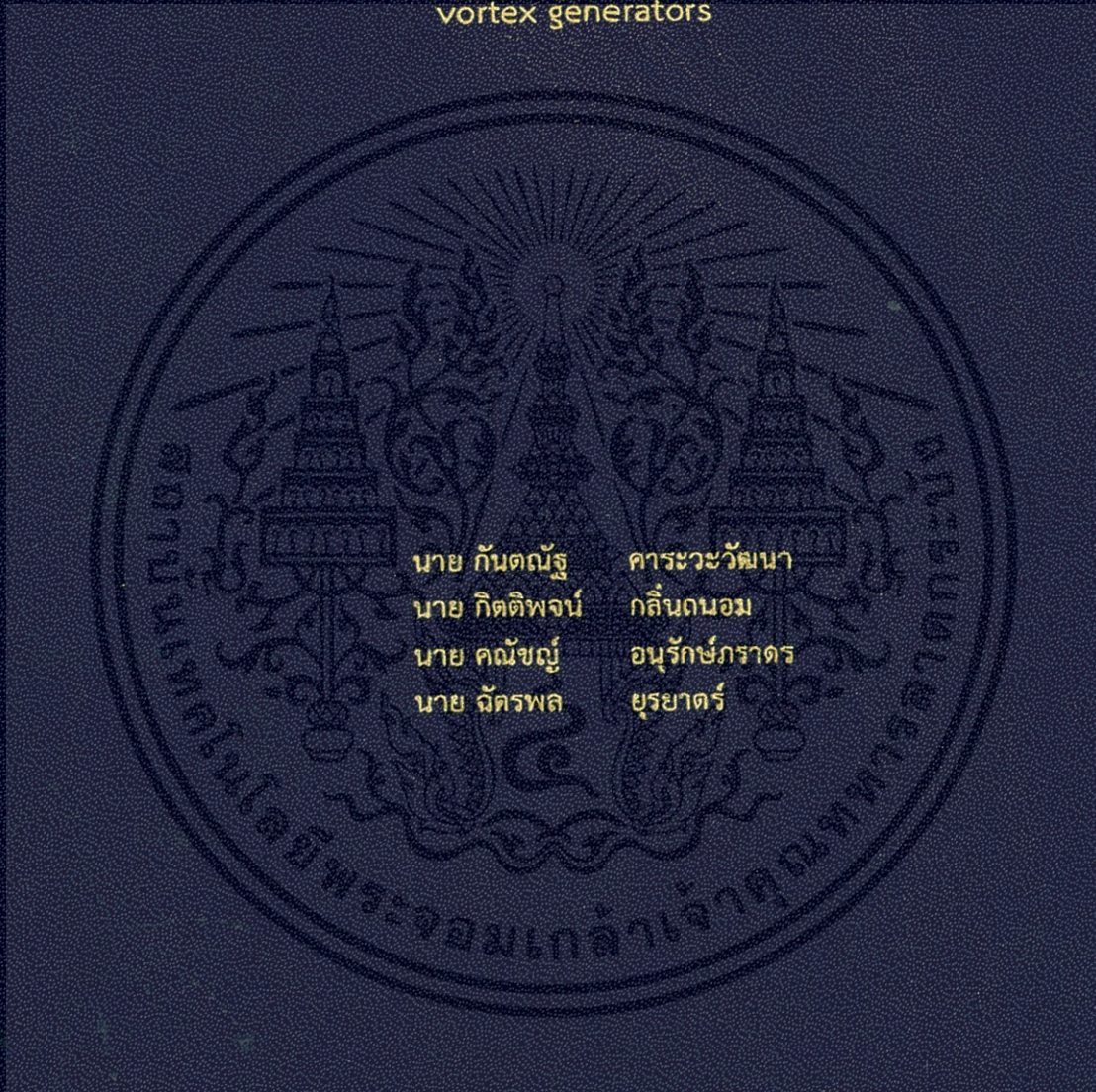


การศึกษา แบบจำลองสามมิติของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฟิน-ทิวบ์
และวอเทกซ์เจนเนอเรเตอร์ ที่มีการจัดวางรูปตัววี

3D simulation study in fin-tube heat exchanger with V-shape
vortex generators



นาย กันตณัฐ	คาระวะวัฒนา
นาย กิตติพจน์	กลั่นถนอม
นาย คณัชญ์	อนุรักษภราดร
นาย ฉัตรพล	บุรยาตร์

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

การศึกษา แบบจำลองสามมิติของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฟิน-ทิวบ์
และวอเทกซ์เจเนอเรเตอร์ ที่มีการจัดวางรูปตัววี

3D simulation study in fin-tube heat exchanger with V-shape
vortex generators



นาย กันตณัฐ คาระวะวัฒนา
นาย กิตติพจน์ กลิ่นถนอม
นาย คณัชญ์ อนุรักษ์ภราดร
นาย ฉัตรพล ยุรยาตร์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3D simulation study in fin-tube heat exchanger with V-shape
vortex generators



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

2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2556

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องการศึกษา แบบจำลองสามมิติของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฟิน-ทิวบ์ และวอเทกซ์
เจนเนอเรเตอร์ ที่มีการจัดวางรูปตัววี
3D simulation study in fin-tube heat exchanger with V-shape vortex generators

ผู้จัดทำ

1. นาย กันตณัฐ คาระวะวัฒนา รหัสประจำตัว 53010086
2. นาย กิตติพจน์ กลิ่นถนอม รหัสประจำตัว 53010117
3. นาย คณัชญ์ อนุรักษภราดร รหัสประจำตัว 53010159
3. นาย ฉัตรพล ยุรยาตร์ รหัสประจำตัว 53010272

วิภาดา เจษฎารัตน์ชัย อาจารย์ที่ปรึกษา
(ดร.วิภาดา เจษฎารัตน์ชัย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องการศึกษา แบบจำลองสามมิติของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฟิน-ทิวบ์ และวอเทกซ์ เจนเนอเรเตอร์ ที่มีการจัดวางรูปตัววี

นาย กันตณัฐ คาระวะวัฒนา	53010086
นาย กิตติพจน์ กลิ่นถนอม	53010117
นาย คณัษฐ์ อนุรักษภราคร	53010159
นาย ฉัตรพล ยุธยาตร์	53010272
ดร. วิชิตา เจษฎารัตนชัย	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2556	

บทคัดย่อ

ในบทความนี้ศึกษาและทำการวิเคราะห์เชิงตัวเลขแบบสามมิติของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ fin-and-oval-tube ที่ประกอบไปด้วยแผ่นกันแบบรูปตัววีที่วางตามยาว ท่อมีการเรียงตัวแบบสลับ โดยใช้โปรแกรม GAMBIT 2.4.6 และ FLUENT 6.3.26 โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขตามระเบียบวิธีพื้นผิวสี่เหลี่ยม โดยมีค่าเรโนลด์ (วิเคราะห์จากเส้นผ่าศูนย์กลาง ไฮดรอลิกส์) ตั้งแต่ 500 ถึง 2500 โดยมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องคือ ตำแหน่งของแผ่นกัน (upstream,downstream) ทิศทางการจัดวางแผ่นกัน (Upstream-Downstream) มุมปะทะการไหล ($15^{\circ}, 30^{\circ}, 45^{\circ}, 60^{\circ}$) อัตราส่วนของระยะห่างของแผ่นกัน และระยะห่างระหว่างครีป โดยระยะห่างระหว่างแผ่นกันคือ 3.77, 4.77 และ 5.77 มิลลิเมตร นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ พฤติกรรมการไหล และการถ่ายเทความร้อนโดยตรวจสอบประสิทธิภาพแบบจำลองเชิงตัวเลข โดยนำเนิ่นการเปรียบเทียบนั้นสเกลที่นับเบอร์เฉลี่ย และความดันตกคร่อมจากการวิเคราะห์ซึ่งแสดงอยู่ในลักษณะตัวแปรไร้มิติ กับผลการทดลองจริงที่ใกล้เคียง การเปรียบเทียบสามารถยอมรับได้อย่างมี รวมถึงคำนวณค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของแบบจำลองหลังจากได้ติดแผ่นกันแล้ว ผลของเหตุผล แบบจำลองมีการแบ่งกริดในการวิเคราะห์เชิงตัวเลขออกเป็น 300,000, 400,000 และ 500,000 ซึ่งผลของทั้งสามแบบส่งผลใกล้เคียงกัน จึงเลือกใช้จำนวนกริด 300,000 กริดในการวิเคราะห์เพื่อความสะดวกในการคำนวณเชิงตัวเลข อิทธิพลของตัวแปรต่างๆ จะส่งผลต่อผลการทดลองแตกต่างกัน โดยผลของเลขเรโนลด์ จะทำให้ทั้งการถ่ายเทความร้อนดีขึ้น รวมถึงความดันตกคร่อมมีค่ามากขึ้นด้วย มุมปะทะส่งผลเช่นเดียวกัน แต่สำหรับตำแหน่งของแผ่นกันจะส่งผลต่อแนวโน้มของผลการทดลองไม่เหมือนกันซึ่งจะแสดงแนวโน้มทั้งสองกรณีและวิเคราะห์ไปพร้อมๆกัน สำหรับระยะห่างระหว่างแผ่นกันไม่มีผลต่อผลการทดลอง อย่างไรก็ตามเมื่อนำผลการคำนวณทั้งหมด มาเปรียบเทียบกับ กรณีที่ยังไม่ได้ติดตั้งแผ่นกัน พบว่า สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนมีค่าลดลง เป็นเหตุมาจากความดันตกคร่อมที่เพิ่มขึ้นมีค่ามากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับกริดถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3D simulation study in fin-tube heat exchanger with V-shape vortex generators

Kantanat Karawawattana 53010086

Kittipaj Klintanom 53010017

Kanat Anurakparadorn 53010159

Chatrpon Yurayat 53010272

Dr. Withada Jedsadaratanachai Advisor

Year 2013

ABSTRACT

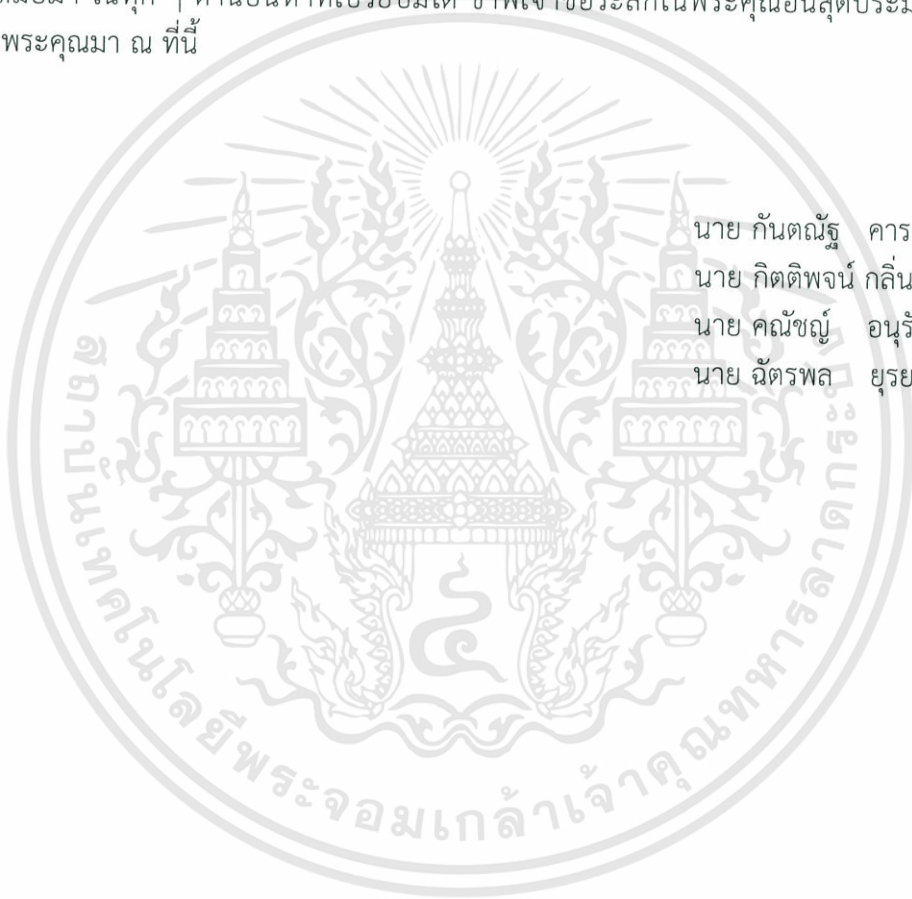
In present study, three-dimensional numerical study was performed for heat transfer characteristics and fluid flow structure of fin-and-oval-tube heat exchanger with longitudinal v-shape vortex generator. The heat exchanger tubes were arranged in staggered form. The numerical analysis based on programs "GAMBIT 2.3" and "FLUENT 6.3" by analysis of finite surface area method. For Re (by the hydraulic diameter) ranges from 500 to 2500. Four geometrical parameters-type of vortex generators (delta-winglet, rectangular)-placement of vortex generator (Upstream, Downstream)-attack angle (15°,30°,45°,60°) and distance between vortex generators (3.77, 4.77, 5.77) were also investigated for parameter optimization. The result were analyzed flow behavior and heat transfer characteristic. By comparing between average Nusselt's number and pressure drop, in dimensionless variable, of numerical model reflect the performance of heat exchanger. And comparing the result of numerical model and resemble empirical study, the comparing result must be acceptable and reasonable. In this step procedure report the model was separated in to 300,000 400,000 and 500,000 grids for numerical study and was analyzed by simple simulation without vortex generator and compare the result with experimental method to validate the model. The result found that all value of grids provide same result, so in this research use 300,000 number of grids for convenient reason. The result of the research shows that effect of Renold Number and attack angles provide better heat transfer when they are increased. The effect of placements of Vortex generators and pitch provide different trends because the effect of angle. The best case that provide most heat transfer is the case with downstream VGs that has 60 degrees angle, 3.77 mm. pitch with 2000 Re. This case provide heat transfer 1.58 times better than base case, but too much pressure drop. So the case that has best heat transfer enhancement is upstream VGs with 15 degrees angle, 5.77 mm. pitch and flow by 2500 Re, TEF is 1.1126 the heat transfer has 1.31 times more than base case and has the friction factor just 1.62 times more than base case.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ก็เพราะด้วยความเอาใจใส่ แนะนำ และช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ เสมอมาจาก ดร.วิชาติดา เจษฎารัตนชัย อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ คุณพิทักษ์ พร้อมโรสง และคุณเกียรติวัชรวิศ จันทราวิภาส ที่ให้ความรู้ในการใช้โปรแกรม คอยแนะนำผู้เขียนในการแก้ไขปัญหาต่างๆ มีความเป็นกันเองไม่ถือตัว ดูแลผู้เขียนเหมือนพี่เหมือนน้อง

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจเอาใจใส่เสมอมา ในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้



นาย กันตณัฐ คารวะวัฒนา

นาย กิตติพงษ์ กลิ่นถนอม

นาย คณิษฐ์ อนุรักษ์ภราดร

นาย ฉัตรพล ยุธยาตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VIII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
บทที่ 3 กฎการอนุรักษ์ของการเคลื่อนที่ของของไหล.....	7
3.1 บทนำ.....	7
3.2 สมการควบคุมของการไหลและการถ่ายเทความร้อน.....	7
3.2.1 การอนุรักษ์มวลในปัญหา 3 มิติ.....	8
3.2.2 อัตราการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติอนุภาคของไหลในเทอมขึ้นส่วนย่อยของไหล.....	9
3.2.3 สมการโมเมนตัมแบบ 3 มิติ.....	12
3.2.4 สมการพลังงานในระบบ 3 มิติ.....	15
3.3 สมการนาเวียร์-สโตกส์ สำหรับของไหลแบบนิวโทเนียน.....	19
3.4 รูปแบบอนุรักษ์สำหรับสมการควบคุมของการไหล.....	22
3.5 รูปแบบเชิงอนุพันธ์และอินทิกรัลสำหรับสมการการเคลื่อนย้ายแบบปกติ.....	22
บทที่ 4 การวิเคราะห์ถ่ายเทความร้อน.....	26
4.1 บทนำ.....	26
4.2 การไหลของของไหล.....	27
4.3 การถ่ายเทความร้อน.....	28
4.3.1 วิธีความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยแบบลอการิทึม.....	30
4.3.2 วิธี Effectiveness-NTU.....	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 5 การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล.....	39
5.1 บทนำ.....	39
5.2 ระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข.....	39
5.3 ขั้นตอนการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล.....	39
5.3.1 ขั้นตอนการประมวลผล.....	40
5.3.2 ขั้นตอนประมวลผล.....	40
5.3.3 ขั้นตอนแสดงผล.....	41
5.4 คุณสมบัติของวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล.....	41
5.4.1 ความเข้ากันได้.....	41
5.4.2 เสถียรภาพการคำนวณ.....	41
5.4.3 การลู่เข้าของผลเฉลย.....	42
5.4.4 การอนุรักษ์.....	42
5.4.5 ความจำกััดขอบ.....	42
5.4.6 ความเสมือนจริง.....	42
5.4.7 ความแน่นอน.....	42
5.5 รูปแบบการจัดวางกริด.....	43
5.6 แบบแผนการคำนวณเชิงตัวเลข.....	44
5.6.1 แบบแผนวิธีผลต่างกึ่งกลาง.....	45
5.6.2 แบบแผนวิธีผลต่างต้นลมอันดับหนึ่ง.....	45
5.6.3 แบบแผนวิธีผลต่างต้นลมอันดับสอง.....	46
5.6.4 แบบแผนวิธีผลต่างควอดรatic.....	47
5.7 การดิสcretize ไรต์สมการควบคุม.....	48
5.8 การดิสcretize ไรต์สมการอนุรักษ์มวล.....	48
5.9 การดิสcretize ไรต์สมการอนุรักษ์พลังงาน.....	49
5.9.1 การดิสcretize ไรต์เทอมไม่คงตัว.....	49
5.9.2 การดิสcretize ไรต์เทอมการพา.....	50
5.9.3 การดิสcretize ไรต์เทอมการแพร่.....	50
5.10 การดิสcretize ไรต์สมการนาเวียร์-สโตกส์.....	52
5.11 ลำดับวิธีการคำนวณหาผลเฉลยของสมการควบคุมในการไหลคงตัว.....	58
บทที่ 6 การกำหนดปัญหาและการพิสูจน์ความถูกต้อง.....	62
6.1 บทนำ.....	62
6.2 สมการควบคุมและสมมติฐาน.....	62
6.3 การกำหนดลักษณะของปัญหาที่ใช้ในการวิจัย.....	63

สารบัญ (ต่อ)

6.4 ค่าเงื่อนไขขอบเขตในการคำนวณการไหลสามมิติ.....	70
6.4.1 เงื่อนไขบริเวณต้นทางการไหล.....	70
6.4.2 เงื่อนไขบริเวณปลายทางการไหล.....	70
6.4.3 เงื่อนไขบริเวณ ครีบ.....	71
6.5 การเลือกระดับความละเอียดและพิสูจน์ความถูกต้อง.....	71
6.5.1 การเลือกระดับความละเอียด.....	71
6.5.2 การตรวจสอบความถูกต้อง.....	72
บทที่ 7 ผลวิเคราะห์เชิงตัวเลขและการอภิปราย.....	75
7.1 บทนำ.....	75
7.2 ผลการทดลอง.....	75
7.3 อิทธิพลของแผ่นกั้น VG รูปตัววี.....	76
7.4 พิจารณาความสัมพันธ์ของตัวแปร.....	78
7.5 อิทธิพลของเลขเรย์โนลด์.....	80
7.6 อิทธิพลของมุมปะทะ.....	81
7.7 อิทธิพลของระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น.....	85
7.8 อิทธิพลของตำแหน่งของแผ่นกั้น.....	92
บทที่ 8 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	96
8.1 สรุปผลการจำลอง.....	96
8.2 ข้อเสนอแนะ.....	97
บรรณานุกรม.....	98
ภาคผนวก ก. ตารางบันทึกผลการทดลอง.....	100
ภาคผนวก ข. ตารางรูปภาพพฤติกรรมต่าง ที่ใช้ในการเปรียบเทียบ.....	105

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 สมการควบคุมการไหลของของไหลแบบนิวโทเนียนอัดตัวได้.....	22
4.1 ค่าของเพาวิง แพคเตอร์.....	29
4.2 ค่าโดยประมาณของ U	29
4.3 ความสัมพันธ์ของ Effectiveness สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	35
4.4 ความสัมพันธ์ของ NTU สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	36
6.1 แสดงกรณีศึกษาของงานวิจัย.....	66
ก.1 ผลการทดลองของครีบที่ติดแผ่นกั้น ที่มีการจัดวางตำแหน่งแบบ upstream.....	100
ก.2 ผลการทดลองของครีบที่ติดแผ่นกั้น ที่มีการจัดวางตำแหน่งแบบ downstream.....	102
ข.1 ภาพพฤติกรรมต่างๆ กรณีที่ไม่ได้ติดแผ่นกั้น VGs.....	106
ข.2 ภาพพฤติกรรมต่างๆ กรณี downstream ระยะ 4.77 ม.ม. Re เท่ากับ 1000.....	107
ข.3 ภาพ stream line ตาม แนวหน้าตัดตามขวาง ที่มีการจัดวางตำแหน่งแบบ upstream.....	109
ข.4 ภาพ stream line ตาม แนวหน้าตัดตามขวาง ที่มีการจัดวางตำแหน่งแบบ downstream.....	110
ข.5 ภาพ Contour ของอุณหภูมิตามแนวหน้าตัดตามขวาง ที่มีการจัดวางตำแหน่งแบบ upstream.....	111
ข.6 ภาพ Contour ของอุณหภูมิตามแนวหน้าตัดตามขวาง ที่มีการจัดวางตำแหน่งแบบ downstream.....	112
ข.7 ภาพ Contour ของความเร็วตามแนวหน้าตัดตามขวาง ที่มีการจัดวางตำแหน่ง upstream.....	113
ข.8 ภาพ Contour ของความเร็วตามแนวหน้าตัดตามขวาง ที่มีการจัดวางตำแหน่ง downstream.....	114
ข.9 ภาพ stream line ตามแนวยาว ที่มีการจัดวางตำแหน่งแบบ upstream.....	115
ข.10 ภาพ stream line ตามแนวยาว ที่มีการจัดวางตำแหน่งแบบ downstream.....	115
ข.11 ภาพ Contour ของอุณหภูมิ ตามแนวยาว ระยะระหว่างแผ่นกั้น 3.77 ม.ม.	116
ข.12 ภาพ Contour ของอุณหภูมิ ตามแนวยาว ระยะระหว่างแผ่นกั้น 5.77 ม.ม.	117
ข.13 ภาพ Contour ของความเร็ว ตามแนวยาว ระยะระหว่างแผ่นกั้น 3.77 ม.ม.	118
ข.14 ภาพ Contour ของความเร็ว ตามแนวยาว ระยะระหว่างแผ่นกั้น 5.77 ม.ม.	119
ข.15 ภาพ Contour ของ Nu ระยะระหว่างแผ่นกั้น 3.77 ม.ม.	120
ข.16 ภาพ Contour ของ Nu ระยะระหว่างแผ่นกั้น 5.77 ม.ม.	121

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	5
3.1	8
3.2	9
3.3	13
3.4	13
3.5	16
4.1	26
4.2	26
4.3	30
4.4	31
4.5	36
4.6	37
4.7	37
5.1	40
5.2	43
5.3	44
5.4	44
5.5	47
5.6	53
5.7	54
5.8	56
5.9	57
5.10	60
5.11	61
6.1	63
6.2	63
6.3	64
6.4	64
6.5	65
6.6	71
6.7	72

สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.8 แสดงลักษณะการแบ่งแบบจำลองและรูปแบบของกริด.....	72
6.9 แสดงแบบจำลองที่เพิ่มระยะทางเข้าทางออกแล้ว.....	73
6.10 แสดงการตรวจสอบความถูกต้องของเลขนับเซลล์.....	73
6.11 แสดงการตรวจสอบความถูกต้องของค่าความดันตกคร่อม.....	74
7.1 แสดงคอนทัวร์ของความเร็วบริเวณกึ่งกลางของช่องทางการไหล ก. กรณีที่ยังไม่ได้ติดแผ่นกั้น VGs ข. กรณีที่ติดแผ่นกั้นในตำแหน่งแบบ upstream ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น VGs เท่ากับ 5.77 มุม ปะทะ 15 องศา เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 2500.....	76
7.2 แสดงสตรีมไลน์ในหน้าตัด ก. กรณีที่ยังไม่ได้ติดแผ่นกั้น VGs ข. กรณีที่ติดแผ่นกั้นในตำแหน่งแบบ upstream ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น VGs เท่ากับ 5.77 มุมปะทะ 15 องศา เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 2500.....	77
7.3 แสดงสตรีมไลน์บริเวณกึ่งกลางของช่องทางการไหล ก. กรณีที่ยังไม่ได้ติดแผ่นกั้น VGs ข. กรณีที่ติด แผ่นกั้นในตำแหน่งแบบ upstream ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น VGs เท่ากับ 5.77 มุมปะทะ 15 องศา เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 2500.....	77
7.4 แสดงอิทธิพลของแผ่นกั้น VGs ต่อค่าตัวประกอบความเสียดทาน ซึ่งสังเกตได้ว่าทุกกรณีศึกษา ค่าตัวประกอบความเสียดทาน สูงกว่ากรณีที่ไม่ได้ติดแผ่นกั้น VGs.....	78
7.5 แสดงอิทธิพลของแผ่นกั้น VGs ต่อเลขนับเซลล์เฉลี่ย ซึ่งสังเกตได้ว่าทุกกรณีศึกษา เลขนับเซลล์เฉลี่ย สูงกว่ากรณีที่ไม่ได้ติดแผ่นกั้น VGs.....	78
7.6 แสดงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆต่อค่าตัวประกอบความเสียดทาน ในสามมิติ.....	78
7.7 แสดงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆต่อเลขนับเซลล์ ในสามมิติ.....	79
7.8 อิทธิพลของระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น VGs ต่อค่าตัวประกอบความเสียดทาน ที่มุม 15 และ 60 องศา การจัดวางตำแหน่งแบบ downstream.....	79
7.9 อิทธิพลของระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น VGs ต่อเลขนับเซลล์เฉลี่ย ที่มุม 15 และ 45 องศา การจัดวาง ตำแหน่งแบบ downstream.....	80
7.10 อิทธิพลของเลขเรย์โนลด์ ต่อค่าตัวประกอบความเสียดทาน กรณีที่ติดแผ่นกั้น VGs รูปตัววี ใน ตำแหน่ง upstream ระยะห่าง 5.77 ม.ม. ที่มุมปะทะต่างๆ.....	80
7.11 อิทธิพลของเลขเรย์โนลด์ต่อเลขนับเซลล์เฉลี่ย กรณีที่ติดแผ่นกั้น VGs รูปตัววี ในตำแหน่ง upstream ระยะห่าง 5.77 ม.ม. ที่มุมปะทะต่างๆ.....	81
7.12 แสดงคอนทัวร์ของเลขนับเซลล์บริเวณพื้นผิวท่อ กรณีที่ติดแผ่นกั้นในตำแหน่งแบบ upstream ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น VGs เท่ากับ 5.77 มุมปะทะ 15 องศา ก.เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 500 ข.เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 2500.....	81
7.13 อิทธิพลของมุมปะทะต่อค่าตัวประกอบความเสียดทาน กรณีที่ติดแผ่นกั้น VGs รูปตัววี ในตำแหน่ง downstream ระยะห่าง 4.77 ม.ม. ที่เลขเรย์โนลด์ต่างๆ.....	82
7.14 แสดงคอนทัวร์ของความเร็วบริเวณกึ่งกลางของช่องทางการไหล กรณีที่ติดแผ่นกั้นในตำแหน่งแบบ downstream ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น VGs เท่ากับ 4.77 เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 1000 ก.มุมปะทะ 15 องศา ข.มุมปะทะ 60 องศา.....	82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.15 อิทธิพลของมุมปะทะต่อเลขนัสเซลเฉลี่ย กรณีที่ติดแผ่นกัน VGs รูปตัววี ในตำแหน่ง downstream ระยะห่าง 4.77 ม.ม. ที่เลขเรย์โนลด์ต่างๆ.....	83
7.16 แสดงสตรีมไลน์บริเวณกึ่งกลางของช่องทางการไหล กรณีที่ติดแผ่นกันในตำแหน่งแบบ downstream ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน VGs เท่ากับ 4.77 เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 1000 ก.มุมปะทะ 15 องศา ข.มุมปะทะ 60 องศา.....	83
7.17 แสดงสตรีมไลน์ในหน้าตัดกรณี que ที่ติดแผ่นกันในตำแหน่งแบบ downstream ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน VGs เท่ากับ 4.77 เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 1000 ก.มุมปะทะ 15 องศา ข.มุมปะทะ 60 องศา.....	84
7.18 แสดงคอนทัวร์ของอุณหภูมิบริเวณกึ่งกลางของช่องทางการไหล กรณีที่ติดแผ่นกันในตำแหน่งแบบ downstream ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน VGs เท่ากับ 4.77 เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 1000 ก.มุมปะทะ 15 องศา ข.มุมปะทะ 60 องศา.....	84
7.19 แสดงคอนทัวร์ของเลขนัสเซลบริเวณพื้นผิวท่อ กรณีที่ติดแผ่นกันในตำแหน่งแบบ downstream ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน VGs เท่ากับ 4.77 เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 1000 ก.มุมปะทะ 15 องศา ข.มุมปะทะ 60 องศา.....	84
7.20 อิทธิพลของระยะห่างระหว่างแผ่นกันต่อค่าตัวประกอบความเสียดทาน กรณีที่ติดแผ่นกัน VGs รูปตัววี ในตำแหน่ง downstream มุมปะทะ 15 องศา ที่เลขเรย์โนลด์ต่างๆ.....	85
7.21 อิทธิพลของระยะห่างระหว่างแผ่นกันต่อค่าตัวประกอบความเสียดทาน กรณีที่ติดแผ่นกัน VGs รูปตัววี ในตำแหน่ง downstream มุมปะทะ 45 องศา ที่เลขเรย์โนลด์ต่างๆ.....	86
7.22 แสดงสตรีมไลน์บริเวณกึ่งกลางของช่องทางการไหล กรณีที่ติดแผ่นกันในตำแหน่งแบบ downstream เลขเรย์โนลด์ 2500 ก.มุมปะทะ 15 องศา ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน 3.77 ม.ม. ข.มุมปะทะ 15 องศา ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน 5.77 ม.ม. ค.มุมปะทะ 45 องศา ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน 3.77 ม.ม. ง.มุมปะทะ 45 องศา ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน 5.77 ม.ม.	86
7.23 แสดงคอนทัวร์ของความเร็วยุบริเวณกึ่งกลางของช่องทางการไหล กรณีที่ติดแผ่นกันในตำแหน่งแบบ downstream เลขเรย์โนลด์ 2500 ก.มุมปะทะ 15 องศา ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน 3.77 ม.ม. ข.มุมปะทะ 15 องศา ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน 5.77 ม.ม. ค.มุมปะทะ 45 องศา ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน 3.77 ม.ม. ง.มุมปะทะ 45 องศา ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน 5.77 ม.ม.	87
7.24 อิทธิพลของระยะห่างระหว่างแผ่นกันต่อค่าตัวประกอบความเสียดทาน กรณีที่ติดแผ่นกัน VGs รูปตัววี ในตำแหน่ง upstream มุมปะทะ 15 และ 45 องศา ที่เลขเรย์โนลด์ต่างๆ.....	87
7.25 แสดงสตรีมไลน์บริเวณกึ่งกลางของช่องทางการไหล กรณีที่ติดแผ่นกันในตำแหน่งแบบ upstream เลขเรย์โนลด์ 2500 มุมปะทะ 15 องศา ก. ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน 3.77 ม.ม. ข. ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน 5.77 ม.ม.	88
7.26 แสดงคอนทัวร์ของความเร็วยุบริเวณกึ่งกลางของช่องทางการไหล กรณีที่ติดแผ่นกันในตำแหน่งแบบ upstream มุมปะทะ 15 องศา เลขเรย์โนลด์ 2500 ก.ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน 3.77 ม.ม. ข. ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน 5.77 ม.ม.	88
7.27 อิทธิพลของระยะห่างระหว่างแผ่นกันต่อเลขนัสเซลเฉลี่ย กรณีที่ติดแผ่นกัน VGs รูปตัววี มุมปะทะ 15 องศา ที่เลขเรย์โนลด์ต่างๆ ก.การจัดวางตำแหน่งของแผ่นกันแบบ upstream ข.การจัดวางตำแหน่งของแผ่นกันแบบ downstream.....	89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.28 แสดงคอนทัวร์ของเลขน้สเชิลบริเวณพื้นผิวท่อ กรณีที่ติดแผ่นกั้นในตำแหน่งแบบ downstream ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น VGs เท่ากับ 4.77 เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 2500 มุมปะทะ 15 องศา ก. ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น 3.77 ม.ม. ข. ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น 5.77 ม.ม.....	89
7.29 แสดงสตรีมไลน์บริเวณกึ่งกลางของช่องทางไหล กรณีที่ติดแผ่นกั้นในตำแหน่งแบบ downstream มุมปะทะ 15 องศา เลขเลขเรย์โนลด์ 2500 ก. ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น 3.77 ม.ม. ข. ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น 5.77 ม.ม.....	89
7.30 แสดงคอนทัวร์ของอุณหภูมิตัด กรณีที่ติดแผ่นกั้นในตำแหน่งแบบ downstream มุมปะทะ 15 องศา เลขเรย์โนลด์ 2500 ก. ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น 3.77 ม.ม. ข. ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น 5.77 ม.ม.....	90
7.31 อิทธิพลของระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นต่อเลขน้สเชิลเฉลี่ย กรณีที่ติดแผ่นกั้น VGs รูปตัววี มุมปะทะ 45 องศา ที่เลขเรย์โนลด์ต่างๆ ก.การจัดวางตำแหน่งของแผ่นกั้นแบบ upstream ข.การจัดวางตำแหน่งของแผ่นกั้นแบบ downstream.....	90
7.32 แสดงคอนทัวร์ของเลขน้สเชิลบริเวณพื้นผิวท่อ กรณีที่ติดแผ่นกั้นในตำแหน่งแบบ downstream ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น VGs เท่ากับ 4.77 เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 2500 มุมปะทะ 45 องศา ก. ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น 3.77 ม.ม. ข. ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น 5.77 ม.ม.....	91
7.33 แสดงคอนทัวร์ของเลขน้สเชิลบริเวณพื้นผิวท่อ กรณีที่ติดแผ่นกั้นในตำแหน่งแบบ upstream ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น VGs เท่ากับ 4.77 เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 500 มุมปะทะ 15 องศา ก. ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น 3.77 ม.ม. ข. ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น 5.77 ม.ม.....	91
7.34 แสดงสตรีมไลน์บริเวณกึ่งกลางของช่องทางไหล กรณีที่ติดแผ่นกั้นในตำแหน่งแบบ downstream มุมปะทะ 45 องศา เลขเลขเรย์โนลด์ 2500 ก. ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น 3.77 ม.ม. ข. ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น 5.77 ม.ม.....	91
7.35 แสดงคอนทัวร์ของอุณหภูมิตัด กรณีที่ติดแผ่นกั้นในตำแหน่งแบบ downstream มุมปะทะ 45 องศา เลขเรย์โนลด์ 2500 ก. ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น 3.77 ม.ม. ข. ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น 5.77 ม.ม.....	92
7.36 แสดงอิทธิพลของตำแหน่งของแผ่นกั้นต่อค่าตัวประกอบความเสียดทาน กรณีมุมปะทะ 15 และ 45 องศาที่เลขเรย์โนลด์ต่างๆ ก.ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น 3.77 ม.ม. ข.ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น 5.77 ม.ม.....	92
7.37 แสดงสตรีมไลน์บริเวณกึ่งกลางของช่องทางไหลกรณีมุมปะทะ 45 องศา ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น 3.77 ม.ม. เลขเรย์โนลด์ 2500 ก.การจัดวางตำแหน่งแบบ upstream ข.การจัดวางตำแหน่งแบบ downstream.....	93
7.38 แสดงคอนทัวร์ของความเร็วบริเวณกึ่งกลางของช่องทางไหล มุมปะทะ 45 องศา เลขเรย์โนลด์ 500 ก.ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น 3.77 ม.ม ข. ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น 5.77 ม.ม.....	93
7.39 แสดงอิทธิพลของตำแหน่งของแผ่นกั้นต่อเลขน้สเชิล กรณีมุมปะทะ 15 และ 45 องศาที่เลขเรย์โนลด์ต่างๆ ก.ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น 3.77 ม.ม. ข.ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น 5.77 ม.ม.	93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.40 แสดงคอนทัวร์ของเลขนัสเซลบริเวณพื้นผิวท่อ ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน VGs เท่ากับ 3.77 เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 2500 ก.มุ่มปะทะ 15 องศา การจัดวางตำแหน่งแบบ upstream ข.มุ่มปะทะ 15 องศา การจัดวางตำแหน่งแบบ downstream ค.มุ่มปะทะ 45 องศา การจัดวางตำแหน่งแบบ upstream ง.มุ่มปะทะ 45 องศา การจัดวางตำแหน่งแบบ downstream.....	94
7.41 แสดงสตรีมไลน์ในหน้าตัดกรณีที่ติดแผ่นกัน เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 2500 ก.มุ่มปะทะ 15 องศา ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน VGs เท่ากับ 5.77 การจัดวางตำแหน่งแบบ upstream ข.มุ่มปะทะ 15 องศา ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน VGs เท่ากับ 5.77 การจัดวางตำแหน่งแบบ downstream ค.มุ่มปะทะ 45 องศา ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน VGs เท่ากับ 3.77 การจัดวางตำแหน่งแบบ upstream ง.มุ่มปะทะ 45 องศา ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน VGs เท่ากับ 3.77 การจัดวางตำแหน่งแบบ downstream.....	95
ข.1 แสดงหน้าตัดตามขวางที่แสดงในตาราง สำหรับกรณี upstream และ downstream ตามลำดับ.....	103
ข.2 ระดับสี Contour ที่ $k.Re$ เท่ากับ 2500 ข. Re เท่ากับ 500.....	103
ข.3 Contour Nusselt กรณี upstream ระยะ 5.77 ม.ม. Re 500.....	106

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์ลาติน	
A	พื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งหมด, m^2
A_o	พื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งหมด, m^2
A_c	พื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งหมด, m^2
b	ระยะของ delta winglet, mm
B	ความกว้างของช่องทางการไหล, mm
c	ความยาวของ delta winglet, mm
C_p	ความร้อนจำเพาะ, J/kg K
D_h	Hydraulic diameter
f	แฟคเตอร์ของความเสียดทาน
H	ระยะห่างของครีป, mm
h	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน, W/m^2K
k	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน
L	ความยาวการไหล, mm
Nu	เลขนัสเซลท์
P	ระยะห่างแผ่นกัน, mm
ΔP	Pressure drop, kPa
Q	การถ่ายเทความร้อน, W
Re	เลขเรย์โนลด์
T	อุณหภูมิ, K
T_{in}	อุณหภูมิทางเข้า, K
T_{out}	อุณหภูมิทางออก, K
T_w	อุณหภูมิผนัง, K
T_{avg}	อุณหภูมิเฉลี่ย, K
u_i	ความเร็วทางเข้า, m/s
u, v, w	ส่วนประกอบเวกเตอร์ความเร็ว, m/s
U_c	ความเร็วที่ผ่านหน้าตัดการไหลที่น้อยที่สุด, m/s
x, y, z	ระยะพิกัดคาร์ทีเซียน
สัญลักษณ์กรีก	
α	มุมปะทะ, $^\circ$
μ	ความหนืดเชิงจลศาสตร์, Pa s
ρ	ความหนาแน่นของของไหล, kg/m^3
ν	ความหนืดเชิงพลศาสตร์, m^2/s

Subscripts

in inlet

out outlet

w wall

อักษรย่อ

LVGs Longitudinal Vortex generators

TVGs Transverse Vortex generators

VG Vortex-generator



บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันพลังงานเป็นสิ่งที่จะเป็นอย่างมากในการพัฒนาประเทศรวมถึงยังมีการนำพลังงานมาในเชิงอุตสาหกรรมกันอย่างแพร่หลาย ซึ่งสามารถใช้ในการผลิตหรือสร้างอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในชีวิตประจำวัน อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญในกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ปัจจุบันได้มีการพัฒนารูปแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมากมายเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานในทั่วไป ทั้งกิจการขนาดย่อมจนถึงอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ซึ่งเราสามารถพบได้โดยทั่วไปในงานเชิงวิศวกรรมเช่น หม้อน้ำรถยนต์ คอนเดนเซอร์ เครื่องปรับอากาศ หม้อไอน้ำ ฯลฯ หากโรงงานอุตสาหกรรมสามารถใช้อุปกรณ์ดังกล่าวได้อย่างเต็มประสิทธิภาพก็จะช่วยลดต้นทุนการผลิตทางด้านพลังงานลงได้ การออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในงานวิศวกรรมที่นั่นไม่ใช่จะคำนึงถึงแต่เพียงเรื่องของขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเท่านั้น สมรรถนะก็เป็นเรื่องที่สำคัญไม่ยิ่งหย่อนไปกว่าเรื่องขนาดหรือรูปร่าง บทบาทของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนั้นวันยังมีความสำคัญมาขึ้นทุกวัน ในปัจจุบันวิศวกรต่างก็ประสบกับปัญหาเกี่ยวกับวิกฤตการณ์ทางด้านพลังงานเป็นอย่างมาก ดังนั้นผู้ผลิตจึงพยายามที่จะออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนให้มีประสิทธิภาพและก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด ซึ่งไม่เพียงแต่ว่าจะต้องคำนึงถึงความประหยัดในด้านลงทุนเท่านั้น แต่ยังต้องคำนึงถึงผลตอบแทนด้านพลังงานอีกด้วย

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

อย่างที่ทราบกันว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญในกระบวนการต่างๆในโรงงานอุตสาหกรรม รวมถึงกระบวนการต่างๆที่เกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวันของเรา ซึ่งทำให้เกิดการค้นคว้าวิจัยเพื่อเพิ่มสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนกันอย่างแพร่หลาย โดยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนส่วนใหญ่จะอาศัยการถ่ายเทความร้อนแบบการพา สำหรับการเพิ่มสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถแบ่งออกเป็นสองกลุ่มใหญ่ๆ กลุ่มแรกคือ กลุ่มที่ต้องอาศัยแหล่งพลังงานจากภายนอกเข้ามาช่วยกระตุ้นให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนเช่น วิธีการสร้างสนามแม่เหล็กการฉีดจนกระทั่งการใช้กลไกทางกลเข้ามาช่วยสร้างการกระเพื่อมให้แก่การไหลเพื่อกระตุ้นให้มีการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น วิธีนี้เรียกว่า Active method ส่วนอีกกลุ่มหนึ่งคือ การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีการที่ไม่ต้องอาศัยพลังงานจากแหล่งภายนอกมาช่วยกระตุ้นแต่จะใช้พื้นผิวที่ขรุขระโดยใช้อุปกรณ์เช่น ท่อรูปกันหอยเพื่อช่วยสร้างการไหลให้หมุนวนหรือการเติมสารบางตัวลงไปเพื่อช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนซึ่งเป็นกลุ่มที่นักวิจัยจำนวนมากนิยมใช้กัน วิธีนี้เรียกว่า Passive method ซึ่งเทคนิคการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนด้วยวิธี Passive method นี้ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่น การใส่ครีบลงในแผ่นเรียบและทำการปรับมุมปะทะเข้าไป อุปกรณ์นี้ช่วยสร้างการไหลให้ปั่นป่วนโดยผลการศึกษาพบว่าส่วนใหญ่ชี้ให้เห็นว่าถึงแม้การถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มสูงขึ้น แต่หากพิจารณาถึงค่าความดันตกคร่อมก็จะส่งผลให้ค่าความเสียดทานของการไหลเพิ่มสูงขึ้นเช่นเดียวกัน

งานวิจัยนี้จึงวิเคราะห์พฤติกรรมของการไหลของอากาศและตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อการถ่ายเทความร้อนของครีบบีมีการติดแผ่นกัน (Vortex generator) ชนิดปีกรูปทรงสามเหลี่ยม (Delta-winglet) สำหรับการสร้างการไหลแบบปั่นป่วน และบังคับทิศทางการไหลไปสู่ทิศทางที่มีการถ่ายเทความร้อน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณมาก ภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนขนาดย่อม โดยศึกษาที่ การจัดวางตำแหน่งของแผ่นกันแบบ ตามทิศทางการไหล (upstream) และสวนทางกับทิศทางการไหล (downstream) ค่ามุมปะทะเป็น 15,30,45 และ 60 องศา และระยะห่างระหว่างแผ่นกัน 3.77,4.77 และ 5.77 มิลลิเมตร ในช่วงเลขเรย์โนลด์ 500 ถึง 2500 โดยอาศัยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขสำหรับการไหลมาคำนวณหาผลเฉลยของปัญหา ซึ่งผลการวิจัยที่ได้สามารถใช้เป็นแนวทางหนึ่งในการออกแบบและจัดวางแผ่นกันเพื่อทำให้ครีบบีมีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

สำหรับวัตถุประสงค์เบื้องต้นในงานวิจัยนี้เพื่อการศึกษาพฤติกรรมการไหลและความสามารถในการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Fin-tube ที่ประกอบไปด้วยแผ่นกัน (Vortex generator) แบบสามเหลี่ยม (delta winglet pairs) ที่ต่อกันเป็นรูปตัววี ในลักษณะต่างๆ โดยงานวิจัยนี้ ได้ใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม FLUENT ซึ่งเป็นที่นิยมและเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ประกอบด้วย

1.2.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนค่าความดันตกคร่อมและพฤติกรรมการไหลของของไหลภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Fin-tube ในด้านของครีบบี ที่มีการประกอบแผ่นกัน จัดวางเป็นรูปตัววีในแบบต่างๆโดยใช้วิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลข

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของแผ่นกันตัววีในลักษณะต่างๆ ที่มีผลต่อพฤติกรรมการไหล, การถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อม

1.2.3 เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ซึ่งประกอบด้วย อิทธิพลของเลขเรย์โนลด์ (Re) ,อิทธิพลของมุมปะทะของแผ่นกันตัววี ,อิทธิพลของระยะห่างระหว่างแผ่นกัน , อิทธิพลของการจัดวางแผ่นกัน, อิทธิพลของลักษณะการติดตั้งและรูปแบบของแผ่นกัน

1.2.4 เพื่อศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้มีการศึกษามาแล้วทั้งในส่วนของการทดลองจริงและในส่วนของการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

1.2.5 เพื่อทดสอบความสามารถของแผ่นกันรูปตัววีต่อการแลกเปลี่ยนความร้อน ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Fin-Tube

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 คำนวณด้วยวิธีเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของของไหลและการถ่ายเทความร้อนของระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (finite volume method)

1.3.2 ทำการคำนวณในแบบจำลองการไหลแบบสามมิติ ที่มีการไหลแบบราบเรียบ(Laminar) ในช่วงเลขเรย์โนลด์ จาก 500 ถึง 2500

1.3.3 พิจารณาเฉพาะลักษณะการพาความร้อนแบบบังคับ (forced convection)

1.3.4 ทำการวิจัยบนพื้นผิวของครีบบีในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ fin – tube ที่มีอุณหภูมิผิวคงที่ 300 เคลวิน (23 องศาเซลเซียส)

1.3.5 วิเคราะห์เฉพาะท่อที่มีหน้าตัดเป็นรูปวงรี ที่มีการจัดเรียงแบบสลับ(staggered)

1.3.6 แผ่นกันที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะเป็นแผ่นกันแบบบางหรือครีบบางไม่สามารถนำความร้อนได้ แบบสามเหลี่ยม (delta winglet pair)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.7 แผ่นกันวางตัวเป็นรูปแบบของตัววี โดยหันมุมไปตามทิศทางการไหล(upstream) และหันมุมในทิศสวนทางกับทิศทางการไหล(downstream) มีมุมปะทะ $\alpha = 15, 30, 45$ และ 60 องศา และระยะระหว่างแผ่นกัน 3.77, 4.77 และ 5.77 มิลลิเมตร

1.3.8 หาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆที่มีผลในการเพิ่มสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.4.1 รวบรวมข้อมูล ทำการศึกษาทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของการไหลในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ fin-tube

1.4.2 ศึกษาการใช้งานโปรแกรมในการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลข GAMBIT และการคำนวณพลศาสตร์ของไหล Fluent เพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์หาผลเฉลยตามระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม

1.4.3 กำหนดลักษณะของปัญหาและลักษณะรูปร่างของแผ่นกันและสร้างแบบจำลองบนโปรแกรมออกแบบทางพลศาสตร์ของไหลพร้อมกับเลือกขนาดและจำนวนกริดที่เหมาะสม

1.4.4 ทำการคำนวณเชิงตัวเลขที่ต้องการศึกษาจากแบบจำลองการไหลสามมิติ โดยการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่างๆ ตามที่ระบุไว้ในวัตถุประสงค์คือ ค่าเรย์โนลด์(Re), ค่ามุมปะทะ(α), รูปแบบของแผ่นกัน (delta-winglet, Rectangular), ทิศทางการจัดวางแผ่นกัน (Downstream, Upstream), ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน

1.4.5 วิเคราะห์ผลที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลข และนำข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์ผลและแสดงผลในรูปตัวแปรไร้มิติ

1.4.6 สรุปผลการวิจัยตามวัตถุประสงค์พร้อมข้อเสนอแนะในการทำการวิจัยต่อไป

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ fin-tube

1.5.2 เพื่อการพัฒนาและการออกแบบแผ่นกันภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ fin - tube ในภาคอุตสาหกรรม

1.5.3 เป็นองค์ความรู้และแนวทางในการวิจัยที่เกี่ยวข้องต่อไป

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทรรศน์

2.1 บทนำ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมขนาดใหญ่มีการเติบโตอย่างต่อเนื่องทำให้ความต้องการด้านพลังงานสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมสูงขึ้น อุปกรณ์ที่สำคัญในระบบการผลิตของอุตสาหกรรม คือ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยเฉพาะ Fin-tube heat exchanger ถูกใช้อย่างกว้างขวางในระบบทำความร้อน ระบบระบายอากาศ ระบบปรับอากาศ และระบบทำความเย็น การพัฒนาออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนให้มีประสิทธิภาพที่ดีจะส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายในการผลิตที่น้อยลงและยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยลงด้วย ดังนั้น มีความพยายามในการเพิ่มสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในหลายๆด้าน หนึ่งในนั้น คือ ด้านอากาศ เนื่องจากคุณสมบัติของอากาศมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ค่อนข้างต่ำ โดยสามารถทำได้หลายวิธี 1 วิธี คือ การจัดการพฤติกรรมกระแสของอากาศ เพราะลักษณะการไหลของอากาศจะแสดงให้เห็นถึง การกระจายของอุณหภูมิ ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความต้านทานความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

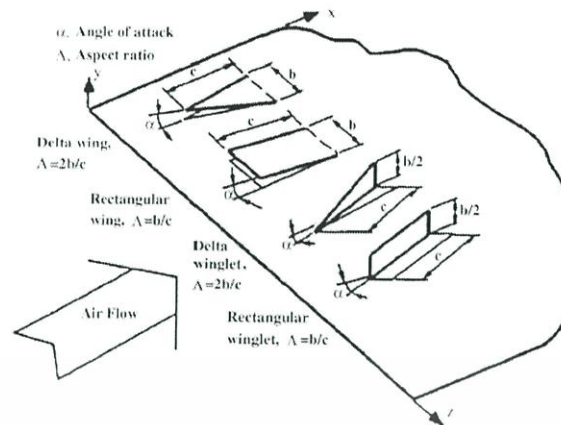
หนึ่งในอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมพฤติกรรมกระแสให้เป็นแบบปั่นป่วน คือ Vortex-generator (VG) อย่างไรก็ตาม แม้ว่าการติดตั้ง VG จะทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนและทำให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนดีขึ้น การติดตั้ง VG ยังก่อให้เกิด Pressure drop VG สามารถติดตั้งได้ใน 2 ลักษณะ คือ 1. Longitudinal Vortex generators (LVGs) 2. Transverse Vortex generators (TVGs) สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้เสนอในหัวข้อ 2.2 มีดังนี้

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

(J.M., Wu et al.)[1] จากการทดลองของ Wu JM และ Tao WG เรื่องการพาความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมมุมฉาก พบว่า การติดตั้ง VG แบบ LVGs มีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนที่มากกว่าการติดตั้ง VG แบบ TVGs โดยก่อให้เกิดพฤติกรรม 3 อย่าง

1. Developing boundary layer
2. Swirl
3. Flow destabilization

จากการศึกษาเพิ่มเติมจากรวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการติดตั้ง VG บน Fin-tube heat exchanger พบว่า มีการศึกษาค้นคว้า และทำการทดลองในด้านนี้อย่างแพร่หลาย (Jacobi, A.M. et al.)[2] และคณะทำการศึกษา การถ่ายเทความร้อนโดยใช้ VG พบว่าลักษณะพื้นฐานของ VG มี 4 ลักษณะ คือ 1. delta wing 2. rectangular wing 3. delta winglet 4. rectangular winglet



รูปที่ 2.1 แผ่นกั้นในรูปแบบต่างๆ

และพบว่า VG แบบ winglet ให้สมรรถนะในการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าแบบ wing โดย delta winglet จะมีสมรรถนะในการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่า rectangular winglet เล็กน้อย

(Fiebig, M.)[3] และคณะทำการศึกษาเชิงตัวเลขและทำการทดลองการไหลแบบปั่นป่วนภายในพบว่า การติดตั้ง VG แบบ LVGs ช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้มากกว่า การติดตั้ง VG แบบ TVGs ที่ Pressure loss เท่ากัน และ VG ลักษณะ winglet ให้การเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อนที่เท่ากับ wing แต่จะทำให้เกิด Pressure loss ที่น้อยกว่า

(K., Torii et al.)[4] พบว่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนเพิ่มขึ้น 30% และ 10% ใน Re ช่วง 350-2100 เมื่อมี delta winglet vortex generators ของการหมุนแบบ Common flow up for staggered tube banks heat exchanger. และ 20% และ 10% สำหรับ in-line tube exchanger

(Y.H., Zhang et al.)[5] พบว่า Vortex generator ควรตั้งใกล้ผนัง tube มากเท่าที่จะเป็นไปได้ ในกรณี three-row flat tube bank fin พวกเขาพบว่า friction factor ลดลง เมื่อ Re เพิ่มขึ้น

จากสถิติของ (S., Yoo et al.)[6] ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนทั้งหมดของ fin-flat tube heat exchanger ที่ไม่มี delta winglet vortex generators (DWVGs) และเพิ่มขึ้น 45% เมื่อเปรียบเทียบกับ fin-circular tube heat exchanger. พวกเขาตั้งข้อสังเกตว่า pressure drop ของ fin-flat tube เพิ่มขึ้น 80% และเพิ่ม 50% สำหรับ fin-circular tube เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง fin tube ที่มีและไม่มี delta winglet vortex generators (DWVGs)

(Y.H., Zhang et al.)[5] ศึกษาผลกระทบของ pitch of in-line delta winglet vortex generators (DWVGs) on local & average Nu และ Re ช่วง 500-5000 ของ finned three row flat tube พวกเขาได้รายงานวาระยะ Pitch มีผลกับอัตราการถ่ายเทความร้อนอย่างมาก และประสิทธิภาพจากผลกระทบของระยะ Pitch ในอัตราการถ่ายเทความร้อนขึ้นกับมุมปะทะของ Vortex generator for identical ของอัตราการถ่ายเทมวล

(K.M., Kwak et al.)[7] & (L.H., Tang et al.)[8] พบว่าการเพิ่มขึ้นของมุมปะทะหรือความสูง หรือ การลดความสูง อาจเพิ่มประสิทธิภาพของ vortex generator fin ของ fin-tube heat exchanger

(Chu, P. et al.)[9] ทำการวิเคราะห์การไหลภายในและพฤติกรรมถ่ายเทความร้อนที่ประกอบด้วย LVGs ภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ fin-tube ที่มีท่อเป็นรูปวงรี ในช่วง $Re=500-2500$ ที่มุมปะทะ $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ และ 60° และจำนวนแถวของท่อ ($n=2,3,4$ และ 5) พบว่าที่มุมปะทะ 30° และจำนวนแถวของท่อที่น้อยที่สุดให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาวรรณกรรมข้างต้นพบว่าลักษณะของการจัดวางของแผ่นกั้นมีอยู่หลายลักษณะแต่ยังไม่พบการจัดวางแบบลักษณะรูปตัววี

(Promvong, Pongjet et al.)[10] ทำการศึกษาทดลองการไหลภายในท่อ โดยมีแผ่นกั้นรูปตัววี พบว่าแผ่นกั้นรูปตัววีให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนมากกว่า จึงนำมาศึกษากับพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ fin-tube

(Khundheyer, Ahmed F. et al.)[11]ได้ทำการศึกษาการสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Fin-Tube และนำผลที่ได้จากการคำนวณโดยแบบจำลองไปเปรียบเทียบกับผลจากการทดลองจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจริง พบว่าพฤติกรรมการไหลของผลจากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับแบบจำลองที่สมมติพฤติกรรมการไหลเป็นแบบ Laminar มากที่สุดสำหรับช่วงที่มีเลขเรย์โนลด์ที่เป็น Laminar ทั้งพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนและพฤติกรรมเกี่ยวกับแรงเสียดทาน รวมถึงผลเฉลยต่างๆสำหรับแบบจำลองที่สมมติพฤติกรรมการไหลเป็นแบบ Turbulent มีค่าใกล้เคียงกับแบบ Laminar มากในช่วงดังกล่าว

จากการศึกษาดังกล่าว จึงกำหนดสมมติฐานพฤติกรรมการไหลของแบบจำลองในการทำโครงการครั้งนี้ให้มีการไหลแบบ Laminar แม้ว่าจะเกิดพฤติกรรมการไหลแบบ Turbulent จากการไหลหมุนวนซึ่งเป็นผลมาจากแผ่นกั้นก็ตาม เพื่อความสะดวกและประหยัดเวลาในการคำนวณ



กฎการอนุรักษ์ของการเคลื่อนที่ของของไหล

3.1 บทนำ

ในบทนี้กล่าวถึงสมการพื้นฐานทางคณิตศาสตร์สำหรับการไหลและการถ่ายเทความร้อนที่ประกอบไปด้วย กฎการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม และพลังงาน ซึ่งได้นำไปสู่สมการควบคุมของการไหลรวมทั้งเงื่อนไขที่จำเป็นบางอย่างคือ เงื่อนไขเริ่มต้นและที่ขอบโดยเนื้อหาหลักที่ครอบคลุมในบทนี้ประกอบด้วย

- ระบบสมการ PDEs (Partial Differential Equations) ซึ่งควบคุมการไหลในพิกัดคาร์ทีเซียน(x, y, z)
- แนวคิดเกี่ยวกับความหนืดในรูปของ Newtonian ซึ่งนำไปสู่สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier – Stokes equations)
- รูปแบบเชิงอนุพันธ์และอินทิกรัลสำหรับสมการการเคลื่อนย้ายแบบปกติ

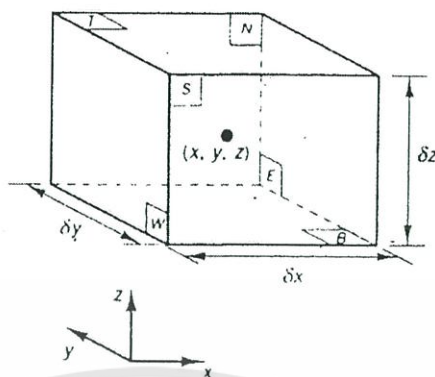
3.2 สมการควบคุมของการไหลและการถ่ายเทความร้อน

สมการควบคุมการไหลและสมการทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายกฎการอนุรักษ์ทางฟิสิกส์ดังนี้

- มวลของไหลไม่สูญหายไปไหน
- อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมเท่ากับผลรวมของแรงที่กระทำต่ออนุภาคของไหล (กฎข้อที่สองของนิวตัน)
- อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานเท่ากับผลรวมของอัตราการเพิ่มขึ้นของความร้อนกับอัตราของงานที่กระทำในอนุภาคของไหล (กฎข้อหนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์)

ของไหลจะถูกพิจารณาว่ามีความต่อเนื่องสำหรับการวิเคราะห์การไหลของของไหลที่ระดับมหภาค คือ พิจารณาที่ขนาดระดับ $1 \mu m$ ขึ้นไป โครงสร้างและการเคลื่อนที่ระดับโมเลกุลไม่สามารถนำมาพิจารณาได้ เราสนใจที่จะอธิบายพฤติกรรมของไหลในเทอมของคุณสมบัติในระดับมหภาค เช่น ความเร็ว ความดัน ความหนาแน่น อุณหภูมิ รวมทั้งอัตราการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัตินี้ เป็นต้น สิ่งนี้อาจจะคิดเป็นค่าเฉลี่ยของกลุ่มโมเลกุลจำนวนมาก ดังนั้นจุดใดๆในของไหลนั้นจะมีคุณสมบัติของไหลระดับมหภาคกล่าวคือไม่ขึ้นกับอิทธิพลจากอนุภาคในระดับโมเลกุล

เราพิจารณาชิ้นส่วนของไหลขนาดเล็กที่มีความยาวด้านเท่ากับ δx , δy และ δz ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ชิ้นส่วนของของไหลสำหรับกฎการอนุรักษ์

ผิวหน้าทั้งหกด้านจะถูกแทนด้วย N, S, E, W, T, B ซึ่งแทนถึงทิศทางในแนวเหนือใต้ ตะวันออก ตะวันตก บนและล่างตามลำดับ ศูนย์กลางของชิ้นส่วนอยู่ที่ตำแหน่ง (x, y, z) เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นระบบของ มวลโมเมนตัม และพลังงานของชิ้นส่วนของไหลจะสามารถสร้างสมการการไหลของของไหลได้

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, อุณหภูมิ และเวกเตอร์ความเร็วตามลำดับ เพื่อหลีกเลี่ยงความซับซ้อนในการเขียนค่าสัญลักษณ์แสดงคุณสมบัติดังกล่าว เราจะไม่ระบุตำแหน่งและเวลาเช่น ความดันที่ศูนย์กลาง (x, y, z) ของชิ้นส่วนของไหลที่เวลา t จะถูกแทนโดย p หรือการเปลี่ยนแปลงในทิศทาง x ของความดันที่ศูนย์กลาง (x, y, z) ที่เวลา t หนึ่งๆจะถูกแทนโดย dp/dx หลักการนี้จะถูกนำไปใช้สำหรับคุณสมบัติของไหลทั้งหมด

ชิ้นส่วนของไหลที่พิจารณานั้นมีขนาดเล็กมากจนกระทั่งคุณสมบัติของไหลที่ผิวหน้าสามารถอธิบายได้อย่างแม่นยำด้วยสองพจน์แรกของสมการ Taylor ดังนั้นสำหรับตัวอย่างความดันที่ผิวหน้า W และ E ซึ่งทั้งคู่มีระยะห่างจากศูนย์กลางของชิ้นส่วนของไหลเท่ากับ $\frac{1}{2} \cdot \delta x$ สามารถเขียนได้ดังนี้

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

3.2.1 การอนุรักษ์มวลในปัญหา 3 มิติ

ขั้นตอนแรกของการหาสมการอนุรักษ์มวล คือ การพิจารณาถึงสมดุลมวลของชิ้นส่วนของไหลดังนี้

อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลใน ชิ้นส่วนของไหล	=	อัตราการไหลสุทธิของมวล ที่เข้าไปในชิ้นส่วนของไหล
---------------------------------------------	---	-----------------------------------------------------

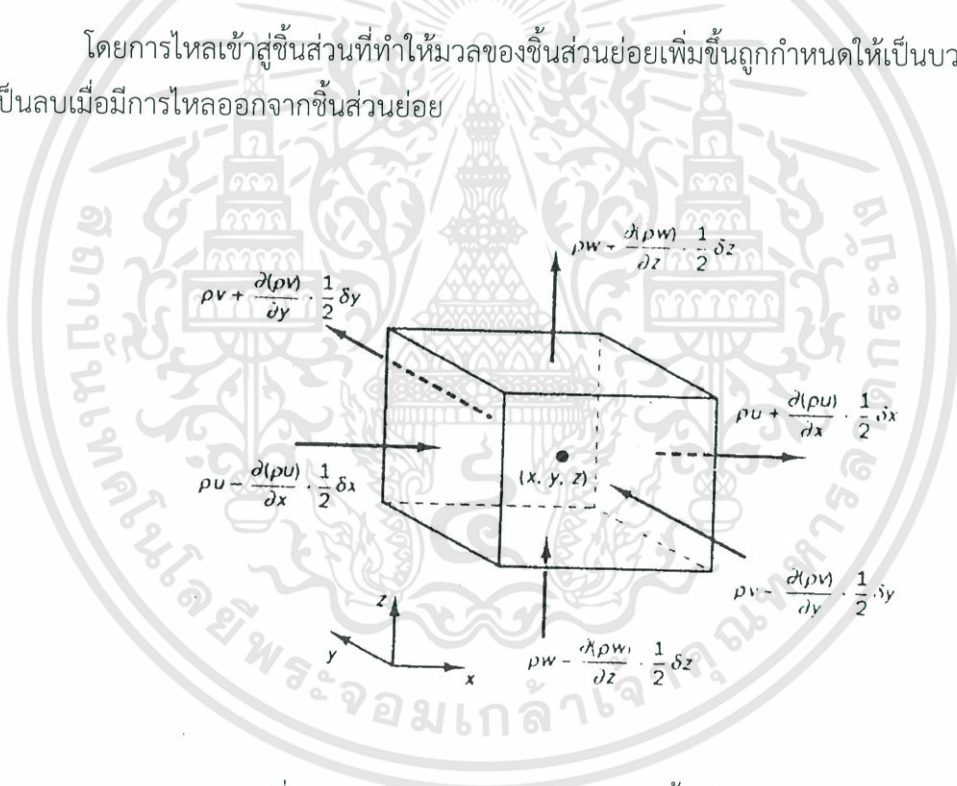
อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในชิ้นส่วนย่อยของของไหล คือ

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

อัตราการไหลเชิงมวลผ่านผิวพื้นผิวและชิ้นส่วนย่อยซึ่งนิยามโดยผลคูณของความหนาแน่นพื้นที่ผิวและความเร็วในทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวนั้น จากรูปที่ 3.2 จะพบว่าการไหลสุทธิของมวลเข้าสู่ชิ้นส่วนย่อยผ่านพื้นผิวสามารถเขียนได้ ดังนี้

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

โดยการไหลเข้าสู่ชิ้นส่วนที่ทำให้มวลของชิ้นส่วนย่อยเพิ่มขึ้นถูกกำหนดให้เป็นบวกและมีค่าเป็นลบเมื่อมีการไหลออกจากชิ้นส่วนย่อย



รูปที่ 3.2 การไหลของมวลเข้าและออกชิ้นส่วนของไหล

อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลภายในชิ้นส่วนย่อยนั้นเท่ากับอัตราของมวลสุทธิจากการไหลออกผ่านพื้นผิวของชิ้นส่วนย่อย ซึ่งเมื่อย้ายข้างให้อยู่ฝั่งเดียวกันเมื่อรวมกันแล้วจะหักล้างกันหมด 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) นี้คือสมการอนุรักษ์มวลหรือสมการความต่อเนื่อง 3 มิติแบบการไหลไม่คงตัวและอัดตัวได้ เทอมแรกทางซ้ายมือคือ อัตราการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น (มวลต่อปริมาตร) ต่อเวลา เทอมที่สองอธิบายถึงการไหลสุทธิของมวลข้ามผ่านขอบเขตของปริมาตรเล็กๆซึ่งเรียกว่า เทอมของการพา

สำหรับของไหลที่อัดตัวไม่ได้ เช่น ของเหลว ความหนาแน่นมีค่าคงที่และสมการ (3.4) จะกลายเป็น

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

หรือในรูปแบบเต็ม

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

3.2.2 อัตราการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติอนุภาคของไหลในเทอมขึ้นส่วนย่อยของไหล

ในกฎของการอนุรักษ์โมเมนตัมและพลังงานนั้นจะมีการกล่าวถึงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของอนุภาคของไหลคุณสมบัติแต่ละอย่างของอนุภาคจะเป็นฟังก์ชันของตำแหน่ง (x, y, z) ของอนุภาคและเวลา (t) ในการศึกษาี้เรากำหนดให้ค่าคุณสมบัติใดๆต่อหน่วยมวลด้วยสัญลักษณ์ 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 $dz/dt=w$ หากแทนค่าดังกล่าวไปในสมการข้างบนจะได้ว่า

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

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

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

รูปแบบนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการอธิบายความเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติของของไหลในปริมาตรเล็กๆ ที่หยุดนิ่งหนึ่งๆ เป็นการนิยามความสัมพันธ์ระหว่างอนุพันธ์ของคุณสมบัติ ϕ ของอนุภาคของไหลกับอัตราเปลี่ยนของ ϕ ในชิ้นส่วนหรือปริมาตรย่อยๆ ของของไหลนั้น

ต่อไปนี้หากเราหันมาพิจารณากฎการอนุรักษ์ของมวล ค่าของมวลต่อหน่วยปริมาตร (ความหนาแน่น ρ) คือพารามิเตอร์ที่กำลังศึกษา เมื่อพิจารณาผลรวมของอัตราการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นในปริมาตรเล็กๆ และผลของการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากการพาในสมการอนุรักษ์มวล (3.4) ก็คือ

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

ดังนั้นรูปทั่วไปของเทอมทั้งสองเทอมนี้สำหรับคุณสมบัติใดๆ ของของไหล ϕ สามารถเขียนได้ดังนี้

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

สมการที่ (3.9) เทอมแรกคือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติ ϕ ต่อหน่วยปริมาตรบวกกับเทอมที่สองคือการไหลสุทธิของ ϕ ต่อปริมาตรที่ออกจากชิ้นส่วนย่อยของไหลซึ่งเราสามารถนำมาเขียนใหม่เพื่อให้ได้ภาพความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของทั้งสองเทอมนี้กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของ ϕ ในอนุภาคของไหลดังนี้

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

เทอม $\phi \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) \right]$ เท่ากับศูนย์เนื่องจากสมการอนุรักษ์มวล (3.4) จากความสัมพันธ์ดังแสดงใน (3.10) จะได้ว่า

อัตราการเพิ่มของ ϕ สำหรับ ชิ้นส่วนย่อยของไหล	+	อัตราการไหลสุทธิของ ϕ ที่ ออกจากชิ้นส่วนย่อยของไหล	=	อัตราการเพิ่มของ ϕ สำหรับอนุภาคของไหล
------------------------------------------------------	---	------------------------------------------------------------	---	-----------------------------------------------

การเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมของอนุภาคของไหลทั้ง 3 ทิศทางอ้างอิงแกนในพิกัดฉาก รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของพลังงานซึ่งปริมาณสเกลาร์นั้นสามารถแทนพารามิเตอร์ ϕ และอัตราการเปลี่ยนแปลงของ ϕ ต่อหน่วยปริมาตร ตามที่นิยามไว้ใน (3.8) และ (3.10) สามารถแสดงได้ดังในตารางถัดไป

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

รูปแบบที่ให้ไว้ในตารางข้างบนนี้จะถูกนำไปใช้ในการสร้างสมการอนุรักษ์โมเมนตัมและพลังงานดังที่จะแสดงรายละเอียดในหัวข้อถัดจากนี้

3.2.3 สมการโมเมนตัมแบบ 3 มิติ

กฎข้อที่สองของนิวตันกล่าวไว้ว่า “อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของอนุภาคของไหลเท่ากับผลรวมของแรงที่กระทำต่ออนุภาค”

อัตราการเพิ่มโมเมนตัม ของอนุภาคของไหล	=	ผลรวมแรงที่กระทำ ต่ออนุภาคของไหล
------------------------------------------	---	-------------------------------------

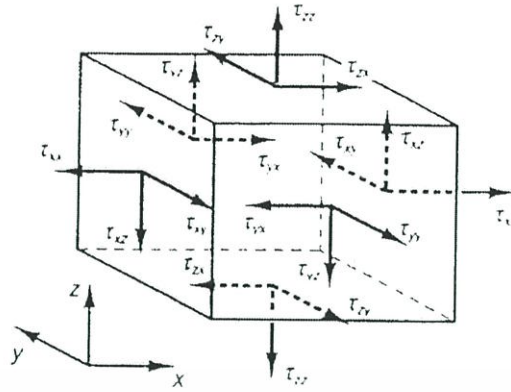
อัตราการเพิ่มโมเมนตัมต่อหน่วยปริมาตรของอนุภาคของไหลในทิศ x, y และ z กำหนดได้โดย

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

เราแบ่งประเภทของแรงที่กระทำต่ออนุภาคของไหลเป็นสองแบบคือ

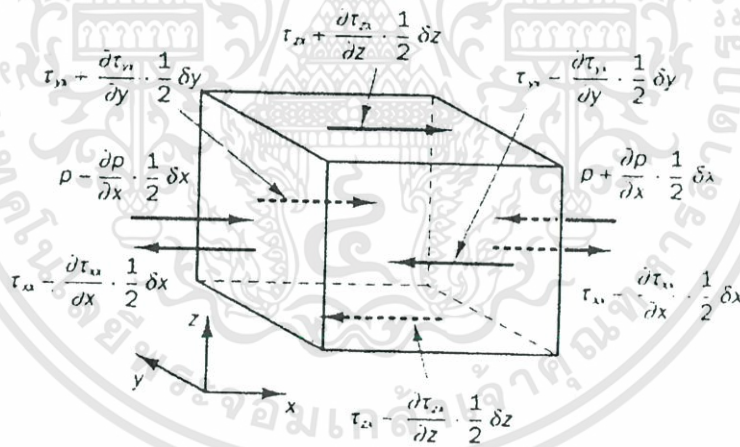
- แรงกระทำที่ผิว (Surface forces) ได้แก่ แรงเนื่องจากความดันแรงเนื่องจากความหนืดแรงโน้มถ่วง
- แรงกระทำในปริมาตร (Body forces) ของชิ้นส่วนย่อยของของไหล ได้แก่ แรงหมุนหนีศูนย์กลางแม่เหล็กไฟฟ้า (Coriolis forces)

โดยทั่วไปเทอมของแรงกระทำที่ผิวจะถูกจัดกลุ่มแยกออกต่างหากและเทอมของแรงกระทำภายในปริมาตรที่จะถูกพิจารณาเป็นเทอมของการเพิ่มและลดโมเมนตัมแยกออกมาอีกเทอมหนึ่ง ความเค้นที่กระทำต่อชิ้นส่วนย่อยของของไหลสามารถนิยามได้ด้วยเทอมของความดันและเทอมความเค้นย่อยเนื่องจากความหนืด μ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ความดันซึ่งมองว่าเป็นความเค้นตั้งฉากถูกแทนด้วย p ส่วนความเค้นเฉือนเนื่องจากความหนืดแทนโดย τ สัญลักษณ์ τ_{ij} ซึ่งให้เห็นถึงความเค้นย่อยที่กระทำในทิศทาง j บนพื้นที่ที่มีเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทาง i นั่นเอง



รูปที่ 3.3 องค์ประกอบของความเค้นบนผิวหน้าสามทิศทางทั้งสามทิศทางของชิ้นส่วนของไหล

เริ่มแรกเราพิจารณาแรงกระทำในทิศทาง x เนื่องจากความดันและความเค้นย่อย τ_{xy} , τ_{yz} และ τ_{xx} ดังในรูปที่ 3.4 ขนาดของแรงที่กระทำบนพื้นผิวเกิดจากผลคูณของความเค้นและพื้นที่ที่มีทิศทางเดียวกับแกนอ้างอิงโดยมีเครื่องหมายบวกและมีค่าเป็นเครื่องหมายลบเมื่อทิศทางตรงข้าม แรงสุทธิในทิศทาง x คือ ผลรวมของแรงย่อยที่กระทำบนชิ้นส่วนย่อยของไหลในทิศทางดังกล่าว



รูปที่ 3.4 องค์ประกอบของความเค้นในทิศทาง x

เมื่อพิจารณาผิวหน้า E, W เราได้ว่า

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

ผลรวมแรงต่อหน่วยปริมาตรทั้งหมดเนื่องจากความเค้นที่ผิวจะเท่ากับผลรวมของ (3.12a), (3.12b) และ (3.12c) ที่หารด้วยปริมาตรสุทธิ

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

เทอมที่ปรากฏใน (3.13) นี้ยังไม่รวมการพิจารณาแรงกระทำภายในชิ้นส่วนของของไหล ซึ่งสามารถถูกรวมได้โดยพิจารณาเป็นแหล่งสร้างหรือทำลายโมเมนตัมเป็นหน่วยของโมเมนตัมต่อปริมาตรต่อเวลาในทิศทาง x

ในขั้นตอนนี้สมการโมเมนตัมในทิศทาง x หาได้โดยการกำหนดให้อัตราการเปลี่ยนโมเมนตัมในทิศทาง x และอนุภาคการไหล (3.11) เท่ากับผลรวมของแรงในทิศทาง x ที่กระทำต่อชิ้นส่วนของไหลโดยความเค้นที่ผิวบวกกับอัตราการสร้างหรือสูญสลายของโมเมนตัมในทิศทาง x เนื่องจากแรงภายในชิ้นส่วนของของไหลนั้นตามแนวแกน x

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

ในทำนองเดียวกันโมเมนตัมในทิศทาง y จะเขียนได้ว่า

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

และโมเมนตัมในทิศทาง z คือ

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

ความดันมีลักษณะเป็นความเค้นอัดตั้งฉาก (Compressive normal stress) ซึ่งโดยทั่วไปมีเครื่องหมายเป็นลบ ในกรณีที่ความเค้นตั้งฉากเนื่องจากความหนืดมีลักษณะเป็นความเค้นดึง (Tensile normal stress) จะเครื่องหมายบวกเทอมของการสร้างหรือสูญสลายของโมเมนตัม $S_{Mx} = 0, S_{My} = 0$ และ S_{Mz} (3.14 a-c) คือ แรงกระทำภายในของแต่ละทิศทาง ตัวอย่างเช่นแรงกระทำภายในเนื่องจากแรงโน้มถ่วงจะถูกกำหนดให้มีค่า

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

3.2.4 สมการพลังงานในระบบ 3 มิติ

สมการพลังงานถูกหาได้จากกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ที่กล่าวไว้ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานของอนุภาคของไหลเท่ากับอัตราการเพิ่มความต้านแก่นุภาคบวกกับอัตราการทำงานของอนุภาคการไหล

อัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงานของอนุภาคของไหลต่อหน่วยปริมาตรคือ

$$\rho \frac{DE}{Dt} \quad (3.13)$$

(1) งานที่กระทำโดยแรงบนพื้นผิว

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

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

ดังนั้นเมื่อลดรูปแล้วอัตราการเกิดงานสุทธิบนพื้นผิวนั้นในทิศทาง x คือ

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

ส่วนประกอบย่อยของแรงเนื่องจากความเค้นพื้นผิวในทิศทาง y และ z ก็จะทำงานบนอนุภาคดังกล่าวเช่นกัน ในกระบวนการคิดแบบข้างต้นอัตราการเกิดงานบนอนุภาคของไหลเนื่องจากการทำงานโดยแรงเหล่านี้สามารถเขียนได้ดังนี้

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

และ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการเกิดงานทั้งหมดต่อหน่วยปริมาตรของของไหลโดยแรงบนพื้นผิวทั้งหมดคือผลรวมของ (3.16a-c) หารด้วยปริมาตร $\delta x \delta y \delta z$ เทอมของ p สามารถถูกจัดรวบรวมและเขียนในรูปแบบของไดเวอร์เจนต์ ดังนี้

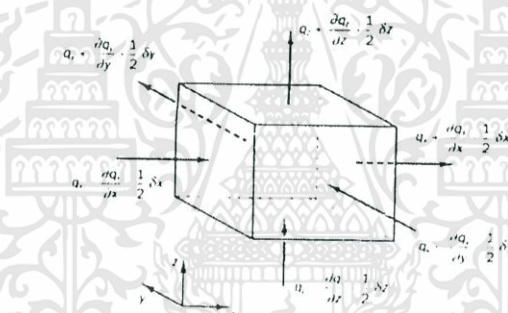
$$-\frac{\partial(up)}{\partial x} - \frac{\partial(vp)}{\partial y} - \frac{\partial(wp)}{\partial z} = -\text{div}(\rho \mathbf{u})$$

ดังนั้นอัตราการเกิดงานรวมทั้งหมดบนชิ้นส่วนของของไหลโดยความเค้นบนพื้นผิวมีหน่วยเป็นปริมาตรของพลังงานต่อหน่วยเวลาต่อหน่วยปริมาตร

$$[-\text{div}(\rho \mathbf{u})] + \left[\begin{aligned} &\frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} \\ &+ \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} \end{aligned} \right] \quad (3.17)$$

(2) 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

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

ในทำนองเดียวกันอัตราการถ่ายเทความร้อนสุทธิของไหลเนื่องจากฟลักซ์ของความร้อนในทิศทาง y และ z คือ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการความร้อนสุทธิที่เพิ่มขึ้นของอนุภาคของไหลต่อปริมาตรครอบคลุมขอบเขตของชิ้นส่วนของไหล จะเท่ากับผลรวมของ (3.18a-c) หาด้วยปริมาตร $\delta x \delta y \delta z$

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

กฎของ Fourier ของการนำความร้อนอธิบายความสัมพันธ์ของอัตราการถ่ายเทปริมาณความร้อนต่อพื้นที่ (Heat flux) กับความแตกต่างอุณหภูมิต่อหน่วยความยาว

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

สิ่งนี้สามารถเขียนได้ในรูปแบบของเวกเตอร์ได้ดังนี้

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

รวมสมการ (3.19) และ (3.20) ซึ่งจะได้ว่าอัตราการเพิ่มของความร้อนที่อนุภาคของไหลเนื่องจากการนำความร้อนผ่านพื้นผิวของชิ้นส่วนของของไหล

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

(3) สมการพลังงาน

ในหัวข้อนี้เราจะมากล่าวถึงพลังงานจำเพาะของของไหลซึ่งแทนด้วย E พลังงานของของไหล ถูกนิยามเป็นผลรวมของพลังงานความร้อนภายใน / พลังงานจลน์ $\frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2)$ พลังงานศักย์โน้มถ่วง โดยมองว่าชิ้นส่วนของไหลมีการสะสมพลังงานศักย์โน้มถ่วง พลังงานภายในอาจไม่มีการรวมเอาพลังงานศักย์เข้าไว้ในนิยามก็ได้ หากมองว่าวัตถุกำลังทำงานในขณะที่เคลื่อนที่ในสนามความโน้มถ่วงของโลกโดยงานในส่วนนี้เรียกว่า งานเนื่องจากน้ำหนักของวัตถุซึ่งเป็นเทอมการก่อกำเนิดในสมการพลังงาน มีหน่วยเป็นพลังงานต่อปริมาตรต่อหน่วยเวลา

การอนุรักษ์พลังงานของชิ้นส่วนของไหล ทำได้โดยการกำหนดให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานของชิ้นส่วนของไหล (3.15) มีค่าเท่ากับผลรวมของการเกิดงานสุทธิบนชิ้นส่วนของไหล (3.17) และอัตราการความร้อนสุทธิที่เพิ่มขึ้นของของไหลเนื่องจากฟลักซ์ความร้อน (3.21) และอัตราการเพิ่มของพลังงานเนื่องจากเทอมของการก่อกำเนิดตั้งนั้นสมการพลังงาน คือ

$$p \frac{DE}{Dt} - \text{div}(p\mathbf{u}) + \left[\begin{array}{l} \frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} \\ + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} \end{array} \right] + \text{div}(k \cdot \text{grad} T) + S_E \quad (3.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

แม้ว่า (3.22) คือ สมการพลังงานที่สมบูรณ์ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ พลังงานภายในที่สัมพันธ์กับ อุณหภูมิของของไหลและพลังงานจลน์ที่สัมพันธ์กับความเร็วของของไหล เรามักจะพิจารณาพลังงาน ในแต่ละส่วนแยกจากกัน พลังงานจลน์ที่สัมพันธ์กับความเร็วของของไหลนั้นสามารถเขียนโดยการ แปลงรูปแบบของสมการโมเมนตัม กล่าวคือทำการคูณสมการโมเมนตัมในทิศทาง x ด้วยความเร็ว u สมการโมเมนตัมในทิศทาง y ด้วยความเร็ว v และสมการโมเมนตัมในทิศทาง z ด้วยความเร็ว w และ รวมผลลัพธ์เข้าด้วยกันก่อนทำการหารด้วย 2 สิ่งนี้ทำให้ได้สมการอนุรักษ์สำหรับพลังงานจลน์ดัง ข้างล่างนี้

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

ทำการลบ (3.23) จาก (3.22) และนิยาม source term ขึ้นใหม่เป็น $S_i = S_E - u \cdot S_M$ จึงทำให้ได้ สมการพลังงานภายในดังนี้

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

ในการไหลแบบอัดตัวไม่ได้เรามี $i=cT$ ซึ่ง c คือค่าความร้อนจำเพาะและ $\text{div } \mathbf{u} = 0$ ซึ่งทำให้เรา จัดเรียงสมการ (3.24) ไปในรูปของอุณหภูมิได้ คือ

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

สำหรับสมการการไหลที่อัดตัวได้ (3.22) ถูกจัดรูปเป็นสมการสำหรับค่า enthalpy และ เนื่องจากค่า enthalpy จำเพาะ (h) และค่า enthalpy จำเพาะสัมพันธ์ (h_o) ของของไหลกำหนด ได้โดย

$$h = i + \frac{p}{\rho} \text{ และ } h_o = h + \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2)$$

รวมสองนิยามนี้กับนิยามของพลังงานจำเพาะ (E) เข้าด้วยกันเราจะได้

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

แทนค่า (3.26) ไปในสมการ (3.22) และจัดเรียบเรียงบางอย่างทำให้ได้สมการพลังงานรวม

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho h_o)}{\partial t} + \text{div}(\rho h_o \mathbf{u}) + \text{div}(k \cdot \text{grad}T) \frac{\partial p}{\partial t} + \left[\frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \right. \\ & \left. \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} \right] + S_E \end{aligned} \quad (3.27)$$

สมการ (3.24), (3.25) และ (3.27) ไม่ใช่สมการอนุรักษ์พลังงานที่เพิ่มเติมเข้ามาใหม่ หากแต่เป็นอีกรูปแบบหนึ่งของสมการพลังงาน (3.22)

3.3 สมการนาเวียร์-สโตกส์ สำหรับของไหลแบบนิวโทเนียน

สมการควบคุมประกอบด้วยตัวที่ไม่รู้ค่า คือ ความเค้นเนื่องจากความหนืดในแนวแกนย่อย τ_{ij} ในการไหลของของไหลนั้น ค่าความเค้นหนืดสามารถอธิบายได้โดยอัตราการเสียรูปร่างที่ตำแหน่งใดๆ (หรืออัตราความเครียด) ในการไหล 3 มิติ อัตราการเสียรูปร่างที่ตำแหน่งใดๆ ประกอบด้วยอัตราการเสียรูปร่างเชิงเส้นและอัตราเสียรูปร่างเชิงปริมาตร

ก๊าซทุกชนิดโดยส่วนมากมีคุณสมบัติเป็นแบบ Isotropic ในขณะที่ของเหลวบางชนิดที่ประกอบด้วยโมเลกุลของโพลิเมอร์ในจำนวนที่มากพออย่างน้อยสำคัญอาจจะประพฤติตัวเป็น Anisotropic หรือคุณสมบัติของความเค้นหนืดแบบขึ้นอยู่กัทิศทาง ซึ่งเป็นผลของการจัดเรียงตัวของโซ่โมเลกุลของโพลิเมอร์ ของไหลดังกล่าวอยู่นอกเหนือจากขอบเขตของหนังสือนี้และเราจะทำการศึกษาต่อไปโดยสมมุติว่าการไหลเป็น Isotropic

อัตราการเสียรูปร่างเชิงเส้นของชิ้นส่วนของไหลมี 9 องค์ประกอบใน 3 มิติในจำนวนนั้นมี 6 องค์ประกอบที่เป็นอิสระในของไหลแบบ Isotropic (Schlichting, 1979) ซึ่งถูกเขียนโดยสัญลักษณ์ S_{ij} ระบบการอ้างอิงในตัวห้อยต่อท้ายสัญลักษณ์ชี้ให้เห็นองค์ประกอบซึ่งเป็นระบบเดียวกับระบบอ้างอิงความเค้น (ดูในหัวข้อ 3.2.3) มีองค์ประกอบของการเสียรูปร่างเชิงเส้นแบบตั้งฉากอยู่ 3 ตัว

$$S_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} \quad S_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} \quad S_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (3.28a)$$

มีองค์ประกอบของการเสียรูปร่างเชิงเส้นแบบเฉือนทั้ง 6 ด้านของชิ้นส่วนของไหล คือ

$$\begin{aligned} S_{xy} = S_{yx} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \text{ และ } S_{xz} = S_{zx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ S_{yz} = S_{zy} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (3.28b)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเสีรูปร่างเชิงปริมาตรถูกให้โดย

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \text{div} \mathbf{u}$$

ในของไหลแบบ Newtonian ความเค้นเนื่องจากความหนืดเป็นส่วนโดยตรงกับอัตราของการเสีรูปร่างของของไหลตามกฎที่ว่าด้วยความหนืดของนิวตันในปริภูมิ 3 มิติสำหรับของไหลที่อัดตัวได้นั้นการไหลจะมีความหนืดเชื่อมโยงอย่างแปรผันตามค่าพารามิเตอร์ 2 ตัวคือ ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดที่หนึ่ง (Dynamic viscosity, μ) ซึ่งจะเชื่อมโยงกับการเสีรูปร่างเชิงเส้นของของไหล และความหนืดที่สอง, λ ที่จะเชื่อมโยงกับการเสีรูปร่างปริมาตร ดังนั้นเราจะมีองค์ประกอบย่อยของความเค้นอยู่ทั้งหมด 9 ตัวโดยมี 6 ตัวในนั้นไม่ขึ้นแก่กันหรือเรียกว่ามีระดับอิสระ (Degree of freedom) เท่ากับ 6

$$\begin{aligned} \tau_{xx} &= 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \text{div} \mathbf{u}, \tau_{yy} = 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} + \lambda \text{div} \mathbf{u}, \tau_{zz} = 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} + \lambda \text{div} \mathbf{u}, \\ \tau_{xy} &= \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right), \tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right), \\ \tau_{yz} &= \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (3.29)$$

ภาพของความหนืดในส่วนที่สองนั้นไม่ชัดเจนนัก เนื่องจากผลของมันในทางปฏิบัติมีไม่มากนักสำหรับก๊าซ การประมาณค่าที่ดีคือ $\lambda = -\frac{2}{3}\mu$ (Schlichting, 1979) และเนื่องจากเราสมมุติว่าของเหลวเป็นแบบอัดตัวไม่ได้ ซึ่งจากสมการอนุรักษ์มวลคือ $\text{div} \mathbf{u} = 0$ ดังนั้นความเค้นหนืดจะเป็น 2 เท่าของอัตราการเสีรูปร่างเชิงเส้นแทนค่าความเค้นเฉือนข้างบน (3.29) ไปใน (3.14a-c) ทำให้ได้สมการซึ่งเรียกตามชื่อ Navier-Stokes ซึ่งเป็นนักวิทยาศาสตร์ในศตวรรษที่ 19 ที่ได้พยายามดังนี้

$$\begin{aligned} \rho \frac{Du}{Dt} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \text{div} \mathbf{u} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \\ &\quad + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + S_{Mx} \end{aligned} \quad (3.30a)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{Dv}{Dt} &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[2\mu \frac{\partial v}{\partial y} + \lambda \text{div} \mathbf{u} \right] \\ &\quad + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + S_{My} \end{aligned} \quad (3.30b)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{Dw}{Dt} &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] \\ &\quad + \frac{\partial}{\partial z} \left[2\mu \frac{\partial w}{\partial z} + \lambda \text{div} \mathbf{u} \right] + S_{Mz} \end{aligned} \quad (3.30c)$$

เราสามารถจัดเรียงเทอมของความเค้นหนีตใหม่ ดังข้างล่างนี้

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

ความเค้นหนีตในสมการที่เป็นองค์ประกอบในทิศทาง y และ z สามารถจัดใหม่ในลักษณะเดียวกันเราจะสร้างสมการโมเมนต์อย่างง่ายโดยการซ้อนเทอมของความเค้นหนีตในเทอมของการเพิ่มขึ้นของโมเมนต์ (Source term) ดังนั้นจึงนิยามเทอมของการเพิ่มขึ้นของโมเมนต์ใหม่โดย

$$S_M = S_M + [S_M] \quad (3.31)$$

สมการนาเวียร์-สโตกส์สามารถถูกเขียนในรูปแบบที่ใช้สำหรับการพัฒนาวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม
ดังนี้

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \operatorname{div}(\mu \operatorname{gradu}) + S_{Mx} \quad (3.32a)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \operatorname{div}(\mu \operatorname{gradu}) + S_{My} \quad (3.32b)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \operatorname{div}(\mu \operatorname{gradu}) + S_{Mz} \quad (3.32c)$$

ถ้าเราใช้แบบจำลอง Newtonian สำหรับความเค้นหนีตในสมการพลังงานภายใน(3.24)เราจะได้

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\rho \operatorname{div} \mathbf{u} + \operatorname{div}(k \cdot \operatorname{grad} T) + \Phi + S_i \quad (3.33)$$

ผลกระทบทั้งหมดเนื่องจากความเค้นหนีตในสมการพลังงานภายในนี้สามารถเขียนได้ในเทอมของฟังก์ชันการสลายตัว (Dissipation function) Φ ซึ่งหลังจากการปรับรูปแบบสมการสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \Phi = \mu \{ & 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \\ & \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \} + \lambda (\operatorname{div} \mathbf{u})^2 \end{aligned} \quad (3.34)$$

การสลายตัวนี้เป็นค่าบวกเสมอเนื่องจากประกอบด้วยเทอมยกกำลังสองและแทนถึงการก่อกำเนิดของพลังงานภายในอันเป็นผลมาจากการเสียดรูปทรงของชิ้นส่วนของไหล อีกนัยหนึ่งคือเป็นตัวลดทอนพลังงานจลน์จากการเคลื่อนที่ของอนุภาคของไหลและเปลี่ยนไปเป็นพลังงานภายในหรือความร้อนนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 รูปแบบอนุรักษ์สำหรับสมการควบคุมของการไหล

ตารางที่ 3.1 แสดงสมการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม และพลังงานในรูปแบบของไดเวอร์เจนต์เป็นสมการแบบ 3 มิติที่ขึ้นกับเวลาของของไหล Newtonian ที่อัดตัวได้

ตารางที่ 3.1 สมการควบคุมการไหลของของไหลแบบนิวโทเนียนอัดตัวได้

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

$$\text{โมเมนตัม } x \quad \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{ grad } u) + S_{Mx} \quad (3.35a)$$

$$\text{โมเมนตัม } y \quad \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{ grad } v) + S_{My} \quad (3.35b)$$

$$\text{โมเมนตัม } z \quad \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{ grad } w) + S_{Mz} \quad (3.35c)$$

$$\text{พลังงาน} \quad \frac{\partial(\rho i)}{\partial t} + \text{div}(\rho i \vec{u}) = -\rho \text{div } \vec{u} + \text{div}(k \text{ grad } T) + \Phi + S_i \quad (3.35a)$$

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

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

เทอมการก่อกำเนิดของโมเมนตัม S_M และฟังก์ชันการสลายตัว Φ แสดงใน (3.31) และ (3.34) ตามลำดับ เป็นที่น่าสนใจที่ว่าสมมติฐานสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ทำให้ได้สมการการไหล (PDEs) 5 สมการและสมการพีชคณิต 2 สมการรวมเป็น 7 สมการ ต่อมาเราใช้แนวคิดของของไหล Newtonian ซึ่งอธิบายความเค้นหนืดในเทอมของความแตกต่างขององค์ประกอบความเร็วต่อหน่วยความยาว เป็นผลให้เกิดตัวไม่รู้ค่า 7 ตัว จำนวนที่เท่ากันของสมการและตัวไม่รู้ค่าของระบบนี้สามารถถูกแก้ปัญหาได้ด้วยเงื่อนไขที่ขอบและค่าเริ่มต้น (Boundary and Initial condition)

3.5 รูปแบบเชิงอนุพันธ์และอินทิกรัลสำหรับสมการการเคลื่อนย้ายแบบปกติ

จากตารางที่ 3.1 จะพบว่า มีโครงสร้างสมการหลายสมการที่มีความคล้ายคลึงกัน ถ้าเราพิจารณา ϕ เป็นตัวแปรแสดงคุณสมบัติใดๆของของไหลแล้ว รูปแบบของสมการอนุรักษ์ที่ถูกสร้างขึ้นนั้นก็จะมีโครงสร้างคล้ายกับสมการข้างต้นเช่นกัน ทั้งนี้รวมทั้งสมการสำหรับปริมาณสเกลาร์ เช่น อุณหภูมิและความเข้มข้นของสสาร สามารถเขียนได้ในรูปแบบดังนี้

$$\frac{\partial(\rho \phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho \phi \vec{u}) = \text{div}(\Gamma \text{ grad } \phi) + S_\phi \quad (3.28)$$

หรืออธิบายได้ คือ

อัตราการ เพิ่ม ϕ ของ ชิ้นส่วนของไหล	การไหลสุทธิของ ϕ ที่ ออกจากชิ้นส่วน ของไหล	=	อัตราการเพิ่มขึ้น ของ ϕ เนื่องจาก การแพร่	อัตราการ เพิ่มขึ้นของ ϕ + เนื่องจากการ ก่อกำเนิด
------------------------------------------------	-------------------------------------------------------	---	------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------

สมการ (3.37) ถูกเรียกว่าสมการการเคลื่อนย้ายของคุณสมบัติ ϕ ซึ่งพบว่ามันสามารถอธิบายการเคลื่อนย้ายของปริมาณทางฟิสิกส์ที่แตกต่างกันได้คือ เทอมที่แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงและเทอมของการพอยูตันซ้ายมือของสมการ ส่วนเทอมของการแพร่ (Γ คือการแพร่ทางความร้อน) และเทอมของการก่อกำเนิดอยู่ขวามือตามลำดับ โดยได้ซ่อนเทอมซึ่งไม่เหมือนกันไว้ในเทอมของการก่อกำเนิดนั่นเอง

สมการ(3.37) ถูกใช้เป็นจุดเริ่มต้นสำหรับขั้นตอนการคำนวณในวิธีปริมาตรสืบเนื่องโดยกำหนด ϕ เท่ากับ $1, n, v, w$ และ i (หรือ T หรือ h_o) และเลือกค่าที่เหมาะสมสำหรับสัมประสิทธิ์การแพร่ Γ และเทอมการก่อกำเนิดเราได้รูปแบบพิเศษของตารางที่ 3.1 ในสมการ Partial differential equations ทั้ง 5 ชุด ซึ่งประกอบด้วยสมการอนุรักษ์มวล โมเมนตัมและพลังงาน ทั้งนี้ขั้นตอนหลักของวิธีปริมาตรสืบเนื่องคือการอินทิเกรตสมการ (3.37) เหนือปริมาตรควบคุม (CV) 3 มิติซึ่งทำให้ได้

$$\int_{cv} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dV + \int_{cv} \text{div}(\rho\phi\mathbf{u})dV = \int_{cv} \text{div}(\Gamma \text{grad } \phi)dV + \int_{cv} S_\phi dV \quad (3.38)$$

การอินทิเกรตเชิงปริมาตรในเทอมที่สองด้านซ้ายมือคือ เทอมการพา และในเทอมแรกทางขวามือ คือเทอมของการแพร่ ถูกเขียนใหม่เป็นการอินทิเกรตเชิงพื้นผิวของปริมาตรควบคุมโดยใช้ทฤษฎี Gauss' divergence สำหรับเวกเตอร์ \mathbf{a} ใดๆทฤษฎีนี้กล่าวว่า

$$\int_{cv} \text{div}(\mathbf{a})dV = \int_A \mathbf{n} \cdot \mathbf{a}dA \quad (3.39)$$

ความหมายทางคณิตศาสตร์ของ $\mathbf{n} \cdot \mathbf{a}$ คือ องค์ประกอบย่อยของเวกเตอร์ \mathbf{a} ในทิศทางของเวกเตอร์ \mathbf{n} ตั้งฉากต่อพื้นผิวของชิ้นส่วน dA ฉะนั้นการอินทิเกรตของ divergence ของเวกเตอร์ \mathbf{a} เหนือปริมาตรจะเท่ากับองค์ประกอบย่อยของเวกเตอร์ \mathbf{a} ในทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวตลอดทั้งขอบเขตของปริมาตรรวม(Integrated) ซึ่งก็คืออาณาบริเวณของพื้นผิว A ทั้งหมด การประยุกต์ทฤษฎี Gauss' divergence (สมการที่ 3.38) จะทำให้สามารถเขียนได้ ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t} (\int_{cv} \rho\phi dV) + \int_A \mathbf{n} \cdot (\rho\phi\mathbf{u})dA = \int_A \mathbf{n} \cdot (\Gamma \text{grad } \phi)dA + \int_{cv} S_\phi dV \quad (3.40)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับชั้นของการอินทิเกรตและการอนุพันธ์ได้ถูกเปลี่ยนแปลงในเทอมแรกของทางซ้ายมือของสมการ (3.40) เพื่อแสดงให้เห็นความหมายทางคณิตศาสตร์ เทอมนี้มีนัยถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดของคุณสมบัติ ϕ ในปริมาณควบคุม ผลคูณ $n \cdot (\rho\phi\mathbf{u})dA$ หมายถึง ฟลักซ์ขององค์ประกอบ

ของคุณสมบัติ ϕ เนื่องจากการไหลของของไหลในทิศทางของเวกเตอร์ตั้งฉาก \mathbf{n} ซึ่งก็คือออกจากพื้นผิวของชิ้นส่วนของไหล ดังนั้น เทอมที่สองด้านซ้ายมือของสมการ (3.40) หรือเทอมการพาเป็นอัตราการลดลงสุทธิของคุณสมบัติของไหล ϕ ของชิ้นส่วนของไหลเนื่องจากการพา

ฟลักซ์การแพร่เป็นบวกในทิศทางของการเปลี่ยนแปลงต่อหน่วยความยาวของคุณสมบัติของไหล ϕ มีค่าลบ เช่น ตลอดแนวทาง $(-\text{grad } \phi)$ สำหรับตัวอย่างนี้ความร้อนถูกนำหรือแพร่ไปในทิศทางของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่อหน่วยความยาว หรือที่เรียกว่า เกรเดียนต์ที่เป็นลบ ดังนั้น ผลคูณของ $n \cdot (-\Gamma \text{grad } \phi)$ คือ องค์ประกอบของฟลักซ์การแพร่ในทิศทางของเวกเตอร์ตั้งฉากที่ทิศพุ่งออกไปจากพื้นผิวของชิ้นส่วนของไหล ในทำนองเดียวกันกับผลคูณ $n \cdot (\Gamma \text{grad } \phi)$ ซึ่งเท่ากับ $-n \cdot (-\Gamma \text{grad } \phi)$ ซึ่งก็คือ ฟลักซ์การแพร่ที่มีค่าบวก มีทิศทางตรงกันข้ามกับเวกเตอร์ตั้งฉากหรือเข้าไปในชิ้นส่วนย่อยนั่นเอง เทอมแรกทางขวามือของ (3.40) คือเทอมการแพร่ ดังนั้นจะสอดคล้องกับฟลักซ์ที่ไหลเข้าไปในชิ้นส่วนและแทนอัตราการเพิ่มสุทธิของคุณสมบัติ ϕ ของชิ้นส่วนของไหลเนื่องจากการแพร่เทอมสุดท้ายทางขวามือของสมการนี้ได้ให้อัตราการเพิ่มของคุณสมบัติ ϕ ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากผลของการก่อกำเนิดภายในชิ้นส่วนของไหล

ในทำนองเดียวกัน ความสัมพันธ์ (3.40) ของของไหลในปริมาตรควบคุมสามารถอธิบายได้ดังนี้

อัตราการเพิ่ม ϕ	+	อัตราการลดลงสุทธิของ ϕ เนื่องจากการพาที่คร่อมผ่านขอบเขต	=	อัตราการเพิ่มขึ้นของ ϕ เนื่องจากการแพร่	+	อัตราการสร้างสุทธิของ ϕ
----------------------	---	--------------------------------------------------------------	---	----------------------------------------------	---	------------------------------

การอธิบายนี้ยืนยันได้ว่าการอินทิเกรตของสมการ Partial differential ยังคงสภาพของการอนุรักษ์ปริมาณทางฟิสิกส์ของของไหลถึงแม้ว่าในระดับปริมาตรควบคุมที่มีขนาดจำกัด (Microscopic)

ในปัญหาสถานะคงตัว (Steady state) อัตราของเทอมที่การเปลี่ยนแปลงของ (3.40) เท่ากับศูนย์ สิ่งนี้นำไปสู่รูปแบบอินทิเกรตของสมการการเคลื่อนที่แบบสถานะคงตัว

$$\int_A \mathbf{n} \cdot (\rho\phi\mathbf{u})dA = \int_A \mathbf{n} \cdot (\Gamma \text{grad } \phi)dA + \int_{cv} S_\phi dV \quad (3.41)$$

ในปัญหาที่เกี่ยวข้องกับเวลาจำเป็นต้องอินทิเกรตเทียบเวลา t ในช่วงเวลาน้อยๆ Δt จาก t จนกระทั่งถึง $t+\Delta t$ ทำให้ได้รูปแบบอินทิเกรตทั่วไปของสมการการเคลื่อนที่ คือ

$$\begin{aligned} & \int_{\Delta t} \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{cv} \rho \phi dV \right) dt + \int_{\Delta t} \int_A \mathbf{n} \cdot (\rho \phi \mathbf{u}) dA dt \\ & = \int_{\Delta t} \int_A \mathbf{n} \cdot (\Gamma \text{grad } \phi) dA dt + \int_{\Delta t} \int_{cv} S_\phi dV dt \end{aligned} \quad (3.42)$$

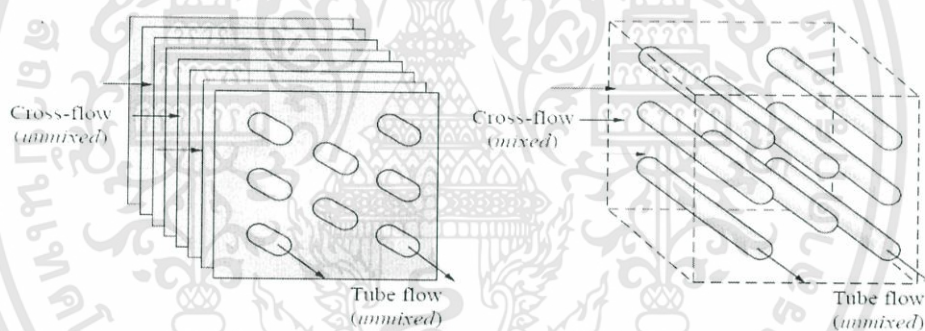


บทที่ 4

การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน

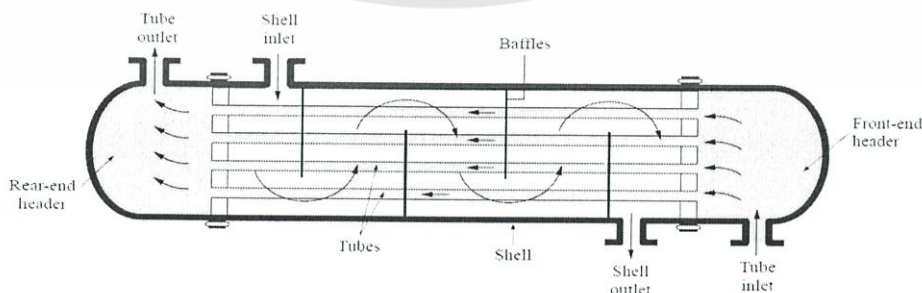
4.1 บทนำ

ขบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างกระแสของไหลแตกต่างกัน 2 ชนิด เป็นสิ่งที่สำคัญและสามารถพบในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนธรรมดาอาจแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ซึ่งขึ้นกับการจัดวางทิศทางสัมผัสของทิศทางการไหลของกระแสของไหลทั้ง 2 ชนิด ถ้ากระแสทั้งสองไหลตัดซึ่งกันและกันในช่องว่างที่โดยปกติเป็นมุมฉาก เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนี้ถูกเรียกว่าเป็น “เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตัดกันหรือตั้งฉากกัน” (Cross-flow heat exchanger) ตัวอย่างเครื่องแบบนี้ก็เช่น หม้อน้ำรถยนต์ หรือหน่วยหล่อเย็นในท่อระบบปรับอากาศ



รูปที่ 4.1 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตั้งฉาก

ชนิดที่สองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนประกอบด้วยกระแสการไหล 2 ชนิดเคลื่อนที่ในทิศทางขนานกันในช่องว่าง หรือเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Shell-and-Tube



รูปที่ 4.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Shell-and-Tube

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การไหลของของไหล

สำหรับการไหลของอากาศผ่านครีบบนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตั้งฉากนั้น ซึ่งความกว้างระหว่างครีบบมีค่าน้อยมาก อากาศจะประพฤติตัวเป็นการไหลแบบลามินาร์ โดยเราสามารถคำนวณค่าเรย์โนลด์ได้จาก

$$Re = \frac{\rho U_c V_d}{\mu} \quad (4.1)$$

ซึ่ง U_c เป็นความเร็วเฉลี่ยพื้นที่หน้าตัดที่น้อยที่สุดซึ่งตั้งฉากกับการไหล

V_d เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อรวมทั้งขาของท่อ (Fin collar outside diameter, $D_c + 2\delta$)

ความดันตกที่เกิดขึ้นในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน คือ ปริมาณกำลังที่เราต้องเพิ่มเข้าไปเพื่อให้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถทำงานได้ ซึ่งในส่วนของความดันตกของทั้งระบบเราสามารถแยกออกได้เป็น 2 ส่วนคือ ความดันตกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และความดันตกที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากอุปกรณ์ที่ทำงานเพื่อให้ของไหลไหลผ่าน เช่น วาล์ว หัวฉีด รวมถึงข้อต่อต่างๆ ซึ่งในหัวข้อนี้เราจะพิจารณาเฉพาะความดันที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ความดันตกที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางจะเกิดขึ้นจากสาเหตุดังต่อไปนี้

1. แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นบริเวณของพื้นที่ทำการแลกเปลี่ยนความร้อน
2. อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของของไหล
3. การยุบตัวหรือขยายตัวของของไหลเมื่อผ่านเข้าออกบริเวณแกนกลางของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
4. ผลกระทบอันเนื่องมาจากแรงโน้มถ่วง

ซึ่งเราสามารถแสดงในรูปสมการเป็น

$$\frac{\Delta P}{P_{in}} = \frac{G^2}{2g_c} \cdot \frac{v_1}{P_{in}} \left[(K_c + 1 - \sigma^2) + 2 \left(\frac{v_2}{v_1} - 1 \right) + f \frac{A_o v_m}{A_c v_1} - (1 - \sigma^2 - K_E) \frac{v_2}{v_1} \right] \quad (4.2)$$

อย่างไรก็ตามค่าสัมประสิทธิ์ทางเข้าและค่าสัมประสิทธิ์ทางออก (K_c, K_E) จะมีค่าเป็นศูนย์เมื่อการไหลตั้งฉากกับแนวการจัดเรียงของท่อ ซึ่งจะได้ผลลัพธ์เป็น

$$\frac{\Delta P}{P_{in}} = \frac{G^2}{2g_c} \cdot \frac{v_1}{P_{in}} \left[(1 - \sigma^2) \left(\frac{v_2}{v_1} - 1 \right) + f \frac{A_o v_m}{A_c v_1} \right] \quad (4.3)$$

ซึ่ง G คือ มวลของกระแสการไหล ณ พื้นที่หน้าตัดที่น้อยที่สุด มีค่าเท่ากับ $U_c \cdot \rho$

v_1 เป็นความหนาแน่นจำเพาะ $\left(\frac{1}{\rho_1} \right)$ ณ บริเวณทางเข้า

v_2 เป็นความหนาแน่นจำเพาะ $\left(\frac{1}{\rho_1} \right)$ ณ บริเวณทางออก

v_m เป็นความหนาแน่นจำเพาะเฉลี่ยของบริเวณทางเข้าและทางออก $\left(\frac{v_1 + v_2}{2} \right)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

σ เป็นอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดที่น้อยที่สุดต่อพื้นที่ทางเข้า

A_c เป็นพื้นที่หน้าตัดที่น้อยที่สุด

A_G เป็นพื้นที่สำหรับการแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งหมด

และเนื่องจากความหนาแน่นจำเพาะของบริเวณทางเข้าและทางออกมีค่าแตกต่างกันไม่มากนักดังนั้นเราจะได้ว่า

$$\frac{\Delta P}{P_{in}} = \frac{G^2}{2g_c} \cdot \frac{v_1}{P_{in}} \left[f \frac{A_o v_m}{A_c v_1} \right] \quad (4.4)$$

ดังนั้นเราสามารถคำนวณค่าตัวประกอบเสียดทานได้เป็น

$$f = \frac{(2\Delta P)}{\rho U_c^2} \left(\frac{A_c}{A_o} \right) \quad (4.5)$$

4.3 การถ่ายเทความร้อน

ความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนนิยมใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเพื่อใช้บอกวัดขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งสัมประสิทธิ์นี้นิยามอยู่ในเทอมของความต้านทานความร้อนรวมต่อการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหล 2 ชนิด สัมประสิทธิ์นี้หาได้โดยการรวมความต้านทานการนำความร้อนและการพาความร้อนระหว่างของไหลที่ถูกแยกโดยระนาบหลายชั้น และผนังทรงกระบอกต่างๆ เข้าด้วยกันเป็นไปตามสมการ

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{U_c A_c} = \frac{1}{U_h A_h} = \frac{1}{(\eta_o h A)_c} + R_w + \frac{1}{(\eta_o h A)_h} \quad (4.6)$$

โดยทั่วไประหว่างการใช้งานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตามปกติพื้นผิวของหมันย้อมสกปรกสิ่งที่เป็นปอนอยู่ในของไหล สนิม หรือปฏิกิริยาต่างๆ ระหว่างของไหลและวัสดุผนัง เป็นผลให้มีตะกรันหรือคราบสกปรก ซึ่งเพิ่มความต้านทานต่อการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลทั้งสองชนิด ผลนี้สามารถแก้ไขโดยใส่ค่าความต้านทานเพิ่มเติมเรียกว่า เฟอร์ลิงแฟคเตอร์ (Fouling factor, R_f) ค่านี้จะขึ้นกับอุณหภูมิของการทำงาน ความเร็วเร็วของไหล และระยะการบำรุงรักษาเครื่อง ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมได้เป็น

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{U_c A_c} = \frac{1}{U_h A_h} = \frac{1}{(\eta_o h A)_c} + \frac{R''_{f,c}}{(\eta_o h A)_c} + R_w + \frac{R''_{f,h}}{(\eta_o h A)_h} + \frac{1}{(\eta_o h A)_w} \quad (4.7)$$

ซึ่ง R_w คือ ความต้านทานการนำความร้อน

η_o คือ ประสิทธิภาพของผิวรวม (Temperature effectiveness) ของผิวที่มีครีบ

เทอมการนำความร้อนของผนังอาจตัดทิ้งได้เนื่องจากผนังบางและค่า k ของผนังมักมีค่าสูง ในทำนองเดียวกัน เราสามารถละการคำนวณพจน์ของความต้านทานในการพา ถ้าค่า h อันหนึ่งมีค่าน้อยกว่าอีกอันหนึ่งมาก ดังนั้นจึงเป็นหลักสำหรับหาค่า U ได้ง่ายขึ้น ค่าของ U บางค่าได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 ค่าของเฟวลิง แฟคเตอร์

Fluid	$R_f, m^2 \cdot ^\circ C/W$
Distilled water, sea water, river water, boiler feedwater:	
Below 50°C	0.0001
Above 50°C	0.0002
Fuel oil	0.0009
Steam (oil-free)	0.0001
Refrigerants (liquid)	0.0002
Refrigerants (vapor)	0.0004
Alcohol vapors	0.0001
Air	0.0004

ตารางที่ 4.2 ค่าโดยประมาณของ U

Type of heat exchanger	$U, W/m^2 \cdot ^\circ C^*$
Water-to-water	850–1700
Water-to-oil	100–350
Water-to-gasoline or kerosene	300–1000
Feedwater heaters	1000–8500
Steam-to-light fuel oil	200–400
Steam-to-heavy fuel oil	50–200
Steam condenser	1000–6000
Freon condenser (water cooled)	300–1000
Ammonia condenser (water cooled)	800–1400
Alcohol condensers (water cooled)	250–700
Gas-to-gas	10–40
Water-to-air in finned tubes (water in tubes)	30–60†
	400–850†
Steam-to-air in finned tubes (steam in tubes)	30–300†
	400–4000‡

ปริมาณของความร้อนที่มีการถ่ายเทระหว่างของไหล 2 ชนิดภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเราสามารถจะคำนวณได้จาก

$$\dot{Q} = (\dot{m}C_p)_h (T_{h,1} - T_{h,2}) = (\dot{m}C_p)_c (T_{c,1} - T_{c,2}) \quad (4.8)$$

ตัวห้อย c และ h หมายถึง ของไหลเย็นและของไหลร้อนตามลำดับ ส่วนตัวห้อย 1 และ 2 หมายถึง ของไหลเข้าและของไหลออกตามลำดับ

การวิเคราะห์คำนวณหาขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เราสามารถวิเคราะห์ได้โดยวิธีดังต่อไปนี้

1. วิธีความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยแบบลอการิทึม (Log Mean Temperature)
2. วิธี Effectiveness-NTU (Effectiveness and Number of Transfer units)

4.3.1 วิธีความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยแบบลอการิทึม (Log Mean Temperature)

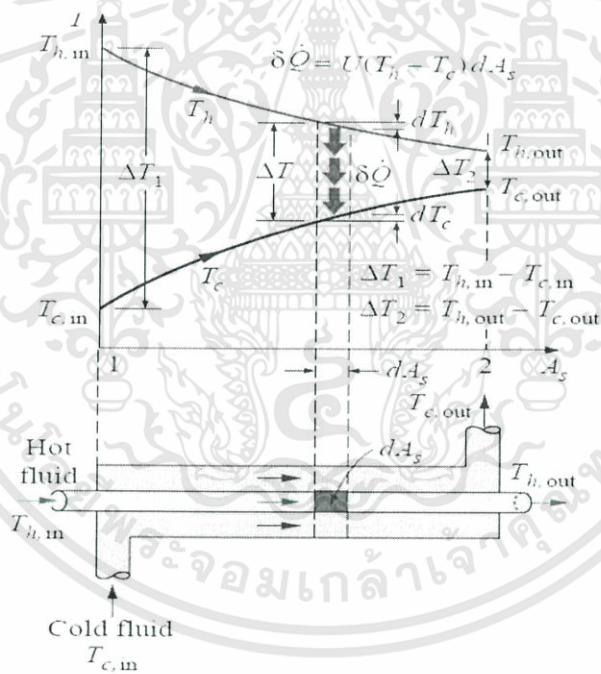
โดยเนื่องจากแบบจำลองที่ทำการศึกษาคำนวณอุณหภูมิทางเข้าและทางออกของไหลทั้งหมดได้ ทางคณะผู้ทำจึงเลือกวิธีการดังกล่าวในการคำนวณ เมื่อพิจารณาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อนกัน ตามรูปที่ 4.3 โดยของไหลอาจจะไหลแบบสวนกัน (Counter flow) หรือไหลตามกัน (Pararell Flow) ก็ได้ เราสามารถคำนวณหาการถ่ายเทความร้อนของท่อได้

$$\dot{Q} = UA\Delta T_m \tag{4.9}$$

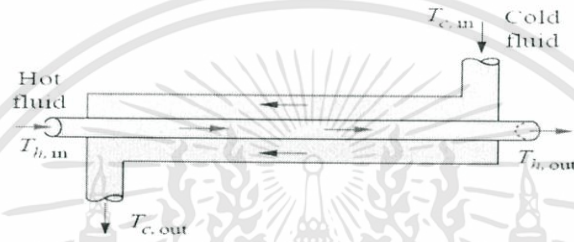
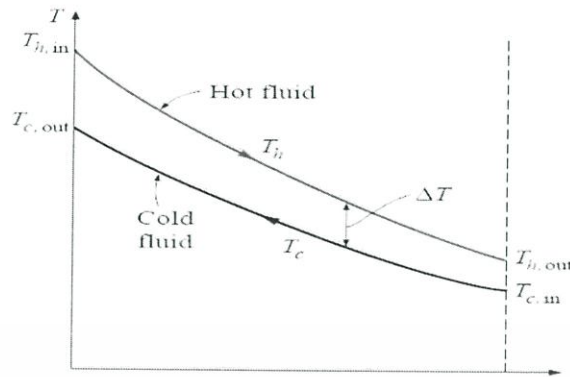
ซึ่ง U คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม

A คือ พื้นที่ผิวสำหรับการถ่ายเทความร้อนรวมตามนิยามของ U

ΔT_m คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยที่เหมาะสมผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 4.3 รูปร่างของอุณหภูมิสำหรับการไหลตามกันในเครื่องแบบท่อซ้อนกัน



รูปที่ 4.4 รูปร่างของอุณหภูมิสำหรับการไหลสวนทางกันในเครื่องแบบท่อซ้อนกัน

สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลสวนกัน ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านชั้นส่วนของพื้นที่ dA อาจเขียนได้เป็น

$$dq = -\dot{m}_h C_{ph} dT_c \tag{4.10}$$

$$dT_h = \frac{-dq}{\dot{m}_h c_{ph}} = \frac{-dq}{C_h} \tag{4.11}$$

$$dT_c = \frac{dq}{\dot{m}_h c_{ph}} = \frac{dq}{C_h} \tag{4.12}$$

ดังนั้น
$$dT_h - dT_c = d(T_h - T_c) = -dq\left(\frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c}\right) \tag{4.13}$$

ในทำนองเดียวกันการถ่ายเทความร้อนอาจเขียนได้ในรูป

$$dq = U(T_h - T_c)dA \tag{4.14}$$

$$d(T_h - T_c) = -U(T_h - T_c)dA\left(\frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c}\right) \tag{4.15}$$

หรือ
$$\frac{d(T_h - T_c)}{T_h - T_c} = -U\left(\frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c}\right)dA \tag{4.16}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินทิเกรตจากเงื่อนไข 1 ไป 2 (คือทางเข้าถึงทางออก) ได้

$$\frac{\ln(T_{h2}-T_{c2})}{T_{h1}-T_{c1}} = -UA\left(\frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c}\right) \quad (4.17)$$

อินทิเกรตสมการ (4.11) และ (4.12) จากเงื่อนไข 1 ไปสู่ 2 แล้วนำมาเขียนใหม่ได้

$$\dot{m}_h c_{ph} = \frac{q}{T_{h1}-T_{h2}} = C_h \quad (4.18)$$

$$\dot{m}_c c_{ch} = \frac{q}{T_{c1}-T_{c2}} = C_c \quad (4.19)$$

แทนค่ากลับในสมการ (4.17) ได้

$$q = UA \frac{(T_{h2}-T_{c2})-(T_{h1}-T_{c1})}{\ln[(T_{h2}-T_{c2})/(T_{h1}-T_{c1})]} \quad (4.20)$$

เปรียบเทียบกับสมการ (4.9) และ (4.20) จะได้

$$\Delta T_m = \frac{(T_{h2}-T_{c2})-(T_{h1}-T_{c1})}{\ln[(T_{h2}-T_{c2})/(T_{h1}-T_{c1})]} \quad (4.21)$$

$$\Delta T_c = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln[\Delta T_2/\Delta T_1]} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln[\Delta T_1/\Delta T_2]} \quad (4.22)$$

ความแตกต่างของอุณหภูมินี้เรียกว่า Log Mean Temperature Difference (LMTD) ซึ่งเป็นความแตกต่างของอุณหภูมิที่ปลายข้างหนึ่งของเครื่อง ลบด้วยความแตกต่างของอุณหภูมิที่ปลายอีกข้างหนึ่งหารด้วยลอการิทึมธรรมชาติของอัตราส่วนของความแตกต่างของอุณหภูมิทั้งสองนี้ สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลสวนทางกัน เราสามารถหาค่าเฉลี่ยความแตกต่างของอุณหภูมิได้ในทำนองเดียวกันนั่นคือ

$$\Delta T_m = \frac{(T_{h2}-T_{c2})-(T_{h1}-T_{c1})}{\ln[(T_{h2}-T_{c2})/(T_{h1}-T_{c1})]} = \frac{(T_{h2}-T_{c1})-(T_{h1}-T_{c2})}{\ln[(T_{h2}-T_{c1})/(T_{h1}-T_{c2})]} \quad (4.23)$$

4.3.2 วิธี Effectiveness-NTU (Effectiveness and number of Transfer Units)

ความยุ่งยากอย่างหนึ่งในการใช้วิธี LMTD หาสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน คือค่า LMTD สามารถหาได้ถ้าไม่ทราบอุณหภูมิทางเข้า-ออกของของไหลทั้งหมด ในปัญหาการออกแบบจริงค่าอุณหภูมิเหล่านี้ต่างรู้ จึงสามารถใช้วิธี LMTD ได้อย่างไรก็ตามถ้าเราประสงค์ที่จะประเมินสถานะ (เช่น q) ของเครื่องที่กำหนดเงื่อนไขทางเข้ามาเรียบร้อยแล้ว อุณหภูมิทางออกไม่ทราบจนกว่าจะหาค่า q ได้เสียก่อน ดังนั้นเราจึงต้องใช้การคำนวณแบบย่ำ (Iteration) โดยสมมติอุณหภูมิทางออกก่อนเพื่อมาหา q ที่ต้องการ ถ้าค่า q ที่ได้สอดคล้องกับค่า q ที่เราต้องการแสดงว่าอุณหภูมิทางออกที่เราสมมุติใช้ได้ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเป็นวิธีการที่ค่อนข้างยุ่งยากไม่สะดวก

ค่า effectiveness (ε) ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน นิยามเป็นอัตราส่วนของความร้อนที่ถูกถ่ายเทจริงโดยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่อความร้อนที่ควรจะถูกถ่ายเทไปได้สูงสุดหรือ

$$\text{Effectiveness} = \varepsilon = \frac{q}{q_{\max}} \quad (4.24)$$

โดยที่การถ่ายเทความร้อนจริง (q) หาได้จากสมดุลพลังงานกระแสของไหลร้อนหรือกระแสของไหลเย็นก็ได้

$$q = \dot{m}_c c_{pc} (T_{c2} - T_{c1}) = \dot{m}_h c_{ph} (T_{h1} - T_{h2}) \quad (4.25)$$

ส่วนค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่ควรจะเป็น (q_{\max}) ซึ่งถูกจำกัดโดยกระแสของไหลที่มีอัตราความจุความร้อนน้อยที่สุดนั่นคือ

$$q_{\max} = \dot{m}_c c_{pc} (T_{h1} - T_{c1}) \quad \dot{m}_c c_{pc} < \dot{m}_h c_{ph} \quad (4.26)$$

$$q_{\max} = \dot{m}_h c_{ph} (T_{h1} - T_{c1}) \quad \dot{m}_c c_{pc} > \dot{m}_h c_{ph} \quad (4.27)$$

$$\varepsilon = (T_{c2} - T_{c1}) / (T_{h1} - T_{c1}) \quad \dot{m}_c c_{pc} < \dot{m}_h c_{ph} \quad (4.28)$$

$$\varepsilon = (T_{h1} - T_{h2}) / (T_{h1} - T_{c1}) \quad \dot{m}_c c_{pc} > \dot{m}_h c_{ph} \quad (4.29)$$

ขนาดความร้อนสัมพัทธ์ของกระแสของไหลทั้งสองเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมาก และเพื่อที่จะทำให้เป็นปริมาณที่น้อยกว่าหนึ่งเสมอ ดังนั้น อัตราความจุ (Capacity ratio) นิยามเป็น

$$C_r = (\dot{m}_c c_p)_{\min} / (\dot{m}_c c_p)_{\max} \quad (4.30)$$

ผลคูณ UA แทนความจุการแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่อองศาของความแตกต่างอุณหภูมิ ขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนี้สามารถทำเป็นรูปไร้มิติได้โดยอิงความจุของการเก็บสะสมของกระแสของไหลอันหนึ่ง เนื่องจากกระแสซึ่งมีอัตราความจุความร้อนน้อยกว่าอีกอันจะจำกัดการถ่ายเทความร้อนสูงสุด จึงต้องใช้ในรูปไร้มิติได้ ดังนั้น จำนวนของหน่วยถ่ายเทของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Number of Transfer Units, NTU) นิยามเป็น

$$NTU = \frac{UA}{(\dot{m}_c c_p)_{\min}} \quad (4.31)$$

ค่า ε สามารถเขียนเป็นฟังก์ชันของ C_r และ NTU ได้ โดยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนใดๆค่า C_r และ NTU ทั้งสองนี้เกี่ยวข้องเพียงเฉพาะ อัตราการไหลของของไหล ความจุความร้อน ขนาดของเครื่อง และค่า U ดังนั้น ε กับ NTU เราจะพิจารณาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตามกันซึ่ง $C_{\min} = C_h$ ดังนั้น $C_{\max} = C_c$ และจากสมการที่ผ่านมาได้

$$\varepsilon = (T_{h1} - T_{h2}) / (T_{h1} - T_{c1}) \text{ และ } q = \dot{m}_c c_{pc} (T_{c2} - T_{c1}) = \dot{m}_h c_{ph} (T_{h1} - T_{h2})$$

ดังนั้น

$$C_{\min}/C_{\max} = (T_{c2} - T_{c1})/(T_{h1} - T_{h2}) \quad (4.32)$$

จากสมการ (4.17) เขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{\ln(T_{h2}-T_{c2})}{(T_{h1}-T_{c1})} = -UA \left(\frac{1}{C_{\min}} + \frac{1}{C_{\max}} \right) = \frac{-UA}{C_{\min}} \left(1 + \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \right) \quad (4.33)$$

แทนด้วยสมการ (4.31) ได้

$$\frac{(T_{h2}-T_{c2})}{(T_{h1}-T_{c1})} = \exp \left[-NTU \left(1 + \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \right) \right] \quad (4.34)$$

เทอมซ้ายมือจัดใหม่ได้

$$\frac{(T_{h2}-T_{c2})}{(T_{h1}-T_{c1})} = \frac{T_{h2}-T_{h1}+T_{h1}-T_{c2}}{T_{h1}-T_{c1}} \quad (4.35)$$

จากสมการ (4.32) ได้ $T_{c0} = T_{c1} + \frac{C_{\min}}{C_{\max}} (T_{h1} - T_{h2})$ แทนลงในสมการ (4.35) เป็น

$$\frac{(T_{h2}-T_{c2})}{(T_{h1}-T_{c1})} = -\varepsilon + \frac{T_{h1}-T_{c1}}{T_{h1}-T_{c1}} - \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \frac{(T_{h1}-T_{h2})}{(T_{h1}-T_{c1})} \quad (4.36)$$

$$= -\varepsilon + 1 - \frac{C_{\min}\varepsilon}{C_{\max}} = 1 - \varepsilon \left(1 + \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \right) \quad (4.37)$$

แทนกลับลงในสมการ (4.34) ได้

$$1 - \varepsilon \left(1 + \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \right) = \exp \left[-NTU \left(1 + \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \right) \right] \quad (4.38)$$

แทนด้วยสมการ (4.30) ให้

$$1 - (1 + C_r) = \exp[-NTU(1 + C_r)] \quad (4.39a)$$

ทำนองเดียวกัน ถ้าซึ่ง $C_{\max} = C_h$ และ $C_{\min} = C_c$ แล้วจะได้ผลลัพธ์เป็น

$$1 - (1 + C_r) = \exp[-NTU(1 + C_r)] \quad (4.39b)$$

เช่นเดียวกับสมการข้างต้น

ดังนั้น

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 + C_r)]}{(1 + C_r)} \quad (4.40)$$

หรือ
$$NTU = \frac{-\ln[1 - \varepsilon(1 + C_r)]}{(1 + C_r)} \quad (4.41)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ (4.40) และสมการ (4.41) เป็นการแสดงความสัมพันธ์ซึ่งให้ ϵ เป็นฟังก์ชันของ C_r และ NTU ถ้ากำหนดขนาดของเครื่องค่า U อัตราการไหลของของไหลและค่าความจุความร้อน และอุณหภูมิทางเข้าของของไหลมาให้แล้ว สมการ (4.40) และสมการ (4.41) ก็จะทำให้ค่าอุณหภูมิทางออกของของไหลอันหนึ่ง ส่วนอุณหภูมิทางออกของของไหลที่เหลือหาได้จากสมดุลพลังงาน ในทางกลับกันอาจหาเทอมได้ว่า NTU เป็นฟังก์ชันของ

C_r และ ϵ ได้ตามสมการ (4.41) ซึ่งสมการนี้บางครั้งก็มีประโยชน์สำหรับคำนวณการออกแบบ ซึ่งสมการดังกล่าวเป็นรูปที่ง่ายในการคำนวณ อย่างไรก็ตามถ้าไม่ต้องการรายละเอียดมากนัก ก็แสดงได้ในรูปซึ่งสะดวกสบายแก่การใช้มากกว่า

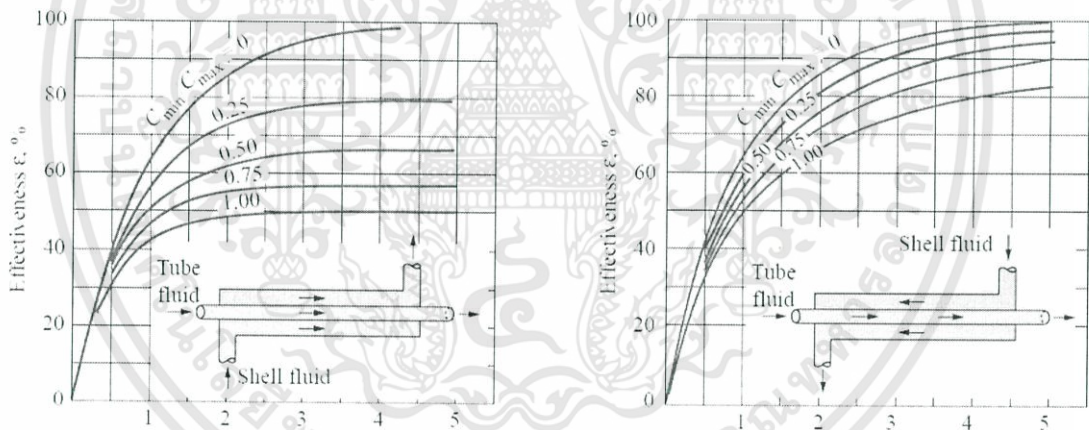
Kays และ London ได้แสดงความสัมพันธ์ของ Effectiveness, NUT และ $\frac{C_{min}}{C_{max}}$ สำหรับการแจกแจงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดต่างๆ และบางส่วนของผลลัพธ์ จากการวิเคราะห์ของเขาได้แสดงแผนภูมิหรือกราฟตามรูปที่ 4.5-4.7 ซึ่งถ้าต้องการค่าที่ละเอียดกว่าค่าที่อ่านจากกราฟก็อาจหาค่าได้โดยใช้คอมพิวเตอร์หาค่าสมการสำหรับแต่ละเงื่อนไขเพื่อหาค่า ϵ และ NUT ซึ่งได้สรุปไว้ในตารางที่ 4.3-4.4

ตารางที่ 4.3 ความสัมพันธ์ของ Effectiveness สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยที่ $NTU = \frac{UA}{C_{min}}$ และ $C_r = \frac{C_{min}}{C_{max}}$

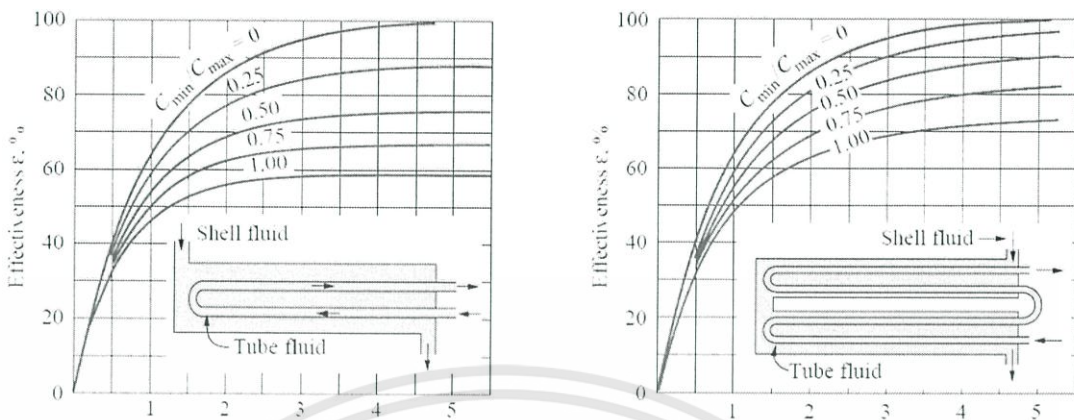
Heat exchanger type	Effectiveness relation
1 Double pipe: Parallel-flow	$\epsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 + c)]}{1 + c}$
Counter-flow	$\epsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 - c)]}{1 - c \exp[-NTU(1 - c)]}$
2 Shell and tube: One-shell pass 2, 4, ... tube passes	$\epsilon = 2 \left\{ \frac{1 + c + \sqrt{1 + c^2}}{1 + \exp[-NTU \sqrt{1 + c^2}]} \frac{1 + \exp[-NTU \sqrt{1 + c^2}]}{1 - \exp[-NTU \sqrt{1 + c^2}]} \right\}^{-1}$
3 Cross-flow (single-pass) Both fluids unmixed	$\epsilon = 1 - \exp \left\{ \frac{NTU^{0.22} c}{c} [\exp(-c NTU^{0.73}) - 1] \right\}$
C_{max} mixed, C_{min} unmixed	$\epsilon = \frac{1}{c} (1 - \exp[1 - c(1 - \exp(-NTU))])$
C_{min} mixed, C_{max} unmixed	$\epsilon = 1 - \exp \left\{ -\frac{1}{c} [1 - \exp(-c NTU)] \right\}$
4 All heat exchangers with $c = 0$	$\epsilon = 1 - \exp(-NTU)$

ตารางที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของ NTU สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยที่ $NTU = \frac{UA}{C_{min}}$ และ $C_r = \frac{C_{min}}{C_{max}}$

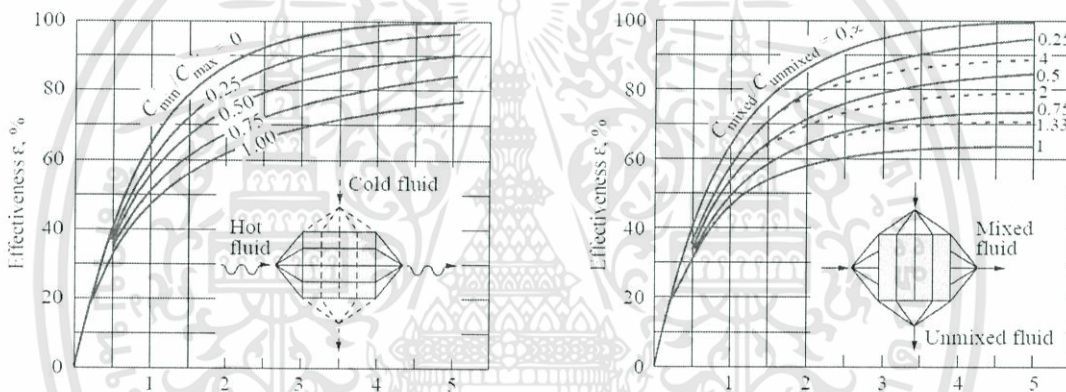
Heat exchanger type	NTU relation
1 <i>Double-pipe:</i> Parallel-flow	$NTU = -\frac{\ln [1 - \epsilon(1 + c)]}{1 + c}$
Counter-flow	$NTU = \frac{1}{c - 1} \ln \left(\frac{\epsilon - 1}{\epsilon c - 1} \right)$
2 <i>Shell and tube:</i> One-shell pass 2, 4, . . . tube passes	$NTU = -\frac{1}{\sqrt{1 + c^2}} \ln \left(\frac{2/\epsilon - 1 - c - \sqrt{1 + c^2}}{2/\epsilon - 1 - c + \sqrt{1 + c^2}} \right)$
3 <i>Cross-flow (single-pass)</i> C_{max} mixed, C_{min} unmixed	$NTU = -\ln \left[1 + \frac{\ln (1 - \epsilon c)}{c} \right]$
C_{min} mixed, C_{max} unmixed	$NTU = \frac{\ln [c \ln (1 - \epsilon) + 1]}{c}$
4 <i>All heat exchangers</i> with $c = 0$	$NTU = -\ln(1 - \epsilon)$



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Effectiveness และ NTU ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตามกันและไหลสวนกันตามลำดับ



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Effectiveness และ NTU ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Shell-and-tube



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Effectiveness และ NTU ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตั้งฉากกัน (ก) ของไหลทั้งสองไม่ผสมกัน (ข) ของไหลชนิดหนึ่งผสมแต่อีกชนิดไม่ผสมกัน

สำหรับหม้อน้ำและคอนเดนเซอร์ เราถือว่าเป็นขบวนการเดือดเป็นไอละกลั่นตัวเป็นหยดน้ำนั้นอุณหภูมิของไหลยังคงที่อยู่ หรือของไหลกระทำตัวเหมือนว่ามีค่าความจุความร้อนอนันต์ในกรณีเหล่านี้ $C_{min}/C_{max} \rightarrow 0$ และความสัมพันธ์ของ ϵ กับ NTU ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะเป็นสมการง่าย ๆ อย่างเดียวคือ

$$\epsilon = 1 - e^{-NTU} \tag{4.42}$$

หรือ

$$NTU = -\ln(1 - \epsilon) \tag{4.43}$$

นอกจากนี้สมการของตัวแปรไร้มิติที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนความร้อนได้แก่

เลขนัสเซล (Nusselt number)

เป็นตัวแปรไร้มิติที่บอกถึงความสามารถในการพาความร้อน เมื่อเทียบกับการนำความร้อน แสดงโดย

$$Nu = \frac{h_m D_c}{k} \quad (4.44)$$

เมื่อ h_m คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

ค่าตัวประกอบโคลเบิร์น (Colburn j-factor)

ค่าตัวประกอบโคลเบิร์นเป็นอัตราส่วนของความร้อนเนื่องจากการพาต่อปริมาณความร้อนที่ควรจะถ่ายเทได้ทั้งหมด ซึ่งเป็นไปตามสมการ

$$j = \frac{Nu}{Re \cdot Pr^{1/3}} \quad (4.45)$$

และจะได้

$$j = \frac{h_{iii}}{\rho U_c c_p} Pr^{2/3} \quad (4.46)$$

สมรรถนะเชิงความร้อน

สมรรถนะเชิงความร้อนสามารถหาได้จาก

$$\eta = \frac{(Nu/Nu_0)}{(f/f_0)^{1/3}} \quad (4.47)$$

ซึ่ง Nu คือ เลขนัสเซลของครีปที่ทำการติดปีกสำหรับสร้างการไหลแบบปั่นป่วน

Nu_0 คือ เลขนัสเซลของครีปเรียบ

f คือ ค่าตัวประกอบเสียดทานของครีปที่ทำการติดปีกสำหรับสร้างการไหลแบบปั่นป่วน

f_0 คือ ค่าตัวประกอบเสียดทานของครีปที่เรียบ

บทที่ 5

การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

5.1 บทนำ

การจำลองการถ่ายเทความร้อนและสภาวะการไหลของอากาศที่ไหลผ่านแผ่นกั้นแบบต่างๆนอกจากความเข้าใจทางทฤษฎีพื้นฐาน ยังต้องมีความเข้าใจทางด้านกรคำนวณเชิงตัวเลขเนื่องจากเป็นเครื่องมือหลักสำหรับการหาผลเฉลย เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ หัวข้อ 5.2 ขั้นตอนการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ซึ่งเป็นแนวทางสากลที่ใช้โดยทั่วไปหัวข้อ 5.4 อธิบายคุณสมบัติของวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ซึ่งเป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์ความผิดพลาดของสมการดิสเครทไทต์ หัวข้อที่ 5.5 กล่าวถึงรูปแบบการจัดวางกริด และสอดคล้องความหมายของตัวแปร และสัญลักษณ์ที่ใช้ในบทนี้ หัวข้อที่ 5.6 แบบแผนการคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อเข้าใจถึงแบบแผนวิธี (Scheme) ที่ใช้ในแต่ละองค์ประกอบของการดิสเครทไทต์ และหัวข้อที่ 5.7 ถึง 5.10 แสดงวิธีการดิสเครทไทต์สมการควบคุมไว้เฉพาะบางแบบแผนวิธี Versteeg [13] มีรายละเอียดเพิ่มเติมไว้ครบถ้วน

5.2 ระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข

วิวัฒนาการของการคำนวณเชิงตัวเลขเริ่มมาก่อนปี ค.ศ. 1950 (Anderson[15]) เกิดขึ้นพร้อมกับยุคที่ระบบคอมพิวเตอร์เริ่มมีการพัฒนา ช่วงเวลานั้นระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite difference methods, *FDM*) และระเบียบผลต่างมูลฐาน (Finite element methods, *FEM*) เป็นวิธีพื้นฐานในการหาผลเฉลยของสมการอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equations, *PDE*) ซึ่งนิยมใช้มากในการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (Computational fluid dynamics, *CFD*) ต่อมาได้รวบรวมเอาองค์ความรู้ทางระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม และระเบียบวิธีผลต่างมูลฐานไว้ด้วยกัน(Chung [14])เรียกว่าระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite volume methods, *FVM*) ทำให้มีโครงสร้างที่เข้าใจได้ง่ายขึ้นขณะที่ยังมีความแม่นยำสูง จนเป็นที่นิยมในปัจจุบัน

5.3 ขั้นตอนการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

หากพิจารณาการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลในมุมมองการโปรแกรม จะกล่าวได้ว่าเป็นโครงสร้างของอัลกอริธึมที่สามารถนำไปสู่การจำลองสภาวะการไหลได้ โปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์

ของไหลในเชิงพาณิชย์ ส่วนมากมีระบบที่ผู้ใช้สามารถป้อนค่าต่างๆที่ต้องการแล้วจึงนำไปคำนวณโดยแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนดังนี้ (Versteeg [13])

5.3.1 ขั้นตอนก่อนการประมวลผล

ขั้นตอนก่อนการประมวลผล (Pre-Processing) คือขั้นเตรียมการโดยระบุรายละเอียดของการกำหนดปัญหา และพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้อง ดังต่อไปนี้

1. กำหนดรูปร่าง และระบุนขนาดของระบบที่สนใจเรียกว่า การคำนวณสนามการคำนวณ (Computation domain)
2. กำหนดจำนวน และรูปแบบการจัดวางกริด (Grid or Mesh) ซึ่งคือการแบ่งสนามการคำนวณออกเป็นปริมาตรเล็กๆ รูปแบบการจัดแบ่ง และจัดวางกริด ขึ้นอยู่กับปัญหาที่พิจารณาการจัดที่เหมาะสม ทำให้การหาผลเฉลยประมาณค่า (Approximation solution) แม่นยำขึ้น
3. เลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้เหมาะสมกับธรรมชาติของปัญหา เลือกโดยใช้อรรถศาสตร์ทางทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง
4. กำหนดคุณสมบัติของไหล เช่น พิจารณาของไหลเป็นอากาศที่อุณหภูมิปกติ เป็นต้น
5. กำหนดเงื่อนไขขอบ (Boundary condition) และค่าเริ่มต้น (Initial condition)



รูปที่ 5.1 แสดงความเชื่อมโยงของกระบวนการดิสcretize ไทค์ และผลเฉลยประมาณค่า

5.3.2 ขั้นตอนประมวลผล

ขั้นประมวลผล (Solving) เป็นขั้นที่ต้องใช้ระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อแก้ปัญหา ซึ่งการคำนวณในงานวิจัยนี้ทั้งหมดใช้วิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมมีขั้นตอนดังนี้ (จากรูปที่ 5.1)

- (1) ประมาณตัวแปรไม่ทราบค่าโดยหาค่าเฉลี่ยของฟังก์ชัน (มักใช้ในปัญหาแบบปั่นป่วน) สร้างเป็นสมการอนุพันธ์ย่อยโดยรวมกับสมการควบคุมการไหล

(2) หาผลเฉลยวีค (Weak solution) ของสมการควบคุมด้วยวิธีน้ำหนักตกค้าง (Weight residual) จากนั้นดิสcretize โดยประมาณแต่ละเทอมและความสัมพันธ์แบบแผนวิธีที่เลือกไว้ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์เป็นสมการพีชคณิต

(3) แก้สมการพีชคณิต ผลเฉลยที่เรียกว่า ผลเฉลยประมาณค่า

5.3.3 ชั้นแสดงผล

ชั้นแสดงผล (Post-processing) คือการแสดงผลเฉลยประมาณค่าของตัวแปรที่สนใจ และใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ เช่น รูปแบบความเร็ว รูปแบบวอเทคซิติ เป็นต้น

5.4 คุณสมบัติของวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลเพื่อจำลองพฤติกรรมตามธรรมชาติ ควรตระหนักว่าธรรมชาติมักมีพฤติกรรมซับซ้อน ดังนั้นสิ่งที่พึงระวังอย่างยิ่งคือ ความถูกต้องของผลเฉลย ผลการคำนวณที่ดีที่สุดเป็นเพียงค่าประมาณที่ดีที่สุดเท่าที่มนุษย์สามารถหาคำตอบได้เท่านั้นไม่ใช่ผลเฉลยแม่นยำตรง คุณสมบัติของวิธีการคำนวณ คือปัจจัยบ่งบอกความเที่ยงตรงของผลเฉลยประมาณค่าเมื่อเทียบกับพฤติกรรมจริงที่ควรเกิดขึ้น แบ่งได้หลายประการดังนี้ (Ferziger [16])

5.4.1 ความเข้ากันได้

ความเข้ากันได้ (Consistency) หมายถึงความเหมือน (Equivalent) ระหว่างสมการควบคุม (สมการอนุพันธ์ย่อย) และสมการพีชคณิตที่ผ่านกระบวนการดิสcretize เมื่อระยะกริด (Grid spacing) และค่าขั้นเวลา (Time step) ลดลงใกล้ศูนย์โดยปกติเรียกความแตกต่างหลังจากกระบวนการดิสcretize ใหม่ว่าความผิดพลาดแบบทรานเคชัน (Truncation error) ซึ่งลดลงเมื่อมีความเข้ากันได้มากขึ้น

5.4.2 เสถียรภาพการคำนวณ

เสถียรภาพการคำนวณ (Stability) เป็นลักษณะการคำนวณที่มีค่าผิดพลาดน้อยลงเมื่อคำนวณซ้ำ (Damping of error) เรียกความผิดพลาดที่เกิดจากการคำนวณซ้ำว่าความผิดพลาดแบบเร้าออฟ (Round-off error) เช่นความผิดพลาดในการคำนวณทศนิยมตำแหน่งที่ 12 ของคอมพิวเตอร์ เป็นต้น อย่างไรก็ตามหากวิธีการคำนวณไม่มีเสถียรภาพ ผลการคำนวณจะมีลักษณะลู่ออก (Divergence) โดยมักเกิดจากการเลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่ถูกต้อง หรือแบบแผนการคำนวณเชิงตัวเลขไม่เหมาะสมกับปัญหาที่พิจารณา ซึ่งการตรวจสอบเสถียรภาพการคำนวณต้องใช้ความรู้ของทฤษฎีการรบกวน (Perturbation theory) เป็นแนวทาง

5.4.3 การลู่เข้าของผลเฉลย

ผลการคำนวณที่มีการลู่เข้าของผลเฉลย (Convergence) หมายถึงผลเฉลยประมาณค่ามีแนวโน้มเข้าใกล้ผลเฉลยแม่นยำตรง สำหรับปัญหาไม่เชิงเส้น (Nonlinear Problem) ยากที่จะตรวจสอบการลู่เข้าของผลเฉลย เนื่องจากไม่สามารถหาผลเฉลยแม่นยำตรงได้ อย่างไรก็ตามการตรวจสอบทำได้โดยวิธีเปรียบเทียบวิธีการคำนวณที่มีระยะกริดลดลง กระทั่งผลเฉลยไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามระยะกริด (Grid independent) เรียกได้ว่ามีคุณสมบัติการลู่เข้าของผลเฉลยที่ดี

5.4.4 การอนุรักษ์

คุณสมบัติการอนุรักษ์ (Conservation) เป็นคุณสมบัติที่มีอยู่ในกฎการอนุรักษ์ดังบทที่ 3 เนื่องจากผลการคำนวณที่มีมาจากสมการควบคุม ดังนั้นวิธีการคำนวณจึงควรมีคุณสมบัตินี้ด้วยโดยคุณสมบัติการอนุรักษ์เป็นจุดเด่นที่สำคัญของระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่อง กล่าวคือคำนึงถึงความสมดุลของการส่งถ่ายปริมาณข้ามขอบเขตที่พิจารณา เช่นรอบผิวปิดของปริมาตรเล็กๆที่แบ่งตามระยะกริดเป็นต้น

5.4.5 ความจำกัดขอบ

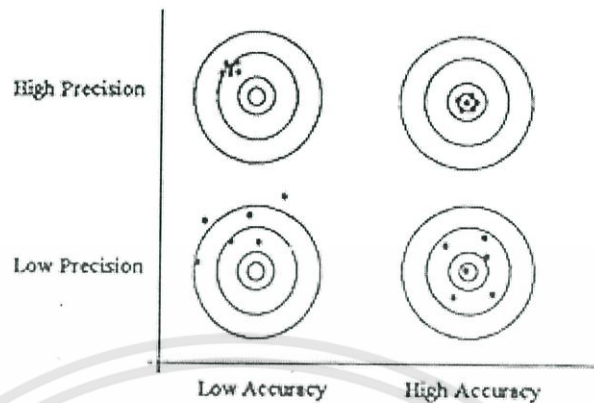
ความจำกัดขอบ (Bounded ness) หมายถึงผลเฉลยควรมีค่าอยู่ในขอบเขตจำกัด เช่นความหนาแน่น ความเข้มข้น ต้องมีค่ามากกว่าศูนย์เสมอ หรือระบบการถ่ายเทความร้อนที่ทราบอุณหภูมิต่ำสุด-สูงสุด ผลเฉลยที่ควรได้ต้องมีค่าอยู่ในช่วงนั้นด้วยเช่นกันโดยวิธีการคำนวณที่มีอันดับสูง (Higher order) มีแนวโน้มความจำกัดขอบต่ำลง ดังนั้นจึงไม่ควรเลือกใช้วิธีการคำนวณที่มีอันดับสูงมากเกินไป

5.4.6 ความเสมือนจริง

ความเสมือนจริง (Realization) หมายถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่จำลองพฤติกรรมธรรมชาติที่ซับซ้อน เช่นแบบจำลองการไหลปั่นป่วน แบบจำลองการเผาไหม้ เป็นต้น ควรเลือกแบบจำลองที่มีความเสมือนจริงเมื่อเทียบกับความหมายทางกายภาพ หากเลือกใช้ หรือนำมาใช้ไม่สอดคล้องกับปัญหา ผลเฉลยที่ได้อาจสื่อความหมายทางกายภาพที่ถูกต้อง

5.4.7 ความแน่นอน

บ่อยครั้งในงานทางวิศวกรรมกล่าวถึงความแน่นอน (Accuracy) ซึ่งมักใช้สับสนกับความแม่นยำ (Precision) พิจารณารูปที่ 5.2 (Chapra [17]) แสดงความแตกต่างระหว่างแนวคิดทั้งสองอย่างชัดเจน ตรงกลางเป้าเป็นเสมือนค่าแม่นยำ และความแม่นยำสูง หมายถึงค่าส่วนใหญ่กระจายตัวน้อย ดังนั้นงานวิเคราะห์ทางด้านวิศวกรรมจึงควรให้ความสำคัญของความแน่นอนมากกว่าความแม่นยำ ซึ่งช่วยในการวิเคราะห์ที่ถูกต้องมีแนวโน้มเดียวกับสภาพจริงมากขึ้น แต่ในงานออกแบบต้องการความผิดพลาดลงน้อยที่สุด จึงควรใช้ทั้งสองแนวคิดประกอบรวมกัน



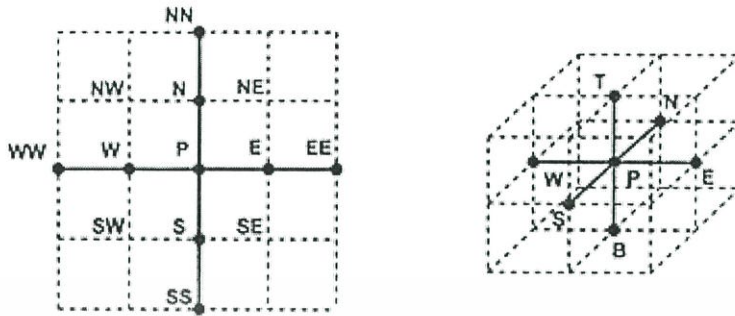
รูปที่ 5.2 แสดงแนวคิดของความแม่นยำและความเที่ยง

วิธีคำนวณท้าวพลศาสตร์ของไหล แบ่งปัจจัยของความแม่นยำเป็น 3 ปัจจัยดังนี้

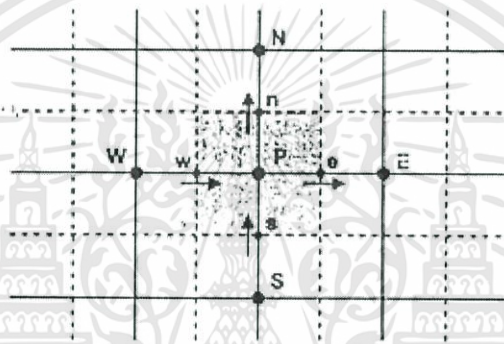
1. ความแม่นยำจากแบบจำลอง (Modeling accuracy) เกิดจากความเหมือนจริงของแบบจำลองเทียบกับพฤติกรรมจริงตามธรรมชาติ
2. ความแม่นยำจากการดิสครีไทต์ (Discretization accuracy) เกิดจากความเข้ากันได้ของสมการพีชคณิตเทียบกับสมการควบคุม (สมการอนุพันธ์ย่อย)
3. ความแม่นยำจากการแก้สมการพีชคณิต (Iteration accuracy) เกิดจากการลู่เข้าของผลเฉลยประมาณค่า เทียบกับผลเฉลยแม่นยำตรงของสมการพีชคณิต

5.5 รูปแบบการจัดวางกริด

รูปแบบการจัดวางกริดโดยทั่วไปแบ่งได้เป็น 3 แบบคือ แบบโครงสร้างปกติ (structured grids) แบบกลุ่มโครงสร้าง (Block structured grids) และแบบไม่เป็นโครงสร้าง (Unstructured grids) เพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจกระบวนการดิสครีไทต์ในหัวข้อถัดไป จึงได้ใช้รูปแบบการจัดวางกริดดังรูปที่ 5.3 (แบบโครงสร้างปกติ) และเพื่อความกระชับได้ดิสครีไทต์กริด 2 มิติเท่านั้น ซึ่งสามารถขยายไปสู่กริดแบบ 3 มิติได้โดยตรง



รูปที่ 5.3 แสดงรูปแบบการจัดวางกริดในแกน 2 มิติ และ 3 มิติ



รูปที่ 5.4 ส่วนแรเงาแสดงตำแหน่งของปริมาตรควบคุมแบบ 2 มิติ

จากรูปที่ 5.4 ตำแหน่ง P คือตำแหน่งโนด (Node) ที่สนใจตัวพิมพ์เล็ก เช่น w, e แสดงถึงตำแหน่งของปริมาณที่เข้า-ออกจากปริมาตรควบคุมที่แรเงา (Cell volume) เช่น ความเร็ว เป็นต้น เรียกว่าตำแหน่งผิวเซลล์ (Cell surface) ลูกศรที่ปรากฏแสดงทิศเป็นบวกของปริมาณเวกเตอร์ที่ตำแหน่งผิวเซลล์ รูปแบบลักษณะนี้เรียกว่า การจัดเรียงตำแหน่งรวม (Co-located arrangement) กล่าวคือปริมาณสเกลาร์ และเวกเตอร์มีตำแหน่งเดียวกัน (มวล, ความเร็ว, ความดัน, และอุณหภูมิ) โดยการจัดวางในแบบนี้จะได้กล่าวถึงในหัวข้อ 5.10 เนื่องมาจากปัญหาการดิสครีไทต์เทอมอัตราเปลี่ยนความดันของสมการนาเวียร์-สโตกส์

5.6 แบบแผนการคำนวณเชิงตัวเลข

ปัจจุบันมีนักวิจัยที่คิดค้นแบบแผนการคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical scheme) มากมายซึ่งขอกล่าวถึงเฉพาะแบบแผนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย 4 แบบคือ

5.6.1 แบบแผนวิธีผลต่างกึ่งกลาง

แบบแผนวิธีผลต่างกึ่งกลาง (Central differencing scheme, *CDS*) คือการประมาณค่าที่ตำแหน่งผิวเซลล์ต่างๆ ด้วยหลักการหาค่าเฉลี่ยกึ่งกลาง เป็นไปตามสมการ (5.1) เมื่อ ϕ แทนปริมาณที่สนใจใดๆ

$$\begin{aligned}\phi_e &= (\phi_P + \phi_E)/2 \\ \phi_w &= (\phi_W + \phi_P)/2 \\ \phi_n &= (\phi_P + \phi_N)/2 \\ \phi_s &= (\phi_S + \phi_P)/2\end{aligned}\quad (5.1)$$

จากสมการ (5.1) เห็นได้ว่าการประมาณค่าที่ผิวเซลล์ด้วยค่าที่ตำแหน่งโนดโดยถ่วงน้ำหนักโนดประชิด (Adjacent node) เท่ากัน แบบแผนวิธีนี้จึงขึ้นอยู่กับระยะกริดเป็นสำคัญ ซึ่งระยะกริดที่ลดลงทำให้ผลเฉลยมีความแน่นอนสูงขึ้น

5.6.2 แบบแผนวิธีผลต่างต้นลมอันดับหนึ่ง

การประมาณค่าที่ผิวเซลล์ (รูปที่ 5.4) ของแบบแผนวิธีผลต่างต้นลมอันดับหนึ่ง (1st- order upwind differencing scheme, *UDS-1*) ให้ปริมาณที่ตำแหน่งท้ายลมมีค่าเท่ากับปริมาณที่ตำแหน่งต้นลม ดังสมการ (5.2) เมื่อ ϕ แทนปริมาณที่สนใจและ u แทนความเร็วที่ตำแหน่งผิวเซลล์นั้น เช่น u_e แทนความเร็วที่ตำแหน่งผิวเซลล์ e เป็นต้น

$$\begin{aligned}\phi_e &= \alpha_e \phi_P + (1 - \alpha_e) \phi_E \quad \text{เมื่อ } u_e > 0 \Rightarrow \alpha_e = 1 \text{ และ } u_e < 0 \Rightarrow \alpha_e = 0 \\ \phi_w &= \alpha_w \phi_W + (1 - \alpha_w) \phi_P \quad \text{เมื่อ } u_w > 0 \Rightarrow \alpha_w = 1 \text{ และ } u_w < 0 \Rightarrow \alpha_w = 0 \\ \phi_n &= \alpha_n \phi_P + (1 - \alpha_n) \phi_N \quad \text{เมื่อ } u_n > 0 \Rightarrow \alpha_n = 1 \text{ และ } u_n < 0 \Rightarrow \alpha_n = 0 \\ \phi_s &= \alpha_s \phi_S + (1 - \alpha_s) \phi_P \quad \text{เมื่อ } u_s > 0 \Rightarrow \alpha_s = 1 \text{ และ } u_s < 0 \Rightarrow \alpha_s = 0\end{aligned}\quad (5.2)$$

แบบแผนวิธีผลต่างต้นลมอันดับหนึ่งมีคุณสมบัติจำกัดขอบสูง ทำให้ผลเฉลยไม่กระเพื่อม (Oscillary solution) เป็นข้อดีทั้งในแง่เสถียรภาพการคำนวณ และการลู่เข้าของผลเฉลย แต่ในขณะเดียวกัน ทำให้เกิดพฤติกรรมการแพร่เชิงตัวเลข (Numerical diffusive) เนื่องจากลักษณะผลเฉลยเสมือนถูกถ่วงน้ำหนักจากค่าที่ตำแหน่งต้นลมเป็นหลัก สำหรับกรณีที่มีการไหลซับซ้อน แบบวิธีนี้จะทำให้คุณสมบัติความเข้ากันได้ลดลง

5.6.3 แบบแผนวิธีผลต่างต้นลมอันดับสอง

แบบแผนวิธีผลต่างต้นลมอันดับสอง (2^{nd} -order upwind differencing scheme, *USD-2*)

ได้พัฒนาให้มีความแน่นอนสูงขึ้น พิจารณาที่ตำแหน่งโนด P เมื่อใช้ออนุกรมขยายของเทเลอร์ (Taylor series expansion) ตามหลักการผลต่างต้นลม เขียนความสัมพันธ์ที่ผิวเซลล์ e ได้ว่า

$$\phi_e = \phi_p + \delta_{eP} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_p + \frac{\delta_{eP}^2}{2} \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \right)_p + \text{H.O.T.} \quad \text{เมื่อ } u_e > 0 \quad (5.3)$$

สมการ (5.3) เป็นตัวอย่างแบบแผนวิธีในกรณี 1 มิติ พิจารณาเฉพาะที่ผิวเซลล์ e เมื่อ δ_{eP} แทนระยะห่างระหว่างผิวเซลล์ e และโนดต้นลม P (เนื่องจาก $u_e > 0$) สำหรับกรณีแบบแผนวิธีผลต่างต้นลมอันดับหนึ่งจะใช้เฉพาะเทอมแรกทางขวาของสมการ และแบบแผนวิธีผลต่างต้นลมอันดับสองนี้จะใช้สองเทอมแรกทางขวาของสมการ

เทอม $\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_p$ คือ ความชันของเซลล์ต้นลม ซึ่งประมาณโดยการเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักด้วยปริมาตรของเซลล์นั้นดังสมการ (5.4) จากนั้นใช้ทฤษฎีของเกาส์ (Gauss theorem) จะเขียนได้ในสมการ (5.5) ดังนี้

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_p = \frac{1}{V} \int \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dV \quad (5.4)$$

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_p = \frac{1}{V} \oint \phi \cdot \vec{n} dV \quad (5.5)$$

เมื่อ V แทนขนาดปริมาตรของเซลล์ A แทนพื้นที่ผิวเซลล์ และ \vec{n} แทนเวกเตอร์ตั้งฉากกับผิวเซลล์ สมการ (5.5) ทำการดิสครีไทต์ด้วยระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมใน 2 มิติ (กรณีที่มีการจัดวางกริดตามรูปที่ 5.4) จะลดรูปได้เป็น

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_p = \frac{1}{A_p} (\phi_e L_e + \phi_w L_w + \phi_n L_n + \phi_s L_s) \quad (5.6)$$

จากสมการ (5.6) เมื่อ L แทนระยะความกว้างของผิวเซลล์ในแต่ละด้านตามตัวห้อย เช่น L_e แทนระยะความกว้างของผิวเซลล์ e เป็นต้น และ A_p แทนพื้นที่เซลล์ที่ตำแหน่งโนด P อยู่ เช่น A_p มีค่าเท่ากับพื้นที่แรงงาในรูปที่ 5.4 เป็นต้น ซึ่งค่า ϕ ที่ผิวเซลล์ต่างๆของสมการ (5.6) หาได้หลายวิธี แต่ในที่นี้เลือกใช้แบบแผนวิธีผลต่างกึ่งกลางดังสมการ (5.1) ดังนั้นสมการ (5.3) จึงเขียนใหม่ได้ว่า

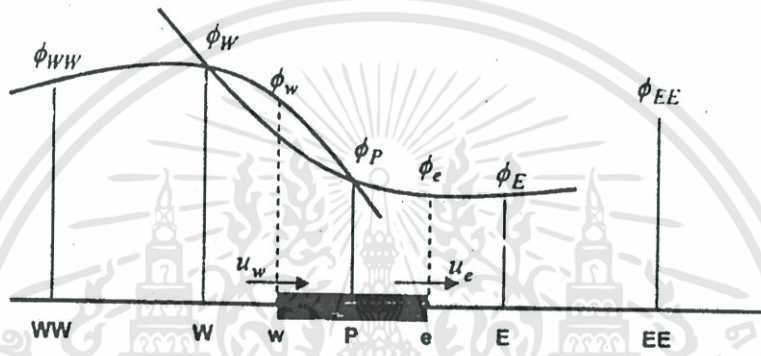
$$\phi_e = \phi_p + \frac{\delta_{eP}}{A_p} \left(\left(\frac{\phi_P + \phi_E}{2} \right) \cdot L_e + \left(\frac{\phi_W + \phi_P}{2} \right) \cdot L_w + \left(\frac{\phi_P + \phi_N}{2} \right) \cdot L_n + \left(\frac{\phi_S + \phi_P}{2} \right) \cdot L_s \right) \quad \text{เมื่อ } u_e > 0 \quad (5.7)$$

ในทำนองเดียวกันเมื่อ $u_e < 0$ จะเขียนได้ดังสมการ (5.8) และสมการของ ϕ_w, ϕ_n, ϕ_s สามารถหาได้ด้วยหลักการเดียวกัน ซึ่งไม่ขอกล่าวถึงในรายละเอียด

$$\phi_e = \phi_E + \frac{\delta_{eE}}{A_E} \left(\frac{(\phi_E + \phi_{EE})}{2} \cdot L_{ee} + \frac{(\phi_E + \phi_P)}{2} \cdot L_e + \frac{(\phi_{NE} + \phi_E)}{2} \cdot L_{ne} + \frac{(\phi_E + \phi_{SE})}{2} \cdot L_{es} \right) \quad \text{เมื่อ } u_e < 0 \quad (5.8)$$

5.6.4 แบบแผนวิธีผลต่างควอดราติก

แบบแผนวิธีผลต่างควอดราติก (Quadratic upstream interpolation for convective kinetics differencing scheme, *QUICK*) เริ่มนำเสนอโดย Leonard ค.ศ. 1979 เป็นแบบแผนวิธีที่ใช้โนด 3 ตำแหน่งในการประมาณค่าของแต่ละผิวเซลล์ (2 โนดที่ต้นลม และ 1 โนดที่ท้ายลม) ดังแสดงในรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 รูปแบบแนวคิดของแบบแผนวิธีผลต่างควอดราติกในปริมาตรควบคุมแบบ 1 มิติ

ตามรูปที่ 5.5 เมื่อ $u_w > 0$ และ $u_e > 0$ การประมาณค่า ϕ_w ที่ผิวเซลล์ w จะใช้ค่าที่โนดต้นลมคือ ww และ w ประกอบกับโนดท้ายลมคือ P ในทำนองเดียวกันการประมาณค่า ϕ_e ที่ผิวเซลล์ e จะใช้ค่าที่โนดต้นลมคือ W และ P ประกอบกับที่โนดท้ายลมคือ E ตามลำดับ

ด้วยหลักการความคล้ายคลึง กรณีที่ $u_w < 0$ และ $u_e < 0$ การประมาณค่า ϕ_w ใช้โนด E และ P ประกอบกับโนด W และการประมาณค่า ϕ_e ใช้โนด EE, E และ P ตามลำดับ ซึ่งความสัมพันธ์ต่างๆ สามารถเขียนได้ในสมการ (5.9) ถึง (5.12) โดย $u_x > 0$ แล้ว $\alpha_x = 1$ และ $u_x < 0$ แล้ว $\alpha_x = 0$ เมื่อ $x = w, e, s, n$ ตามลำดับ

$$\phi_w = \frac{3}{8} [(1 + \alpha_w) \cdot \phi_W + (2 - \alpha_w) \cdot \phi_P] - \frac{1}{8} [(1 + \alpha_w) \cdot \phi_E + \alpha_w \cdot \phi_{WW}] \quad (5.9)$$

$$\phi_e = \frac{3}{8} [(1 + \alpha_e) \cdot \phi_P + (2 - \alpha_e) \cdot \phi_E] - \frac{1}{8} [(1 + \alpha_e) \cdot \phi_{EE} + \alpha_e \cdot \phi_W] \quad (5.10)$$

$$\phi_s = \frac{3}{8} [(1 + \alpha_s) \cdot \phi_S + (2 - \alpha_s) \cdot \phi_P] - \frac{1}{8} [(1 + \alpha_s) \cdot \phi_N + \alpha_s \cdot \phi_{SS}] \quad (5.11)$$

$$\phi_n = \frac{3}{8} [(1 + \alpha_n) \cdot \phi_P + (2 - \alpha_n) \cdot \phi_N] - \frac{1}{8} [(1 + \alpha_n) \cdot \phi_{NN} + \alpha_n \cdot \phi_S] \quad (5.12)$$

แบบแผนวิธีผลต่างครอดราติกมีความแน่นอนอันดับสาม ซึ่งสูงกว่าทั้งแบบแผนวิธีผลต่างต้นลมอันดับหนึ่ง และสองเป็นเทคนิคการผสมผสานความได้เปรียบของแบบแผนวิธีผลต่างกึ่งกลาง และแบบ

แผนวิธีผลต่างต้นลมเข้าด้วยกัน กล่าวคือมีคุณสมบัติอนุรักษ์ และความเข้ากันได้มากกว่าแบบแผนวิธีผลต่างต้นลม อย่างไรก็ตามแบบแผนวิธีอันดับสูงจะมีเงื่อนไขเสถียรภาพการคำนวณ (Conditionally stable) เพิ่มขึ้น และคุณสมบัติจำกัดขอบลดลง

5.7 การดิสเครทไทต์สมการควบคุม

การคำนวณด้วยวิธีปริมาตรสืบเนื่อง ต้องหาผลเฉลยวิคของสมการควบคุมด้วยวิธีน้ำหนักตกค้างโดยการเลือกใช้ 1 (Unit) เป็นฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก (Weight function) ผลที่ได้เป็นสมการอินทิกรัล(Integral equation)บนขอบเขตปริมาตรควบคุมเล็กๆ จากทฤษฎีของเกาส์ทำให้สามารถพิจารณาปริมาณที่ส่งถ่ายเข้า-ออกเฉพาะที่ขอบเขตเป็นตัวแทนทั้งปริมาตรได้ รวมเรียกว่าการดิสเครทไทต์สมการอนุพันธ์ย่อยโดยหัวข้อ 5.8 ถึง 5.10 จะกล่าวรายละเอียดวิธีดิสเครทไทต์ ซึ่งเป็นเนื้อหาที่ต่อเนื่องกันการดิสเครทไทต์สมการอนุรักษ์มวลเป็นเนื้อหาที่ง่ายต่อความเข้าใจเนื่องจากรูปแบบสมการไม่ซับซ้อนการดิสเครทไทต์สมการอนุรักษ์พลังงานจะซับซ้อนขึ้น โดยกล่าวถึงแบบแผนวิธีที่ใช้กับสมการที่ขึ้นกับเวลา และประยุกต์ใช้แบบแผนวิธีในหัวข้อ 5.6 เพื่อดิสเครทไทต์เทอมต่างๆของสมการอนุรักษ์พลังงานสำหรับดิสเครทไทต์สมการนาเวียร์-สโตกส์จะแสดงการประมาณค่าความดัน ซึ่งค่อนข้างยุ่งยาก และซับซ้อน ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงแสดงหัวข้อการดิสเครทไทต์สมการอนุรักษ์พลังงานก่อนหน้าการดิสเครทไทต์สมการนาเวียร์-สโตกส์

5.8 การดิสเครทไทต์สมการอนุรักษ์มวล

จากสมการอนุรักษ์มวลแบบไร้อัตตัม จะได้ผลเฉลยวิคดังสมการ (5.13) และใช้ทฤษฎีของเกาส์จะได้สมการ (5.14)

$$\int \frac{\partial u_i}{\partial x} dV = 0 \quad (5.13)$$

$$\oint u_i n_i dA = 0 \quad (5.14)$$

เมื่อ A แทนพื้นที่ผิวเซล และ n_i แทนเวกเตอร์ตั้งฉากกับผิวเซล จากสมการ (5.5) ให้ทำการดิสเครทไทต์ด้วยระบบวิธีปริมาตรสืบเนื่องใน 2 มิติ (กรณีจัดวางกริดตามรูปที่ 5.4) จะได้สมการ (5.15) ซึ่งเรียกว่า สมการอนุรักษ์มวลแบบดิสเครทไทต์ เมื่อ L แทนระยะความกว้างของผิวเซลในแต่ละด้านตามตัวห้อย เช่น L_e แทนระยะความกว้างของผิวเซล e เป็นต้น

$$(uL)_e - (uL)_w + (uL)_n - (uL)_s = 0 \quad (5.15)$$

5.9 การดิสเครทไทต์สมการอนุรักษ์พลังงาน

จากแนวทางการดิสเครทไทต์สมการควบคุมทำให้การดิสเครทไทต์สมการอนุรักษ์พลังงาน โดยไม่พิจารณาเทอมฟังก์ชันการสลายตัวสามารถเขียนได้ว่า

$$\int_t^{t+\Delta t} \left(\int \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dV \right) dt + \int_t^{t+\Delta t} \left(\int \rho c_p u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} dV \right) dt = \int_t^{t+\Delta t} \left(\int k \frac{\partial^2 T}{\partial x_i \partial x_i} dV \right) dt \quad (5.16)$$

เทอมไม่คงตัว

เทอมการพา

เทอมการแพร่

เนื่องจากสมการอนุรักษ์พลังงานมีตัวแปรขึ้นกับตำแหน่ง และเวลา ดังนั้นสมการ (5.16) จึงอินทิเกรตในช่วงเวลาสั้นๆ (ΔT) และปริมาตรเล็กๆ (dV) โดยแบ่งพิจารณาเป็น 3 เทอมตามความหมายทางกายภาพคือ เทอมที่ไม่คงตัว (Unsteady term) เทอมการพา (Convection term) และเทอมการแพร่ (Diffusion term) ดังต่อไปนี้

5.9.1 การดิสเครทไทต์เทอมไม่คงตัว

แนวทางการดิสเครทไทต์จะใช้ทฤษฎีของเกาส์ เพื่อพิจารณาปริมาณ (กรณีนี้คืออุณหภูมิ) ที่ส่งถ่ายเข้า-ออกจากขอบเขตของปริมาตรควบคุมเล็กๆ ดังนี้

$$\int_t^{t+\Delta t} \left(\int \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dV \right) dt = \int \left(\int_t^{t+\Delta t} \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dt \right) dV \quad (5.17)$$

การประมาณค่าผลต่างเวลาแบ่งได้เป็น 3 แบบแผนวิธีหลักๆคือ แบบแผนวิธีเอกซ์พลีซิที (Explicit scheme) แบบแผนวิธีอิมพลีซิที (Implicit scheme) และแบบแผนวิธีแครง-นิโคลสัน (Crank-Nicolson scheme) งานวิจัยนี้กล่าวเฉพาะแบบแผนวิธีอิมพลีซิทีแบ่งได้หลายอันดับโดยสมการ (5.18) แสดงแบบแผนวิธีอิมพลีซิทีอันดับหนึ่ง (1^{st} - order implicit scheme) และสมการ (5.19) แสดงแบบแผนวิธีอิมพลีซิทีอันดับสอง (2^{nd} - order implicit scheme)

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\phi^{n+1} - \phi^n}{\Delta t} \quad (5.18)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{3\phi^{n+1} - 4\phi^n + \phi^{n-1}}{2\Delta t} \quad (5.19)$$

เมื่อ n แทนเวลาชั่วขณะที่พิจารณา ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะแสดงเฉพาะการดิสเครทไทต์ด้วยแบบวิธีอิมพลีซิทีอันดับหนึ่งโดยนำสมการ (5.18) แทนในสมการ (5.17) (กรณี 2 มิติ และจัดวางกริดตามรูปที่ 5.4) พิจารณาใน 2 มิติ ปริมาตรเซลล์เปลี่ยนเป็นพื้นที่เซลล์ จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \int \left(\int_t^{t+\Delta t} \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dt \right) dV &= \rho c_p \cdot \left(\frac{T - T^0}{\Delta t} \right) \cdot A_P \\ \int_t^{t+\Delta t} \left(\int \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dV \right) dt &= \rho c_p \cdot (T - T^0) \cdot A_P \end{aligned} \quad (5.20)$$

จากสมการ (5.20) ด้วย '0' แทนอุณหภูมิที่เวลา t สำหรับอุณหภูมิที่เวลา $t + \Delta t$ ไม่มีตัวยกและ A_p แทนพื้นที่เซลล์ที่ตำแหน่งโนด P (โนดที่สนใจ) เช่น A_p คือพื้นที่ส่วนที่แรเงาในรูปที่ 5.4 เป็นต้น

5.9.2 การ discretize โหนดเทอมการพา

การ discretize โหนดด้วยทฤษฎีของเกาส์ (พิจารณาใน 2 มิติ และจัดวางกริดตามรูปที่ 5.4) สามารถเขียนได้ดังนี้ เมื่อ $F_x = \rho c_p u_x L_x$ คือ สัมประสิทธิ์การพาที่ผนังเซลล์ต่างๆ โดยที่ $x=e, w, n, s$ ตามลำดับ

$$\begin{aligned} \int_t^{t+\Delta t} \left(\int \rho c_p u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} dV \right) dt &= \int_t^{t+\Delta t} (\phi \rho c_p \bar{u}_i T dA) dt \\ &= \rho c_p \cdot ((uTL)_e - (uTL)_w + (uTL)_n - (uTL)_s) \cdot \Delta t \\ \int_t^{t+\Delta t} \left(\int \rho c_p u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} dV \right) dt &= (F_e T_e - F_w T_w + F_n T_n - F_s T_s) \cdot \Delta t \end{aligned} \quad (5.21)$$

ค่าอุณหภูมิที่ผิวเซลล์ เช่น T_e คืออุณหภูมิที่ผิวเซลล์ e (ของปริมาตรที่โนด P) เป็นต้น คือตัวแปรที่ไม่ทราบค่าที่ต้องการประมาณค่า ในที่นี้เลือกแสดงแบบแผนวิธีผลต่างครอตราดิก สมการ (5.9) ถึง (5.12) เมื่อให้ $\phi = T$ นำทั้งหมดแทนในสมการ (5.21) จัดรูปใหม่จะได้สมการ (5.22) ดังนั้นผลเฉลยที่ได้จึงมีคุณสมบัติของแบบแผนวิธีผลต่างครอตราดิก ซึ่งถูกบรรจุอยู่ในพฤติกรรมกริดที่ส่งผลมาจากเทอมการพา ด้วยเหตุนี้จึงเห็นได้ว่า การเลือกแบบแผนวิธีการคำนวณในแต่ละเทอมมีความสำคัญมากต่อผลเฉลยประมาณค่าของระบบที่พิจารณา

$$\int_t^{t+\Delta t} \left(\int \rho c_p u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} dV \right) dt = \begin{bmatrix} \frac{3}{8} T_P \left((1 + \alpha_e) F_e - (2 - \alpha_w) F_w \right) \\ + (1 + \alpha_n) F_n - (2 - \alpha_s) F_s \\ - \frac{1}{8} T_W (3(1 + \alpha_w) F_w + \alpha_e F_e) \\ + \frac{1}{8} T_E (3(2 - \alpha_e) F_e + (1 - \alpha_w) F_w) \\ - \frac{1}{8} T_S (3(1 + \alpha_s) F_s - \alpha_n F_n) \\ + \frac{1}{8} T_N (3(2 - \alpha_n) F_n + (1 - \alpha_s) F_s) \\ + \frac{1}{8} T_{WW} (\alpha_w F_w) - \frac{1}{8} T_{EE} ((1 - \alpha_e) F_e) \\ + \frac{1}{8} T_{SS} (\alpha_s F_s) - \frac{1}{8} T_{NN} ((1 - \alpha_n) F_n) \end{bmatrix} \cdot \Delta t \quad (5.22)$$

5.9.3 การ discretize โหนดเทอมการแผ่

การ discretize โหนดด้วยทฤษฎีของเกาส์ (พิจารณาใน 2 มิติ และการจัดวางกริดตามรูปที่ 5.4) สามารถเขียนได้ดังสมการ (5.23)

การหาค่าประมาณของ $\partial T / \partial x_i$ เลือกแสดงด้วยแบบแผนวิธีผลต่างกึ่งกลาง ซึ่งไม่ได้ใช้สมการ (5.1) โดยตรงเนื่องจากไม่ต้องการประมาณค่าที่ผิวเซลล์ แต่ต้องการประมาณอัตราเปลี่ยนของปริมาณที่ส่งถ่ายผ่านผิวเซลล์ด้วยหลักการของแบบแผนวิธีผลต่างกึ่งกลางจะเปลี่ยนสมการ (5.1) ให้เขียนใหม่ได้เป็นสมการ

(5.24) เมื่อ δ_{PE} เป็นผลต่างของระยะที่โนด P และ E ในทำนองเดียวกัน $\delta_{WP}, \delta_{PN}, \delta_{SP}$ ก็คือผลต่างของระยะระหว่างโนดตัวห้อย

$$\begin{aligned} \int_t^{t+\Delta t} \left(\int k \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} dV \right) dt &= \int_t^{t+\Delta t} \left(\phi \bar{n} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) dA \right) dt \\ &= \left(\begin{aligned} &\left(k \frac{\partial T}{\partial x} L \right)_e - \left(k \frac{\partial T}{\partial x} L \right)_w \\ &+ \left(k \frac{\partial T}{\partial x} L \right)_n - \left(k \frac{\partial T}{\partial x} L \right)_s \end{aligned} \right) \cdot \Delta t \end{aligned} \quad (5.23)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e &= \frac{(\phi_E - \phi_P)}{\delta_{PE}}, & \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w &= \frac{(\phi_P - \phi_W)}{\delta_{WP}} \\ \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_n &= \frac{(\phi_N - \phi_P)}{\delta_{PN}}, & \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_s &= \frac{(\phi_P - \phi_S)}{\delta_{PE}} \end{aligned} \quad (5.24)$$

แทนสมการ (5.24) ลงในสมการ (5.23) พร้อมจัดรูปใหม่จะได้ตั้งสมการ (5.25) เมื่อ $D_e = k \frac{L_e}{\delta_{PE}}, D_w = k \frac{L_w}{\delta_{PE}}, D_n = k \frac{L_n}{\delta_{PE}}, D_s = k \frac{L_s}{\delta_{PE}}$ คือสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ผนังเซลล์ e, w, n, s ตามลำดับ

$$\int_t^{t+\Delta t} \left(\int k \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} dV \right) dt = \left(\begin{aligned} &D_e T_E + D_w T_W + D_n T_N + D_s T_S \\ &- (D_e + D_w + D_n + D_s) \cdot T_P \end{aligned} \right) \cdot \Delta t \quad (5.25)$$

นำสมการ (5.20), (5.22) และ (5.25) แทนในสมการ (5.16) และจัดรูปใหม่ โดยรวมพจน์ต่างๆเข้าด้วยกัน (ไม่ขอแสดงรายละเอียด) จะได้สมการ (5.26) เรียกว่าสมการอนุรักษ์พลังงานแบบดิสครีทไทต์ หรืออีกนัยหนึ่งคือ สมการพีชคณิตของสมการอนุรักษ์พลังงาน

$$\begin{aligned} a_P T_P &= a_E T_E + a_W T_W + a_N T_N + a_S T_S \\ &+ a_{EE} T_{EE} + a_{WW} T_{WW} + a_{NN} T_{NN} + a_{SS} T_{SS} \\ &+ a_P^0 T_P^0 \end{aligned} \quad (5.26)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} a_E &= D_e - \frac{3}{8} (2 - \alpha_e) \cdot F_e - \frac{1}{8} (1 - \alpha_w) \cdot F_w \\ a_W &= D_w + \frac{3}{8} (1 + \alpha_w) \cdot F_w + \frac{1}{8} a_e \cdot F_e \\ a_N &= D_n - \frac{3}{8} (2 - \alpha_n) \cdot F_n - \frac{1}{8} (1 - \alpha_s) \cdot F_s \\ a_S &= D_s + \frac{3}{8} (1 + \alpha_s) \cdot F_s + \frac{1}{8} a_n \cdot F_n \\ a_{EE} &= \frac{1}{8} (1 - \alpha_e) \cdot F_e \\ a_{WW} &= -\frac{1}{8} \alpha_w \cdot F_w \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 a_{NN} &= \frac{1}{8}(1 - \alpha_n) \cdot F_n \\
 a_{SS} &= -\frac{1}{8}\alpha_s \cdot F_s \\
 a_p^0 &= \frac{A_p}{\Delta t} \\
 a_p &= a_p^0 + a_E + a_W + a_N + a_S + a_{EE} + a_{WW} + a_{NN} + a_{SS} \\
 &\quad + (F_e - F_w + F_n - F_s)
 \end{aligned}$$

5.10 การดิสcretไทต์สมการนาเวียร์-สโตกส์

ด้วยแนวทางการดิสcretไทต์สมการควบคุม เมื่อใช้กับสมการนาเวียร์-สโตกส์แบบไร้การอัดตัวจะ
ได้ผลเฉลยวิคดังนี้

$$\begin{aligned}
 &\overbrace{\int_t^{t+\Delta t} \left(\int \rho \frac{\partial u_i}{\partial t} dV \right) dt}^{\text{เทอมไม่คงตัว}} + \overbrace{\int_t^{t+\Delta t} \left(\int \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} dV \right) dt}^{\text{เทอมการพา}} \\
 &= - \overbrace{\int_t^{t+\Delta t} \left(\int \frac{\partial p}{\partial x_i} dV \right) dt}^{\text{เทอมอัตราเปลี่ยนความดัน}} + \overbrace{\int_t^{t+\Delta t} \left(\int \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} dV \right) dt}^{\text{เทอมการแพร่}}
 \end{aligned}$$

(5.27)

จากสมการ (5.27) พบว่าแต่ละเทอมมีความหมายคล้ายกับสมการอนุรักษ์พลังงานในหัวข้อ 5.9 สมการ (5.16) โดยสมการ (5.27) มีเทอมอัตราเปลี่ยนความดันอยู่ด้วย จากหลักการความคล้ายคลึง ทำให้ไม่ต้องกล่าวรายละเอียดการดิสcretไทต์เทอมไม่คงตัว เทอมการพา และเทอมการแพร่ซ้ำอีก อย่างไรก็ตามได้แสดงผลการดิสcretไทต์เทอมดังกล่าวไว้ สำหรับหัวข้อนี้ได้เพิ่มเติมเนื้อหาการดิสcretไทต์เทอมอัตราเปลี่ยนความดันเป็นหลัก

การดิสcretไทต์เทอมอัตราเปลี่ยนความดันมีลักษณะที่พิเศษกว่าเทอมอื่น เพราะว่าในระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่องจะพิจารณาอัตราเปลี่ยนแปลงความดันเป็นเทอมแหล่งกำเนิด (Source term) เนื่องจากความสัมพันธ์ที่ควบคู่กัน (Couple relation) ระหว่างสมการอนุรักษ์มวล และสมการนาเวียร์-สโตกส์ ด้วยตัวแปรความเร็ว (u_i) อีกทั้งสมการนาเวียร์-สโตกส์ ยังมีความควบคู่แบบไม่เชิงเส้น (Non-linear couple)รวมอยู่ด้วย เห็นได้จากเทอมการพาเทียบกับเทอมอื่นๆ ดังนั้นหากทราบค่าของความดันที่ถูกต้องแล้ว ผลเฉลยของสมการนาเวียร์-สโตกส์แบบไร้การอัดตัว(ความเร็ว)ควรจะสอดคล้องกับสมการอนุรักษ์มวลด้วย

เมื่อพิจารณาเทอมอัตราเปลี่ยนความดันเป็นเทอมแหล่งกำเนิดทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้ทฤษฎีของเกาส์ในการดิสcretไทต์ ดังนั้นสามารถเขียนได้ดังสมการ (5.28) ซึ่งวิธีการแบบนี้เป็นหนึ่งในสาเหตุที่ทำให้คุณสมบัติของการเข้ากันได้ลดลง

$$\int_t^{t+\Delta t} \left(\int \frac{\partial p}{\partial x_i} dV \right) dt = \frac{\partial p}{\partial x_i} \cdot A_p \cdot \Delta t \tag{5.28}$$

สมการ (5.28) เทอมที่ต้องการประมาณค่าอัตราเปลี่ยนแปลงความดันคือ $\partial p/\partial x$, ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ การจัดวางตำแหน่งของความดันบนกริด โดยที่ผ่านมากล่าวถึงการจัดวางกริดแบบตำแหน่งร่วมเท่านั้น โดยทั่วไปการจัดวางกริดสามารถแบ่งได้ 2 แบบคือ

1. การจัดเรียงกริดแบบตำแหน่งร่วม (Co-located arrangement) (จากหัวข้อ 5.4)
2. การจัดเรียงกริดแบบทับซ้อน (Staggered arrangement)

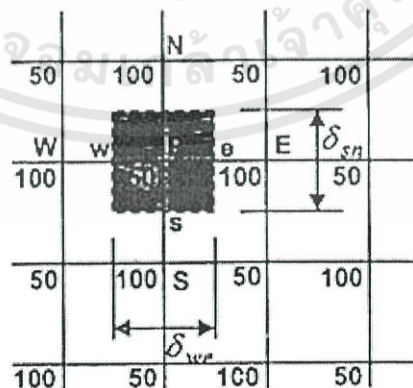
กรณีจัดเรียงกริดแบบตำแหน่งร่วม การประมาณค่า $\partial p/\partial x$ แบบเชิงเส้น จะได้ดังนี้

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{p_e - p_w}{\delta_{we}} = \frac{\left(\frac{p_E + p_P}{2}\right) - \left(\frac{p_P + p_W}{2}\right)}{\delta_{we}} = \frac{p_E - p_W}{2\delta_{we}} \tag{5.29}$$

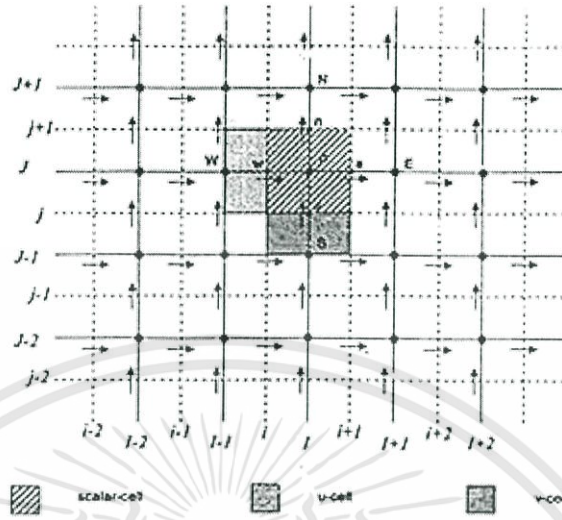
$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{p_n - p_s}{\delta_{sn}} = \frac{\left(\frac{p_N + p_P}{2}\right) - \left(\frac{p_P + p_S}{2}\right)}{\delta_{sn}} = \frac{p_N - p_S}{2\delta_{sn}}$$

การประมาณอัตราเปลี่ยนแปลงความดันแบบสมการ (5.29) ใช้ได้ดีในปัญหาที่การกระจายตัวของความดันสม่ำเสมอ หากการกระจายตัวของความดันเปลี่ยนแปลงไปมาก หรือพฤติกรรมความดันกระเพื่อม (Pressure fluctuation) ดังในรูป 5.6 เรียกว่า ปัญหากระดานหมากรุก (Checker board problem) การประมาณค่าที่มีการจัดเรียงกริดแบบตำแหน่งร่วมจะไม่เหมาะสม

แทนค่าจากปัญหากระดานหมากรุกตามรูปที่ 5.6 ในสมการ (5.29) พบว่าอัตราเปลี่ยนความดันเป็นศูนย์ซึ่งไม่เป็นจริง กรณีนี้สามารถแก้ไขได้โดยลดระยะกริดจนไม่เกิดลักษณะปัญหากระดานหมากรุก แต่ทำให้จำนวนกริดเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้สิ้นเปลืองหน่วยความจำ และระยะเวลาในการคำนวณซึ่งขึ้นอยู่กับทรัพยากรทางคอมพิวเตอร์ที่มี



รูปที่ 5.6 การกระจายตัวของความดันกระเพื่อม หรือปัญหากระดานหมากรุก



รูปที่ 5.7 แสดงการจัดเรียงกริดแบบทับซ้อนใน 2 มิติ

ดังนั้นการจัดเรียงกริดแบบทับซ้อนจึงเป็นเทคนิคที่เกิดขึ้นเพื่อแก้ไขความผิดพลาดของการคำนวณค่าอัตราเปลี่ยนความดันในปัญหากระดานหมากรุกโดยให้ตัวแปรสเกลาร์ (มวล ความดัน และ อุณหภูมิ) อยู่ในตำแหน่งโนดของปริมาตรควบคุมที่พิจารณา แต่ตัวแปรเวกเตอร์ (ความเร็ว) มีปริมาตรควบคุมเบี่ยงออกไป โดยจุดศูนย์กลางเซลล์ของปริมาตรเบี่ยงอยู่บนผิวเซลล์ของปริมาตรควบคุมที่สนใจ ในกรณี 2 มิติ แสดงดังรูปที่ 5.7

รูปที่ 5.7 ปริมาณสเกลาร์เก็บค่าที่โนดที่มีเครื่องหมาย (■) เรียกปริมาตรควบคุมนั้นว่า สเกลาร์เซลล์ (scalar-cell) สำหรับปริมาณเวกเตอร์เก็บค่าอยู่ที่ผิวเซลล์ที่มีเครื่องหมาย → เรียกว่า ยูเซลล์ (u-cell) ใช้กับแนวนอน กรณีแนวตั้งเก็บค่าอยู่ที่ผิวเซลล์ที่มีเครื่องหมาย ↑ เรียกว่า วิเซลล์ (v-cell) โดยการจัดคู่อันดับของตำแหน่งสัญลักษณ์ตัวพิมพ์ใหญ่ (I, J) แทนตำแหน่งของโนดที่อ้างอิงสเกลาร์เซลล์ และตัวพิมพ์เล็ก (i, j) แทนตำแหน่งของผิวเซลล์ ใช้ประกอบกับตัวพิมพ์ใหญ่เพื่ออ้างอิงตำแหน่งของยูเซลล์และวิเซลล์ที่เบี่ยงไปตามลำดับ

จากสมการ (5.28) การประมาณค่า $\frac{\partial p}{\partial x}$ กรณีจัดเรียงกริดแบบทับซ้อนจะเปลี่ยนไปจากสมการ (5.29) เพราะพิจารณาอัตราเปลี่ยนของความดันทำที่ปริมาตรควบคุมของความเร็ว ในกรณีอัตราเปลี่ยนความดันในแนวนอน ($\frac{\partial p}{\partial x}$) ใช้ยูเซลล์ และแนวตั้งใช้ ($\frac{\partial p}{\partial y}$) ใช้วิเซลล์ดังสมการ (5.30) และ (5.31) เป็นการประมาณค่าแบบเชิงเส้นโดยสมการทั้งสองอ้างอิงตำแหน่งแบบคู่อันดับ

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{p_P - p_W}{\delta_{WP}} = \frac{p_{I,J} - p_{I-1,j}}{\delta_u} \tag{5.30}$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{p_P - p_S}{\delta_{SP}} = \frac{p_{I,j} - p_{I,j-1}}{\delta_v} \tag{5.31}$$

เมื่อ δ_u และ δ_v คือระยะความกว้างของมิวเซล และ วิเซลตามลำดับ พิจารณาในปัญหากระดานหมากรุกด้วยสมการ (5.30) และ (5.31) พบว่าค่าอัตราเปลี่ยนของความดันมีค่าไม่เป็นศูนย์ แสดงว่าการจัดเรียงกริดแบบทับซ้อนมีแนวโน้มที่ใช้ปริมาณกริดไม่มาก แต่สามารถคำนวณอัตราเปลี่ยนของความดันได้ถูกต้องมากขึ้น อย่างไรก็ตามการจัดเรียงกริดแบบทับซ้อนต้องจัดเก็บตำแหน่งยูเซล และ วิเซลแยกออกจากตำแหน่งสเกลลาร์เซล จึงทำให้ค่อนข้างยุ่งยากในการเขียนโปรแกรมคำนวณ ดังนั้นการประมาณค่าเทอมอัตราเปลี่ยนความดันในสมการ (5.27) กรณีการจัดเรียงกริดแบบทับซ้อนทำได้โดยแทนสมการ (5.30) และ (5.31) ในสมการ (5.28) จัดรูปใหม่เป็น

$$\int_t^{t+\Delta t} \left(\int \frac{\partial p}{\partial x_i} dV \right) dt = \begin{cases} (p_{I,J} - p_{I-1,J}) \cdot L_u \cdot \Delta t & ; u - cell \\ (p_{I,J} - p_{I,J-1}) \cdot L_v \cdot \Delta t & ; v - cell \end{cases} \quad (5.32)$$

เมื่อ $L_u = L_{i,j}$ และ $L_v = L_{i,j}$ เป็นระยะความกว้าง-ยาวของยูเซล และ วิเซลตามลำดับ จากสมการ (5.32) ใช้ในกรณีกริดชนิดสี่เหลี่ยมเหมือนดังรูปที่ 5.7 เท่านั้นไม่ครอบคลุมกริดที่มีรูปแบบอื่นๆ เช่น สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยมไม่สม่ำเสมอ เป็นต้น

เมื่อพิจารณาการดิสcretize สมการนาเวียร์-สโตกส์ โดยใช้หลักการของความคล้ายคลึงจากการดิสcretize สมการอนุรักษ์พลังงาน สมการ (5.27) โดยจัดรูปใหม่ และเขียนได้ดังสมการ (5.33) และ (5.34) ซึ่งเป็นสมการนาเวียร์-สโตกส์ในแนวนอน และแนวตั้ง ตามลำดับ

$$\begin{aligned} a_p u_p &= a_E u_E + a_W u_W + a_N u_N + a_S u_S \\ &+ a_{EE} u_{EE} + a_{WW} u_{WW} + a_{NN} u_{NN} + a_{SS} u_{SS} \\ &+ a_p^0 u_p^0 + (p_W - p_P) \cdot L_u \end{aligned} \quad (5.33)$$

$$\begin{aligned} a_p v_p &= a_E v_E + a_W v_W + a_N v_N + a_S v_S \\ &+ a_{EE} v_{EE} + a_{WW} v_{WW} + a_{NN} v_{NN} + a_{SS} v_{SS} \\ &+ a_p^0 v_p^0 + (p_S - p_P) \cdot L_v \end{aligned} \quad (5.34)$$

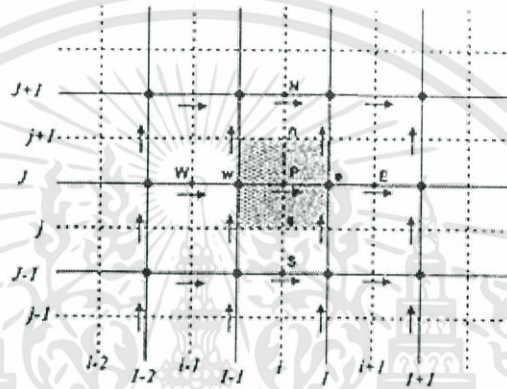
เมื่อ

$$\begin{aligned} a_p^0 &= \frac{A_p}{\Delta t}, a_E = D_e - \frac{3}{8}(2 - \alpha_e) \cdot F_e - \frac{1}{8}(1 - \alpha_w) \cdot F_w, \\ a_W &= D_w + \frac{3}{8}(1 + \alpha_w) \cdot F_w + \frac{1}{8} a_e \cdot F_e, \\ a_N &= D_n - \frac{3}{8}(2 - \alpha_n) \cdot F_n - \frac{1}{8}(1 - \alpha_s) \cdot F_s, \\ a_S &= D_s + \frac{3}{8}(1 + \alpha_s) \cdot F_s + \frac{1}{8} a_n \cdot F_n, \\ a_{EE} &= \frac{1}{8}(1 - \alpha_e) \cdot F_e, a_{WW} = -\frac{1}{8} \alpha_w \cdot F_w \\ a_{NN} &= \frac{1}{8}(1 - \alpha_n) \cdot F_n, \quad a_{SS} = -\frac{1}{8} \alpha_s \cdot F_s, \end{aligned}$$

$$\text{และ } a_p = a_e + a_w + a_n + a_s + a_{EE} + a_{WW} + a_{NN} + a_{SS} + (F_e - F_w + F_n - F_s)$$

สมการ (5.33) และ (5.34) เขียนให้อยู่ในรูปแบบการจัดวางกริดแบบทับซ้อน ดังนั้นจากหัวข้อที่ผ่านมาปริมาณ F , D เขียนอยู่ในรูปแบบของการจัดวางกริดแบบตำแหน่งร่วมจึงต้องปรับปรุงโดยพิจารณากรณียูเซล และวีเซลตามลำดับดังนี้

1. สัมประสิทธิ์การพาและการแพร่กรณียูเซล



รูปที่ 5.8 แสดงเวกเตอร์ความเร็วเมื่อพิจารณาเยล

จากรูปที่ 5.8 แสดงความเร็วในผนังเซลล์แบบต่างๆของยูเซล ในระบบการกำหนดตำแหน่งแบบคู่อันดับ พบว่าตำแหน่งเดิมของโนด P ในรูปที่ 5.7 เป็นตำแหน่งโนด e ในรูปที่ 5.8 เนื่องจากขณะที่พิจารณาเยลในกริดแบบทับซ้อน ตำแหน่งกึ่งกลางเซลล์เบี่ยงเบนไป ทำให้ต้องพิจารณาการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆอีกครั้ง

กรณีความหนาแน่น และความหนืดมีค่าคงที่ สามารถหาสัมประสิทธิ์การพา และการแพร่ ได้ดังสมการ (5.35) และ (5.36) ตามลำดับ (Versteeg [13])

$$F_e = (\rho u L)_e = \rho L_{i,j} \frac{u_{i+1,j} + u_{i,j}}{2}, \quad F_w = (\rho u L)_w = \rho L_{i-1,j} \frac{u_{i,j} + u_{i-1,j}}{2}, \quad (5.35)$$

$$F_n = (\rho v L)_n = \rho L_{i,j+1} \frac{v_{i,j+1} + v_{i,j}}{2}, \quad F_s = (\rho v L)_s = \rho L_{i,j} \frac{v_{i,j} + v_{i,j-1}}{2},$$

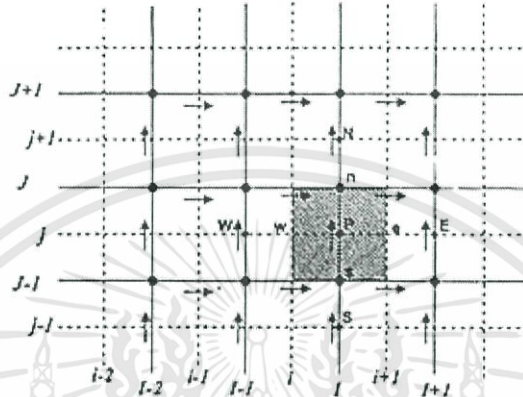
$$D_e = \mu \frac{L_{i,j}}{x_{i+1} - x_i}, \quad D_w = \mu \frac{L_{i-1,j}}{x_i - x_{i-1}}, \quad (5.36)$$

$$D_n = \mu \frac{L_{i,j+1}}{y_{j+1} - y_j}, \quad D_s = \mu \frac{L_{i,j}}{y_j - y_{j-1}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. สัมประสิทธิ์การพาและการแพร่กรณีวีเซล

พบว่าตำแหน่งเดิมของโหนด P ในรูปที่ 5.7 เป็นตำแหน่งโหนด n ในรูปที่ 5.9 เนื่องจากตำแหน่งกึ่งกลางเซลล์เบี่ยงเบนไปคล้ายคลึงกับกรณียูเซลโดยสามารถหาสัมประสิทธิ์การพา และการแพร่ได้ดังสมการ (5.37) และ (5.38) ตามลำดับ



รูปที่ 5.9 แสดงเวกเตอร์ความเร็วเมื่อพิจารณาวีเซล

$$F_e = \rho L_{i+1,j-1} \frac{u_{i+1,j} + u_{i+1,j-1}}{2}, F_w = \rho L_{i,j} \frac{u_{i,j} + u_{i,j-1}}{2}, \quad (5.37)$$

$$F_n = \rho L_{i,j} \frac{v_{i,j} + v_{i,j+1}}{2}, F_s = \rho L_{i,j-1} \frac{v_{i,j-1} + u_{i,j}}{2},$$

$$D_e = \mu \frac{L_{i+1,j-1}}{x_{i+1} - x_i}, D_w = \mu \frac{L_{i,j}}{x_i - x_{i-1}}, \quad (5.38)$$

$$D_n = \mu \frac{L_{i,j}}{y_{j+1} - y_j}, D_s = \mu \frac{L_{i,j-1}}{y_j - y_{j-1}}$$

พิจารณาสัมประสิทธิ์การพา ($F = pu$) เมื่อเทียบกับการดิสครีทไทด์สมการอนุพันธ์พลังงานในหัวข้อ 5.8 จะพบว่าในหัวข้อที่ผ่านมาไม่ต้องดิสครีทไทด์เทอมสัมประสิทธิ์ต่างๆ เนื่องจากในสมการอนุพันธ์พลังงาน ถือว่าทราบค่าความเร็วที่ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งกรณีนี้ใช้ได้กับการคำนวณแบบไม่ควบคู่ (Uncouple Solving) กล่าวคือ สมการอนุพันธ์พลังงานสามารถแยกพิจารณาหลังจากคำนวณสมการนาเวียร์-สโตกส์

เนื่องจากสัมประสิทธิ์การพามีเทอมความเร็วที่ผิวเซลล์อยู่ด้วย ซึ่งในสมการนาเวียร์-สโตกส์ ค่าความเร็วเป็นตัวแปรไม่ทราบค่า ดังนั้นการประมาณค่าความเร็วที่ผิวเซลล์ในการจัดเรียงกริดแบบตำแหน่งร่วม และกริดแบบตำแหน่งทับซ้อน ต้องคำนวณค่าความเร็วที่ผิวเซลล์จากตำแหน่งที่เก็บค่า

ตัวแปรความเร็วอยู่ เช่น ใช้ตำแหน่งโหนด (กรณีกริดแบบตำแหน่งร่วม) หรือใช้ตำแหน่งยูเซล-วีเซล (กรณีกริดแบบทับซ้อน) เป็นต้น ดังแสดงในสมการ (5.35) ถึง (5.38)

กรณีจัดเรียงกริดแบบทับซ้อนควรเขียนสมการดิสเครทไทต์ในระบบตำแหน่งคู่อันดับเพื่อไม่ทำให้ตำแหน่งของปริมาตรควบคุมที่พิจารณาสับสน จากสมการ (5.32) (5.33) และ (5.34) นำมาเขียนใหม่เป็นสมการนาเวียร์-สโตกส์แบบดิสเครทไทต์ ได้ดังนี้

$$a_{i,j}u_{i,j} = \sum a_d u_d (p_{I-1,j} - p_{I,j}) \cdot L_{i,j} \quad (5.39)$$

$$a_{i,j}v_{i,j} = \sum a_d v_d (p_{I,j-1} - p_{I,j}) \cdot L_{i,j} \quad (5.40)$$

เมื่อตัวห้อย d แทนตำแหน่งต่างๆของผิวเซลในปริมาตรควบคุมที่พิจารณาโดยเทียบกับกลุ่มสัมประสิทธิ์ในสมการ (5.33) และ (5.34) เช่นตำแหน่งผิวเซล P, E, W, N, S, EE เป็นต้น ซึ่งมีสัมประสิทธิ์การพา และการแพร่เป็นไปตามสมการ (5.35) และ (5.38)

5.11 ลำดับวิธีการคำนวณหาผลเฉลยของสมการควบคุมในการไหลคงตัว

ในการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลตามระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่องมีลำดับวิธีการคำนวณหาผลเฉลยของสมการควบคุมหลายวิธีโดยลำดับวิธีที่นิยมใช้ทั่วไปคือ ลำดับวิธี SIMPLE ลำดับวิธี SIMPLEC ลำดับวิธี SIMPLER และลำดับวิธี PISO ซึ่งในหัวข้อนี้จกล่าวถึงเฉพาะลำดับวิธี SIMPLE เพียงอย่างเดียว

ลำดับวิธีการคำนวณหาผลเฉลยแบบ SIMPLE (Semi-implicit method for pressure-linked equation) เป็นวิธีที่ใช้หลักการเดาค่าความดันแล้วนำไปคำนวณหาค่าความเร็ว และอุณหภูมิหรือปริมาณสเกลาร์อื่นๆ จากสมการนาเวียร์-สโตกส์ และสมการอนุรักษ์พลังงานตามลำดับ จากนั้น ตรวจสอบด้วยสมการอนุรักษ์มวล หากค่าตัวแปรทั้งหมดมีความสอดคล้องกับสมการควบคุมแสดงว่าค่าความดันที่เดามีความถูกต้อง หากไม่สอดคล้องจะเดาค่าความดันใหม่บนพื้นฐานของค่าความดัน ความเร็ว และอุณหภูมิเดิมที่คำนวณไว้ ดังนั้นขั้นแรกจึงแทนสมการ (5.39) และ (5.40) ด้วยค่าความเร็ว และ ความดันที่เดา (ตัวแปรที่เดาแทนด้วยสัญลักษณ์ด้วย $*$) จะได้ว่า

$$a_{i,j}u_{i,j}^* = \sum a_d u_d^* + (p_{I-1,j}^* - p_{I,j}^*) \cdot L_{i,j} \quad (5.41)$$

$$a_{i,j}v_{i,j}^* = \sum a_d v_d^* + (p_{I,j-1}^* - p_{I,j}^*) \cdot L_{i,j} \quad (5.42)$$

ทำการนิยามค่าความดันแก้ไข (Pressure correction) p' ขึ้น ซึ่งเป็นผลต่างระหว่างค่าความดันที่ถูกต้อง p กับค่าความดันที่เดาขึ้น p^* ถ้าค่าแก้ไขมีแนวโน้มใกล้ศูนย์มากขึ้นแสดงว่าค่าความดันลู่เข้าใกล้ความดันที่ถูกต้องมากขึ้น

$$p = p^* + p' \quad (5.43)$$

ในทำนองเดียวกันก็นิยามค่าแก้ไขของความเร็ว u' และ v' ที่เป็นผลต่างระหว่างค่าความเร็วที่ถูกต้องกับความเร็วที่เดาขึ้น u^* และ v^* ดังนี้

$$u = u^* + u' \quad (5.44)$$

$$v = v^* + v' \quad (5.45)$$

สามารถเขียนความสัมพันธ์ของค่าแก้ไขได้โดยนำสมการ (5.39) และ (5.40) ลบด้วยสมการ (5.41) และ (5.42) ตามลำดับ ใช้สูตรค่าแก้ไขจากสมการ (5.43) ถึง (5.45) จะได้สมการ (5.46) และ (5.47) ตามลำดับ

$$a_{i,j}u'_{i,j} = \sum a_d u'_d + (p'_{i-1,j} - p'_{i,j}) \cdot L_{i,j} \quad (5.46)$$

$$a_{i,j}v'_{i,j} = \sum a_d v'_d + (p'_{i,j-1} - p'_{i,j}) \cdot L_{i,j} \quad (5.47)$$

จากสมการ (5.46) และ (5.47) จะเห็นว่าเทอมที่มีเครื่องหมาย \sum ให้มีค่าประมาณศูนย์ ซึ่งเป็นการประมาณค่าตามลำดับวิธีแบบ SIMPLE โดยลำดับต่อไปแทนสมการ (5.46) และ (5.47) ลงในสมการ (5.44) และ (5.45) ตามลำดับ เมื่อ $d_{x,y} = \frac{L_{x,y}}{a_{x,y}}$ และ x,y คือตำแหน่งคู่ลำดับใดๆในสนามการคำนวณ และในทำนองเดียวกัน สมการความสัมพันธ์ของ $u_{i+1,j}, v_{i,j+1}$ จะเขียนได้ดังสมการ (5.50) และ (5.51)

$$u_{i,j} = u^*_{i,j} + d_{i,j}(p'_{i-1,j} - p'_{i,j}) \quad (5.48)$$

$$v_{i,j} = v^*_{i,j} + d_{i,j}(p'_{i,j-1} - p'_{i,j}) \quad (5.49)$$

$$u_{i+1,j} = u^*_{i+1,j} + d_{i+1,j}(p'_{i,j} - p'_{i+1,j}) \quad (5.50)$$

$$v_{i,j+1} = v^*_{i,j+1} + d_{i,j+1}(p'_{i,j} - p'_{i,j+1}) \quad (5.51)$$

จากหัวข้อที่ผ่านมาได้กล่าวถึงสาเหตุการพิจารณาเทอมอัตราการผลิตความดันเป็นเทอมแหล่งกำเนิดเพื่อคำนวณค่าความเร็วที่สอดคล้องกับสมการอนุรักษ์มวล สมการ (5.15) ที่ระบุตำแหน่งในระบบคู่อันดับตามรูปที่ 5.10 จะได้ว่า

$$(uL)_{i+1,j} - (uL)_{i,j} + (uL)_{i,j+1} - (uL)_{i,j} = 0 \quad (5.52)$$

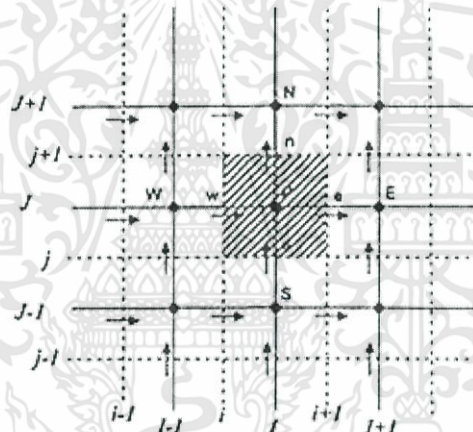
สำหรับการจัดเรียงกริดแบบทับซ้อน การ discretize เทอมการอนุรักษ์มวลใช้สเกลาร์เซลเป็นปริมาตรควบคุมที่สนใจ เนื่องจากความหมายทางกายภาพของมวลเป็นปริมาณที่มีแต่ขนาดไม่มีทิศทาง ดังนั้น

การประมาณด้วยสเกลาร์เซลล์ พิจารณาความสัมพันธ์ของค่าแก้ไขแทนสมการ (5.48) ถึง (5.51) ในสมการ (5.52) จัดรูปใหม่จะได้ดังนี้

$$m_{i,j}p'_{i,j} = m_{i+1,j}p'_{i+1,j} + m_{i-1,j}p'_{i-1,j} + m_{i,j+1}p'_{i,j+1} + m_{i,j-1}p'_{i,j-1} + M'_{i,j} \quad (5.53)$$

เมื่อ

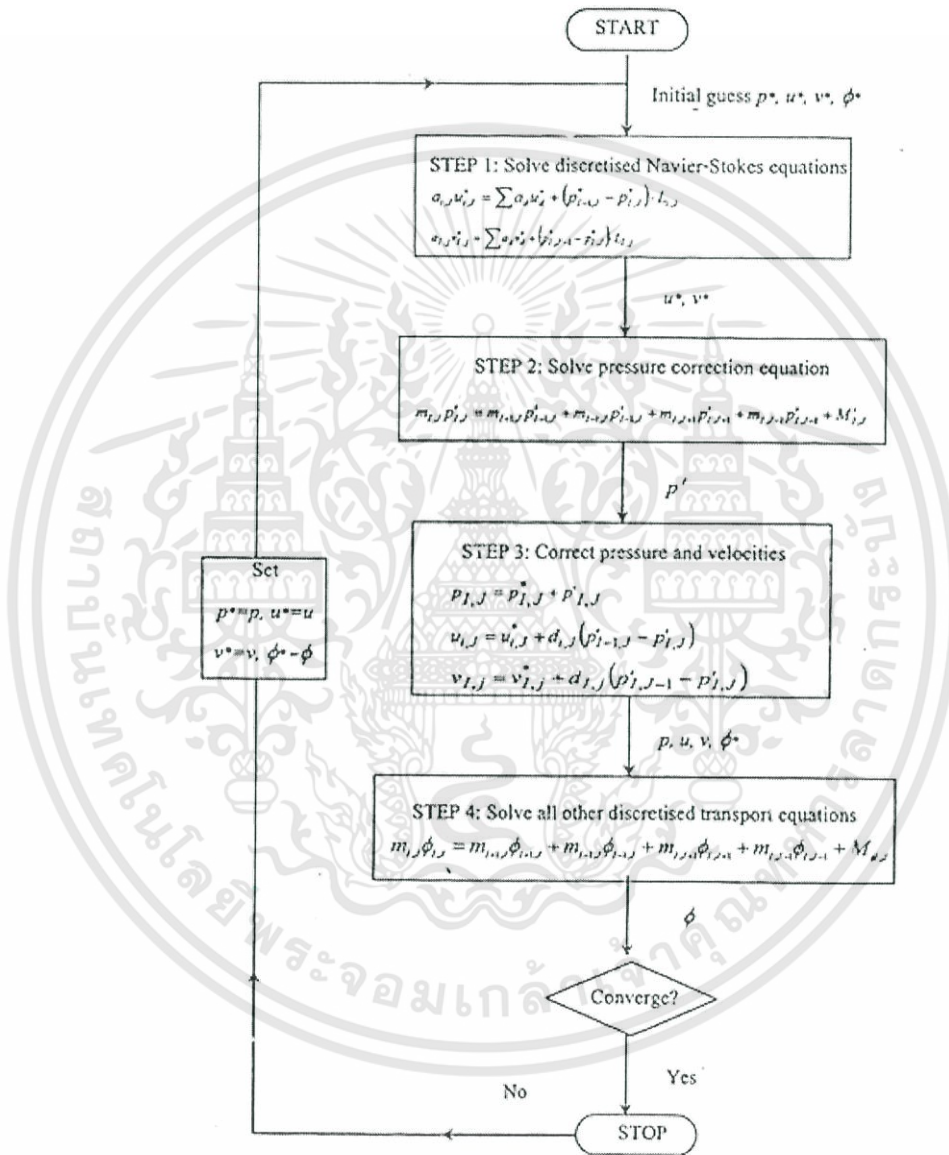
$$\begin{aligned} m_{i+1,j} &= (dL)_{i+1,j} \\ m_{i-1,j} &= (dL)_{i,j} \\ m_{i,j+1} &= (dL)_{i,j+1} \\ m_{i,j-1} &= (dL)_{i,j} \\ m_{i,j} &= m_{i+1,j} + m_{i-1,j} + m_{i,j+1} + m_{i,j-1} \\ M'_{i,j} &= (u^*L)_{i,j} - (u^*L)_{i+1,j} + (v^*L)_{i,j} - (v^*L)_{i,j+1} \end{aligned}$$



รูปที่ 5.10 แสดงเวกเตอร์ความเร็วเมื่อพิจารณาสเกลาร์เซลล์

สมการ (5.53) เรียกว่าสมการสำหรับแก้ไขความดัน (Equation for pressure correction) นำไปแทนในสมการ (5.43) (5.46) และ (5.47) เพื่อคำนวณค่าความเร็ว และความดันที่ถูกต้อง และหากความดันแก้ไขมีค่าต่ำกว่าขอบเขตกำหนด (Threshold) ปกติมีค่าน้อยมากทำให้ความผิดพลาดจากการประมาณค่าของเทอม Σ เป็นศูนย์ในสมการ (5.46) และ (5.47) ลดลง จึงควรตระหนักว่าปัญหาที่พิจารณาอาจส่งผลให้ค่าความดันแก้ไขไม่ลู่เข้า ในทางระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขจึงมักแก้ไขโดยใช้เทคนิควิธีอันเดอร์รีแลกเซชัน (Under relaxation method) ร่วมกับสมการ (5.43) และ (5.45) โดยความหมายทางกายภาพคือการเพิ่มตัวหน่วงให้ระบบการคำนวณ ทำให้ลดการลู่ออกของผลเฉลยโดยการหน่วง หรือในทางตรงกันข้ามคือการลู่เข้าของผลเฉลยจะช้าลง ซึ่งรายละเอียดวิธีการอันเดอร์รีแลกเซชันพบได้ทั่วไปในตำราทางด้านวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข

กระบวนการวิธี SIMPLE นั้น ให้คำตอบในการหาค่าความดัน และความเร็ว โดยกระบวนการวิธีทำซ้ำ ดังนั้นหากมีปริมาณสเกลาร์อื่นใดที่ผูกติดอยู่กับสมการนาเวียร์-สโตกส์ก็จำเป็นต้องทำการคำนวณเป็นลำดับ และวนกลับมาทำการคำนวณซ้ำอีกจนกระทั่งคำตอบทั้งหมดลู่เข้า ซึ่งได้ให้ Flow chart ไว้ในรูป 5.11



รูปที่ 5.11 ลำดับวิธีการคำนวณผลเฉลยด้วยวิธี SIMPLE

บทที่ 6

การกำหนดปัญหาและการพิสูจน์ความถูกต้อง

6.1 บทนำ

ในบทนี้เป็นการกำหนดลักษณะของปัญหาที่ใช้สำหรับทำการวิจัยและพร้อมทั้งทำการพิสูจน์ความถูกต้องของโปรแกรมที่ใช้กับผลการทดลองของงานวิจัยอื่นๆ ซึ่งลักษณะของปัญหาที่ใช้ในการจำลองการถ่ายเทความร้อนและพฤติกรรมของการไหลเป็นครีปที่มีการติดแผ่นกันสำหรับสร้างการไหลแบบหมุนวน (Vortex generator, VG) ภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนขนาดย่อม โดยแบ่งรูปแบบการจัดวางแผ่นกัน แบบทิศทางการกระแสน้ำไหล (upstream) และสวนทิศกับกระแสการไหล (downstream) ปรับค่ามุมปะทะเป็น 15,30,45 และ 60 องศา และปรับค่าระยะห่างระหว่างแผ่นกันเป็น 3.77,4.77 และ 5.77 มิลลิเมตร ตามลำดับ ในช่วงเรย์โนลด์ 500 ถึง 2500

6.2 สมการควบคุมและสมมติฐาน

การพัฒนาแบบจำลองเชิงตัวเลขสำหรับการไหลของของไหลรวมถึงการถ่ายเทความร้อนและพฤติกรรมของการไหลของครีปที่มีการติดตั้งแผ่นกันสำหรับการสร้างการไหลแบบหมุนวน ภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนขนาดย่อม มีสมมติฐานดังนี้

6.2.1 การไหลของของไหลและการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบคงตัว 3 มิติ

6.2.2 การไหลเป็นการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ และของไหลมีคุณสมบัติคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง

6.2.3 กระบวนการที่ทำให้เกิดการไหลวน (vortices) เป็นกระบวนการแบบ quasi-steady state

6.2.4 การไหลเป็นแบบ Laminar เนื่องจากความเร็วในการไหลน้อยมาก และระยะระหว่าง ครีป น้อยมาก และพฤติกรรมเป็นแบบ fully-developed สำหรับพื้นที่ทำการคำนวณ

6.2.5 การถ่ายเทความร้อนและความหนาของครีปและแผ่นกันจะไม่นำมาพิจารณา

6.2.6 ไม่คำนึงแรงเนื่องจากน้ำหนักและการสูญเสียเนื่องจากความหนืด

6.2.7 ไม่คำนึงการแผ่รังสีความร้อน

จากสมมติฐานข้างต้น จะนำไปใช้ในการพิจารณาการไหลของอากาศระหว่างครีปโดยที่สมการควบคุมประกอบไปด้วยสมการความต่อเนื่อง (Continuity equation), สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier Stokes equation) และสมการพลังงาน (Energy equation) ซึ่งมีรายละเอียดในพิภคคาร์ที่เขียนดังนี้

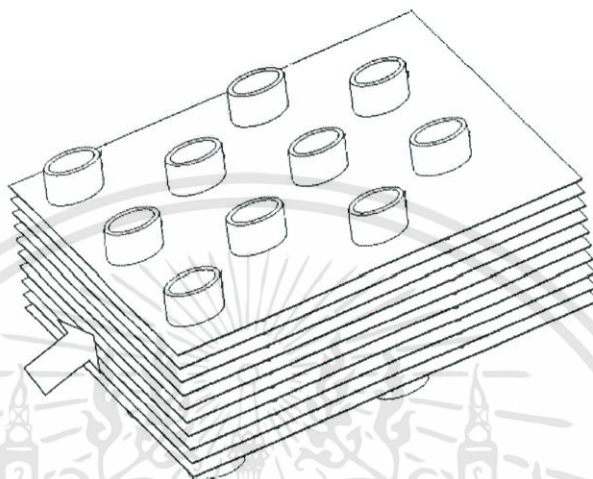
$$\text{สมการความต่อเนื่อง :} \quad \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (6.1)$$

$$\text{สมการโมเมนตัม:} \quad \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial p}{\partial x_k} \quad (6.2)$$

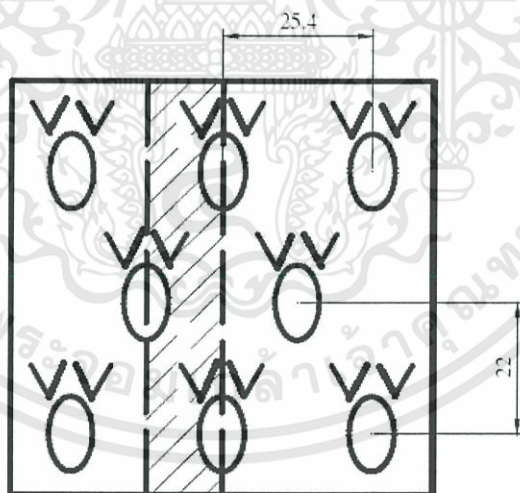
$$\text{สมการพลังงาน:} \quad \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (6.3)$$

6.3 การกำหนดลักษณะของปัญหาที่ใช้ในการวิจัย

โดยงานวิจัยนี้สนใจศึกษาเฉพาะส่วนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน กล่าวคือเฉพาะบริเวณที่อากาศไหลผ่านระหว่างครีบบังซึ่งมีท่อที่ตัดเรียงแบบเยื้องขวางการไหลของอากาศอยู่ สำหรับการจัดวางท่อและลักษณะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในการศึกษาจะแสดงในรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 แสดงรูปแบบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Fin-tube และการจัดวางท่อรูปวงรีที่ใช้ในการศึกษา

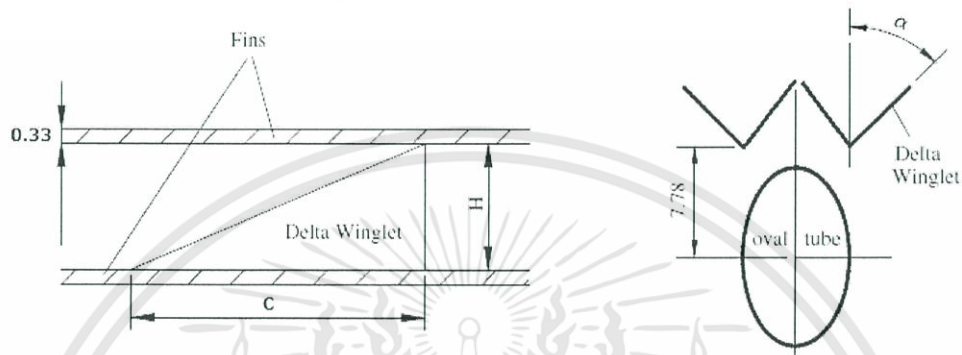


รูปที่ 6.2 แสดงขอบเขตส่วนหนึ่งของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ทำการศึกษา และระยะห่างระหว่างท่อ

จากรูปที่ 6.2 แสดงช่องทางการไหลซึ่งเป็นขอบเขตส่วนหนึ่งของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ทำการศึกษา โดยมีลักษณะดังต่อไปนี้ ความสูงของช่องการไหลมีระยะ(H) 3.2 ม.ม. กว้าง(B) 12.7 ม.ม. และยาว(L) 64.4 ม.ม. เส้นผ่าศูนย์กลางไฮดรอลิกส์ของช่องทางการไหล(D_h) 3.63 ม.ม. สำหรับท่อรูปวงรีมีทั้งหมด 3 แถว มีรัศมีหลัก(R_a) 6.28 ม.ม. รัศมีรอง(R_b) 3.77 ม.ม. ท่อแรกมีระยะห่างจากทางเข้าของช่องไหลเป็นระยะ 17.92 ม.ม. ระยะห่างระหว่างท่อตามยาว 25.4 ม.ม. ระยะห่างระหว่างท่อตามขวางเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์อื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

22 มม. ผลิตจากอลูมิเนียมและความหนาของครีป 0.33 มม. อุณหภูมิที่ผิวท่อคงที่ 300 เคลวิน อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้า 340 เคลวิน

แผ่นกั้นรูปตัววีที่มีลักษณะแบบ Delta-winglet ถูกติดกับพื้นผิวของ Fin ด้านหลังของท่อทรงรีอย่างสมมาตร โดยความสูงของแผ่นกั้นมีความสูงเท่ากับความสูงของช่องทางการไหล (ระยะระหว่างครีปแต่ละแผ่น:H) ซึ่งแผ่นกั้นนั้นทำหน้าที่เป็นโครงร่างที่กั้นระหว่างครีป แต่ละแผ่นพอดี มีอัตราส่วน aspect ratio($4H/c$) เท่ากับ 2 ความหนาของแผ่นกั้นดังแสดงในรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.3 แสดงลักษณะและขนาดของแผ่นกั้นและระยะห่างของแผ่นกั้นจากท่อ และการจัดวาง

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการแลกเปลี่ยนความร้อนและพฤติกรรมการไหลของอากาศ เมื่อมีการแบ่งรูปแบบการจัดวางแผ่นกั้น แบบทิศทางตามกระแสการไหล (upstream) และสวนทิศกับกระแสการไหล (downstream) ปรับค่ามุมปะทะเป็น 15,30,45 และ 60 องศา และปรับค่าระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นเป็น 3.77,4.77 และ 5.77 มิลลิเมตร ตามลำดับ ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านพื้นที่ศึกษาเป็น 1.3,2.6,3.9,5.2 และ 6.5 เมตรต่อวินาทีตามลำดับ

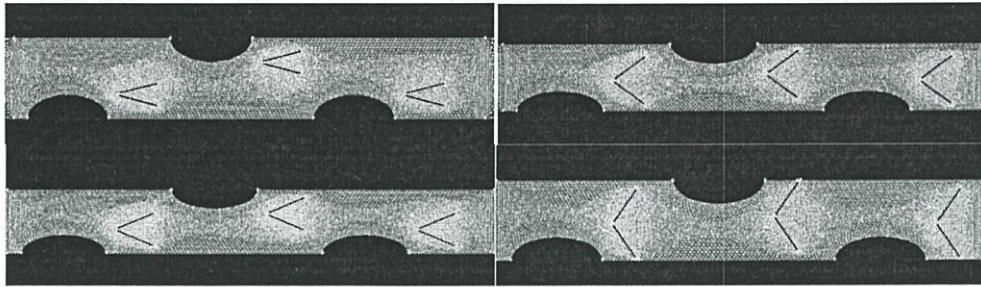


ก.

ข.

รูปที่ 6.4 ลักษณะการจัดวางแผ่นกั้นในทิศทางต่างๆ ก.upstream ข.downstream

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.5 แสดงมุมมองของแผ่นกั้น 15,30,45 และ 60 องศาตามลำดับ

สมการควบคุมทั้งหมดจะถูก discretized โดยแบบแผนวิธีผลต่างควอดราติก (Quadratic upstream interpolation for convective kinetics differencing scheme, QUICK) แล้วทำการคำนวณ หาผลเฉลยตามระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่องโดยแผนผังวิธีแบบ SIMPLE (Semi-implicit method for pressure-linked equations) ในการลู่อู่เข้าหาคำตอบจะพิจารณาที่ความแตกต่างของค่าการแปรเปลี่ยนน้อยกว่า 10^{-6} สำหรับสมการความต่อเนื่องและ 10^{-8} สำหรับสมการพลังงาน

ในการวิจัยนี้มีตัวแปรที่ให้ความสนใจอยู่ ตัวแปร คือ

$$\text{Reynolds Number: } Re = \frac{U_c D_h}{\nu} \quad (6.4)$$

$$\text{Nusselt Number เฉลี่ย: } Nu = \frac{hH}{k} \quad (6.5)$$

$$\text{ค่าตัวประกอบความเสียดทาน: } f = \frac{\Delta P D_h}{\frac{1}{2} \rho U_c^2 L} \quad (6.6)$$

$$\text{สัมประสิทธิ์การพาความร้อน } h = \frac{Q}{A \Delta T} \quad (6.7)$$

โดยที่ U_c คือ ความเร็วที่ผ่านหน้าตัดการไหลที่น้อยที่สุด

ν คือ ค่าความหนืดเชิงพลศาสตร์

k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน

D_h คือ Hydraulic diameter มีค่า 3.63 มม.

ΔP คือ Pressure drop; $\Delta P = \bar{p}_{in} - \bar{p}_{out}$

Q คือ การถ่ายเทความร้อน; $Q = \dot{m} C_p \Delta T$

$$\text{อุณหภูมิและความดันเฉลี่ยต่อพื้นที่หน้าตัด: } \bar{T} = \frac{\iint_A u T dA}{\iint_A u dA}, \bar{p} = \frac{\iint_A p dA}{\iint_A dA} \quad (6.8), (6.9)$$

$$\text{Log-mean temperature: } \Delta T = \frac{(T_w - \bar{T}_{in}) - (T_w - \bar{T}_{out})}{\ln \left[\frac{(T_w - \bar{T}_{in})}{(T_w - \bar{T}_{out})} \right]} \quad (6.10)$$

$$\text{ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน: } TEF = \frac{Nu/Nu_o}{(f/f_o)^{1/3}} \quad (6.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.1 แสดงกรณีศึกษาของงานวิจัย

กรณีศึกษา	การจัดวางตำแหน่ง	ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน	มุมปะทะ(องศา)	ความเร็วของอากาศที่ทางเข้า (เมตรต่อวินาที)	
1	upstream	3.77	15	1.3	
2				2.6	
3				3.9	
4				5.2	
5				6.5	
6		30	3.77	45	1.3
7					2.6
8					3.9
9					5.2
10					6.5
11					1.3
12					2.6
13					3.9
14					5.2
15					6.5
16		60	4.77	15	1.3
17					2.6
18					3.9
19					5.2
20					6.5
21					1.3
22					2.6
23		30	4.77	15	3.9
24					5.2
25					6.5
26					1.3
27					2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้พิมพ์ไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีศึกษาที่	การจัดวางตำแหน่ง	ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน	มุมปะทะ(องศา)	ความเร็วของอากาศที่ทางเข้า (เมตรต่อวินาที)	
28	upstream	4.77	30	3.9	
29				5.2	
30				6.5	
31			45	1.3	
32				2.6	
33				3.9	
34			5.2		
35			6.5		
36			60	1.3	
37				2.6	
38				3.9	
39			5.2		
40			6.5		
41			5.77	15	1.3
42					2.6
43		3.9			
44		5.2			
45		6.5			
46		30		1.3	
47				2.6	
48				3.9	
49		5.2			
50		6.5			
51		45		1.3	
52				2.6	
53				3.9	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณี	การจัดวางตำแหน่ง	ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน	มุมปะทะ(องศา)	ความเร็วของอากาศที่ทางเข้า (เมตรต่อวินาที)
54	upstream	5.77	45	5.2
55				6.5
56				1.3
57			60	2.6
58				3.9
59				5.2
60				6.5
61	downstream	3.77	15	1.3
62				2.6
63				3.9
64			5.2	
65			6.5	
66			1.3	
67			2.6	
68			30	3.9
69			5.2	
70			6.5	
71			45	1.3
72				2.6
73				3.9
74	5.2			
75	60	3.77	45	6.5
76			1.3	
77			2.6	
78			3.9	
79			5.2	
80			6.5	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที	การจัดวางตำแหน่ง	ระยะห่างระหว่าง แผ่นกั้น	มุมปะทะ(องศา)	ความเร็วของอากาศ ที่ทางเข้า (เมตรต่อวินาที)	
81			15	1.3	
82				2.6	
83				3.9	
84				5.2	
85				6.5	
86			30	1.3	
87				2.6	
88				3.9	
89				5.2	
90				6.5	
91	downstream	4.77	45	1.3	
92				2.6	
93				3.9	
94				5.2	
95				6.5	
96			60	1.3	
97				2.6	
98				3.9	
99				5.2	
100				6.5	
101	5.77	15	1.3		
102			2.6		
103			3.9		
104			5.2		
105			6.5		
106			5.77	30	1.3
107					2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีศึกษา	การจัดวางตำแหน่ง	ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน	มุมปะทะ(องศา)	ความเร็วของอากาศที่ทางเข้า (เมตรต่อวินาที)
108	downstream	5.77	30	3.9
109				5.2
110				6.5
111			45	1.3
112				2.6
113				3.9
114			60	5.2
115				6.5
116				1.3
117			60	2.6
118				3.9
119				5.2
120	6.5			

6.4 ค่าเงื่อนไขขอบเขตในการคำนวณการไหลสามมิติ

สำหรับการคำนวณในสามมิติ ได้ใช้ค่าเงื่อนไขขอบเขตดังต่อไปนี้

6.4.1 เงื่อนไขบริเวณต้นทางการไหล

$$\text{บริเวณทางเข้า : } u = u_{in} = \text{const}, v = w = 0, T = T_{in} = \text{const.} \quad (6.12)$$

$$\text{บริเวณพื้นผิวด้านบนและด้านล่าง: } \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial v}{\partial z} = 0, w = 0, \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (6.13)$$

$$\text{บริเวณพื้นผิวด้านข้าง: } \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial y} = 0, v = 0, \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (6.14)$$

6.4.2 เงื่อนไขบริเวณปลายทางการไหล

$$\text{บริเวณพื้นผิวด้านบนและด้านล่าง: } \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial v}{\partial z} = 0, w = 0, \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (6.15)$$

$$\text{บริเวณพื้นผิวด้านข้าง: } \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial y} = 0, v = 0, \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (6.16)$$

$$\text{บริเวณทางออก: } \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (6.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.4.3 เงื่อนไขบริเวณ ครีบ

บริเวณพื้นผิวด้านบนและด้านล่างมี

$$\text{เงื่อนไขความเร็วของของไหล: } u = v = w = 0 \quad (6.18)$$

เงื่อนไขอุณหภูมิ : เป็นเงื่อนไขแบบคาบ (periodic)

บริเวณพื้นผิวด้านข้างมี

$$\text{บริเวณของไหล: } \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial w}{\partial y} = 0, v = 0, \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (6.19)$$

$$\text{บริเวณผิวครีบ: } u = v = w = 0, \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (6.20)$$

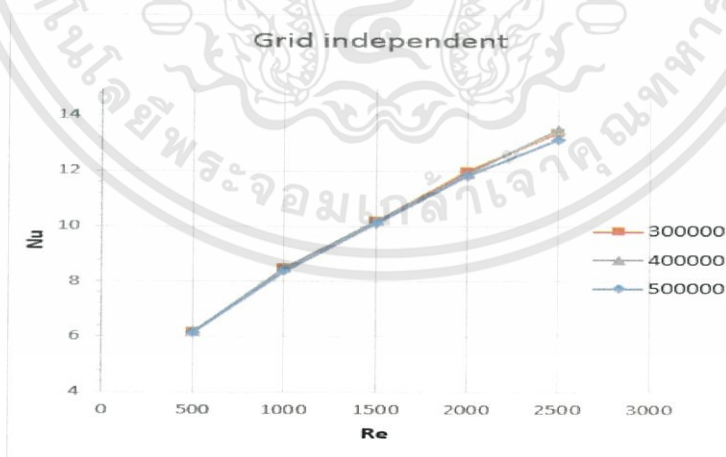
$$\text{บริเวณพื้นผิวท่อ: } u = v = w = 0, T = T_w = \text{const.} \quad (6.21)$$

6.5 การเลือกระดับความละเอียดและพิสูจน์ความถูกต้อง

เนื่องจากผลเฉลยที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลขเป็นค่าที่ได้จากการประมาณ การคำนวณย่อมมีความผิดพลาดเกิดขึ้นได้ ดังนั้นในการนำโปรแกรมมาใช้งานต้องมีการตรวจสอบโปรแกรมว่าให้ผลเฉลยถูกต้องหรือไม่

6.5.1 การเลือกระดับความละเอียด

เนื่องจากการคำนวณด้วยวิธีเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของของไหลและการถ่ายเทความร้อนของระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (finite volume method) จะต้องทำการแบ่งแบบจำลองออกเป็นกริดต่างๆ โดยจำนวนกริดบ่งบอกถึงความละเอียดในการคำนวณ ซึ่งหากการคำนวณมีความละเอียดมากโอกาสที่จะเกิดความผิดพลาดจะยิ่งน้อยลง แต่การใช้จำนวนกริดในจำนวนมากขึ้นนั้น จะทำให้เสียเวลาในการคำนวณมากขึ้นตามไปด้วย จึงต้องทำการทดสอบกริดอิสระเพื่อหาจำนวนกริดที่เหมาะสมสำหรับการคำนวณเชิงตัวเลขในงานวิจัยนี้

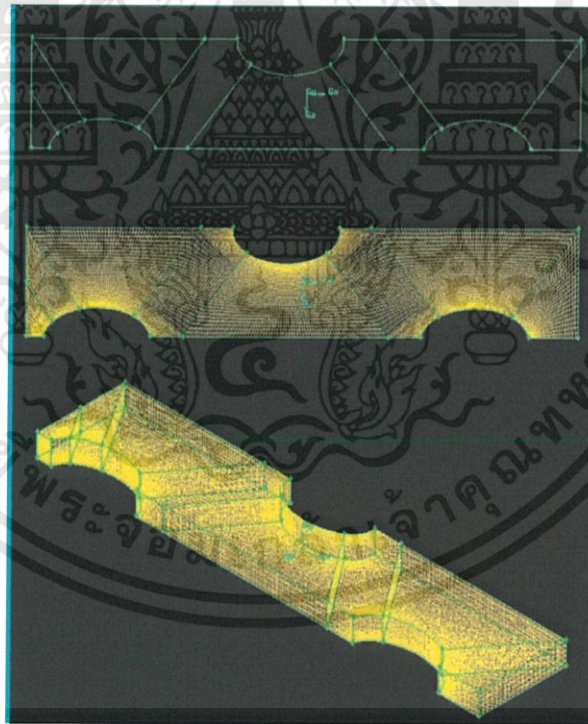


รูปที่ 6.6 แสดงการทดสอบกริดอิสระสำหรับ เลขนัสเซล



รูปที่ 6.7 แสดงการทดสอบกริดอิสระสำหรับ ค่าความดันตกคร่อม

จากรูปที่ 6.6 และ 6.7 แสดงให้เห็นว่าการทดสอบกริดโดยการเลือกใช้จำนวนกริดที่ 300,000 400,000 และ 500,000 กริด ให้ผลเฉลยการคำนวณที่ไม่แตกต่างกันมากนัก หรือแตกต่างกันแค่ประมาณ 0.75 % ดังนั้นการเลือกใช้จำนวนกริดที่ 300,000 จึงเหมาะสมที่สุดเพราะจะประหยัดเวลาในการคำนวณมากที่สุด



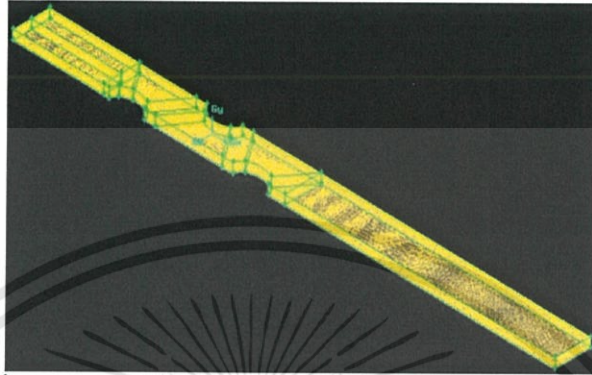
รูปที่ 6.8 แสดงลักษณะการแบ่งแบบจำลองและรูปแบบของกริด

6.5.2 การตรวจสอบความถูกต้อง

นอกจากการทดสอบกริดอิสระแล้วการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่เลือกทำขึ้นกับผลการทดลองที่เกิดขึ้นจริงก็มีความสำคัญไม่น้อยไปกว่ากัน โดยจะเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Kays and London [12] ในการทดสอบความถูกต้อง

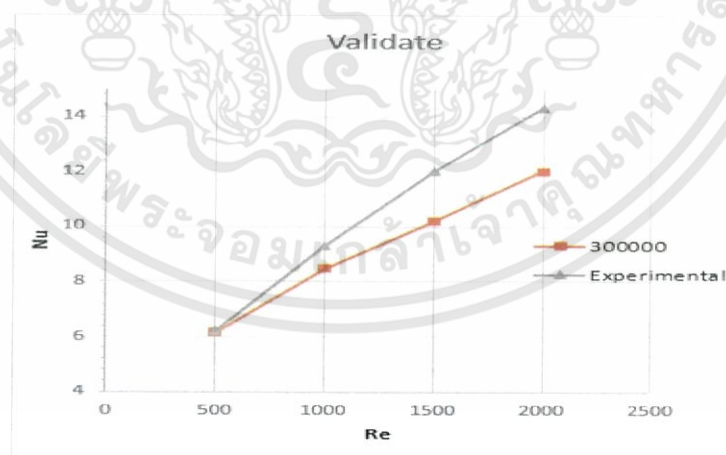
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความดันตกคร่อม ที่ได้มีค่าความผิดพลาดจากการทดลองสูง ซึ่งมีค่าถึงประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ จึงสันนิษฐานว่าจุดที่ทำการวัดค่าความดันตกคร่อม เป็นจุดที่เกิดจากการสุ่มอาจทำให้ความดันที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อน ดังนั้น จึงต้องทำการสุ่มในช่วงการวัดที่ยาวขึ้น น่าจะทำให้ค่าความดันตกคร่อม มีค่าใกล้เคียงกับผลงานวิจัยมากขึ้นโดยการเพิ่มระยะทางเข้า ทางออก

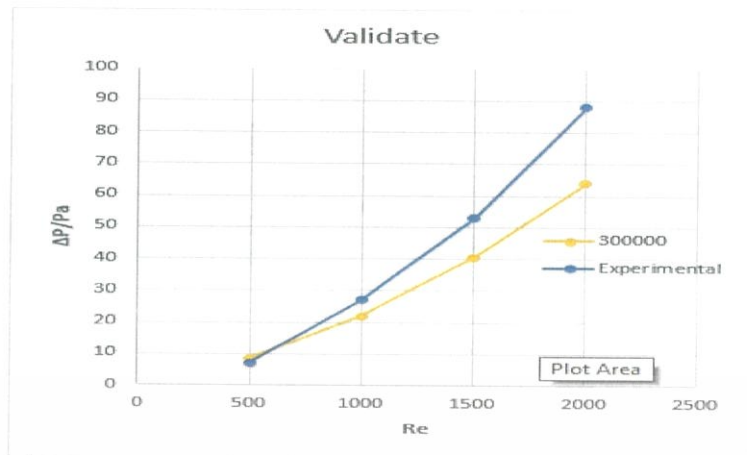


รูปที่ 6.9 แสดงแบบจำลองที่เพิ่มระยะทางเข้า ทางออกแล้ว

เมื่อเปรียบเทียบผลของการจำลองพบว่าค่าที่ได้จากระเบียบวิธีเชิงตัวเลขมีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดคิดเป็น 10% สำหรับเลขนัสเซลและ 20% สำหรับค่าความดันตกคร่อม ของการทดสอบการจำลอง การไหลของอากาศผ่านครีที่ังไม่มีการติดตั้งแผ่นกั้นสำหรับการสร้างการไหลแบบหมุนวน ดังแสดงในรูปที่ 6.10 และ 6.11 ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลลัพธ์ที่ดังกล่าวมีความสอดคล้องกับผลงานวิจัยอื่นเป็นอย่างดี ทำให้เป็นที่ยืนยันได้ว่าแบบจำลองการไหล 3 มิติ รวมทั้งโปรแกรมที่ใช้พื้นฐานของระเบียบวิธีปริมาตรสี่บเนื่องสามารถนำมาเป็นเครื่องมือในการคำนวณเพื่อวิเคราะห์ปัญหาการไหลในการถ่ายเทความร้อนสำหรับงานวิจัยนี้ได้



รูปที่ 6.10 แสดงการตรวจสอบความถูกต้องของเลขนัสเซล



รูปที่ 6.11 แสดงการตรวจสอบความถูกต้องของค่าความดันตกคร่อม



ผลวิเคราะห์เชิงตัวเลขและการอภิปราย

7.1 บทนำ

โดยทั่วไปสมรรถนะเชิงความร้อนจะแปรผันตรงกับค่าความดันสูญเสีย กล่าวคือหากต้องการเพิ่มสมรรถนะในการแลกเปลี่ยนความร้อน ค่าความดันสูญเสียก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งจะนำไปสู่การสิ้นเปลืองกำลังทางกลในรูปของพลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนคอมเพรสเซอร์หรือพัดลม เพราะฉะนั้นการออกแบบและการเลือกใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจึงจะต้องมีการพิจารณาอย่างถี่ถ้วนทั้งในด้านอัตราการถ่ายเทความร้อนและกำลังทางกลที่ใช้ในการขับเคลื่อนของไหลเพื่อให้เกิดความเหมาะสมมากที่สุด

ในบทนี้จะวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลและพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของครีบบนครีบบเรียบและครีบบนที่ติดแผ่นกันสำหรับสร้างการไหลแบบหมุนวน VG ซึ่งในหัวข้อ 7.3 จะกล่าวถึงอิทธิพลของแผ่นกัน โดยจะเปรียบเทียบถึงความแตกต่างของครีบบเรียบและครีบบนที่ติด VG หัวข้อที่ 7.4 จะอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิทธิพลต่างๆ และหัวข้อถัดไปคือ 7.5, 7.6, 7.7 และ 7.8 จะกล่าวถึงอิทธิพลของเลขเรย์โนลด์ มุมปะทะ ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน และการจัดวางตำแหน่งของแผ่นกัน VG ที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อน โดยที่ค่าการถ่ายเทความร้อนได้แสดงในเทอมของเลขนัสเซลเฉลี่ย (Nu) และผลของการสูญเสียความดันจะแสดงในเทอมของค่าตัวประกอบความเสียดทาน (friction factor) การศึกษาจะพิจารณาถึงอิทธิพลของเลขเรย์โนลด์ในช่วง 500 ถึง 2500 และขนาดของแผ่นกัน VG ในรูปแบบต่างๆ คือ อิทธิพลของมุมปะทะที่ 15, 30, 45 และ 60 องศา ตามลำดับ และอิทธิพลของระยะห่างระหว่างแผ่นกัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.77, 4.77 และ 5.77 มิลลิเมตรตามลำดับ และการจัดวางตำแหน่งของแผ่นกันในทิศทางเดียวกับกระแสการไหล (upstream) และทิศทางสวนกับกระแสการไหล (downstream) ทำการศึกษาการไหลแบบราบเรียบ (Laminar) โดยจากพารามิเตอร์เลขนัสเซลเฉลี่ย และค่าตัวประกอบความเสียดทานทำให้สามารถวิเคราะห์หาขนาดของ VG ที่เหมาะสมซึ่งให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงที่สุด

7.2 ผลการทดลอง

จากการคำนวณเชิงตัวเลข จะสามารถวัดผลการทดลองจากโปรแกรม ในรูปแบบของเลขนัสเซลเฉลี่ย (Nu) และค่าความดันตกคร่อมที่ทางเข้าและออก (ΔP) นำผลการทดลองไปคำนวณตัวแปรต่างๆ ดังนี้

7.2.1. f (friction factor) สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน เป็นตัวแปรไร้มิติ ซึ่งเป็นผลมาจากความดันตกคร่อม

7.2.2. Nu/Nu_0 เป็นการเปรียบเทียบค่าของเลขนัสเซลเฉลี่ย กับกรณีที่ยังไม่ได้ติด VGs

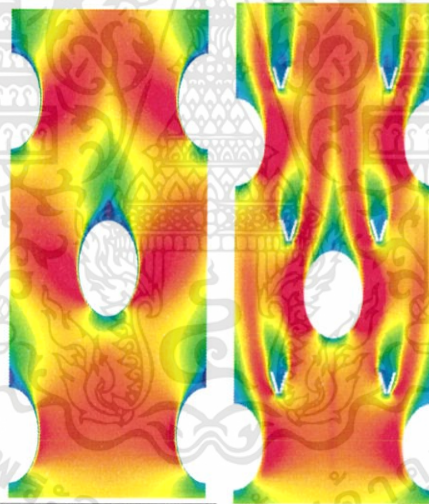
7.2.3. f/f_0 เป็นการเปรียบเทียบค่าตัวประกอบความเสียดทาน กับกรณีที่ยังไม่ได้ติด VGs

7.2.4. TEF (Thermal Enhancement factor) สมรรถนะการถ่ายเทความร้อน เป็นตัวแปรที่แสดงผลของความสามารถการถ่ายเทความร้อน และผลเสียจากความดันตกคร่อมในตัวแปรเดียว ซึ่งสามารถใช้เปรียบเทียบผลการทดลองในแต่ละกรณีได้ชัดเจน สำหรับตารางบันทึกผลการทดลองจะแสดงอยู่ในภาคผนวก ก.

7.3 อิทธิพลของแผ่นกัน VG รูปตัววี

สำหรับในหัวข้อ 7.3 นี้จะกล่าวถึงความแตกต่างของพฤติกรรมการไหลและพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนระหว่างครีบริเรียบและครีบริที่ติดแผ่นกัน VGs โดยการพิจารณาผลกระทบจากการติดตั้งแผ่นกัน VGs รูปตัววี จะทำการเปรียบเทียบกรณีที่มีสมรรถนะในการถ่ายเทความร้อนมากที่สุดนั่นคือกรณีที่ติดตั้งแผ่นกันในตำแหน่งแบบ upstream ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน VGs เท่ากับ 5.77 มุมปะทะ 15 องศา เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 2500 กับกรณีที่ไม่ได้ติดตั้งแผ่นกัน VGs

หากพิจารณาจากคอนทัวร์ของความเร็ว (Contour-velocity) จะพบว่ากรณีติดตั้งแผ่นกันจะเกิดการชะลอของการไหลที่บริเวณด้านหลัง VGs ทำให้เกิดค่าความดันตกคร่อม เนื่องจากการหมุนวนของของไหล ข้างหลังแผ่นกัน หากพิจารณาจากสตรีมไลน์ในหน้าตัดตามขวาง (Cross section-streamline) จะพบว่าของกรณีติดตั้งแผ่นกัน VGs จะเกิดการหมุนวนในหน้าตัด ที่รุนแรงกว่า กรณีไม่ได้ติดตั้งแผ่นกัน VGs ซึ่งเกิดการหมุนวนเพียงเล็กน้อยบริเวณที่ติดกับครีบริ บนล่าง จากการหมุนวนดังกล่าวและความเร็วที่ลดลงจากการชะลอของการไหล ส่งผลทำให้ค่าตัวประกอบความเสียหายมีค่าเพิ่มขึ้น และการชะลอของการไหลทำให้ช่วงเวลาในการถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศมีมากขึ้น รวมถึงกระแสการไหลถูกบังคับทิศทางไปทางท่อมากขึ้น สังเกตได้จากสตรีมไลน์ (streamline) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Fin-Tube จึงสามารถถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศได้มากขึ้น ส่งผลให้ เลขนัสเซลเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้น

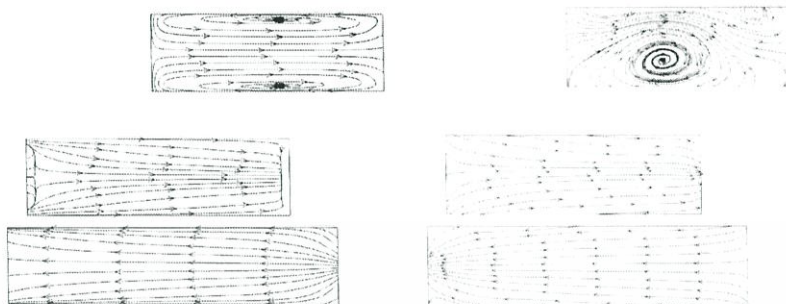


ก. ข.

รูปที่ 7.1 แสดงคอนทัวร์ของความเร็วบริเวณกึ่งกลางของช่องทางการไหล ก. กรณีที่ยังไม่ได้ติดตั้งแผ่นกัน VGs ข. กรณีที่ติดตั้งแผ่นกันในตำแหน่งแบบ upstream ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน VGs เท่ากับ 5.77 มุมปะทะ 15 องศา เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 2500

พิจารณาดารงที่ผลการทดลองในภาคผนวก ก. จากผลการทดลองเมื่อพิจารณาอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าตัวประกอบความเสียหาย เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ได้ติดตั้งแผ่นกัน VGs พบว่า กรณีที่ทำให้ค่าตัวประกอบความเสียหายเพิ่มขึ้นน้อยคือ กรณีที่ติดตั้งแผ่นกันในตำแหน่งแบบ upstream ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน VGs เท่ากับ 3.77 มุมปะทะ 15 องศา เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 2500 โดยมีค่าประกอบความเสียหายเป็น 1.57 เท่าของกรณีที่ไม่ได้ติดตั้งแผ่นกัน VGs ($f/f_0 = 1.57$) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเกิดความสูญเสียจากการสูญเสียความดันมากขึ้นเพียง 1.57 เท่า แต่อัตราส่วนของ เลขนัสเซลเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเพียง 1.25 เท่า ($Nu/Nu_0 = 1.25$) จึงมีใช้กรณีที่มีสมรรถนะในการถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุด (TEF = 1.0774) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

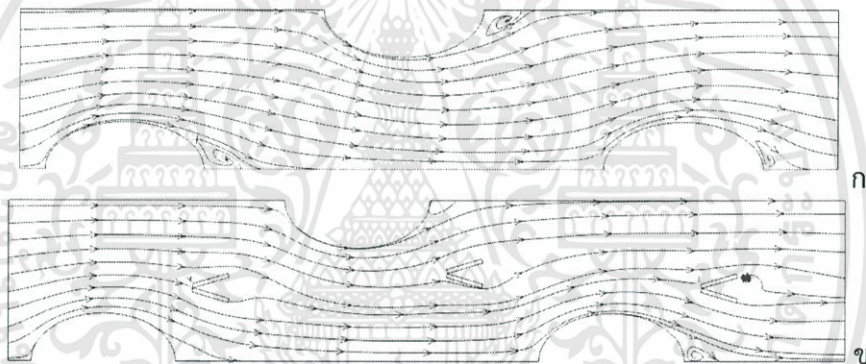
จากผลการทดลองเมื่อพิจารณาอัตราการเพิ่มขึ้นของ เลขนัสเซลเฉลี่ย เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ได้ติดแผ่นกัน VGs พบว่า กรณีที่ทำให้ เลขนัสเซลเฉลี่ยเพิ่มขึ้นมากที่สุดคือ กรณีที่ติดแผ่นกันใน



ก.

ข.

รูปที่ 7.2 แสดงสตรีมไลน์ในหน้าตัด ก. กรณีที่ยังไม่ได้ติดแผ่นกัน VGs ข. กรณีที่ติดแผ่นกันในตำแหน่งแบบ upstream ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน VGs เท่ากับ 5.77 มุมปะทะ 15 องศา เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 2500



ก.

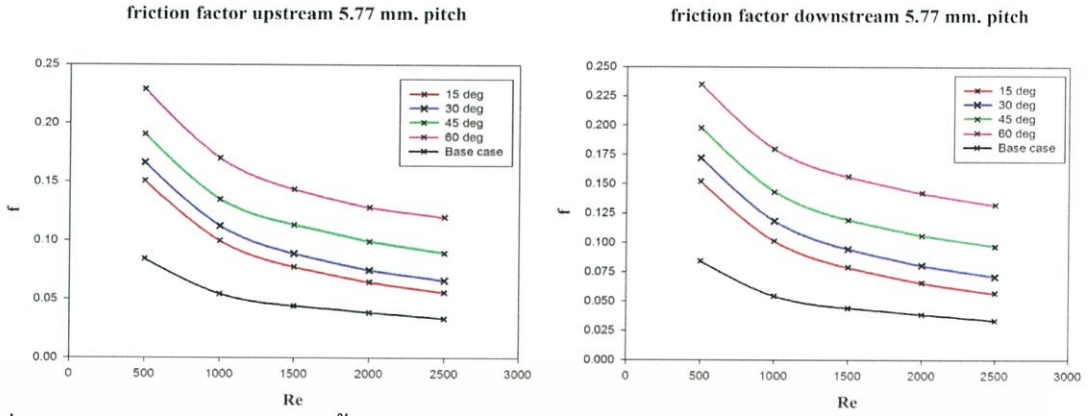
ข.

รูปที่ 7.3 แสดงสตรีมไลน์บริเวณกึ่งกลางของช่องทางการไหล ก. กรณีที่ยังไม่ได้ติดแผ่นกัน VGs ข. กรณีที่ติดแผ่นกันในตำแหน่งแบบ upstream ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน VGs เท่ากับ 5.77 มุมปะทะ 15 องศา เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 2500

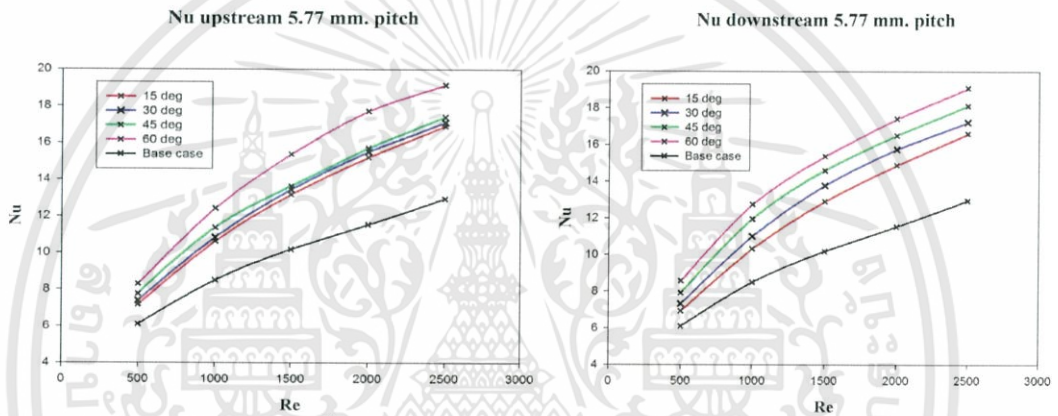
ตำแหน่งแบบ downstream เป็น 1.58 เท่าของ กรณีที่ไม่ได้ติดแผ่นกัน VGs ($Nu/Nu_0 = 1.58$) แสดงให้เห็นว่าเกิดการถ่ายเทความร้อนมากกว่ากรณีที่ไม่ได้ติดแผ่นกัน VGs 1.58 เท่า แต่มีค่าตัวประกอบความเสียดทานมากกว่าถึง 4.16 เท่า ($f/f_0 = 4.16$) จึงทำให้เกิดสมรรถนะในการถ่ายเทความร้อน ต่ำกว่ากรณีที่ไม่ได้ติดแผ่นกัน ($TEF = 0.9881$)

เมื่อพิจารณาสมรรถนะในการถ่ายเทความร้อน จากตารางที่ 3 พบว่า กรณีที่มีสมรรถนะในการถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุดคือ กรณีที่ติดแผ่นกันในตำแหน่งแบบ upstream ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน VGs เท่ากับ 5.77 มุมปะทะ 15 องศา เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 2500 ซึ่งมีค่าสมรรถนะในการถ่ายเทความร้อนเท่ากับ 1.1126 หรือมีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนมากกว่ากรณีที่ไม่ได้ติดแผ่นกัน VGs ถึง 11.26 เปอร์เซ็นต์ สำหรับกรณีนี้ มีอัตราการถ่ายเทความร้อนเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ได้ติดแผ่นกัน VGs ถึง 1.31 เท่า ($Nu/Nu_0 = 1.31$) และมีอัตราการเพิ่มขึ้นของ ค่าตัวประกอบความเสียดทานเพียง 1.62 เท่า ($f/f_0 = 1.62$) จึงเป็นกรณีที่มีสมรรถนะในการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



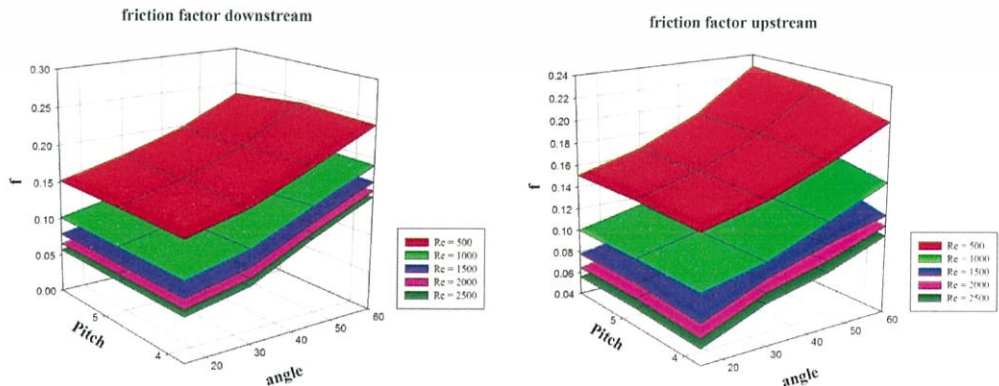
รูปที่ 7.4 แสดงอิทธิพลของแผ่นกั้น VGs ต่อค่าตัวประกอบความเสียดทาน ซึ่งสังเกตได้ว่าทุกกรณีศึกษามีค่าตัวประกอบความเสียดทาน สูงกว่ากรณีที่ไม่ได้ติดแผ่นกั้น VGs



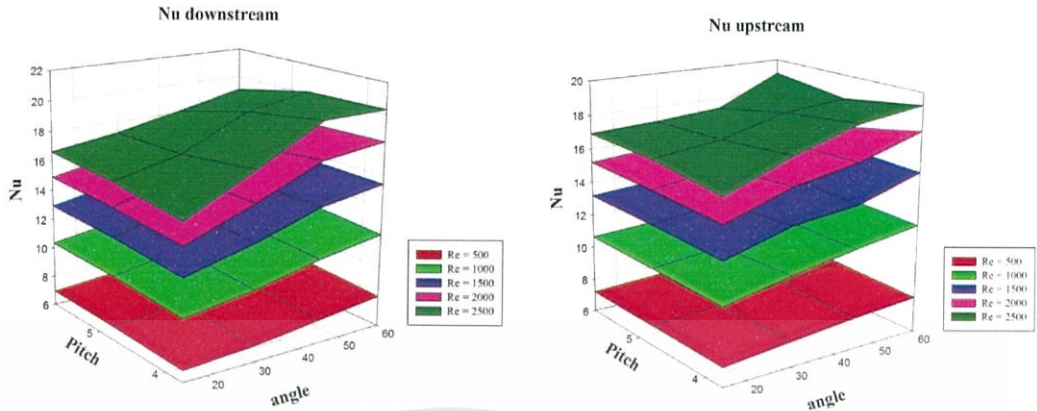
รูปที่ 7.5 แสดงอิทธิพลของแผ่นกั้น VGs ต่อเลขนัสเซลเฉลี่ย ซึ่งสังเกตได้ว่าทุกกรณีศึกษามีเลขนัสเซลเฉลี่ย สูงกว่ากรณีที่ไม่ได้ติดแผ่นกั้น VGs

7.4 พิจารณาความสัมพันธ์ของตัวแปร

จากรูปที่ 7.1 และ 7.2 สามารถ สังเกตได้ว่า อิทธิพลของตัวแปรต่างๆ เมื่อพิจารณาแนวโน้มของผลการทดลอง ที่เราสนใจแค่อิทธิพลของตัวแปรตัวแปรหนึ่ง จะเห็นว่าแนวโน้มของอิทธิพลนั้นที่ส่งผลต่อผลการทดลอง จะมีลักษณะแตกต่างกันระหว่างกรณีการจัดวางตำแหน่งของแผ่นกั้น VGs แบบ upstream และ downstream ในการวิเคราะห์ผลการทดลองจึงต้องวิเคราะห์ทั้งสองกรณีนี้ควบคู่กันไป

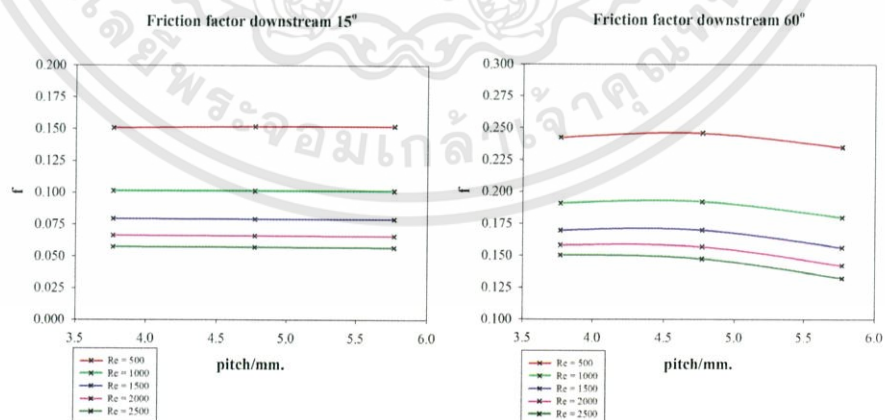


รูปที่ 7.6 แสดงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆต่อค่าตัวประกอบความเสียดทาน ในสามมิติ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



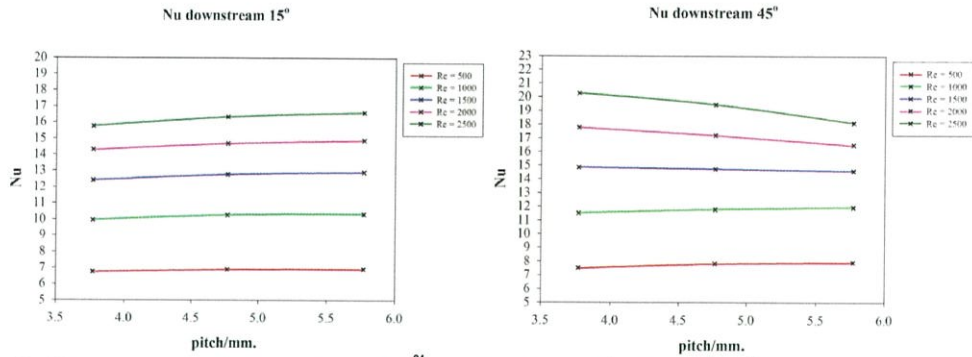
รูปที่ 7.7 แสดงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆต่อเลขนัสเซล ในสามมิติ

เมื่อพิจารณาต่อไปถึงความสัมพันธ์ระหว่างมุมปะทะและ Reynolds Number พบว่า ทั้งสองตัวแปรไม่ส่งผลต่อกัน ซึ่งหมายความว่าแนวโน้มของผลการทดลองจะมีความคล้ายคลึงกันทุกกรณี ที่มีระยะห่างระหว่างแผ่นกัน VGs เท่ากัน จากรูปที่ 7.3 พบว่า เมื่อมุมปะทะมีค่ามากขึ้น ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน VGs จะเริ่มมีผลต่อค่าตัวประกอบความเสียหาย ในกรณีของ downstream แต่ยังมีแนวโน้มในลักษณะเดียวกันในทุกๆเลขเรย์โนลด์ (สำหรับกรณี upstream จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะนี้) หรืออาจสรุปได้ว่า ตัวแปรมุมปะทะและระยะห่างระหว่างแผ่นกัน VGs มีความสัมพันธ์ต่อกัน จึงต้องพิจารณาควบคู่กันไปในกรณีวิเคราะห์ค่าตัวประกอบความเสียหาย และเลขนัสเซลเฉลี่ย (เกิด interaction ต่อกัน) จากรูปที่ 7.4 สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อมุมปะทะมีค่ามากขึ้น อิทธิพลของระยะห่างระหว่างแผ่นกัน VGs จะเริ่มมีผลต่อ ค่า Nu ซึ่งเกิดขึ้นเฉพาะกรณีที่ค่า เลขเรย์โนลด์สูงๆโดย เริ่มส่งผลที่มุมปะทะ 45 องศา กรณีนี้เกิดขึ้นทั้งกับตำแหน่งของแผ่นกันแบบ downstream และ upstream หรืออาจสรุปได้ว่าระยะห่างระหว่างแผ่นกัน VGs มีความสัมพันธ์กับทั้ง มุมปะทะ เลขเรย์โนลด์ (เกิด interaction ต่อกัน)



รูปที่ 7.8 อิทธิพลของระยะห่างระหว่างแผ่นกัน VGs ต่อค่าตัวประกอบความเสียหาย ที่มุม 15 และ 60 องศา การจัดวางตำแหน่งแบบ downstream

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

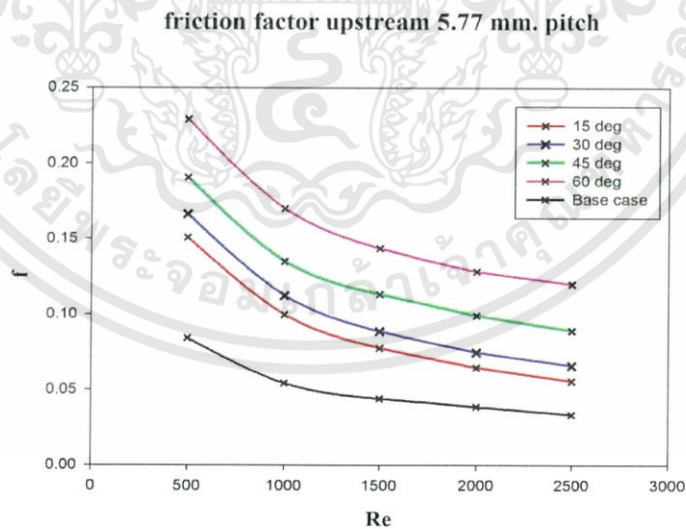


รูปที่ 7.9 อิทธิพลของระยะห่างระหว่างแผ่นกัน VGs ต่อเลขนัสเซลเฉลี่ย ที่มุม 15 และ 45 องศา การจัดวางตำแหน่งแบบ downstream

7.5 อิทธิพลของเลขเรย์โนลด์

เนื่องจากแนวโน้มสำหรับอิทธิพลของเลขเรย์โนลด์ ในแต่ละระยะห่างระหว่างแผ่นกัน VGs มีความคล้ายคลึงกัน จึงจะนำเสนอแค่ระยะห่าง 5.77 ม.ม. เท่านั้น

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ กับค่าตัวประกอบความเสียดทาน ในรูปที่ 7.10 และ 11 จะพบว่าเลขเรย์โนลด์มีค่าสูงขึ้น ค่าตัวประกอบความเสียดทานจะลดลงอย่างช้าๆ ทุกกรณีศึกษา เนื่องจากความสัมพันธ์ของค่าตัวประกอบความเสียดทานจะแปรผกผันกับกำลังสองของความเร็วเฉลี่ย (ความเร็วแปรผกผันตรงต่อเลขเรย์โนลด์) ดังแสดงในสมการที่ 6.6 และมีค่าสูงสุดเลขเรย์โนลด์ เท่ากับ 500 และต่ำที่สุดเลขเรย์โนลด์ เท่ากับ 2500 ตัวอย่างเช่น กรณีที่ติดตั้งแผ่นกัน VGs รูปตัววี ในตำแหน่ง upstream ระยะห่าง 5.77 ม.ม. มุมปะทะ 15 องศา เมื่อเลขเรย์โนลด์ เปลี่ยนจาก 500 เป็น 2500 ค่าตัวประกอบความเสียดทานจะลดลง 63.13 เปอร์เซ็นต์

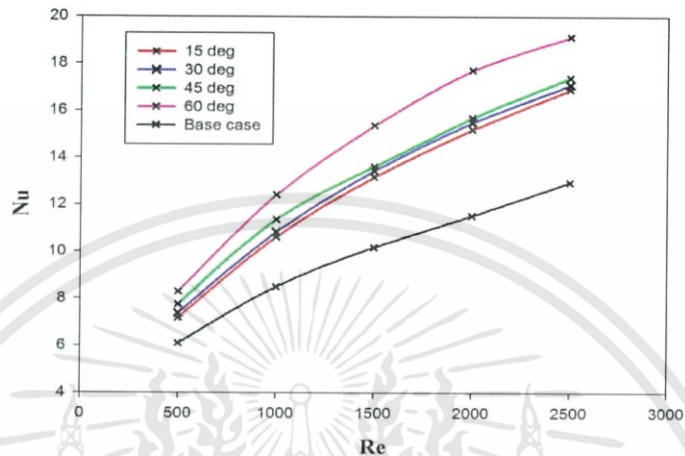


รูปที่ 7.10 อิทธิพลของเลขเรย์โนลด์ ต่อค่าตัวประกอบความเสียดทาน กรณีที่ติดตั้งแผ่นกัน VGs รูปตัววี ในตำแหน่ง upstream ระยะห่าง 5.77 ม.ม. ที่มุมปะทะต่างๆ

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์กับเลขนัสเซลเฉลี่ย ในรูปที่ 7.11 จะพบว่าเมื่อเลขเรย์โนลด์ มีค่าสูงขึ้นเลขนัสเซลเฉลี่ย จะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ทุกกรณีศึกษา เนื่องจาก ความเร็วที่เพิ่มขึ้น การถ่ายเทความร้อนจะมีมากขึ้นเลขนัสเซลเฉลี่ย จะแปรผันตามเลขเรย์โนลด์ มีค่าสูงสุดที่เลขเรย์โนลด์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่ากับ 2500 และต่ำที่สุดที่เลขเรย์โนลด์ เท่ากับ 500 ตัวอย่างเช่น กรณีที่ติดแผ่นกัน VGs รูปตัววี ในตำแหน่ง upstream ระยะห่าง 5.77 มม. มุมปะทะ 15 องศา เมื่อเลขเรย์โนลด์เปลี่ยนจาก 500 เป็น 2500 เลขนัสเซลเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 135.40 เปอร์เซนต์

Nu upstream 5.77 mm. pitch



รูปที่ 7.11 อิทธิพลของเลขเรย์โนลด์ต่อเลขนัสเซลเฉลี่ย กรณีที่ติดแผ่นกัน VGs รูปตัววี ในตำแหน่ง upstream ระยะห่าง 5.77 มม. ที่มุมปะทะต่างๆ



รูปที่ 7.12 แสดงคอนทัวร์ของเลขนัสเซลบริเวณพื้นผิวท่อ กรณีที่ติดแผ่นกันในตำแหน่งแบบ upstream ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน VGs เท่ากับ 5.77 มม. มุมปะทะ 15 องศา ก.เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 500 ข.เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 2500

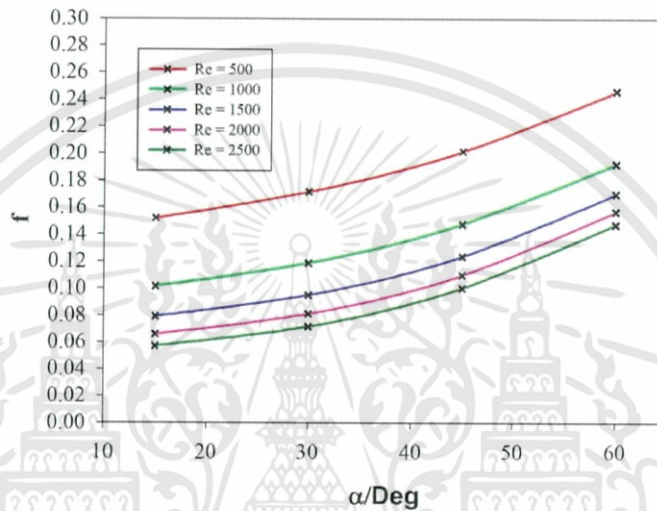
7.6 อิทธิพลของมุมปะทะ

เนื่องจากแนวโน้มสำหรับอิทธิพลของ มุมปะทะในแต่ละระยะห่างของแผ่นกัน VGs มีความคล้ายคลึงกัน จึงจะนำเสนอแค่ระยะ 4.77 มม. เท่านั้น

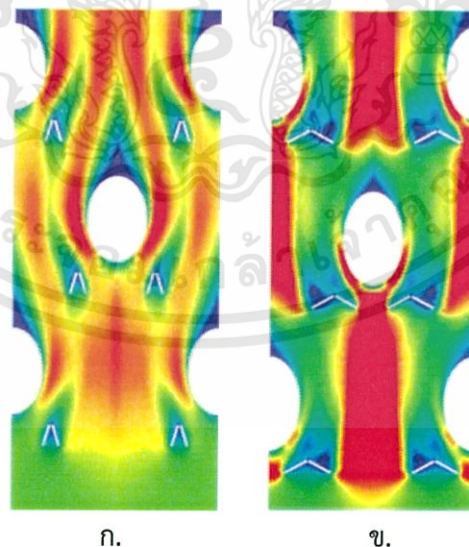
จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมปะทะ กับ ค่าตัวประกอบความเสียดทาน ในรูปที่ 7.13 จะพบว่าเมื่อ มุมปะทะ มีค่าสูงขึ้น ค่าตัวประกอบความเสียดทานจะเพิ่มขึ้นทุกกรณีศึกษา เนื่องจากมุมปะทะที่เพิ่มขึ้น จะทำให้การไหลเป็นไปได้ยากขึ้น (เกิดการบล็อกรวม) ทำให้เกิดความดันตกคร่อม(สูญเสียความดัน)เพิ่มขึ้นอย่างมาก สังเกตได้จากสตรีมไลน์พบว่า ที่มุมปะทะสูงๆการไหลจะถูกบล็อกไว้ด้วยแผ่นกัน หรือคอนทัวร์ของความเร็ว ถึงแม้ว่ามุมปะทะที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ของไหลถูกเร่งความเร็วผ่านช่องว่าง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างแผ่นกัน แต่บริเวณอื่นความเร็วของของไหลลดลงอย่างมาก หากจะพิจารณาจากการไหลหมุนวนในหน้าตัด มุมปะทะที่สูงกว่าทำให้เกิดการไหลหมุนวนที่รุนแรงกว่า จึงส่งผลให้ค่าตัวประกอบความเสียดทานสูงขึ้น มีค่าสูงสุดที่ มุมปะทะเท่ากับ 60 องศา และต่ำที่สุดที่ มุมปะทะเท่ากับ 15 องศา ตัวอย่างเช่น กรณีที่ติดตั้งแผ่นกัน VGs รูปตัววี ในตำแหน่ง downstream ระยะห่าง 4.77 ม.ม. Reynolds Number เท่ากับ 1000 เมื่อมุมปะทะเปลี่ยนจาก 15 องศา เป็น 60 องศา ค่าตัวประกอบความเสียดทานเพิ่มขึ้น 89.63 เปอร์เซ็นต์

Friction factor downstream 4.77 mm. pitch



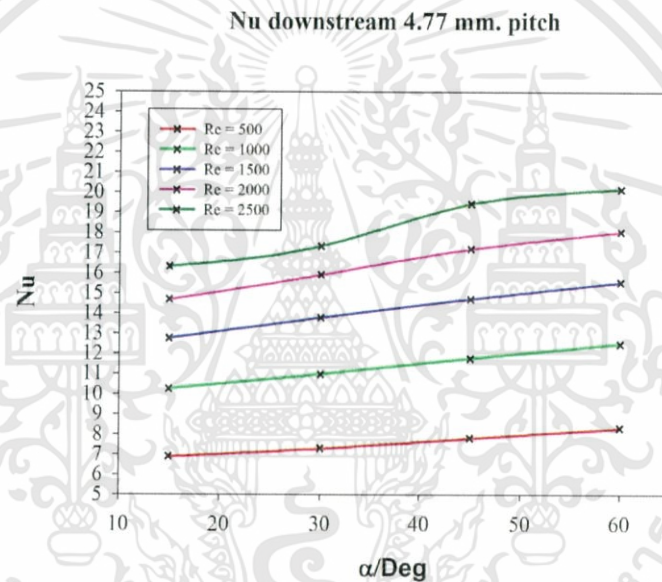
รูปที่ 7.13 อิทธิพลของมุมปะทะต่อค่าตัวประกอบความเสียดทาน กรณีที่ติดตั้งแผ่นกัน VGs รูปตัววี ในตำแหน่ง downstream ระยะห่าง 4.77 ม.ม. ที่เลขเรย์โนลด์ต่างๆ



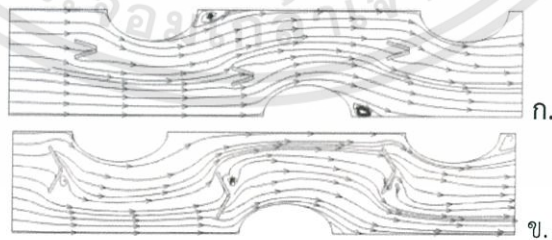
รูปที่ 7.14 แสดงคอนทัวร์ของความเร็วบริเวณกึ่งกลางของช่องทางการไหล กรณีที่ติดตั้งแผ่นกัน ในตำแหน่งแบบ downstream ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน VGs เท่ากับ 4.77 เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 1000 ก.มุมปะทะ 15 องศา ข.มุมปะทะ 60 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

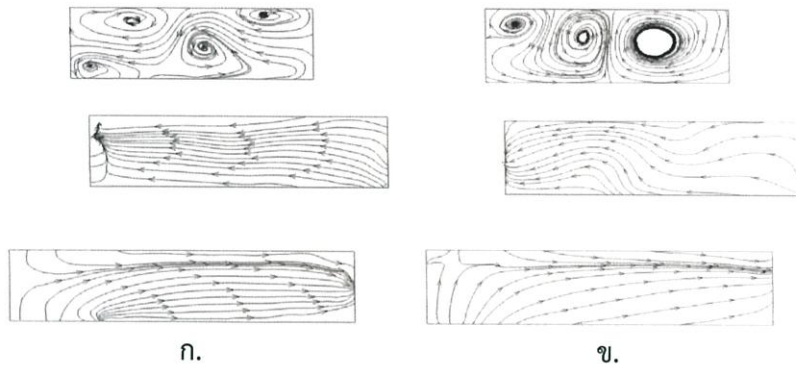
จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมปะทะเลขนัสเซลเฉลี่ย ในรูปที่ 7.15 จะพบว่าเมื่อ มุมปะทะ มีค่าสูงขึ้นเลขนัสเซลเฉลี่ย จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยทุกกรณีศึกษาเนื่องจากมุมปะทะที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการกระจายอุณหภูมิเฉลี่ยที่หน้าตัดทำได้อย่างสม่ำเสมอ และสามารถบังคับให้กระแสการไหลผ่านบริเวณท่อได้มากกว่า จึงทำให้อากาศสามารถไหลไปถ่ายเทความร้อนบริเวณผิวท่อได้มากขึ้น รวมถึงมุมปะทะทำให้เกิดการชะลอการไหลบริเวณท่อ ทำให้เวลาในการถ่ายเทความร้อนนานขึ้น เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของอุณหภูมิ ในหน้าตัดต่างๆพบว่า มุมปะทะที่สูงกว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิต่ำจากท่อกระจายตัวสู่อากาศมากขึ้นเลขนัสเซลเฉลี่ย มีค่าสูงสุดที่ มุมปะทะเท่ากับ 60 องศา และต่ำที่สุดที่ มุมปะทะเท่ากับ 15 องศา ตัวอย่างเช่น กรณีที่ติดแผ่นกัน VGs รูปตัววี ในตำแหน่ง downstream ระยะห่าง 4.77 ม.ม. เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 1000 เมื่อมุมปะทะเปลี่ยนจาก 15 องศา เป็น 60 องศา ค่าตัวประกอบความเสียดทานเพิ่มขึ้น 89.63 เปอร์เซ็นต์



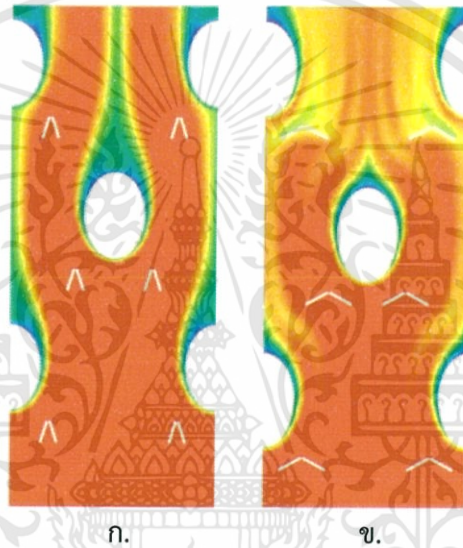
รูปที่ 7.15 อิทธิพลของมุมปะทะต่อเลขนัสเซลเฉลี่ย กรณีที่ติดแผ่นกัน VGs รูปตัววี ในตำแหน่ง downstream ระยะห่าง 4.77 ม.ม. ที่เลขเรย์โนลด์ต่างๆ



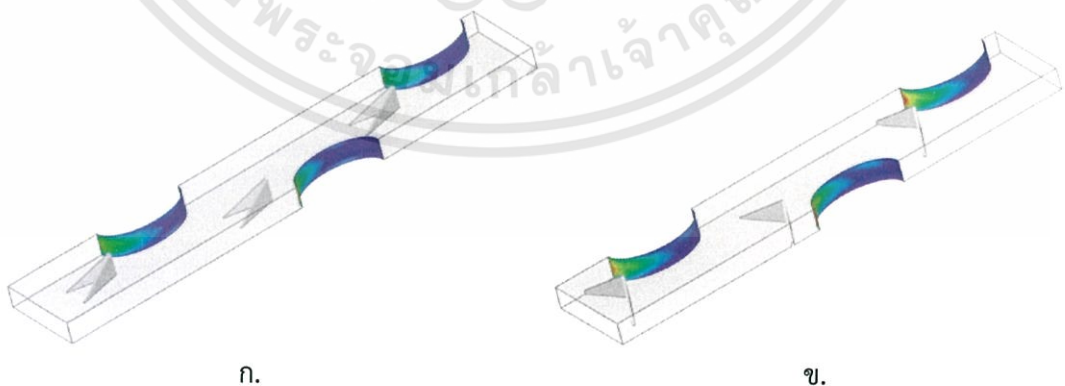
รูปที่ 7.16 แสดงสตรีมไลน์บริเวณกึ่งกลางของช่องทางการไหล กรณีที่ติดแผ่นกัน VGs ในตำแหน่งแบบ downstream ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน VGs เท่ากับ 4.77 เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 1000 ก.มุมปะทะ 15 องศา ข.มุมปะทะ 60 องศา



รูปที่ 7.17 แสดงสตรีมไลน์ในหน้าตัดกรณีที่ติดแผ่นกันในตำแหน่งแบบ downstream ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน VGs เท่ากับ 4.77 เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 1000 ก.มุมปะทะ 15 องศา ข.มุมปะทะ 60 องศา



รูปที่ 7.18 แสดงคอนทัวร์ของอุณหภูมิบริเวณกึ่งกลางของช่องทางการไหล กรณีที่ติดแผ่นกันในตำแหน่งแบบ downstream ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน VGs เท่ากับ 4.77 เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 1000 ก.มุมปะทะ 15 องศา ข.มุมปะทะ 60 องศา

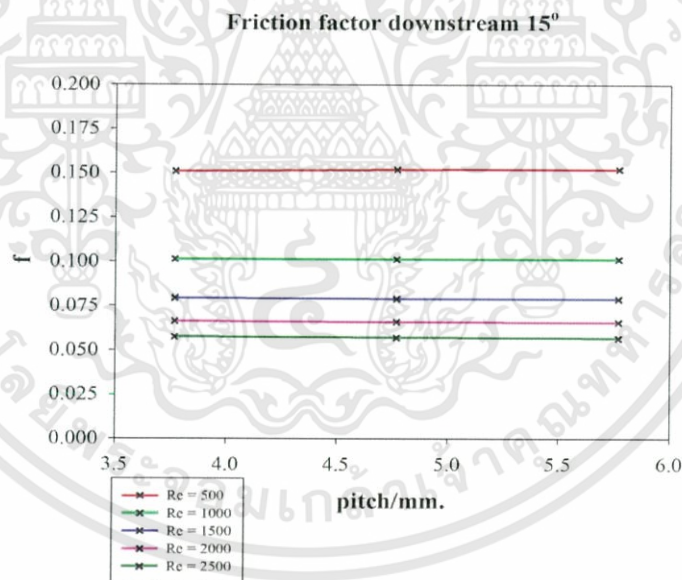


รูปที่ 7.19 แสดงคอนทัวร์ของเลขนัสเชิลบริเวณพื้นผิวท่อ กรณีที่ติดแผ่นกันในตำแหน่งแบบ downstream ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน VGs เท่ากับ 4.77 เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 1000 ก.มุมปะทะ 15 องศา ข.มุมปะทะ 60 องศา

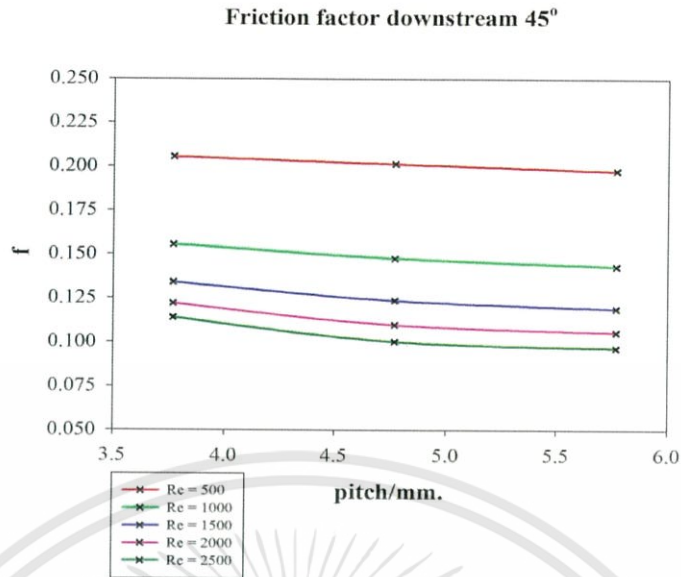
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.7 อิทธิพลของระยะห่างระหว่างแผ่นกัน

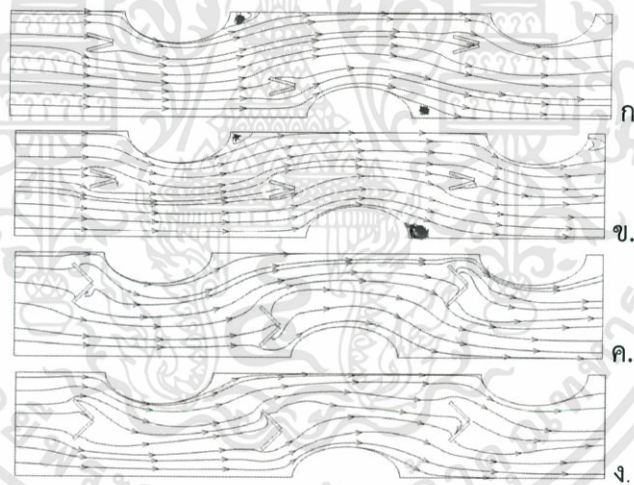
จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมปะทะ และค่าตัวประกอบความเสียดทาน สำหรับกรณี downstream ในรูปที่ 7.20 และ 7.21 พบว่าที่มุมปะทะต่ำๆ ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน VGs มีผลกระทบต่อค่าตัวประกอบความเสียดทานน้อยมาก เนื่องจากระยะห่างที่เพิ่มขึ้นเพียงแค่เลื่อนแผ่นกัน VGs ออกจากกัน ไม่ทำให้เกิดความแตกต่างจนทำให้เกิดผลกระทบต่อค่าการไหลเพราะพื้นที่ที่ช่องไหลไหลผ่านมีค่ามากพอสมควรอยู่แล้ว การเพิ่มขึ้นของพื้นที่ดังกล่าวจึงไม่มีผล สังเกตจากสตรีมไลน์ พบว่าพฤติกรรมของการไหลมีความแตกต่างกันน้อยมาก หรือจากคอนทัวร์ของความเร็วพบว่าเมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้น ลักษณะความเร็วของช่องไหลไม่ได้เปลี่ยนแปลงมากนัก จึงทำให้ค่าตัวประกอบความเสียดทานไม่เปลี่ยนแปลง ยกตัวอย่างเช่นกรณีแผ่นกันที่มีมุมปะทะ 15 องศา เลขเรย์โนลด์ 2500 เมื่อเปลี่ยนระยะห่างจาก 3.77 เป็น 5.77 ค่าตัวประกอบความเสียดทานเพิ่มขึ้นเพียง 1.22 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น แต่ที่มุมปะทะสูงๆ ผลกระทบของระยะห่างระหว่างแผ่นกัน VGs ที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าตัวประกอบความเสียดทานลดลง ความแตกต่างกับกรณีที่มีมุมปะทะต่ำๆ คือพื้นที่ที่ช่องไหลไหลผ่านสำหรับระยะห่างระหว่างแผ่นกันน้อยๆ มีค่าน้อยมากจนเกิดความสำคัญขึ้น โดยส่งผลให้การไหลลำบากขึ้นเห็นได้ชัดจากสตรีมไลน์ เมื่อพิจารณาคอนทัวร์ของความเร็ว พบว่าการกระจายตัวของความเร็ว้น้อยมาก บริเวณที่การไหลถูกกั้นจึงมีความเร็วต่ำมาก เมื่อระยะห่างระหว่างแผ่นกันเพิ่มขึ้น พื้นที่ในการไหลเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การกระจายของความเร็วเพิ่มขึ้น ชัดเจนเช่นกรณีข้างต้น ที่มีมุมปะทะ 45 องศา ความเสียดทานลดลง 15.26 เปอร์เซ็นต์



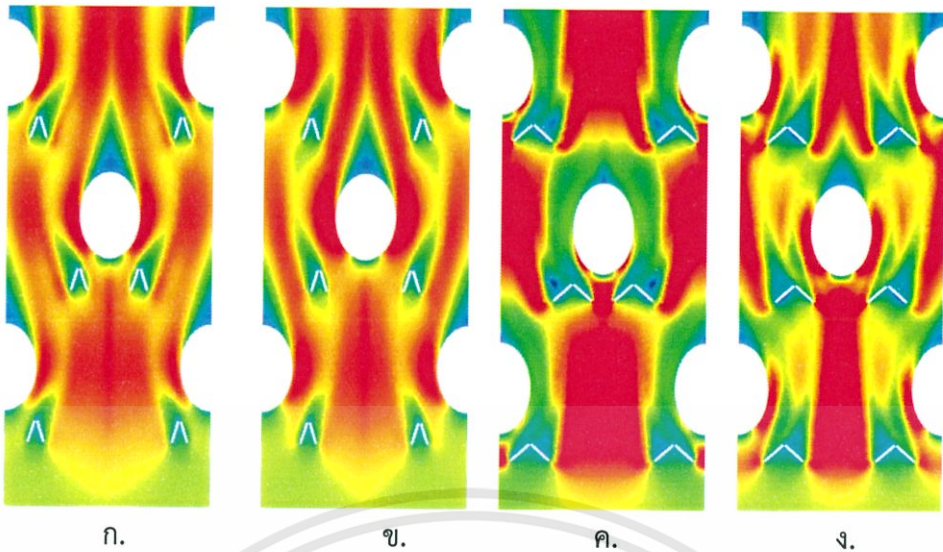
รูปที่ 7.20 อิทธิพลของระยะห่างระหว่างแผ่นกันต่อค่าตัวประกอบความเสียดทาน กรณีที่ติดแผ่นกัน VGs รูปตัววี ในตำแหน่ง downstream มุมปะทะ 15 องศา ที่เลขเรย์โนลด์ต่างๆ



รูปที่ 7.21 อิทธิพลของระยะห่างระหว่างแผ่นกันต่อค่าตัวประกอบความเสียดทาน กรณีที่ติดตั้งแผ่นกัน VGs รูปตัววี ในตำแหน่ง downstream มุมปะทะ 45 องศา ที่เลขเรย์โนลด์ต่างๆ

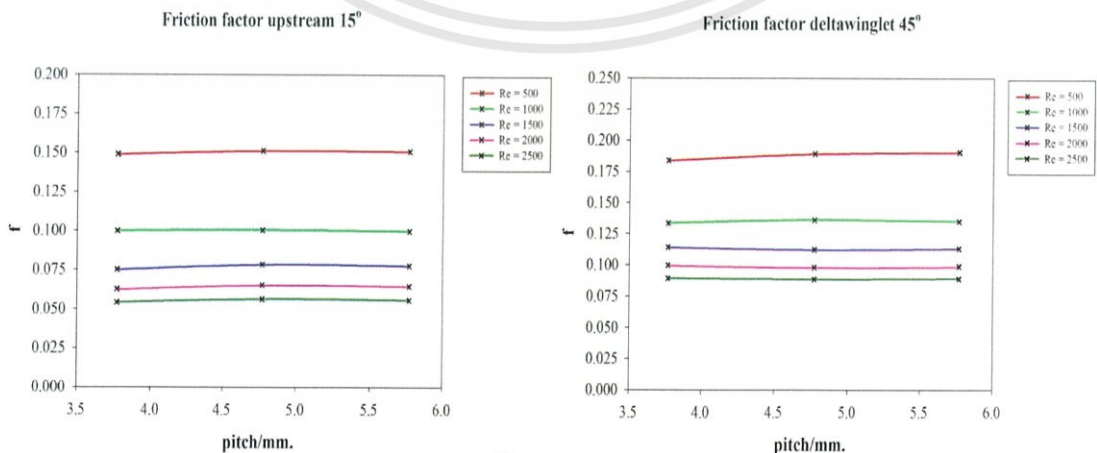


รูปที่ 7.22 แสดงสตรีมไลน์บริเวณกึ่งกลางของช่องทางการไหล กรณีที่ติดตั้งแผ่นกันในตำแหน่งแบบ downstream เลขเรย์โนลด์ 2500 ก. มุมปะทะ 15 องศา ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน 3.77 ม.ม. ข. มุมปะทะ 15 องศา ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน 5.77 ม.ม. ค. มุมปะทะ 45 องศา ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน 3.77 ม.ม. ง. มุมปะทะ 45 องศา ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน 5.77 ม.ม.



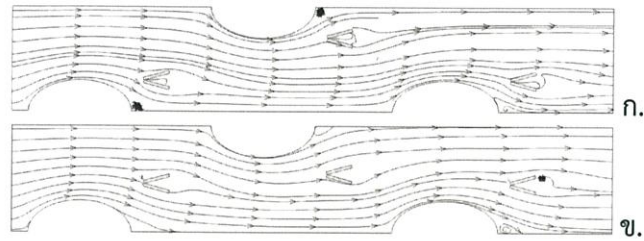
รูปที่ 7.23 แสดงคอนทัวร์ของความเร็วบริเวณกึ่งกลางของช่องทางไหล กรณีที่ติดแผ่นกัน ในตำแหน่งแบบ downstream เลขเรย์โนลด์ 2500 ก. มุมปะทะ 15 องศา ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน 3.77 มม. ข. มุมปะทะ 15 องศา ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน 5.77 มม. ค. มุมปะทะ 45 องศา ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน 3.77 มม. ง. มุมปะทะ 45 องศา ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน 5.77 มม.

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมปะทะ และค่าตัวประกอบความเสียดทาน สำหรับกรณี upstream ในรูปที่ 7.24 พบว่าทั้งที่มุมปะทะต่ำหรือสูงก็ตาม ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน VGs มีผลกระทบต่อค่าตัวประกอบความเสียดทานน้อยมาก หรือมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่มุมปะทะสูงๆ เนื่องจากระยะห่างที่เพิ่มขึ้นเพียงแค่อ่อนแผ่นกัน VGs ออกจากกัน ไม่ทำให้เกิดความแตกต่างจนทำให้เกิดผลกระทบต่อค่าการไหล แม้ว่า จะเพิ่มพื้นที่ในการไหลในกรณีมุมปะทะสูงๆก็ตาม เมื่อพิจารณาจากสตริมไลน์ ระยะห่างระหว่างแผ่นกันที่เปลี่ยนไปไม่ได้ทำให้พฤติกรรมของการไหลเปลี่ยนไปจากเดิมมากนักเหมือนกรณี downstream เพราะรูปทรงของการจัดวางแบบ upstream นั้นมีลักษณะที่ทำให้การไหลเป็นไปได้สะดวกกว่าแบบ downstream ซึ่งจะพิจารณาเปรียบเทียบในหัวข้อถัดไป ความเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจึงส่งผลต่อแนวโน้มของค่าตัวประกอบความเสียดทานให้ใกล้เคียงค่าเดิม เช่นกรณีแผ่นกันที่มีมุมปะทะ 15 องศา เลขเรย์โนลด์ 2500 เมื่อเปลี่ยนระยะห่างจาก 3.77 เป็น 5.77 ค่าตัวประกอบความเสียดทานเพิ่มขึ้นเพียง 2.77 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น

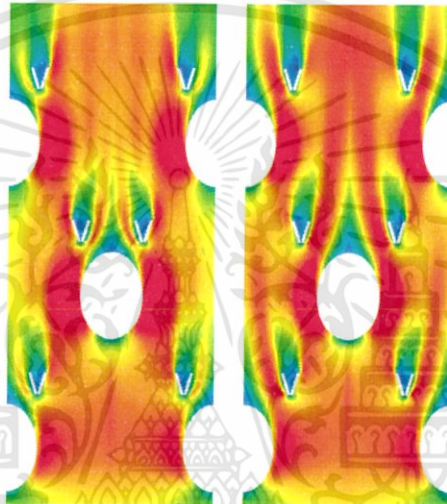


รูปที่ 7.24 อิทธิพลของระยะห่างระหว่างแผ่นกันต่อค่าตัวประกอบความเสียดทาน กรณีที่ติดแผ่นกัน VGs รูปตัววี ในตำแหน่ง upstream มุมปะทะ 15 และ 45 องศา ที่เลขเรย์โนลด์ต่างๆ

เอไอเอส... ไม่ว่าการณ์ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

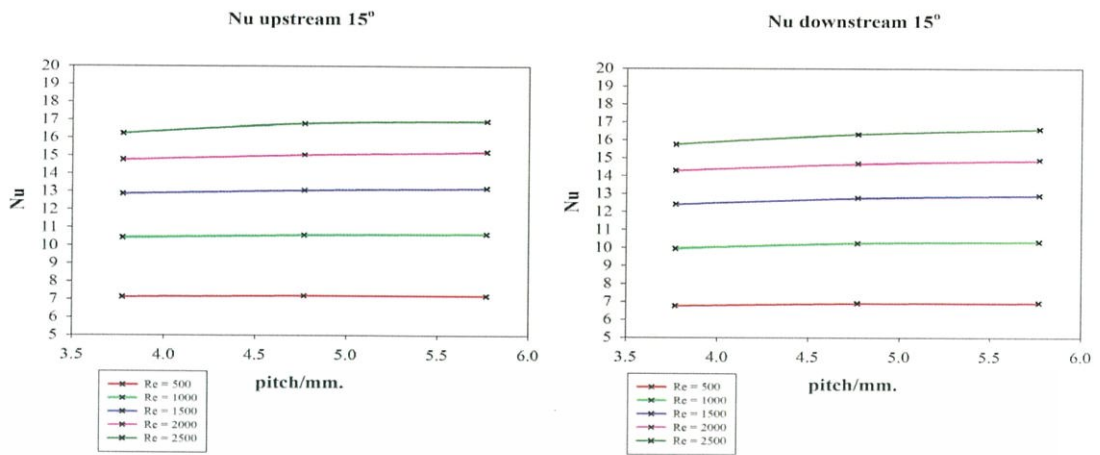


รูปที่ 7.25 แสดงสตรีมไลน์บริเวณกึ่งกลางของช่องทางการไหล กรณีที่ติดแผ่นกันในตำแหน่งแบบ upstream เลขเรย์โนลด์ 2500 มุมปะทะ 15 องศา ก. ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน 3.77 ม.ม. ข. ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน 5.77ม.ม.



รูปที่ 7.26 แสดงคอนทัวร์ของความเร็วบริเวณกึ่งกลางของช่องทางการไหล กรณีที่ติดแผ่นกันในตำแหน่งแบบ upstream มุมปะทะ 15 องศา เลขเรย์โนลด์ 2500 ก.ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน 3.77 ม.ม ข. ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน 5.77 ม.ม.

จากกราฟความสัมพันธ์ของระยะห่างระหว่างแผ่นกัน VGs และเลขนัสเซลเฉลี่ย ในรูปที่ 7.27 และ 7.31 สำหรับเลขเรย์โนลด์สูงๆ พบว่าทั้งกรณี upstream และ downstream จะมีค่าเลขนัสเซลเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามระยะห่างระหว่างแผ่นกัน VGs เมื่อมีมุมปะทะต่ำๆเล็กน้อย เมื่อพิจารณาจากสตรีมไลน์ เมื่อระยะห่างระหว่างแผ่นกันเพิ่มขึ้นพื้นที่ในการไหลจะเพิ่มมากขึ้น ซึ่งหมายความว่าปริมาณอากาศที่เข้าไปถ่ายเทความร้อนจากผิวท่อมีมากกว่า โดยที่เส้นทางการไหลยังคงเดิม ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนดีกว่า หรือสังเกตจากคอนทัวร์ของอุณหภูมิในหน้าตัด พบว่าการกระจายอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างแผ่นกันเพิ่มขึ้น ซึ่งช่วยในการถ่ายเทความร้อนให้ดีขึ้น ตัวอย่างเช่น กรณี downstream เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 2500 มุมปะทะ 15 องศา เมื่อระยะห่างระหว่างแผ่นกันเพิ่มขึ้นจาก 3.77 เป็น 5.77 ม.ม. เลขนัสเซลเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้น 5.38 เปอร์เซ็นต์



ก.

ข.

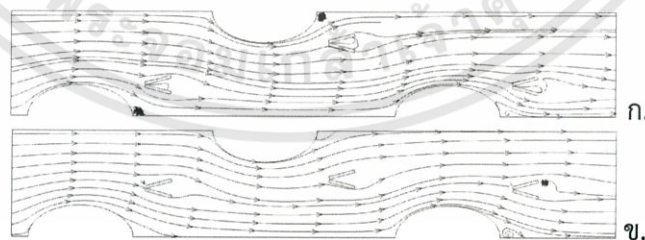
รูปที่ 7.27 อิทธิพลของระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นต่อเลขนีสเซลเฉลี่ย กรณีที่ติดแผ่นกั้น VGs รูปตัววี มุมปะทะ 15 องศา ที่เลขเรย์โนลด์ต่างๆ ก.การจัดวางตำแหน่งของแผ่นกั้นแบบ upstream ข.การจัดวางตำแหน่งของแผ่นกั้นแบบ downstream



ก.

ข.

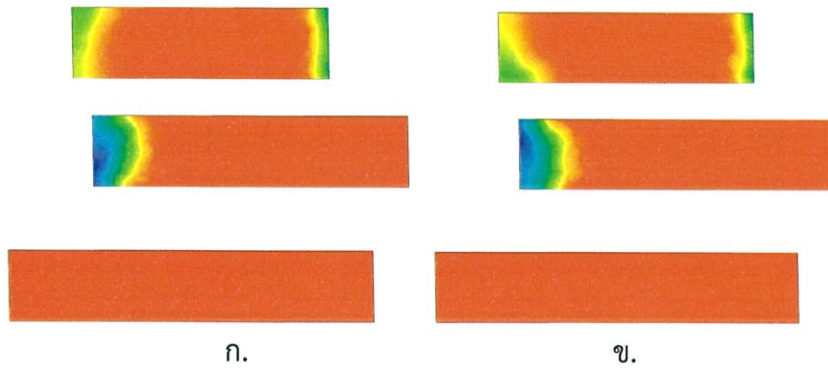
รูปที่ 7.28 แสดงคอนทัวร์ของเลขนีสเซลบริเวณพื้นผิวท่อ กรณีที่ติดแผ่นกั้นในตำแหน่งแบบ downstream ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น VGs เท่ากับ 4.77 เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 2500 มุมปะทะ 15 องศา ก. ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น 3.77 ม.ม. ข. ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น 5.77 ม.ม.



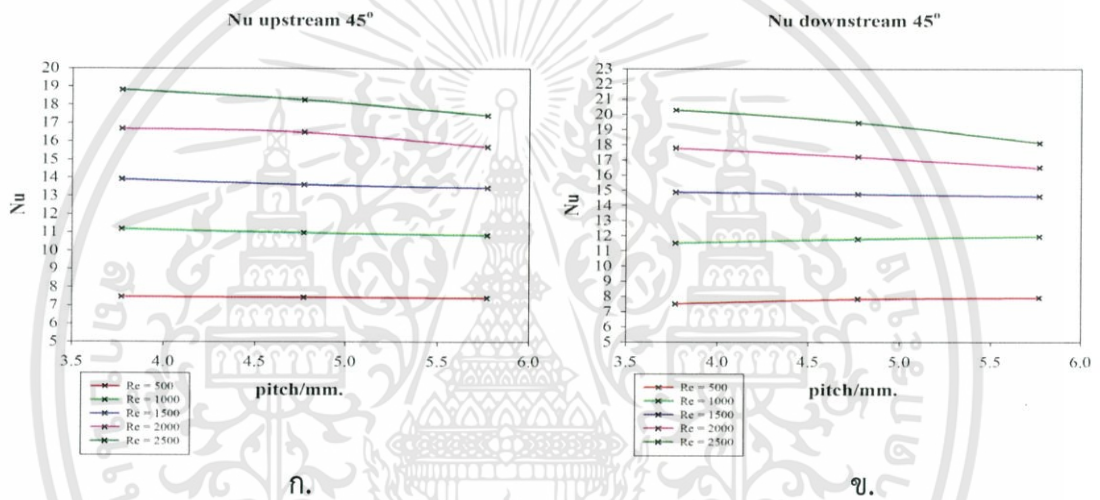
ก.

ข.

รูปที่ 7.29 แสดงสตรีมไลน์บริเวณกึ่งกลางของช่องทางการไหล กรณีที่ติดแผ่นกั้นในตำแหน่งแบบ downstream มุมปะทะ 15 องศา เลขเลขเรย์โนลด์ 2500 ก. ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น 3.77 ม.ม. ข. ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น 5.77 ม.ม.

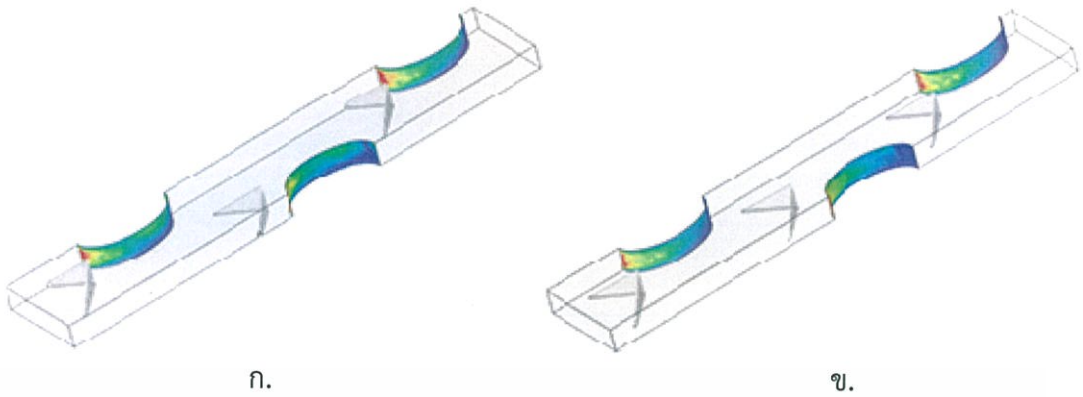


รูปที่ 7.30 แสดงคอนทัวร์ของอุณหภูมิในหน้าตัด กรณีที่ติดแผ่นกันในตำแหน่งแบบ downstream มุมปะทะ 15 องศา เลขเรย์โนลด์ 2500 ก. ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน 3.77 ม.ม. ข. ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน 5.77 ม.ม.

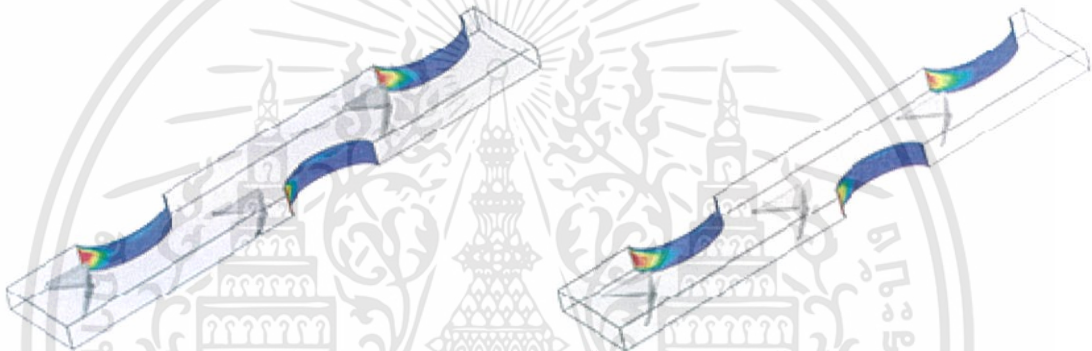


รูปที่ 7.31 อิทธิพลของระยะห่างระหว่างแผ่นกันต่อเลขนัสเซลเฉลี่ย กรณีที่ติดแผ่นกัน VGs รูปตัววี มุมปะทะ 45 องศา ที่เลขเรย์โนลด์ต่างๆ ก.การจัดวางตำแหน่งของแผ่นกันแบบ upstream ข.การจัดวางตำแหน่งของแผ่นกันแบบ downstream

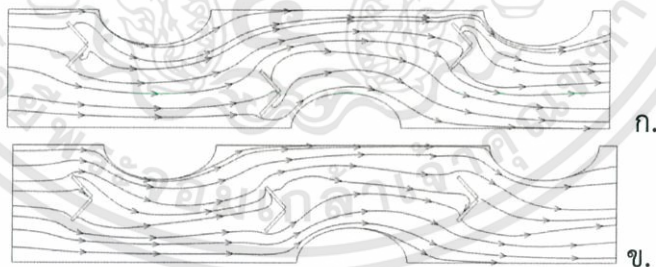
แต่สำหรับมุมปะทะสูงๆ เลขนัสเซลเฉลี่ยจะลดลงเมื่อ ระยะห่างระหว่างแผ่นกันเพิ่มขึ้น เนื่องจากที่ ระยะห่างระหว่างแผ่นกันต่ำๆ กระแสการไหลจะถูกบังคับให้เข้าไปบริเวณผิวที่ออกมากว่า เมื่อระยะห่างระหว่างแผ่นกันเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้การไหลสะดวกมากขึ้น กระแสการไหลที่ถูกบังคับให้เข้าไปกระทบผิวที่อ่อนจะน้อยลง จากคอนทัวร์ของอุณหภูมิในหน้าตัดพบว่ากระกระจายของอุณหภูมิลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างแผ่นกันเพิ่มขึ้น ตัวอย่างเช่นกรณีตัวอย่างข้างต้น ที่มุมปะทะ 45 องศา เลขนัสเซลเฉลี่ยจะลดลง 7.19 เปอร์เซ็นต์ แต่แนวโน้มดังกล่าวมิได้มีผลต่อกรณีที่มีค่าเลขเรย์โนลด์ต่ำๆ กล่าวคือระยะห่างระหว่างแผ่นกัน VGs ไม่ทำให้ เลขนัสเซลเฉลี่ยเปลี่ยนแปลงเท่าใดนัก เพราะที่ความเร็วน้อยๆ อัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าน้อยมากซึ่งอธิบายจากหัวข้ออิทธิพลของเลขเรย์โนลด์ แม้ว่าจะมีการบังคับให้กระแสการไหลเข้าไปกระทบผิวที่ออกมากว่า แต่ไม่ได้ทำให้เกิดนัยสำคัญขึ้น



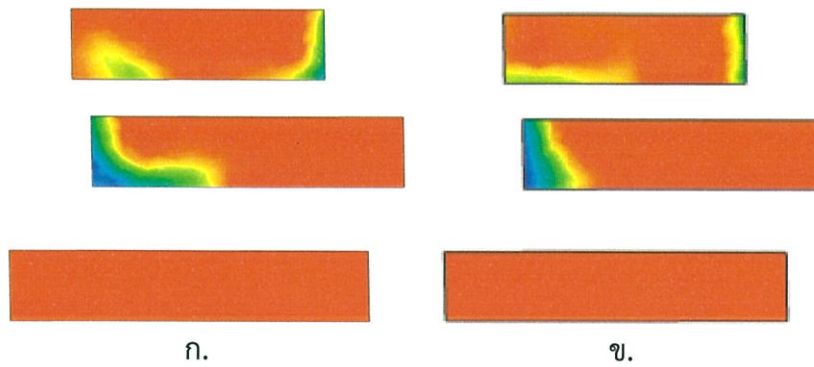
รูปที่ 7.32 แสดงคอนทัวร์ของเลขนีสเชิลบริเวณพื้นผิวท่อ กรณีที่ติดแผ่นกันในตัวแบบ downstream ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน VGs เท่ากับ 4.77 เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 2500 มุมปะทะ 45 องศา ก. ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน 3.77 ม.ม. ข. ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน 5.77 ม.ม.



รูปที่ 7.33 แสดงคอนทัวร์ของเลขนีสเชิลบริเวณพื้นผิวท่อ กรณีที่ติดแผ่นกันในตัวแบบ upstream ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน VGs เท่ากับ 4.77 เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 500 มุมปะทะ 15 องศา ก. ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน 3.77 ม.ม. ข. ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน 5.77 ม.ม.



รูปที่ 7.34 แสดงสตรีมไลน์บริเวณกึ่งกลางของช่องทางการไหล กรณีที่ติดแผ่นกันในตัวแบบ downstream มุมปะทะ 45 องศา เลขเลขเรย์โนลด์ 2500 ก. ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน 3.77 ม.ม. ข. ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน 5.77 ม.ม.



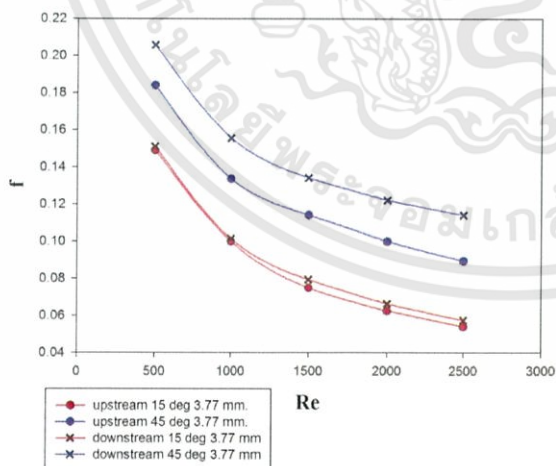
รูปที่ 7.35 แสดงคอนทัวร์ของอุณหภูมิในหน้าตัด กรณีที่ติดแผ่นกันในตัวแบบ downstream มุมปะทะ 45 องศา เลขเรย์โนลด์ 2500 ก. ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน 3.77 ม.ม. ข. ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน 5.77 ม.ม.

7.8 อิทธิพลของตำแหน่งของแผ่นกัน

เนื่องจากแนวโน้มของระยะห่างระหว่างแผ่นกัน VGs ในแต่ละมุมปะทะและเลขเรย์โนลด์ ต่างกัน จึงต้องพิจารณาทั้งที่เลขเรย์โนลด์ต่ำและสูง รวมทั้งมุมปะทะต่ำและสูงไปพร้อมกัน

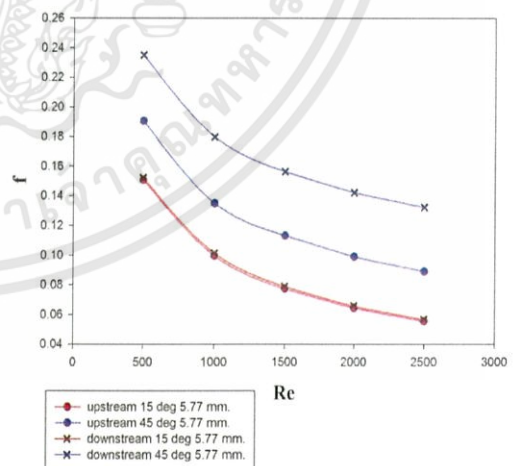
จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ อิทธิพลของการจัดวางตำแหน่งของแผ่นกัน VGs ดังแสดงในรูปที่ 7.36 และ 7.37 สามารถสังเกตได้ว่า ทุกกรณีที่มักจัดวางตำแหน่งแบบ downstream จะมีค่าค่าประกอบความเสียดทาน มากกว่ากรณี upstream เสมอ เนื่องจากลักษณะแผ่นกันแบบ upstream มีลักษณะที่ลู่ทำให้การไหลเป็นไปได้สะดวกกว่า การบล็อกรังการไหลแบบ downstream เกิดขึ้นมากกว่า สังเกตได้อย่างชัดเจนจากสตรีมไลน์ ซึ่งกรณีที่มุมปะทะสูงๆ ความแตกต่างของการบล็อกรังการไหลจะชัดเจนยิ่งขึ้น

Compared friction upstream&downstream 3.77 mm. pitch



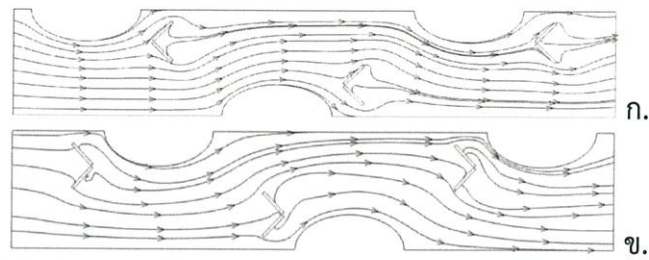
ก.

Compared friction upstream&downstream 5.77 mm. pitch

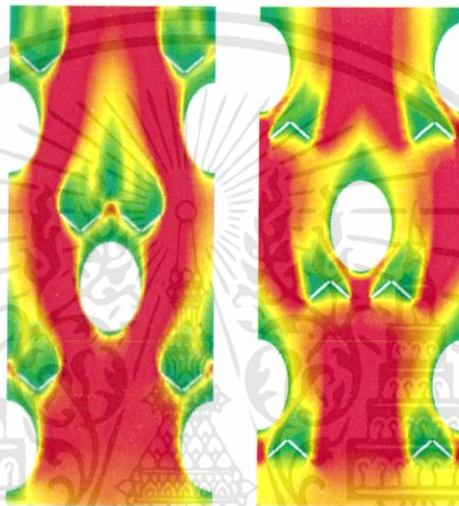


ข.

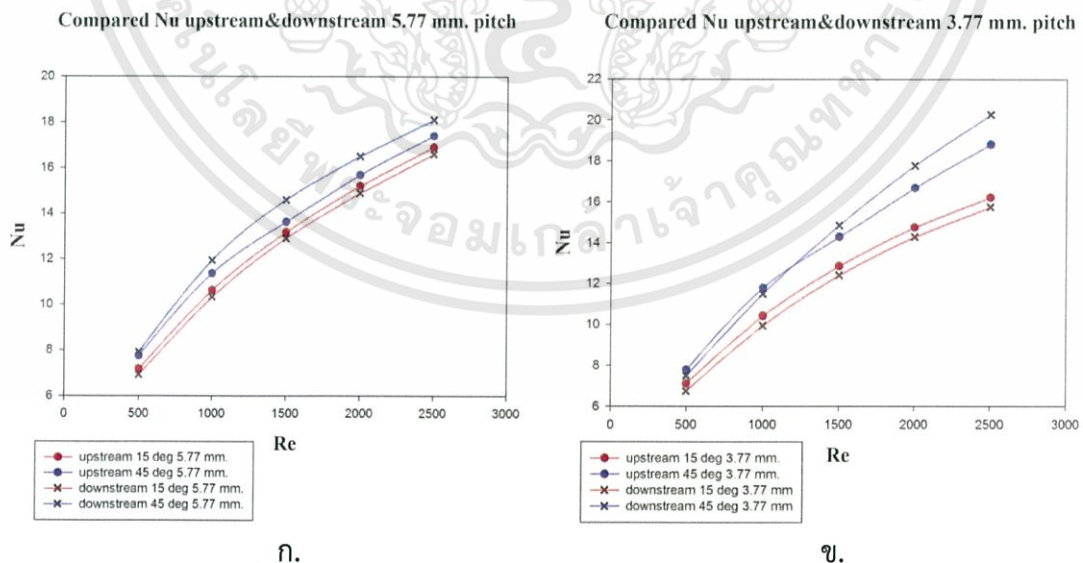
รูปที่ 7.36 แสดงอิทธิพลของตำแหน่งของแผ่นกันต่อค่าตัวประกอบความเสียดทาน กรณีมุมปะทะ 15 และ 45 องศาที่เลขเรย์โนลด์ต่างๆ ก.ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน 3.77 ม.ม. ข.ระยะห่างระหว่างแผ่นกัน 5.77 ม.ม.



รูปที่ 7.37 แสดงสตรีมไลน์บริเวณกึ่งกลางของช่องทางการไหลกรณีมุมปะทะ 45 องศา ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น 3.77 มม. เลขเรย์โนลด์ 2500 ก.การจัดวางตำแหน่งแบบ upstream ข.การจัดวางตำแหน่งแบบ downstream

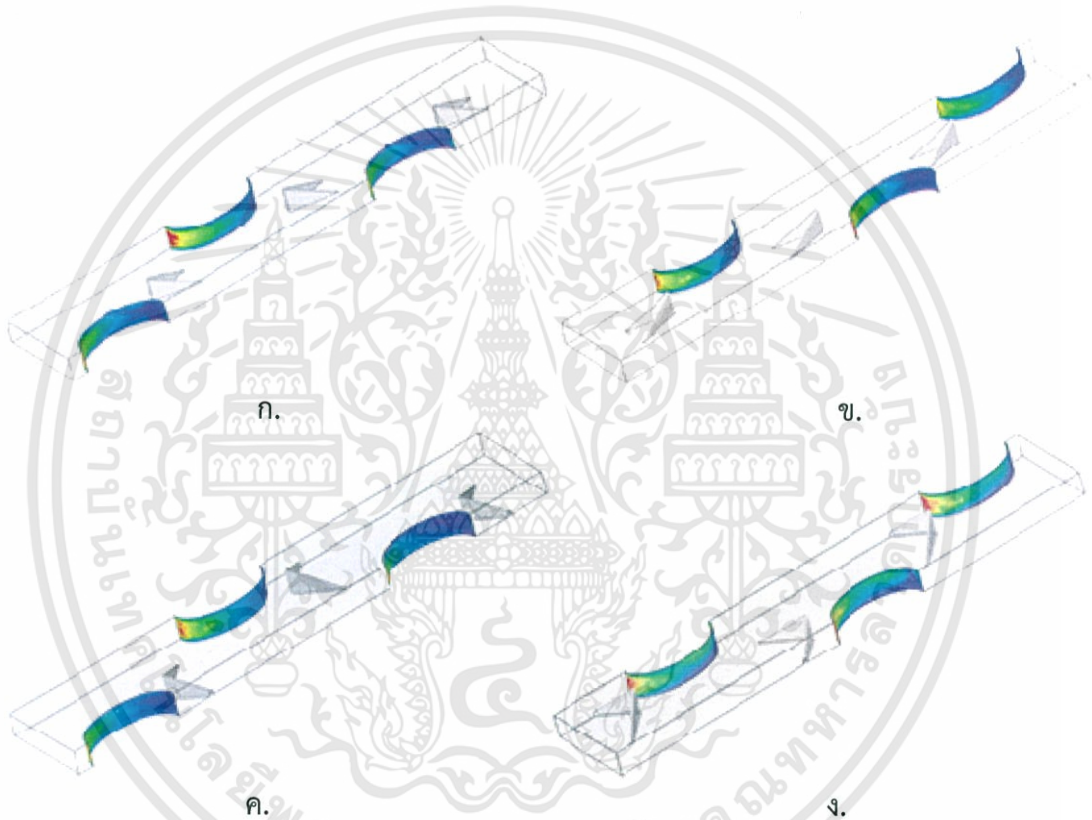


รูปที่ 7.38 แสดงคอนทัวร์ของความเร็วบริเวณกึ่งกลางของช่องทางการไหล มุมปะทะ 45 องศา เลขเรย์โนลด์ 500 ก.ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น 3.77 มม. ข. ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น 5.77 มม.

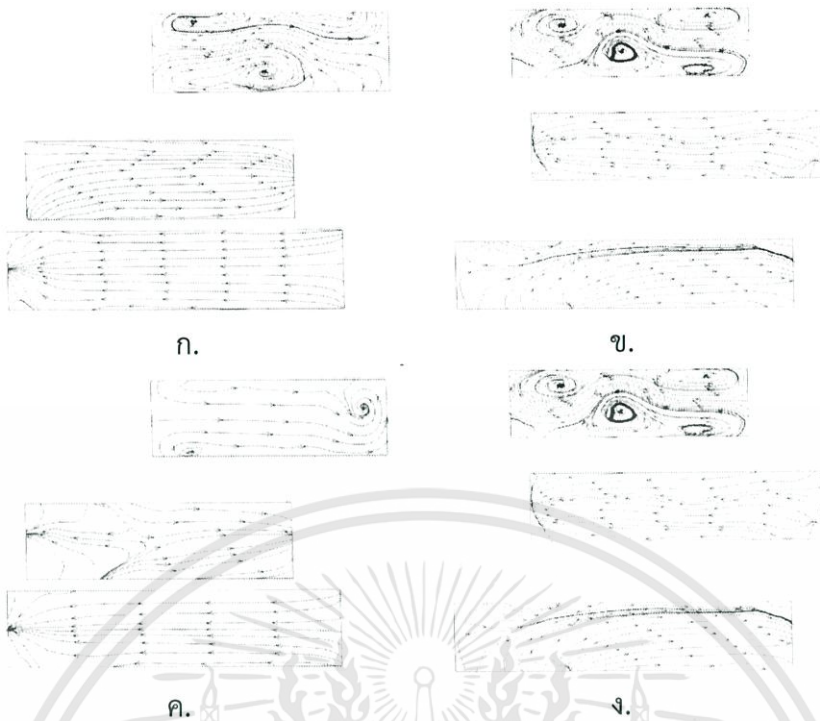


รูปที่ 7.39 แสดงอิทธิพลของตำแหน่งของแผ่นกั้นต่อเลขนัสเซิล กรณีมุมปะทะ 15 และ 45 องศาที่เลขเรย์โนลด์ต่างๆ ก.ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น 3.77 มม. ข.ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น 5.77 มม.

แต่สำหรับเลขนัสเซลเฉลี่ย ที่มุมต่ำๆ การจัดวางตำแหน่งของแผ่นกั้น VGs แบบ upstream จะมีค่ามากกว่า แบบ downstream เล็กน้อย เนื่องจากการจัดวางแบบ upstream ซึ่งการไหลเป็นไปได้สะดวกกว่า สามารถถ่ายเทความร้อนได้สะดวกกว่าเช่นกัน สำหรับการไหลหมุนวนนั้น กรณี downstream ทำให้เกิดการไหลแบบหมุนวนมากกว่า แต่อย่างไรก็ตาม ยังมีลักษณะคล้ายคลึงกันมาก ทั้งขนาดและจำนวน จึงไม่อาจส่งผลให้ downstream ถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่า สำหรับที่มุมสูงๆ กรณี downstream จะมีค่าเลขนัสเซลเฉลี่ยมากกว่า เนื่องจากการ บล็อกการไหลในกรณีของ downstream จะทำให้เกิดการไหลหมุนวนด้านหลังแผ่นกั้นได้มากกว่า ซึ่งการไหลแบบหมุนวนที่เพิ่มขึ้นนั้นแตกต่างกันมาก กว่ากรณีมุมต่ำๆ มาก จึงส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนดีกว่าได้ชัดเจน และมีความแตกต่างมากขึ้นเรื่อยๆเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น เพราะที่เลขเรย์โนลด์สูงๆ กรณี upstream เกิดการไหลหมุนวนน้อยกว่า downstream มากกว่า



รูปที่ 7.40 แสดงคอนทัวร์ของเลขนัสเซลบริเวณพื้นผิวท่อ ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น VGs เท่ากับ 3.77 เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 2500 ก.มุมปะทะ 15 องศา การจัดวางตำแหน่งแบบ upstream ข.มุมปะทะ 15 องศา การจัดวางตำแหน่งแบบ downstream ค.มุมปะทะ 45 องศา การจัดวางตำแหน่งแบบ upstream ง.มุมปะทะ 45 องศา การจัดวางตำแหน่งแบบ downstream



รูปที่ 7.41 แสดงสตรีมไลน์ในหน้าตัดกรณีที่มีตีแผ่นก้น เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 2500 ก.มุมปะทะ 15 องศา ระยะห่างระหว่างแผ่นก้น VGs เท่ากับ 5.77 การจัดวางตำแหน่งแบบ upstream ข.มุมปะทะ 15 องศา ระยะห่างระหว่างแผ่นก้น VGs เท่ากับ 5.77 การจัดวางตำแหน่งแบบ downstream ค.มุมปะทะ 45 องศา ระยะห่างระหว่างแผ่นก้น VGs เท่ากับ 3.77 การจัดวางตำแหน่งแบบ upstream ง.มุมปะทะ 45 องศา ระยะห่างระหว่างแผ่นก้น VGs เท่ากับ 3.77 การจัดวางตำแหน่งแบบ downstream

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

8.1 สรุปผลการจำลอง

สำหรับปริญญาโทฉบับนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของแผ่นกั้นสำหรับการสร้างการไหลแบบหมุนวนแบบสามเหลี่ยมที่มีการจัดวางเป็นรูปตัววี (V-shape delta-winglet Vortex generator) ซึ่งถูกติดตั้งภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ fin-tube โดยการจำลองเชิงตัวเลข 3 มิติ แผ่นกั้นดังกล่าวส่งผลกระทบต่อสมรรถนะในการถ่ายเทความร้อน และพฤติกรรมการไหล, ความดันตกคร่อม และการถ่ายเทความร้อน โดยทำการศึกษาการติดตั้งแผ่นกั้นในกรณีต่างๆดังนี้ การจัดวางแบบ upstream และ downstream มุมปะทะ 15,30,45 และ 60 องศา ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น 3.77,4.77 และ 5.77 ม.ม. ที่ เลขเรย์โนลด์ 500 ถึง 2500 ค่าตัวแปรที่สนใจได้แก่ ค่าตัวประกอบความเสียดทาน, เลขนัสเซลเฉลี่ย และค่าสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF)ตามลำดับ ซึ่งการจำลองสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. เมื่ออากาศไหลผ่านแผ่นกั้นรูปตัววี จะทำให้เกิดกระแสการไหลแบบหมุนวนส่งผลให้มีการคลุกเคล้ากันอย่างสมบูรณ์ขึ้น นอกจากนั้นยังบังคับให้อากาศเข้าไปปะทะกับผนังท่อเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนได้มากกว่าแบบครีปเปล่าที่มีอากาศเพียงส่วนหนึ่งเข้าไปถ่ายเทความร้อนจากผนังท่อเท่านั้น อิทธิพลของตำแหน่งของแผ่นกั้น มุมปะทะ และระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น จะช่วยให้อากาศเข้าไปแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีขึ้นอีกด้วย โดยจะส่งผลแตกต่างกันไปแล้วแต่กรณี

2. กรณีที่ติดแผ่นกั้นในตำแหน่งแบบ downstream ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น VGs เท่ากับ 3.77 มุมปะทะ 60 องศา เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 2000 จะมีการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด โดยมีเลขนัสเซลเฉลี่ยเป็น 1.58 เท่าของ กรณีที่ไม่ได้ติดแผ่นกั้น

3.กรณีที่ติดแผ่นกั้นในตำแหน่งแบบ upstream ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น VGs เท่ากับ 3.77 มุมปะทะ 15 องศา เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 2500 มีค่าตัวประกอบความเสียดทานมากที่สุด โดยมีค่าเป็น 1.57 เท่าของ กรณีที่ไม่ได้ติดแผ่นกั้น

4. สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนจะวัดจากกรณีที่มีการถ่ายเทความร้อนมาก แต่ผลเสียจากความดันตกคร่อมในรูปแบบของค่าตัวประกอบความเสียดทานจะต้องไม่มากเกินไป ซึ่งกรณีดังกล่าวจะเกิดขึ้นเมื่อ การไหลแบบหมุนวนที่เกิดขึ้นจากแผ่นกั้นเป็นการไหลที่ไม่รุนแรงเกินไป หรือไหลอย่างช้าๆ และจำนวนน้อยๆ กรณีที่ติดแผ่นกั้นในตำแหน่งแบบ upstream ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น VGs เท่ากับ 5.77 มุมปะทะ 15 องศา เลขเรย์โนลด์ เท่ากับ 2500 ซึ่งมีค่าสมรรถนะในการถ่ายเทความร้อนเท่ากับ 1.1126 สำหรับกรณีนี้ มีอัตราการถ่ายเทความร้อนเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ได้ติดแผ่นกั้น VGs ถึง 1.31 เท่าและมีอัตราการเพิ่มขึ้นของ ค่าตัวประกอบความเสียดทานเพียง 1.62 เท่าจึงเป็นกรณีที่มีสมรรถนะในการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด

8.2 ข้อเสนอแนะ

ผลการวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการใช้ระเบียบวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลสำหรับการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนและพฤติกรรมการไหล ของอากาศเมื่อไหลผ่านครีป สามารถใช้เป็นเครื่องมือเพื่อการวิเคราะห์ผลและย้ำความมั่นใจ ก่อนเข้าสู่กระบวนการออกแบบจริงได้ ซึ่งมีความสะดวกและมีค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่าการสร้างเครื่องทดลองเพื่อใช้ในการทดลอง สำหรับผลจากการศึกษานี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาและออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ fin-tube เพื่อให้มีสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุด โดยสามารถนำไปเป็นแนวทางในการวิจัยระดับสูงต่อไป เช่น การศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนและการไหลของอากาศเมื่อทำการติดแผ่นกัน VGs ในรูปแบบอื่นๆ

ในการทำการจำลองนั้นผลที่ได้ไม่สามารถทราบล่วงหน้าได้ ดังนั้นในการทำวิจัยสำหรับการจำลองควรที่จะปรับเปลี่ยนค่าต่างๆ อย่างละเอียด อย่างมีระบบ มีแบบแผน จะทำให้ได้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่ดีเหมาะสมกับลักษณะงานที่ใช้ที่สุดได้



บรรณานุกรม

- [1] J.M., W. and W.Q., T. (2007), Investigation on laminar convection heat transfer in fin-and-tube heat exchanger in aligned arrangement with longitudinal vortex generator from the viewpoint synergy of field principal., Applied Thermal engineering 27: 2609-17.
- [2] Jacobi, A.M. and R.K.Shah (1995), Heat transfer surface enhancement through the use of longitudinal vortices : a review of recent progress., Exp. Therm. Fluid Sci. 11: 295-309.
- [3] Fiebig, M. (1995), Embedded vortices in internal flow : heat transfer and pressure loss enhancement., Int. J. Heat Fluid Flow 16: 376-388.
- [4] K., T., K.m., K. and K., N. (2002), Heat transfer enhancement accompanying pressure-loss reduction with winglet-type vortex generators for fin-tube heat exchangers., International Journal of Heat and Mass Transfer 45: 3795-801.
- [5] Y.H., Z., L.B., W., F., K., Y.X., S. and S.D., G. (2004), The effect of span position of winglet vortex generator on local heat/mass transfer over a three-row flat tube bank fin., Journal of Heat and Mass Transfer 40: 881-90.
- [6] S., Y., D., P. and M., C. (2002), Heat transfer enhancement for fin-tube heat exchanger using vortex generators., International Journal of KSME 16(1): 109-15.
- [7] K.M., K., K., T. and K., N. (2003), Heat transfer and pressure loss penalty for the number of tube rows of staggered finned-tube bundles with a single transverse row of winglets., International Journal of Heat and Mass Transfer 46: 175-80.
- [8] L.H., T., M., Z. and Q.W., W. (2009), Experimental and numerical investigation on air-side performance of fin-and-tube heat exchangers with various fin patterns., Experimental Thermal and Fluid Science 33: 818-27.
- [9] Chu, P., He, Y.L., Lei, Y.G., Tian, L.T. and Li, R. (2009), Three-dimensional numerical study on fin-and-oval-tube heat exchanger with longitudinal vortex generators., Applied Thermal engineering 29: 859-876.
- [10] Promvong, P., Jedsadaratanachai, W., Kwankaomeng, S. and Thainpong, C. (2012), 3D simulation of laminar flow and heat transfer in V-baffled square channel., International communication of Heat and Mass Transfer 39: 85-93.
- [11] Khundheyer, A.F. and Mahmoud, M.S. (2011), Numerical Analysis of Fin-tube Plate Heat exchanger by using CFD Technique., ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences
- [12] W.M. Kays, A.L. London, Compact Heat Exchangers, third ed., McGraw-Hill, New York, 1998. pp. 270-271.

- [13] Versteeg, H.K. and Malalasekera W., *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method.* (1995), Malaysia : Longman Scientific & Technical
- [14] Chung, T. J., *Computational fluid dynamics.*, (2002), Cambridge University Press.
- [15] Anderson, J. D., et al., *Introduction to computation fluid dynamics.* Edited by Wndt, John F. Newyork : Springer-Verlag. (1992)
- [16] Ferziger, J.H. and Peric, M., *Computation methods for fluid dynamics.* (1999), 2nd ed. Germany : Springer-/verlag Berlin Heidelberg
- [17] Chapra, Steven C. and Canale, Raymond P., *Numerical methods for engineers.* (1998), Singapore : McGraw-Hill



ภาคผนวก ก.
ตารางบันทึกผลการทดลอง

ตารางที่ ก.1 ผลการทดลองของครีบทัดที่ติดแผ่นกัน ที่มีการจัดวางตำแหน่งแบบ upstream

Upstream								
Re	ระยะ	มุม	ΔP	Nu	f	Nu/Nu0	f/f0	TEF
Re500	3.77	15	14.8976	7.1215	0.1490	1.1510	1.7719	0.9648
		30	16.2575	7.468113	0.1626	1.2071	1.9337	0.9827
		45	18.3937	7.7997	0.1840	1.2607	2.1878	0.9850
		60	20.9103	8.047327	0.2092	1.3007	2.4871	0.9737
	4.77	15	15.1109	7.1879	0.1512	1.1618	1.7973	0.9692
		30	16.5649	7.425952	0.1657	1.2003	1.9702	0.9711
		45	18.9192	7.8722	0.1892	1.2724	2.2503	0.9848
		60	22.4076	8.242244	0.2241	1.3322	2.6652	0.9746
	5.77	15	15.0765	7.1832	0.1508	1.1610	1.7932	0.9693
		30	16.6264	7.389017	0.1663	1.1943	1.9776	0.9650
		45	19.0516	7.7575	0.1906	1.2538	2.2660	0.9682
		60	22.8975	8.305114	0.2290	1.3423	2.7235	0.9749
Re1000	3.77	15	39.9308	10.4242	0.0999	1.2271	1.8390	1.0016
		30	44.7329	11.17507	0.1119	1.3155	2.0601	1.0338
		45	53.4097	11.791	0.1336	1.3880	2.4597	1.0282
		60	62.5276	12.34344	0.1564	1.4530	2.8796	1.0213
	4.77	15	40.107	10.5601	0.1003	1.2431	1.8471	1.0132
		30	45.0276	10.96895	0.1126	1.2912	2.0737	1.0126
		45	54.3922	11.8279	0.1360	1.3923	2.5050	1.0252
		60	67.7354	12.5763	0.1694	1.4804	3.1195	1.0132
	5.77	15	39.8462	10.6251	0.0996	1.2507	1.8351	1.0216
		30	44.8991	10.83144	0.1123	1.2750	2.0678	1.0008
		45	53.9442	11.3617	0.1349	1.3375	2.4843	0.9875
		60	67.98	12.41884	0.1700	1.4619	3.1308	0.9993

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Upstream								
Re	ระยะ	มุม	ΔP	Nu	f	Nu/Nu0	f/f0	TEF
Re1500	3.77	15	67.4	12.8658	0.0749	1.2638	1.6987	1.0592
		30	87.8686	13.91099	0.0977	1.3665	2.2145	1.0484
		45	102.614	14.2919	0.1140	1.4039	2.5861	1.0228
		60	114.5534	15.45778	0.1273	1.5184	2.8871	1.0664
	4.77	15	70.3444	13.0621	0.0782	1.2831	1.7729	1.0602
		30	80.4207	13.60372	0.0894	1.3363	2.0268	1.0559
		45	100.9198	14.697	0.1122	1.4437	2.5434	1.0576
		60	131.3874	15.6342	0.1460	1.5358	3.3113	1.0304
	5.77	15	69.701	13.1725	0.0775	1.2940	1.7567	1.0724
		30	79.7159	13.43661	0.0886	1.3199	2.0091	1.0460
		45	101.7205	13.621	0.1131	1.3380	2.5636	0.9776
		60	129.1456	15.37023	0.1435	1.5098	3.2548	1.0188
Re2000	3.77	15	99.709	14.7665	0.0625	1.2805	1.6235	1.0895
		30	137.0969	16.03325	0.0859	1.3903	2.2323	1.0638
		45	159.103	16.6837	0.0997	1.4467	2.5906	1.0534
		60	188.5041	17.82679	0.1182	1.5459	3.0693	1.0637
	4.77	15	103.9445	15.0389	0.0652	1.3041	1.6925	1.0943
		30	120.7177	15.64211	0.0757	1.3564	1.9656	1.0828
		45	156.4798	16.4895	0.0981	1.4299	2.5479	1.0469
		60	203.4997	17.7448	0.1276	1.5387	3.3135	1.0321
	5.77	15	102.902	15.1998	0.0645	1.3181	1.6755	1.1097
		30	119.0144	15.49337	0.0746	1.3435	1.9379	1.0776
		45	157.8809	15.6881	0.0990	1.3604	2.5707	0.9931
		60	204.5155	17.72258	0.1282	1.5368	3.3300	1.0291

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Upstream								
Re	ระยะ	มม	ΔP	Nu	f	Nu/Nu0	f/f0	TEF
Re2500	3.77	15	134.95	16.2271	0.0541	1.2531	1.5730	1.0774
		30	191.5771	17.68747	0.0768	1.3658	2.2331	1.0449
		45	222.6509	18.8114	0.0893	1.4526	2.5953	1.0570
		60	271.9657	19.28218	0.1091	1.4890	3.1702	1.0136
	4.77	15	140.2007	16.7772	0.0562	1.2955	1.6343	1.0999
		30	164.8807	17.26584	0.0661	1.3333	1.9219	1.0724
		45	220.768	18.2598	0.0885	1.4100	2.5734	1.0289
		60	292.7853	19.2102	0.1174	1.4834	3.4129	0.9853
	5.77	15	138.6675	16.9095	0.0556	1.3058	1.6164	1.1126
		30	164.0871	17.09677	0.0658	1.3202	1.9127	1.0636
		45	221.9939	17.4019	0.0890	1.3438	2.5877	0.9788
		60	298.9322	19.1384	0.1199	1.4779	3.4845	0.9748

ตารางที่ ก.2 ผลการทดลองของครีบทัดที่ติดแผ่นกัน ที่มีการจัดวางตำแหน่งแบบ downstream

downstream								
Re	ระยะ	มม	ΔP	Nu	f	Nu/Nu0	f/f0	TEF
Re500	3.77	15	15.0886	6.7627	0.1509	1.1086	1.7947	0.9123
		30	17.0806	7.032477	0.1709	1.1367	2.0316	0.9103
		45	20.55373	7.506148	0.2056	1.2132	2.4447	0.9134
		60	24.2451	7.986865	0.2425	1.2909	2.8837	0.9199
	4.77	15	15.1892	6.9018	0.1519	1.1155	1.8066	0.9290
		30	17.1515	7.30778	0.1716	1.1812	2.0400	0.9446
		45	20.14947	7.821367	0.2016	1.2642	2.3966	0.9581
		60	24.5995	8.324627	0.2461	1.3455	2.9259	0.9541
	5.77	15	15.2047	6.9324	0.1521	1.1205	1.8085	0.9328
		30	17.2023	7.319937	0.1721	1.1831	2.0461	0.9452
		45	19.75621	7.919645	0.1976	1.2800	2.3498	0.9766
		60	23.4851	8.573973	0.2349	1.3858	2.7933	0.9980

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

downstream								
Re	ระยะ	มม	ΔP	Nu	f	Nu/Nu0	f/f0	TEF
Re1000	3.77	15	40.5048	9.9527	0.1013	1.1716	1.8654	0.9517
		30	47.8435	10.59617	0.1196	1.2473	2.2034	0.9586
		45	62.19804	11.50456	0.1555	1.3543	2.8645	0.9536
		60	76.3141	12.15263	0.1908	1.4306	3.5146	0.9409
	4.77	15	40.5047	10.25008	0.1013	1.2066	1.8654	0.9802
		30	47.4099	10.97793	0.1186	1.2923	2.1834	0.9961
		45	59.01275	11.76346	0.1476	1.3848	2.7178	0.9923
		60	76.8126	12.4863	0.1921	1.4698	3.5375	0.9647
	5.77	15	40.5395	10.3249	0.1014	1.2154	1.8670	0.9871
		30	47.3254	10.9975	0.1183	1.2946	2.1795	0.9985
		45	57.2107	11.94116	0.1431	1.4057	2.6348	1.0177
		60	71.8426	12.74028	0.1797	1.4997	3.3086	1.0065
Re1500	3.77	15	71.3729	12.41444	0.0793	1.2195	1.7988	1.0027
		30	87.0136	13.51323	0.0967	1.3274	2.1930	1.0217
		45	120.6258	14.85857	0.1341	1.4596	3.0401	1.0076
		60	152.6284	15.49277	0.1696	1.5219	3.8466	0.9713
	4.77	15	71.0811	12.7663	0.0790	1.2541	1.7914	1.0326
		30	85.4347	13.78964	0.0950	1.3546	2.1532	1.0490
		45	111.1952	14.7201	0.1236	1.4460	2.8024	1.0256
		60	152.8623	15.54802	0.1699	1.5273	3.8525	0.9743
	5.77	15	71.003	12.9063	0.0789	1.2678	1.7895	1.0443
		30	84.8682	13.76895	0.0943	1.3525	2.1389	1.0498
		45	107.0813	14.59356	0.1190	1.4336	2.6987	1.0297
		60	140.5515	15.36907	0.1562	1.5097	3.5423	0.9904

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

downstream								
Re	ระยะ	มุม	ΔP	Nu	f	Nu/Nu0	f/f0	TEF
Re2000	3.77	15	105.7923	14.2999	0.0663	1.2400	1.7226	1.0344
		30	132.4581	15.95526	0.0830	1.3836	2.1568	1.0709
		45	194.6424	17.77669	0.1220	1.5415	3.1693	1.0494
		60	252.2193	18.24697	0.1581	1.5823	4.1068	0.9881
	4.77	15	105.203	14.6879	0.0659	1.2737	1.7130	1.0645
		30	129.3507	15.91551	0.0811	1.3801	2.1062	1.0767
		45	175.1397	17.19418	0.1098	1.4910	2.8517	1.0514
		60	250.2872	18.04888	0.1569	1.5651	4.0753	0.9798
	5.77	15	104.8308	14.8835	0.0657	1.2906	1.7069	1.0799
		30	128.1374	15.7417	0.0803	1.3650	2.0864	1.0683
		45	168.4521	16.49774	0.1056	1.4306	2.7428	1.0220
		60	226.8899	17.41614	0.1422	1.5102	3.6943	0.9769
Re2500	3.77	15	143.1746	15.7526	0.0574	1.2164	1.6689	1.0255
		30	183.1483	17.99239	0.0734	1.3894	2.1349	1.0790
		45	284.3195	20.26603	0.1140	1.5649	3.3142	1.0496
		60	374.3126	20.30448	0.1501	1.5679	4.3632	0.9595
	4.77	15	142.4459	16.3191	0.0571	1.2602	1.6604	1.0642
		30	178.4766	17.32495	0.0716	1.3378	2.0804	1.0480
		45	249.8665	19.42992	0.1002	1.5004	2.9126	1.0506
		60	367.3129	20.16082	0.1473	1.5568	4.2816	0.9587
	5.77	15	141.4814	16.6007	0.0567	1.2819	1.6492	1.0850
		30	176.7622	17.217	0.0709	1.3295	2.0604	1.0448
		45	240.8937	18.10649	0.0966	1.3982	2.8080	0.9911
		60	329.7467	19.08297	0.1322	1.4736	3.8437	0.9407

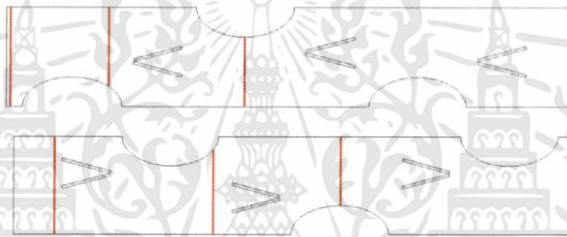
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ตารางรูปภาพพฤติกรรมต่าง ที่ใช้ในการเปรียบเทียบ

สำหรับรูปภาพที่ใช้ในการเปรียบเทียบพฤติกรรมต่างๆ ที่ถูกใช้ในการอ้างอิงจากบทที่ 7 โดยใช้โปรแกรม Tecplot ในการวาด โดยจะแสดงผลในรูปแบบของ

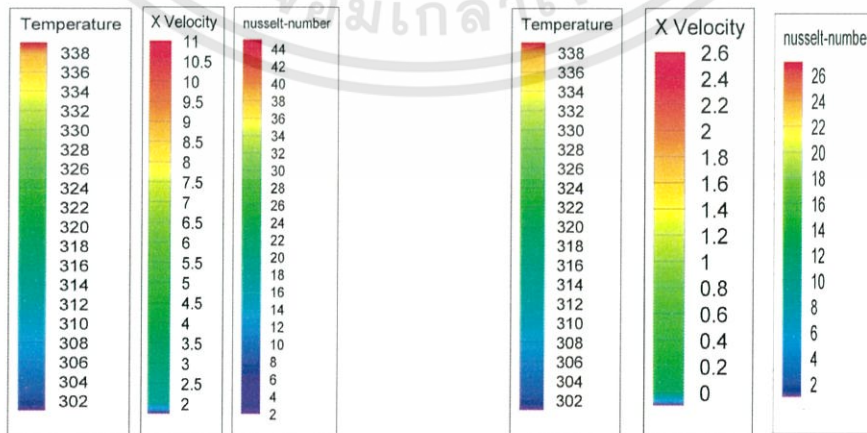
- ข.1. Streamline ในหน้าตัดต่างๆตามแนวขวาง
 - ข.2. Contour ของความเร็วในหน้าตัดต่างๆ ตามแนวขวาง
 - ข.3. Contour ของอุณหภูมิของความเร็วในหน้าตัด ต่างๆ ตามแนวขวาง
 - ข.4. Stream line ตามแนวยาวจากภาพด้านบนที่หน้าตัด ตรงกลางช่องทางการไหล
 - ข.5. Contour ของความเร็วตามแนวยาวจากภาพด้านบนที่ หน้าตัด ตรงกลางช่องทางการไหล
 - ข.6. Contour ของอุณหภูมิตามแนวยาวจากภาพด้านบนที่ หน้าตัด ตรงกลางช่องทางการไหล
- หน้าตัดตามแนวขวางจะแสดงหน้าตัดดังต่อไปนี้



รูปที่ ข.1 แสดงหน้าตัดตามขวางที่แสดงในตาราง สำหรับกรณี upstream และ downstream ตามลำดับ

การตัดหน้าตัดดังรูปที่ ข.1 หน้าตัดแรกจะแสดงพฤติกรรมของอากาศแรกเข้าในช่องทางการไหล หน้าตัดที่สองจะแสดงจะแสดงพฤติกรรมของอากาศบริเวณปลายท่อที่ 1 หน้าตัดที่สองจะแสดงจะแสดง พฤติกรรมของอากาศบริเวณกลางที่ 2 สำหรับกรณีอื่นๆ นอกเหนือจากในตารางจะแสดงผลไว้ที่ทางด้าน ท้ายของตาราง

สำหรับ Contour ต่างๆจะมีระดับสีดังต่อไปนี้



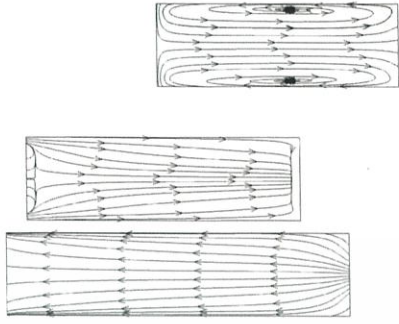

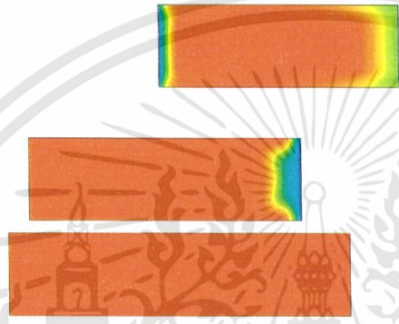
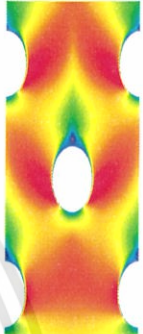
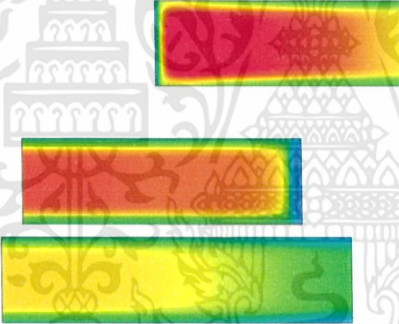

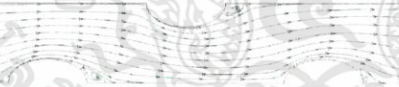
ก.

ข.

รูปที่ ข.2 ระดับสี Contour ที่ ก.Re เท่ากับ2500 ข. Re เท่ากับ 500

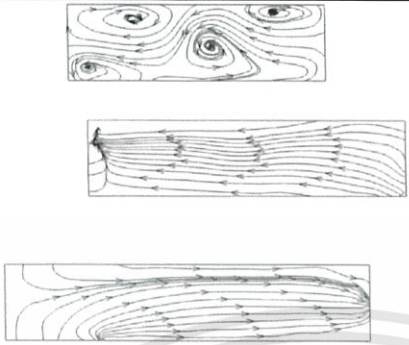
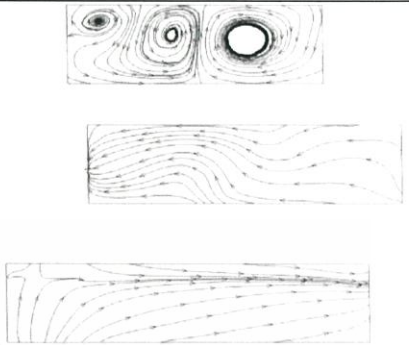

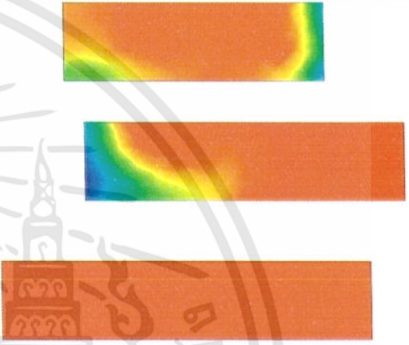
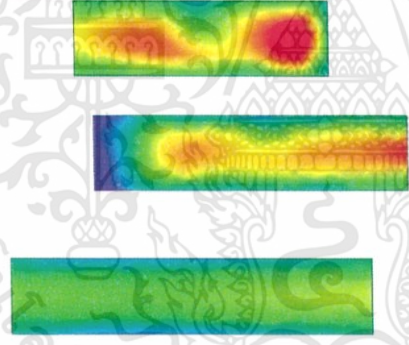
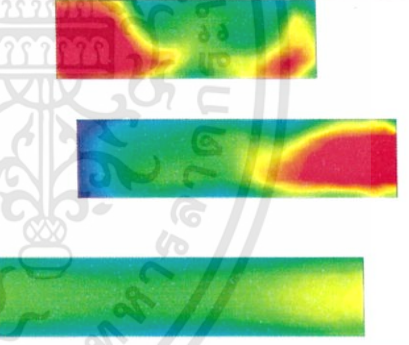

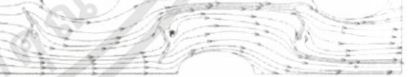
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 ภาพพฤติกรรมต่างๆ กรณีที่ไม่ได้ติดแผ่นกัน VGs

Behavior	Base case	Behavior	Base case
Cross section-streamline		Contour-temp	
Cross section-Contour-temp		Contour-velocity	
Cross section-Contour-velocity		Contour-Nu	
streamline			

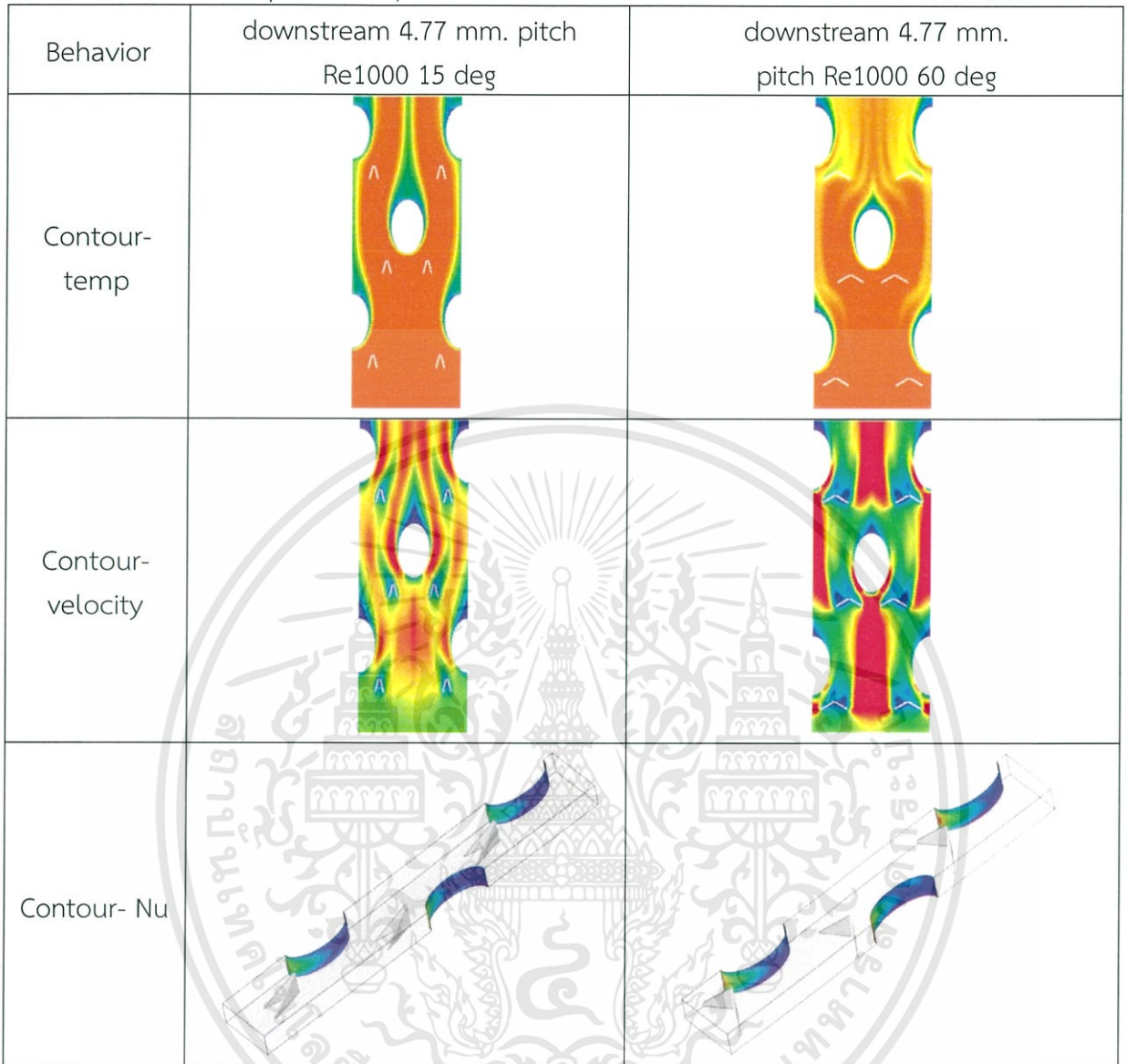
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 ภาพพฤติกรรมต่างๆ กรณี downstream ระยะ 4.77 ม.ม. Re เท่ากับ 1000

Behavior	downstream 4.77 mm. pitch Re1000 15 deg	downstream 4.77 mm. pitch Re1000 60 deg
Cross section-streamline		
Cross section-Contour-temp		
Cross section-Contour-velocity		
streamline		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

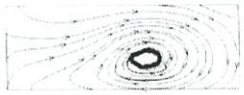
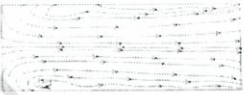
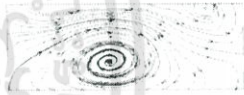

ตารางที่ ข.3 ภาพ พฤติกรรมต่างๆ กรณี downstream ระยะ 4.77 ม.ม. Re เท่ากับ 1000 (ต่อ)



ภาพที่ ข.3 Contour Nusselt กรณี upstream ระยะ 5.77 ม.ม. Re 500

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.4 ภาพ stream line ตาม แนวหน้าตัดตามขวาง ที่มีการจัดวางตำแหน่งแบบ upstream

cases	upstream	
	500	2500
3.77	15	
	45	
5.77	15	
	45	

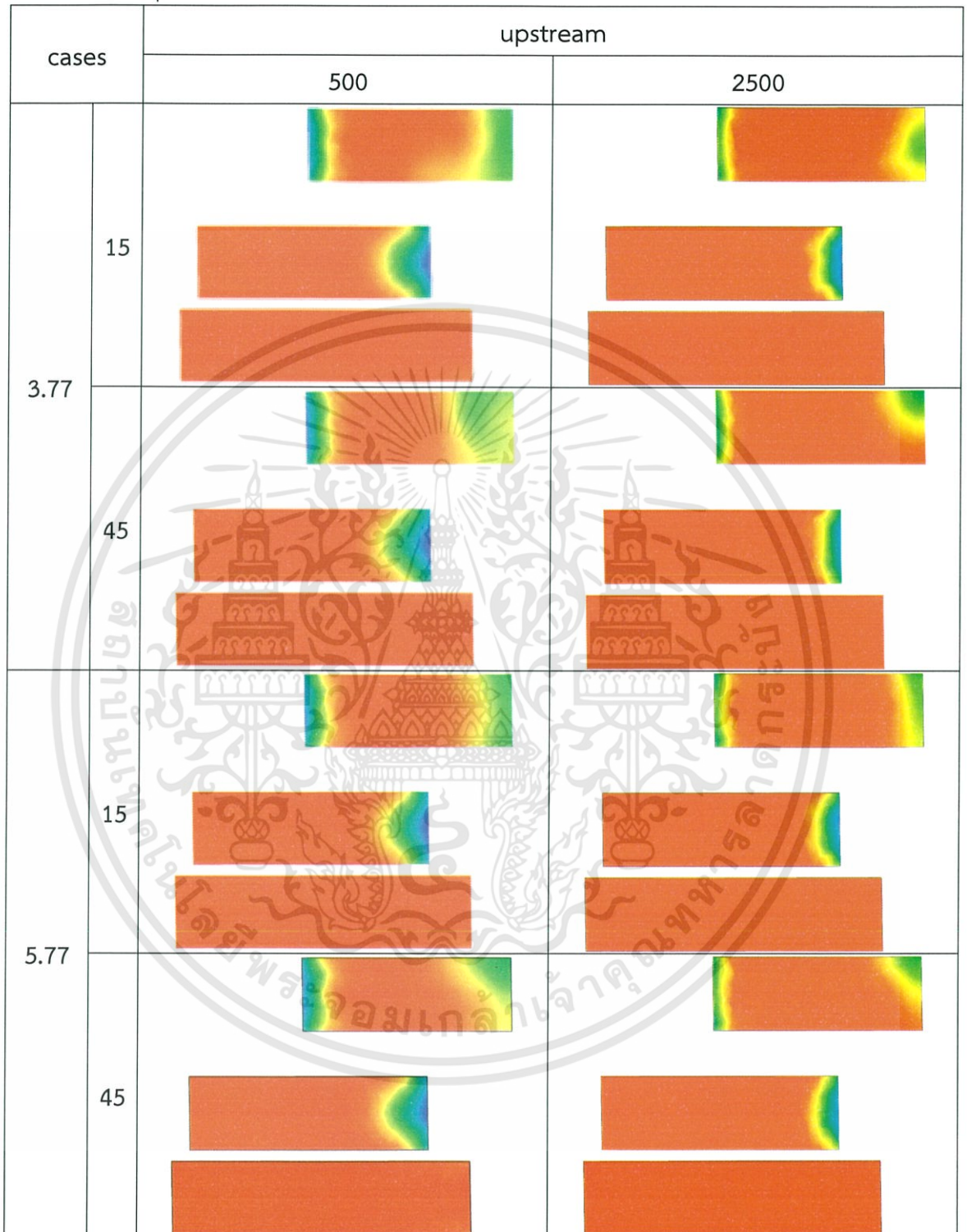
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 ภาพ stream line ตาม แนวหน้าตัดตามขวาง ที่มีการจัดวางตำแหน่งแบบ downstream

cases	downstream	
	500	2500
3.77	15	
	45	
5.77	15	
	45	

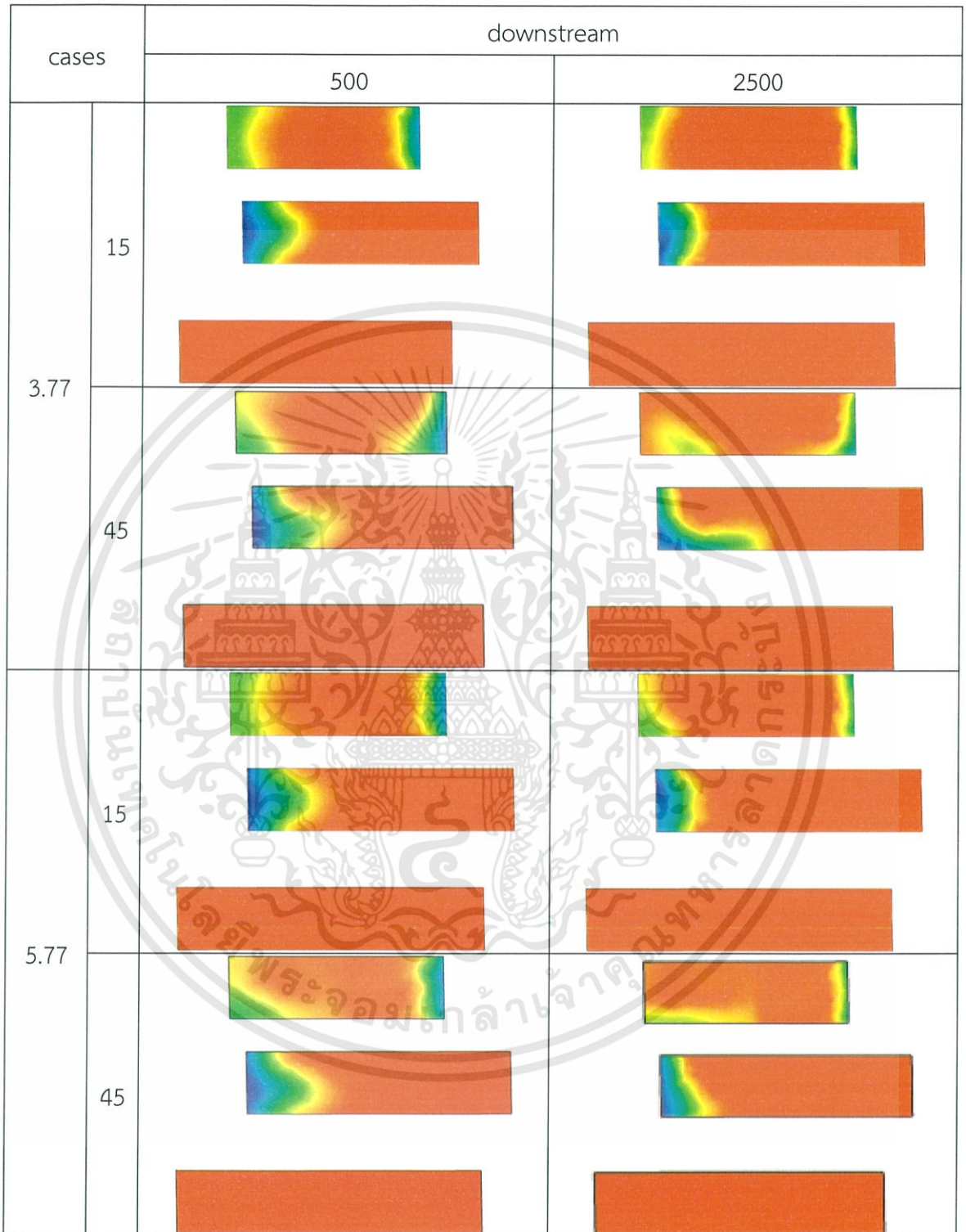
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.6 ภาพ Contour ของอุณหภูมิตามแนวหน้าตัดตามขวาง ที่มีการจัดวางตำแหน่งแบบ upstream



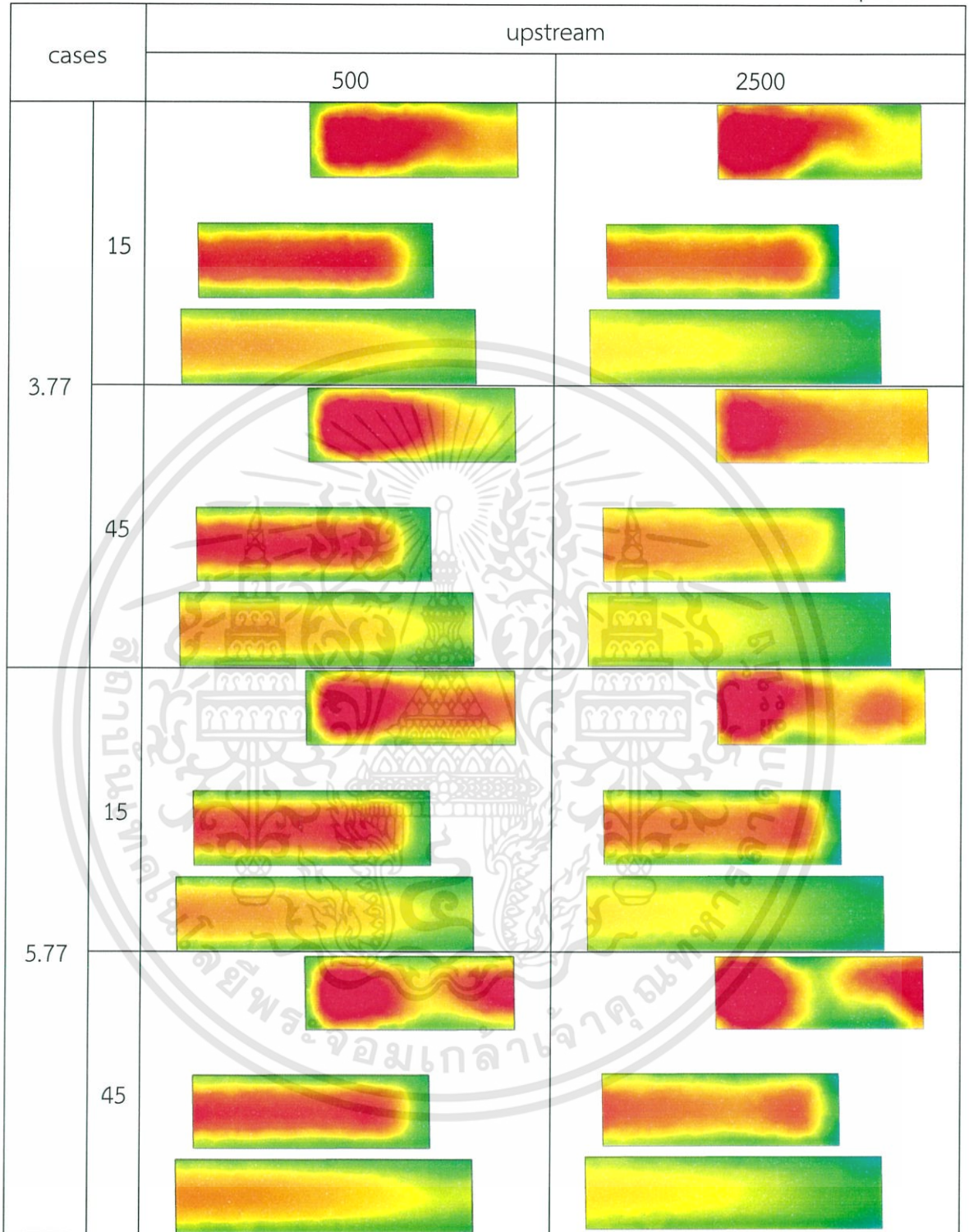
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.7 ภาพ Contour ของอุณหภูมิตามแนวหน้าตัดตามขวาง ที่มีการจัดวางตำแหน่งแบบ downstream



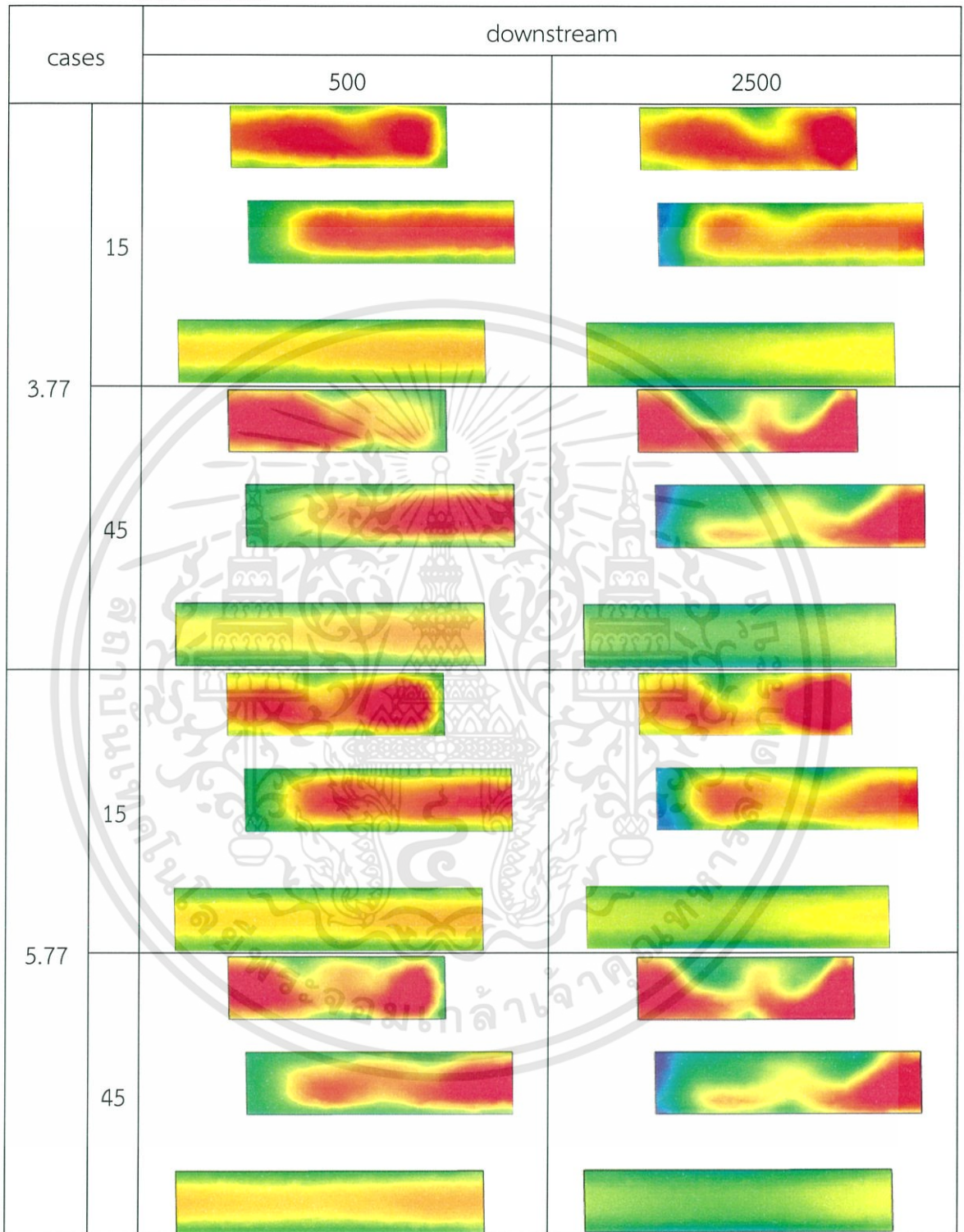
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.8 ภาพ Contour ของความเร็วตามแนวหน้าตัดตามขวาง ที่มีการจัดวางตำแหน่งupstream



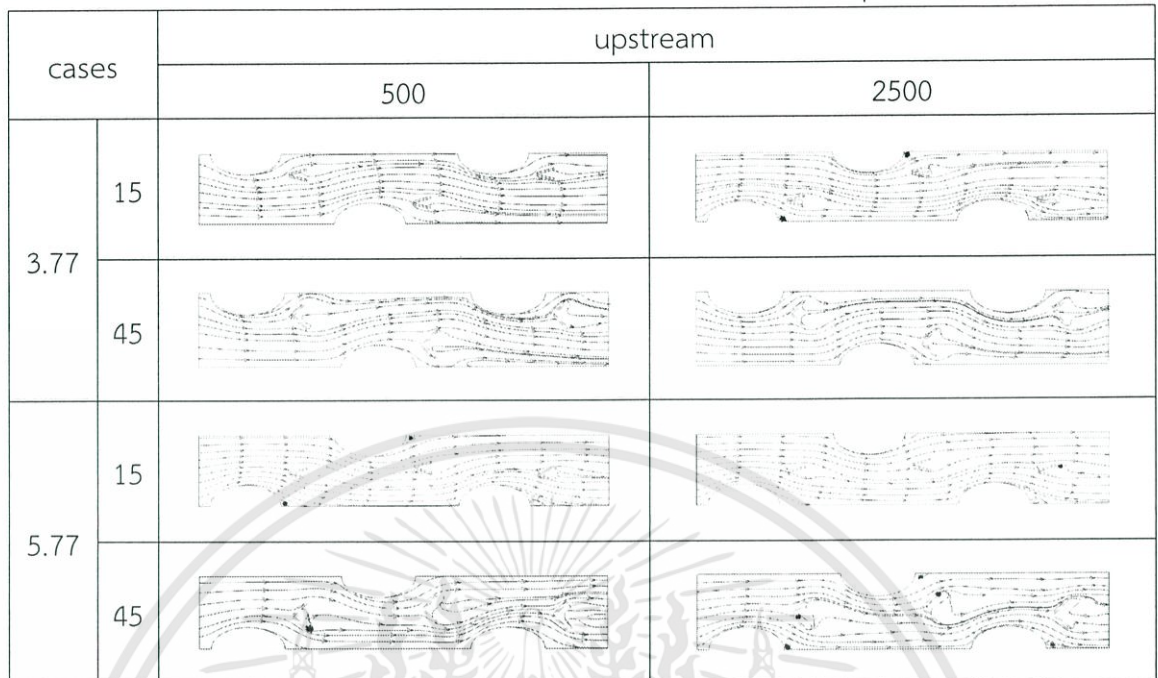
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.9 ภาพ Contour ของความเร็วตามแนวหน้าตัดตามขวาง ที่มีการจัดวางตำแหน่ง
downstream

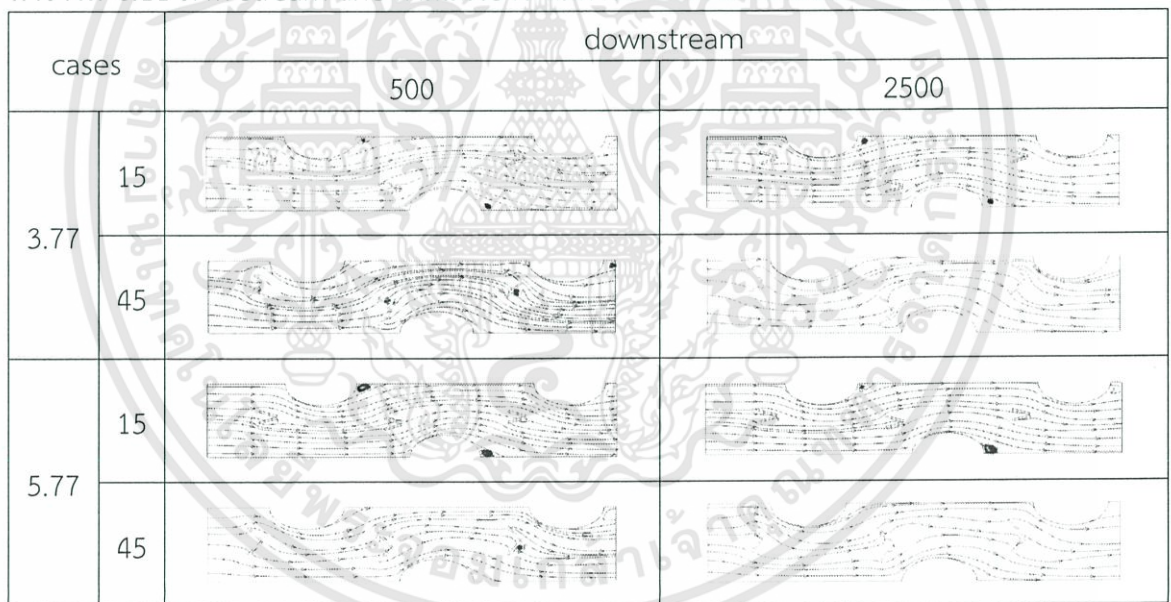


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.10 ภาพ stream line ตามแนวยาว ที่มีการจัดวางตำแหน่งแบบ upstream

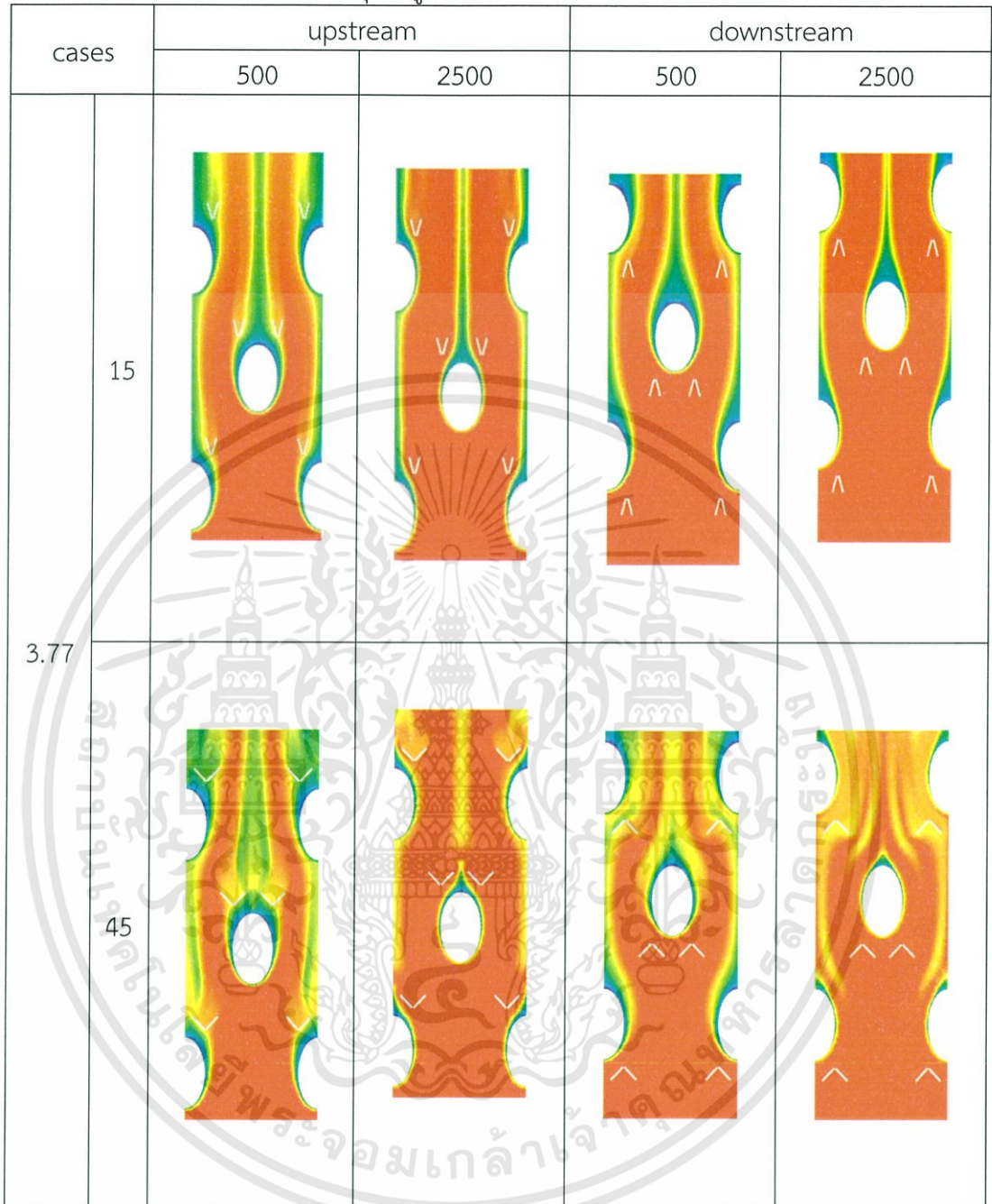


ตารางที่ ข.11 ภาพ stream line ตามแนวยาว ที่มีการจัดวางตำแหน่งแบบ downstream



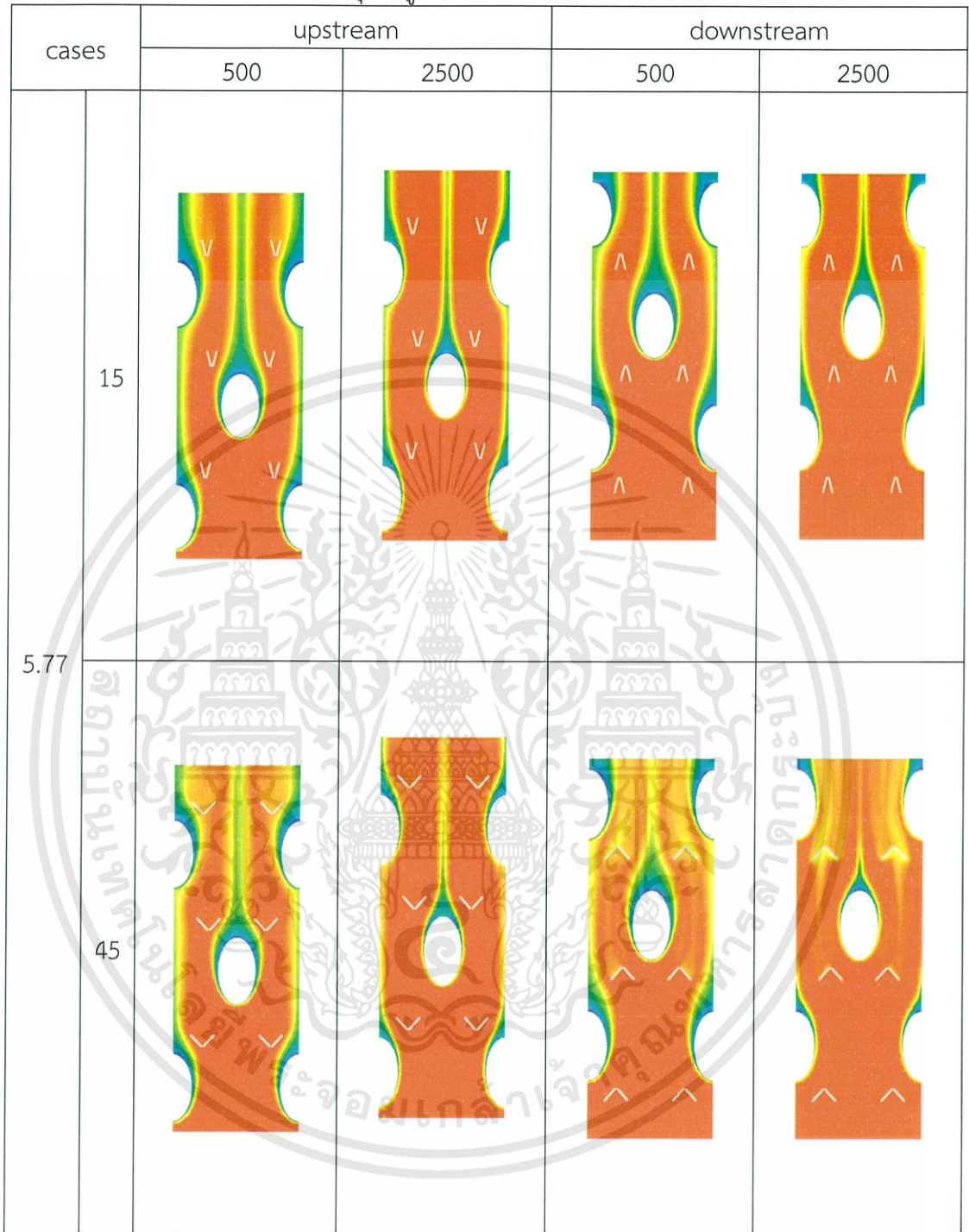
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.12 ภาพ Contour ของอุณหภูมิ ตามแนวยาว ระยะระหว่างแผ่นกัน 3.77 มม.



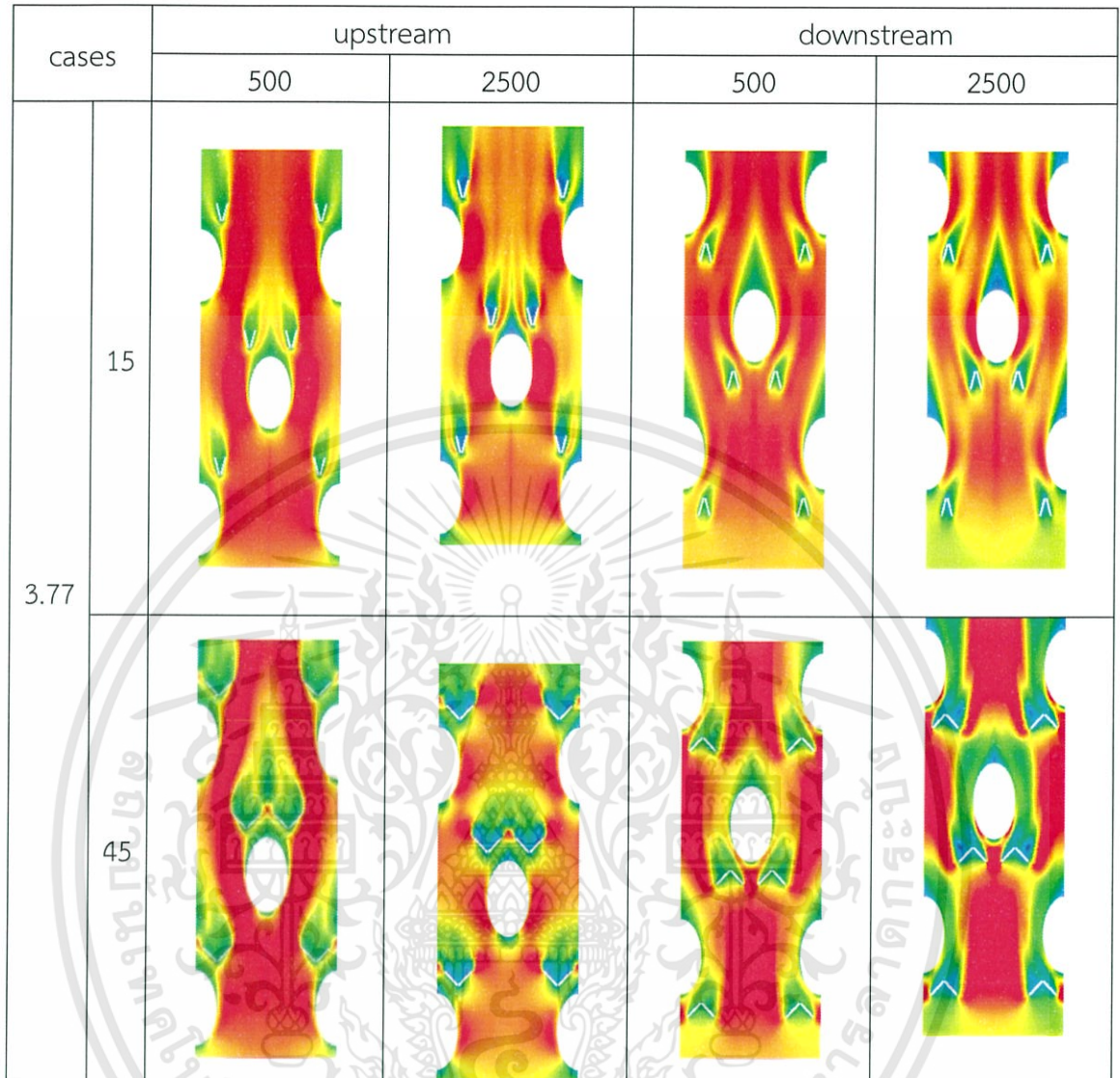
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.13 ภาพ Contour ของอุณหภูมิ ตามแนวยาว ระยะระหว่างแผ่นกัน 5.77 มม.



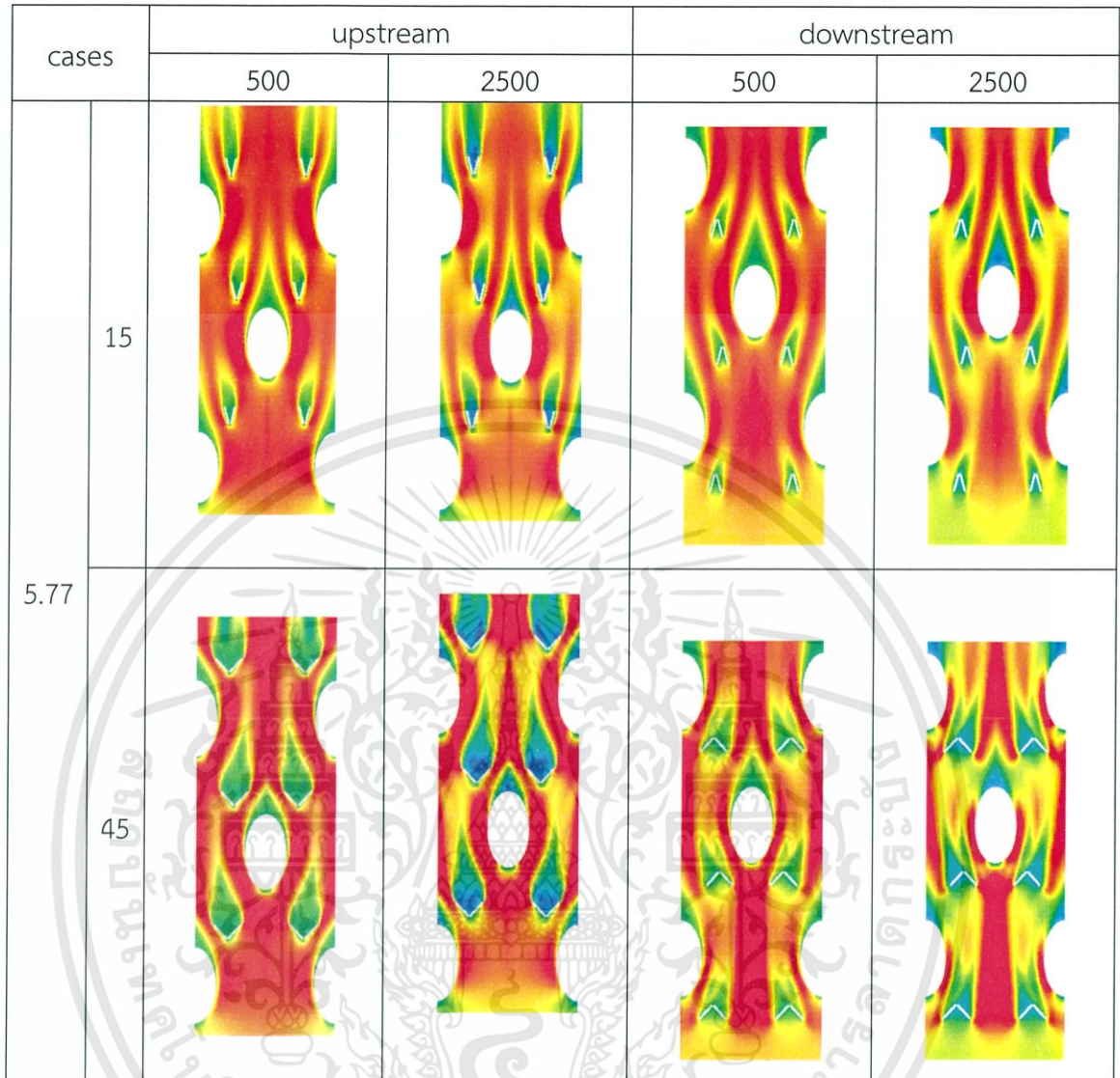
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.14 ภาพ Contour ของความเร็ว ตามแนวยาว ระยะระหว่างแผ่นกัน 3.77 ม.ม.



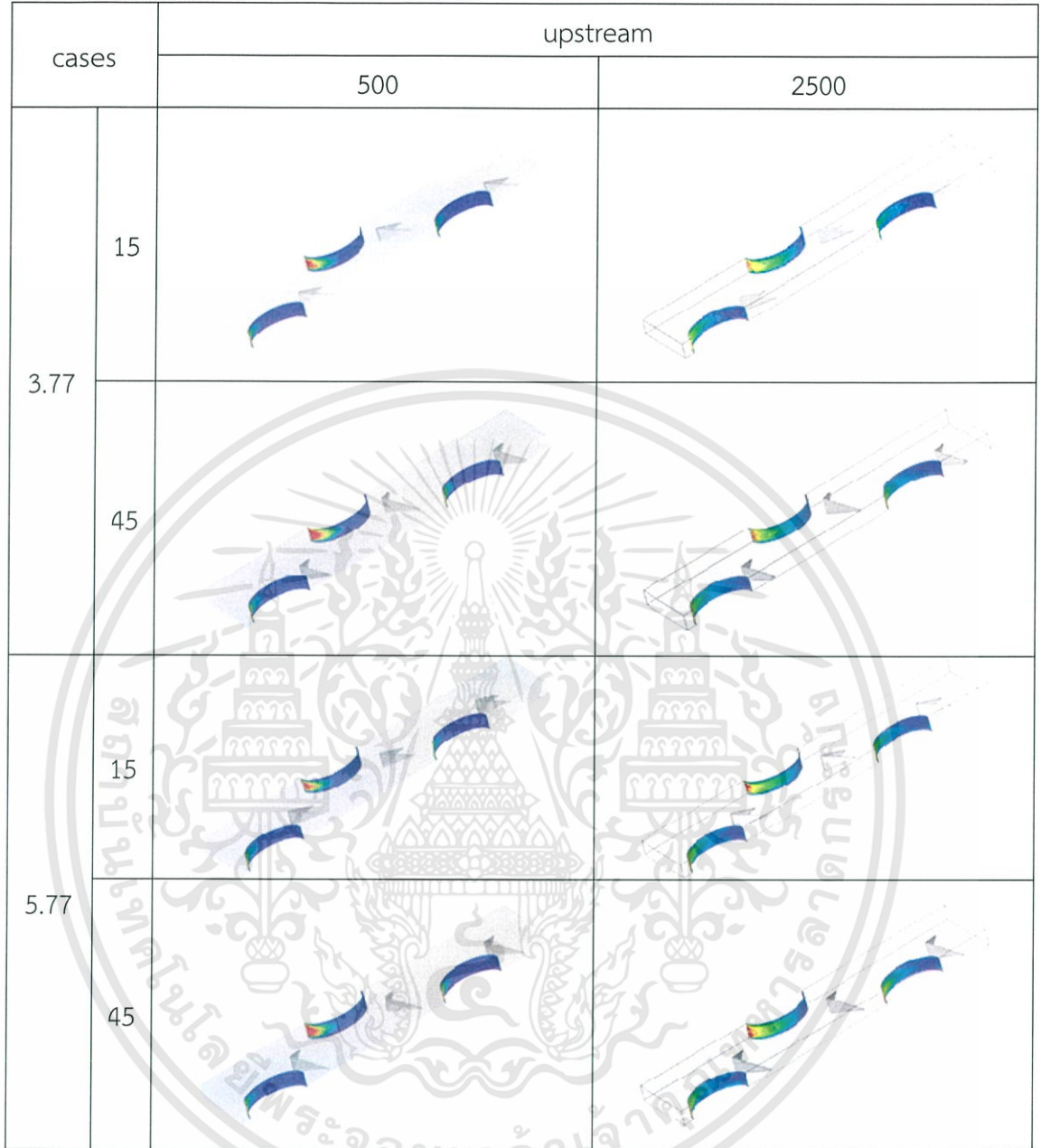
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.15 ภาพ Contour ของความเร็ว ตามแนวยาว ระยะระหว่างแผ่นกัน 5.77 ม.ม.




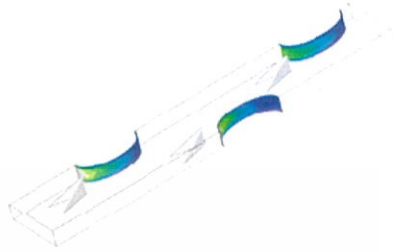
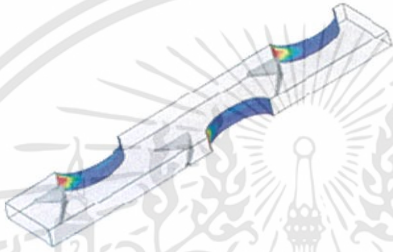
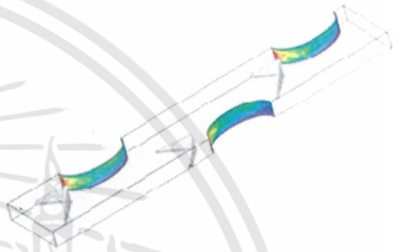


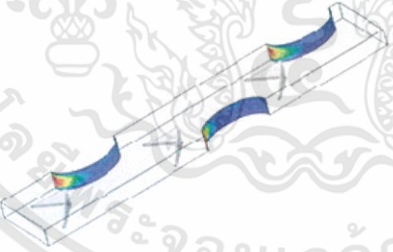
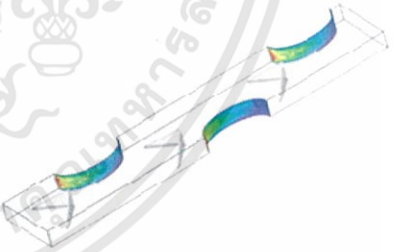
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.16 ภาพ Contour ของ Nu ระยะระหว่างแผ่นกัน 3.77 ม.ม.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.17 ภาพ Contour ของ Nu ระยะระหว่างแผ่นกัน 5.77 ม.ม.

cases		downstream	
		500	2500
3.77	15		
	45		
5.77	15		
	45		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้