิเกรตจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$u_m = -\frac{r_o^2}{8\mu} \frac{dp}{dx} \quad (3.47)$$

แทนสมการ (3.47) ใน (3.46) จะได้รูปร่างของความเร็วเป็น

$$\frac{u(r)}{u_m} = 2 \left[1 - \left(\frac{r}{r_o} \right)^2 \right] \quad (3.48)$$

เพราะว่า u_m สามารถหาได้จากการรู้อัตราการไหลของมวล ดังนั้นสมการ (3.47) สามารถหาเกร็ด
เดือนของความดันได้ $\left(\frac{dp}{dx} \right)$

สำหรับช่องขนานจะได้รูปร่างของความเร็วเป็น

$$\frac{u(y)}{u_m} = \frac{3}{2} \left[1 - \left(\frac{y}{d} \right)^2 \right] \quad (3.49)$$

เมื่อ $y = 0$ ที่ตรงกลางของช่องขนาน

$2d =$ ความสูงของช่องขนาน

3.2.1.4 การเปลี่ยนแปลงความดันและตัวประกอบเสียดทานในการไหลแบบปรับตัวเต็มที่แล้ว

ปกติวิศวกรมักสนใจเกี่ยวกับความดันตกในการไหลภายในท่อ เนื่องจากตัวพารามิเตอร์นี้
เกี่ยวข้องกับขนาดกำลังงานของปั๊มหรือพัดลมโดยตรง ในการหาความดันตก เราจะใช้ ตัว
ประกอบเสียดทานของ Moody (หรือ Darcy) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ไร้มิติ โดยนิยามว่า

$$f \equiv \frac{-(dp/dx)D}{\rho u_m^2 / 2} \quad (3.50)$$

ค่านี้ต่างกับสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน C_f ซึ่งบางครั้งเรียกว่า “ตัวประกอบเสียดทานเฟนนิ่ง”
ซึ่งนิยามว่า

$$C_f \equiv \frac{\tau_s}{\rho u_m^2 / 2} \quad (3.51)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะว่าแรงเฉือนบนผิวของของไหลเท่ากับ(ทิศทางตรงกันข้าม) แรงบนผิวของของไหล ดังนั้นความเค้นเฉือนบนผิวกำหนดเป็น $\tau_s = -\mu(du/dr)_{r=r_o}$ จากสมการ (3.46) ได้

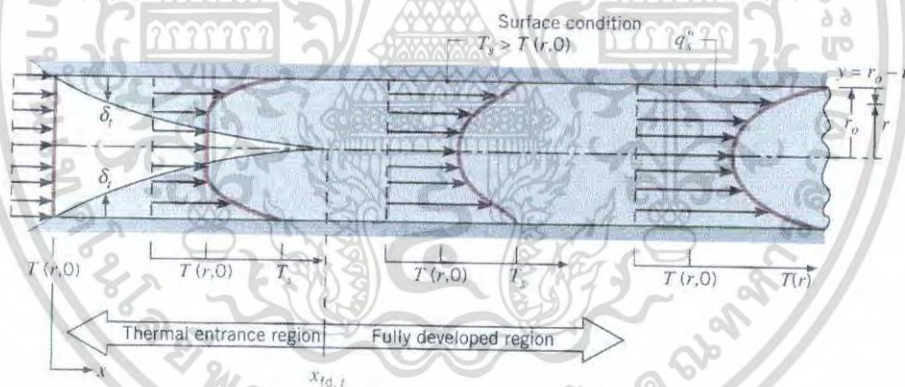
$$C_f = \frac{f}{4} \quad (3.52)$$

แทนสมการ (3.38) และ (3.47) ลงใน (3.50) สำหรับการไหลแบบลามินาร์ที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว ได้

$$f = \frac{64}{\text{Re}_D} \quad (3.53)$$

นอกจากนี้เรารู้ว่า ความดันตก (Δp) ระหว่างระยะ x_1 ถึง x_2 เป็น

$$\Delta p = - \int_{p_1}^{p_2} dp = f \frac{\rho u_m^2}{2D} \int_{x_1}^{x_2} dx = f \frac{\rho u_m^2}{2D} (x_2 - x_1) \quad (3.54)$$



รูปที่ 3.8 การก่อตัวของบาวน์คาร์ลีเยอร์ทางความร้อนในท่อกลม

3.2.2 การถ่ายเทความร้อน

เรามาศึกษาอิทธิพลของความร้อนข้างล่างของไหลเข้าไปในท่อตามรูปที่ 3.8 ที่อุณหภูมิสม่ำเสมอ $T(r,0)$ ซึ่งมีค่าแตกต่างจากอุณหภูมิที่ผิวแล้ว การพาความร้อนจะเกิดขึ้นและบาวน์คาร์ลีเยอร์ของความร้อนจะเริ่มก่อตัวขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าสภาวะที่ผิวของท่อคงที่โดยอาจเป็นอุณหภูมิผิวสม่ำเสมอคงที่ ($T_s = \text{คงที่}$) หรือฟลักซ์ความร้อนที่ผิวสม่ำเสมอ ($q_s'' = \text{คงที่}$) สภาวะที่ปรับตัวคงที่แล้วของความร้อน (thermally fully developed condition) ก็จะเกิดขึ้น ในที่สุดรูปร่างของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิที่ปรับตัวเต็มที่แล้วจะแตกต่างกัน ตามเงื่อนไขไม่ว่าอุณหภูมิผิวคงที่หรือฟลักซ์ความร้อนคงที่ [1]

สำหรับการไหลแบบลามินาร์ระยะความยาวของทางเข้าสำหรับปรับตัว จะเป็น

$$\left(\frac{x_{fd,t}}{D}\right)_{lam} \approx 0.05 \text{ Re}_D \text{ Pr} \quad (3.55)$$

โดยการเปรียบเทียบบริเวณทางเข้า(Entrance region) ของอุณหภูมิตามสมการ (3.55) กับสมการของความเร็ว (3.39) จะพบว่าต่างกันที่ค่า Pr เท่านั้น จึงพอสรุปได้ว่า ถ้า $\text{Pr} > 1$ แล้ว ไฮโดรไดนามิคบาวนด์รีเลเยอร์ ขยายเร็วกว่า บาวนด์รีเลเยอร์ของความร้อนมาก ($x_{fd} > x_{fdh}$) และจะกลับกันถ้า $\text{Pr} < 1$ สำหรับค่า Pr สูงๆเช่น น้ำมัน ($\text{Pr} \geq 100$) x_{fd} จะน้อยกว่า x_{fdh} มากมายและอาจสมมุติได้ว่ารูปทรงของความเร็วที่ปรับตัวเต็มที่แล้วมีตลอดช่วงบริเวณทางเข้าของความร้อน ในทางกลับกันของไหลที่มีค่า Pr ต่ำมาๆเช่น โลหะเหลว ($\text{Pr} \leq 0.05$) รูปร่างอุณหภูมิอาจเป็นแบบอัดตัวเต็มที่แล้วได้เร็วมากในขณะที่รูปร่างของความเร็วยังอยู่ในช่วงกำลังก่อตัวอยู่ ส่วนในการไหลแบบเทอร์บูเลนต์เงื่อนไขทั้งสองเกือบจะเป็นอิสระไม่ขึ้นกับ Pr และโดยการประมาณครั่งก่อนได้ว่า $x_{fd,t} / D = 10$

3.2.2.1 อุณหภูมิเฉลี่ย

ในเรื่องอุณหภูมินี้ จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิเฉลี่ย (T_m) ในลักษณะที่เหมือนกัน u_m โดยให้ความหมาย

$$T_m = \frac{\int_{A_c} \rho u c_v T dA_c}{m c_v} \quad (3.56)$$

สำหรับท่อกลม และเป็นการไหลที่อัดตัวไม่ได้ จะได้ว่า

$$T_m = \frac{2}{u_m r_o^2} \int_0^{r_o} u T r dr \quad (3.57)$$

ค่าของ T_m จะเปลี่ยนตามแนว x ถ้ามีความร้อนเข้าหรือออกจากของไหล ซึ่งต่างจาก u_m ที่มีค่าคงที่สำหรับท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่

พลักซ์ความร้อน (q_s'') ระหว่างของไหลกับผิวท่อที่จุดใดๆ หาได้จากกฎเย็นตัวของนิวตัน

$$q_s'' = h(T_s - T_m) \quad (3.58)$$

ซึ่ง h เป็นสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ตำแหน่งใดๆ อย่างไรก็ตามมีความแตกต่างกันระหว่าง T_m และ T_∞ เนื่องจาก T_∞ คงที่ในทิศทางของการไหล ส่วน T_m ต้องเปลี่ยนแปลงตามทิศทางนั่นคือ dT_m/dx จะไม่เป็นศูนย์ถ้ามีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้น ค่าของ T_m เพิ่มตามระยะ x ถ้าการถ่ายเทความร้อนเป็นไปจากผิวสู่ของไหล ($T_s > T_m$) และ T_m จะลดลงกับระยะ x ถ้า $T_s < T_m$

3.2.2.2 สถานะการปรับตัวเต็มที่แล้ว (Fully developed conditions)

เนื่องจากการพาความร้อนเกิดขึ้นจริงระหว่างผิวและของไหลคืออุณหภูมิของไหลต้องยังคงเปลี่ยนแปลงตามระยะ x สิ่งที่ยากรู้คือเกิดภาวะ thermal fully developed หรือยัง สถานการณ์นี้จะแตกต่างไปจากกรณีการไหลของของไหลที่ซึ่ง $(\partial u/\partial x) = 0$ ในช่วงบริเวณปรับตัวเต็มที่แล้ว ในทางกลับกันถ้ามีการพาความร้อนแล้ว (dT_m/dx) เช่นเดียวกับ $(\partial T/\partial x)$ ที่รัศมี r ใดๆจะไม่เป็นศูนย์ ผลที่ตามมารูปร่างของอุณหภูมิ $T(r)$ จะเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องกับ x ซึ่งเปรียบเสมือนว่า สถานะการปรับตัวเต็มที่แล้วของอุณหภูมิไม่เคยเกิดขึ้นเลย ปรากฏการณ์นี้จะต้องจัดใหม่ให้อยู่ในรูปไร้มิติของอุณหภูมิเพื่อให้ได้เงื่อนไข

จากสำหรับการนำแบบทราวนเซียนท์และสมการอนุพันธ์หลังงาน ได้ความแตกต่างอุณหภูมิไร้มิติในรูป $(T_s - T)/(T_s - T_m)$ ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่มีอยู่จริงซึ่งอัตราส่วนนี้จะเป็นอิสระกับ x นั่นคือถึงแม้ว่า $T(r)$ ยังคงเปลี่ยนอย่างต่อเนื่องกับ x แต่รูปร่างสัมพัทธ์ของ Profile นี้จะไม่เปลี่ยนแปลง และการไหลแบบนี้เรียกว่า “การไหลปรับตัวเต็มที่แล้วทางความร้อน” (thermally fully developed) และจะได้ว่า

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{T_s(x) - T(r, x)}{T_s(x) - T_m(x)} \right]_{fd,t} = 0 \quad (3.59)$$

โดยที่ T_s เป็นอุณหภูมิผิวท่อ T เป็นอุณหภูมิของไหลที่ตำแหน่งใดๆ

T_m เป็นอุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลทั่วพื้นที่หน้าตัดของท่อ

เงื่อนไขที่กำหนดให้สำหรับสมการ (3.59) ซึ่งจะเกิดขึ้นในท่ออาจจะเป็นกรณี q_s'' คงที่หรือ T_s คงที่ก็ได้ เงื่อนไขที่ผิวแบบนี้เกิดขึ้นมากในทางวิศวกรรม เช่น ผนังท่อที่ซึ่งได้รับความร้อนจากไฟฟ้าหรือ ผิวภายนอกที่ได้รับความแผ่รังสีอย่างสม่ำเสมอจะเป็นกรณีของ q_s'' คงที่ ส่วนกรณี

T_s คงที่ จะเกิดขึ้นถ้ามีการเปลี่ยนสถานะ(เนื่องจากการเดือดหรือการควบแน่น) เกิดขึ้นที่ผิวภายนอก

สังเกตว่าเป็นไปไม่ได้ที่จะเกิดเงื่อนไขทั้งสองอย่างนี้พร้อมกัน (เกิดกรณี T_s และ q_s'' คงที่พร้อมกัน) ถ้า q_s'' คงที่ T_s ต้องแปรเปลี่ยนกับระยะ x

รูปแบบที่สำคัญจำนวนมากของการไหลที่ปรับตัวแล้วทางความร้อน(Thermally developed flow) มักอ้างถึงสมการ(3.59)เพราะว่าอัตราส่วนอุณหภูมินี้เป็นอิสระกับ x ค่าอนุพันธ์ของอัตราส่วนนี้เทียบกับ r ต้องไม่ขึ้นกับ x การหาค่าอนุพันธ์นี้ที่ผิวท่อ (สังเกตว่า T_s และ T_m คงที่) เราจะได้

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{T_s - T}{T_s - T_m} \right) \Big|_{r=r_o} = \frac{-\partial T / \partial r \Big|_{r=r_o}}{T_s - T_m} \neq f(x)$$

แทน $\partial T / \partial r$ จากกฎของฟูเรียร์ ซึ่ง จากรูป 2.6 อยู่ในรูป

$$q_s'' = -k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_o}$$

และสำหรับ q_s'' จากกฎการเย็นตัวของนิวตัน จะได้

$$\frac{h}{k} \neq f(x) \quad (3.60)$$

ดังนั้นการไหลแบบปรับตัวเต็มที่แล้วของอุณหภูมิของของไหล โดยมีคุณสมบัติต่างๆคงที่ ค่า h ที่ตำแหน่งใดๆจะคงที่ไม่ขึ้นกับระยะ x

สมการ(3.59) ใช้ไม่ได้กับช่วงระยะทางเข้า (entrance region) ที่ซึ่ง h แปรตาม x ตามที่แสดงในรูปที่ 5. เพราะว่า $\delta_t = 0$ ที่ทางเข้าของท่อ ดังนั้น h จะมีค่าสูงมากที่ $x = 0$ อย่างไรก็ตามค่า h จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเกิดบาวน์คาร์เลเยอร์ของอุณหภูมิขึ้น จนกระทั่งเข้าสู่ค่าคงที่ซึ่งก็คือเข้าสู่ช่วงปรับตัวเต็มที่แล้วนั่นเอง

กรณีพิเศษ สำหรับฟลักซ์ความร้อน (q_s'') คงที่ เพราะว่าทั้งค่า h และ q_s'' คงที่ ในช่วงปรับตัวเต็มที่แล้ว จากสมการ (3.78) ได้ว่า

$$\frac{dT_s}{dx} \Big|_{fd,t} = \frac{dT_m}{dx} \Big|_{fd,t} \quad q_s'' = \text{constant} \quad (3.61)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้ากระจาย (3.79) และหาคำตอบสำหรับ $\partial T / \partial x$ จะได้

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{f,d,t} = \frac{dT_s}{dx} \Big|_{f,d,t} - \frac{(T_s - T)dT_s}{(T_s - T_m)dx} \Big|_{f,d,t} + \frac{(T_s - T)dT_m}{(T_s - T_m)dx} \Big|_{f,d,t} \quad (3.62)$$

แทนค่าจากสมการ (3.61) ได้

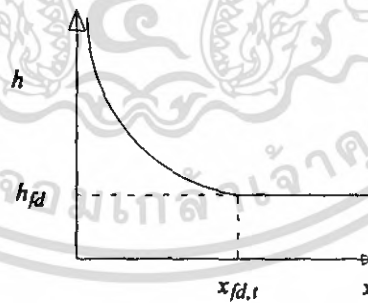
$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{f,d,t} = \frac{dT_m}{dx} \Big|_{f,d,t} \quad q_s'' = \text{constant} \quad (3.63)$$

ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามแนวแกนจะเป็นอิสระกับตำแหน่งในแนวรัศมี สำหรับกรณีของ T_s คงที่ ($dT_s / dx = 0$) จากสมการ (3.62) ได้ว่า

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{f,d,t} = \frac{(T_s - T)dT_m}{(T_s - T_m)dx} \Big|_{f,d,t} \quad T_s = \text{constant} \quad (3.64)$$

โดยที่ค่า $\partial T / \partial x$ จะขึ้นอยู่กับแนวรัศมี

จากที่กล่าวมาพอเชื่อถือได้ว่าอุณหภูมิเฉลี่ยเป็นตัวแปรที่สำคัญมากสำหรับการไหลภายในท่อ เพื่อนที่จะอธิบายการไหลนั้นๆ จำเป็นต้องรู้การแปรเปลี่ยนของมันกับค่า x การแปลงเปลี่ยนหาได้ โดยการประยุกต์การสมดุลพลังงานทั้งหมดกับการไหล



รูปที่ 3.9 การเปลี่ยนแปลงตามแกนของ h สำหรับการไหลภายในท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 การสมดุลของพลังงาน (Energy Balance)

พิจารณาการไหลในท่อตามรูปที่ 3.10 ของไหลไหลด้วยอัตรามวลคงที่ \dot{m} และมีการพาความร้อนเกิดขึ้นที่ผิวภายใน โดยทั่วไปการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ของของไหลรวมทั้งการนำความร้อนในทิศทางแนวแกนจะไม่นำมาคิดละทิ้งได้ คั้งนั้นถ้าไม่มีงานเพลลาซึ่งกระทำโดยของไหลขณะไหลผ่านท่อแล้ว จะมีเพียงอิทธิพลที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อน และกับงานจากการไหลเท่านั้น

งานของการไหลเป็นงานที่ใช้เคลื่อนของไหลผ่านปริมาตรควบคุม คิดต่อหน่วยมวลของไหล และจะอยู่ในรูปของผลคูณของความดัน p และปริมาตรจำเพาะ v (ซึ่ง $v = 1/\rho$)

โดยการประยุกต์การอนุรักษ์พลังงานต่อปริมาตรควบคุมตามรูปที่ 2.8 และจากนิยามของ T_m จะได้

$$dq_{conv} + \dot{m}(c_v T_m + pv) - \left\{ \dot{m}(c_v T_m + pv) + \dot{m} \frac{d(c_v T_m + pv)}{dx} dx \right\} = 0$$



รูปที่ 3.10 ปริมาตรควบคุมสำหรับการไหลภายในท่อ

หรือ
$$dq_{conv} = \dot{m} d(c_v T_m + pv) \quad (3.65)$$

ถ้าของไหลเป็นแก๊สสมบูรณ์ ($pv = RT_m$, และ $c_p = c_v + R$) จะได้

$$dq_{conv} = \dot{m} d c_p T_m \quad (3.66)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการนี้ใช้ได้ดีสำหรับของเหลวที่อัดตัวไม่ได้เช่นกัน ในกรณีนี้ $c_p = c_v$ และเพราะว่า v น้อยมาก ๆ $d(pv)$ โดยทั่วไปจะน้อยกว่า $d(c_v T_m)$ มากจนตัดทิ้งได้

รูปพิเศษของสมการ (3.66) เกี่ยวข้องกับเงื่อนไขสำหรับท่อทั้งหมด โดยการอินทิเกรตจากทางเข้าถึงทางออกของท่อ จะได้

$$dq_{conv} = \dot{m} c_p (T_{m,o} + T_{m,i}) \quad (3.67)$$

โดยที่ q_{conv} เป็นอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อทั้งหมด

สมการ (3.66) อาจเปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่สะดวกได้โดยใช้สมการอัตราการพาความร้อนคือ ปริมาตรควบคุมคือ $dq_{conv} = q_s'' P dx$ ซึ่ง P เป็นเส้นรอบรูป ($P = \pi D$) สำหรับท่อกลม โดยการแทนค่าจากสมการ (3.78) ได้ว่า

$$\frac{dT_m}{dx} = \frac{q_s'' P}{\dot{m} c_p} = \frac{P}{\dot{m} c_p} h (T_s - T_m) \quad (3.68)$$

คำตอบของ (3.69) สำหรับค่า $T_m(x)$ ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขความร้อนที่ผิว คืออาจเป็นกรณีฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ หรืออุณหภูมิที่ผิวคงที่ก็ได้

3.2.3.1 กรณีฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ (Constance Surface Heat Flux)

กรณีนี้จะพบว่าจะหาว่าค่า q_{conv} ทั้งหมด เพราะว่า q_s'' ไม่ขึ้นกับ x ดังนั้น

$$dq_{conv} = q_s'' (PL) \quad (3.69)$$

สมการนี้อาจจะใช้กับสมการ (3.67) เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ($T_{m,o} + T_{m,i}$)

สำหรับ q_s'' คงที่ จากสมการ (3.68) จะได้

$$\frac{dT_m}{dx} = \frac{q_s'' P}{\dot{m} c_p} \neq f(x) \quad (3.70)$$

อินทิเกรตจาก $x = 0$ ถึง x ใดๆ ได้

$$T_m(x) = T_{m,i} + \frac{q_s'' P}{mc_p} x \quad q_s'' = \text{Constant} \quad (3.71)$$

จาก (3.71) ได้ว่า T_m แปรเปลี่ยนเชิงเส้นกับระยะ x ตามท่อ

3.2.3.2 กรณีอุณหภูมิผิวคงที่ (Constant Surface Temperature)

ผลลัพธ์สำหรับค่า q_{conv} และการกระจายของ T_m แตกต่างกัน โดยสิ้นเชิงจากกรณีก่อน สำหรับกรณีนี้โดยนิยาม โดย ΔT เป็น $T_s - T_m$ สมการ (3.68) เขียนใหม่เป็น

$$\frac{dT_m}{dx} = -\frac{d(\Delta T)}{dx} = -\frac{P}{mc_p} h \Delta T$$

แยกตัวแปรและอินทิเกรตจากทางเข้าถึงทางออกของท่อได้

$$\int_{\Delta T_i}^{\Delta T_o} \frac{d(\Delta T)}{\Delta T} = -\frac{P}{mc_p} \int_0^L h dx$$

$$\ln \frac{\Delta T_o}{\Delta T_i} = -\frac{PL}{mc_p} \left(\frac{1}{L} \int_0^L h dx \right)$$

จากนิยามของ \bar{h} จะได้

$$\ln \frac{\Delta T_o}{\Delta T_i} = -\frac{PL}{mc_p} \bar{h}_L \quad (T_s = \text{constant}) \quad (3.72)$$

ซึ่ง \bar{h}_L หรือ \bar{h} เป็นค่าเฉลี่ยของ h สำหรับท่อทั่วทั้งหมด โดยจัดใหม่

$$\frac{\Delta T_o}{\Delta T_i} = \frac{T_s - T_{m,o}}{T_s - T_{m,i}} = \exp \left(-\frac{PL}{mc_p} \bar{h}_L \right) \quad (T_s = \text{constant}) \quad (3.73)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าเราอินทิเกรตจากทางเข้าถึงตำแหน่ง x ใด จะได้

$$\frac{T_s - T_m(x)}{T_s - T_{m,i}} = \exp\left(-\frac{Px}{\dot{m}c_p}\bar{h}\right) \quad (3.74)$$

โดยที่ค่า \bar{h} ในสมการนี้เป็นค่าเฉลี่ยของ h จากทางเข้าของท่อถึง x สมการนี้ชี้ให้เห็นว่าความแตกต่างของอุณหภูมิ ($T_s - T_m$) ลดลงเป็นเอกซ์โพเนนเชียลกับระยะทางตามแนวแกนของท่อ

การหาสมการสำหรับ q_{conv} ทั้งหมดนั้นยุ่งยากมาก กับธรรมชาติของเอกซ์โพเนนเชียล โดยใช้สมการ(3.66)

$$q_{conv} = \dot{m}c_p [(T_s - T_{m,i}) - (T_s - T_{m,o})] = \dot{m}c_p (T_i + T_o)$$

และแทนค่า $\dot{m}c_p$ จากสมการ (2-131) จะได้

$$q_{conv} = \bar{h}A_s\Delta T_{l,m} \quad (T_s = \text{constant}) \quad (3.75)$$

ซึ่งค่า A_s เป็นพื้นที่ผิวท่อทั้งหมด ($A_s = PL$) และ $\Delta T_{l,m}$ เป็นค่าความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยแบบลอการิทึม (LTDM)

$$\Delta T_{l,m} \equiv \frac{\Delta T_o - \Delta T_i}{\ln(\Delta T_o / \Delta T_i)} \quad (3.76)$$

สมการ (3.76) เป็นรูปหนึ่งของกฎการเย็นตัวของนิวตันสำหรับท่อทั้งหมดและ $\Delta T_{l,m}$ เป็นค่าเฉลี่ยของความแตกต่างอุณหภูมิที่เหมาะสมทั่วทั้งความยาวท่อ ธรรมชาติลอการิทึมของความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยนี้เนื่องจากธรรมชาติของการลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล [แตกต่างจากความแตกต่างเฉลี่ยเลขคณิต (Arithmetic Mean Temperature Difference, AMTD) ซึ่งมีรูป $\Delta T_{am} = (\Delta T_i + \Delta T_o) / 2$]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 สหพันธ์การพาความร้อน: การไหลแบบลามินาร์ในท่อกลม

3.2.4.1 ช่วงบริเวณปรับตัวเต็มที่แล้ว (Fully developed region)

ที่จุดใดๆ สมการพลังงานจะเป็น

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{\alpha}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (3.77)$$

สมการนี้อยู่ในรูปที่เหมือนกับสมการบาวคาร์ลีเลเซอร์แต่ค่า Viscous dissipation ไม่นำมาคิด

เทอมทางซ้ายมือของสมการ (3.77) นับเป็นการถ่ายเทพลังงานสุทธิโดยการเคลื่อนที่ของของไหลทั้งก้อน (การพา) และเทอมทางขวามือนับเป็นการถ่ายเทพลังงานสุทธิโดยการนำในทิศทางตามแนวรัศมี

คำตอบของสมการ (3.77) ได้หาไว้แล้วสำหรับช่วงที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว ในช่วงนี้การประมาณบาวคาร์ลีเลเซอร์ของความเร็วเป็นที่พอใจถูกต้อง นั่นคือ $v = 0$ และ $(\partial u / \partial x) = 0$ สำหรับกรณีของรูปร่างตามแนวแกนเป็นแบบพาราโบลา นอกจากนี้สำหรับกรณีฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่การประมาณบาวคาร์ลีเลเซอร์ของอุณหภูมิก็ให้ผลที่พอใจเช่นกันนั่นคือ $\partial^2 T / \partial x^2 = 0$ แทนการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตามแนวแกนจากสมการ (3.63) และสำหรับความเร็วตามแนวแกน จากสมการ (3.48) สมการพลังงาน (3.77) ลดรูปเป็น

$$\frac{1}{r} \frac{d(rdT)}{dr} = \frac{2u_m}{\alpha} \frac{(dT_m)}{dx} \left[1 - (r/r_o)^2 \right] \quad q_s'' = \text{constant} \quad (3.78)$$

ซึ่งเทอม $\frac{2u_m}{\alpha} \frac{(dT_m)}{dx}$ คงที่โดยการแยกตัวแปรและอินทิเกรตสองครั้ง จะได้

$$T(r) = \frac{2u_m}{\alpha} \frac{(dT_m)}{dx} \left[\frac{r^2}{4} - \frac{r^4}{16r_o^2} \right] + C_1 \ln r + C_2$$

ค่าคงที่ของการอินทิเกรต C_1 และ C_2 หากจากเงื่อนไขที่ขอบที่เหมาะสมดังนี้

T มีค่าจำกัดที่ $r = 0$ (หรือ $\partial T / \partial r = 0$ ที่ $r = 0$) จะได้ $C_1 = 0$ และ $T(r_o) = T_s$ ที่ซึ่ง T_s แปรตาม x จะได้ $C_2 = T_s - (2u_m / \alpha) (dT_m / dx) (3r_o^2 / 16)$ ดังนั้นสำหรับช่วงที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว และฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่จะได้การกระจายของอุณหภูมิในรูป

$$T(r) = T_s - \frac{2u_m r_o^2}{\alpha} \left(\frac{dT_m}{dx} \right) \left[\frac{3}{16} + \frac{1}{16} \left(\frac{r}{r_o} \right)^4 - \frac{1}{4} \left(\frac{r}{r_o} \right)^2 \right] \quad (3.79)$$

จากการรู้การกระจายของอุณหภูมิ ค่าพารามิเตอร์อื่นๆก็สามารถหาได้ เช่น ถ้ารูปร่างของความเร็วจึงและอุณหภูมิ ตามสมการ(3.56) และ (3.79) โดยแทนในสมการ (3.57) และอินทิเกรตทั่วทั้ง r จะได้

$$T_m = T_s - \frac{11}{48} \left(\frac{u_m r_o^2}{\alpha} \right) \left(\frac{dT_m}{dx} \right) \quad (3.80)$$

จากสมการ (3.70) ซึ่ง $P = \pi D$ และ $\dot{m} = \rho u_m (\pi D^2 / 4)$ จะได้

$$T_m - T_s = - \frac{11 q_s'' D}{48 k} \quad (3.81)$$

โดยการรวมกฎการเป็นตัวของนิวตัน สมการ (3.58) และ (3.81) ได้ว่า

$$h = \frac{48}{11} \left(\frac{k}{D} \right)$$

หรือ $Nu_D = (hD/k) = 4.36$ สำหรับ q_s'' คงที่ (3.82)

ดังนั้นในท่อกลมที่มีคุณลักษณะลักษณะความร้อนที่ผิวคงที่ การไหลแบบลามินาร์ที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว ค่าตัวเลขนัมเบอร์ จะคงที่ ไม่ขึ้นกับ Re_D, Pr และตำแหน่งตามแนวแกน x

สำหรับเงื่อนไขแบบลามินาร์ปรับตัวเต็มที่แล้วโดยมีอุณหภูมิที่ผิวคงที่ การประมาณบาวคาร์ลีเลเซอร์ของความเร็วจึงให้ผลที่น่าพอใจอีก และการประมาณบาวคาร์ลีเลเซอร์ของอุณหภูมิว่า $(\partial^2 T / \partial x^2) \ll (\partial^2 T / \partial r^2)$ สมเหตุสมผล โดยแทนรูปร่างของความเร็วจึงจากสมการ (3.48) และการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตามแนวแกนจากสมการ (3.64) สมการพลังงานจะเป็น

$$\frac{1}{r} \frac{d(rdT)}{dr} = \frac{2u_m}{\alpha} \left(\frac{dT_m}{dx} \right) \left[1 - \left(r/r_o \right)^2 \right] \frac{T_s - T}{T_s - T_m} \quad \text{สำหรับ } (T_s = \text{constant}) \quad (3.83)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำตอบของสมการนี้ต้องหาโดยขบวนการซ้ำ (Iteration) โดยคอมพิวเตอร์ซึ่งเกี่ยวข้องกับการทำแบบประมาณ successive รูปร่างของอุณหภูมิ ผลลัพธ์ที่ได้ไม่สามารถที่จะอธิบายทางพีชคณิตง่ายๆ แต่ผลลัพธ์ของนัสเซิลส์นัมเบอร์แสดงได้ในรูป

$$Nu_p = 3.66 \text{ สำหรับ } (T_s = \text{constant}) \quad (3.84)$$

ข้อสังเกต ในการใช้สมการ (3.82) และ (3.84) เพื่อหา h ค่า k จะต้องมีค่าที่ T_m เท่านั้น

3.2.5 สหพันธ์การพาความร้อน: ท่อที่ไม่กลม

ถึงแม้ว่าเรามีข้อจำกัดมากเกี่ยวกับการพิจารณาต่อการไหลภายในท่อกลม การประยุกต์ทางวิศวกรรมส่วนใหญ่จำนวนมากเกี่ยวข้องกับการพาความร้อนในท่อที่ไม่กลม สมการที่กล่าวมาแล้วใช้ได้คือพอประมาณกับท่อที่ไม่มีพื้นที่หน้าตัดกลม โดยการใช้เส้นผ่านศูนย์กลางสมมูลเป็นความยาวเฉพาะ (Characteristic length) ซึ่งเรียกว่า “เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก” (Hydraulic diameter) และนิยามเป็น











$$D_h \equiv \frac{4A_c}{P} \quad (3.85)$$

ที่ซึ่ง A_c และ P เป็นพื้นที่หน้าตัดและเส้นรอบรูปของการไหลตามลำดับ เส้นผ่านศูนย์กลางนี้จะใช้ในการคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น Re_p และ Nu_p

สำหรับการไหลแบบลามินาร์ สหพันธ์ที่ใช้ในท่อกลมเมื่อนำมาใช้กรณีนี้อาจให้ความแม่นยำน้อยโดยเฉพาะอย่างยิ่งกับพื้นที่หน้าตัดที่มีมุมคมหลายมุม สำหรับกรณีเช่นนั้น ค่า Nu_p สอดคล้องกับเงื่อนไขปรับตัวเต็มที่ได้หาได้จากตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่า Nu_D และ f สำหรับการไหลแบบลามินาร์ที่ปรับตัวเต็มที่แล้วในท่อ
พื้นที่หน้าตัดต่างๆกัน

TABLE 8.1 Nusselt numbers and friction factors for fully developed laminar flow in tubes of differing cross section

Cross Section	$\frac{b}{a}$	$Nu_D \equiv \frac{hD_h}{k}$		$f Re_{D_h}$
		(Uniform q''_s)	(Uniform T_s)	
	—	4.36	3.66	64
	1.0	3.61	2.98	57
	1.43	3.73	3.08	59
	2.0	4.12	3.39	62
	3.0	4.79	3.96	69
	4.0	5.33	4.44	73
	8.0	6.49	5.60	82
	∞	8.23	7.54	96
	∞	5.39	4.86	96
	—	3.11	2.47	53

Used with permission from W. M. Kays and M. E. Crawford, *Convection Heat and Mass Transfer*, McGraw-Hill, New York, 1980.

สมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อน (Thermal Performance) [5] หาได้จาก

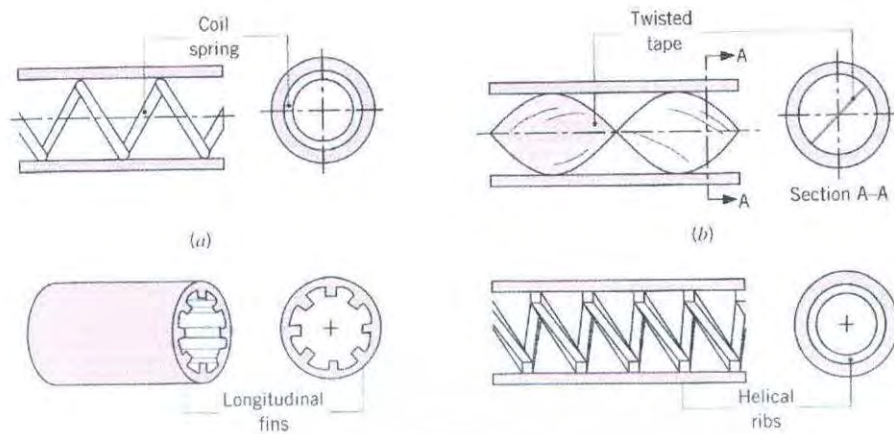
$$\eta = \frac{(Nu / Nu_o)}{(f / f_o)^{1/3}} \quad (3.86)$$

เมื่อ

Nu_o คือ นัสเซลท์นัมเบอร์ของช่องขนานผิวเรียบ

f_o คือ ค่าตัวประกอบความเสียดทานของช่องขนานผิวเรียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนแบบต่างๆ

3.2.6 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer Enhancement)

มีวิธีหลายประการสำหรับช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในการไหลภายในท่อ วิธีที่ยอมรับกันดี โดยการเพิ่มค่า h และ/หรือ โดยการเพิ่มพื้นที่ผิวการพาให้มากขึ้น ตัวอย่างเช่น ค่า h อาจเพิ่มได้โดยทำให้ผิวขรุขระเพื่อให้เกิดเทอร์บูเลนซ์ทำได้โดยการเจียรแต่งหรือสอดใส่ลวดคอยล์-สปริงก็ได้ การสอดใส่ลวด (ตามรูปที่ 3.11a) ให้ความหมายเป็นเกลียว (helical roughness) ในการสัมผัสกับผิวภายในท่อ อีกวิธีหนึ่งเป็นการเพิ่ม h โดยการทำให้เกิดการหมุนวน (swirl) ด้วยการสอดใส่ของแผ่นเกลียวบิด (twisted tape) ตามรูปที่ 3.11b การสอดแทรกนี้ประกอบด้วยแผ่นบางที่ถูกบิดเป็นคาบของมุม 360° เป็นผลให้ความเร็วของการไหลเพิ่ม เนื่องจากความเร็วสัมผัสเพิ่มใกล้ผนังท่อ พื้นที่การถ่ายเทความร้อนเพิ่มได้โดยการติดครีปตามแนวยาวแก่ผิวภายใน (รูปที่ 3.11c) ในขณะที่ค่า h และพื้นที่อาจทำให้เพิ่มได้โดยใช้ครีปเกลียววนอน (spiral fins) รูปที่ 3.11d การเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนได้อาจเป็นผลทำให้เกิดความดันตก (pressure drop) มากขึ้น ดังนั้นอาจจำเป็นต้องใช้ปั๊มหรือพัดลมช่วยอีก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การกำหนดปัญหาและการตรวจสอบผลการคำนวณ

ในบทนี้เป็นการกำหนดลักษณะของปัญหาที่ใช้สำหรับทำการวิจัย และพร้อมทั้งทำการตรวจสอบโปรแกรมที่ใช้กับผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact solution)

4.1 วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล

การคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของและการถ่ายเทความร้อนไม่ว่าเป็นโปรแกรมที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเอง หรือ โปรแกรมเชิงพาณิชย์โดยทั่วไปจะประกอบด้วย 3 ขั้นตอนได้แก่

4.1.1 ขั้นตอนการประมวลผล

ขั้นตอนการประมวลผล (Pre-processing) หมายถึงขั้นตอนเตรียมการ โดยระบุรายละเอียดของการกำหนดปัญหาและพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้อง ได้แก่

4.1.1.1 การกำหนดลักษณะของปัญหา

4.1.1.2 การกำหนดขนาด จำนวนและรูปแบบการจัดวางกริด (Grid) คือ การสร้างและการจัดวางกริดบนแบบจำลองการไหล (Computational Domain) ให้มีความเหมาะสมซึ่งส่งผลถึงการประหยัดทรัพยากรของคอมพิวเตอร์ในการคำนวณ

4.1.1.3 การกำหนดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ให้เหมาะสมกับปัญหาที่พิจารณา

4.1.1.4 การกำหนดคุณสมบัติของของไหล

4.1.1.5 การกำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขตและค่าเริ่มต้นให้กับปัญหาที่พิจารณา

4.1.2 ขั้นการประมวลผล

ขั้นการประมวลผล (Solving) หมายถึงขั้นตอนการประยุกต์วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขสำหรับการนำไปใช้แก้ปัญหา โดยการคำนวณในงานวิจัยนี้ทั้งหมดใช้ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม โดยขั้นตอนดังนี้

4.1.2.1 ทำการ discretize ไรซ์สมการ โดยการประมาณเทอมต่างๆ คือ เทอมการพา (Convection term) ด้วยแบบแผนการคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical scheme) ที่เหมาะสมผลลัพธ์ที่ได้อยู่ในรูปสมการพีชคณิต

4.1.2.2 ทำการแก้สมการพีชคณิตที่ได้จากการ discretize ไรซ์ผลลัพธ์ที่ได้ เรียกว่าผลเฉลยโดยประมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

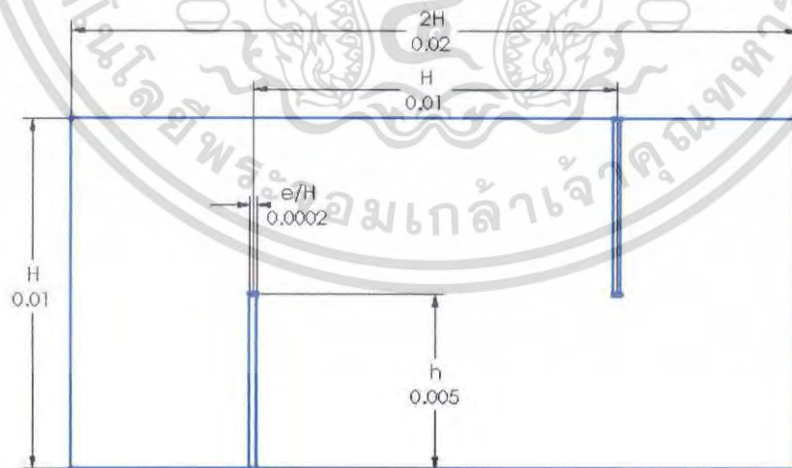
4.1.3 ขั้นตอนการแสดงผล

ขั้นตอนการแสดงผล(Pose-Processing) หมายถึงกระบวนการแสดงผลผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการประมวลผลโดยปกติประกอบด้วย ความเร็วย่อยในทิศทางแกนต่างๆ ความดัน และอุณหภูมิ ซึ่งอยู่ในรูปของตัวเลข เพื่อก่อให้เกิดความเข้าใจในพฤติกรรมกรไหลและสภาวะการไหลและสภาวะการไหลจำเป็นต้องสร้างผลลัพธ์ให้อยู่ในรูปของกราฟิก

4.2 การกำหนดลักษณะของปัญหาที่ใช้ในการวิจัย

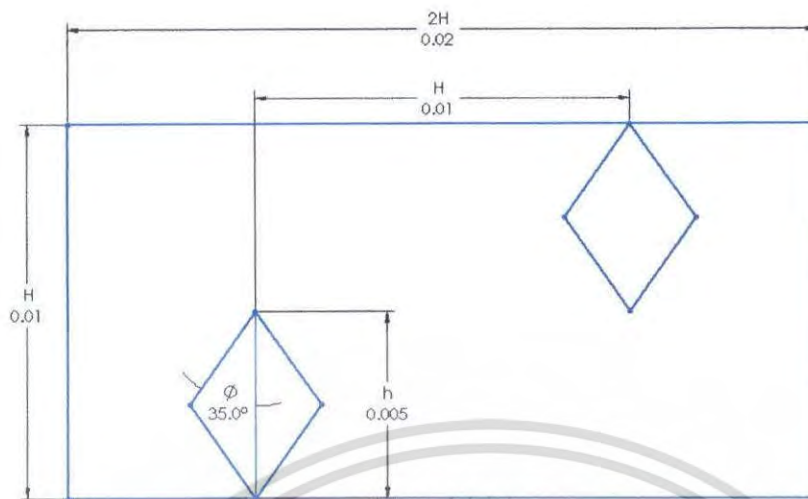
งานวิจัยนี้กำหนดให้ช่องขนานมีแผ่นกั้นลักษณะแบบแผ่นเรียบ, ไดมอนด์ และปริซึม โดยไดมอนด์ และปริซึมจะมีมุม 35, 25, 15 และ 5 องศา และมีอัตราส่วนความสูงของแผ่นกั้นต่อความสูง (h/H) ของช่องขนานเท่ากับ 0.4 และ 0.5 โดยให้ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นคงที่เท่ากับความสูงของช่องขนาน สำหรับการจัดวางแผ่นกั้นถูกจัดวางแบบเยื้องกัน โดยเป็นการจำลองการไหลแบบ Periodic Translational (Computational Domain) ในแบบสองมิติ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ถึง 4.3

กริดที่ใช้เป็นแบบสี่เหลี่ยม แบ่งกริดแบบสม่ำเสมอ(Uniform grid) การหาผลกระทบของกริดที่มีผลต่อคำตอบได้ทำการศึกษาโดยใช้ขนาดของกริดที่แตกต่างกัน ที่ขนาด 100×200 และ 110×220 พบว่าเมื่อขนาดเพิ่มขึ้นเป็น 110×220 ค่าตัวเลขที่นับเบอรร์เปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 0.01% ดังนั้นจึงเลือกขนาดของกริดเท่ากับ 100×200 ซึ่งขนาดกริดนี้จะถูกนำไปใช้ในการศึกษาอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ต่อไป

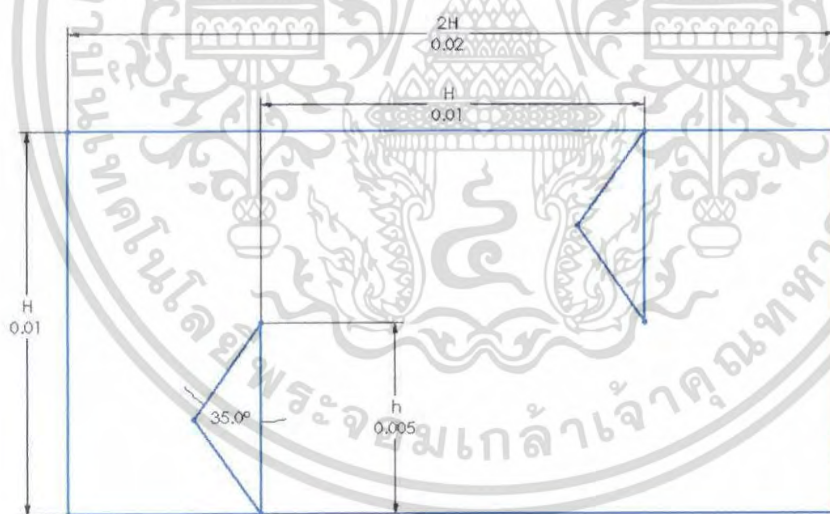


รูปที่ 4.1 แบบจำลองการไหลของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

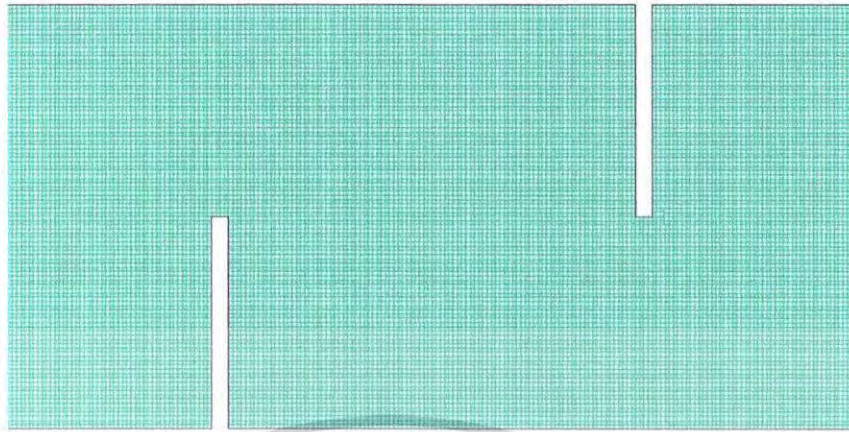


รูปที่ 4.2 แบบจำลองการไหลของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบไดมอนด์



รูปที่ 4.3 แบบจำลองการไหลของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Grid

Mar 21, 2008
FLUENT 6.3 (2d, dp, pbns, lam)

รูปที่ 4.4 ลักษณะกริดที่ใช้ในการจำลองการไหลภายในช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบ

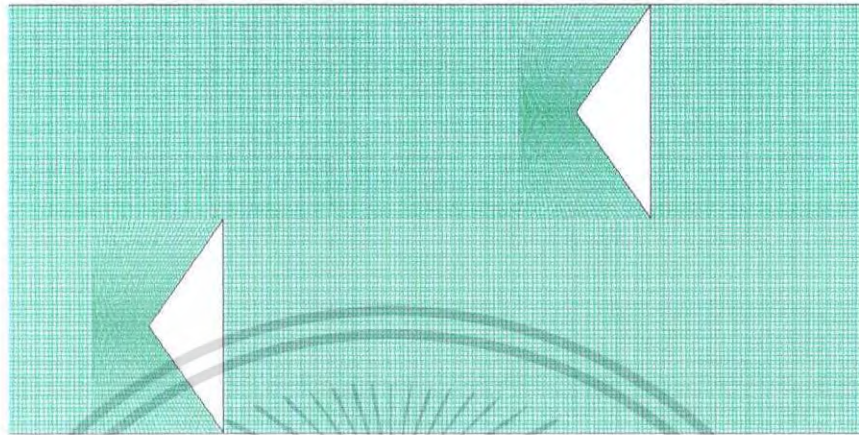


Grid

Mar 21, 2008
FLUENT 6.3 (2d, dp, pbns, lam)

รูปที่ 4.5 ลักษณะกริดที่ใช้ในการจำลองการไหลภายในช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบโดมอนด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Grid

Mar. 21, 2008
FLUENT 6.3 (2d, dp, pbns, lam)

รูปที่ 4.6 ลักษณะกริดที่ใช้ในการจำลองการไหลภายในช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึม

4.3 สมการควบคุมการไหลและการถ่ายเทความร้อน

การกำหนดสมการควบคุมการไหลและการถ่ายเทความร้อน ได้ตั้งสมมติฐานให้อากาศเป็นของไหลอัดตัวไม่ได้ คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของอากาศมีค่าคงที่ การไหลอยู่ในสภาวะคงตัวไม่พิจารณาฟังก์ชันการคายพลังงานเนื่องจากความหนืดพิจารณาการคำนวณโดยการพาความร้อนแบบบังคับ ไม่พิจารณาผลกระทบของการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งได้สมการควบคุมการไหลและการถ่ายเทความร้อนดังนี้

สมการความต่อเนื่อง

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (4.1)$$

สมการโมเมนตัมในแนวแกน x

$$\rho \left[u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right] = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (4.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ โมเมนตัมในแนวแกน y

$$\rho \left[u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right] = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (4.3)$$

สมการพลังงาน

$$\rho \left[u \frac{\partial i}{\partial x} + v \frac{\partial i}{\partial y} \right] = k \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] \quad (4.4)$$

4.4 ค่าเงื่อนไขขอบเขตในการคำนวณการไหลสองมิติ

4.4.1 สภาวะทางเข้าและทางออกเป็นแบบ Periodic Translation อากาศไหลเข้าด้วยอัตราการไหล (Mass flow rate) อย่างสม่ำเสมอ และมีค่าตัวเลขพรีนดัล (Prandtl number; Pr) คงที่เท่ากับ 0.707

$$\dot{m} = \dot{m}_o, T = T_o \quad (4.5)$$

4.4.2 กำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ผนังมีค่าเท่ากับศูนย์ (No slip condition) เป็นผนังที่อยู่กับที่ (Stationary wall)

$$u = v = 0 \quad (4.6)$$

4.4.3 กำหนดให้ค่าฟลักซ์ความร้อนของแผ่นกั้นมีค่าเท่ากับศูนย์ คือเงื่อนไขแบบอะไดแบติก (Adiabatic boundary condition)

$$y = 0; \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) = 0 \quad (4.7)$$

4.4.4 กำหนดให้อุณหภูมิที่ผิวของช่องขนานมีอุณหภูมิคงที่

$$T = T_s \quad (4.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การตรวจสอบโปรแกรมที่ใช้กับผลเฉลยแม่นยำ (Exact solution)

เนื่องจากผลเฉลยที่ได้เนื่องจากการคำนวณเชิงตัวเลขเป็นค่าที่ได้จากการประมาณ การคำนวณย่อมมีความผิดพลาดเกิดขึ้นได้ ดังนั้นในการนำโปรแกรมมาใช้งาน ต้องมีการตรวจสอบโปรแกรมว่าให้ผลเฉลยถูกต้องหรือไม่ การตรวจสอบโปรแกรมในหัวข้อนี้จะนำผลที่ได้จากโปรแกรมมาเปรียบเทียบกับผลเฉลยแม่นยำ

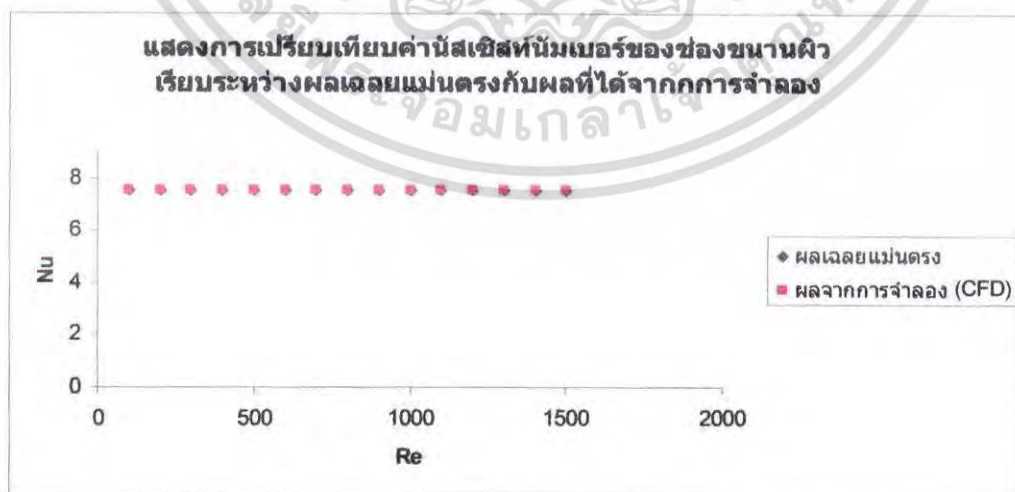
โดยผลเฉลยแม่นยำจะได้ค่านัสเซสท์นัมเบอร์ของช่องขนานที่มีการไหลแบบลามินาร์ปรับตัวเต็มที่แล้ว

$$Nu = 7.54 \quad (4.9)$$

และผลเฉลยแม่นยำจะได้ค่าตัวประกอบความเสียดทานของช่องขนานที่มีการไหลแบบลามินาร์ปรับตัวเต็มที่แล้ว

$$f = \frac{96}{Re} \quad (4.10)$$

เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากโปรแกรมจะมีความแตกต่างเพียง 0.24% ซึ่งแสดงดังรูปที่ ผลที่ได้จากทั้งโปรแกรมและจากผลเฉลยแม่นยำให้ผลที่สอดคล้องกัน ทำให้ยืนยันได้ว่าแบบจำลองการไหลสองมิติ รวมทั้งโปรแกรมที่ใช้พื้นฐานของระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม สามารถนำมาเป็นเครื่องมือในการคำนวณ เพื่อวิเคราะห์ปัญหาการไหลในการถ่ายเทความร้อนสำหรับงานวิจัยนี้ได้



รูปที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบค่านัสเซสท์นัมเบอร์ของช่องขนานผิวเรียบระหว่างผลเฉลยแม่นยำ

กับผลที่ได้จากการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวประกอบความเสียดทานของช่องขนานผิวเรียบระหว่างผลเฉลยแม่นยำกับค่าที่ได้จากการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

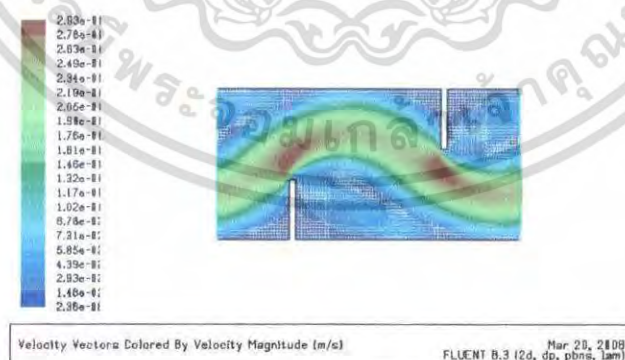
ผลการจำลองและการวิจารณ์

โดยทั่วไปสมรรถนะทางความร้อนจะสัมพันธ์กับการสูญเสียความดันเนื่องจากความเสียดทาน การปรับปรุงสมรรถนะทางความร้อนมักจะได้มาพร้อมกับการสูญเสียความดันที่เพิ่มมากขึ้น สำหรับของไหลที่มีความหนาแน่นต่ำ (ก๊าซ) การปรับปรุงอัตราการถ่ายเทความร้อนมักจะนำไปสู่ความสิ้นเปลืองกำลังทางกลในรูปของพลังงานขับเคลื่อนคอมเพรสเซอร์หรือพัดลม เพราะฉะนั้น การออกแบบและการเลือกใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจึงจะต้องมีการพิจารณาอย่างถี่ถ้วนใน อัตราการถ่ายเทความร้อนและกำลังทางกลที่ใช้ในการขับเคลื่อนของไหล

โดยผลการจำลองมุ่งเน้นที่จะศึกษาสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนและตัวประกอบความเสียดทานของช่องขนานที่มีอุณหภูมิผิวคงที่ (Constant Surface Temperature) โดยการศึกษาจะพิจารณาถึงอิทธิพลของแผ่นกั้นในรูปแบบต่างๆ มีสัดส่วนความสูงของแผ่นกั้นต่อความสูงของช่องขนาน (h/H) ที่ทำการศึกษาเท่ากับ 0.4 และ 0.5 และการจัดวางครีบบนแบบเยื้องกัน โดยทำการศึกษาการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) ในช่วงเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ 100 ถึง 1500

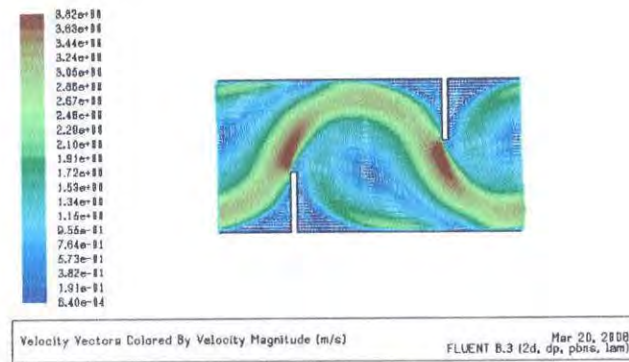
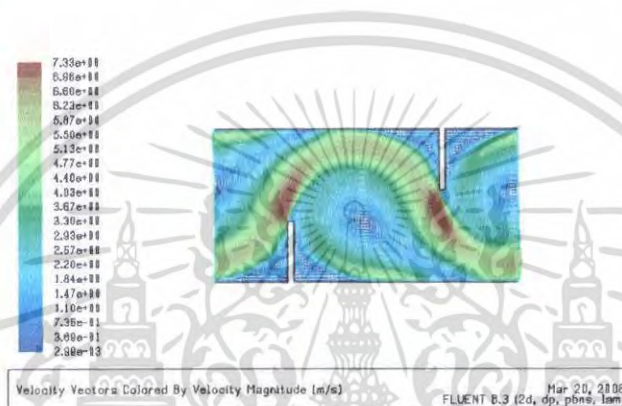
5.1 ช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบ (Flat plate baffles)

5.1.1 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์



(a) $Re = 100$

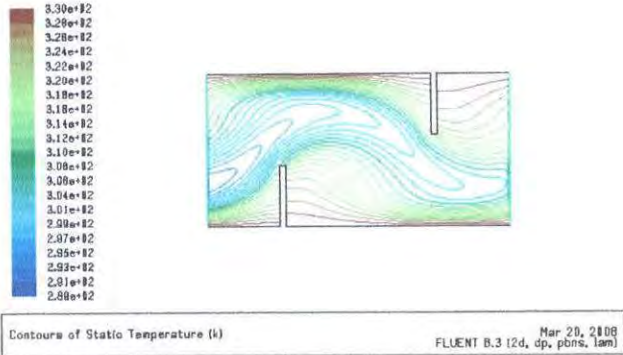
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(b) $Re = 800$ (c) $Re = 1500$

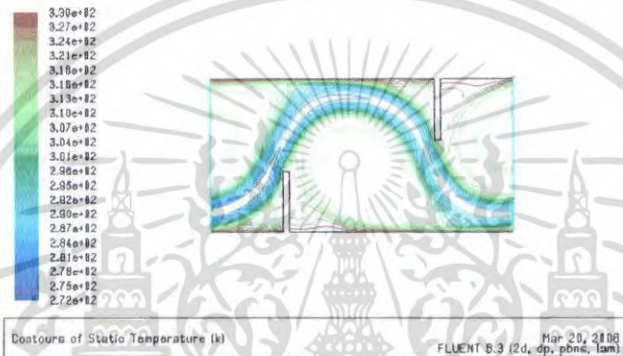
รูปที่ 5.1 แสดงเวกเตอร์ความเร็วภายในช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบที่มีสัดส่วน $h/H = 0.4$ พิจารณาผลกระทบจากค่า Re

ในรูปที่ 5.1 แสดงเวกเตอร์ความเร็วภายในช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบที่มีสัดส่วน $h/H = 0.4$ โดยมีค่า Re 100, 800 และ 1500 ตามลำดับ พบว่าเมื่อกระแสการไหลได้ไหลเข้าปะทะแผ่นแผ่นกั้น ทำให้เกิดกระแสหมุนวนบริเวณระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น ที่ค่า $Re = 100$ นั้นการหมุนวนจะเกิดขึ้น โดยมีขนาดค่อนข้างเล็ก และความเร็วที่ใกล้กับผิวช่องขนานทั้งด้านบนและด้านล่างค่อนข้างต่ำ สำหรับที่ค่า $Re = 800$ และ 1500 กระแสการไหลหมุนวนจะมีขนาดใหญ่ขึ้น และมีความเร็วที่ใกล้กับผิวช่องขนานทั้งด้านบนและด้านล่างที่สูงขึ้นตามลำดับ

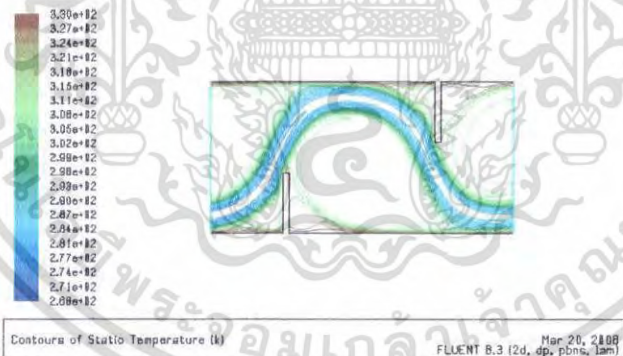
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) Re = 100



(b) Re = 800

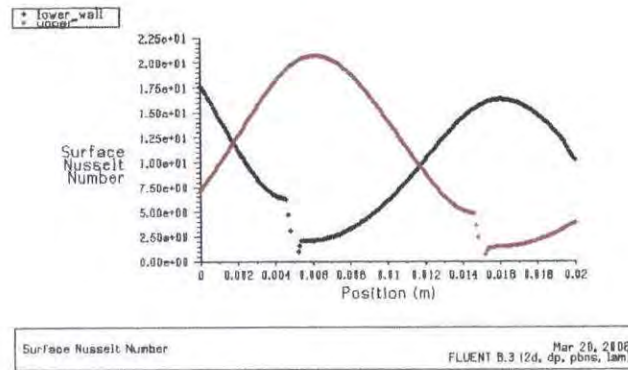
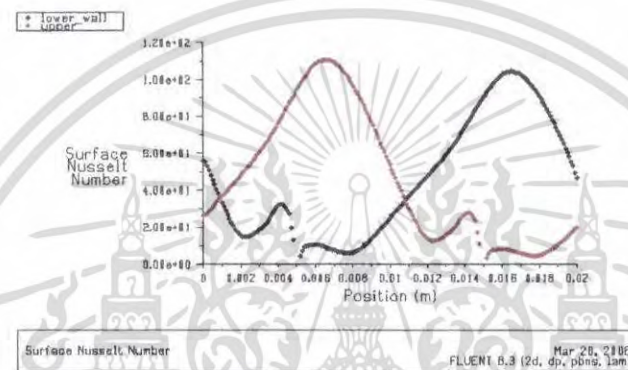
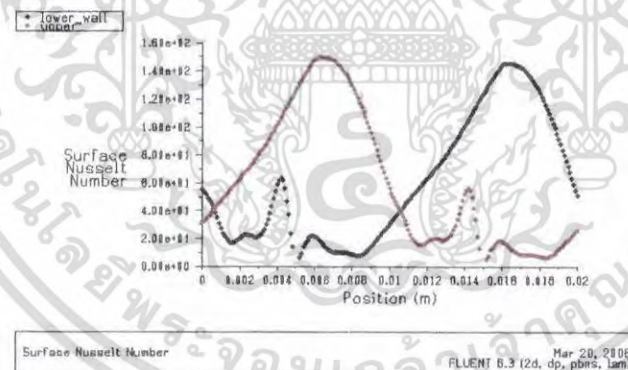


(c) Re = 1500

รูปที่ 5.2 แสดงเส้นทางของอุณหภูมิภายในช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบที่มีสัดส่วน $h/H = 0.4$ พิจารณาผลกระทบจากค่า Re

ในรูปที่ 5.2 แสดงเส้นทางของอุณหภูมิภายในช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบที่มีสัดส่วน $h/H = 0.4$ โดยมีค่า Re 100, 800 และ 1500 ตามลำดับ พบว่าที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ 100 ความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิวของช่องขนานกับของไหลที่บริเวณใกล้กับผิวนั้นมีค่าค่อนข้างน้อย สำหรับที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ 800 และ 1500 ความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิวของช่องขนานกับของไหลที่บริเวณใกล้กับผิวนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ ทำให้มีการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีขึ้น

ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

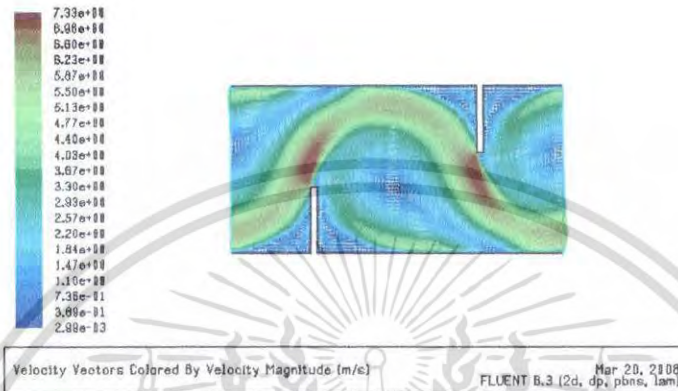
(a) $Re = 100$ (b) $Re = 800$ (c) $Re = 1500$

รูปที่ 5.3 แสดงค่าสเกลที่นัมเบอร์เฉพาะที่ภายในช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบที่มีสัดส่วน $h/H = 0.4$ พิจารณาผลกระทบจากค่า Re

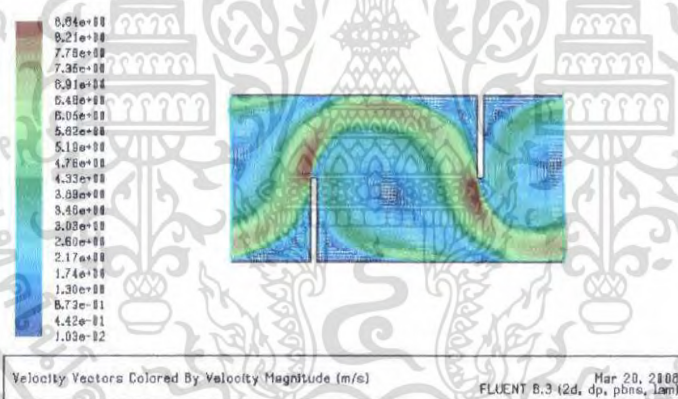
ในรูปที่ 5.3 แสดงค่าสเกลที่นัมเบอร์เฉพาะที่ภายในช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบที่มีสัดส่วน $h/H = 0.4$ โดยมีค่า Re 100, 800 และ 1500 ตามลำดับ พบว่าที่ค่าเรย์โนลด์สที่นัมเบอร์เท่ากับ 100 ค่าสเกลที่นัมเบอร์เฉพาะที่ของผิวของช่องขนานที่อยู่ตรงกันข้ามกับตำแหน่งที่ติดตั้งแผ่นกั้นจะมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากบริเวณดังกล่าวชั้นขอบความร้อน (Thermal boundary layer) มีความหนาเอกลสารเป็นเอกลสารที่สวางเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะเป็นใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้อย สำหรับที่ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์เท่ากับ 800 และ 1500 ค่านี้สเกลที่นัมเบอร์เฉพาะที่จะมีลักษณะคล้ายกับที่ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์เท่ากับ 100 แต่จะมีค่าสเกลที่นัมเบอร์เฉพาะที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ

5.1.2 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าสัดส่วน h/H



(a) $h/H = 0.4$

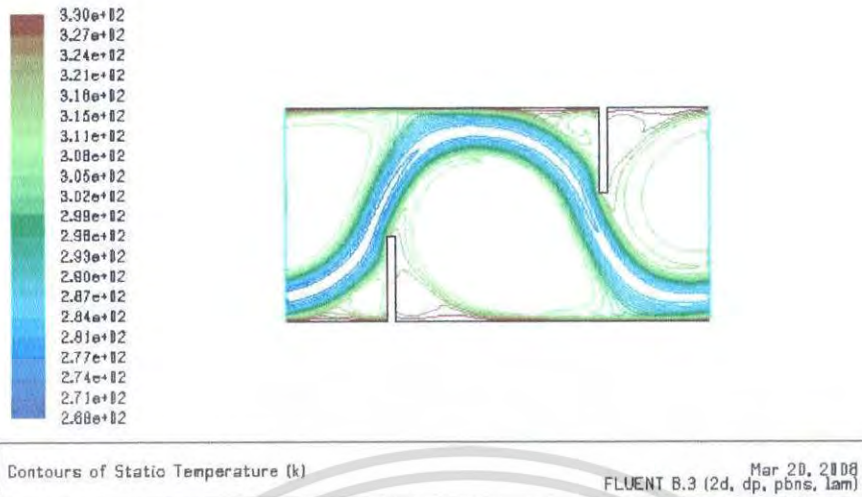
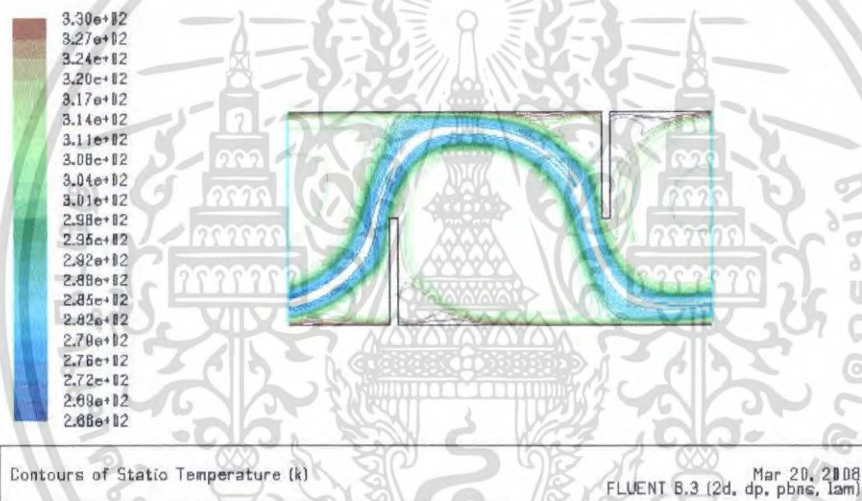


(b) $h/H = 0.5$

รูปที่ 5.4 แสดงเวกเตอร์ความเร็วภายในช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบที่มีค่า $Re = 1500$ พิจารณา ผลกระทบจากค่าสัดส่วน h/H

ในรูปที่ 5.4 แสดงเวกเตอร์ความเร็วภายในช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบที่มีค่า $Re = 1500$ โดยมีค่าสัดส่วน h/H เท่ากับ 0.4 และ 0.5 ตามลำดับ พบว่าที่ค่า h/H เท่ากับ 0.5 จะเกิดการหมุนวนของกระแสการไหลที่บริเวณระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นมีขนาดใหญ่กว่าที่สัดส่วน h/H เท่ากับ 0.4 และมีความเร็วของกระแสการไหลที่ใกล้กับผิวของช่องขนานสูงกว่าที่สัดส่วน h/H เท่ากับ 0.4

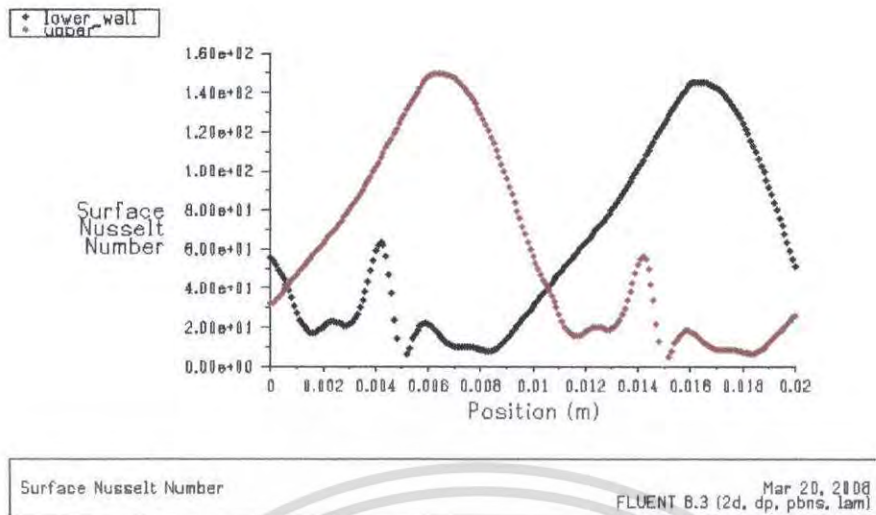
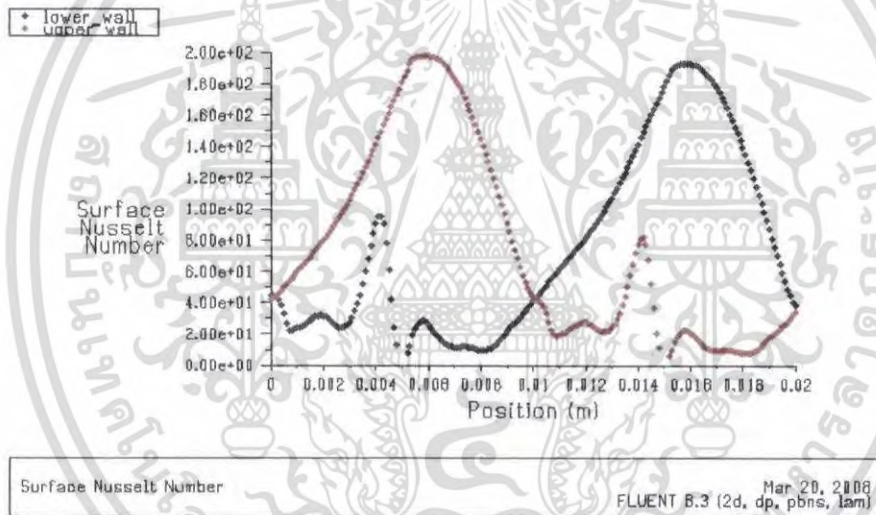
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(a) $h/H = 0.4$ (b) $h/H = 0.5$

รูปที่ 5.5 แสดงเส้นทางของอุณหภูมิภายในช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบที่มีค่า $Re = 1500$ พิจารณาผลกระทบจากค่าสัดส่วน h/H

ในรูปที่ 5.5 แสดงเส้นทางของอุณหภูมิในช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบที่มีค่า $Re = 1500$ โดยมีค่าสัดส่วน h/H เท่ากับ 0.4 และ 0.5 ตามลำดับ พบว่าที่ค่า h/H เท่ากับ 0.5 จะมีความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิวของช่องขนานกับของไหลที่บริเวณใกล้กับผิวนั้นมีค่ามากกว่าที่สัดส่วน h/H เท่ากับ 0.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(a) $h/H = 0.4$ (b) $h/H = 0.5$

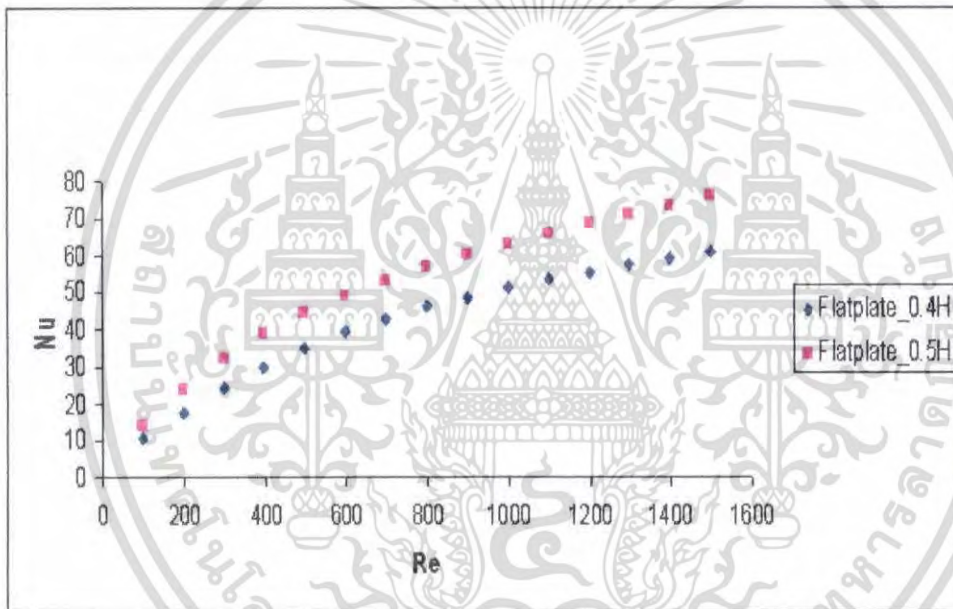
รูปที่ 5.6 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนที่ผนังของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบที่มีค่า $Re = 1500$ พิจารณาผลกระทบจากค่าสัดส่วน h/H

ในรูปที่ 5.6 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนที่ผนังของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบที่มีค่า $Re = 1500$ โดยมีค่าสัดส่วน h/H เท่ากับ 0.4 และ 0.5 ตามลำดับ พบว่าที่ค่า h/H เท่ากับ 0.5 จะให้ค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าที่สัดส่วน h/H เท่ากับ 0.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.3 ผลความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์และค่าสเกลต์นัมเบอร์ ของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบ

จากรูปที่ 5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์กับสเกลต์นัมเบอร์ของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบ สามารถสรุปผลการจำลองได้ว่าค่า Nu ของช่องขนานจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามค่า Re ที่เพิ่มขึ้นหรือการไหลที่มีลักษณะหมุนวนมากยิ่งขึ้น โดยแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบภายในช่องขนานจะสามารถช่วยเพิ่มการหมุนวนของกระแสการไหลที่บริเวณระยะห่างของแผ่นกั้นมากยิ่งขึ้นทำให้ค่า Nu สูงขึ้น สำหรับสัดส่วนความสูงของแผ่นกั้นต่อความสูงของช่องขนาน (h/H) จะมีผลต่อค่า Nu อย่างมากคือที่สัดส่วน (h/H) เท่ากับ 0.5 จะให้ค่า Nu สูงกว่าที่สัดส่วน (h/H) เท่ากับ 0.4

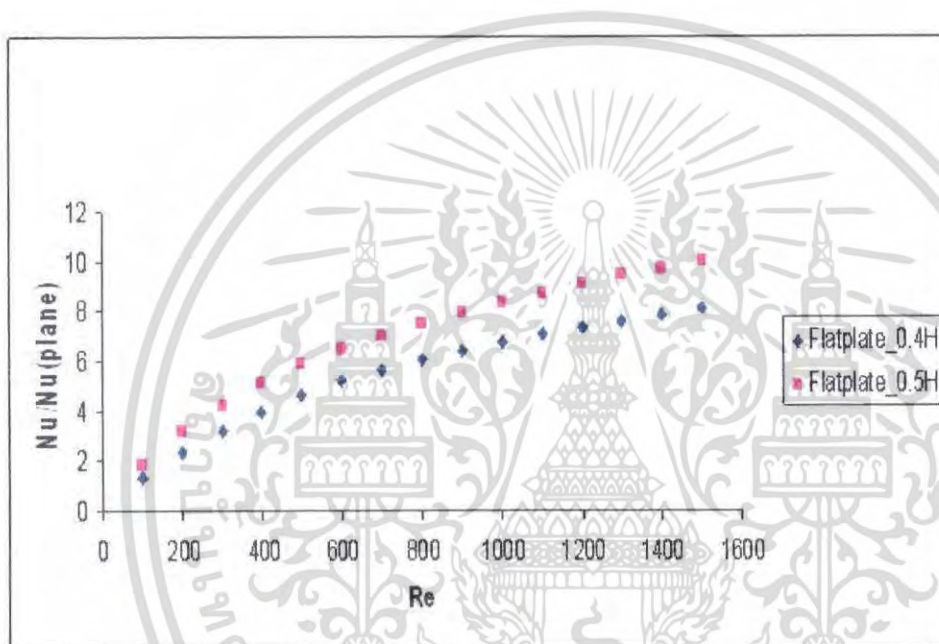


รูปที่ 5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์กับสเกลต์นัมเบอร์ของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.4 ผลความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ และค่าสเคลทน์นัมเบอร์ ช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบต่อช่องขนานผิวเรียบ

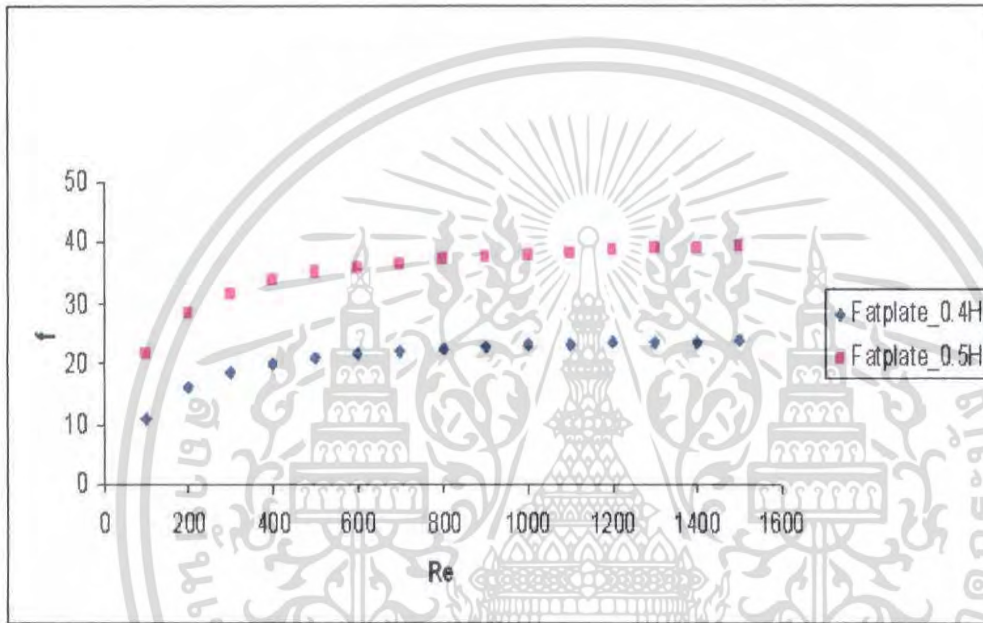
จากรูปที่ 5.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ และค่าสเคลทน์นัมเบอร์ของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบต่อช่องขนานผิวเรียบ (Nu/Nu_o) สามารถสรุปผลได้คือเมื่อค่า Re เพิ่มขึ้นอัตราส่วน (Nu/Nu_o) จะมีค่าเพิ่มขึ้นโดยช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบที่มีสัดส่วน h/H เท่ากับ 0.5 จะให้อัตราส่วน (Nu/Nu_o) มากกว่าช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบที่มีสัดส่วน h/H เท่ากับ 0.4



รูปที่ 5.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์และค่าสเคลทน์นัมเบอร์ของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบต่อช่องขนานผิวเรียบ

5.1.5 ผลความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ และค่าตัวประกอบความเสียดทานของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบ

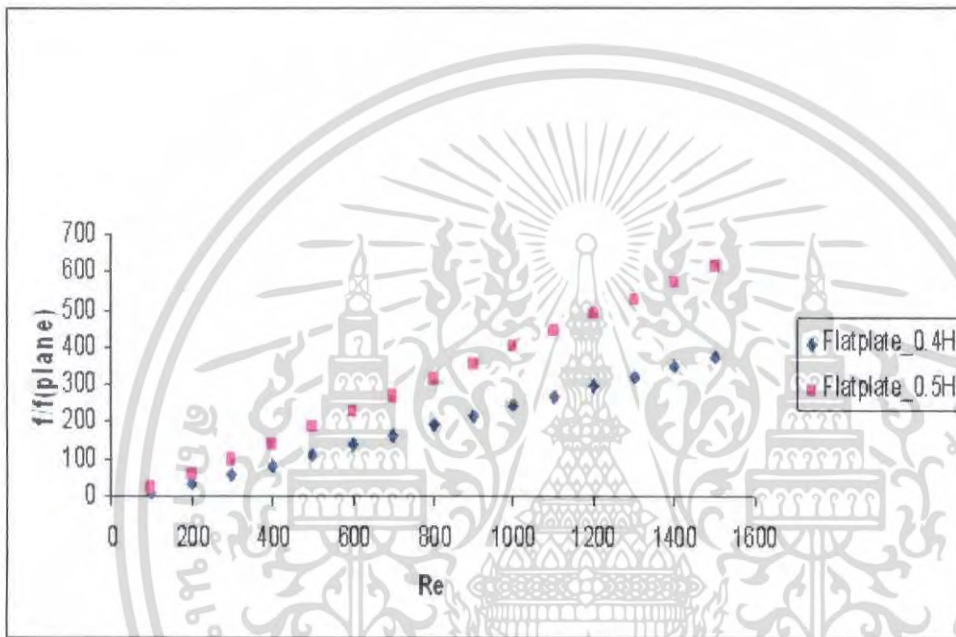
จากรูปที่ 5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์และค่าตัวประกอบความเสียดทานของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบ สามารถสรุปผลได้ว่าค่า f ของช่องขนานจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามค่า Re โดยที่สัดส่วน h/H เท่ากับ 0.5 จะให้ค่า f มากกว่าที่สัดส่วน h/H เท่ากับ 0.4



รูปที่ 5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์และค่าตัวประกอบความเสียดทานของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบ

5.1.6 ผลความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ และค่าตัวประกอบความเสียดทานของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบต่อช่องขนานผิวเรียบ

จากรูปที่ 5.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ และค่าตัวประกอบความเสียดทานของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบต่อช่องขนานผิวเรียบ (f/f_0) โดยสามารถสรุปผลการจำลองได้คืออัตราส่วนค่า (f/f_0) ของช่องขนานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามค่า Re ที่เพิ่มขึ้น โดยที่สัดส่วน h/H เท่ากับ 0.5 จะให้ค่า f/f_0 มากกว่าที่สัดส่วน h/H เท่ากับ 0.4

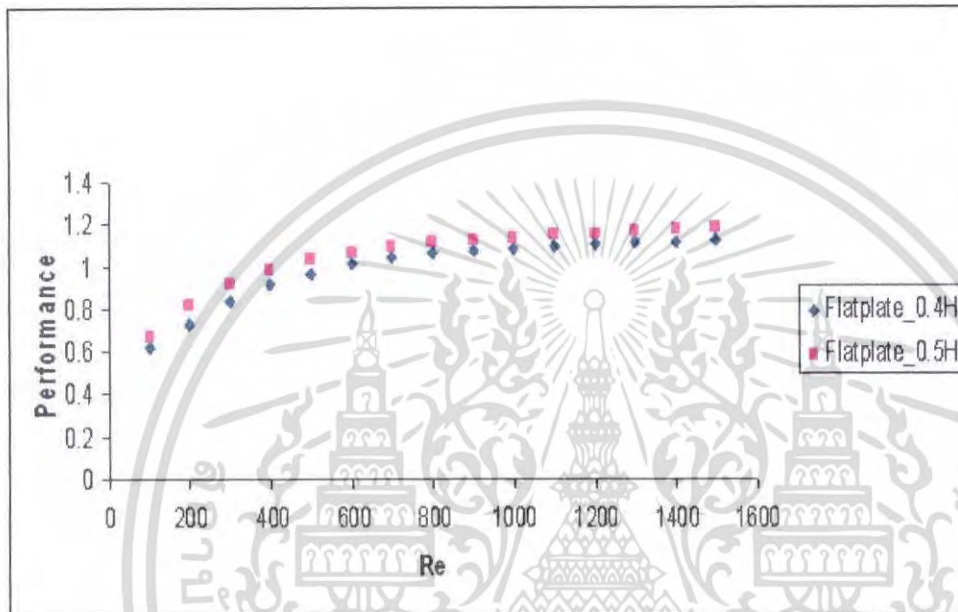


รูปที่ 5.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ และค่าตัวประกอบความเสียดทานของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบต่อช่องขนานผิวเรียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.7 ผลความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ และค่าสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบ

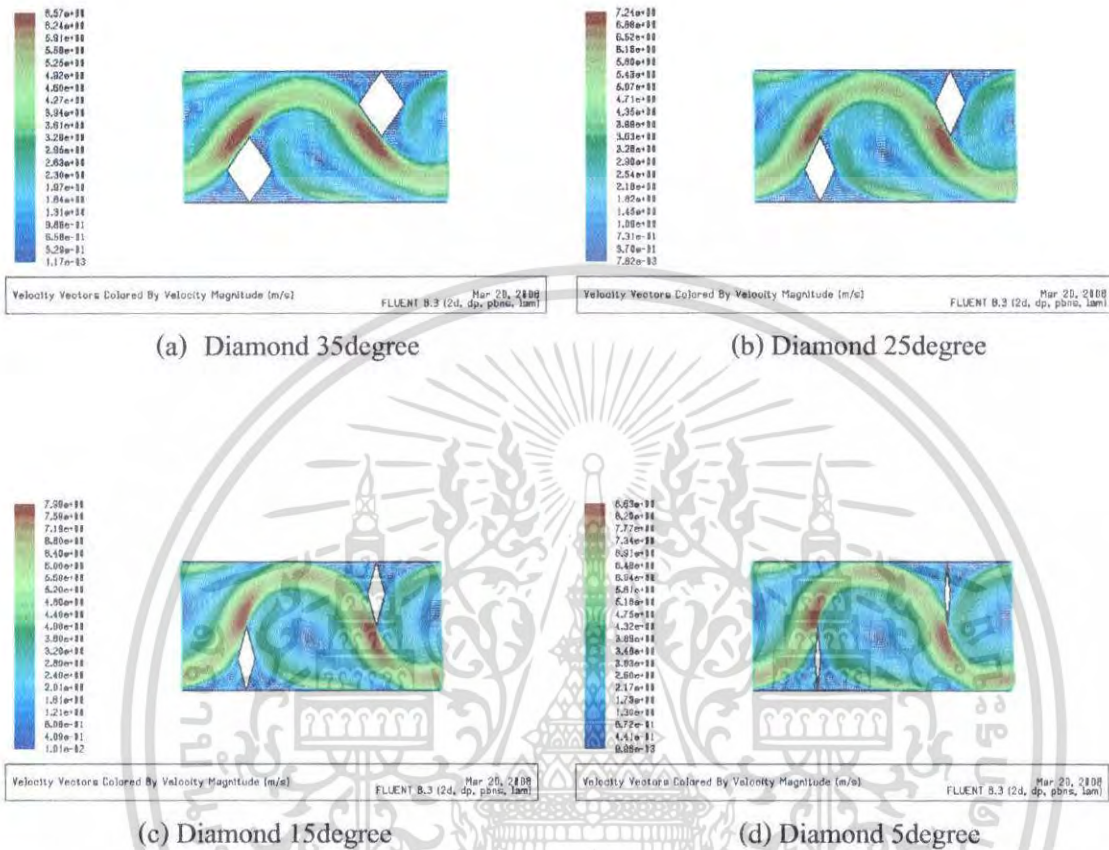
จากรูปที่ 5.11 พบว่าค่าสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อน (η) ของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่า Re เพิ่มขึ้นและอัตราส่วน h/H เท่ากับ 0.5 จะมีค่า η มากกว่าที่อัตราส่วน h/H เท่ากับ 0.4



รูปที่ 5.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์กับค่าสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบ

5.2 ช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบไดมอนด์ (Diamond Baffles)

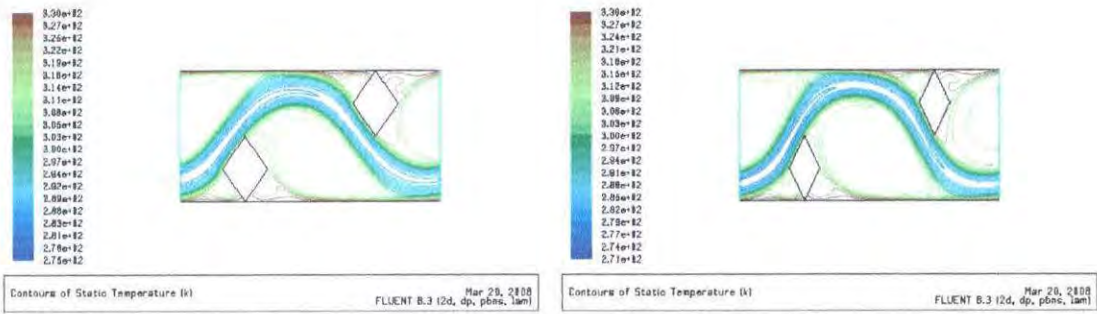
5.2.1 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่ามุมของไดมอนด์



รูปที่ 5.12 แสดงเวกเตอร์ความเร็วภายในช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบไดมอนด์ที่มีสัดส่วน $h/H = 0.5$ และมีค่า $Re = 1500$ พิจารณาผลกระทบของมุมที่เปลี่ยนแปลง

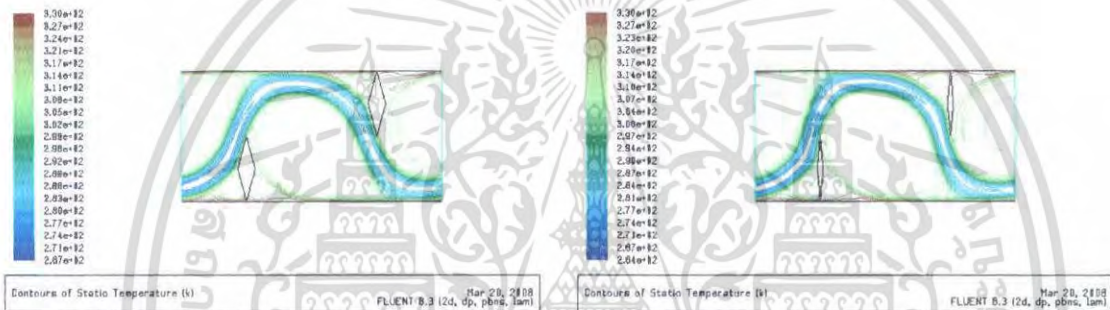
ในรูปที่ 5.12 แสดงเวกเตอร์ความเร็วภายในช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบไดมอนด์ที่มีสัดส่วน $h/H = 0.5$ และมีค่า $Re = 1500$ โดยมีมุมของไดมอนด์เท่ากับ 35, 25, 15 และ 5 องศาตามลำดับ พบว่า จะเกิดการหมุนวนของกระแสการไหลที่บริเวณระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น ซึ่งเมื่อมุมของไดมอนด์ลดลง จะทำให้ขนาดของกระแสมวนเพิ่มขึ้น และทำให้ความเร็วของของไหลที่ใกล้กับผิวช่องขนานเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) Diamond 35degree

(b) Diamond 25degree



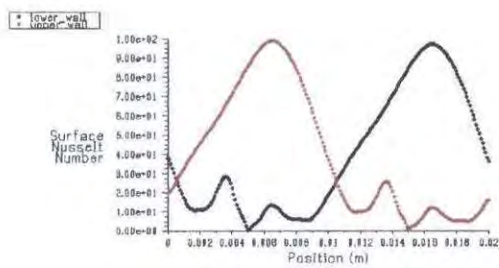
(c) Diamond 15degree

(d) Diamond 5degree

รูปที่ 5.13 แสดงเส้นทางของอุณหภูมิภายในช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบโคมอนด์ที่มีสัดส่วน $h/H = 0.5$ และมีค่า $Re = 1500$ พิจารณาผลกระทบของมุมที่เปลี่ยนแปลง

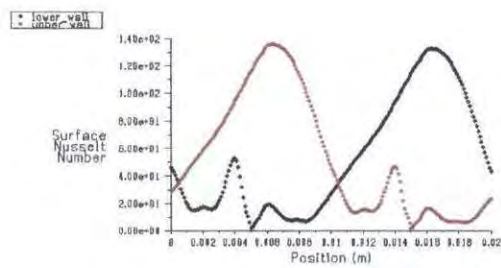
ในรูปที่ 5.13 แสดงเส้นทางของอุณหภูมิภายในช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบโคมอนด์ที่มีสัดส่วน $h/H = 0.5$ และมีค่า $Re = 1500$ โดยมีมุมของโคมอนด์เท่ากับ 35, 25, 15 และ 5 องศาตามลำดับ พบว่า จะมีความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิวของช่องขนานกับอุณหภูมิของของไหลที่บริเวณใกล้เคียงกับผิวนั้น จะเพิ่มขึ้นเมื่อมุมของโคมอนด์ลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



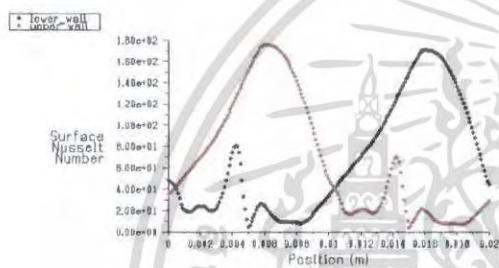
Surface Nusselt Number Mar 20, 21:08
FLUENT 6.3 (2d, dp, pbr2, lam)

(a) Diamond 35degree



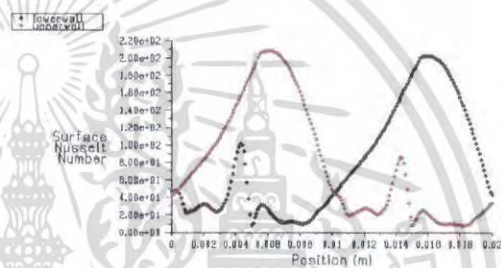
Surface Nusselt Number Mar 20, 21:08
FLUENT 6.3 (2d, dp, pbr2, lam)

(b) Diamond 25degree



Surface Nusselt Number Mar 20, 21:08
FLUENT 6.3 (2d, dp, pbr2, lam)

(c) Diamond 15degree



Surface Nusselt Number Mar 20, 21:08
FLUENT 6.3 (2d, dp, pbr2, lam)

(d) Diamond 5degree

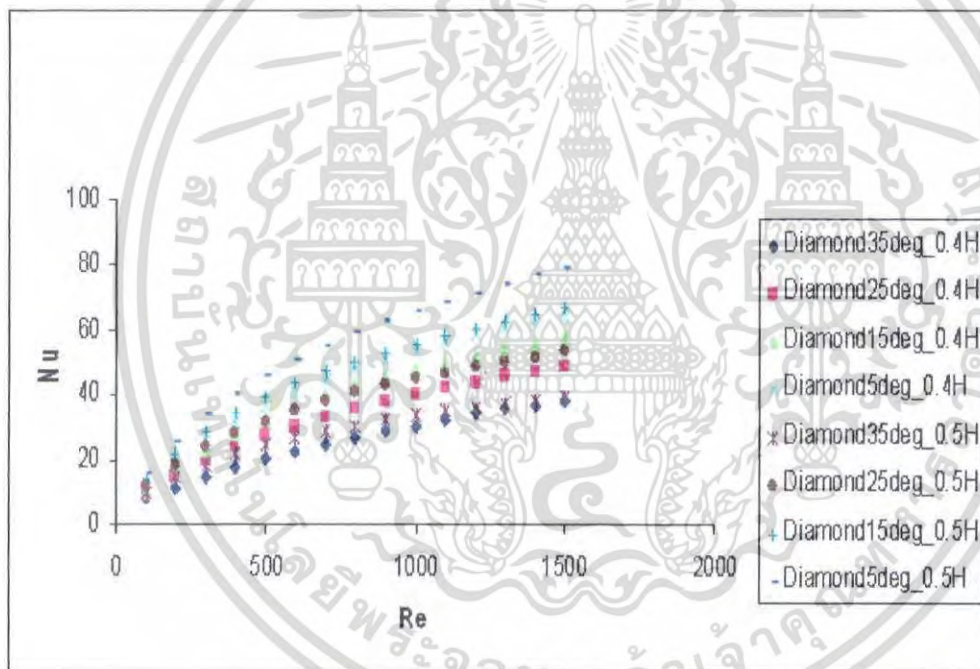
รูปที่ 5.14 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ภายในช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบไดมอนด์ที่มีสัดส่วน $h/H = 0.5$ และมีค่า $Re = 1500$ พิจารณาผลกระทบของมุมที่เปลี่ยนแปลง

ในรูปที่ 5.14 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ภายในช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบไดมอนด์ที่มีสัดส่วน $h/H = 0.5$ และมีค่า $Re = 1500$ โดยมีมุมของไดมอนด์เท่ากับ 35, 25, 15 และ 5 องศา ตามลำดับ พบว่าจะมีค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่เพิ่มขึ้นเมื่อมุมของไดมอนด์ลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2 ผลความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์และค่านี้สเซลท์นัมเบอร์ ของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบไดมอนด์

จากรูปที่ 5.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์กับนี้สเซลท์นัมเบอร์ของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบไดมอนด์ สามารถสรุปผลการจำลองได้ว่าค่า Nu ของช่องขนานจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามค่า Re ที่เพิ่มขึ้นหรือการไหลที่มีลักษณะหมุนวนยิ่งขึ้น โดยแผ่นกั้นแบบไดมอนด์ภายในช่องขนานจะสามารถช่วยเพิ่มการหมุนวนของกระแสการไหลที่บริเวณระยะห่างของแผ่นกั้นมากยิ่งขึ้นทำให้ค่า Nu สูงขึ้น สำหรับมุมของไดมอนด์ที่ 5 องศาจะให้ค่า Nu มากที่สุด และลดลงตามมุมที่เพิ่มขึ้น สำหรับสัดส่วนความสูงของแผ่นกั้นต่อความสูงของช่องขนาน (h/H) จะมีผลต่อค่า Nu อย่างมากคือที่สัดส่วน (h/H) เท่ากับ 0.5 จะให้ค่า Nu สูงกว่าที่สัดส่วน (h/H) เท่ากับ 0.4

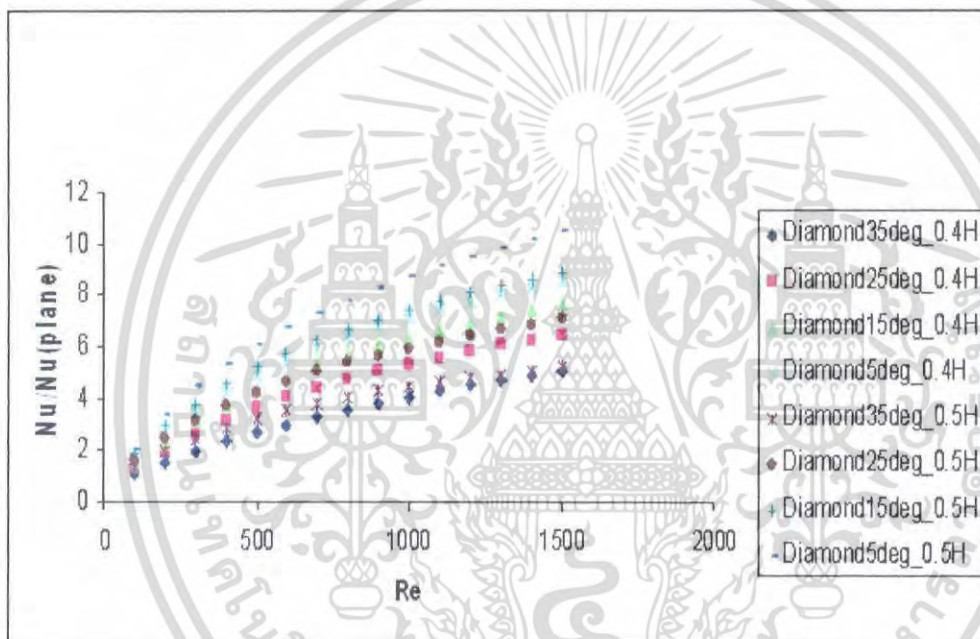


รูปที่ 5.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์กับนี้สเซลท์นัมเบอร์ของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบ ไดมอนด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.3 ผลความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์และค่านัสเชิลท์นัมเบอร์ ของช่องขนานที่มีแผ่นกันแบบไดมอนด์ต่อช่องขนานผิวเรียบ

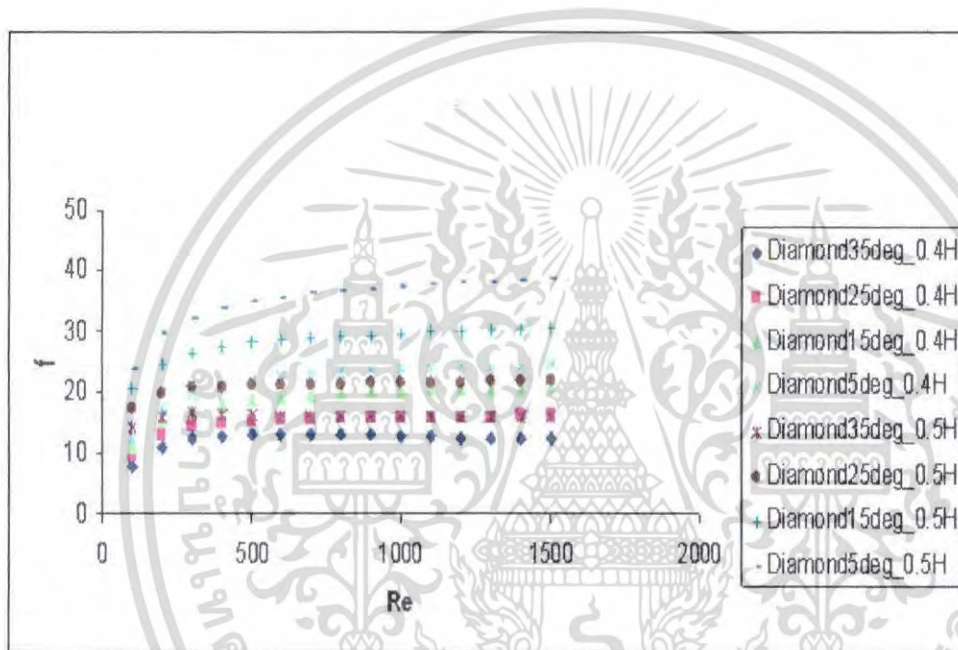
จากรูปที่ 5.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์และค่านัสเชิลท์นัมเบอร์ ของช่องขนานที่มีแผ่นกันแบบไดมอนด์ต่อช่องขนานผิวเรียบ (Nu / Nu_0) สามารถสรุปได้คือ Nu / Nu_0 ของช่องขนานจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตาม Re ที่เพิ่มขึ้น สำหรับมุมของไดมอนด์ที่ 5 องศาจะให้ค่า Nu / Nu_0 มากที่สุด และลดลงตามมุมที่เพิ่มขึ้น สำหรับสัดส่วนความสูงของแผ่นกันต่อความสูงของช่องขนาน (h / H) จะมีผลต่อค่า Nu / Nu_0 อย่างมากคือที่สัดส่วน (h / H) เท่ากับ 0.5 จะให้ค่า Nu / Nu_0 สูงกว่าที่สัดส่วน (h / H) เท่ากับ 0.4



รูปที่ 5.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์และค่านัสเชิลท์นัมเบอร์ ของช่องขนานที่มีแผ่นกันแบบไดมอนด์ต่อช่องขนานผิวเรียบ

5.2.4 ผลความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ และค่าตัวประกอบความเสียดทานของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบไดมอนด์

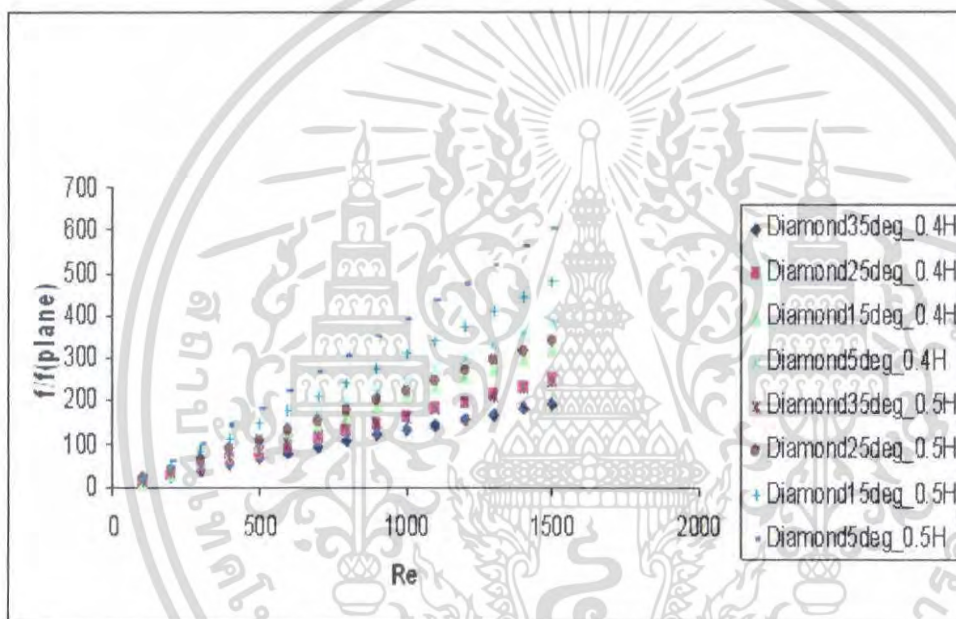
จากรูปที่ 5.17 ผลความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์และค่าตัวประกอบความเสียดทานของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบไดมอนด์ สามารถสรุปได้คือ มุมของไดมอนด์ที่ 5 องศาจะให้ค่า f มากที่สุดและลดลงตามมุมที่เพิ่มขึ้น สำหรับสัดส่วนความสูงของแผ่นกั้นต่อความสูงของช่องขนาน (h/H) จะมีผลต่อค่า f อย่างมากคือที่สัดส่วน h/H เท่ากับ 0.5 จะให้ค่า f สูงกว่าที่สัดส่วน h/H เท่ากับ 0.4



รูปที่ 5.17 ผลความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ และค่าตัวประกอบความเสียดทานของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบไดมอนด์

5.2.5 ผลความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ และค่าตัวประกอบความเสียดทานของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบไดมอนด์ต่อช่องขนานผิวเรียบ

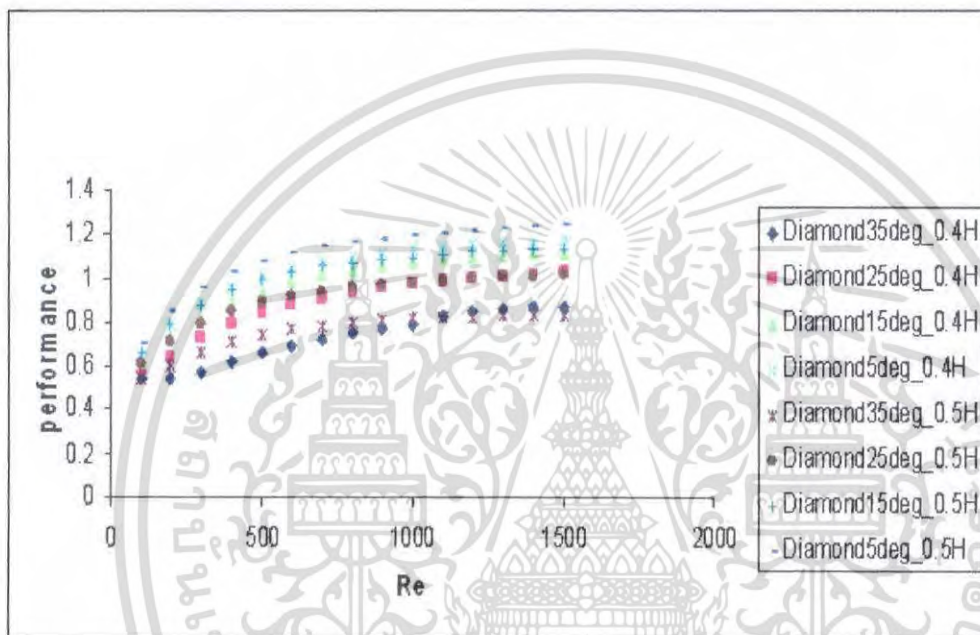
จากรูปที่ 5.18 แสดงสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์และค่าตัวประกอบความเสียดทาน ของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบไดมอนด์ต่อช่องขนานผิวเรียบ (f/f_0) สามารถสรุปได้คือ f/f_0 ของช่องขนานจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตาม Re ที่เพิ่มขึ้น สำหรับมุมของไดมอนด์ที่ 5 องศาจะให้ค่า f/f_0 มากที่สุดและลดลงตามมุมที่เพิ่มขึ้น สำหรับสัดส่วนความสูงของแผ่นกั้นต่อความสูงของช่องขนาน (h/H) จะมีผลต่อค่า f/f_0 อย่างมากคือที่สัดส่วน (h/H) เท่ากับ 0.5 จะให้ค่า f/f_0 สูงกว่าที่สัดส่วน (h/H) เท่ากับ 0.4



รูปที่ 5.18 แสดงสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์และค่าตัวประกอบความเสียดทานของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบ ไดมอนด์ต่อช่องขนานผิวเรียบ

5.2.6 ผลความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ และค่าสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบไดมอนด์

จากรูปที่ 5.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ และค่าสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบไดมอนด์ พบว่าค่าสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อน (η) ของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบไดมอนด์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่า Re เพิ่มขึ้นและ สำหรับมุมของไดมอนด์ที่ 5 องศาจะให้ค่า η มากที่สุดและลดลงตามมุมที่เพิ่มขึ้น

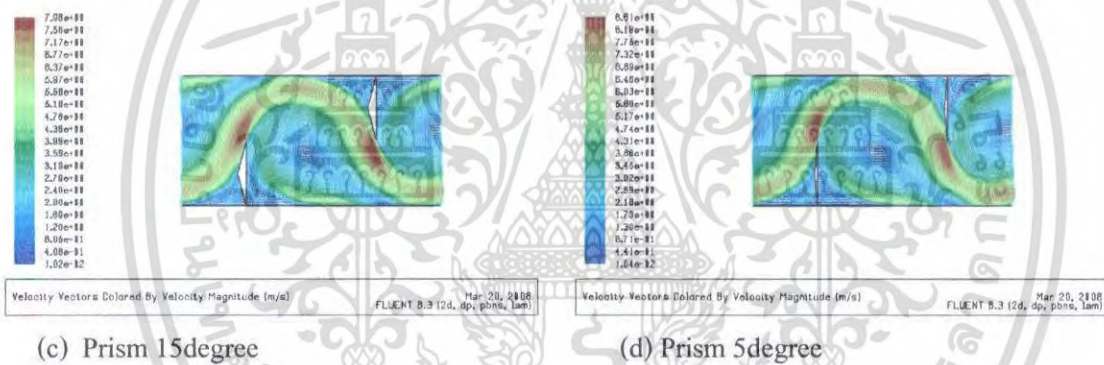
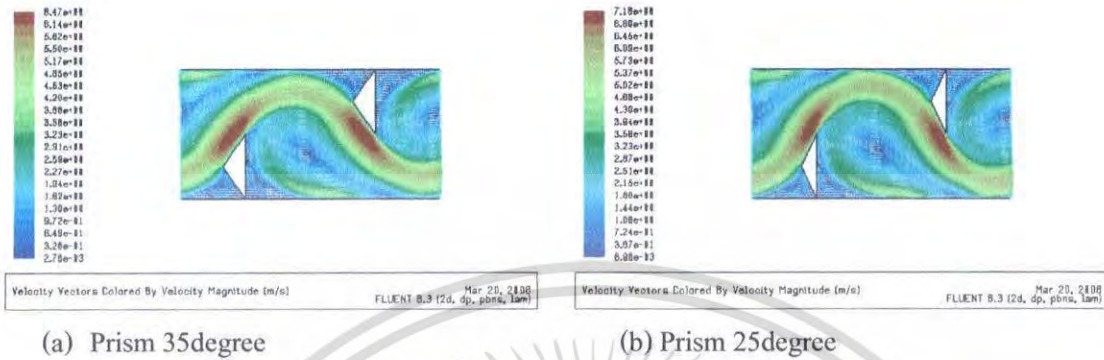


รูปที่ 5.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ และค่าสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบไดมอนด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึม (Prism Baffles)

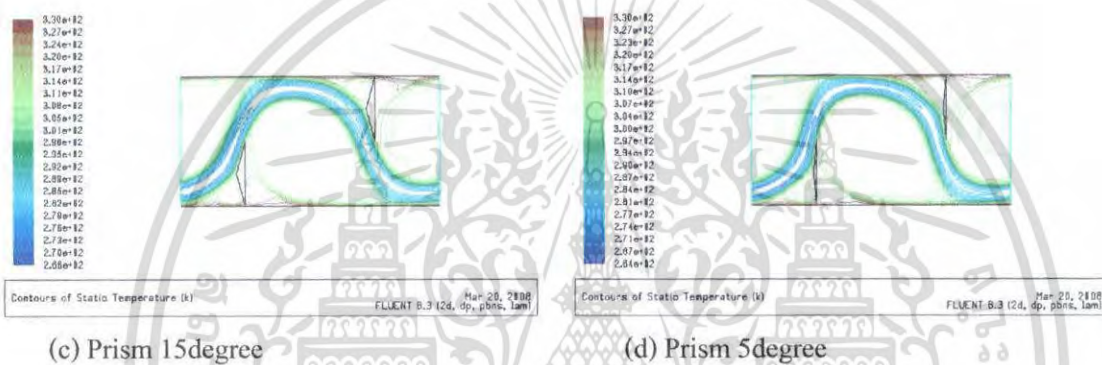
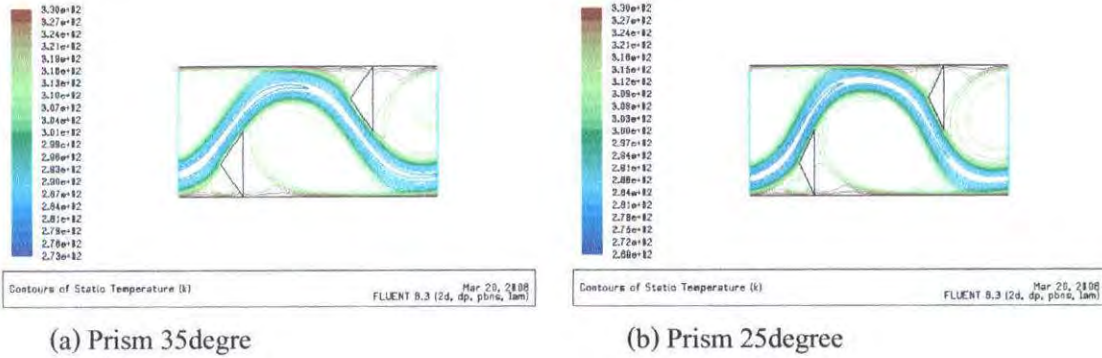
5.3.1 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่ามุมของปริซึม



รูปที่ 5.20 แสดงเวกเตอร์ความเร็วภายในช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึมที่มีสัดส่วน $h/H = 0.5$ และมีค่า $Re = 1500$ พิจารณาผลกระทบของมุมที่เปลี่ยนแปลง

ในรูปที่ 5.20 แสดงเวกเตอร์ความเร็วภายในช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึมที่มีสัดส่วน $h/H = 0.5$ และมีค่า $Re = 1500$ โดยมีมุมของปริซึมเท่ากับ 35, 25, 15 และ 5 องศาตามลำดับ พบว่าจะเกิดการหมุนวนของกระแสการไหลที่บริเวณระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น ซึ่งเมื่อมุมของปริซึมลดลง จะทำให้ขนาดของกระแสหมุนวนเพิ่มขึ้น และทำให้ความเร็วของของไหลที่ใกล้กับผิวช่องขนานเพิ่มขึ้น

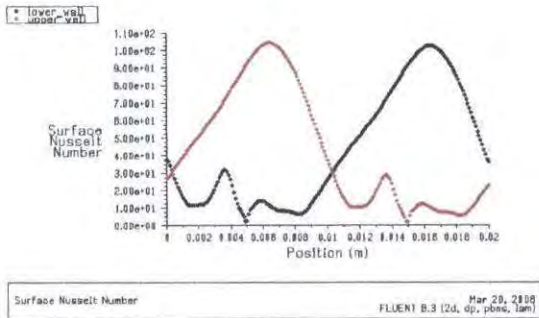
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



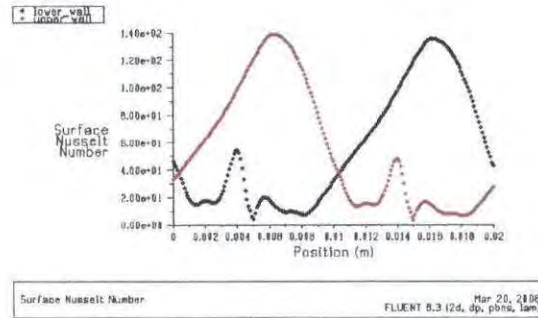
รูปที่ 5.21 แสดงเส้นทางของอุณหภูมิภายในช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึมที่มีสัดส่วน $h/H = 0.5$ และมีค่า $Re = 1500$ พิจารณาผลกระทบของมุมที่เปลี่ยนแปลง

ในรูปที่ 5.21 แสดงเส้นทางของอุณหภูมิภายในช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึมที่มีสัดส่วน $h/H = 0.5$ และมีค่า $Re = 1500$ โดยมีมุมของปริซึมเท่ากับ 35, 25, 15 และ 5 องศาตามลำดับ พบว่าจะมีความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิวของช่องขนานกับอุณหภูมิของของไหลที่บริเวณใกล้กับผิวนั้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อมุมของปริซึมลดลง

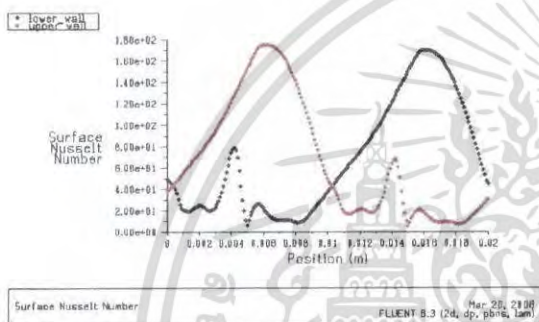
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



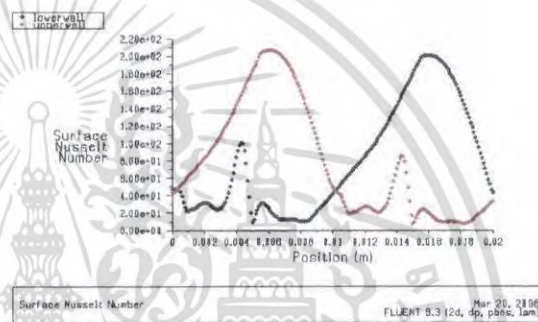
(a) Prism 35degree



(b) Prism 25degree



(c) Prism 15degree



(d) Prism 5degree

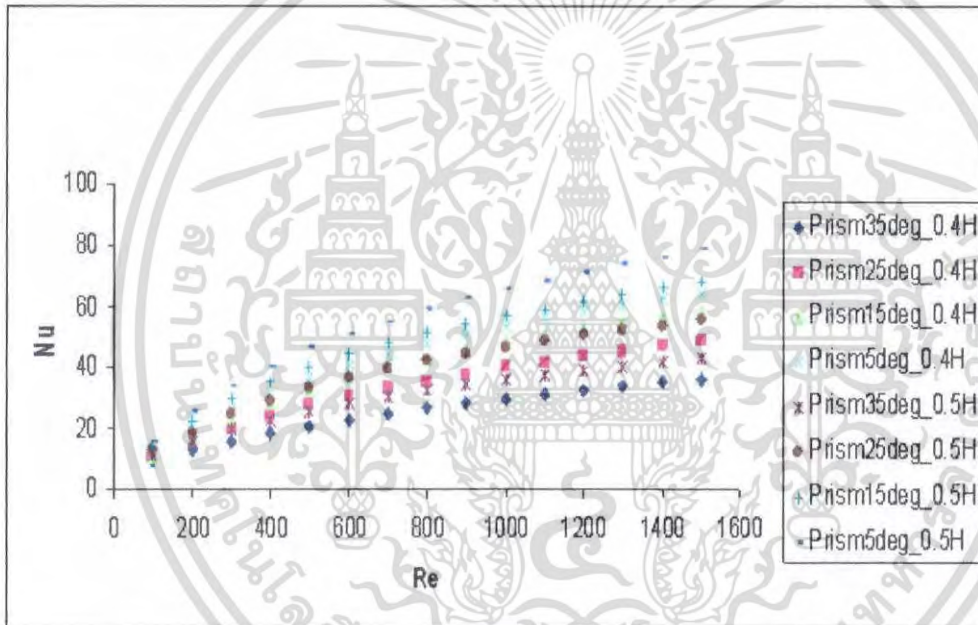
รูปที่ 5.22 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ภายในช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึมที่มีสัดส่วน $h/H=0.5$ และมีค่า $Re = 1500$ พิจารณาผลกระทบของมุมที่เปลี่ยนแปลง

ในรูปที่ 5.22 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ภายในช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึมที่มีสัดส่วน $h/H = 0.5$ และมีค่า $Re = 1500$ โดยมีมุมของปริซึมเท่ากับ 35, 25, 15 และ 5 องศาตามลำดับ พบว่าจะมีค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่เพิ่มขึ้นเมื่อมุมของปริซึมลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.2 ผลความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์์นัมเบอร์และค่าไนส์เชิลท์นัมเบอร์ ของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึม

จากรูปที่ 5.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์์นัมเบอร์กับไนส์เชิลท์นัมเบอร์ของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึม สามารถสรุปผลการจำลองได้ว่าค่า Nu ของช่องขนานจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น Re ที่เพิ่มขึ้นหรือการไหลที่มีลักษณะหมุนวนยิ่งขึ้น โดยแผ่นกั้นแบบปริซึมภายในช่องขนานจะสามารถช่วยเพิ่มการหมุนวนของกระแสการไหลที่บริเวณระยะห่างของแผ่นกั้นมากยิ่งขึ้น ทำให้ค่า Nu สูงขึ้น สำหรับมุมของปริซึมที่ 5 องศาจะให้ค่า Nu มากที่สุด และลดลงตามมุมที่เพิ่มขึ้น สำหรับสัดส่วนความสูงของแผ่นกั้นต่อความสูงของช่องขนาน (h/H) จะมีผลต่อค่า Nu อย่างมากคือที่สัดส่วน h/H เท่ากับ 0.5 จะให้ค่า Nu สูงกว่าที่สัดส่วน h/H เท่ากับ 0.4

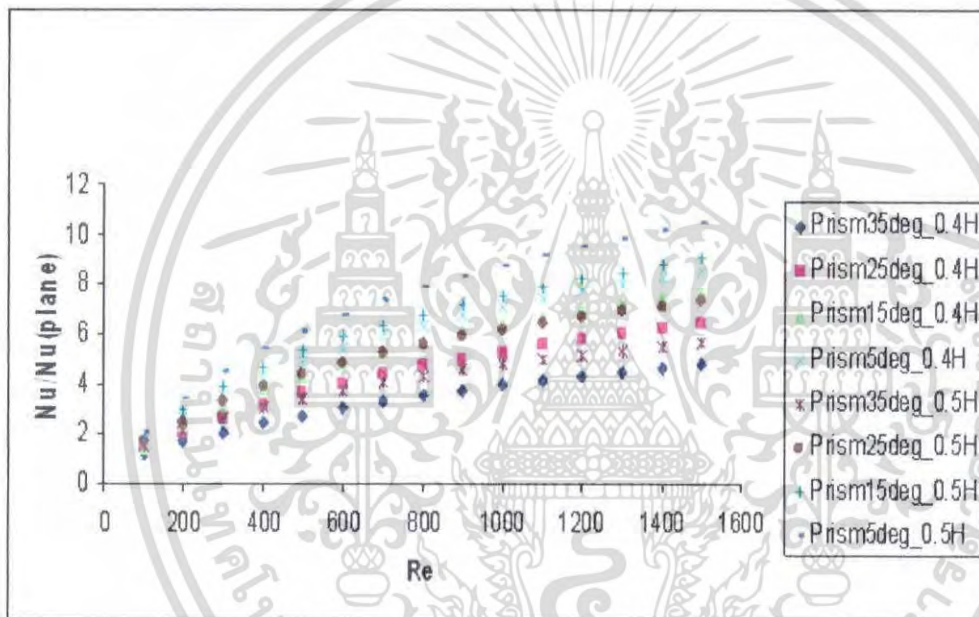


รูปที่ 5.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์์นัมเบอร์กับไนส์เชิลท์นัมเบอร์ของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.3 ผลความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์์นัมเบอร์และค่านัสเซิลท์นัมเบอร์ ของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึมต่อช่องขนานผิวเรียบ

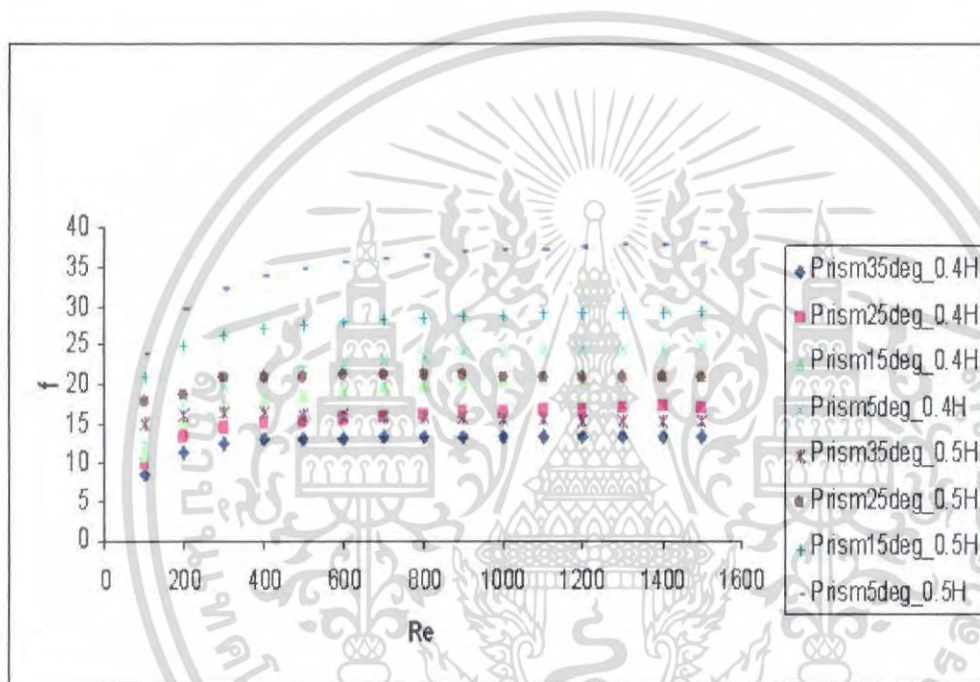
จากรูปที่ 5.24 แสดงสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์์นัมเบอร์และค่านัสเซิลท์นัมเบอร์ ของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึมต่อช่องขนานผิวเรียบ (Nu / Nu_0) สามารถสรุปได้คือ Nu / Nu_0 ของช่องขนานจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตาม Re ที่เพิ่มขึ้น สำหรับมุมของปริซึมที่ 5 องศาจะให้ค่า Nu / Nu_0 มากที่สุดและลดลงตามมุมที่เพิ่มขึ้น สำหรับสัดส่วนความสูงของแผ่นกั้นต่อความสูงของช่องขนาน (h / H) จะมีผลต่อค่า Nu / Nu_0 อย่างมากคือที่สัดส่วน h / H เท่ากับ 0.5 จะให้ค่า Nu / Nu_0 สูงกว่าที่สัดส่วน h / H เท่ากับ 0.4



รูปที่ 5.24 แสดงสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์์นัมเบอร์และค่านัสเซิลท์นัมเบอร์ ของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึมต่อช่องขนานผิวเรียบ

5.3.4 ผลความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ และค่าตัวประกอบความเสียดทานของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึม

จากรูปที่ 5.25 ผลความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ และค่าตัวประกอบความเสียดทานของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบ ปริซึม สามารถสรุปได้คือ มุมของปริซึมที่ 5 องศาจะให้ค่า f มากที่สุดและลดลงตามมุมที่เพิ่มขึ้น สำหรับสัดส่วนความสูงของแผ่นกั้นต่อความสูงของช่องขนาน (h/H) จะมีผลต่อค่า f อย่างมากคือที่สัดส่วน h/H เท่ากับ 0.5 จะให้ค่า f สูงกว่าที่สัดส่วน h/H เท่ากับ 0.4

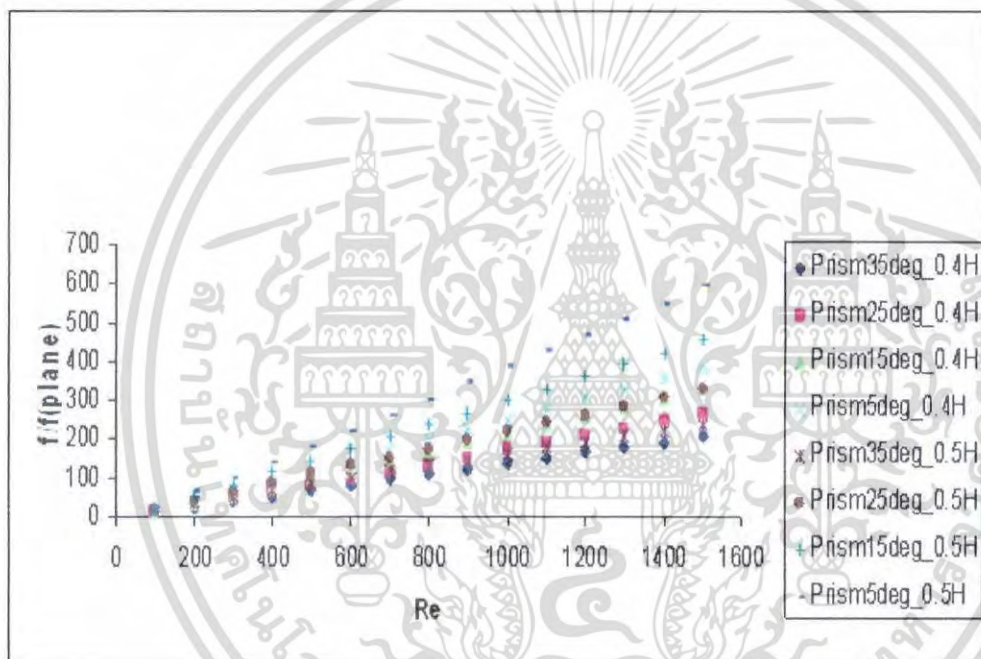


รูปที่ 5.25 ผลความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ และค่าตัวประกอบความเสียดทานของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบ ปริซึม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.5 ผลความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ และค่าตัวประกอบความเสียดทานของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึมต่อช่องขนานผิวเรียบ

จากรูปที่ 5.26 แสดงสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์และค่าตัวประกอบความเสียดทาน ของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึมต่อช่องขนานผิวเรียบ (f/f_0) สามารถสรุปได้คือ ของช่องขนานจะมีค่า f/f_0 เพิ่มมากขึ้นตาม Re ที่เพิ่มขึ้น สำหรับมุมของปริซึมที่ 5 องศาจะให้ค่า f/f_0 มากที่สุดและลดลงตามมุมที่เพิ่มขึ้น สำหรับสัดส่วนความสูงของแผ่นกั้นต่อความสูงของช่องขนาน (h/H) จะมีผลต่อค่า f/f_0 อย่างมากคือที่สัดส่วน (h/H) เท่ากับ 0.5 จะให้ค่า f/f_0 สูงกว่าที่สัดส่วน (h/H) เท่ากับ 0.4

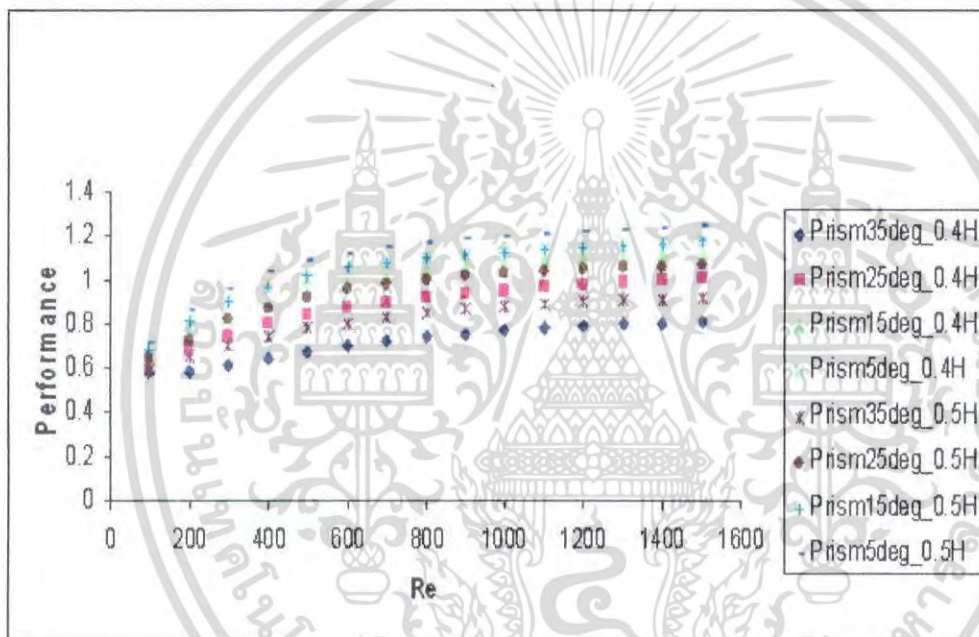


รูปที่ 5.26 แสดงสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์และค่าตัวประกอบความเสียดทาน ของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึมต่อช่องขนานผิวเรียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.6 ผลความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ และค่าสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึม

จากรูปที่ 5.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ และค่าสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึมพบว่าค่าสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อน (η) ของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่า Re เพิ่มขึ้นและ สำหรับมุมของปริซึมที่ 5 องศาจะให้ค่า η มากที่สุดและลดลงตามมุมที่เพิ่มขึ้น สำหรับสัดส่วนความสูงของแผ่นกั้นต่อความสูงของช่องขนาน (h/H) จะมีผลต่อค่า η อย่างมากคือที่สัดส่วน h/H เท่ากับ 0.5 จะให้ค่า η สูงกว่าที่สัดส่วน h/H เท่ากับ 0.4

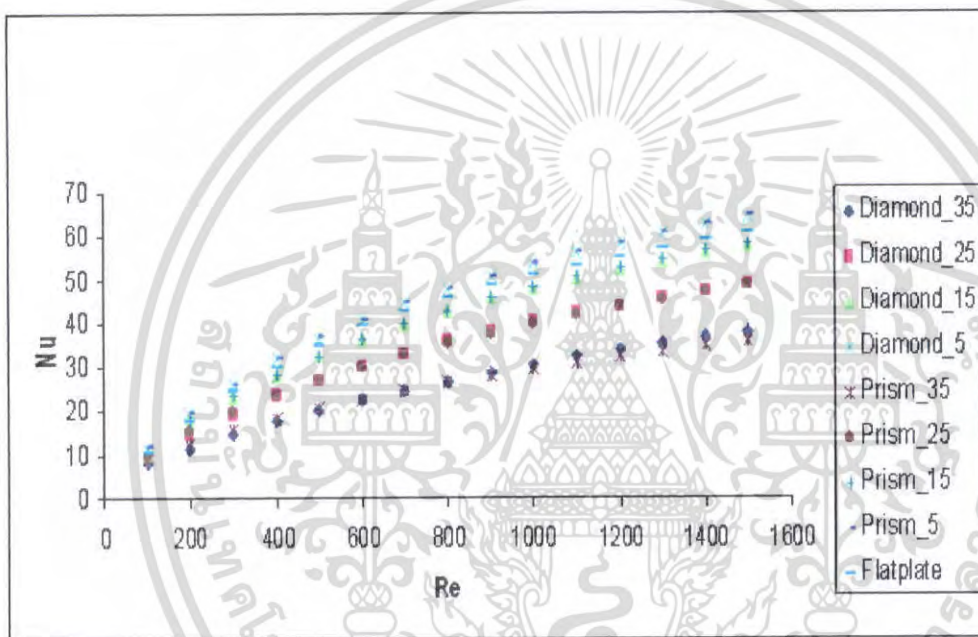


รูปที่ 5.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ และค่าสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึม

5.4 การเปรียบเทียบผลการจำลองของช่องขนานที่มีครีประเกศต่างๆที่สัดส่วนความสูงแผ่นกั้นต่อความสูงของช่องขนาน (h/H) เท่ากัน

5.4.1 คำนวณสเกลที่นับเบอร์ที่สัดส่วน h/H เท่ากับ 0.4

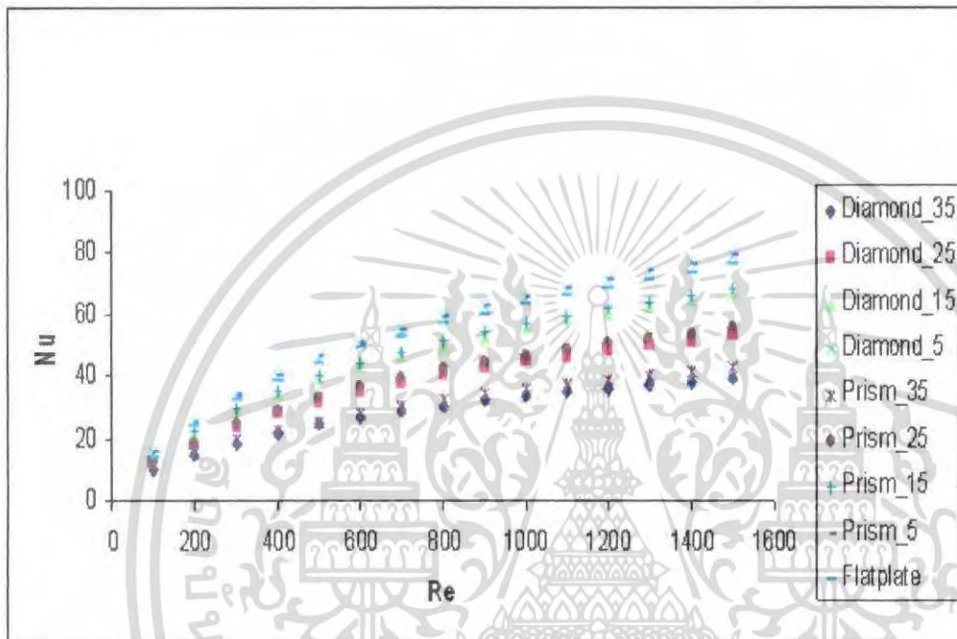
จากรูปที่ 5.28 แสดงการเปรียบเทียบค่านับสเกลที่นับเบอร์ของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นประเภทต่างๆที่สัดส่วนความสูงครีต่อความสูงของช่องขนาน (h/H) เท่ากับ 0.4 พบว่าค่า Nu ของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึม 5 องศาจะให้ค่าสูงที่สุดและรองลงมาคือช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบโดมอนด์ที่มีมุม 5 องศาต่อมาคือช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบ



รูปที่ 5.28 แสดงการเปรียบเทียบค่านับสเกลที่นับเบอร์ของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นประเภทต่างๆที่สัดส่วนความสูงแผ่นกั้นต่อความสูงของช่องขนาน (h/H) เท่ากับ 0.4

5.4.2 คำนวณเลขที่นัมเบอร์ที่สัดส่วน h/H เท่ากับ 0.5

จากรูปที่ 5.29 แสดงการเปรียบเทียบค่าเลขที่นัมเบอร์ของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นประเภทต่างๆ ที่สัดส่วนความสูงแผ่นกั้นต่อความสูงของช่องขนาน (h/H) เท่ากับ 0.5 พบว่าค่า Nu ของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบโคมอนด์ 5 องศาจะให้ค่าสูงที่สุดและรองลงมาคือช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึมที่มีมุม 5 องศาต่อมาคือช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบ

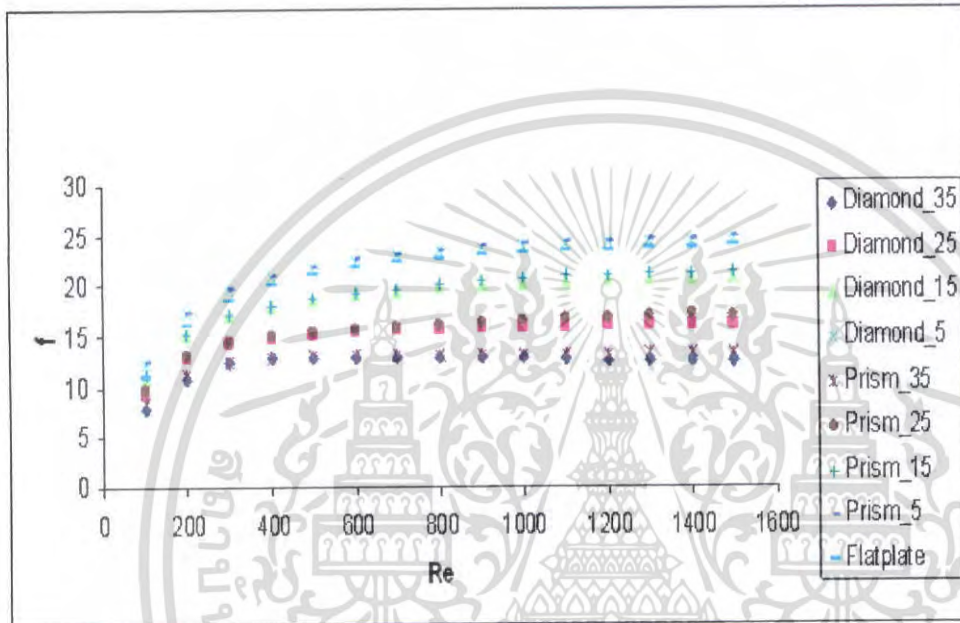


รูปที่ 5.29 แสดงการเปรียบเทียบค่าเลขที่นัมเบอร์ของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นประเภทต่างๆ ที่สัดส่วน ความสูงแผ่นกั้นต่อความสูงของช่องขนาน (h/H) เท่ากับ 0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.3 ค่าตัวประกอบความเสียดทานที่สัดส่วน h/H เท่ากับ 0.4

จากรูปที่ 5.30 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวประกอบความเสียดทานของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นประเภทต่างๆ ที่สัดส่วนความสูงแผ่นกั้นต่อความสูงของช่องขนาน (h/H) เท่ากับ 0.4 พบว่าค่า f ของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึม 5 องศาจะให้ค่าสูงที่สุดและรองลงมาคือช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบโดมอนด์ที่มีมุม 5 องศาต่อมาคือช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบ

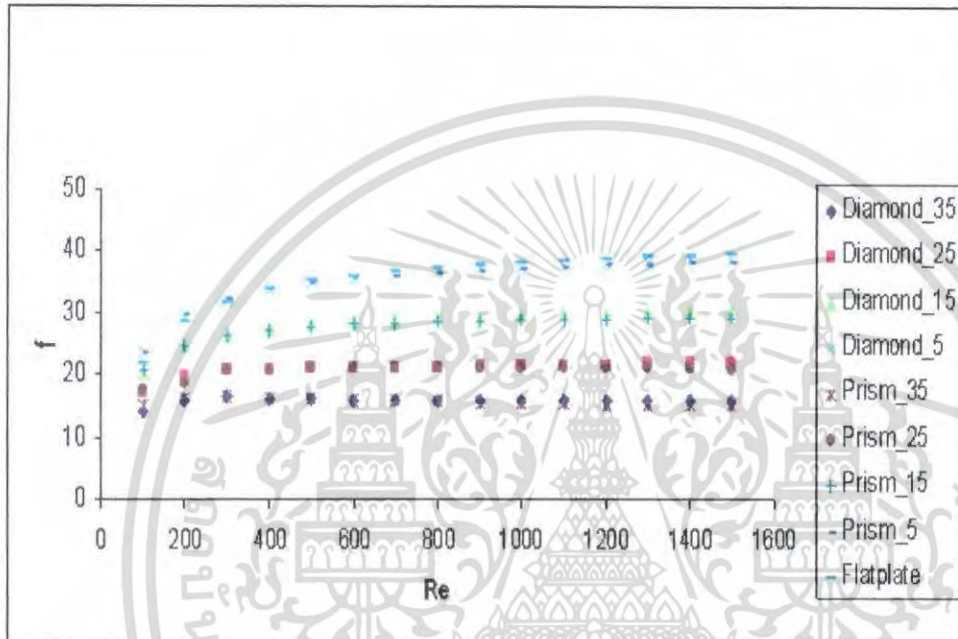


รูปที่ 5.30 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวประกอบความเสียดทานของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นประเภทต่างๆ ที่สัดส่วนความสูงแผ่นกั้นต่อความสูงของช่องขนาน (h/H) เท่ากับ 0.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.4 ค่าตัวประกอบความเสียดทานที่สัดส่วน h/H เท่ากับ 0.5

จากรูปที่ 5.31 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวประกอบความเสียดทานของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นประเภทต่างๆที่สัดส่วนความสูงแผ่นกั้นต่อความสูงของช่องขนาน (h/H) เท่ากับ 0.5 พบว่าค่า f ของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบจะให้ค่าสูงที่สุดและรองลงมาคือช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบโคมอนด์ที่มีมุม 5 องศาต่อมาคือช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึมที่มีมุม 5 องศา

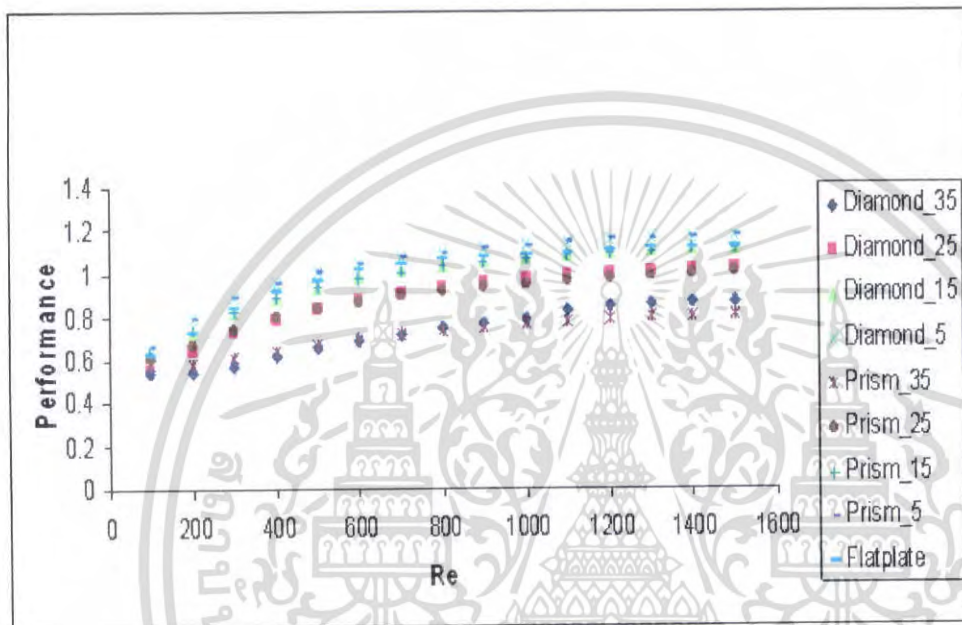


รูปที่ 5.31 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวประกอบความเสียดทานของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นประเภทต่างๆที่สัดส่วนความสูงแผ่นกั้นต่อความสูงของช่องขนาน (h/H) เท่ากับ 0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.5 ค่าสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนที่สัดส่วน h/H เท่ากับ 0.4

จากรูปที่ 5.32 แสดงการเปรียบเทียบค่าสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นประเภทต่างๆ ที่สัดส่วนความสูงแผ่นกั้นต่อความสูงของช่องขนาน (h/H) เท่ากับ 0.4 พบว่าค่า η ของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบ ไดมอนด์ 5 องศาจะให้ค่าสูงที่สุดและรองลงมาคือช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึมที่มีมุม 5 องศาต่อมาคือช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบ

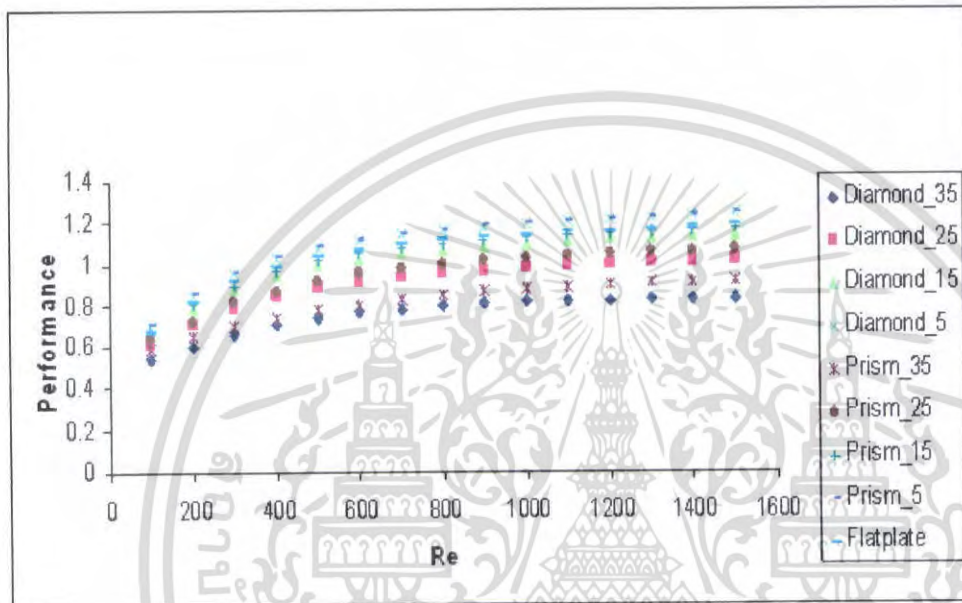


รูปที่ 5.32 แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นประเภทต่างๆ ที่สัดส่วนความสูงแผ่นกั้นต่อความสูงของช่องขนาน (h/H) เท่ากับ 0.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.6 ค่าสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนที่สัดส่วน h/H เท่ากับ 0.5

จากรูปที่ 5.33 แสดงการเปรียบเทียบค่าสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นประเภทต่างๆ ที่สัดส่วนความสูงแผ่นกั้นต่อความสูงของช่องขนาน (h/H) เท่ากับ 0.5 พบว่าค่า η ของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึม 5 องศาจะให้ค่าสูงที่สุดและรองลงมาคือช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบโดมอนด์ที่มีมุม 5 องศาต่อมาคือช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบ



รูปที่ 5.33 แสดงการเปรียบเทียบค่าสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นประเภทต่างๆ ที่สัดส่วนความสูงแผ่นกั้นต่อความสูงของช่องขนาน (h/H) เท่ากับ 0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรูปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรูปผลการจำลอง

ในงานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการศึกษาค่านัสเซิลท์นัมเบอร์ ตัวประกอบความเสียดทาน และสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นในรูปแบบที่แตกต่างกัน โดยการจำลองจะเป็นการศึกษาถึงอิทธิพลของรูปแบบแผ่นกั้นในช่องขนาน การจัดแผ่นกั้นแบบเยื้องกัน และสัดส่วนของแผ่นกั้นคือความสูงของช่องขนาน (h/H) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.4 และ 0.5 โดยการศึกษาตั้งแต่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 100 ถึง 1500 โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบกับช่องขนานผิวเรียบ ซึ่งจากการจำลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. เมื่ออากาศที่ไหลผ่านช่องขนานมีการหมุนวนมากขึ้น ไม่ว่าจะเพิ่มอัตราความเร็วหรือการติดตั้งแผ่นกั้นไว้ภายในช่องขนาน เหล่านี้จะทำให้ช่องขนานดังกล่าวมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนมากยิ่งขึ้น ซึ่งการไหล แบบหมุนวนจะสามารถสังเกตได้จากค่าตัวประกอบความเสียดทานที่มีค่าเพิ่มขึ้น
2. ในการไหลแบบราบเรียบ(Laminar Flow) เมื่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นพบว่าค่านัสเซิลท์นัมเบอร์ ของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นทุกประเภทจะเพิ่มขึ้น และมีผลให้สมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้นด้วย
3. ที่สัดส่วน h/H เท่ากับ 0.5 จะให้ค่า Nu และ f สูงกว่าสัดส่วน h/H เท่ากับ 0.4 หากเปรียบเทียบที่สัดส่วน h/H เท่ากับ 0.4 เท่ากันช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึม 5 องศาสูงที่สุด จะให้ค่า Nu และ f สูงสุด และหากเปรียบเทียบที่สัดส่วน h/H เท่ากับ 0.5 เท่ากันช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบโคมอนด์ 5 องศา จะให้ค่า Nu สูงที่สุด ส่วนช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบจะให้ค่า f สูงสุด
4. ค่าสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนที่คิดที่กำลังขับเคลื่อนเท่ากันของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นทุกประเภทพบว่าเมื่อเรย์โนลด์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นค่าสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้นด้วย โดยค่า η สูงสุดจะเกิดขึ้นกับช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึม 5 องศาและมีสัดส่วน h/H เท่ากับ 0.5 ซึ่งที่ Re เท่ากับ 1500 ให้ค่า η สูงสุดเท่ากับ 1.243

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 ข้อเสนอแนะ

ผลการวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการใช้ระเบียบวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล และการถ่ายเทความร้อนสามารถใช้เป็นเครื่องมือเพื่อการวิเคราะห์ผลและย้ำความมั่นใจ ก่อนเข้าสู่กระบวนการออกแบบจริงได้ ซึ่งมีความสะดวกและมีค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่าการสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการทดลองสำหรับผลการศึกษาในงานวิจัยนี้ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการพัฒนาและออกแบบแผ่นกั้นในการจัดวางแบบเชิงกันภายในช่องขนานให้มีความเหมาะสมได้ ทั้งยังสามารถนำไปเป็นแนวทางการวิจัยในระดับสูงต่อไป เช่น ควบศึกษากการถ่ายเทความร้อนภายในช่องขนานที่มีแผ่นกั้นโดยใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนในการคำนวณสามมิติ การศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระยะห่างของแผ่นกั้นต่อความสูงของช่องขนาน การจัดเรียงตัวแผ่นกั้น ทำการจัดรูปแบบการไหลของอากาศภายในช่องขนานให้เป็นลักษณะหมุนควงในลักษณะต่างๆ เป็นต้น



เอกสารอ้างอิง

- [1] พงษ์เจต พรหมวงศ์. การถ่ายเทความร้อน. ภาควิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2542
- [2] จารุวัตร เจริญสุข. พอลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ. ภาควิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2549
- [3] ชาตณรงค์ วันทา. “การวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับการถ่ายเทความร้อนในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. 2548
- [4] SS. Mousavi, K. Hooman. “Heat and fluid flow in entrance region of channel with staggered baffles.” *Energy Conversion and Management* 47 (2006) 2011-2019. February, 2006. pp. 2011-2019
- [5] Ralph. Webb, Nae-Hyun Kim. **Principles of Enhanced Heat Transfer**. UK: Routledge. December 2004

ภาคผนวก
บทความที่ทำการวิจัย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การศึกษาโดยใช้ซีเอฟดีเกี่ยวกับพฤติกรรมความร้อนของการไหลแบบราบเรียบ ผ่านช่องขนานที่มีแผ่นกั้น¹

ณัฐวิทย์ ทีคะพงศ์², นิวัฒน์ สุกสาม², อติศักดิ์ ไม้แก้ว², พงษ์เจต พรหมวงศ์³

บทคัดย่อ

การเพิ่มสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนในช่องขนานที่มีอุณหภูมิผนังคงที่และมีการไหลแบบลามินาร์ สามารถทำได้โดยติดตั้งแผ่นกั้นที่ผนังของช่องขนานแบบวางเยื้องกัน ซึ่งแผ่นกั้นที่ติดตั้งนั้นมีลักษณะแบบ แผ่นเรียบ, ปริซึม และโดมอนด์ โดยทำการศึกษาจากการสร้างแบบจำลองสองมิติจากการประยุกต์ใช้ ซีเอฟดี (พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ) โปรแกรม FLUENT ซึ่งแบบจำลองมีอัตราส่วนความสูงของแผ่นกั้นต่อความสูงของช่องขนานมีอัตราส่วนเท่ากับ 0.4 และ 0.5 โดยใช้กริดแบบสี่เหลี่ยม และเลือกใช้ solve แบบ SIMPLE ช่วงการไหลอยู่ระหว่างค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ 100 ถึง 1500 ผลที่ได้การติดตั้งแผ่นกั้นนี้จะไปขัดขวางการเกิดบาวนด์รีเลย์อร์ของการไหลและของความร้อน และทำให้เกิดการหมุนวนของการไหลบริเวณช่องว่างระหว่างแผ่นกั้น เมื่ออัตราส่วนความสูงของแผ่นกั้นต่อความสูงของช่องขนาน และ ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าไนส์เซิลท์นัมเบอร์และค่าตัวประกอบความเสียดทานเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาค่าสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นจะเพิ่มขึ้นด้วย

Abstract

To increase performance of heat transfer in the channel with isothermal walls and flowing like laminar. One of the techniques used is to place baffles on the channel walls with staggered arrangements. The baffles have styles e.g. flat plate, prism and diamond. We can study furthermore by build-up two dimensional model of using CFD (computational fluid dynamics) program FLUENT. Heights of the baffles to the height of the channel (blockage ratio) should be have ratio equal 0.4 and 0.5 which is using rectangular grid and solved using SIMPLE. The Reynolds number ranging from 100 to 1500. It was observed that the baffles interrupt the hydrodynamic and thermal boundary layers and form a recirculation zone between two adjacent baffles. When increasing the blockage ratio and Reynolds number will increase the Nusselt number and friction factor. When considering of thermal performance will increase.

© 2008 Department of Mechanical Engineering, KMITL. All rights reserved

Keywords: Heat transfer; Computational fluid dynamics

1. บทนำ

ปัจจุบันเป็นที่ทราบกันดีว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญกับกระบวนการผลิตในภาคอุตสาหกรรมมาก เช่น หม้อไอน้ำ เครื่องทำความเย็น และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่างๆ ในกระบวนการผลิต เป็นต้น และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่างๆเหล่านี้เป็นอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานค่อนข้างมากอีกด้วย ดังนั้นการหาแนวทางในการปรับปรุงเพื่อเพิ่มสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จะเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกระบวนการผลิตและยังเป็นการลดการใช้พลังงานในการกระบวนการผลิตได้อีกด้วย

¹ ชื่ออังกฤษ "CFD study on thermal behavior of laminar baffled channel flows"

² นักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สจล. ห้อง 3Q/1 รหัส 48015725 ห้อง 3Q/2 รหัส 48015420 และ 48015742 ตามลำดับ

³ รองศาสตราจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สจล., โทร 0 2326 4197. อีเมล kppongje@kmitl.ac.th

อักษรย่อ

เส้นผ่าศูนย์กลางไฮดรอลิก	Re	เรย์โนลด์นัมเบอร์
ตัวประกอบความเสียดทาน	T	อุณหภูมิ
ตัวประกอบความเสียดทานของช่องขนานผิวเรียบ	u	ความเร็วในแนวแกน x
สัมประสิทธิ์การพาความร้อน	u_m	ความเร็วเฉลี่ย
พลังงานภายใน	v	ความเร็วในแนวแกน y
ค่าการนำความร้อน	η	สมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อน
u นัสเซลท์นัมเบอร์	μ	ความหนืดสัมบูรณ์
u_o นัสเซลท์นัมเบอร์ของช่องขนานผิวเรียบ	ρ	ความหนาแน่น
ความดัน		

แนวทางหนึ่งที่มีการใช้ในการปรับปรุงเพื่อเพิ่มสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนคือการเพิ่มการหมุนวนของการไหลผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งการติดตั้งแผ่นกั้นก็เป็นวิธีการหนึ่งในการเพิ่มการหมุนวนของการไหล โดยจากการศึกษาของ S.S. Mousavi, K. Jovanovic [3] ศึกษาการไหลและการถ่ายเทความร้อนภายในช่องขนานที่แผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบวางเอียงกันภายในช่องขนาน ซึ่งได้กำหนดให้ระยะห่างของครีบคงที่ และปรับเปลี่ยนอัตราส่วนความสูงของครีบและความสูงของแบบจำลองการไหล การศึกษาใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขโดยระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม ภายในแบบจำลองการไหลสองมิติ การไหลเป็นแบบราบเรียบและอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady flow) ตัวเลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 50-500 โดยใช้ความยาวจำเพาะของสมการเป็นความสูงความสูงของช่องขนาน ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มอัตราส่วนความสูงของแผ่นกั้นต่อความสูงของแบบจำลองการไหล เป็นการเพิ่มขนาดของกระแสหมุนวน ทำให้การถ่ายเทความร้อนของแบบจำลองดีขึ้น

ในการสร้างแบบจำลองการไหลภายในช่องขนานวิเคราะห์การไหลให้เป็นแบบลามินาร์ ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์นิยามได้ดังนี้

$$Re = \frac{\rho u_m D_h}{\mu} \quad (1)$$

กำหนดให้สภาวะการไหลเป็นแบบคงตัวสองมิติและการไหลเป็นแบบอัดตัวไม่ได้ของไหลทำงานเป็นอากาศที่มีคุณสมบัติคงที่ สำหรับสมการความต่อเนื่อง, สมการนาเวียร์-สโตก และสมการพลังงาน [2] ในรูปพิกัด (x, y) สามารถแสดงได้ดังนี้

- สมการต่อเนื่อง

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

- สมการโมเมนตัมในแนวแกน x

$$\rho \left[u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right] = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

- สมการโมเมนตัมในแนวแกน y

$$\rho \left[u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right] = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

- สมการพลังงาน

$$\rho \left[u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right] = k \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] \quad (5)$$

มีพารามิเตอร์ที่ให้ความสนใจในการเพิ่มสมรรถนะในการแลกเปลี่ยนความร้อนคือค่า นัสเซลท์นัมเบอร์ (Nusselt number) และค่าตัวประกอบความเสียดทาน (Friction factor) [1]

ค่า นัสเซลท์นัมเบอร์นิยามได้ดังนี้

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

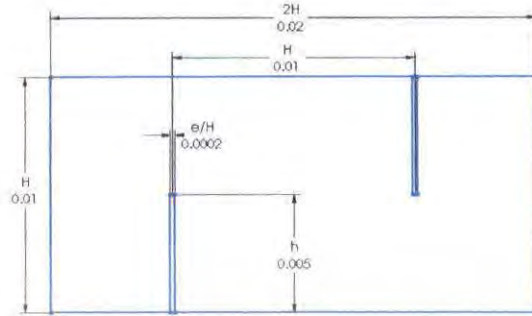
ค่าตัวประกอบความเสียดทานนิยามได้ดังนี้

$$f = \frac{-(dp/dx) D_h}{\rho u_m^2 / 2} \quad (7)$$

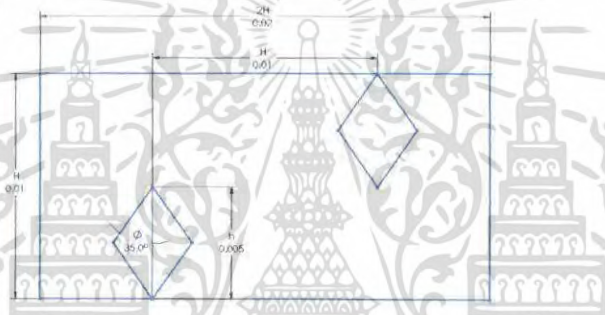
สมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อน (Performance) [4] หาได้จากสมการ

$$\eta = \frac{(Nu / Nu_o)}{(f / f_o)^{1/3}} \quad (8)$$

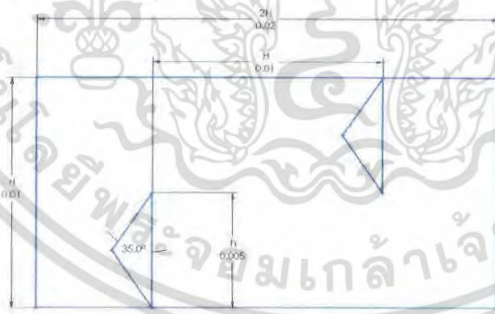
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 1 แบบจำลองของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบ



รูป 2 แบบจำลองของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบโดมอนด์



รูป 3 แบบจำลองของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึม

2. การกำหนดลักษณะของปัญหา

งานวิจัยนี้กำหนดให้ช่องขนานมีแผ่นกั้นลักษณะแบบแผ่นเรียบ, โดมอนด์ และปริซึม โดยโดมอนด์ และ ปริซึมจะมีมุม 35, 25, 15 และ 5 องศาและมีอัตราส่วนความสูงของแผ่นกั้นต่อความสูงของช่องขนาน (h/H) เท่ากับ 0.4 และ 0.5 โดยให้ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นคงที่เท่ากับ ความสูงของช่องขนาน สำหรับการจำลองแผ่นกั้นถูกจัดวางแบบเยื้องกัน โดยเป็นการจำลองการไหลแบบ Periodic Translational ในแบบสองมิติ ดังแสดงในรูป 1 ถึง 3

2.1 ค่าเงื่อนไขขอบเขตในการคำนวณการไหลสองมิติ

2.1.1 สภาวะทางเข้าและทางออกเป็นแบบ Periodic Translational อากาศไหลเข้าด้วยอัตราการไหล (Mass flow rate)

2.1.2 กำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ผนังให้ความเร็วมีค่าเท่ากับศูนย์ (No slip condition) เป็นผนังที่อยู่กับที่ (Stationary wall)

2.1.3 กำหนดให้ค่าฟลักซ์ความร้อนของแผ่นกั้นมีค่าเท่ากับศูนย์คือเงื่อนไขแบบอะเดียแบติก (Adiabatic boundary condition)

2.1.4 กำหนดให้อุณหภูมิที่ผิวของช่องขนานมีอุณหภูมิคงที่ (Constant surface temperature)

ไม่วารณิใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และหึ่งขี้งงของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.ความเป็นอิสระของกริด (Grid independence)

กริดที่ใช้เป็นแบบสี่เหลี่ยม แบ่งกริดแบบสม่ำเสมอ (Uniform grid) การหาผลกระทบของกริดที่มีผลต่อคำตอบ ได้ทำการศึกษาโดยใช้ขนาดของกริดที่แตกต่างกันที่ขนาด 100×200 และ 110×220 พบว่าเมื่อขนาดเพิ่มขึ้นเป็น 110×220 ค่าสัมประสิทธิ์นิมเบอร์เปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 0.011% ดังนั้นจึงเลือกขนาดของกริดเท่ากับ 100×200 ซึ่งขนาดกริดนี้จะถูกนำไปใช้ในการศึกษาอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ต่อไป

4.การตรวจสอบโปรแกรมที่ใช้กับผลเฉลยแม่นยำ (Exact solution)

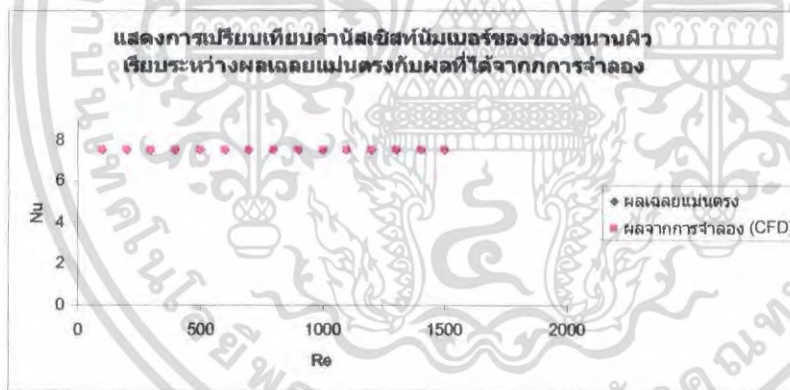
เนื่องจากผลเฉลยที่ได้เนื่องจากการคำนวณเชิงตัวเลขเป็นค่าที่ได้จากการประมาณ การคำนวณย่อมมีความผิดพลาดเกิดขึ้นได้ ดังนั้นในการนำโปรแกรมมาใช้งาน ต้องมีการตรวจสอบโปรแกรมว่าให้ผลเฉลยถูกต้องหรือไม่ การตรวจสอบโปรแกรมนี้จะนำผลที่ได้จากโปรแกรมมาเปรียบเทียบกับผลเฉลยแม่นยำ

โดยผลเฉลยแม่นยำตรงจะได้ค่าสัมประสิทธิ์นิมเบอร์และค่าตัวประกอบความเสียดทานของช่องขนานที่มีอุณหภูมิผิวคงที่และการไหลแบบลามินาร์ปรับตัวเต็มที่แล้ว [1] ดังนี้

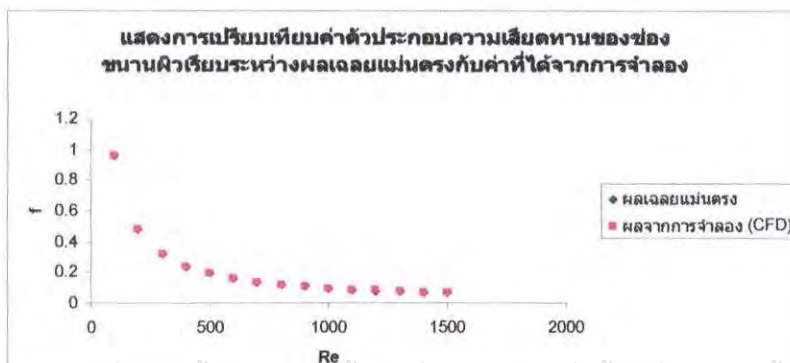
$$Nu_o = 7.54 \quad (9)$$

$$f_o = \frac{96}{Re} \quad (10)$$

เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากโปรแกรมจะมีความแตกต่างเฉลี่ย 0.24% ซึ่งแสดงดังรูป 4 และรูป 5 ผลที่ได้จากทั้งโปรแกรมและจากผลเฉลยแม่นยำตรงให้ผลที่สอดคล้องกัน ทำให้ยืนยันได้ว่าแบบจำลองการไหลสองมิติ รวมทั้งโปรแกรมที่ใช้พื้นฐานของระเบียบวิธีปริมาตรสลับเนื่องสามารถนำมาเป็นเครื่องมือในการคำนวณ เพื่อวิเคราะห์ปัญหาการไหลในการถ่ายเทความร้อนสำหรับงานวิจัยนี้ได้



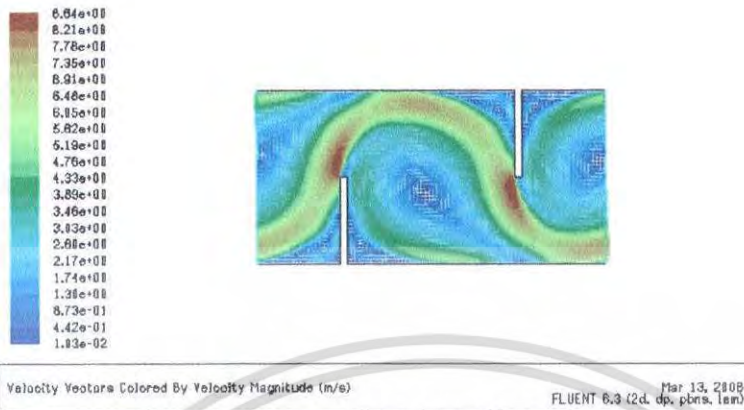
รูป 4 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์นิมเบอร์ของช่องขนานผิวเรียบระหว่างผลเฉลยแม่นยำตรงกับผลที่ได้จากการจำลอง



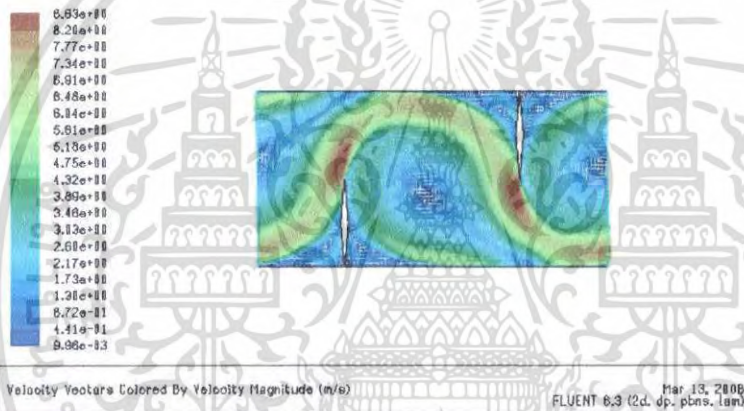
รูป 5 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวประกอบความเสียดทานของช่องขนานผิวเรียบระหว่างผลเฉลยแม่นยำตรงกับค่าที่ได้จากการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

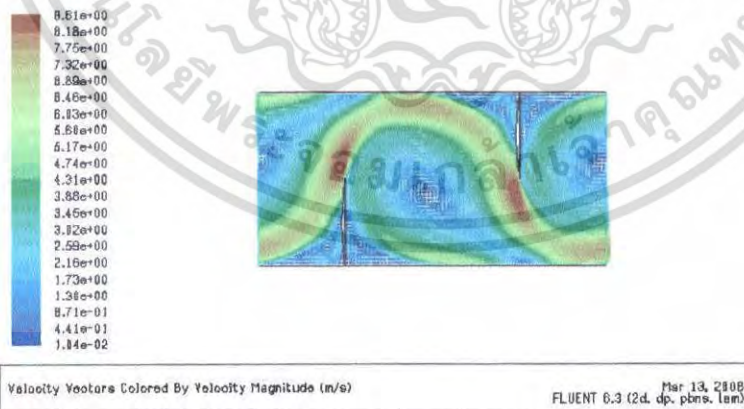
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ผู้ใช้ทั้งหมดยกเว้นผู้จัดทำเอกสารนี้ขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 6 แสดงเวกเตอร์ของความเร็วภายในช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบ ที่ $Re = 1500$



รูป 7 แสดงเวกเตอร์ของความเร็วภายในช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบโดมอันดับมุม 5 องศา ที่ $Re = 1500$



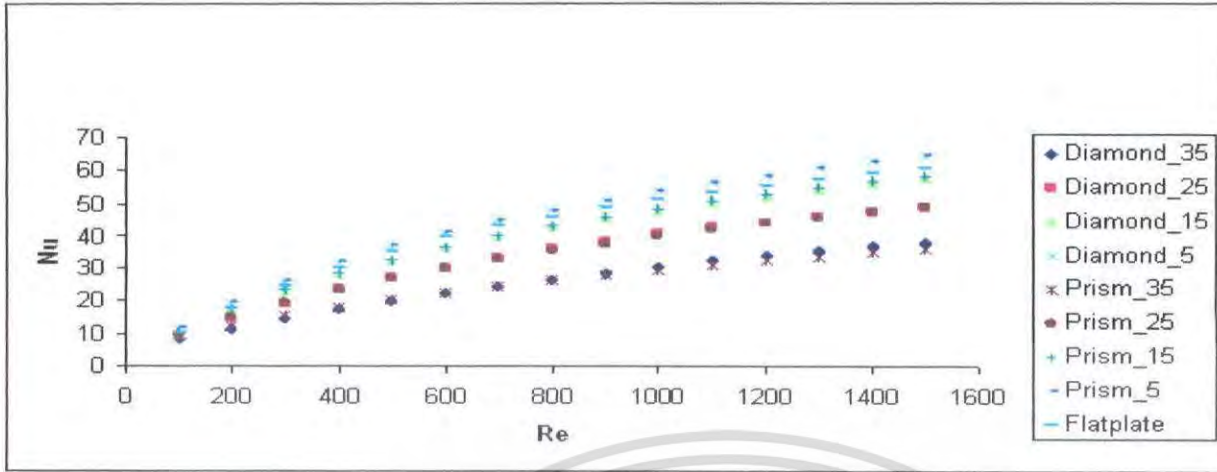
รูป 8 แสดงเวกเตอร์ของความเร็วภายในช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึมมุม 5 องศา ที่ $Re = 1500$

5.ผลลัพธ์จากการสร้างแบบจำลอง

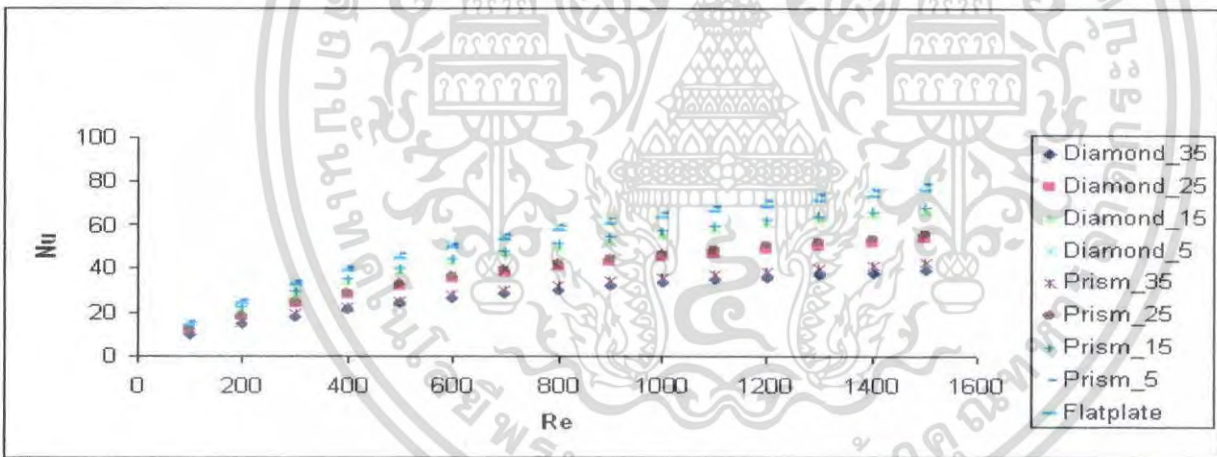
จากรูป 6 ถึง 8 แสดงเวกเตอร์ของความเร็วภายในช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแต่ละแบบที่สัดส่วนความสูงแผ่นกั้นต่อความสูงของช่องขนาน (h/H) เท่ากับ 0.5 ที่ $Re = 1500$ ซึ่งการไหลเกิดการหมุนวน ทำให้ของไหลที่ใกล้ผิวของขนานที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไหลไปยังบริเวณ

ตรงกลางของช่องขนาน และของไหลที่อยู่บริเวณตรงกลางที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจะไหลไป ที่ผิวของช่องขนานส่งผลทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีขึ้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

เมื่อก่อนนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น หากต้องการนำเอกสารนี้ไปใช้ ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



9 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวเลขที่นัมเบอร์ของช่องทางที่มีแผ่นกั้นประเภทต่างๆที่สัดส่วนความสูงแผ่นกั้นต่อความสูงของช่องทาง (h/H) เท่ากับ 0.4



10 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวเลขที่นัมเบอร์ของช่องทางที่มีแผ่นกั้นประเภทต่างๆที่สัดส่วนความสูงแผ่นกั้นต่อความสูงของช่องทาง (h/H) เท่ากับ 0.5

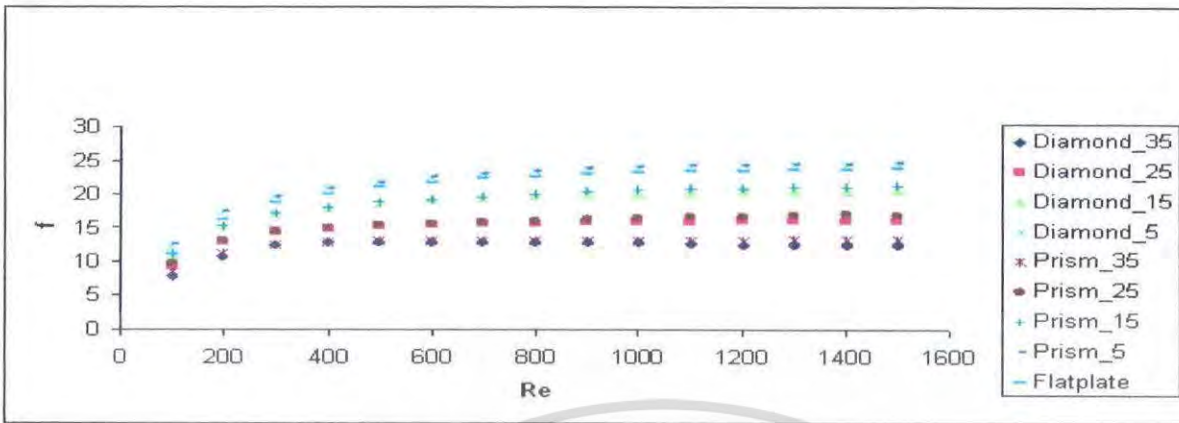
5.1 ค่าตัวเลขที่นัมเบอร์ที่สัดส่วน h/H เท่ากับ 0.4

จากรูป 9 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวเลขที่นัมเบอร์ของช่องทางที่มีแผ่นกั้นประเภทต่างๆที่สัดส่วนความสูงแผ่นกั้นต่อความสูงของช่องทาง (h/H) เท่ากับ 0.4 พบว่าค่า Nu ของช่องทางที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึมรองคาจะให้ค่าสูงที่สุดและรองลงมาคือช่องทางที่มีแผ่นกั้นแบบโดมอนด์รองคาต่อมาคือช่องทางที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบ และค่า Nu ของแผ่นกั้นรูปแบบอื่นๆ

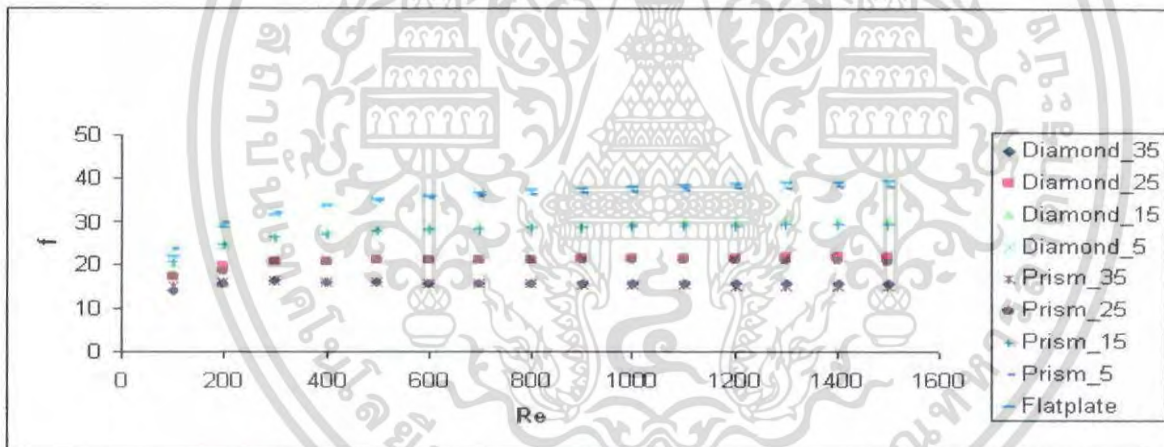
5.2 ค่าตัวเลขที่นัมเบอร์ที่สัดส่วน h/H เท่ากับ 0.5

จากรูป 10 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวเลขที่นัมเบอร์ของช่องทางที่มีแผ่นกั้นประเภทต่างๆที่สัดส่วนความสูงแผ่นกั้นต่อความสูงของช่องทาง (h/H) เท่ากับ 0.5 พบว่าค่า Nu ของช่องทางที่มีแผ่นกั้นแบบโดมอนด์รองคาจะให้ค่าสูงที่สุดและรองลงมาคือช่องทางที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึมรองคาต่อมาคือช่องทางที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบ และค่า Nu ของแผ่นกั้นรูปแบบอื่นๆ

งานเพื่อการศึกษา เมื่อผู้จัดทำเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 11 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวประกอบความเสียดทานของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นประเภทต่างๆที่สัดส่วนความสูงแผ่นกั้นต่อความสูงของช่องขนาน (h/H) เท่ากับ 0.4



รูป 12 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวประกอบความเสียดทานของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นประเภทต่างๆที่สัดส่วนความสูงแผ่นกั้นต่อความสูงของช่องขนาน (h/H) เท่ากับ 0.5

5.3 ค่าตัวประกอบความเสียดทานที่สัดส่วน h/H เท่ากับ 0.4

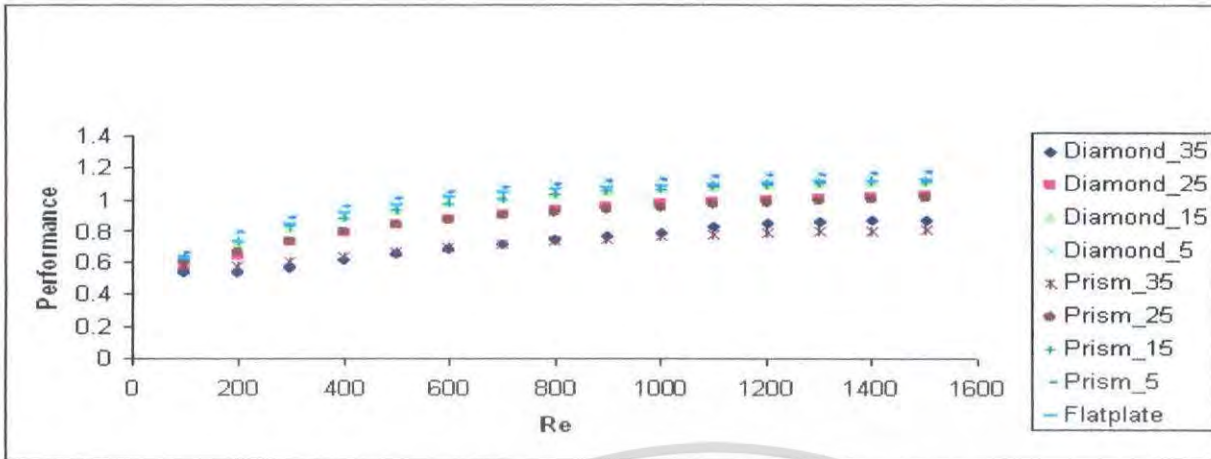
จากรูป 11 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวประกอบความเสียดทานของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นประเภทต่างๆที่สัดส่วนความสูงแผ่นกั้นต่อความสูงของช่องขนาน (h/H) เท่ากับ 0.4 พบว่าค่า f ของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึมรอกศาจะให้ค่าสูงที่สุดและรองลงมาคือช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบโดมอนด์รอกศาต่อมาคือช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบ และค่า f ของแผ่นกั้นรูปแบบอื่นๆที่สวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการ

5.4 ค่าตัวประกอบความเสียดทานที่สัดส่วน h/H เท่ากับ 0.5

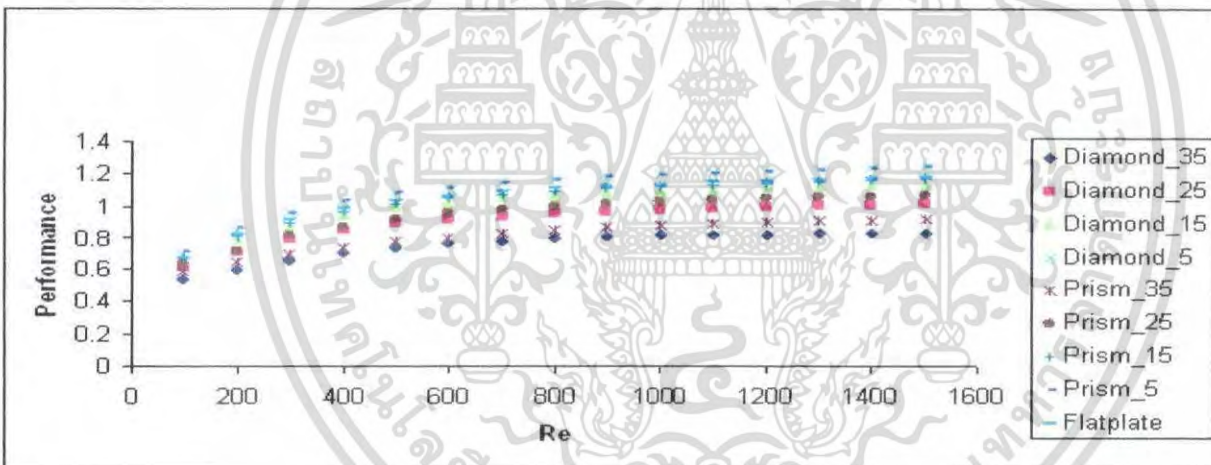
จากรูป 12 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวประกอบความเสียดทานของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นประเภทต่างๆที่สัดส่วนความสูงแผ่นกั้นต่อความสูงของช่องขนาน (h/H) เท่ากับ 0.5 พบว่าค่า f ของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบจะให้ค่าสูงที่สุดและรองลงมาคือช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบโดมอนด์ที่มีมุมรอกศาต่อมาคือช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึมที่มี

มุมรอกศา และค่า f ของแผ่นกั้นรูปแบบอื่นๆจะโยชน์ด้านการค้า

ไม่วารณิใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 13 แสดงการเปรียบเทียบค่าสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นประเภทต่างๆที่สัดส่วนความสูงแผ่นกั้นต่อความสูงของช่องขนาน (h/H) เท่ากับ 0.4



รูป 14 แสดงการเปรียบเทียบค่าสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นประเภทต่างๆที่สัดส่วนความสูงแผ่นกั้นต่อความสูงของช่องขนาน (h/H) เท่ากับ 0.5

5.5 ค่าสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนที่สัดส่วน h/H เท่ากับ 0.4

จากรูป 13 แสดงการเปรียบเทียบค่าสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นประเภทต่างๆที่สัดส่วนความสูงแผ่นกั้นต่อความสูงของช่องขนาน (h/H) เท่ากับ 0.4 พบว่าค่า η ของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบโดมอนด์รองคางจะให้ค่าสูงที่สุดและรองลงมาคือช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึมรองคางต่อมาคือช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบ และค่า η ของแผ่นกั้นรูปแบบอื่นๆ

5.6 ค่าสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนที่สัดส่วน h/H เท่ากับ 0.5

จากรูป 14 แสดงการเปรียบเทียบค่าสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นประเภทต่างๆที่สัดส่วนความสูงแผ่นกั้นต่อความสูงของช่องขนาน (h/H) เท่ากับ 0.5 พบว่าค่า η ของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึมรองคางจะให้ค่าสูงที่สุดและรองลงมาคือช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบโดมอนด์รองคางต่อมาคือช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบ และค่า η ของแผ่นกั้นรูปแบบอื่นๆ

ไม่วารณิใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.สรุปผล

ในงานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการศึกษาค่านัสเซลที่นัมเบอร์ ตัวประกอบความเสียดทาน และสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนของ ช่องขนานที่มีแผ่นกั้นในรูปแบบที่แตกต่างกัน โดยการจำลองจะเป็น การศึกษาถึงอิทธิพลของรูปแบบแผ่นกั้นในช่องขนาน การจัดวางแผ่น กั้นแบบเอียงกัน และสัดส่วนของแผ่นกั้นต่อความสูงของช่อง ขนาน (h/H) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.4 และ 0.5 โดยการศึกษาตั้งแต่ค่าเรย์ โนลด์นัมเบอร์ 100 ถึง 1500 โดยทำการศึกษาร่วมกับช่องขนานผิว เรียบ ซึ่งจากการจำลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. เมื่ออากาศที่ไหลผ่านช่องขนานมีการหมุนวนมากขึ้น ไม่ว่าจะ เป็น อัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น หรือการติดตั้งแผ่นกั้นไว้ภายในช่องขนาน เหล่านี้จะทำให้ช่องขนานดังกล่าวมีความสามารถในการแลกเปลี่ยน ความร้อนมากยิ่งขึ้น ซึ่งการไหลแบบหมุนวนจะสามารถสังเกตได้จาก ค่าตัวประกอบความเสียดทานที่มีค่าเพิ่มขึ้น

2. เมื่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นพบว่าค่านัสเซลที่นัมเบอร์ ของ ช่องขนานที่มีแผ่นกั้นทุกประเภทจะเพิ่มขึ้น และมีผลให้สมรรถนะการ แลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้นด้วย

3. ที่สัดส่วน h/H เท่ากับ 0.5 จะให้ค่า Nu และ f สูงกว่า สัดส่วน h/H เท่ากับ 0.4 หากเปรียบเทียบที่สัดส่วน h/H เท่ากับ 0.4 เท่ากัน ช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึมรองศาจะให้ค่า Nu และ f สูง

ที่สุด และหากเปรียบเทียบที่สัดส่วน h/H เท่ากับ 0.5 เท่ากัน ช่องขนาน ที่มีแผ่นกั้นแบบโดมอนด์ รองศา จะให้ค่า Nu สูงที่สุด ส่วนช่องขนาน ที่มีแผ่นกั้นแบบแผ่นเรียบจะให้ค่า f สูงสุด

4. ค่าสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนที่คิดที่กำลังขับเคลื่อน เท่ากันของช่องขนานที่มีแผ่นกั้นทุกประเภทพบว่าเมื่อเรย์โนลด์นัมเบอร์ เพิ่มขึ้นค่าสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้นด้วย โดยค่า η สูงสุดจะเกิดขึ้นกับช่องขนานที่มีแผ่นกั้นแบบปริซึมรองศาและมี สัดส่วน h/H เท่ากับ 0.5 ที่ Re เท่ากับ 1500 ให้ค่า η สูงสุดเท่ากับ 1.243

เอกสารอ้างอิง

- [1] รศ.ดร. พงษ์เจต พรหมวงศ์, การถ่ายเทความร้อน, ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
- [2] รศ.ดร. จารุวัตร เจริญสุข, พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ, ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
- [3] S.S. Mousavi, K. Hooman, Heat and fluid flow in entrance region of a channel with staggered baffles, Energy Conversion & Management, 2006
- [4] Ralph. Webb, Nae-Hyun Kim, Principles of Enhanced Heat Transfer, Routledge, UK, December 2004

ประวัติผู้เขียน

นาย นิวัฒน์ สุกสาม เกิดวันที่ 24 ตุลาคม 2523 จังหวัดนราธิวาส โดยมีประวัติการศึกษาดังนี้
 พ.ศ. 2539-2542 ปวช. สาขาช่างยนต์ วิทยาลัยเทคนิคนราธิวาส
 พ.ศ. 2542-2544 ปวส. สาขาช่างยนต์ วิทยาลัยเทคนิคนราธิวาส
 พ.ศ. 2548-2551 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

นาย ณัฐวิษณุ ทิคะพงศ์ เกิดวันที่ 10 ตุลาคม 2528 จังหวัดระยอง โดยมีประวัติการศึกษาดังนี้
 พ.ศ. 2543-2546 ปวช. สาขาช่างยนต์ วิทยาลัยเทคนิคระยอง
 พ.ศ. 2546-2548 ปวส. สาขาช่างยนต์ วิทยาลัยเทคนิคสัตหีบ
 พ.ศ. 2548-2551 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

นาย อติศักดิ์ ไม้แก้ว เกิดวันที่ 8 สิงหาคม 2527 จังหวัดระยอง โดยมีประวัติการศึกษาดังนี้
 พ.ศ. 2543-2546 ปวช. สาขาช่างยนต์ วิทยาลัยเทคนิคสัตหีบ
 พ.ศ. 2546-2548 ปวส. สาขาช่างยนต์ วิทยาลัยเทคนิคสัตหีบ
 พ.ศ. 2548-2551 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้