

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การจำลองเชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมที่ติดครีบริบตัววี

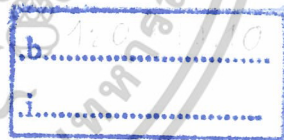
NUMERICAL SIMULATION OF HEAT TRANSFER IN CIRCULAR
TUBE WITH V-SHAPED RIBS



นายพัฒนา กลิ่นนิมมวล

นายภานุมาศ พร้อมมูล

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน...103118
วัน,เดือน,ปี... 28 ส.ค. 2552



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

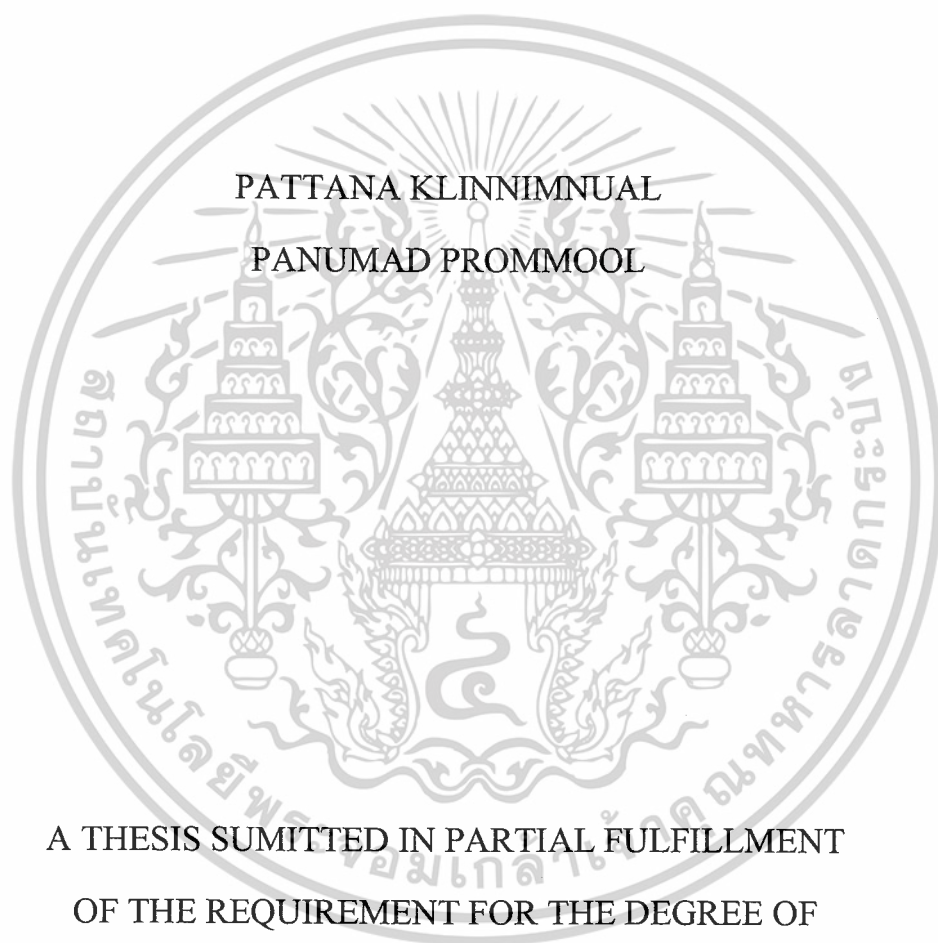
คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NUMERICAL SIMULATION OF HEAT TRANSFER IN CIRCULAR
TUBE WITH V-SHAPED RIBS



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

2008

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2551

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การจำลองเชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมที่ติดครีบริบตัววี

NUMERICAL SIMULATION OF HEAT TRANSFER IN CIRCULAR TUBE WITH
V-SHAPED RIBS

ผู้จัดทำ

1.พัฒนะ กลิ่นน้มนวล รหัสประจำตัว 48010607

2.ภาณุมาศ พร้อมมูล รหัสประจำตัว 48010675



อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจำลองเชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลม ที่ติดครีบริปตัววี

นายพัฒนะ กลิ่นนันทนวล รหัสประจำตัว 48010607

นายภาณุมาศ พร้อมมูล รหัสประจำตัว 48010675

รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2551

บทคัดย่อ

โครงการนี้นำเสนอผลจากการจำลองการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการไหลแบบราบเรียบภายในท่อกลมที่ติดตั้งครีบริปตัววีโดยจะศึกษาอิทธิพลของครีบริปต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ในการศึกษานี้จะเริ่มต้นสร้างแบบจำลองของท่อกลม โดยที่ผิวของท่อกลมมีอุณหภูมิผิวคงที่ จากนั้นครีบริปตัววีจะถูกติดตั้งเข้าไปภายใน ครีบริปที่ติดตั้งมีสามรูปแบบ รูปแบบแรกคือครีบริปเดี่ยว รูปแบบที่สองคือครีบริปคู่วางตรงกัน และรูปแบบที่สามครีบริปคู่วางเอียงกัน โดยทั้งสามรูปแบบมีการเปลี่ยนค่าความสูงครีบริป(10%, 15%, 20% ของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อกลม) และมุมปะทะของครีบริปตัววี (30°, 45°, 60°) หลังจากนั้นเริ่มการจำลองการทำงานโดยกำหนดให้มีการไหลในช่วงราบเรียบ (เลขเรย์โนลด์สอยู่ระหว่าง 100 ถึง 800) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อนและเพิ่มพลังงานการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลและท่อซึ่งวัดได้ในรูปการเพิ่มขึ้นของเลขนัสเซิลท์ รวมถึงไม่เพิ่มการสูญเสียพลังงานการไหลจากความเสียดทานในรูปของการลดลงของความดันมากจนเกินไปซึ่งวัดได้ในรูปของการเพิ่มขึ้นของตัวประกอบความเสียดทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NUMERICAL SIMULATION OF HEAT TRANSFER IN CIRCULAR TUBE WITH V-SHAPED RIBS

Pattana Klinnimnual 48010607

Panumad Prommool 48010675

Assoc.Prof.Dr. Pongjet Promvonge Advisor

ABSTRACT

This project presents the numerical simulated result of Laminar flow in a circular tube mounted with v-shaped ribs, by considering the influence of v-shaped ribs on enhancement of heat transfer. At the first, a model of the circular tube is produced at which its surface constant temperature and a v-shaped rib is placed into the circular tube. There are 3 pattern of ribs arrangement, first pattern is single rib, second pattern is in-line rib pair, and third pattern is staggered rib pair. By all pattern have to vary height value of ribs (10%, 15%, 20% of inner diameter of circular tube) and half angle of v-shaped ribs (30° , 45° , 60°). Then, the simulation is performed for flow in a laminar range (Reynolds number is between 100 to 800). The objective is to increase heat efficiency and heat transfer energy between the fluid and the tube that is measured of increasing Nusselt number and not to increase too much the flow energy loss in pressure drop which measured of increasing friction factor.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้คงไม่อาจเสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความช่วยเหลือและความร่วมมือจากหลายๆฝ่ายด้วยกัน ได้แก่ อาจารย์พงษ์เจต พรหมวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาบัตรที่ให้คำแนะนำ เอาใจใส่ ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือเสมอมา ขอขอบคุณพี่ป.โท ป.เอก ที่ช่วยเหลือให้คำแนะนำทางด้าน โปรแกรม และขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านสำหรับการให้คำปรึกษา ข้อคิดเห็นและคำแนะนำต่างๆ รวมทั้งขอขอบคุณทุกท่านที่ได้มีส่วนช่วยเหลือในการทำโครงการนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

พัฒนา กลิ่นน้มนวล

ภาณุมาศ พร้อมมูล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ii
กิตติกรรมประกาศ	iii
สารบัญ	iv
สารบัญตาราง	vi
สารบัญรูป	vii
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและความเป็นมา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตโครงการ	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ	2
บทที่ 2 ทฤษฎี	3
2.1 บทนำ	3
2.2 สมการความต่อเนื่องในปัญหา 3 มิติ	4
2.3 สมการโมเมนตัมในปัญหา 3 มิติ	6
2.4 สมการพลังงานในปัญหา 3 มิติ	9
2.5 ลักษณะพื้นฐานของการไหลภายในท่อ	11
2.6 การสูญเสียความดันภายในท่อ	14
2.7 ประเภทของการถ่ายเทความร้อน	15
2.8 สมดุลพลังงาน กรณีอุณหภูมิต่ำที่ผิวคงที่	18
2.9 ประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน	20
บทที่ 3 การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล	22
3.1 บทนำ	22
3.2 ระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข	22
3.3 ขั้นตอนการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล	22
3.4 คุณสมบัติของวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล	24
3.5 รูปแบบการจัดวางกริด	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.6 แบบแผนการคำนวณเชิงตัวเลข	27
3.7 การดิสเครทไทต์สมการบังคับ	31
3.8 การดิสเครทไทต์สมการอนุพันธ์มวล	31
3.9 การดิสเครทไทต์สมการอนุพันธ์พลังงาน	32
3.10 การดิสเครทไทต์สมการนาเวียร์ – สโตกส์	36
บทที่ 4 วิธีการทดลอง	43
4.1 บทนำ	43
4.2 การสร้างแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนของท่อกลมที่ติดครีบริบรูปตัววี	45
4.3 การใช้โปรแกรม Fluent ในการคำนวณ	46
บทที่ 5 ผลการทดลอง	55
5.1 บทนำ	55
5.2 กรณีท่อกลมผิวเรียบ	55
5.3 ท่อกลมมีครีบริบรูปตัววีที่มีการเปลี่ยนแปลงความสูงของครีบริบและลักษณะการวางตัวของครีบริบ โดยมุมปะทะของครีบริบมีค่าคงที่เท่ากับ 30°	57
5.4 ท่อกลมมีครีบริบรูปตัววีที่มีการเปลี่ยนแปลงความสูงของครีบริบและลักษณะการวางตัวของครีบริบ โดยมุมปะทะของครีบริบมีค่าคงที่เท่ากับ 45°	61
5.5 ท่อกลมมีครีบริบรูปตัววีที่มีการเปลี่ยนแปลงความสูงของครีบริบและลักษณะการวางตัวของครีบริบ โดยมุมปะทะของครีบริบมีค่าคงที่เท่ากับ 60°	66
5.6 การเปรียบเทียบลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลของพารามิเตอร์	70
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	77
6.1 สรุปผลการวิจัย	77
6.2 ข้อเสนอแนะ	78
บรรณานุกรม	79
ภาคผนวก บทความประกอบการนำเสนอโครงการ	81
ประวัติผู้จัดทำ	89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุต่างๆ (ที่300K)	17
4.1 แสดงลักษณะต่างๆของท่อกลมที่ใช้ในการทดลอง	44
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ส์กับอัตราการไหลของมวล	51



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 ปริมาตรควบคุมดิฟเฟอเรนเชียล (dx, dy, dz) ในบาวนด์คาร์ทีเซียน ความเร็ว 3 มิติ	5
รูปที่ 2.2 ความเค้นตึงฉากและความเค้นเฉือนของปริมาตรควบคุมดิฟเฟอเรนเชียล 3 มิติ	7
รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะการไหลแบบบริเวณทางเข้า, กำลังพัฒนา และพัฒนาเต็มที่	13
รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะการไหลแบบทรานซิชั่น	13
รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะการไหลแบบเทอร์บูเลนต์	14
รูปที่ 2.6 ตัวประกอบเสียดทานสำหรับการไหลที่ปรับตัวเต็มที่แล้วในท่อกลม	15
รูปที่ 3.1 แสดงความเชื่อมโยงของกระบวนการคิสรทโทต์และผลเฉลยประมาณค่า	23
รูปที่ 3.2 แสดงแนวคิดของความแน่นอนและความแม่นยำ	26
รูปที่ 3.3 แสดงรูปแบบการจัดวางกริดในแกน 2 มิติ และ 3 มิติ	26
รูปที่ 3.4 ส่วนแรเงาแสดงตำแหน่งของปริมาตรควบคุมแบบ 2 มิติ	27
รูปที่ 3.5 รูปแบบแนวคิดของแบบแผนวิธีผลต่างครอคราติคในปริมาตรควบคุม แบบ 1 มิติ	30
รูปที่ 3.6 การกระจายตัวของความดันกระเพื่อม หรือปัญหากระดานหมากรุก	37
รูปที่ 3.7 แสดงการจัดเรียงกริดแบบหีบซ้อนใน 2 มิติ	38
รูปที่ 3.8 แสดงเวกเตอร์ความเร็วเมื่อพิจารณาเยล	40
รูปที่ 3.9 แสดงเวกเตอร์ความเร็วเมื่อพิจารณาวีเซล	41
รูปที่ 4.1 แบบจำลองที่ใช้ในการทดลอง	43
รูปที่ 4.2 แสดงการสร้างแบบจำลองใน โปรแกรม Gambit	45
รูปที่ 4.3 การเลือก Version ในการทำงาน	46
รูปที่ 4.4 การปรับ Scale grid	47
รูปที่ 4.5 การตั้งค่า Solver	47
รูปที่ 4.6 ให้มีการคำนวณสมการพลังงาน	47
รูปที่ 4.7 การตั้งค่า Viscous Model	48
รูปที่ 4.8 แสดงการตั้งค่าคุณสมบัติของการไหล	48
รูปที่ 4.9 การกำหนดค่า Operating Conditions	49
รูปที่ 4.10 การปรับค่าคุณสมบัติของผนัง	50
รูปที่ 4.11 การปรับค่าคุณสมบัติของครีบ	50
รูปที่ 4.12 แสดงการปรับค่า Periodic Conditions	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.13 แสดงการกำหนดค่า Solution Controls	52
รูปที่ 4.14 แสดงการปรับค่า Residual Monitors	53
รูปที่ 4.15 การเดาค่าเริ่มต้น	53
รูปที่ 4.16 แสดงหน้าต่างที่เริ่มการคำนวณ	54
รูปที่ 4.17 แสดงการรายงานผล	54
รูปที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ Nu ของท่อกลมผิวเรียบ	56
รูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ f ของท่อกลมผิวเรียบ	56
รูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ Nu_r กรณีครีบริบมีมุมปะทะ 30°	59
รูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ Nu_r/Nu_0 กรณีครีบริบมีมุมปะทะ 30°	59
รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ f_r กรณีครีบริบมีมุมปะทะ 30°	60
รูปที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ f_r/f_0 กรณีครีบริบมีมุมปะทะ 30°	60
รูปที่ 5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ enhancement efficiency กรณีครีบริบมีมุมปะทะ 30°	61
รูปที่ 5.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ Nu_r กรณีครีบริบมีมุมปะทะ 45°	63
รูปที่ 5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ Nu_r/Nu_0 กรณีครีบริบมีมุมปะทะ 45°	64
รูปที่ 5.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ f_r กรณีครีบริบมีมุมปะทะ 45°	64
รูปที่ 5.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ f_r/f_0 กรณีครีบริบมีมุมปะทะ 45°	65
รูปที่ 5.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ enhancement efficiency กรณีครีบริบมีมุมปะทะ 45°	65
รูปที่ 5.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ Nu_r กรณีครีบริบมีมุมปะทะ 60°	68
รูปที่ 5.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ Nu_r/Nu_0 กรณีครีบริบมีมุมปะทะ 60°	68
รูปที่ 5.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ f_r กรณีครีบริบมีมุมปะทะ 60°	69
รูปที่ 5.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ f_r/f_0 กรณีครีบริบมีมุมปะทะ 60°	69
รูปที่ 5.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ enhancement efficiency กรณีครีบริบมีมุมปะทะ 60°	70
รูปที่ 5.18 แสดงการเปรียบเทียบเส้นทางของอนุภาคของของไหลกรณี มุมปะทะ = 30° , ความสูง = 20%	72

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 5.19 แสดงการเปรียบเทียบเส้นทางของอนุภาคของของไหลกรณี มุมปะทะ = 30° , ครีบกุ่มวางเอียงกัน	73
รูปที่ 5.20 แสดงการเปรียบเทียบเส้นทางของอนุภาคของของไหลกรณี ความสูง = 20%, ครีบกุ่มวางเอียงกัน	74
รูปที่ 5.21 (a) แสดงเลขนัยสเกลาร์ของผิวท่อกลม	75
รูปที่ 5.21 (b) แสดงการกระจายตัวของความดันที่ผิวท่อกลม	75
รูปที่ 5.21 (c) การกระจายตัวของความดันภายในท่อกลม	76



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและความเป็นมา

ในปัจจุบันการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้มีการพัฒนาเพื่อต้องการลดขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและต้นทุนในการผลิต ในขณะที่อัตราการถ่ายเทความร้อนยังสูงอยู่ซึ่งตัวแปรสำคัญในการลดขนาดและค่าใช้จ่ายของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนคือการเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนให้สูงขึ้นในขณะที่สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าลดลง วิธีการเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยวิธีทำให้เกิดผิวขรุขระเช่นการติดครีบบนท่อ เพื่อให้เกิดการไหลแบบหมุนวน

การสร้างและติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทดสอบความสามารถในการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมที่มีการติดตั้งครีบบนผิวภายในท่อ เราต้องเสียค่าใช้จ่ายสำหรับอุปกรณ์สูง เสียเวลาและแรงงานเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวเราจึงใช้โปรแกรมทางด้านซีเอฟดี (CFD) ที่สามารถวิเคราะห์แรงและพลังงานของของไหลที่ไหลผ่านสิ่งต่างๆ ได้มาช่วยในการจำลองการไหลของของไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งครีบบนผิวภายใน เพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานที่เกิดขึ้นกับของไหล

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

สำหรับโครงการนี้เราจะทำการศึกษาพฤติกรรมการแลกเปลี่ยนความร้อนของท่อกลม ที่มีครีบบนผิวภายใน

1. เพื่อศึกษาการใช้โปรแกรมแกมบิท (Gambit) ในการวาดรูปท่อกลมผิวเรียบ และท่อกลมที่มีการติดตั้งครีบบนผิวภายในท่อกลม ที่เราจะใช้ในการจำลองการไหลผ่านของอากาศ
2. เพื่อศึกษาการใช้โปรแกรมฟลูเอนท์ (Fluent) จำลองการไหลของของไหลผ่านท่อกลมที่มีครีบบนผิวติดอยู่ภายใน
3. ศึกษารูปแบบครีบบ ความสูงครีบบ และมุมปะทะของครีบบนผิว ที่ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนดีที่สุด
4. ศึกษาค่าของเลขเรย์โนลด์ส์ (Reynolds Number) ของของไหลที่ทางเข้า ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน
5. ศึกษาผลกระทบของการเพิ่มขึ้นของความเสียดทานเมื่อติดตั้งครีบบนผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของโครงการงาน

ขอบเขตของโครงการงานนี้ เราใช้โปรแกรมแกมบิท (Gambit) ในการวาดรูปท่อกลมผิวเรียบ และท่อกลมที่มีการติดครีบบรูปตัววีอยู่ภายในท่อกลม ที่เราจะใช้ในการจำลองการไหลผ่านของอากาศ และใช้โปรแกรมฟลูเอนท์ (Fluent) ประมวลผลแบบสามมิติอย่างละเอียด ในโครงการงานนี้เราได้สร้างแบบจำลองการไหลภายในท่อกลมที่มีครีบบรูปตัววีติดอยู่ภายใน การจำลองการไหลของไหลผ่านท่อกลม เราจะกำหนดให้ผนังท่อกลมมีอุณหภูมิที่ผิวคงที่และไม่มีการเคลื่อนที่ของไหลที่ไหลเข้าคืออากาศ อีกทั้งเราได้ควบคุมเลขเรย์โนลด์ส์ (Reynolds Number) ของของไหลที่บริเวณทางเข้า และอัตราการเปลี่ยนแปลงความดันตามทิศทางการไหลของของไหลเท่ากับศูนย์ตัวแปรที่เราปรับค่าได้แก่ การวาง ความสูง และมุมของครีบบรูปตัววี

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการงาน

1. สามารถนำโปรแกรมฟลูเอนท์ (Fluent) มาประยุกต์ใช้กับปัญหาการถ่ายเทความร้อนของของไหล ที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดครีบบภายในได้
2. สามารถบอกถึงความสัมพันธ์ของการวางครีบบกับอัตราการถ่ายเทความร้อน และความเสียดทานได้
3. สามารถบอกถึงความสัมพันธ์ของความสูงครีบบกับอัตราการถ่ายเทความร้อน และความเสียดทานได้
4. สามารถบอกถึงความสัมพันธ์ของมุมปะทะของครีบบกับอัตราการถ่ายเทความร้อน และความเสียดทานได้
5. สามารถบอกถึงความสัมพันธ์ของเลขเรย์โนลด์ส์ของความเร็วขาเข้ากับอัตราการถ่ายเทความร้อน และความเสียดทานได้

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 บทนำ

ในทางเทอร์โมไดนามิกส์ มโนทัศน์ของพลังงานนั้นได้ใช้ระบุสถานะของระบบ โดยเป็นที่ทราบกันดีว่าพลังงานนั้นไม่สามารถที่จะสร้างใหม่หรือทำลายได้ เพียงแต่มีความสามารถเปลี่ยนจากรูปหนึ่งไปเป็นอีกรูปหนึ่งได้ ความรู้ทางเทอร์โมไดนามิกส์เกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนและรูปแบบอื่นๆของพลังงาน แต่ทว่าความรู้เกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์หาอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในระบบ การถ่ายเทพลังงานในแง่ของความร้อนนั้นไม่สามารถที่จะวัดโดยตรงได้ แต่สามารถพิจารณาได้จากวิธีทางฟิสิกส์เพราะว่าความร้อนเกี่ยวข้องกับอุณหภูมิ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่วัดได้ โดยการสังเกตยังพบว่าเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิเกิดขึ้นในระบบแล้วจะมีการไหลของความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า เนื่องจากการไหลของความร้อนเกิดขึ้นได้เมื่อไรก็ตามที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิในระบบ ดังนั้นความรู้เกี่ยวกับการกระจายของอุณหภูมิในระบบจึงจำเป็นมากในการศึกษาการถ่ายเทความร้อน และถ้าทราบการกระจายของอุณหภูมิแล้ว เราสามารถหาฟลักซ์ความร้อน (Heat flux) ซึ่งเป็นค่าของปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ต่อหนึ่งหน่วยเวลาได้จากกฎหรือสมการซึ่งเกี่ยวข้องระหว่างฟลักซ์ความร้อนกับเกรเดียนต์อุณหภูมิ

ปัญหาในการหาค่าการกระจายของอุณหภูมิ และการไหลของความร้อนเป็นสิ่งที่น่าสนใจในสาขาต่างๆ ทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ ในงานออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เช่น หม้อน้ำ (boilers) คอนเดนเซอร์ (condensers) หม้อน้ำรถยนต์ (radiators) และอื่นๆ การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนเป็นสิ่งสำคัญสำหรับกำหนดขนาดของอุปกรณ์นั้น ในงานออกแบบแกนเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (nuclear reactor cores) การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนของสารเชื้อเพลิงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับหาขนาดที่ถูกต้องของสารเชื้อเพลิงเพื่อป้องกันการระเบิด ในด้านเทคโนโลยีการบินปัญหาการกระจายของอุณหภูมิ และการถ่ายเทความร้อนเป็นสิ่งที่จะต้องพิจารณาเพื่อจำกัดน้ำหนัก และให้ความปลอดภัย ในด้านการประยุกต์การทำความร้อนและการทำความเย็นสำหรับอาคารต่างๆ นั้น การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนที่ถูกต้องมีผลมากต่อการประเมินบริเวณฉนวนที่จำเป็น เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน หรือ ลดปริมาณความร้อนที่ได้รับมากเกินไป

ในการศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน สามารถแยกพิจารณาออกได้อย่างเด่นชัดเป็น 3 แบบ คือ การนำ การพา และการแผ่รังสี อันที่จริงแล้วการกระจายของอุณหภูมิในตัวกลางหนึ่งจะถูกควบคุมโดยอิทธิพลรวมของการถ่ายเทความร้อนทั้งสามแบบตามที่กล่าวเพราะฉะนั้นตามความเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จริงแล้ว จึงไม่สามารถแยกแบบหนึ่งแบบใดได้อย่างสิ้นเชิงจากแบบอื่นๆ ที่เหลือได้ อย่างไรก็ตามเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ เราจะแยกพิจารณาเป็นแบบใดแบบหนึ่งได้เช่น พิจารณาเฉพาะการพาความร้อนอย่างเดียว ถ้าเมื่อไหร่ก็ตามอิทธิพลของการนำและการแผ่รังสีมีผลต่อการวิเคราะห์น้อยมาก ดังนั้น เราจึงสามารถแยกพิจารณาในแต่ละแบบของการถ่ายเทความร้อนได้เพียงลำพัง ตามสมมุติฐานดังกล่าว

2.2 สมการความต่อเนื่องในปัญหา 3 มิติ

กฎอนุรักษ์อย่างหนึ่งของของไหลซึ่งเกี่ยวข้องกับบาวนด์คาร์เลเยอร์ความเร็วคือ สสารย่อมไม่อาจสร้างขึ้นใหม่หรือไม่สามารถทำลายได้ ซึ่งคำกล่าวนี้สามารถใช้ได้กับปริมาตรควบคุมดิฟเฟอเรนเชียลตามรูปที่ 2.1 เราจะได้กฎที่กล่าวว่า “อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในชิ้นส่วนของไหล = อัตราการไหลสุทธิของมวลที่เข้าไปในชิ้นส่วนของไหล”

อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในชิ้นส่วนย่อยของของไหล คือ

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho dx dy dz) = \frac{\partial \rho}{\partial t} dx dy dz \quad (2.1)$$

ต่อไปเราจำเป็นต้องหาอัตราการไหลโดยมวลผ่านพื้นผิวและชิ้นส่วนย่อยซึ่งถูกให้โดยผลคูณของความหนาแน่น พื้นที่และความเร็วในทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวนั้น จากรูปที่ 2.1 จะพบว่าอัตราการไหลสุทธิของมวลเข้าสู่ชิ้นส่วนย่อยผ่านพื้นผิวสามารถเขียนได้ ดังนี้

การไหลสุทธิตามแนวแกน x

$$\left(\rho u - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{dx}{2} \right) dy dz - \left(\rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{dx}{2} \right) dy dz \quad (2.2a)$$

การไหลสุทธิตามแนวแกน y

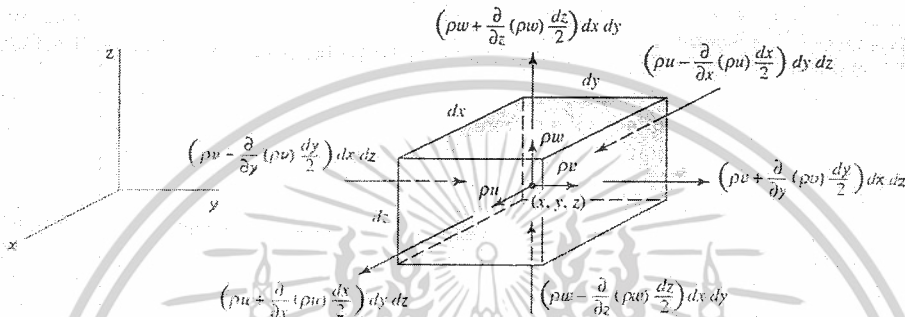
$$\left(\rho v - \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{dy}{2} \right) dx dz - \left(\rho v + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{dy}{2} \right) dx dz \quad (2.2b)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การไหลสุทธิตามแนวแกน z

$$\left(\rho w - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{dz}{2} \right) dx dy - \left(\rho w + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{dz}{2} \right) dx dy \quad (2.2c)$$

โดยการไหลเข้าสู่ชิ้นส่วนที่ทำให้มวลของชิ้นส่วนย่อยเพิ่มขึ้นถูกกำหนดให้เป็นบวก และมีค่าเป็นลบเมื่อมีการไหลออกจากชิ้นส่วนย่อย



รูปที่ 2.1 ปริมาตรควบคุมดิฟเฟอเรนเชียล (dx, dy, dz) ในบาวนด์คาร์ทีเซียนความเร็ว 3 มิติ

เมื่อรวมสมการ (2.1), (2.2a) และ (2.2b) เข้าด้วยกันตามกฎ "อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลภายในชิ้นส่วนย่อยนั้น เท่ากับ อัตราของมวลสุทธิจากการไหลออกผ่านพื้นผิวของชิ้นส่วนย่อย" แล้วเรียงเทอมทั้งหมดไว้ทางซ้ายมือ และหารด้วยปริมาตรของชิ้นส่วนย่อย dx, dy, dz ซึ่งจะได้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2.3)$$

หรือในรูปแบบของเวกเตอร์

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (2.4)$$

สมการ (2.4) นี้ คือสมการอนุรักษ์มวล หรือสมการความต่อเนื่อง 3 มิติ แบบการไหลไม่คงตัวและอัดตัวได้ เทอมแรกทางซ้ายมือคืออัตราการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น (มวลต่อปริมาตร) ต่อเวลา เทอมที่สองอธิบายถึงการไหลสุทธิของมวลข้ามผ่านขอบเขตของปริมาตรเล็ก ๆ นั้น มันจะถูกเรียกเป็นเทอมของการพา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับของไหลที่อัดตัวไม่ได้ ความหนาแน่นมีค่าคงที่ และสมการที่ (2.4) จะกลายเป็น

$$\text{div}(\mathbf{u}) = 0 \quad (2.5)$$

หรือในรูปแบบเต็ม

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.6)$$

จากสมการที่ (2.6) เราสามารถสรุปเป็นกฎที่ว่า “สำหรับการไหลสม่ำเสมอแล้ว อัตราสุทธิของสสารที่เข้าไปในปริมาตรควบคุม (มวลที่ไหลเข้าลบกับมวลที่ไหลออก) ต้องเท่ากับศูนย์”

2.3 สมการโมเมนตัมในปัญหา 3 มิติ

จากกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตัน สำหรับปริมาตรควบคุมดิฟเฟอเรนเชียลในบาวนด์รีเลเยอร์ของความเร็ว ทำให้เราได้กฎของของไหลที่กล่าวว่า “ผลรวมของแรงทั้งหมดที่กระทำต่อปริมาตรควบคุมต้องเท่ากับอัตราสุทธิของโมเมนตัมที่ออกจากปริมาตรควบคุม (โมเมนตัมที่ไหลออกไปลบกับโมเมนตัมที่ไหลเข้ามา)”

$\begin{aligned} \text{อัตราการเพิ่ม โมเมนตัม} &= \text{ผลรวมแรงที่กระทำ} \\ \text{ของอนุภาคของไหล} &\quad \text{ต่ออนุภาคของไหล} \end{aligned} \quad (2.7)$
--

อัตราการเพิ่มโมเมนตัมต่อหน่วยปริมาตรของอนุภาคของไหลในทิศ x , y และ z กำหนดได้โดย

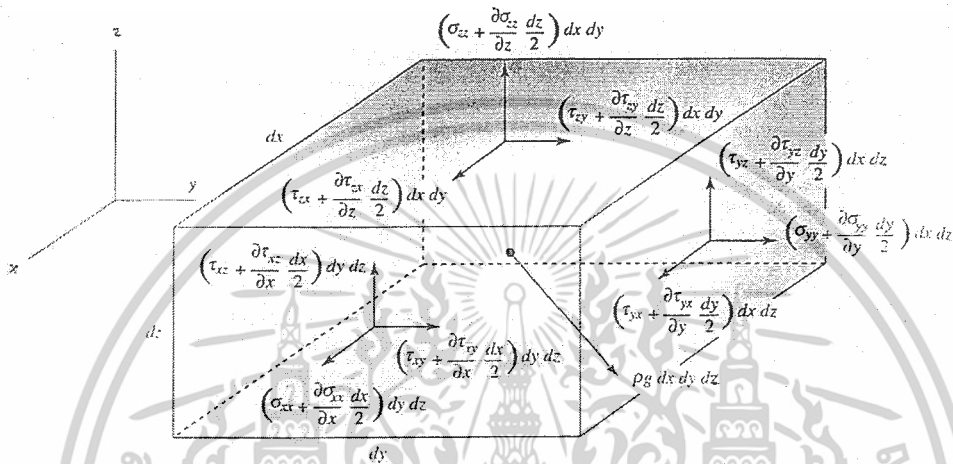
$$\rho \frac{Du}{Dt} \quad \rho \frac{Dv}{Dt} \quad \rho \frac{Dw}{Dt} \quad (2.8)$$

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

$$\frac{D\phi}{Dt} = \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial \phi}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial \phi}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial t} \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงที่กระทำต่ออนุภาคของไหลในบาวนด์รีเลเยอร์มี 2 ชนิด คือ แรงจากมวลของไหล (Body Force) ที่เป็นผลจากอิทธิพลของสนามความโน้มถ่วง สนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก เป็นต้น กระทำต่อมวลของของไหล และแรงที่ผิว (Surface force) ที่เป็นผลจากความเค้นที่กระทำบนผิวของปริมาตรควบคุมที่จุดใดๆ ในบาวนด์รีเลเยอร์ ความเค้นชนิดสามารถแยกได้ 2 องค์ประกอบที่ต่างจากกันซึ่งก็คือ ความเค้นจาก σ_{ij} และความเค้นเฉือน τ_{ij} แรงที่ผิวตามรูปที่ 2.2 จะคิดว่ากระทำต่อของไหลภายในปริมาตรควบคุม และยังเกิดการกระทำซึ่งกันและกันกับของไหลรอบๆ



รูปที่ 2.2 ความเค้นตั้งฉากและความเค้นเฉือนของปริมาตรควบคุมดิฟเฟอเรนเชียล 3 มิติ

แต่ความเค้นเหล่านี้สามารถเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องได้ในแต่ละทิศทางของพิกัด โดยใช้การกระจายอนุกรมเทย์เลอร์สำหรับความเค้นเหล่านี้ เราจะได้แรงที่ผิวสุทธิในแต่ละทิศทางของพิกัดดังนี้

$$\text{ทิศทางแกน } x \quad F_{s,x} = \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) dx dy dz \quad (2.10a)$$

$$\text{ทิศทางแกน } y \quad F_{s,y} = \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} - \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) dx dy dz \quad (2.10b)$$

$$\text{ทิศทางแกน } z \quad F_{s,z} = \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} - \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \right) dx dy dz \quad (2.10c)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำสมการ(2.8) และ (2.10) แทนลงในสมการ (2.7) จะได้

$$\text{ทิศทางการแกน } x \quad \rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} (\sigma_{xx} - P) + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + F_x \quad (2.11a)$$

$$\text{ทิศทางการแกน } y \quad \rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial y} (\sigma_{yy} - P) + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + F_y \quad (2.11b)$$

$$\text{ทิศทางการแกน } z \quad \rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial z} (\sigma_{zz} - P) + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + F_z \quad (2.11c)$$

โดยที่ F_x คือ แรงทั้งหมดเนื่องจากมวลของไหล (Body force in-x direction) ในทิศทาง x ต่อหน่วยปริมาตร

F_y คือ แรงทั้งหมดเนื่องจากมวลของไหล (Body force in-y direction) ในทิศทาง y ต่อหน่วยปริมาตร

F_z คือ แรงทั้งหมดเนื่องจากมวลของไหล (Body force in-z direction) ในทิศทาง z ต่อหน่วยปริมาตร

P คือ แรงดันที่กระทำต่ออนุภาคของของไหล

สำหรับการไหลสามมิติ คุณสมบัติต่างๆคงที่ ของไหลอัดตัวไม่ได้ ค่าความเค้นต่างๆจะเกี่ยวข้องกับความเร็วดังนี้

$$\sigma_{xx} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.12)$$

$$\sigma_{yy} = 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad (2.13)$$

$$\sigma_{zz} = 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \quad (2.14)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (2.15)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (2.16)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแทนค่าความเค้นต่างๆลงในสมการที่ (2.11a), (2.11b) และ (2.11c) จะได้

$$\text{ทิศทางการแกน } x \quad \rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = F_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2.18a)$$

$$\text{ทิศทางการแกน } y \quad \rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = F_y - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (2.18b)$$

$$\text{ทิศทางการแกน } z \quad \rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = F_z - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (2.18c)$$

จากสมการข้างต้นเราสามารถอธิบายได้ดังนี้ เทอมทางซ้ายมือแทนแรงเนื่องจากความเฉื่อย (Inertial force) เทอมแรกทางขวามือแทนแรงจากมวลของไหล (body force) เทอมที่สองแทนแรงจากความดัน (pressure force) และเทอมสุดท้ายในวงเล็บแทนแรงเนื่องจากความหนืด (viscous forces) ที่กระทำต่อของไหล

2.4 สมการพลังงานในปัญหา 3 มิติ

สมการพลังงานหาได้โดยการเขียนสมดุลพลังงานตามกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ สำหรับปริมาตรควบคุมดิฟเฟอเรนเชียลในสนามการไหล ที่กล่าวไว้ว่า “อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานของอนุภาคของไหลเท่ากับอัตราการเพิ่มความต้านทานแก่อนุภาคบวก กับอัตราการทำงานของอนุภาคของไหล” ถ้าเราไม่คิดพลังงานจากการแผ่รังสี และไม่มีแหล่งผลิตพลังงานในการไหลแล้ว สมดุลพลังงานในปริมาตรควบคุมดิฟเฟอเรนเชียล $dx dy dz$ อาจกล่าวได้ว่า

อัตราพลังงานที่เข้า โดยการนำ + อัตราพลังงานที่เข้า โดยแรงจากน้ำหนัก + อัตราพลังงานที่เข้า โดยความเค้นผิว = อัตราพลังงานที่เพิ่มขึ้น

โดยเทอมแรกคือ พลังงานที่เพิ่มแก่ปริมาตรควบคุม โดยการนำที่เกิดขึ้นในทิศทาง x และ y นั่นคือ

$$\text{อัตราพลังงานที่เพิ่มขึ้น โดยการนำ} = - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) dx dy dz \quad (2.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) dx dy dz \quad (2.20)$$

เทอมที่สอง ถ้าให้ F_x , F_y และ F_z เป็น Body force ที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร และให้ u , v และ w เป็นความเร็วในทิศทาง x , y และ z ตามลำดับแล้ว พลังงานที่เข้าไปในปริมาตรควบคุม $dx dy dz$ เป็นผลมาจากการเพิ่มพลังงานศักย์ ดังนี้

$$\text{อัตราพลังงานที่เพิ่มขึ้น โดย Body force} = (uF_x + vF_y + wF_z) dx dy dz \quad (2.21)$$

เทอมที่สาม อัตราพลังงานที่เพิ่มโดยความเค้นที่ผิว ซึ่งประกอบด้วยความเค้น σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} , τ_{yx} , τ_{xy} , τ_{zx} , τ_{xz} , τ_{yz} และ τ_{zy} คือ

$$\text{แกน } x \quad \left\{ \frac{\partial}{\partial x} [u(\sigma_{xx} - P)] + \frac{\partial}{\partial y} (u\tau_{yx}) + \frac{\partial}{\partial z} (u\tau_{zx}) \right\} dx dy dz \quad (2.22a)$$

$$\text{แกน } y \quad \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (v\tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} [v(\sigma_{yy} - P)] + \frac{\partial}{\partial z} (v\tau_{zy}) \right\} dx dy dz \quad (2.22b)$$

$$\text{แกน } z \quad \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (w\tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y} (w\tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} [w(\sigma_{zz} - P)] \right\} dx dy dz \quad (2.22c)$$

เทอมที่สี่ พลังงานที่บรรจุในปริมาตรควบคุม ซึ่งพิจารณาได้ว่าประกอบด้วย พลังงานภายในจำเพาะ (e) และพลังงานจลน์ต่อหนึ่งหน่วยมวล $\left[\frac{u^2 + v^2 + w^2}{2} \right]$ เท่านั้น (ไม่คิดพลังงานศักย์)

$$\text{อัตราพลังงานเพิ่มของปริมาตรควบคุม} = \rho \left[\frac{De}{Dt} + \frac{1}{2} \frac{D}{Dt} (u^2 + v^2 + w^2) \right] dx dy dz \quad (2.23)$$

โดยที่ $\frac{D}{Dt}$ (Total derivative) สำหรับการไหลเป็นแบบสม่ำเสมอสามมิติในที่นี้กำหนดเป็น

$$\frac{D}{Dt} = u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z} \quad (2.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยแทนสมการต่างๆในสมการสมดุลพลังงาน ผลลัพธ์ที่ได้ทำให้กะทัดรัดโดยแทนด้วยสมการโมเมนต์ และค่าความเค้นต่างๆ แล้วจะได้สมการพลังงานในระบบพิกัดฉากสำหรับการไหลสม่ำเสมอสามมิติ อัดตัวไม่ได้ คุณสมบัติต่างๆคงที่ ของของไหลนิวโตเนียนเป็น

$$\rho C_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \mu \Phi \quad (2.25)$$

โดยที่ Φ คือ ฟังก์ชันการสูญเสียพลังงานเนื่องจากความเสียดทานหนืดแสดงได้ดังนี้

$$\Phi = 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \quad (2.26)$$

เทอมต่างๆในสมการ(2.25) โดยเทอมซ้ายมือ แทนอัตราการถ่ายเทพลังงานโดยการถ่ายเทมวล ส่วนขวามือเทอมแรกในวงเล็บแทนการถ่ายเทความร้อน โดยการนำ และเทอมสุดท้ายเป็นการสูญเสียพลังงานจากความหนืดในของไหล เนื่องจากความเสียดทานของของไหลภายใน

2.5 ลักษณะพื้นฐานของการไหลภายในท่อ

พื้นฐานของการไหลของของไหลภายในท่อสามารถจำแนกได้โดยใช้เลขเรย์โนลด์ส์ ซึ่งเป็นอัตราส่วนของแรงเฉื่อย (Inertia force) ต่อความหนืด (Viscous force) โดยมีนิยามดังนี้

$$Re \equiv \frac{\rho u_m D}{\mu} \quad (2.27)$$

เมื่อ	Re	คือ	Reynolds number
	ρ	คือ	ความหนาแน่นของของไหล , kg / m^3
	u_m	คือ	ความเร็วเฉลี่ยของของไหล , m / s
	D	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อกลม , m
	μ	คือ	ความหนืดสัมบูรณ์ของของไหล

ลักษณะของการไหลภายใน (Internal flow) มี 3 ชนิด ได้แก่

2.5.1 การไหลแบบลามินาร์ (Laminar)

การไหลของของไหลในกรณีที่เลขเรย์โนลด์ส์มีค่าน้อยกว่า 2100 มีลักษณะที่ราบเรียบและไหลแยกชั้นกัน แบ่งได้เป็น 2 กรณีคือ

(1) การไหลแบบพัฒนาเต็มที่ (Fully Developed Flow)

เกิดขึ้นเมื่อของไหลไหลผ่านท่อที่มีความยาวมากเกินพอลักษณะที่สำคัญคือความเร็วของแต่ละชั้นของไหลมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตำแหน่งตามแนวแกนของท่อ ช่วงบริเวณทางเข้าสำหรับการไหลแบบพัฒนาเต็มที่ หาได้จากสมการ

$$\left(\frac{X_{fd,h}}{D} \right) \approx 0.05 \text{ Re} \quad (2.28)$$

เมื่อ $X_{fd,h}$ คือ ความยาวของท่อช่วงบริเวณทางเข้าสำหรับการไหลแบบพัฒนาเต็มที่, m
 Re คือ Reynolds number
 D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ, m

ความยาวของท่อช่วงบริเวณทางเข้าสำหรับสภาวะที่ปรับตัวเต็มที่แล้วของความร้อนสำหรับการไหลแบบลามินาร์ ได้จากสมการ

$$\left(\frac{X_{fd,t}}{D} \right) \approx 0.05 \text{ Re Pr} \quad (2.29)$$

เลขพลาด์น (Prandtl Number) ซึ่งเป็นกลุ่มตัวแปรไร้มิติ ได้จากนิยาม

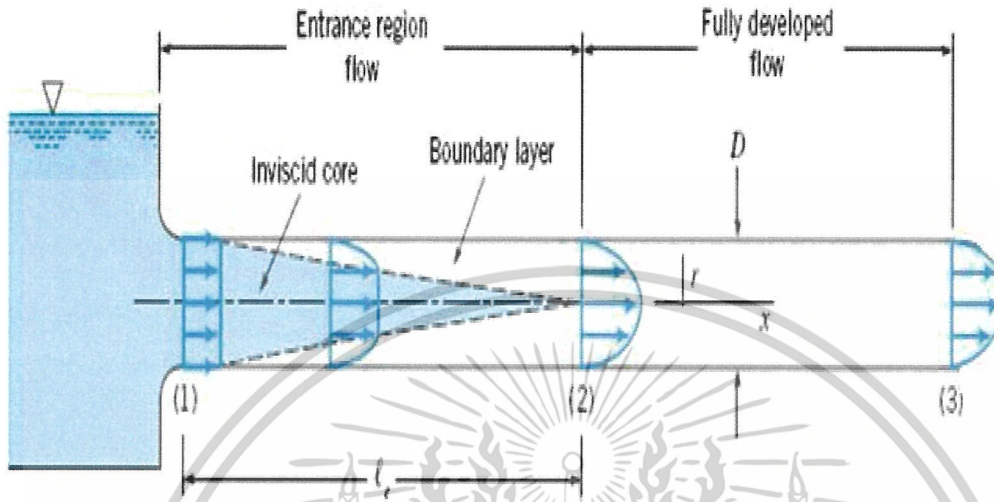
$$\text{Pr} = \frac{C_p \mu}{k} \quad (2.30)$$

เมื่อ Pr คือ เลขพลาด์น
 C_p คือ ค่าความร้อนจำเพาะแบบความดันคงที่, $\text{kJ} / \text{kg}^\circ\text{K}$
 μ คือ ความหนืดสัมบูรณ์ของของไหล, $\text{N}\cdot\text{s} / \text{m}^2$
 k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน, $\text{W} / \text{m}^\circ\text{K}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2) การไหลบริเวณทางเข้า (Entrance Region)

เกิดขึ้นที่บริเวณจุดที่ใกล้เคียงทางเข้าของท่อ รูปแบบความเร็วของชั้นของไหลยังไม่คงที่แต่จะค่อยๆพัฒนาจนคงที่ต่อไป



รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะการไหลแบบบริเวณทางเข้า, กำลังพัฒนา และพัฒนาเต็มที่

2.5.2 การไหลแบบทรานซิชัน (Transition)

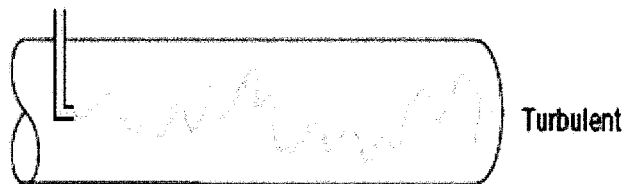
คือการไหลที่อยู่ในช่วงการเปลี่ยนแปลงจากการไหลแบบลามินาร์ไปยังการไหลแบบเทอร์บูเลนต์ โดยมีลักษณะการไหลที่ผสมผสานกันทั้ง 2 รูปแบบ มีค่าเลขเรย์โนลด์อยู่ระหว่าง 2100 ถึง 4200



รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะการไหลแบบทรานซิชัน

2.5.3 การไหลแบบเทอร์บูเลนต์ (Turbulent Flow)

เป็นการไหลแบบไม่เป็นระเบียบเกิดการผสมกันของกระแสสูง มีค่าเลขเรย์โนลด์ส์มากกว่า 4000 และความเร็วที่เปลี่ยนแปลงได้ทุกแกนอ้างอิงความยาวของท่อ



รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะการไหลแบบเทอร์บูเลนต์

2.6 การสูญเสียความดันภายในท่อ

การไหลภายในท่อของของไหล สามารถเป็นไปได้ทั้งการไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน ในกรณีการไหลในท่อที่มีของไหลไหลเต็มท่อ ค่าความดันลดลงหรือพลังงานที่สูญเสียไปกับความเสียดทานเนื่องจากการไหลภายในท่อสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

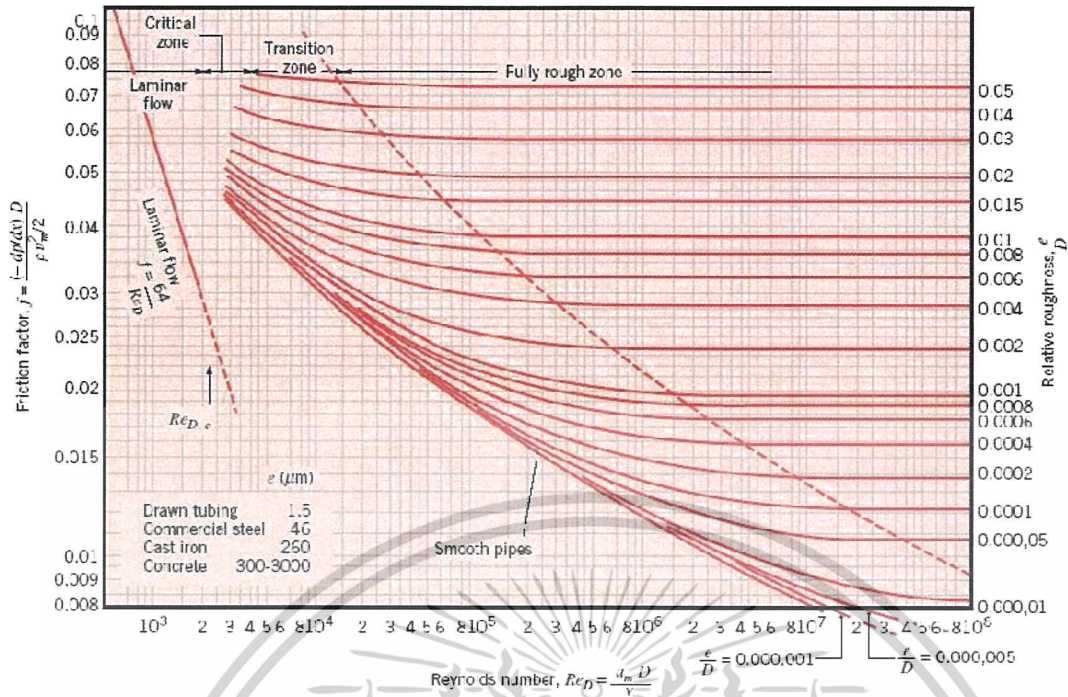
2.6.1 กรณีการไหลภายในท่อกลมที่มีลักษณะการไหลเป็นแบบราบเรียบ ค่าตัวประกอบเสียดทาน (Friction factor) สามารถหาได้จาก

$$f = \frac{64}{\text{Re}} \quad (2.31)$$

2.6.2 กรณีการไหลแบบปั่นป่วน การวิเคราะห์จะยุ่งยากมากกว่า โดยอาจพิจารณาความสัมพันธ์ได้จากไดอะแกรม Moody โดยพิจารณาจากค่าตัวเลขเรย์โนลด์ส์และสัมประสิทธิ์ความขรุขระภายในท่อ หรืออาจใช้สมการในการวิเคราะห์ ซึ่งค่าดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับขนาดของท่อ ความยาวของท่อ และความเร็วในการไหลภายในท่อของของไหล ซึ่งสามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$\Delta P = \frac{fLv^2}{2D} \quad (2.32)$$

เมื่อ	ΔP	คือ	ค่าความดันลด, Pa
	f	คือ	ค่าตัวประกอบเสียดทาน
	L	คือ	ความยาวของท่อ, m .
	v	คือ	ความเร็วเฉลี่ยของของไหลภายในท่อ



รูปที่ 2.6 ตัวประกอบเสียดทานสำหรับการไหลที่ปรับตัวเต็มที่แล้วในท่อกลม

2.7 ประเภทของการถ่ายเทความร้อน

2.7.1 การนำความร้อน (Conduction Heat Transfer)

การนำความร้อนเป็นรูปแบบหนึ่งของการถ่ายเทความร้อน เกิดจากการส่งผ่านพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในตัวกลาง อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลางจากด้านที่มีอุณหภูมิสูงไปยังด้านที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยการส่งความร้อนจากโมเลกุลหนึ่งสู่มอเลกุลหนึ่งอย่างต่อเนื่องกัน โดยที่โมเลกุลดังกล่าวจะมีการเคลื่อนที่ การนำความร้อนสามารถนำความร้อนได้ดีมากในตัวกลางที่เป็นของแข็ง และสามารถเกิดขึ้นได้บ้างในตัวกลางที่เป็นของเหลว และก๊าซ และความร้อนที่เคลื่อนที่โดยการนำความร้อนเกิดขึ้นได้ โดยการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปยังจุดที่มีอุณหภูมิต่ำ นอกจากนี้อิเล็กตรอนยังเคลื่อนที่ไปได้โดยการสั่นสะเทือนของโมเลกุลภายในของแข็งในลักษณะของพลังงานความสั่นสะเทือนอีกด้วย โดยทั่วไปจะพบว่าโลหะจะสามารถนำความร้อนได้ดีกว่าอโลหะ เนื่องจากโลหะมีโมเลกุลที่จัดเรียงอยู่อย่างเป็นระเบียบ ความร้อนจึงถูกถ่ายเทผ่านไป ในลักษณะของพลังงานความสั่นสะเทือนได้อย่างสะดวก และโลหะยังมีจำนวนอิเล็กตรอนจำนวนมาก ซึ่งช่วยในการส่งผ่านพลังงานความร้อนได้ดีมากยิ่งขึ้น

โดยการนำความร้อนสามารถหาได้โดยอาศัยกฎของฟูเรียร์ (Fourier's law) ซึ่งกล่าวไว้ว่า สำหรับการนำความร้อนผ่านตัวกลางทิศทางใดทิศทางหนึ่ง อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน (q_x) ผ่านตัวกลางในทิศทางนั้นเป็นปฏิภาคโดยตรงกับพื้นที่ถ่ายเทความร้อนที่ตั้งฉากกับ

ทิศทางการไหลของความร้อน (A_x) และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวกลางในทิศทางดังกล่าว

$\frac{dT}{dx}$ สำหรับการนำความร้อนในทิศทาง x ภายใต้สภาวะคงตัว (Steady state)

$$q_x = -kA_x \frac{dT}{dx} \quad (2.33)$$

หรือ

$$q_x'' = \frac{q_x}{A_x} = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.34)$$

เมื่อ	q_x	คือ	อัตราการถ่ายเทความร้อน โดยการนำผ่านพื้นที่หน้าตัด A_x , Watt
	q_x''	คือ	ค่าฟลักซ์ความร้อน, W / m^2
	k	คือ	ค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุ (Thermal conductivity), $W / m^{\circ}C$
	A_x	คือ	พื้นที่หน้าตัดของผนังราบที่ตั้งฉากกับทิศทางการนำความร้อน, m^2
	$\frac{dT}{dx}$	คือ	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงระยะทาง dx , $^{\circ}C$

ค่าสภาพการนำความร้อนเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของวัสดุที่ได้จากการวัดและทดสอบ โดยทั่วไป สภาพการนำความร้อนจะแปรผันตามอุณหภูมิ ซึ่งจากการวิเคราะห์การแลกเปลี่ยนพลังงานจลน์จะพบว่าค่าสภาพการนำความร้อนของแก๊สจะแปรผันตามกำลังสองของอุณหภูมิสัมบูรณ์ และค่าสภาพการนำความร้อนของของเหลวต่างๆ ยกเว้นน้ำจะแปรผันตามอุณหภูมิสัมบูรณ์ สำหรับการใช้งานจริง จะใช้ค่าสภาพการนำความร้อนคงที่ ซึ่งหาได้ที่อุณหภูมิเฉลี่ย ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุต่างๆ (ที่ 300K)

วัสดุ	ค่าสภาพการนำความร้อน
เงิน	429
ทองแดง	401
ทอง	317
อะลูมิเนียม	237
เหล็ก	80.2
ปรอท	8.54
แก้ว	1.4
อิฐ	0.72
น้ำ	0.613
ผิวหนังของมนุษย์	0.37
สารทำความเย็น	0.072
อากาศ	0.026

2.7.2 การแผ่รังสีความร้อน (Thermal Radiation)

การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนนั้น วัตถุจะเปลี่ยนพลังงานส่วนหนึ่งของตัวเองไปเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเป็นพลังงานรูปหนึ่ง เมื่อคลื่นเหล่านี้เคลื่อนที่ไปกระทบวัตถุอื่นในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรือเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วแสง พลังงานส่วนหนึ่งของคลื่นเหล่านี้จะถูกดูดกลืนไว้แล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน วัตถุที่แผ่รังสีจะสูญเสียพลังงานของตัวเอง และถ้าวัตถุนั้นไม่ได้รับพลังงานจากแหล่งอื่นเข้ามา อุณหภูมิของแหล่งนั้นก็ลดลง โดยอุณหภูมิของวัตถุจะคงที่ก็ต่อเมื่ออัตราการสูญเสียความร้อนเท่ากับอัตราการรับความร้อน การแผ่รังสีความร้อนสามารถส่งผ่านสุญญากาศได้ ซึ่งต่างจากการนำความร้อนและการพาความร้อนซึ่งจะต้องอาศัยตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน

เมื่อวัตถุใดมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิศูนย์สัมบูรณ์ วัตถุนั้นจะแผ่รังสีออกมาตลอดเวลา ที่ทุกๆ ความยาวคลื่น โดยทั่วไปวัตถุจะแผ่รังสีออกมาที่ความยาวคลื่นต่างๆกัน ปริมาณความร้อนทั้งหมดที่วัตถุแผ่รังสีออกมาสามารถหาได้โดยการรวมความร้อนที่วัตถุนั้นแผ่ออกมาที่ความยาวคลื่นต่างๆกัน โดยอัตราการแผ่รังสีความร้อนทั้งหมดต่อหน่วยพื้นที่เรียกว่า พลังงานการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและลักษณะพื้นผิววัตถุ

$$q_{rad} = A_{rad} \epsilon \sigma T_s^4 \quad (2.35)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือทำซ้ำและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	q_{rad}	คือ	อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อน, <i>Watt</i>
	A_{rad}	คือ	พื้นที่ผิวที่มีการแผ่รังสีความร้อน, m^2
	ϵ	คือ	สภาพการแผ่รังสีของพื้นผิวมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1
	σ	คือ	ค่าคงที่สเตฟาน – โบลตซ์มันน์ เท่ากับ 5.7×10^{-8}
	T_s	คือ	อุณหภูมิผิวของวัตถุ, <i>K</i>

ซึ่งโดยทั่วไปหากอุณหภูมิผิวของวัสดุใกล้เคียงกับสิ่งแวดล้อม ผลกระทบจากการแผ่รังสีความร้อนนี้จะมีค่าน้อยมาก ซึ่งในงานปริญญาโทฉบับนี้ผลกระทบดังกล่าวมีค่าน้อยมากเช่นกัน ดังนั้นจึงไม่นำผลดังกล่าวมาพิจารณาในงานปริญญาโทฉบับนี้

2.7.3 การพาความร้อน

เมื่อของไหลไหลผ่านวัตถุที่เป็นของแข็งหรือไหลผ่านช่องทางการไหล โดยที่อุณหภูมิของของไหลและผิวของแข็งมีค่าต่างกัน การถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลและผิวของแข็งจะเกิดขึ้นเมื่อของไหลเคลื่อนที่สัมผัสกับผิวของของแข็ง กลไกการถ่ายเทความร้อนแบบนี้เรียกว่า “การพาความร้อน” การพาความร้อนแบ่งตามการเกิดได้สองประเภท ได้แก่ การพาความร้อนแบบบังคับ (force convection) ซึ่งการเคลื่อนที่ของของไหลเกิดขึ้นโดยการทำขึ้นเองโดยใช้ปั๊มหรือพัดลมเป็นตัวทำให้เกิดแรงกระทำให้ของไหลไหลผ่านบนพื้นผิว และการพาความร้อนแบบอิสระหรือการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (free or natural convection) ซึ่งการเคลื่อนที่ของของไหลเกิดจากแรงลอยตัวที่มีผลมาจากความแตกต่างของความหนาแน่น ซึ่งเกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิภายในของไหล เช่น ปล่อยแผ่นวัตถุร้อนที่วางอยู่ในแนวตั้งไว้ในอากาศเย็นที่อยู่หนึ่ง ชั้นของอากาศที่ติดกับพื้นผิวของแผ่นวัตถุจะมีการเคลื่อนที่เพราะเกรเดียนต์อุณหภูมิในอากาศเป็นผลทำให้เกรเดียนต์ของความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้อากาศเกิดการเคลื่อนที่ โดยการเคลื่อนที่ของของไหลมีผลกระทบต่อสนามอุณหภูมิภายในของไหล

2.8 สมดุลพลังงาน กรณีอุณหภูมิที่ผิวคงที่

การป้องกันความร้อนไหลออกนอกกระบอกสามารถทำได้ด้วยการหุ้มฉนวนกันความร้อนในบริเวณที่อาจก่อให้เกิดการสูญเสียพลังงานสู่ภายนอกซึ่งงานทดสอบ (โดยสมมติให้ไม่มีการสูญเสียหรือการถ่ายเทความร้อนออกนอกกระบอก) ปริมาณความร้อนที่คายออกมาจะเท่ากับปริมาณความร้อนที่ของไหลเย็นได้รับ จากทฤษฎีการสมดุลความร้อนพบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ของไหลได้รับเท่ากับ

$$Q_{conv} = hA_s(T_w - T_\infty) \quad (2.36)$$

เมื่อ	Q_{conv}	คือ	อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ของไหลได้รับ , <i>Watt</i>
	h	คือ	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน , $W / m^2 \text{ } ^\circ C$
	A_s	คือ	พื้นที่ผิวการถ่ายเทความร้อน , m^2
	T_w	คือ	อุณหภูมิผิวผนังร้อน , $^\circ C$
	T_∞	คือ	อุณหภูมิของของไหลที่บริเวณทางเข้า , $^\circ C$

สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ; h

ค่าสัมประสิทธิ์กรณีเป็นท่อกลมผิวเรียบ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะขึ้นอยู่กับรูปแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน สภาพการไหลของของไหล สมบัติเชิงความร้อนของของไหล และขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงสถานะของของไหลด้วย โดยสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะพิจารณาในรูปของเลขนัสเซิลท์ (Nusselt Number: Nu) ดังสมการ

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (2.37)$$

เมื่อ	h	คือ	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน , $W / m^2 \text{ } ^\circ C$
	k	คือ	ค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุ , $W / m \text{ } ^\circ C$
	Nu	คือ	เลขนัสเซิลท์

การไหลแบบลามินาร์ปรับตัวเต็มที่แล้วภายในท่อ โดยมีอุณหภูมิที่ผิวท่อคงที่ เราสามารถหาค่าเลขนัสเซิลท์โดยขบวนการทำซ้ำ (Iteration) โดยคอมพิวเตอร์ ได้ค่าความสัมพันธ์ของเลขนัสเซิลท์ดังนี้

กรณีท่อกลมผิวเรียบ	$Nu = 3.66$
กรณีท่อสามเหลี่ยมด้านเท่า	$Nu = 2.35$
กรณีท่อสี่เหลี่ยมด้านเท่า	$Nu = 2.98$
กรณีช่องขนานผิวเรียบ	$Nu = 7.54$

2.9 ประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน

เราสามารถวัดประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของท่อกลมที่ติดครีปได้ โดยเทียบเป็นสัดส่วนกับการพาความร้อนของท่อกลมผิวเรียบ เมื่อกำหนดให้กำลังขับและคุณสมบัติของของไหลที่บริเวณทางเข้าเหมือนกันทุกประการ เราจะได้สมการประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนดังนี้

เริ่มจากให้กำลังของพัดลมที่ใช้ในการจ่ายอากาศผ่านท่อที่มีผนังเรียบ (P_0) เท่ากับกำลังของพัดลมที่ใช้ในการจ่ายอากาศผ่านท่อที่มีครีปลักษณะต่างๆ (P_r)

$$P_0 = P_r$$

$$(\Delta PQ)_0 = (\Delta PQ)_r$$

$$\left[\left(\frac{f \rho L \bar{V}^2}{2D_h} \right) (\bar{V}A) \right]_0 = \left[\left(\frac{f \rho L \bar{V}^2}{2D_h} \right) (\bar{V}A) \right]_r$$

$$(f \bar{V}^3)_0 = (f \bar{V}^3)_r$$

$$(f Re^3)_0 = (f Re^3)_r$$

$$\frac{f_0}{f_r} = \frac{Re_r^3}{Re_0^3}$$

$$\frac{Re_r}{Re_0} = \left(\frac{f_0}{f_r} \right)^{1/3}$$

$$\frac{Re_r}{Re_0} = \frac{1}{(f_r / f_0)^{1/3}}$$

$$Re_r = \frac{Re_0}{(f_r / f_0)^{1/3}} \quad (2.38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนพิจารณาที่กำลังของพัคคมที่ใช้ในการ
จ่ายอากาศผ่านท่อที่มีผนังเรียบและท่อที่มีครีบลักษณะต่างๆเท่ากัน

$$Nu = f(Re)$$

$$\eta = \frac{Nu_r}{Nu_0} \Big|_{\text{pumping power}}$$

$$\eta = \frac{Nu_r / Nu_0}{(f_r / f_0)^{1/3}} \quad (2.39)$$

เมื่อ	η	คือ	ประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน
	Nu_r	คือ	เลขนัสเซิลท์ของท่อกลมที่ติดครีบล
	Nu_0	คือ	เลขนัสเซิลท์ของท่อกลมผิวเรียบ
	f_r	คือ	ตัวประกอบความเสียดทานของท่อกลมที่ติดครีบล
	f_0	คือ	ตัวประกอบความเสียดทานของท่อกลมผิวเรียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

3.1 บทนำ

ปัจจัยแห่งความสำเร็จของการจำลองสถานะการไหล และการถ่ายเทความร้อนของอากาศที่ไหลผ่านครีบ นอกจากความเข้าใจทางทฤษฎีพื้นฐาน ยังต้องมีความเข้าใจทางการคำนวณเชิงตัวเลขเนื่องจากเป็นเครื่องมือหลักสำหรับการหาผลเฉลย เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ หัวข้อ 3.2 กล่าวถึงประวัติ และพัฒนาการ โดยย่อของวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข หัวข้อ 3.3 ขั้นตอนการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ซึ่งเป็นแนวทางสากลที่ใช้โดยทั่วไป หัวข้อ 3.4 อธิบายคุณสมบัติของวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ซึ่งเป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์ความผิดพลาดของสมการดิฟเฟอเรนเชียล หัวข้อที่ 3.5 กล่าวถึงรูปแบบการจัดวางกริด และสอดคล้องความหมายของตัวแปร และสัญลักษณ์ที่ใช้ในบทนี้ หัวข้อที่ 3.6 แบบแผนการคำนวณเชิงตัวเลข เพื่อเข้าใจถึงแบบแผนวิธี (Scheme) ที่ใช้ในแต่ละองค์ประกอบของการดิฟเฟอเรนเชียล และในหัวข้อที่ 3.7 ถึง 3.10 แสดงวิธีการดิฟเฟอเรนเชียลแบบต่างๆ โดยเฉพาะบางแบบแผนวิธี

3.2 ระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข

วิวัฒนาการของการคำนวณเชิงตัวเลขเริ่มมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1950 เกิดขึ้นพร้อมกับยุคที่ระบบคอมพิวเตอร์เริ่มมีการพัฒนา ช่วงเวลานั้นระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite difference methods, FDM) และระเบียบวิธีผลต่างมูลฐาน (Finite element methods, FEM) เป็นวิธีพื้นฐานในการหาผลเฉลยของสมการอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equations, PDE) ซึ่งนิยมใช้มากในการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (Computational fluid dynamics, CFD) ต่อมาได้รวบรวมเอาองค์ความรู้ทางระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม และระเบียบวิธีผลต่างมูลฐานเข้าไว้ด้วยกัน เรียกว่า ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite volume methods, FVM) ทำให้มีโครงสร้างที่เข้าใจได้ง่ายขึ้น ขณะที่ยังมีความแม่นยำสูง จนเป็นที่นิยมในปัจจุบัน

3.3 ขั้นตอนการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

หากพิจารณาการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลในมุมมองของโปรแกรม จะกล่าวได้ว่าเป็นโครงสร้างของอัลกอริทึมที่สามารถนำไปสู่การจำลองสถานะการไหลได้ โปรแกรมคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางพลศาสตร์ของไหลในเชิงพาณิชย์ ส่วนมากมีระบบที่ให้ผู้ใช้งานสามารถป้อนค่าต่างๆที่ต้องการแล้วจึงนำไปคำนวณ โดยแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนหลักดังนี้

3.3.1 ขั้นตอนประมวลผล

ขั้นตอนประมวลผล (Pre-processing) คือขั้นตอนเตรียมการ โดยระบุรายละเอียดของการกำหนดปัญหา และพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้อง ดังต่อไปนี้

1. กำหนดรูปร่าง และระบุนขนาดของระบบที่สนใจ เรียกว่า การกำหนดสนามการคำนวณ (Computation domain)
2. กำหนดจำนวน และรูปแบบการจัดวางกริด (Grid or Mesh) ซึ่งคือการแบ่งสนามการคำนวณออกเป็นปริมาตรเล็กๆ รูปแบบการจัดแบ่ง และจัดวางกริด ขึ้นอยู่กับปัญหาที่พิจารณาการแก้ที่เหมาะสมทำให้การหาผลเฉลยประมาณค่า (Approximation solution) แม่นยำขึ้น
3. เลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้เหมาะสมกับธรรมชาติของปัญหา เลือกโดยใช้องค์ความรู้ทางทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง
4. กำหนดคุณสมบัติของไหล เช่นพิจารณาของไหลเป็นอากาศที่อุณหภูมิปกติ เป็นต้น
5. กำหนดเงื่อนไขขอบ (Boundary condition) และค่าเริ่มต้น (Initial condition)



รูปที่ 3.1 แสดงความเชื่อมโยงของกระบวนการดิสเครทไทต์และผลเฉลยประมาณค่า

3.3.2 ขั้นตอนประมวลผล

ขั้นตอนประมวลผล (Solving) เป็นขั้นที่ต้องใช้ระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อแก้ปัญหาแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนย่อยดังนี้ (จากรูปที่ 3.1)

- (1) ประมาณตัวแปรไม่ทราบค่าโดยหาค่าเฉลี่ยของฟังก์ชัน (มักใช้ในปัญหาแบบป้อนป้อนสร้างเป็นสมการอนุพันธ์ย่อย) โดยรวมกับสมการบังคับการไหล
- (2) หาผลเฉลยวิค (Weak solution) ของสมการบังคับ ด้วยวิธีน้ำหนักตกค้าง (Weight residual) จากนั้นดิสเครทไทต์ โดยประมาณแต่ละเทอมความสัมพันธ์ด้วยแบบแผนวิธีที่เลือกไว้เพื่อให้ได้ผลลัพธ์เป็นสมการพีชคณิต
- (3) แก้สมการพีชคณิต ผลเฉลยที่ได้เรียกว่า ผลเฉลยประมาณค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 ชั้นแสดงผล

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

3.4 คุณสมบัติของวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลเพื่อจำลองพฤติกรรมตามธรรมชาติ ควรตระหนักว่าธรรมชาติมักมีพฤติกรรมซับซ้อน ดังนั้นสิ่งที่พึงระวังอย่างยิ่งคือ ความถูกต้องของผลเฉลย ผลการคำนวณที่ดีเลิศ เป็นเพียงค่าประมาณที่ดีที่สุดเท่าที่มนุษย์สามารถหาคำตอบได้เท่านั้น ไม่ใช่ผลเฉลยแม่นยำตรง

คุณสมบัติของวิธีการคำนวณ คือปัจจัยบ่งบอกความเที่ยงตรงของผลเฉลยประมาณค่า เมื่อเทียบกับพฤติกรรมจริงที่ควรเกิดขึ้น แบ่งได้หลายประการดังนี้

3.4.1 ความเข้ากันได้

ความเข้ากันได้ (Consistency) หมายถึงความเหมือน (Equivalent) ระหว่างสมการบังคับ (สมการอนุพันธ์ย่อย) และสมการที่ชดเชยที่ผ่านกระบวนการดิสcretize ทั่ว เมื่อระยะกริด (Grid spacing) และ หรือค่าขั้นเวลา (Time step) ลดลงใกล้ศูนย์ โดยปกติเรียกความแตกต่างหลังจากกระบวนการดิสcretize ทั่วว่า ความผิดพลาดแบบทรานเคชัน (Truncation error) ซึ่งลดลงเมื่อมีความเข้ากันได้มากขึ้น

3.4.2 เสถียรภาพการคำนวณ

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

3.4.3 การลู่เข้าของผลเฉลย

ผลการคำนวณที่มีการลู่เข้าของผลเฉลย (Convergence) หมายถึงผลเฉลยประมาณค่ามีแนวโน้มเข้าใกล้ผลเฉลยแม่นยำ สำหรับปัญหาไม่เชิงเส้น (Nonlinear problem) ยากที่จะตรวจสอบการลู่เข้าของผลเฉลย เนื่องจากไม่สามารถหาผลเฉลยแม่นยำได้ อย่างไรก็ตามการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ในการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร กรุณาแจ้งให้ทราบเพื่อจะได้ดำเนินการแก้ไขต่อไป

ตรวจสอบทำได้ด้วยวิธีเปรียบเทียบผลการคำนวณที่มีระยะกริดลดลง กระทั่งผลเฉลยไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามระยะกริด (Grid independent) เรียกได้ว่ามีคุณสมบัติการลู่เข้าของผลเฉลยที่ดี

3.4.4 การอนุรักษ์

คุณสมบัติการอนุรักษ์ (Conservation) เป็นคุณสมบัติที่มีอยู่ในกฎการอนุรักษ์ดั่งบทที่ 2 เนื่องจากผลการคำนวณมีที่มาจากสมการบังคับ ดังนั้นวิธีการคำนวณจึงควรมีคุณสมบัตินี้ด้วย โดยคุณสมบัติการอนุรักษ์เป็นจุดเด่นที่สำคัญของระเบียบวิธีปริมาตรสลับเนื่อง กล่าวคือคำนึงถึงความสมดุลของการส่งถ่ายปริมาณข้ามขอบเขตที่พิจารณา เช่นรอบผิวปิดของปริมาตรเล็กๆที่แบ่งตามระยะกริดเป็นต้น

3.4.5 ความจำกัดขอบ

ความจำกัดขอบ (Bounded ness) หมายถึงผลเฉลยควรมีค่าอยู่ในขอบเขตจำกัด เช่นความหนาแน่น ความเข้มข้น ต้องมีค่ามากกว่าศูนย์เสมอ หรือระบบการถ่ายเทความร้อนที่ทราบอุณหภูมิต่ำสุด-สูงสุด ผลเฉลยที่ควรได้ต้องมีค่าอยู่ในช่วงนั้นด้วยเช่นกัน โดยวิธีการคำนวณที่มีอันดับสูง (Higher order) มีแนวโน้มความจำกัดขอบต่ำลง ดังนั้นจึงไม่ควรเลือกใช้วิธีการคำนวณที่มีอันดับสูงมากเกินไปจนความจำเป็น

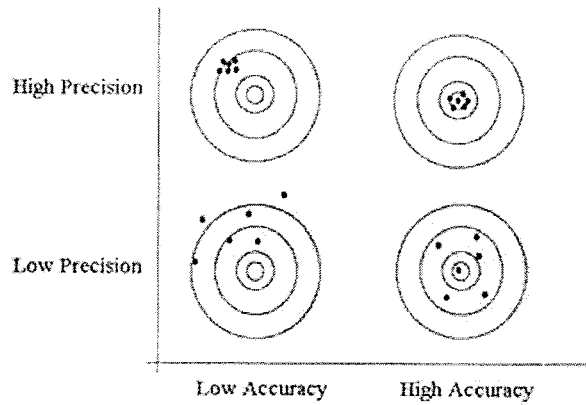
3.4.6 ความเสมือนจริง

ความเสมือนจริง (Realizability) หมายถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่จำลองพฤติกรรมธรรมชาติที่ซับซ้อน เช่นแบบจำลองการไหลปั่นป่วน แบบจำลองการเผาไหม้ เป็นต้น ควรเลือกแบบจำลองที่มีความเสมือนจริงเมื่อเทียบกับความหมายทางกายภาพ หากเลือกใช้ หรือนำมาใช้ไม่สอดคล้องกับปัญหา ผลเฉลยที่ได้อาจไม่สื่อความหมายทางกายภาพที่ถูกต้อง

3.4.7 ความแม่นยำ

บ่อยครั้งในงานทางวิศวกรรมกล่าวถึงความแม่นยำ (Accuracy) ซึ่งมักใช้สับสนกับความแม่นยำ (Precision) พิจารณารูปที่ 3.2 แสดงความแตกต่างระหว่างแนวคิดทั้งสองอย่างชัดเจน ตรงกลางเป่าเป็นเสมือนค่าแม่นยำ โดยเห็นได้ว่าความแม่นยำสูง หมายถึงค่าโดยเฉลี่ยไม่ต่างจากค่าแม่นยำ และความแม่นยำสูง หมายถึงค่าส่วนใหญ่กระจายตัวน้อย ดังนั้นงานวิเคราะห์ทางด้านวิศวกรรมจึงควรให้ความสำคัญของความแม่นยำ มากกว่าความแม่นยำ ซึ่งช่วยในการวิเคราะห์ได้ถูกต้อง มีแนวโน้มเดียวกับสภาพความจริงมากขึ้น แต่ในงานออกแบบต้องการความผิดพลาดน้อยที่สุด จึงควรใช้ทั้ง 2 แนวคิดประกอบรวมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



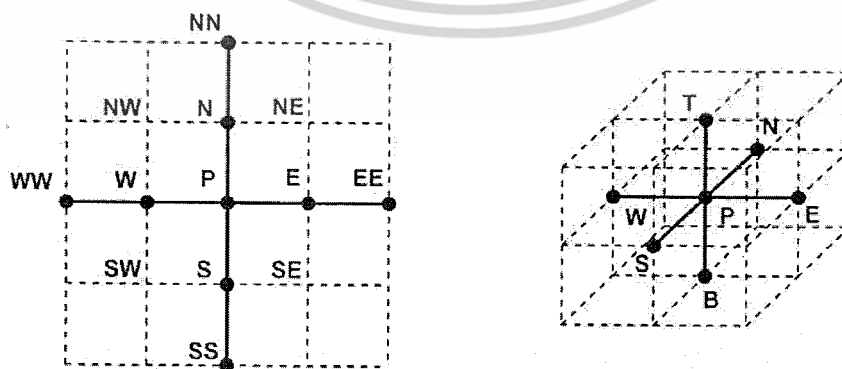
รูปที่ 3.2 แสดงแนวคิดของความแม่นยำและความแม่นย่ำ

วิธีคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล แบ่งปัจจัยของความแม่นยำได้เป็น 3 ปัจจัยดังนี้

1. ความแม่นยำจากแบบจำลอง (Modeling accuracy) เกิดจากความเหมือนจริงของแบบจำลอง เทียบกับพฤติกรรมจริงธรรมชาติ
2. ความแม่นยำจากการ discretization (Discretization accuracy) เกิดจากความเข้ากันได้ของสมการพีชคณิต เทียบกับสมการบังคับ (สมการอนุพันธ์ย่อย)
3. ความแม่นยำจากการแก้สมการพีชคณิต (Iteration accuracy) เกิดจากการลู่เข้าของผลเฉลยประมาณค่า เทียบกับผลเฉลยแม่นยำตรงของสมการพีชคณิต

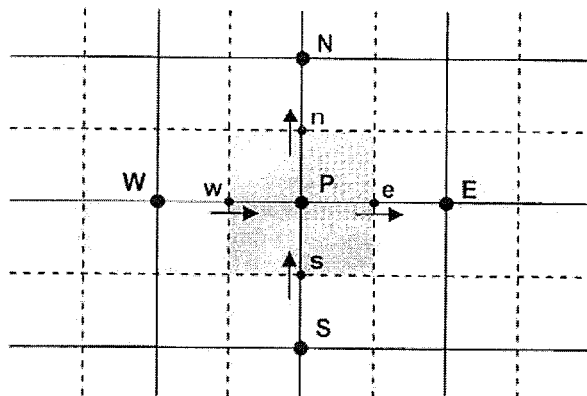
3.5 รูปแบบการจัดวางกริด

รูปแบบการจัดวางกริดโดยทั่วไปแบ่งได้เป็น 3 แบบคือ แบบโครงสร้างปกติ (Structured grids) แบบกลุ่มโครงสร้าง (Block structured grid) และแบบไม่เป็นโครงสร้าง (Unstructured grids) เพื่อให้สอดคล้องกับความเข้าใจกระบวนการ discretization ในหัวข้อถัดไป จึงได้ใช้รูปแบบการจัดวางกริดดังรูปที่ 3.3 (แบบโครงสร้างปกติ) โดยในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะกริดใน 2 มิติ



รูปที่ 3.3 แสดงรูปแบบการจัดวางกริดในแกน 2 มิติ และ 3 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 ส่วนแรงแสดงตำแหน่งของปริมาตรควบคุมแบบ 2 มิติ

จากรูปที่ 3.4 ตำแหน่ง P คือตำแหน่งโนด (Node) ที่สนใจ ตัวอักษรพิมพ์เล็ก เช่น w, e แสดงถึงตำแหน่งของปริมาณที่เข้า-ออกจากปริมาตรควบคุมที่แรงแรง (Cell volume) เช่น ความเร็ว เป็นต้น เรียกว่า ตำแหน่งผิวเซลล์ (Cell face) ลูกศรที่ปรากฏแสดงทิศเป็นบวกของปริมาณเวกเตอร์ที่ตำแหน่งผิวเซลล์ รูปแบบลักษณะนี้ เรียกว่า การจัดเรียงแบบตำแหน่งร่วม (Co-located arrangement) กล่าวคือ ปริมาณสเกลาร์ และเวกเตอร์มีตำแหน่งเดียวกัน (มวล ความเร็ว ความดัน และอุณหภูมิ) โดยการจัดวางกริดในแบบอื่นจะได้กล่าวถึงในหัวข้อ 3.10 เนื่องมาจากปัญหาการดิสครีทไทซ์เทอมอัตราเปลี่ยนความดันของสมการนาเวียร์-สโตกส์

3.6 แบบแผนการคำนวณเชิงตัวเลข

ปัจจุบันมีนักวิจัยที่คิดค้นแบบแผนการคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical scheme) มากมาย ซึ่งขอกกล่าวถึงเฉพาะแบบแผนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย 4 แบบคือ

3.6.1 แบบแผนวิธีผลต่างกึ่งกลาง

แบบแผนวิธีผลต่างกึ่งกลาง (Central differencing scheme, CDS) คือการประมาณค่าที่ตำแหน่งผิวเซลล์ต่างๆ ด้วยหลักการหาค่าเฉลี่ยกึ่งกลาง เป็นไปตามสมการ (3.1) เมื่อ ϕ แทนปริมาณที่สนใจใดๆ

$$\begin{aligned}
 \phi_e &= (\phi_P + \phi_E)/2 \\
 \phi_w &= (\phi_W + \phi_P)/2 \\
 \phi_n &= (\phi_P + \phi_N)/2 \\
 \phi_s &= (\phi_S + \phi_P)/2
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (3.1) เห็นได้ว่าการประมาณค่าที่ผิวเซลล์ด้วยค่าที่ตำแหน่งโนด โดยถ่วงน้ำหนักโนดประชิด (Adjacent node) เท่ากัน แบบแผนวิธีนี้จึงขึ้นอยู่กับระยะกริดเป็นสำคัญ ซึ่งระยะกริดที่ลดลง ทำให้ผลเฉลยมีความแน่นอนสูงขึ้น

3.6.2 แบบแผนวิธีผลต่างต้นลมอันดับหนึ่ง

การประมาณค่าที่ผิวเซลล์ (รูปที่ 3.4) ของแบบแผนวิธีผลต่างต้นลมอันดับหนึ่ง (1st-order upwind differencing scheme, UDS-1) ให้ปริมาณที่ตำแหน่งท้ายลมมีค่าเท่ากับปริมาณที่ตำแหน่งต้นลม ดังสมการ (3.2) เมื่อ ϕ แทนปริมาณที่สนใจ และ u แทนความเร็วที่ตำแหน่งผิวเซลล์นั้น เช่น u_e แทนความเร็วที่ตำแหน่งผิวเซลล์ e เป็นต้น

$$\begin{aligned} \phi_e &= \alpha_e \phi_P + (1 - \alpha_e) \phi_E \quad \text{เมื่อ } u_e > 0 \Rightarrow \alpha_e = 1 \quad \text{และ } u_e < 0 \Rightarrow \alpha_e = 0 \\ \phi_w &= \alpha_w \phi_W + (1 - \alpha_w) \phi_P \quad \text{เมื่อ } u_w > 0 \Rightarrow \alpha_w = 1 \quad \text{และ } u_w < 0 \Rightarrow \alpha_w = 0 \\ \phi_n &= \alpha_n \phi_P + (1 - \alpha_n) \phi_N \quad \text{เมื่อ } u_n > 0 \Rightarrow \alpha_n = 1 \quad \text{และ } u_n < 0 \Rightarrow \alpha_n = 0 \\ \phi_s &= \alpha_s \phi_S + (1 - \alpha_s) \phi_P \quad \text{เมื่อ } u_s > 0 \Rightarrow \alpha_s = 1 \quad \text{และ } u_s < 0 \Rightarrow \alpha_s = 0 \end{aligned} \quad (3.2)$$

แบบแผนวิธีผลต่างต้นลมอันดับหนึ่งมีคุณสมบัติจำกัดขอบสูง ทำให้ผลเฉลยไม่กระเพื่อม (Oscillatory solution) เป็นข้อดีทั้งในแง่เสถียรภาพการคำนวณ และการลู่เข้าของผลเฉลย แต่ในขณะเดียวกัน ทำให้เกิดพฤติกรรมการแพร่เชิงตัวเลข (Numerical diffusive) เนื่องจากลักษณะผลเฉลยเสมือนถูกลดน้ำหนักจากค่าที่ตำแหน่งต้นลมเป็นหลัก สำหรับกรณีที่มีการไหลซับซ้อน แบบแผนวิธีนี้จะทำให้คุณสมบัติความเข้ากันได้ลดลง

3.6.3 แบบแผนวิธีผลต่างต้นลมอันดับสอง

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

$$\phi_e = \phi_P + \delta_{eP} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_P + \frac{\delta_{eP}^2}{2} \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \right)_P + \text{H.O.T.} \quad \text{เมื่อ } u_e > 0 \quad (3.3)$$

สมการ (3.3) เป็นตัวอย่างแบบแผนวิธีในกรณี 1 มิติ พิจารณาเฉพาะที่ผิวเซลล์ e เมื่อ δ_{eP} แทนระยะห่างระหว่างผิวเซลล์ e และโนดต้นลม P (เนื่องจาก $u_e > 0$) สำหรับกรณีแบบแผนวิธีผลต่างต้นลมอันดับหนึ่งจะใช้เฉพาะเทอมแรกทางขวาของสมการ และแบบแผนวิธีผลต่างต้นลมอันดับสองนี้จะใช้สองเทอมแรกทางขวาของสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทอม $\left(\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)_P$ คือ ความชันของเซลดัณฑ์ม ซึ่งประมาณโดยการเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักด้วย ปริมาตรของเซลดัณฑ์ม ดังสมการ (3.4) จากนั้นใช้ทฤษฎีของเกาส์ (Gauss theorem) จะเขียนได้ใน สมการ (3.5) ดังนี้

$$\left(\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)_P = \frac{1}{V} \int \left(\frac{\partial\phi}{\partial x}\right) dV \quad (3.4)$$

$$\left(\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)_P = \frac{1}{V} \oint \phi \cdot \vec{n} dA \quad (3.5)$$

เมื่อ V แทนขนาดปริมาตรของเซลดัณฑ์ม A แทนพื้นที่ผิวเซลดัณฑ์ม และ \vec{n} แทนเวกเตอร์ตั้งฉากกับ ผิวเซลดัณฑ์ม สมการ (3.5) ทำการดิสเกรทไทต์ด้วยระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมใน 2 มิติ (กรณีการจัดวางกริดตามรูปที่ 3.4) จะลดรูปได้เป็น

$$\left(\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)_P = \frac{1}{A_P} (\phi_e L_e + \phi_w L_w + \phi_n L_n + \phi_s L_s) \quad (3.6)$$

จากสมการ (3.6) เมื่อ L แทนระยะความกว้างของผิวเซลดัณฑ์มในแต่ละด้านตามตัวห้อย เช่น L_e แทนระยะความกว้างของผิวเซลดัณฑ์ม ด้าน e เป็นต้น และ A_P แทนพื้นที่เซลดัณฑ์มที่ตำแหน่งโนด P อยู่ เช่น A_P มีค่าเท่ากับพื้นที่แรงแงในรูปที่ 3.4 เป็นต้น ซึ่งค่า ϕ ที่ผิวเซลดัณฑ์มต่างๆของสมการ (3.6) หาได้หลายวิธี แต่ในที่นี้เลือกใช้แบบแผนวิธีผลต่างกึ่งกลางดังสมการ (3.1) ดังนั้นสมการ (3.3) จึงเขียนใหม่ได้ว่า

$$\phi_e = \phi_P + \frac{\delta_{eP}}{A_P} \left(\begin{array}{l} \left(\frac{\phi_P + \phi_E}{2}\right) \cdot L_e + \left(\frac{\phi_W + \phi_P}{2}\right) \cdot L_w \\ + \left(\frac{\phi_P + \phi_N}{2}\right) \cdot L_n + \left(\frac{\phi_S + \phi_P}{2}\right) \cdot L_s \end{array} \right) \text{เมื่อ } u_e > 0 \quad (3.7)$$

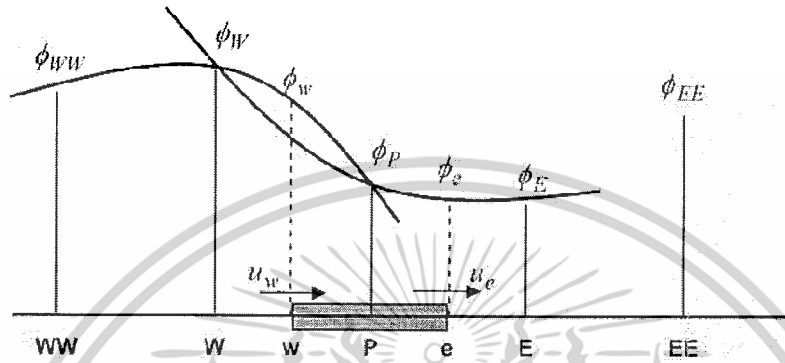
ในทำนองเดียวกันเมื่อ $u_e < 0$ จะเขียนได้ดังสมการ (3.8) และสมการของ ϕ_w, ϕ_n, ϕ_s สามารถหาได้ด้วยหลักการเดียวกัน ซึ่งไม่ขอกล่าวถึงในรายละเอียด

$$\phi_e = \phi_E + \frac{\delta_{eE}}{A_E} \left(\begin{array}{l} \left(\frac{\phi_E + \phi_{EE}}{2}\right) \cdot L_{ee} + \left(\frac{\phi_E + \phi_P}{2}\right) \cdot L_e \\ + \left(\frac{\phi_{NE} + \phi_E}{2}\right) \cdot L_{ne} + \left(\frac{\phi_E + \phi_{SE}}{2}\right) \cdot L_{se} \end{array} \right) \text{เมื่อ } u_e < 0 \quad (3.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ มอนูอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.4 แบบแผนวิธีผลต่างครอคราติก

แบบแผนวิธีผลต่างครอคราติก (Quadratic upstream interpolation for convective kinetics differencing scheme, QUICK) เริ่มนำเสนอโดย Leonard ค.ศ. 1979 เป็นแบบแผนวิธีที่ใช้โนด 3 ตำแหน่งในการประมาณค่าของแต่ละผิวเซลล์ (2 โนดที่ต้นลม และ 1 โนดที่ท้ายลม) ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 รูปแบบแนวคิดของแบบแผนวิธีผลต่างครอคราติกในปริมาตรควบคุมแบบ 1 มิติ

ตามรูปที่ 3.5 เมื่อ $u_w > 0$ และ $u_e > 0$ การประมาณค่า ϕ_w ที่ผิวเซลล์ w จะใช้ค่าที่โนดต้นลมคือ WW และ W ประกอบกับที่โนดท้ายลมคือ 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 (3.9) ถึง (3.12) โดย $u_x > 0$ แล้ว $\alpha_x = 1$ และ $u_x < 0$ แล้ว $\alpha_x = 0$ เมื่อ $x = w, e, s, n$ ตามลำดับ

$$\phi_w = \frac{3}{8}[(1 + \alpha_w) \cdot \phi_W + (2 - \alpha_w) \cdot \phi_P] - \frac{1}{8}[(1 - \alpha_w) \cdot \phi_E + \alpha_w \cdot \phi_{WW}] \quad (3.9)$$

$$\phi_e = \frac{3}{8}[(1 + \alpha_e) \cdot \phi_P + (2 - \alpha_e) \cdot \phi_E] - \frac{1}{8}[(1 - \alpha_e) \cdot \phi_{EE} + \alpha_e \cdot \phi_W] \quad (3.10)$$

$$\phi_s = \frac{3}{8}[(1 + \alpha_s) \cdot \phi_S + (2 - \alpha_s) \cdot \phi_P] - \frac{1}{8}[(1 - \alpha_s) \cdot \phi_N + \alpha_s \cdot \phi_{SS}] \quad (3.11)$$

$$\phi_n = \frac{3}{8}[(1 + \alpha_n) \cdot \phi_P + (2 - \alpha_n) \cdot \phi_N] - \frac{1}{8}[(1 - \alpha_n) \cdot \phi_{NN} + \alpha_n \cdot \phi_S] \quad (3.12)$$

แบบแผนวิธีผลต่างครอคราติกมีความแน่นอนอันดับสาม ซึ่งสูงกว่าทั้งแบบแผนวิธีผลต่างต้นลมอันดับหนึ่งและสอง เป็นเทคนิคการผสมผสานความได้เปรียบของแบบแผนวิธีผลต่างกึ่งกลางและแบบแผนวิธีผลต่างต้นลมเข้าด้วยกัน กล่าวคือมีคุณสมบัติอนุรักษ์ และความเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้ากันได้มากกว่าแบบแผนวิธีผลต่างต้นสม อย่างไรก็ตามแบบแผนวิธีอันดับสูง จะมีเงื่อนไขเสถียรภาพการคำนวณ (Conditionally stable) เพิ่มขึ้น และคุณสมบัติจำกัดขอบลดลง

3.7 การดิสเครทไทต์สมการบังคับ

การคำนวณด้วยวิธีปริมาตรสืบเนื่อง ต้องการผลเฉลยวิคของสมการบังคับ ด้วยวิธีน้ำหนักตกค้าง โดยการเลือกใช้ 1 (Unit) เป็นฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก (Weight function) ผลที่ได้เป็นสมการอินทิกรัล (Integral equation) บนขอบเขตปริมาตรควบคุมเล็กๆ จากทฤษฎีของเกาส์ทำให้สามารถพิจารณาปริมาณที่ส่งถ่ายเข้า-ออกเฉพาะที่ขอบเขต เป็นตัวแทนทั้งปริมาตรได้ รวมเรียกว่าการดิสเครทไทต์สมการอนุพันธ์ย่อย โดยหัวข้อ 3.8 ถึง 3.10 จะกล่าวรายละเอียดวิธีดิสเครทไทต์ ซึ่งเป็นเนื้อหาที่ต่อเนื่องกัน การดิสเครทไทต์สมการอนุพันธ์มวลเป็นเนื้อหาที่ง่ายต่อความเข้าใจ เนื่องจากรูปแบบสมการไม่ซับซ้อน การดิสเครทไทต์สมการอนุพันธ์พลังงานจะซับซ้อนขึ้น โดยกล่าวถึงแบบแผนวิธีที่ใช้กับสมการที่ขึ้นกับเวลา และประยุกต์ใช้แบบแผนวิธีในหัวข้อ 3.6 เพื่อดิสเครทไทต์เทอมต่างๆของสมการอนุพันธ์พลังงาน สำหรับการดิสเครทไทต์สมการนาเวียร์-สโตกส์จะแสดงการประมาณค่าความดัน ซึ่งค่อนข้างยุ่งยาก และซับซ้อน ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงแสดงหัวข้อการดิสเครทไทต์สมการอนุพันธ์พลังงานก่อนหน้าการดิสเครทไทต์สมการนาเวียร์-สโตกส์

3.8 การดิสเครทไทต์สมการอนุพันธ์มวล

จากสมการอนุพันธ์มวลแบบไร้อัตตัม จะได้ผลเฉลยวิคดังสมการ (3.13) และใช้ทฤษฎีของเกาส์ จะได้สมการ (3.14)

$$\int \frac{\partial u_i}{\partial x_i} dV = 0 \quad (3.13)$$

$$\oint u_i n_i dA = 0 \quad (3.14)$$

เมื่อ A แทนพื้นที่ผิวเซต และ \mathbf{n} แทนเวกเตอร์ตั้งฉากกับผิวเซต จากสมการ (3.5) ให้ทำการดิสเครทไทต์ด้วยระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่องใน 2 มิติ (กรณีจัดวางกริดตามรูปที่ 3.4) จะได้สมการ (3.15) ซึ่งเรียกว่า สมการอนุพันธ์มวลแบบดิสเครทไทต์ เมื่อ L แทนระยะความกว้างของผิวเซตในแต่ละด้านตามตัวห้อย เช่น L_e แทนระยะความกว้างของผิวเซต e เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ $(uL)_e - (uL)_w + (uL)_n - (uL)_s = 0$ ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (3.15) การคำนวณการคำนวณ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.9 การดิสเครทไทซ์สมการอนุรักษ์พลังงาน

จากแนวทางการดิสเครทไทซ์สมการบังคับ ทำให้การดิสเครทไทซ์สมการอนุรักษ์พลังงาน โดยไม่พิจารณาเทอมเหือดหาย สามารถเขียนได้ว่า

$$\underbrace{\int_t^{t+\Delta t} \left(\int \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dV \right) dt}_{\text{เทอมไม่คงตัว}} + \underbrace{\int_t^{t+\Delta t} \left(\int \rho c_p u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} dV \right) dt}_{\text{เทอมการพา}} = \underbrace{\int_t^{t+\Delta t} \left(\int k \frac{\partial^2 T}{\partial x_i \partial x_i} dV \right) dt}_{\text{เทอมการแพร่}} \quad (3.16)$$

เนื่องจากสมการอนุรักษ์พลังงานมีตัวแปรขึ้นกับตำแหน่ง และเวลา ดังนั้นสมการ (3.16) จึงอินทิเกรตในช่วงเวลาสั้นๆ (Δt) และปริมาตรเล็กๆ (dV) โดยแบ่งพิจารณาเป็น 3 เทอมตามความหมายทางกายภาพคือ เทอมไม่คงตัว (Unsteady term) เทอมการพา (Convection term) และเทอมการแพร่ (Diffusion term) ดังต่อไปนี้

3.9.1 การดิสเครทไทซ์เทอมไม่คงตัว

แนวทางการดิสเครทไทซ์จะใช้ทฤษฎีของเกาส์ เพื่อพิจารณาปริมาณ (กรณีนี้คืออุณหภูมิ) ที่ส่งถ่ายเข้า-ออกจากขอบเขตของปริมาตรควบคุมเล็กๆ ดังนี้

$$\int_t^{t+\Delta t} \left(\int \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dV \right) dt = \int \left(\int_t^{t+\Delta t} \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dt \right) dV \quad (3.17)$$

การประมาณค่าผลต่างเวลา แบ่งได้เป็น 3 แบบแผนวิธีหลักๆคือ แบบแผนวิธีเอกซ์พลีซิท (Explicit scheme) แบบแผนวิธีอิมพลีซิท (Implicit scheme) และแบบแผนวิธีเครง-นิโคลสัน (Crank-Nicolson scheme) งานวิจัยนี้จะกล่าวเฉพาะแบบแผนวิธีอิมพลีซิท แบ่งได้หลายอันดับ โดยสมการ (3.18) แสดงแบบแผนวิธีอิมพลีซิทอันดับหนึ่ง (1st -order implicit scheme) และสมการ (3.19) แสดงแบบแผนวิธีอิมพลีซิทอันดับสอง (2nd -order implicit scheme)

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\phi^{n+1} - \phi^n}{\Delta t} \quad (3.18)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{3\phi^{n+1} - 4\phi^n + \phi^{n-1}}{2\Delta t} \quad (3.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ t แทนเวลาชั่วขณะที่พิจารณา ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะแสดงเฉพาะการดิสเครทไทต์ ด้วยแบบแผนวิธีอิมพลีซิทอันดับหนึ่ง โดยนำสมการ (3.18) แทนในสมการ (3.17) (กรณี 2 มิติ และจัดวางกริดตามรูปที่ 3.4) พิจารณาใน 2 มิติ ปริมาตรเซลล์เปลี่ยนเป็นพื้นที่เซลล์ จะได้ว่า

$$\int \left(\int_i^{i+\Delta t} \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dt \right) dV = \rho c_p \cdot \left(\frac{T - T^0}{\Delta t} \cdot \Delta t \right) \cdot A_p$$

$$\int_i^{i+\Delta t} \left(\int \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dV \right) dt = \rho c_p \cdot (T - T^0) \cdot A_p \quad (3.20)$$

จากสมการ (3.20) ด้วย '0' แทนอุณหภูมิที่เวลา t สำหรับอุณหภูมิที่เวลา $t + \Delta t$ ไม่มีตัว ยก และ A_p แทนพื้นที่เซลล์ที่ตำแหน่งโนด P (โนดที่สนใจ) เช่น A_p คือพื้นที่ส่วนที่แรเงาในรูปที่ 3.4 เป็นต้น

3.9.2 การดิสเครทไทต์เทอมการพา

การดิสเครทไทต์ด้วยทฤษฎีของเกาส์ (พิจารณาใน 2 มิติ และจัดวางกริดตามรูปที่ 3.4) สามารถเขียนได้ดังนี้ เมื่อ $F_x = \rho c_p u_x L_x$ คือสัมประสิทธิ์การพาที่ผนังเซลล์ต่างๆ โดยที่ $x = e, w, n, s$ ตามลำดับ

$$\int_i^{i+\Delta t} \left(\int \rho c_p u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} dV \right) dt = \int_i^{i+\Delta t} \left(\int \rho c_p \bar{u}_i T dA \right) dt$$

$$= \rho c_p \cdot ((uTL)_e - (uTL)_w + (uTL)_n - (uTL)_s) \cdot \Delta t$$

$$\int_i^{i+\Delta t} \left(\int \rho c_p u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} dV \right) dt = (F_e T_e - F_w T_w + F_n T_n - F_s T_s) \cdot \Delta t \quad (3.21)$$

ค่าอุณหภูมิที่ผิวเซลล์ เช่น T_e คืออุณหภูมิที่ผิวเซลล์ e (ของปริมาตรที่โนด P) เป็นต้น คือตัวแปรไม่ทราบค่าที่ต้องการประมาณค่า ในที่นี้เลือกแสดงแบบแผนวิธีผลต่างครอเดราติค สมการ (3.9) ถึง (3.12) เมื่อให้ $\phi = T$ นำทั้งหมดแทนในสมการ (3.21) จัดรูปใหม่จะได้สมการ (3.22) ดังนั้นผลเฉลยที่ได้จึงมีคุณสมบัติของแบบแผนวิธีผลต่างครอเดราติค ซึ่งถูกบรรจุอยู่ในพฤติกรรมกรการไหลที่ส่งผลมาจากเทอมการพา ด้วยเหตุนี้จึงเห็นได้ว่าการเลือกแบบแผนวิธีการคำนวณในแต่ละเทอมมีความสำคัญมากต่อผลเฉลยประมาณค่าของระบบที่พิจารณา

$$\int_i^{i+\Delta t} \left(\int \rho_p u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} dV \right) dt = \left[\begin{array}{l} \frac{3}{8} T_P \left((1+\alpha_e)F_e - (2-\alpha_w)F_w \right) \\ + (1+\alpha_n)F_n - (2-\alpha_s)F_s \\ - \frac{1}{8} T_w (3(1+\alpha_w)F_w + \alpha_e F_e) \\ + \frac{1}{8} T_E (3(2-\alpha_e)F_e + (1-\alpha_w)F_w) \\ - \frac{1}{8} T_S (3(1+\alpha_s)F_s + \alpha_n F_n) \\ + \frac{1}{8} T_N (3(2-\alpha_n)F_n + (1-\alpha_s)F_s) \\ + \frac{1}{8} T_{ww} (\alpha_w F_w) - \frac{1}{8} T_{EE} ((1-\alpha_e)F_e) \\ + \frac{1}{8} T_{SS} (\alpha_s F_s) - \frac{1}{8} T_{NN} ((1-\alpha_n)F_n) \end{array} \right] \cdot \Delta t \quad (3.22)$$

3.9.3 การดิสเครทไทต์เทอมการแพร่

การดิสเครทไทต์ด้วยทฤษฎีของเกาส์ (พิจารณาใน 2 มิติ และจัดวางกริดตามรูปที่ 3.4) สามารถเขียนได้ดังสมการ (3.23)

การหาค่าประมาณของ $\partial T / \partial x_i$ เลือกแสดงด้วยแบบแผนวิธีผลต่างกึ่งกลาง ซึ่งไม่ได้ใช้สมการ (3.1) โดยตรง เนื่องจากไม่ต้องการประมาณค่าที่ผิวเซลล์ แต่ต้องการประมาณอัตราเปลี่ยนของปริมาณที่ส่งถ่ายผ่านผิวเซลล์ ด้วยหลักการของแบบแผนวิธีผลต่างกึ่งกลางจะเปลี่ยนสมการ (3.1) ให้เขียนใหม่ได้เป็นสมการ (3.24) เมื่อ δ_{PE} เป็นผลต่างของระยะที่โนด P และ E ในทำนองเดียวกัน δ_{WP} , δ_{PN} , δ_{SP} ก็คือผลต่างของระยะระหว่างโนดตัวห้อย

$$\int_i^{i+\Delta t} \left(\int k \frac{\partial^2 T}{\partial x_i \partial x_i} dV \right) dt = \int_i^{i+\Delta t} \left(\oint \bar{n} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) dA \right) dt \quad (3.23)$$

$$= \left[\begin{array}{l} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} L \right)_e - \left(k \frac{\partial T}{\partial x} L \right)_w \\ + \left(k \frac{\partial T}{\partial x} L \right)_n - \left(k \frac{\partial T}{\partial x} L \right)_s \end{array} \right] \cdot \Delta t$$

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e = \frac{(\phi_E - \phi_P)}{\delta_{PE}}, \quad \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w = \frac{(\phi_P - \phi_W)}{\delta_{WP}}$$

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_n = \frac{(\phi_N - \phi_P)}{\delta_{PN}}, \quad \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_s = \frac{(\phi_P - \phi_S)}{\delta_{SP}} \quad (3.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนสมการ (3.24) ลงในสมการ (3.23) พร้อมจัดรูปใหม่จะได้ดังสมการ (3.25) เมื่อ

$$D_e = k \frac{L_e}{\delta_{PE}}, D_w = k \frac{L_w}{\delta_{WP}}, D_n = k \frac{L_n}{\delta_{PN}}, D_s = k \frac{L_s}{\delta_{SP}}$$

คือสมประสิทธิผลการแพร่ที่ผนังเขต e, w, n, s ตามลำดับ

$$\int_t^{t+\Delta t} \left(\int k \frac{\partial^2 T}{\partial x_i \partial x_i} dV \right) dt = \begin{pmatrix} D_e T_E + D_w T_W + D_n T_N + D_s T_S \\ -(D_e + D_w + D_n + D_s) \cdot T_P \end{pmatrix} \cdot \Delta t \quad (3.25)$$

นำสมการ (3.20), (3.22) และ (3.25) แทนในสมการ (3.16) และจัดรูปใหม่ โดยรวมพจน์ต่างๆเข้าด้วยกัน (ไม่ขอแสดงรายละเอียด) จะได้สมการ (3.26) เรียกว่าสมการอนุรักษ์พลังงานแบบดิสครีตไทต์ หรืออีกนัยหนึ่งคือ สมการพีชคณิตของสมการอนุรักษ์พลังงาน

$$\begin{aligned} a_P T_P &= a_E T_E + a_W T_W + a_N T_N + a_S T_S \\ &+ a_{EE} T_{EE} + a_{WW} T_{WW} + a_{NN} T_{NN} + a_{SS} T_{SS} \\ &+ a_P^0 T_P^0 \end{aligned} \quad (3.26)$$

เมื่อ

$$a_E = D_e - \frac{3}{8}(2 - \alpha_e) \cdot F_e - \frac{1}{8}(1 - \alpha_w) \cdot F_w$$

$$a_W = D_w + \frac{3}{8}(1 + \alpha_w) \cdot F_w + \frac{1}{8}\alpha_e \cdot F_e$$

$$a_N = D_n - \frac{3}{8}(2 - \alpha_n) \cdot F_n - \frac{1}{8}(1 - \alpha_s) \cdot F_s$$

$$a_S = D_s + \frac{3}{8}(1 + \alpha_s) \cdot F_s + \frac{1}{8}\alpha_n \cdot F_n$$

$$a_{EE} = \frac{1}{8}(1 - \alpha_e) \cdot F_e$$

$$a_{WW} = -\frac{1}{8}\alpha_w \cdot F_w$$

$$a_{NN} = \frac{1}{8}(1 - \alpha_n) \cdot F_n$$

$$a_{SS} = -\frac{1}{8}\alpha_s \cdot F_s$$

$$a_P^0 = \frac{A_P}{\Delta t}$$

$$\begin{aligned} a_P &= a_P^0 + a_E + a_W + a_N + a_S + a_{EE} + a_{WW} + a_{NN} + a_{SS} \\ &+ (F_e - F_w + F_n - F_s) \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.10 การดิสเครทไทต์สมการนาเวียร์-สโตกส์

ด้วยแนวทางการดิสเครทไทต์สมการบังคับ เมื่อใช้กับสมการนาเวียร์-สโตกส์แบบไร้การอัดตัว จะได้ผลเฉลยวิคดังนี้

$$\begin{aligned}
 & \overbrace{\int_t^{t+\Delta t} \left(\int \rho \frac{\partial u_i}{\partial t} dV \right) dt}^{\text{เทอมไม่คงตัว}} + \overbrace{\int_t^{t+\Delta t} \left(\int \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} dV \right) dt}^{\text{เทอมการพา}} \\
 & = - \underbrace{\int_t^{t+\Delta t} \left(\int \frac{\partial p}{\partial x_i} dV \right) dt}_{\text{เทอมอัตราเปลี่ยนความดัน}} + \underbrace{\int_t^{t+\Delta t} \left(\int \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} dV \right) dt}_{\text{เทอมการแพร่}}
 \end{aligned} \tag{3.27}$$

จากสมการ (3.27) พบว่าแต่ละเทอมมีความหมายคล้ายกับสมการอนุรักษ์พลังงานในหัวข้อ 3.9 สมการ (3.16) โดยสมการ (3.27) มีเทอมอัตราเปลี่ยนความดันอยู่ด้วย จากหลักการความคล้ายคลึง ทำให้ไม่ต้องกล่าวรายละเอียดการดิสเครทไทต์เทอมไม่คงตัว เทอมการพา และเทอมการแพร่ซ้ำอีก อย่างไรก็ตาม ได้แสดงผลการดิสเครทไทต์เทอมดังกล่าวไว้สำหรับหัวข้อนี้ ได้เพิ่มเติมเนื้อหาการดิสเครทไทต์เทอมอัตราเปลี่ยนความดันเป็นหลัก

การดิสเครทไทต์เทอมอัตราเปลี่ยนความดันมีลักษณะที่พิเศษกว่าเทอมอื่น เพราะว่าในระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่องจะพิจารณาอัตราเปลี่ยนแปลงความดัน เป็นเทอมแหล่งกำเนิด (Source term) เนื่องจากความสัมพันธ์ที่ควบคู่กัน (Couple relation) ระหว่างสมการอนุรักษ์มวลและสมการนาเวียร์-สโตกส์ ด้วยตัวแปรความเร็ว (u_i) อีกทั้งสมการนาเวียร์-สโตกส์ ยังมีความควบคู่แบบไม่เชิงเส้น (Non-linear couple) รวมอยู่ด้วย เห็นได้จากเทอมการพาเทียบกับเทอมอื่นๆ ดังนั้นหากทราบค่าของความดันที่ถูกต้องแล้ว ผลเฉลยของสมการนาเวียร์-สโตกส์แบบไร้การอัดตัว (ความเร็ว) ควรจะสอดคล้องกับสมการอนุรักษ์มวลด้วย

เมื่อพิจารณาเทอมอัตราเปลี่ยนความดันเป็นเทอมแหล่งกำเนิด ทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้ทฤษฎีของเกาส์ในการดิสเครทไทต์ ดังนั้นสามารถเขียนได้ดังสมการ (3.28) ซึ่งวิธีการแบบนี้เป็นหนึ่งในสาเหตุที่ทำให้คุณสมบัติการเข้ากันได้ลดลง

$$\int_t^{t+\Delta t} \left(\int \frac{\partial p}{\partial x_i} dV \right) dt = \frac{\partial p}{\partial x_i} \cdot A_p \cdot \Delta t \tag{3.28}$$

สมการ (3.28) เทอมที่ต้องการประมาณค่าอัตราเปลี่ยนแปลงความดันคือ $\partial p / \partial x_i$ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการจัดวางตำแหน่งของความดันบนกริด โดยที่ผ่านมากล่าวถึงการจัดวางกริดแบบตำแหน่งร่วมเท่านั้น โดยทั่วไปการจัดวางกริดสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบคือ

เอกสารนี้ (1) การจัดเรียงกริดแบบตำแหน่งร่วม (Co-located arrangement) (จากหัวข้อ 3.5) โดยขั้นตอนการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2) การจัดเรียงกริดแบบทับซ้อน (Staggered arrangement)

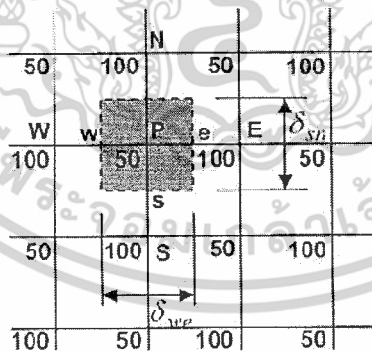
กรณีจัดเรียงกริดแบบตำแหน่งร่วม การประมาณค่า $\partial p / \partial x$, แบบเชิงเส้น จะได้ดังนี้

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{p_e - p_w}{\delta_{we}} = \frac{\left(\frac{p_E + p_P}{2}\right) - \left(\frac{p_P + p_W}{2}\right)}{\delta_{we}} = \frac{p_E - p_W}{2\delta_{we}} \quad (3.29)$$

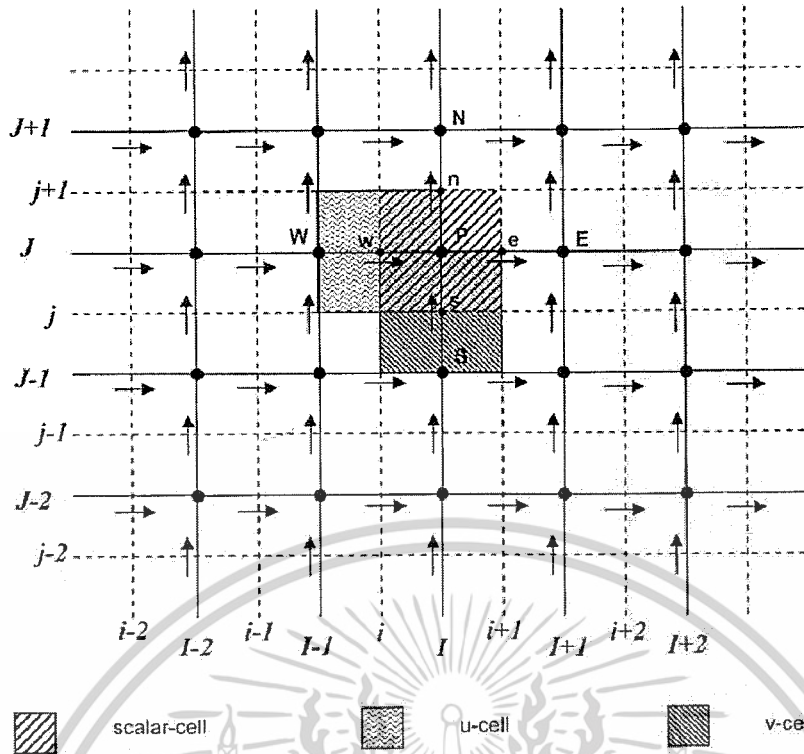
$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{p_n - p_s}{\delta_{sn}} = \frac{\left(\frac{p_N + p_P}{2}\right) - \left(\frac{p_P + p_S}{2}\right)}{\delta_{sn}} = \frac{p_N - p_S}{2\delta_{sn}}$$

การประมาณอัตราเปลี่ยนแปลงความดันแบบสมการ (3.29) ใช้ได้ดีในปัญหาที่การกระจายตัวของความดันสม่ำเสมอ หากการกระจายตัวของความดันเปลี่ยนแปลงไปมาก หรือเกิดพฤติกรรมความดันกระเพื่อม (Pressure fluctuation) ดังในรูปที่ 3.6 เรียกว่า ปัญหากระดานหมากรุก (Checker-board problem) การประมาณค่าที่มีการจัดเรียงกริดแบบตำแหน่งร่วมจะไม่เหมาะสม

แทนค่าจากปัญหากระดานหมากรุกตามรูปที่ 3.6 ในสมการ (3.29) พบว่าอัตราเปลี่ยนของความดันเป็นศูนย์ซึ่งไม่เป็นจริง กรณีนี้สามารถแก้ไขได้โดยลดระยะกริดจนไม่เกิดลักษณะปัญหากระดานหมากรุก แต่ทำให้จำนวนกริดเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้สิ้นเปลืองหน่วยความจำ และระยะเวลาในการคำนวณ ซึ่งขึ้นอยู่กับทรัพยากรทางคอมพิวเตอร์ที่มี



รูปที่ 3.6 การกระจายตัวของความดันกระเพื่อม หรือปัญหากระดานหมากรุก



รูปที่ 3.7 แสดงการจัดเรียงกริดแบบทับซ้อนใน 2 มิติ

ดังนั้นการจัดเรียงกริดแบบทับซ้อน จึงเป็นเทคนิคที่เกิดขึ้นเพื่อแก้ไขความผิดพลาดของการคำนวณค่าอัตราเปลี่ยนแปลงความดันในปัญหากระดานหมากรุก โดยให้ตัวแปรสเกลาร์ (มวล ความดัน และอุณหภูมิ) อยู่ที่ตำแหน่ง โหนดของปริมาตรควบคุมที่พิจารณา แต่ตัวแปรเวกเตอร์ (ความเร็ว) มีปริมาตรควบคุมเบี่ยงออกไป โดยจุดศูนย์กลางเซลล์ของปริมาตรเบี่ยงอยู่บนผิวเซลล์ของปริมาตรควบคุมที่สนใจ ในกรณี 2 มิติ แสดงได้ดังรูปที่ 3.7

จากรูปที่ 3.7 ปริมาตรสเกลาร์เก็บค่าที่โหนดที่มีเครื่องหมาย (•) เรียกปริมาตรควบคุมนั้นว่า สเกลาร์เซลล์ (scalar-cell) สำหรับปริมาตรเวกเตอร์เก็บค่าอยู่ที่ผิวเซลล์ที่มีเครื่องหมาย \rightarrow เรียกว่า ยูเซลล์ (u-cell) ใช้กับแนวนอน กรณีแนวตั้งเก็บค่าอยู่ที่ผิวเซลล์ที่มีเครื่องหมาย \uparrow เรียกว่า วีเซลล์ (v-cell) โดยการจัดลำดับของตำแหน่ง ใช้สัญลักษณ์ตัวพิมพ์ใหญ่ (I, J) แทนตำแหน่งของโหนดที่อ้างอิงสเกลาร์เซลล์ และตัวพิมพ์เล็ก (i, j) แทนตำแหน่งของผิวเซลล์ ใช้ประกอบกับตัวพิมพ์ใหญ่เพื่ออ้างอิงตำแหน่งของยูเซลล์ และวีเซลล์ ที่เบี่ยงไปตามลำดับ

จากสมการ (3.28) การประมาณค่า $\partial p / \partial x$, กรณีจัดเรียงกริดแบบทับซ้อนจะเปลี่ยนไปจากสมการ (3.29) เพราะพิจารณาอัตราเปลี่ยนแปลงความดันทำที่ปริมาตรควบคุมของความเร็ว ในกรณีอัตราเปลี่ยนแปลงความดันตามแนวนอน ($\partial p / \partial x$) ใช้ยูเซลล์ และแนวตั้ง ($\partial p / \partial y$) ใช้วีเซลล์ ดังสมการ (3.30) และ (3.31) เป็นการประมาณค่าแบบเชิงเส้น โดยสมการทั้งสองอ้างอิงตำแหน่งแบบคู่อันดับ

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{p_P - p_W}{\delta_{WP}} = \frac{P_{I,J} - P_{I-1,J}}{\delta_u} \quad (3.30)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{p_P - p_S}{\delta_{SP}} = \frac{P_{I,J} - P_{I,J-1}}{\delta_v} \quad (3.31)$$

เมื่อ δ_u และ δ_v คือระยะความกว้างของผิวเซลล์และวีเซลล์ ตามลำดับ พิจารณาในปัญหากระดานหมากรุกด้วยสมการ (3.30) และ (3.31) พบว่าค่าอัตราเปลี่ยนของความดันมีค่าไม่เป็นศูนย์ แสดงว่าการจัดเรียงกริดแบบทับซ้อนมีแนวโน้มที่ใช้ปริมาณกริดไม่มาก แต่สามารถคำนวณอัตราเปลี่ยนของความดันได้ถูกต้องมากขึ้น อย่างไรก็ตามการจัดเรียงกริดแบบทับซ้อนต้องจัดเก็บตำแหน่งยูเซลล์ และวีเซลล์ แยกออกจากตำแหน่งสเกลาร์เซลล์ จึงทำให้ค่อนข้างยุ่งยากในการเขียนโปรแกรมคำนวณ

ดังนั้นการประมาณค่าเทอมอัตราเปลี่ยนความดันในสมการ (3.27) กรณีจัดเรียงกริดแบบทับซ้อนทำได้โดยแทนสมการ (3.30) และ (3.31) ในสมการ (3.28) จัดรูปใหม่ได้

$$\int_t^{t+\Delta t} \left(\int \frac{\partial p}{\partial x_i} dV \right) dt = \begin{cases} (P_{I,J} - P_{I-1,J}) \cdot L_u \cdot \Delta t & ; u\text{-cell} \\ (P_{I,J} - P_{I,J-1}) \cdot L_v \cdot \Delta t & ; v\text{-cell} \end{cases} \quad (3.32)$$

เมื่อ $L_u = L_{i,j}$ และ $L_v = L_{i,j}$ เป็นระยะความกว้าง-ยาวของยูเซลล์ และวีเซลล์ ตามลำดับ จากสมการ (3.32) ใช้ในกรณีกริดชนิดสี่เหลี่ยมเหมือนดังรูปที่ 3.7 เท่านั้น ไม่ครอบคลุมกริดที่มีรูปแบบอื่นๆ เช่น สามเหลี่ยม หรือสี่เหลี่ยมไม่สม่ำเสมอ เป็นต้น

เมื่อพิจารณาการดิสเครทไทซ์สมการนาเวียร์-สโตกส์ โดยใช้หลักการของความคล้ายคลึงจากการดิสเครทไทซ์สมการอนุพันธ์พลังงาน สมการ (3.27) โดยจัดรูปใหม่ และเขียนได้ดังสมการ (3.33) และ (3.34) ซึ่งเป็นสมการนาเวียร์-สโตกส์ในแนวนอน และแนวตั้งตามลำดับ

$$\begin{aligned} a_p u_P &= a_E u_E + a_W u_W + a_N u_N + a_S u_S \\ &+ a_{EE} u_{EE} + a_{WW} u_{WW} + a_{NN} u_{NN} + a_{SS} u_{SS} \\ &+ a_p^0 u_p^0 + (p_W - p_P) \cdot L_u \end{aligned} \quad (3.33)$$

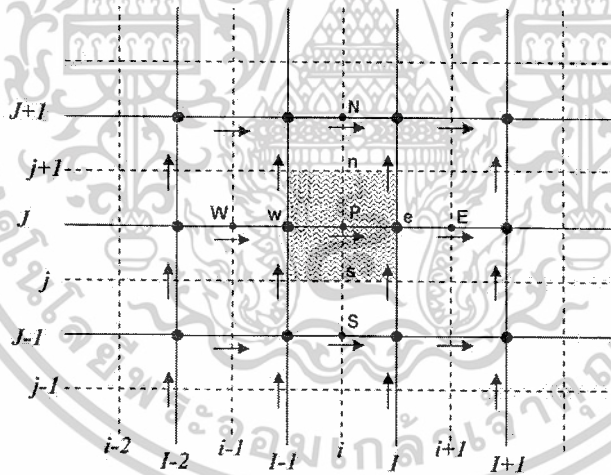
$$\begin{aligned} a_p v_P &= a_E v_E + a_W v_W + a_N v_N + a_S v_S \\ &+ a_{EE} v_{EE} + a_{WW} v_{WW} + a_{NN} v_{NN} + a_{SS} v_{SS} \\ &+ a_p^0 v_p^0 + (p_S - p_P) \cdot L_v \end{aligned} \quad (3.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

สมการ (3.33) และ (3.34) เขียนอยู่ในรูปแบบการจัดวางกริดแบบทับซ้อน ดังนั้นจากหัวข้อที่ผ่านมาปริมาณ F, D เขียนอยู่ในรูปแบบของการจัดวางกริดแบบตำแหน่งร่วม จึงต้องปรับปรุง โดยพิจารณากรณียูเซล และวีเซลตามลำดับ ดังนี้

(1) สัมประสิทธิ์การพาและการแพร่กรณียูเซล



รูปที่ 3.8 แสดงเวกเตอร์ความเร็วเมื่อพิจารณาเยล

จากรูปที่ 3.8 แสดงความเร็วในผนังเซลล์แบบต่างๆของยูเซล ในระบบการกำหนดตำแหน่งแบบคู่อันดับ พบว่าตำแหน่งเดิมของโนด P ในรูปที่ 3.7 เป็นตำแหน่งโนด e ในรูปที่ 3.8 เนื่องจากขณะที่พิจารณาเยลในกริดแบบทับซ้อน ตำแหน่งกึ่งกลางเซลล์เบี่ยงเบนไปทำให้ต้องพิจารณาการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆอีกครั้ง

กรณีความหนาแน่น และความหนืดมีค่าคงที่ สามารถหาสัมประสิทธิ์การพา และการแพร่

ได้ดังสมการ (3.35) และ (3.36) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F_e = (\rho u L)_e = \rho L_{I,J} \frac{u_{i+1,J} + u_{i,J}}{2}, \quad F_w = (\rho u L)_w = \rho L_{I-1,J} \frac{u_{i,J} + u_{i-1,J}}{2}, \quad (3.35)$$

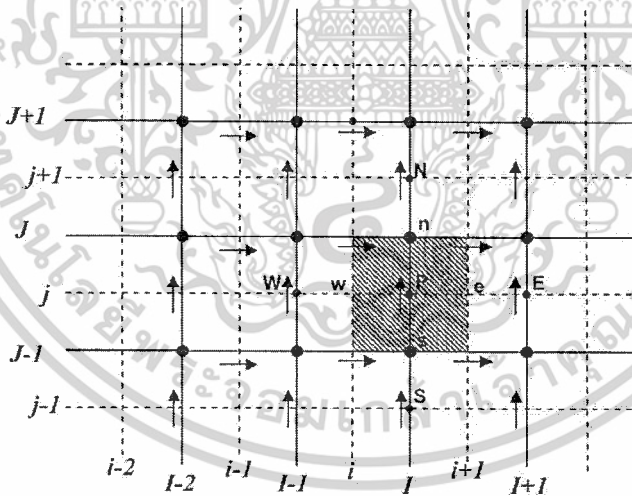
$$F_n = (\rho u L)_n = \rho L_{i,j+1} \frac{v_{I,j+1} + v_{I-1,j+1}}{2}, \quad F_s = (\rho u L)_s = \rho L_{i,j} \frac{v_{I,j} + v_{I-1,j}}{2},$$

$$D_e = \mu \frac{L_{I,J}}{x_{i+1} - x_i}, \quad D_w = \mu \frac{L_{I-1,J}}{x_i - x_{i-1}}, \quad (3.36)$$

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

(2) สัมประสิทธิ์การพาและการแพร่กรณีวีเซล

พบว่าตำแหน่งเดิมของโนด P ในรูปที่ 3.7 เป็นตำแหน่งโนด n ในรูปที่ 3.9 เนื่องจากตำแหน่งกึ่งกลางเซลล์เบี่ยงเบนไป คล้ายคลึงกับกรณียูเซล โดยสามารถหาสัมประสิทธิ์การพา และการแพร่ได้ดังสมการ (3.37) และ (3.38) ตามลำดับ



รูปที่ 3.9 แสดงเวกเตอร์ความเร็วเมื่อพิจารณาวีเซล

$$F_e = \rho L_{i+1,j-1} \frac{u_{i+1,j} + u_{i+1,j-1}}{2}, \quad F_w = \rho L_{i,j} \frac{u_{i,j} + u_{i,j-1}}{2}, \quad (3.37)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$D_n = \mu \frac{L_{i,j}}{y_{j+1} - y_j}, \quad D_s = \mu \frac{L_{i,j-1}}{y_j - y_{j-1}},$$
(3.38)

พิจารณาสัมประสิทธิ์การพา ($F = \rho u$) เมื่อเทียบกับการ discretize ไรต์สมการอนุพันธ์พลังงานในหัวข้อ 3.9 จะพบว่าในหัวข้อที่ผ่านมา ไม่ต้อง discretize ไรต์สมการอนุพันธ์พลังงาน เนื่องจากในสมการอนุพันธ์พลังงาน ถือว่าทราบค่าความเร็วที่ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งกรณีนี้ใช้ได้กับการคำนวณแบบไม่ควบคู่ (Uncouple Solving) กล่าวคือสมการอนุพันธ์พลังงาน สามารถแยกพิจารณาหลังจากคำนวณสมการนาเวียร์-สโตกส์

เนื่องจากสัมประสิทธิ์การพา มีเทอมความเร็วที่ผิวเซลล์อยู่ด้วย ซึ่งในสมการนาเวียร์-สโตกส์ ค่าความเร็วเป็นตัวแปรไม่ทราบค่า ดังนั้นการประมาณค่าความเร็วที่ผิวเซลล์ในการจัดเรียงกริดแบบตำแหน่งร่วม และกริดแบบทับซ้อน ต้องคำนวณค่าความเร็วที่ผิวเซลล์จากตำแหน่งที่เก็บค่าตัวแปรความเร็วอยู่ เช่น ใช้ตำแหน่ง โหนด (กรณีกริดแบบตำแหน่งร่วม) หรือใช้ตำแหน่งยูเซล-วีเซล (กรณีกริดแบบทับซ้อน) เป็นต้น ดังแสดงในสมการ (3.35) ถึง (3.38)

กรณีจัดเรียงกริดแบบทับซ้อน ควรเขียนสมการ discretize ไรต์ในระบบตำแหน่งคู่อันดับ เพื่อไม่ทำให้ตำแหน่งของปริมาตรควบคุมที่พิจารณาสับสน จากสมการ (3.32) (3.33) และ (3.34) นำมาเขียนใหม่เป็นสมการนาเวียร์-สโตกส์แบบ discretize ไรต์ได้ดังนี้

$$a_{i,j} u_{i,j} = \sum a_d u_d (p_{i-1,j} - p_{i,j}) \cdot L_{i,j}$$
(3.39)

$$a_{i,j} v_{i,j} = \sum a_d v_d (p_{i,j-1} - p_{i,j}) \cdot L_{i,j}$$
(3.40)

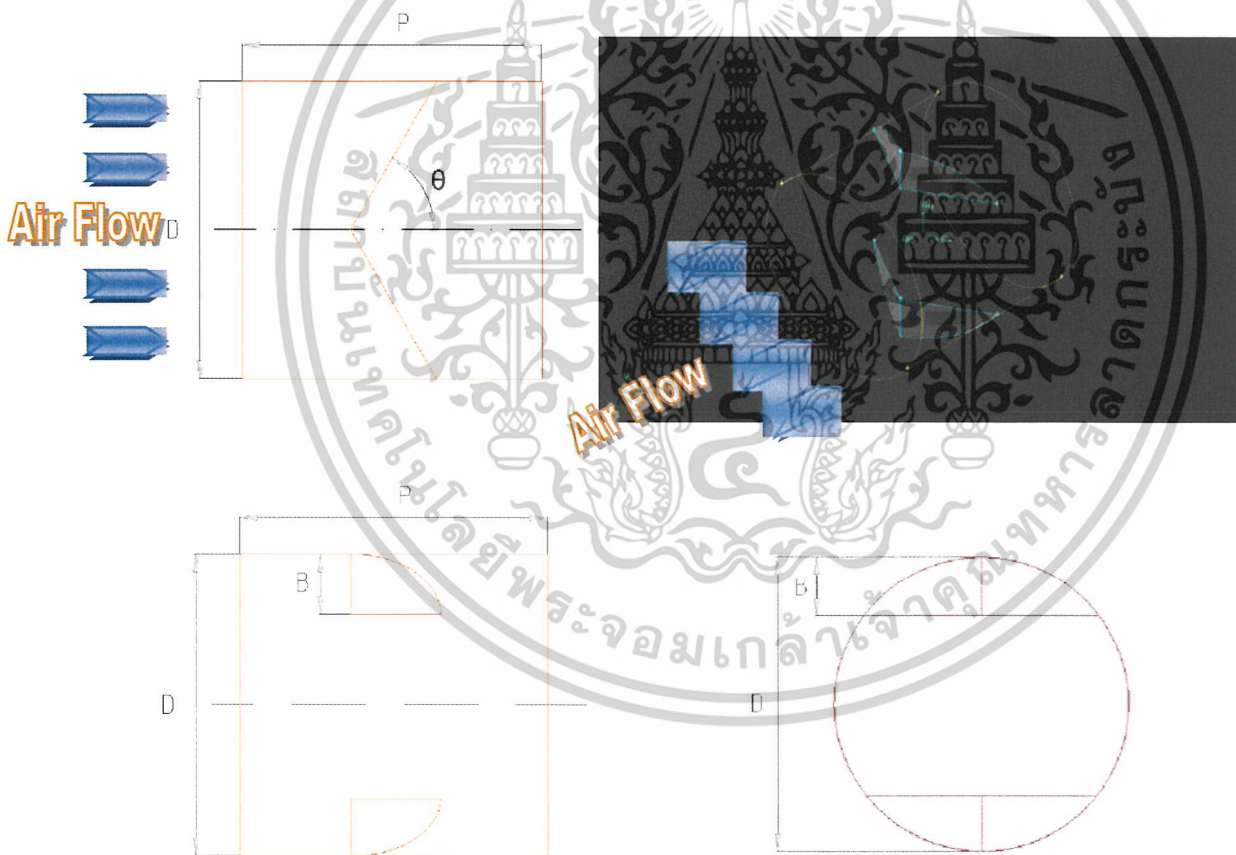
เมื่อตัวห้อย d แทนตำแหน่งต่างๆของผิวเซลล์ในปริมาตรควบคุมที่พิจารณา โดยเทียบกับกลุ่มสัมประสิทธิ์ในสมการ (3.33) และ (3.34) เช่นตำแหน่งผิวเซลล์ P, E, W, N, S, EE เป็นต้น ซึ่งมีสัมประสิทธิ์การพา และการแพร่เป็นไปตามสมการ (3.35) และ (3.38)

บทที่ 4

วิธีการทดลอง

4.1 บทนำ

ในบทนี้แสดงแบบจำลองการวิเคราะห์ในโปรแกรม Fluent ซึ่งเราได้สร้างแบบจำลองสำหรับการไหลแบบลามินาร์ (Laminar) ผ่านท่อกลมที่มีอุณหภูมิผิวคงที่ที่มีลักษณะดังรูปที่ 4.1 ซึ่งแบ่งเป็นกรณีต่างๆ ได้ดังตารางที่ 4.1 โดยกำหนดให้ D คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีขนาดคงที่, B คือความสูงของครีบบนเปอร์เซ็นต์ของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อกลม, P คือระยะพิท, θ คือมุมปะทะ (half angle of v-shape ribs)



รูปที่ 4.1 แบบจำลองที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงลักษณะต่างๆของท่อกลมที่ใช้ในการทดลอง

θ (degree)	B	ลักษณะครีป	D (m)	P (m)
30	10 %	ครีปเดี่ยว	0.05	0.05
		ครีปคู่วางตรงกัน		
		ครีปคู่วางเอียงกัน		
	15 %	ครีปเดี่ยว		
		ครีปคู่วางตรงกัน		
		ครีปคู่วางเอียงกัน		
	20 %	ครีปเดี่ยว		
		ครีปคู่วางตรงกัน		
		ครีปคู่วางเอียงกัน		
45	10 %	ครีปเดี่ยว	0.05	0.05
		ครีปคู่วางตรงกัน		
		ครีปคู่วางเอียงกัน		
	15 %	ครีปเดี่ยว		
		ครีปคู่วางตรงกัน		
		ครีปคู่วางเอียงกัน		
	20 %	ครีปเดี่ยว		
		ครีปคู่วางตรงกัน		
		ครีปคู่วางเอียงกัน		
60	10 %	ครีปเดี่ยว	0.05	0.05
		ครีปคู่วางตรงกัน		
		ครีปคู่วางเอียงกัน		
	15 %	ครีปเดี่ยว		
		ครีปคู่วางตรงกัน		
		ครีปคู่วางเอียงกัน		
	20 %	ครีปเดี่ยว		
		ครีปคู่วางตรงกัน		
		ครีปคู่วางเอียงกัน		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การสร้างแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนผ่านท่อกลมที่ติดครีบริบตัววี

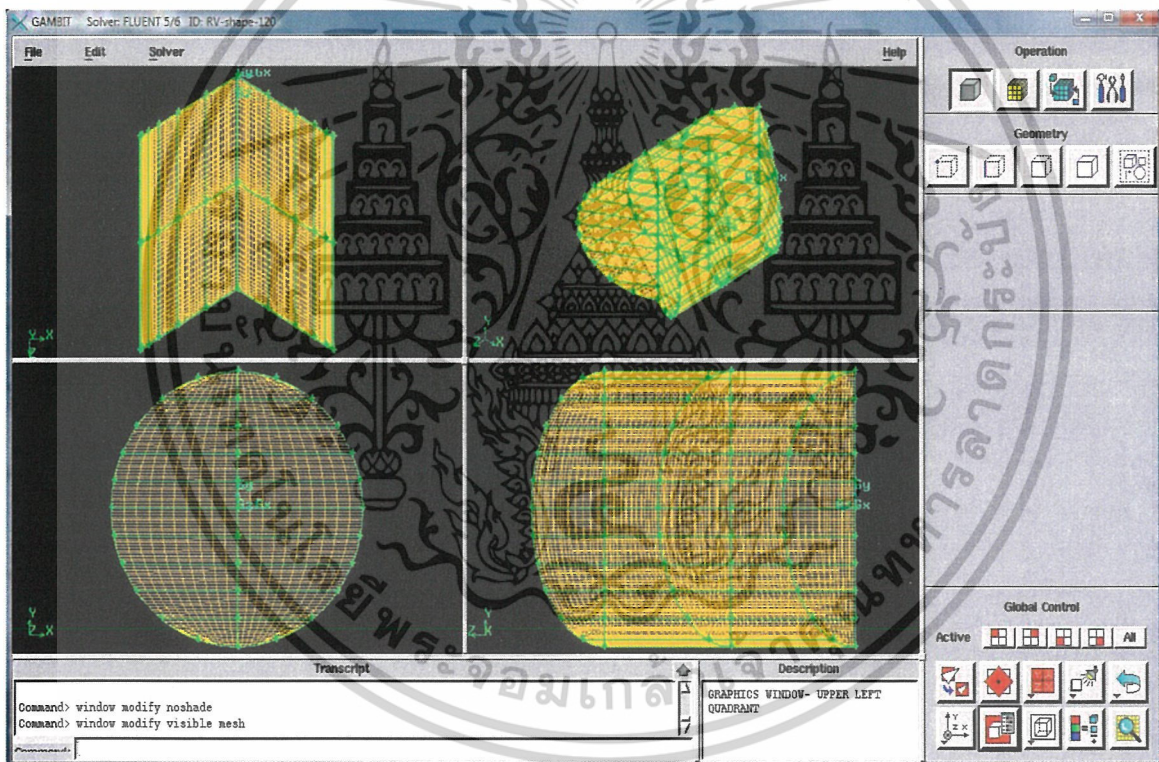
การสร้างแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนผ่านท่อกลมที่ติดครีบริบตัววีมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. สร้างแบบจำลองในโปรแกรม Gambit โดยสร้างแบบจำลองให้มีขนาดและลักษณะต่างๆ ดังตารางที่ 4.1

2. สร้างกริดในแบบจำลองดังรูปที่ 4.2

3. ทำการ Link Face Meshes โดยใช้คำสั่ง Link Face Meshes

4. กำหนดชนิดของเงื่อนไขขอบของแบบจำลอง จากรูปที่ 4.2 กำหนดให้ Face ด้านหน้าและด้านหลังเป็นเงื่อนไขขอบชนิด Periodic ผนังของท่อกำหนดเป็น Wall และครีบริบภายในท่อกำหนดเป็น wall เช่นกัน



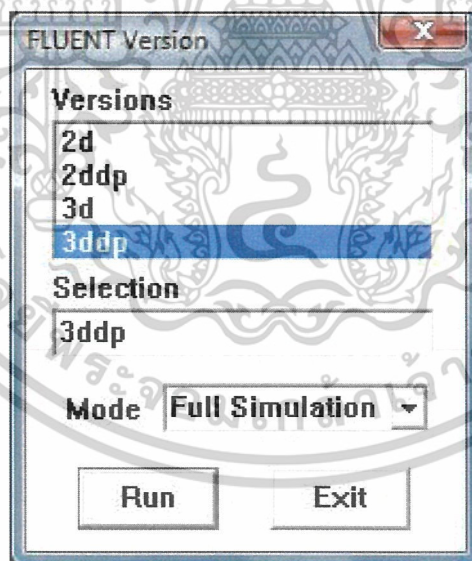
รูปที่ 4.2 แสดงการสร้างแบบจำลองในโปรแกรม Gambit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การใช้โปรแกรม Fluent ในการคำนวณ

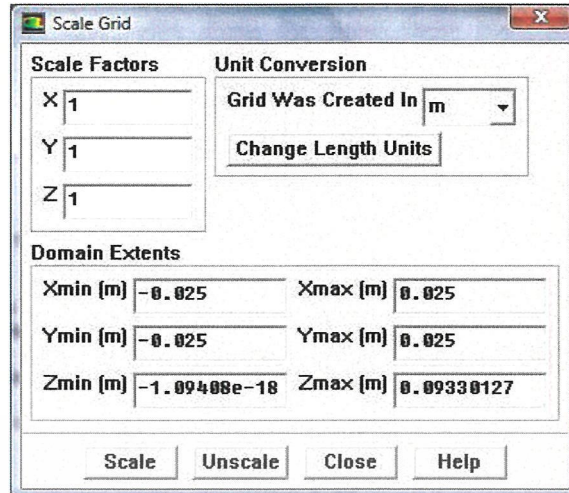
หลังจากการสร้างแบบจำลองขึ้นมาแล้ว ขั้นตอนต่อมาจะนำแบบจำลองมาคำนวณผ่านโปรแกรมไหลผลลย โดยในที่นี้จะใช้โปรแกรม Fluent โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เข้าสู่โปรแกรมและเลือก version การทำงาน โดยเลือกรูปแบบการทำงานให้มีความละเอียดเป็นสองเท่าโดยเลือก 3ddp ใน Fluent ดังรูปที่ 4.3
2. ทำการปรับ scale grid ให้มีขนาดเป็น cm ดังรูปที่ 4.4
3. ตั้งค่า Solver ในช่อง Solver เลือกเป็น Pressure Based ในช่อง Space เลือกเป็น 3D ในช่อง Velocity Formulation เลือกเป็น Absolute ในช่อง Gradient option เลือกเป็น Green-Gauss Cell Based ในช่อง formulation เลือกเป็น implicit ในช่อง Time เลือกเป็น Steady ดังรูปที่ 4.5
4. เลือกให้มีการคำนวณสมการพลังงาน ดังรูปที่ 4.6
5. การตั้งค่า Viscous Model ให้เลือกในช่อง Model เป็น Laminar ดังรูปที่ 4.7
6. การกำหนดคุณสมบัติของไหลซึ่งมีการกำหนดคุณสมบัติต่างๆ โดยเลือกใช้เป็นอากาศ มีความหนาแน่น 1.1614 kg/m^3 ความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ 1007 J/kg-K ค่าการนำความร้อน 0.0263 W/m-K ความหนืด $1.846(10^{-5}) \text{ kg/m-s}$ ดังรูปที่ 4.8

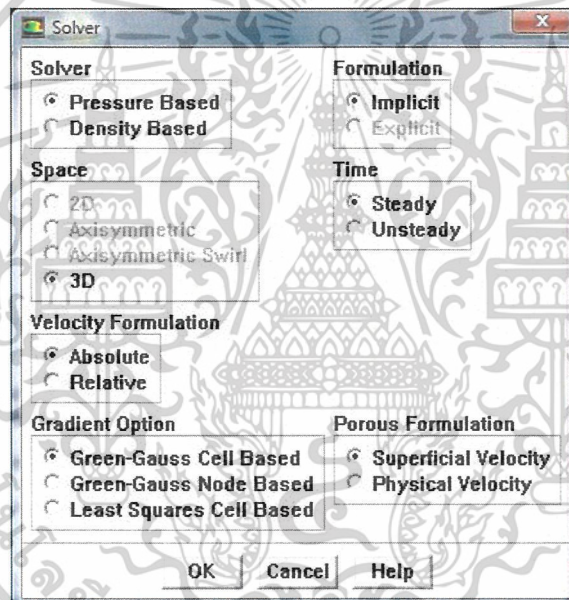


รูปที่ 4.3 การเลือก Version ในการทำงาน

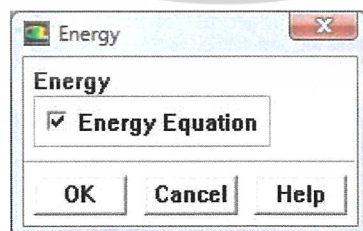
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 การปรับ Scale grid

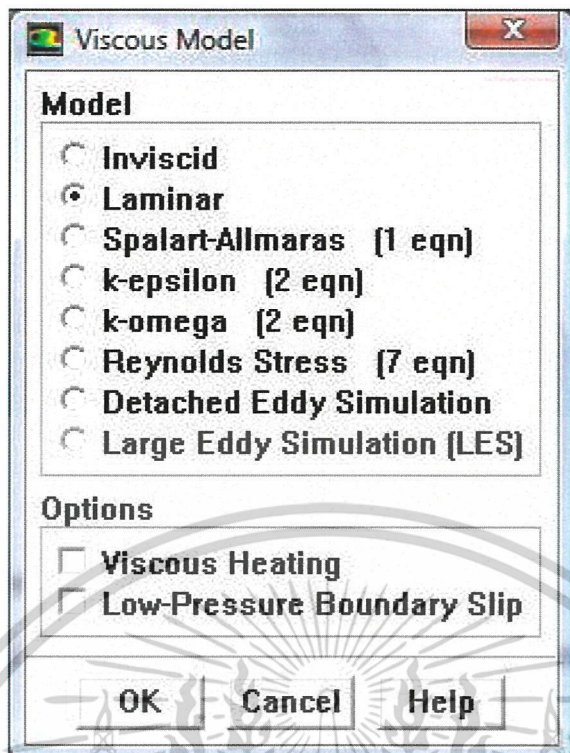


รูปที่ 4.5 การตั้งค่า Solver

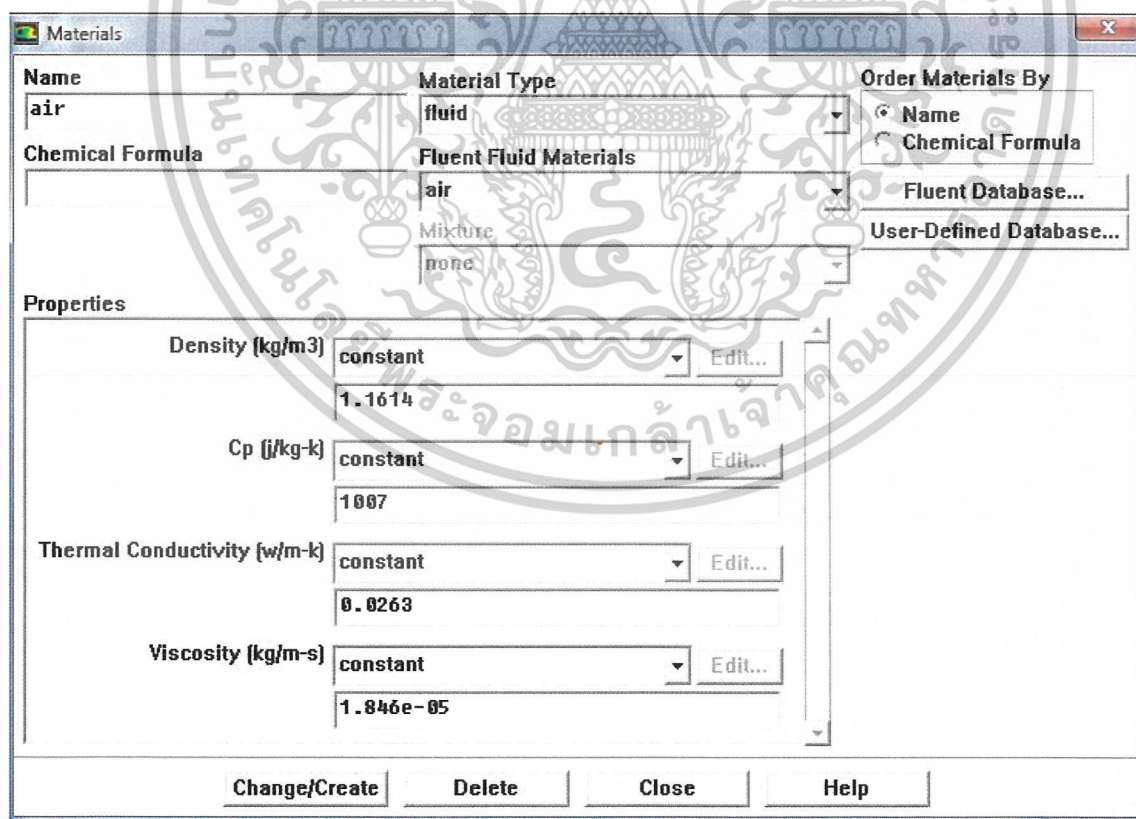


รูปที่ 4.6 ให้มีการคำนวณสมการพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 การตั้งค่า Viscous Model



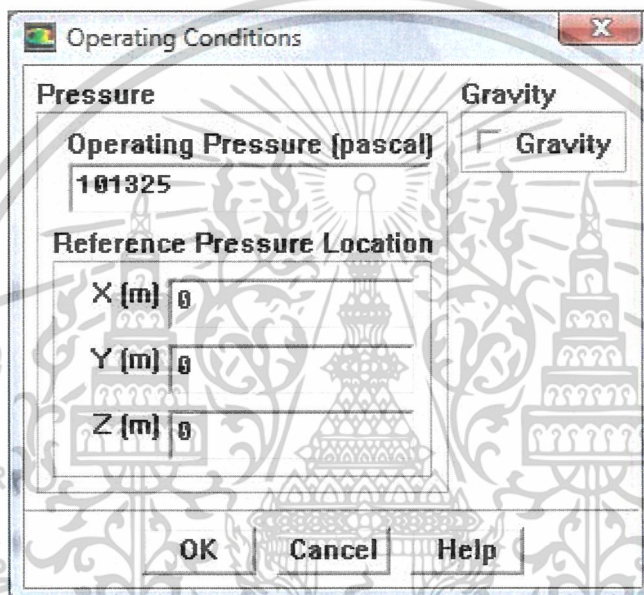
รูปที่ 4.8 แสดงการตั้งค่าคุณสมบัติของการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. กำหนดเงื่อนไขของการปฏิบัติงานให้มีความดัน 101325 Pa ที่ระยะอ้างอิงที่พิกัด $X = 0$, $Y = 0$ และ $Z = 0$ ใน Operating Conditions ดังรูปที่ 4.9

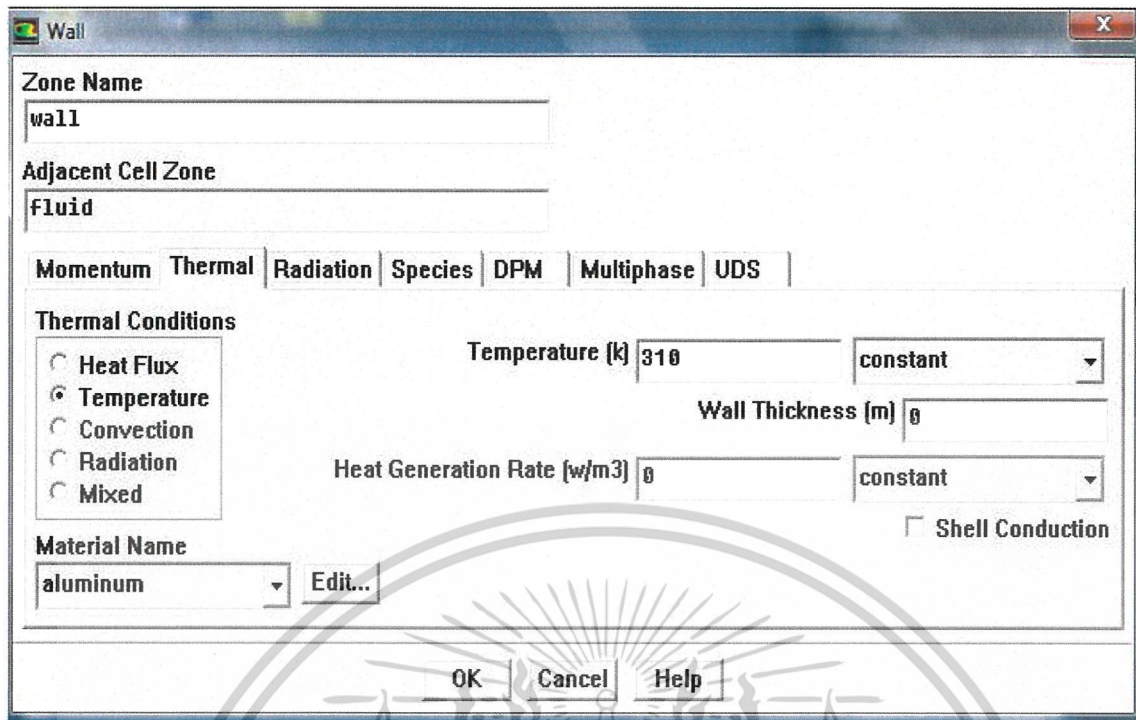
8. การปรับค่าคุณสมบัติของผนังให้เลือก Zone ชื่อ Wall ในแบบจำลองหลังจากนั้นเลือกที่ Thermal และเลือกที่ Temperature ในช่อง Thermal Conditions หลังจากนั้นทำการตั้งค่าอุณหภูมิให้มีค่า 310 K ดังรูปที่ 4.10

9. การปรับค่าคุณสมบัติของครีปให้เลือก Zone ชื่อ rib ในแบบจำลองหลังจากนั้นเลือกที่ Thermal และเลือกที่ Heat flux ในช่อง Thermal Conditions หลังจากนั้นตั้งค่า Heat flux ให้มีค่าเท่ากับ 0 ดังรูปที่ 4.11

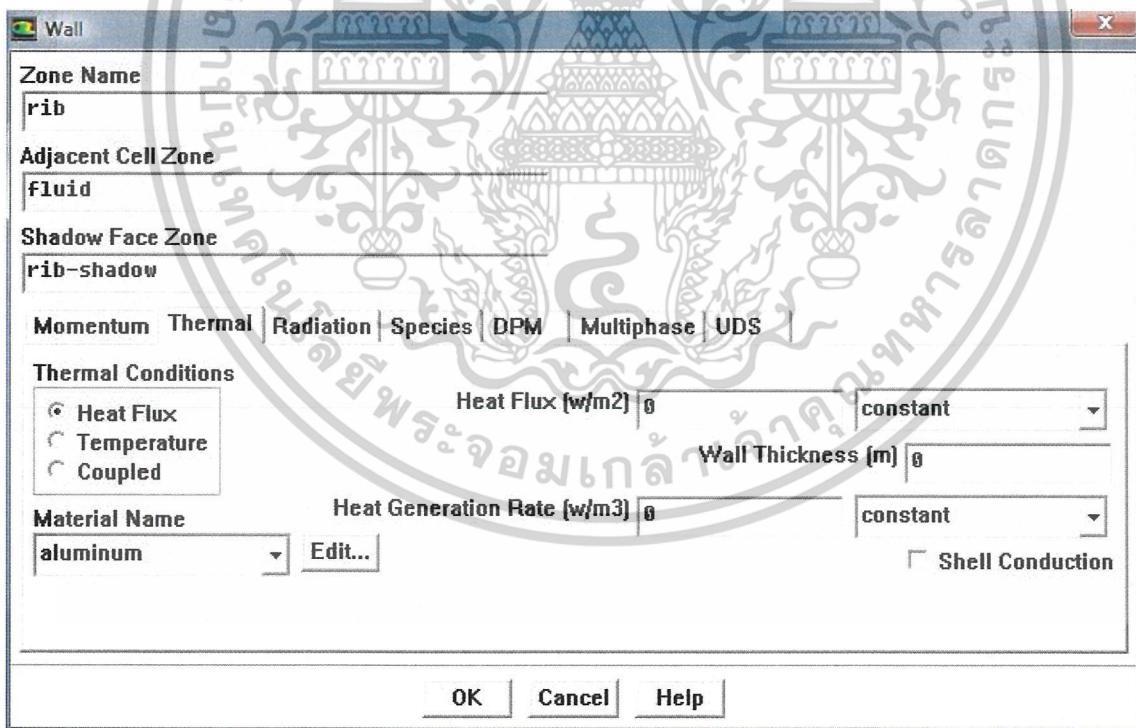


รูปที่ 4.9 การกำหนดค่า Operating Conditions

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



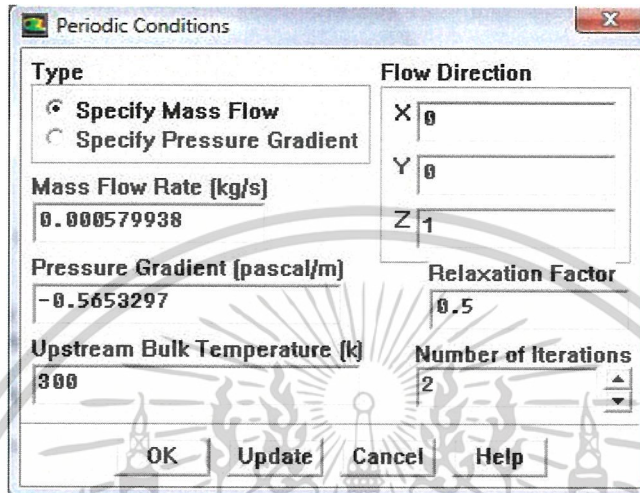
รูปที่ 4.10 การปรับค่าคุณสมบัติของผนัง



รูปที่ 4.11 การปรับค่าคุณสมบัติของครีบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. การปรับค่า Periodic Conditions โดยกำหนดอัตราการไหลของอากาศให้สอดคล้องกับค่าเลขเรย์โนลด์ส์ในช่อง Mass Flow Rate ใน Periodic Conditions ดังรูปที่ 4.12 โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าเลขเรย์โนลด์ส์กับอัตราการไหลของมวลมีค่าดังตารางที่ 4.2 และทำการกำหนดทิศทางการไหลของอากาศในช่อง Flow Direction โดยปรับค่าให้ค่า $Z = 1$ ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 แสดงการปรับค่า Periodic Conditions.

ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ส์กับอัตราการไหลของมวล (kg/s)

Re	Mass Flow Rate
100	$7.24923(10^{-5})$
200	$1.08738(10^{-4})$
300	$2.17477(10^{-4})$
400	$2.89969(10^{-4})$
500	$3.62461(10^{-4})$
600	$4.34954(10^{-4})$
700	$5.07446(10^{-4})$
800	$5.79938(10^{-4})$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

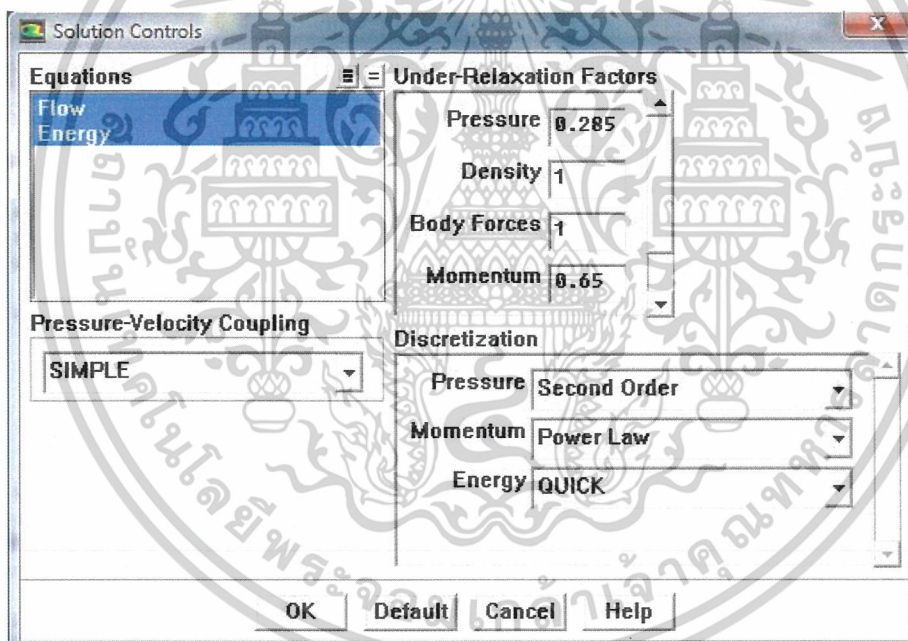
11. การตั้งค่า Solution Controls ในช่อง Under-Relaxation Factor ปรับค่า Pressure เป็น 0.285, Momentum เป็น 0.65 และ Energy เป็น 0.98 และในช่อง Discretization โดยกำหนดให้ Pressure, Momentum และ Energy เลือกการคำนวณสมการเป็นแบบ Second Order, Power Law และ QUICK ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.13

12. การปรับค่า Residual Monitors คือการตั้งค่าจุดสิ้นสุดของการคำนวณ ในช่อง Absolute Criteria ตั้งค่าของ Continuity, x-velocity, y-velocity, z-velocity เป็น 1×10^{-6} และตั้งค่าของ Energy เป็น 1×10^{-9} ดังรูปที่ 4.14

13. ค่าเริ่มต้นให้ความดันเป็น 0 Pa ความเร็วแกน x เป็น 0 m/s ความเร็วแกน y เป็น 0 m/s ความเร็วแกน z เป็น 0 m/s และอุณหภูมิเป็น 300 K ดังรูปที่ 4.15

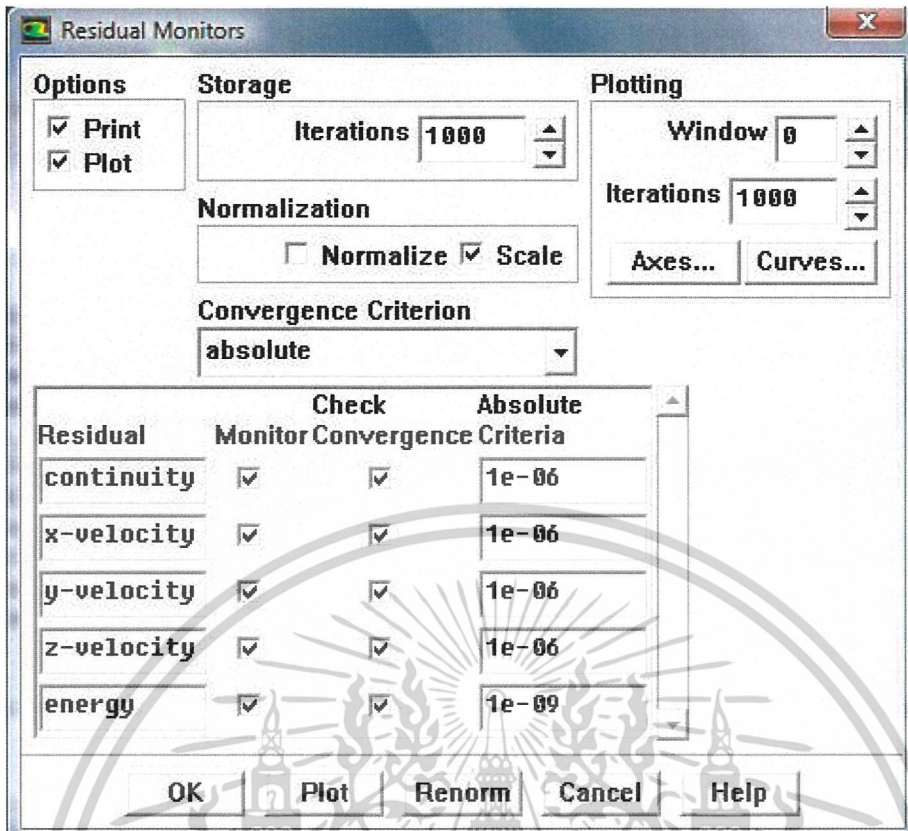
14. เริ่มการคำนวณสมการ โดยวิธีทำซ้ำจนกว่าผลการคำนวณจะลู่เข้าหาคำตอบ ดังรูปที่ 4.16

15. แสดงการรายงานผลโดยเลือกให้มีการรายงานผลในส่วนของ Surface Nusselt Number และ Pressure Gradient ดังรูปที่ 4.17

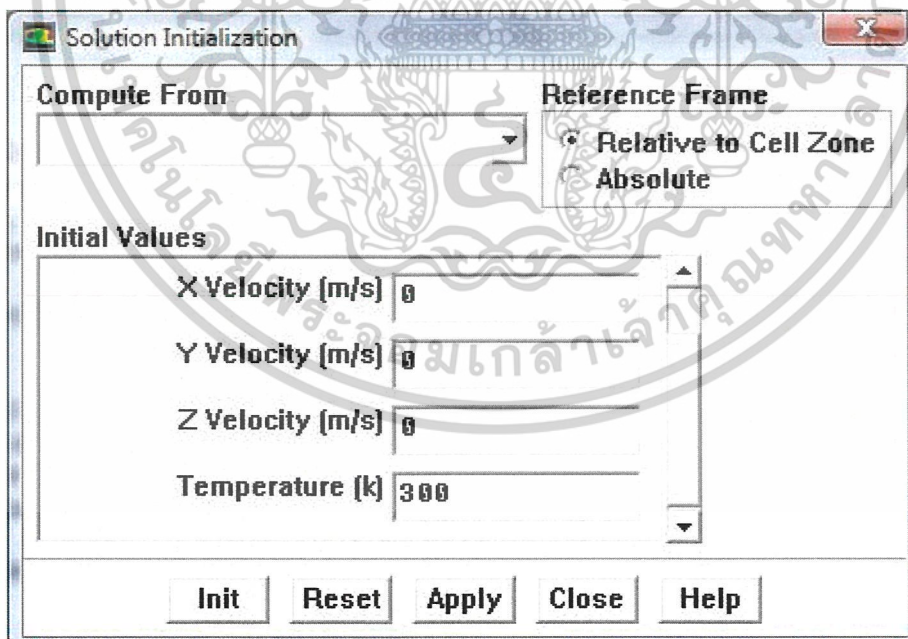


รูปที่ 4.13 แสดงการกำหนดค่า Solution Controls

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

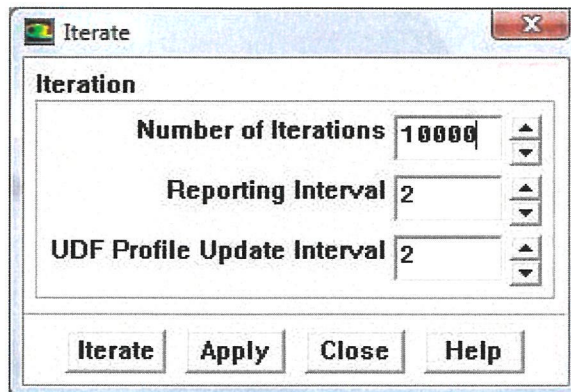


รูปที่ 4.14 แสดงการปรับค่า Residual Monitors

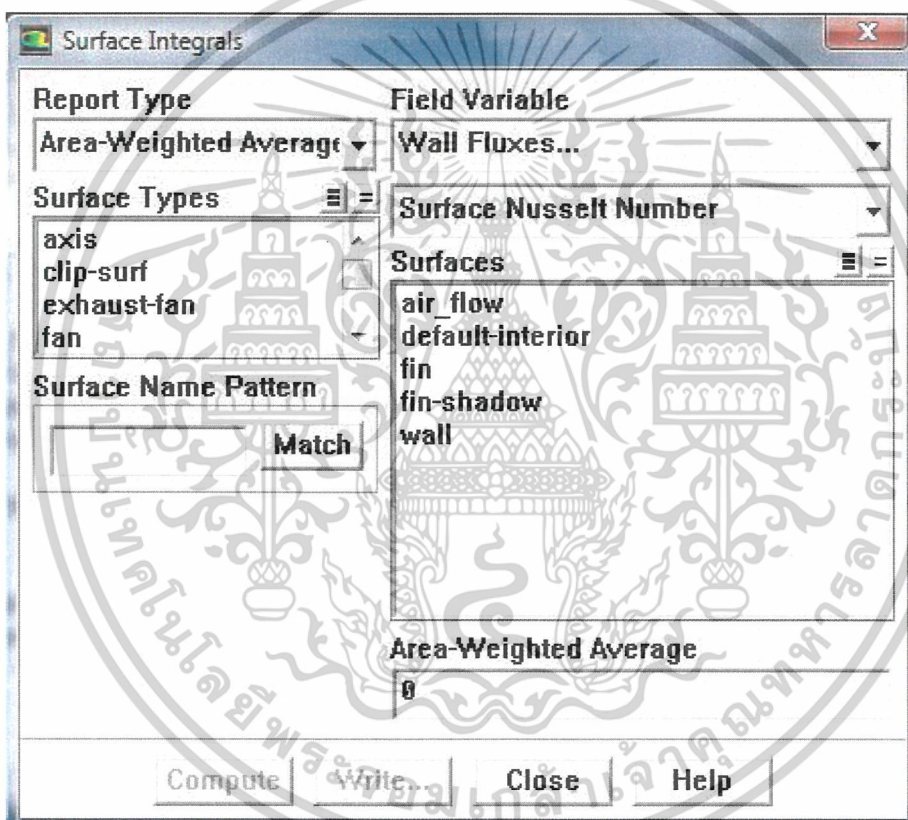


รูปที่ 4.15 การเดาค่าเริ่มต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 แสดงหน้าต่างที่เริ่มการคำนวณ



รูปที่ 4.17 แสดงการรายงานผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการทดลอง

5.1 บทนำ

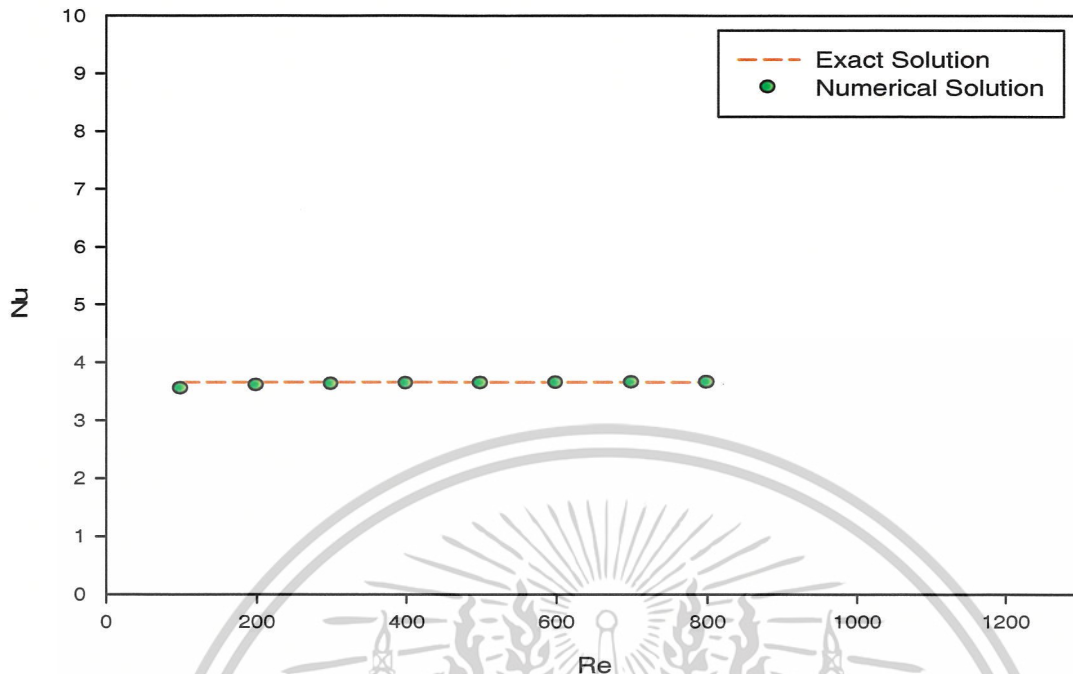
ในบทนี้จะกล่าวถึงการศึกษาการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานภายในท่อกลมที่ติดครีบริบรูปตัววี ในตอนแรกจะเป็นการเปรียบเทียบผลจากการจำลองการทำงาน โดยวิธีคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลและทฤษฎี จากนั้นจะนำเสนอผลการจำลองเปรียบเทียบในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงมุมปะทะของครีบริบ ความสูงของครีบริบ และลักษณะการวางตัวของครีบริบ

5.2 กรณีท่อกลมผิวเรียบ

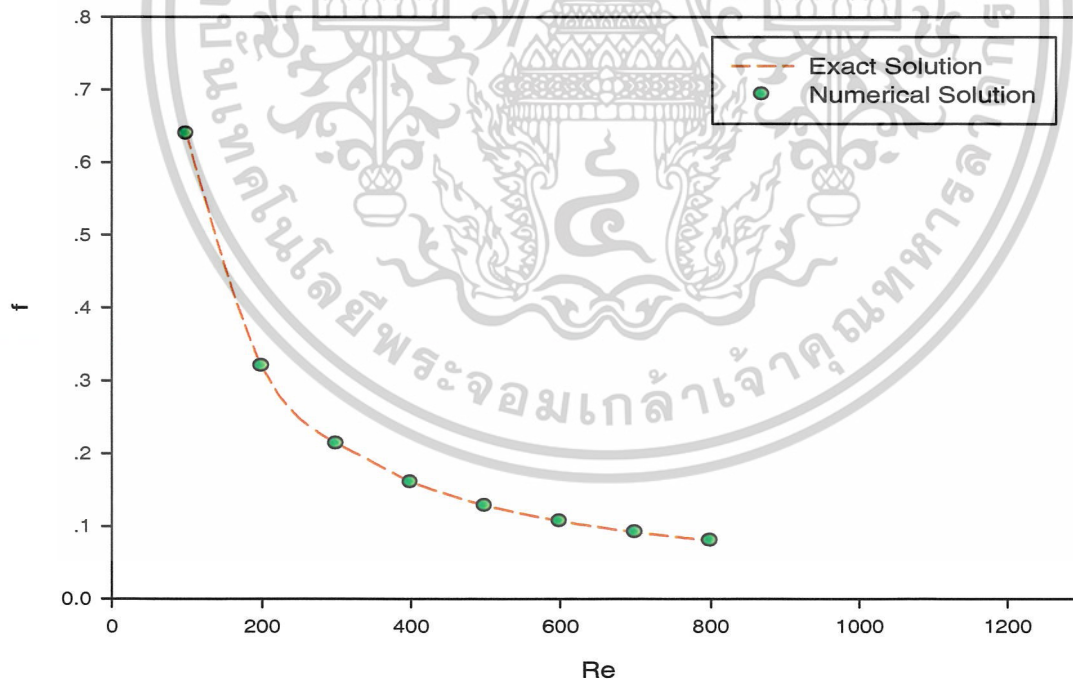
เริ่มต้นจะนำผลที่ได้จากการจำลองการทำงานนำมาเปรียบเทียบกับทฤษฎีในกรณีที่ท่อกลมมีผิวเรียบ โดยให้ความสนใจที่ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานผลจากการเปรียบเทียบนี้จะนำมาประเมินผลเพื่อหาความเหมาะสมน่าเชื่อถือของการจำลองการทำงาน ผลการเปรียบเทียบมีดังต่อไปนี้

รูปที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ส์กับเลขนัสเซิลท์ของท่อกลมผิวเรียบที่ได้จากการจำลองการทำงาน (Numerical Solution) และที่ได้จากทฤษฎี (Exact Solution) ซึ่งเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกันแล้วจะพบว่าค่าที่ได้จากการจำลองการไหลของอากาศจะมีความคลาดเคลื่อนกับทฤษฎีประมาณ 1.88%

รูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ส์กับตัวประกอบความเสียดทานของท่อกลมผิวเรียบที่ได้จากการจำลองการทำงาน (Numerical Solution) และที่ได้จากทฤษฎี (Exact Solution) ซึ่งเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกันแล้วจะพบว่าค่าที่ได้จากการจำลองการไหลของอากาศจะมีความคลาดเคลื่อนกับทฤษฎีประมาณ 0.13%



รูปที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ Nu ของท่อกลมผิวเรียบ



รูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ f ของท่อกลมผิวเรียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการจำลองการทำงานและค่าที่ได้จากทางทฤษฎีของท่อกลมผิวเรียบแล้วนั้นจะพบว่ามีความโน้มและมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ จึงสามารถนำค่าที่ได้จากการจำลองการทำงานนี้มาใช้อ้างอิงและวิเคราะห์ผลได้แม่นยำพอสมควร

5.3 ท่อกลมมีครีบริปตัววิที่มีการเปลี่ยนแปลงความสูงของครีบริปและลักษณะการวางตัวของครีบริปแบบต่างๆ โดยมุมปะทะของครีบริปมีค่าคงที่เท่ากับ 30°

จากผลที่ได้จากการจำลองการทำงานเมื่อกำหนดให้มุมปะทะของครีบริปมีค่าคงที่เท่ากับ 30° และมีการเปลี่ยนแปลงความสูงของครีบริปและลักษณะการวางตัวของครีบริป เพื่อหารูปแบบครีบริป ความสูงครีบริป และมุมปะทะของครีบริปตัววิ ที่ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนดีที่สุด

รูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ส์กับเลขนัสเซิลท์ของท่อกลมผิวเรียบ และท่อกลมมีครีบริปตัววิมีมุมปะทะเท่ากับ 30° ซึ่งมีความสูงเป็น 10%, 15%, 20% ของเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยในแต่ละความสูงจะมีลักษณะการวางตัวของครีบริปเป็นแบบครีบริปเดี่ยว ครีบริปคู่วางตรงกัน ครีบริปคู่วางเอียงกัน ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟจะพบว่าเลขเรย์โนลด์ส์ที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลทำให้เลขนัสเซิลท์มีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีเลขนัสเซิลท์มากที่สุดอยู่ที่ความสูง 20% และลักษณะการวางตัวของครีบริปแบบครีบริปคู่วางตรงกัน โดยมีเลขนัสเซิลท์อยู่ที่ 21.67 และเลขนัสเซิลท์น้อยที่สุดอยู่ที่ความสูง 10% และลักษณะการวางตัวของครีบริปแบบครีบริปเดี่ยว โดยมีเลขนัสเซิลท์อยู่ที่ 10.11

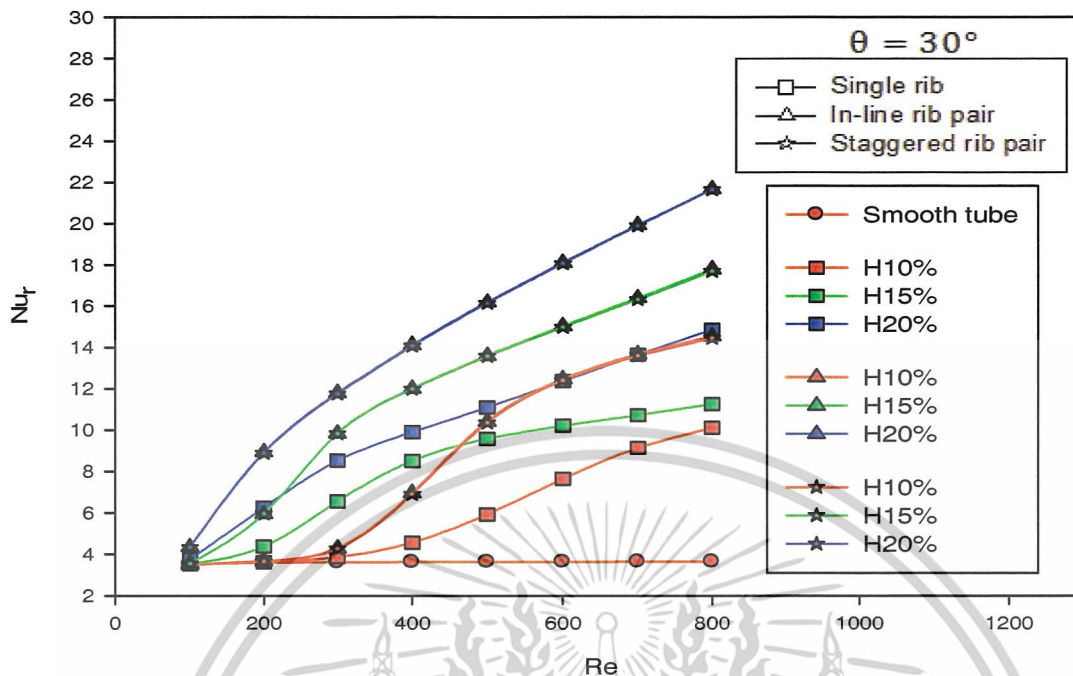
รูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ส์กับอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์ของท่อกลมมีครีบริปต่อเลขนัสเซิลท์ของท่อกลมผิวเรียบ (Nu_p/Nu_f) โดยท่อกลมมีครีบริปตัววิมีมุมปะทะเท่ากับ 30° ซึ่งมีความสูงเป็น 10%, 15%, 20% ของเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยแต่ละความสูงมีลักษณะการวางตัวของครีบริปเป็นแบบครีบริปเดี่ยว ครีบริปคู่วางตรงกัน ครีบริปคู่วางเอียงกัน ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟจะพบว่าเลขเรย์โนลด์ส์ที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลทำให้อัตราส่วนเลขนัสเซิลท์มีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์มากที่สุดอยู่ที่ความสูง 20% และลักษณะการวางตัวของครีบริปแบบครีบริปคู่วางตรงกัน โดยมีอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์อยู่ที่ 5.92 และอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์น้อยที่สุดอยู่ที่ความสูง 10% และลักษณะการวางตัวของครีบริปแบบครีบริปเดี่ยว โดยมีอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์อยู่ที่ 2.76

รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ส์กับตัวประกอบความเสียดทานของท่อกลมผิวเรียบ และท่อกลมมีครีบริปตัววิมีมุมปะทะเท่ากับ 30° ซึ่งมีความสูงเป็น 10%, 15%, 20% ของเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยแต่ละความสูงมีลักษณะการวางตัวของครีบริปเป็นแบบครีบริปเดี่ยว ครีบริปคู่วางตรงกัน ครีบริปคู่วางเอียงกัน ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟจะพบว่าเลขเรย์โนลด์ส์ที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลทำให้ตัวประกอบความเสียดทานมีค่าลดลง โดยมีค่าตัวประกอบความเสียดทานมากที่สุดอยู่ที่ความสูง 20% และลักษณะการวางตัวของครีบริปแบบครีบริปคู่วางตรงกัน โดยมีค่าตัวประกอบความเสียดทานอยู่ที่ 0.76

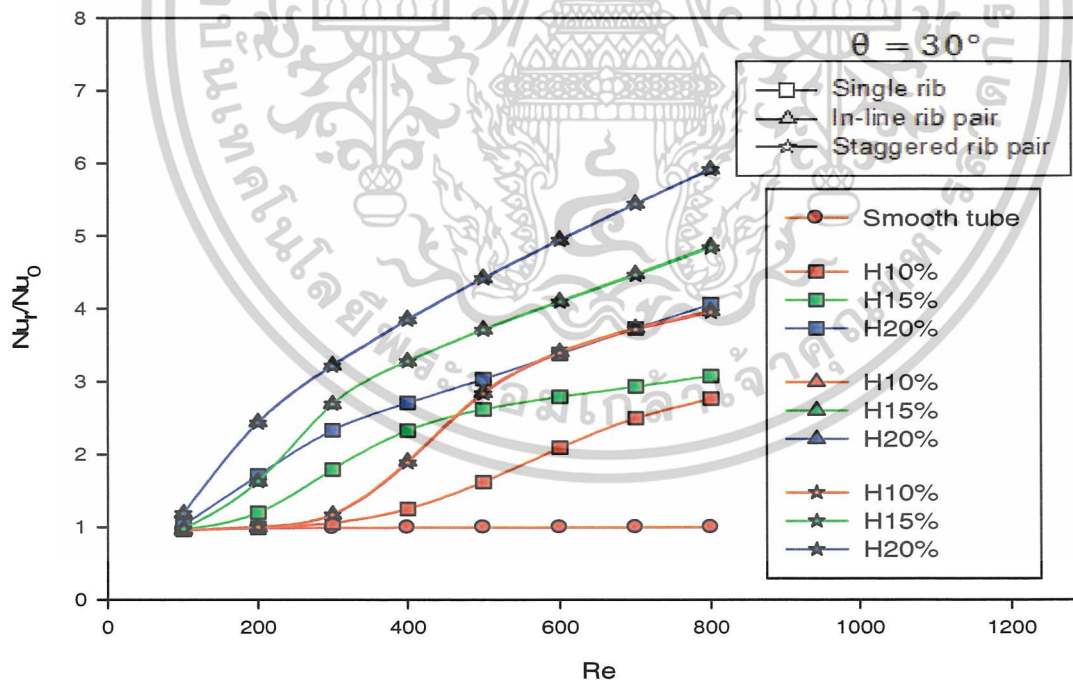
และค่าตัวประกอบความเสียหายน้อยที่สุดอยู่ที่ความสูง 10% และลักษณะการวางตัวของครีบบนแบบครีบบนเดี่ยวโดยมีค่าตัวประกอบความเสียหายอยู่ที่ 0.19

รูปที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ส์กับอัตราส่วนตัวประกอบความเสียหายของท่อกลมมีครีบบนต่อตัวประกอบความเสียหายของท่อกลมผิวเรียบ (f/f_0) โดยท่อกลมมีครีบบนรูปตัววีมีมุมปะทะเท่ากับ 30° ซึ่งมีความสูงเป็น 10%, 15%, 20% ของเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยแต่ละความสูงมีลักษณะการวางตัวของครีบบนเป็นแบบครีบบนเดี่ยว ครีบบนคู่วางตรงกัน ครีบบนคู่วางเอียงกัน ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟจะพบว่าเลขเรย์โนลด์ส์ที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลทำให้อัตราส่วนตัวประกอบความเสียหายมีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีค่าอัตราส่วนตัวประกอบความเสียหายมากที่สุดอยู่ที่ความสูง 20% และลักษณะการวางตัวของครีบบนแบบครีบบนคู่วางตรงกัน โดยมีค่าอัตราส่วนตัวประกอบความเสียหายอยู่ที่ 9.44 และค่าอัตราส่วนตัวประกอบความเสียหายน้อยที่สุดอยู่ที่ความสูง 10% และลักษณะการวางตัวของครีบบนแบบครีบบนเดี่ยวโดยมีค่าอัตราส่วนตัวประกอบความเสียหายอยู่ที่ 2.38

รูปที่ 5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ส์กับประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของท่อกลมมีครีบบนรูปตัววีมีมุมปะทะเท่ากับ 30° ซึ่งมีความสูงเป็น 10%, 15%, 20% ของเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยแต่ละความสูงมีลักษณะการวางตัวของครีบบนเป็นแบบครีบบนเดี่ยว ครีบบนคู่วางตรงกัน ครีบบนคู่วางเอียงกัน ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟจะพบว่าเลขเรย์โนลด์ส์ที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีค่าประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนมากที่สุดอยู่ที่ความสูง 20% และลักษณะการวางตัวของครีบบนแบบครีบบนคู่วางเอียงกัน โดยมีค่าประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนอยู่ที่ 2.80 และค่าประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนน้อยที่สุดอยู่ที่ความสูง 15% และลักษณะการวางตัวของครีบบนแบบครีบบนเดี่ยวโดยมีค่าอัตราส่วนตัวประกอบความเสียหายอยู่ที่ 2.06

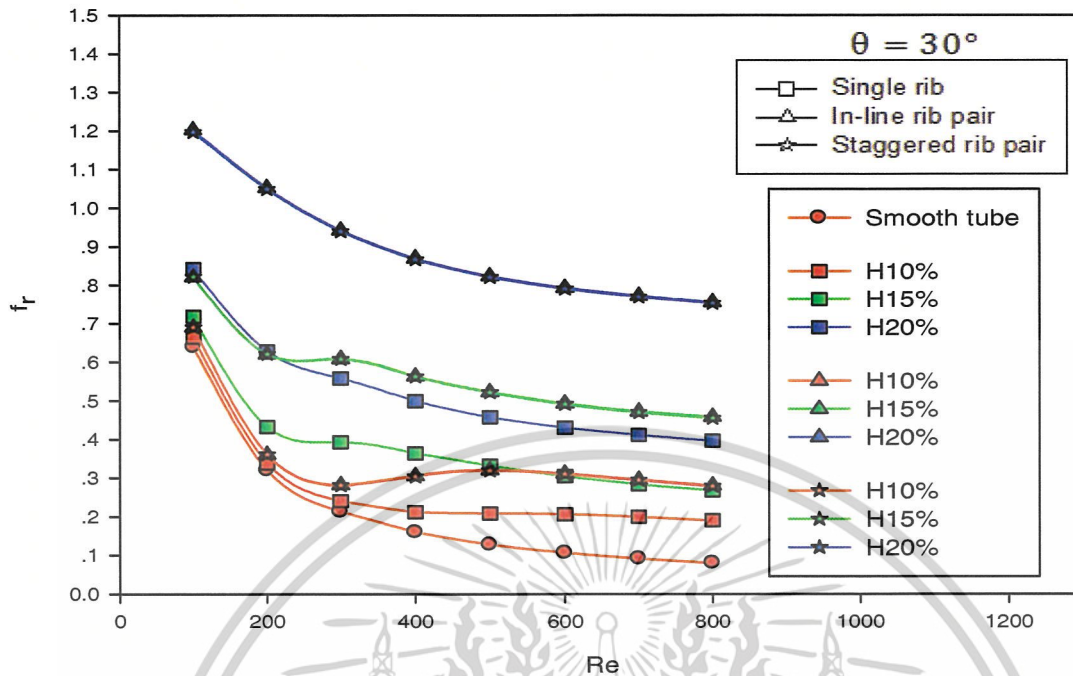


รูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ Nu_f กรณีครีบริบมีมุมปะทะ 30°

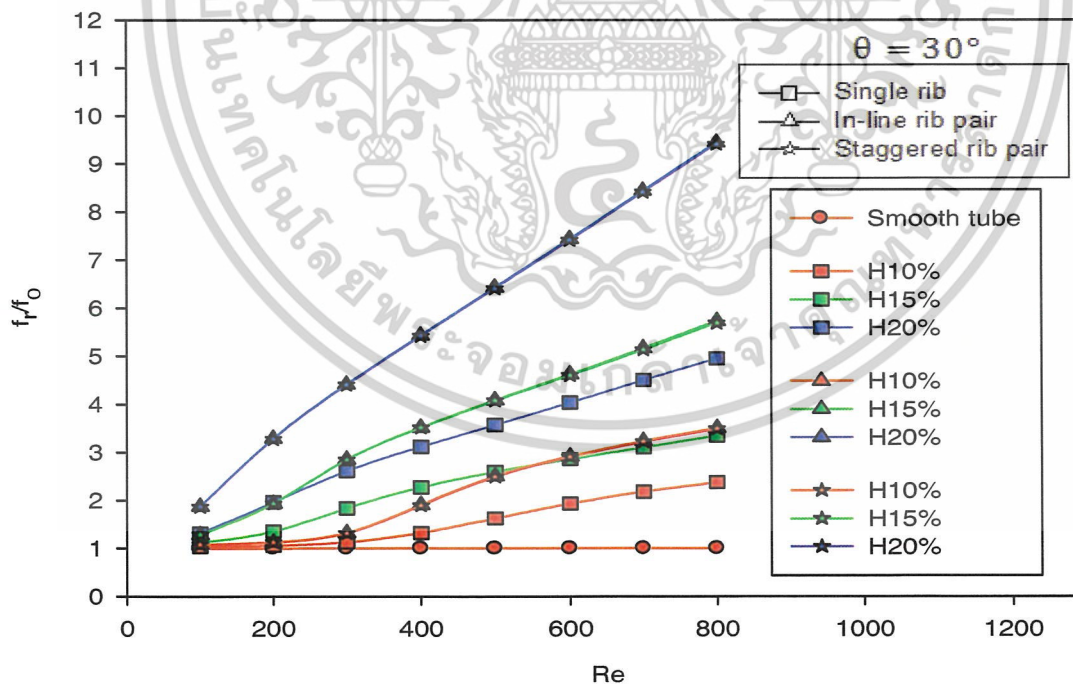


รูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ Nu_f/Nu_0 กรณีครีบริบมีมุมปะทะ 30°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

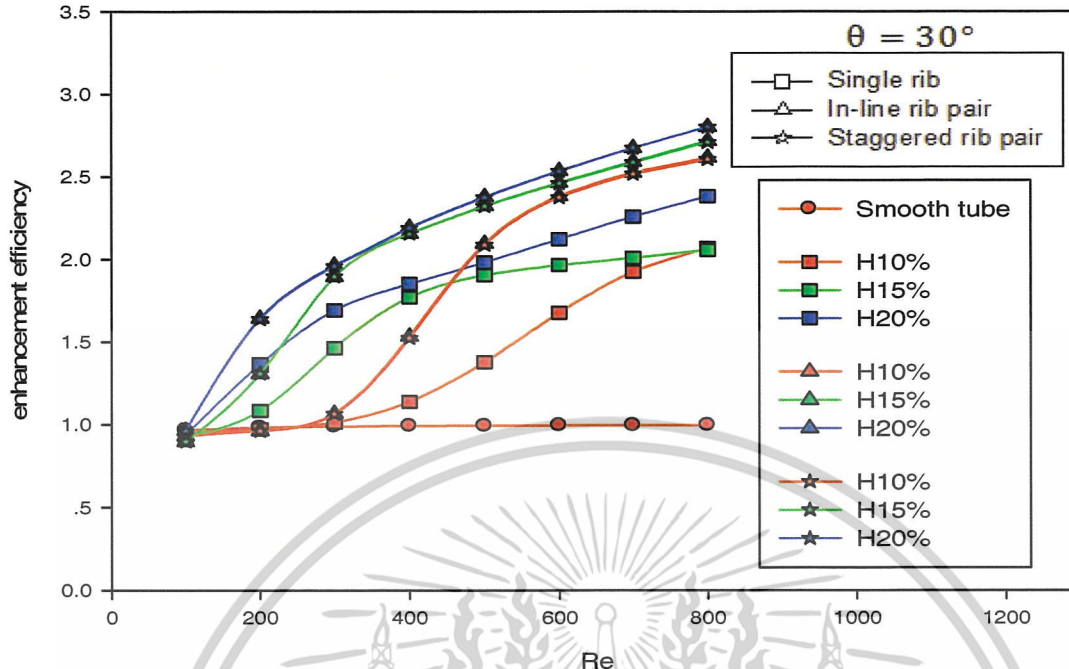


รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ f_r กรณีครีบริบมีมุมปะทะ 30°



รูปที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ f_r/f_0 กรณีครีบริบมีมุมปะทะ 30°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ enhancement efficiency กรณีครีบบีมุมปะทะ 30°

สรุปได้ว่าสำหรับท่อกลมมีครีบบรูปตัววีมีมุมปะทะเท่ากับ 30° ซึ่งมีความสูงเป็น 10%, 15%, 20% ของเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยแต่ละความสูงมีลักษณะการวางตัวของครีบบเป็นแบบครีบบเดี่ยว ครีบบคู่ วางตรงกัน ครีบบคู่วางเอียงกัน ดังนั้นการมีครีบบทำให้มีประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น โดยมีค่าประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนมากที่สุดอยู่ที่ความสูง 20% และลักษณะการวางตัวของครีบบแบบครีบบคู่วางเอียงกัน โดยมีค่าประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนอยู่ที่ 2.80 และค่าประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนน้อยที่สุดอยู่ที่ความสูง 15% และลักษณะการวางตัวของครีบบแบบครีบบเดี่ยว โดยมีค่าอัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานอยู่ที่ 2.06

5.4 ท่อกลมมีครีบบรูปตัววีที่มีการเปลี่ยนแปลงความสูงของครีบบและลักษณะการวางตัวของครีบบแบบต่างๆ โดยมีมุมปะทะของครีบบมีค่าคงที่เท่ากับ 45°

จากผลที่ได้จากการจำลองการทำงานเมื่อกำหนดให้มุมปะทะของครีบบมีค่าคงที่เท่ากับ 45° และมีการเปลี่ยนแปลงความสูงของครีบบและลักษณะการวางตัวของครีบบ เพื่อหารูปแบบครีบบ ความสูงครีบบ และมุมของครีบบรูปตัววี ที่ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนดีที่สุด

รูปที่ 5.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ส์กับเลขนัสเซิลท์ของท่อกลมผิวเรียบ และท่อกลมมีครีบบรูปตัววีมีมุมปะทะเท่ากับ 45° ซึ่งมีความสูงเป็น 10%, 15%, 20% ของเส้นผ่านศูนย์กลาง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยแต่ละความสูงมีลักษณะการวางตัวของครีบเป็นแบบครีบเดี่ยว ครีบลู่วางตรงกัน ครีบลู่วางเอียงกัน ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟจะพบว่าเลขเรย์โนลด์ส์ที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลทำให้เลขนัสเซิลท์มีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีเลขนัสเซิลท์มากที่สุดอยู่ที่ความสูง 20% และลักษณะการวางตัวของครีบแบบครีบลู่วางเอียงกัน โดยมีเลขนัสเซิลท์อยู่ที่ 19.23 และเลขนัสเซิลท์น้อยที่สุดอยู่ที่ความสูง 10% และลักษณะการวางตัวของครีบแบบครีบเดี่ยว โดยมีเลขนัสเซิลท์อยู่ที่ 8.96

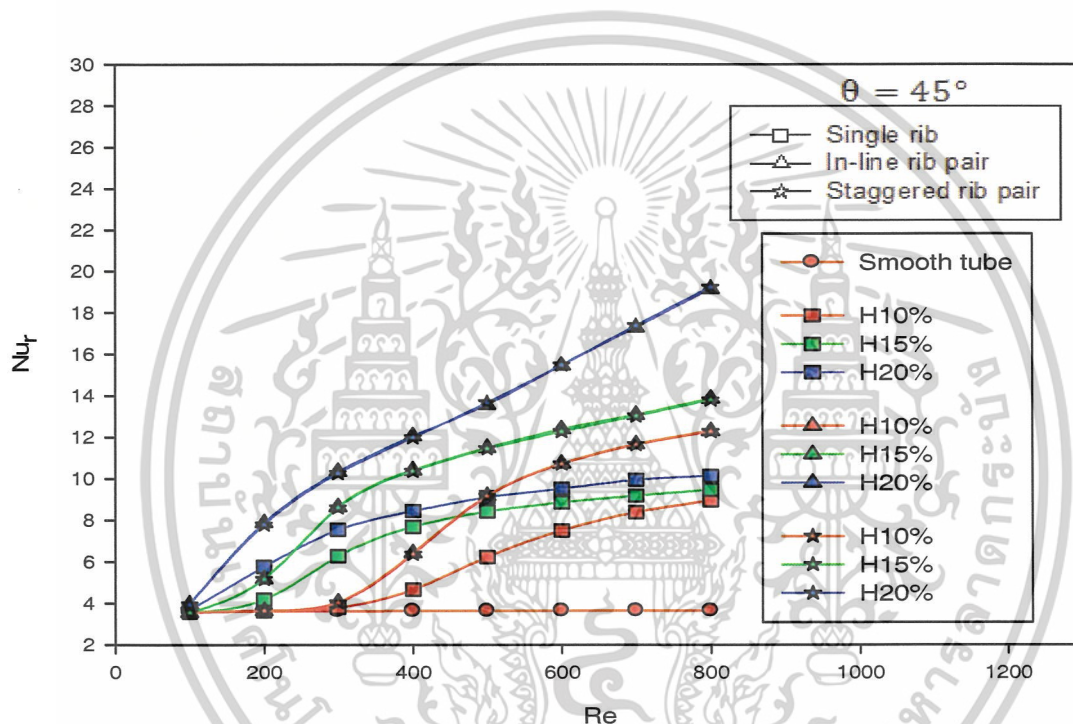
รูปที่ 5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ส์กับอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์ของท่อกลมมีครีบต่อเลขนัสเซิลท์ของท่อกลมผิวเรียบ (Nu_r/Nu_0) โดยท่อกลมมีครีบรูปตัววีมีมุมปะทะเท่ากับ 45° ซึ่งมีความสูงเป็น 10%, 15%, 20% ของเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยแต่ละความสูงมีลักษณะการวางตัวของครีบเป็นแบบครีบเดี่ยว ครีบลู่วางตรงกัน ครีบลู่วางเอียงกัน ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟจะพบว่าเลขเรย์โนลด์ส์ที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลทำให้อัตราส่วนเลขนัสเซิลท์มีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์มากที่สุดอยู่ที่ความสูง 20% และลักษณะการวางตัวของครีบแบบครีบลู่วางเอียงกัน โดยมีอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์อยู่ที่ 5.26 และอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์น้อยที่สุดอยู่ที่ความสูง 10% และลักษณะการวางตัวของครีบแบบครีบเดี่ยว โดยมีอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์อยู่ที่ 2.45

รูปที่ 5.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ส์กับตัวประกอบความเสียดทานของท่อกลมผิวเรียบ และท่อกลมมีครีบรูปตัววีมีมุมปะทะเท่ากับ 45° ซึ่งมีความสูงเป็น 10%, 15%, 20% ของเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยแต่ละความสูงมีลักษณะการวางตัวของครีบเป็นแบบครีบเดี่ยว ครีบลู่วางตรงกัน ครีบลู่วางเอียงกัน ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟจะพบว่าเลขเรย์โนลด์ส์ที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลทำให้ตัวประกอบความเสียดทานมีค่าลดลง โดยมีค่าตัวประกอบความเสียดทานมากที่สุดอยู่ที่ความสูง 20% และลักษณะการวางตัวของครีบแบบครีบลู่วางเอียงกัน โดยมีค่าตัวประกอบความเสียดทานอยู่ที่ 0.84 และค่าตัวประกอบความเสียดทานน้อยที่สุดอยู่ที่ความสูง 10% และลักษณะการวางตัวของครีบแบบครีบเดี่ยว โดยมีค่าตัวประกอบความเสียดทานอยู่ที่ 0.17

รูปที่ 5.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ส์กับอัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานของท่อกลมมีครีบต่อตัวประกอบความเสียดทานของท่อกลมผิวเรียบ (f_r/f_0) โดยท่อกลมมีครีบรูปตัววีมีมุมปะทะเท่ากับ 45° ซึ่งมีความสูงเป็น 10%, 15%, 20% ของเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยแต่ละความสูงมีลักษณะการวางตัวของครีบเป็นแบบครีบเดี่ยว ครีบลู่วางตรงกัน ครีบลู่วางเอียงกัน ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟจะพบว่าเลขเรย์โนลด์ส์ที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลทำให้อัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีค่าอัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานมากที่สุดอยู่ที่ความสูง 20% และลักษณะการวางตัวของครีบแบบครีบลู่วางเอียงกัน โดยมีค่าอัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานอยู่ที่ 10.47 และค่าอัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานน้อยที่สุดอยู่ที่ความสูง 10% และลักษณะการวางตัวของครีบแบบครีบเดี่ยว โดยมีค่าอัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานอยู่ที่ 2.09

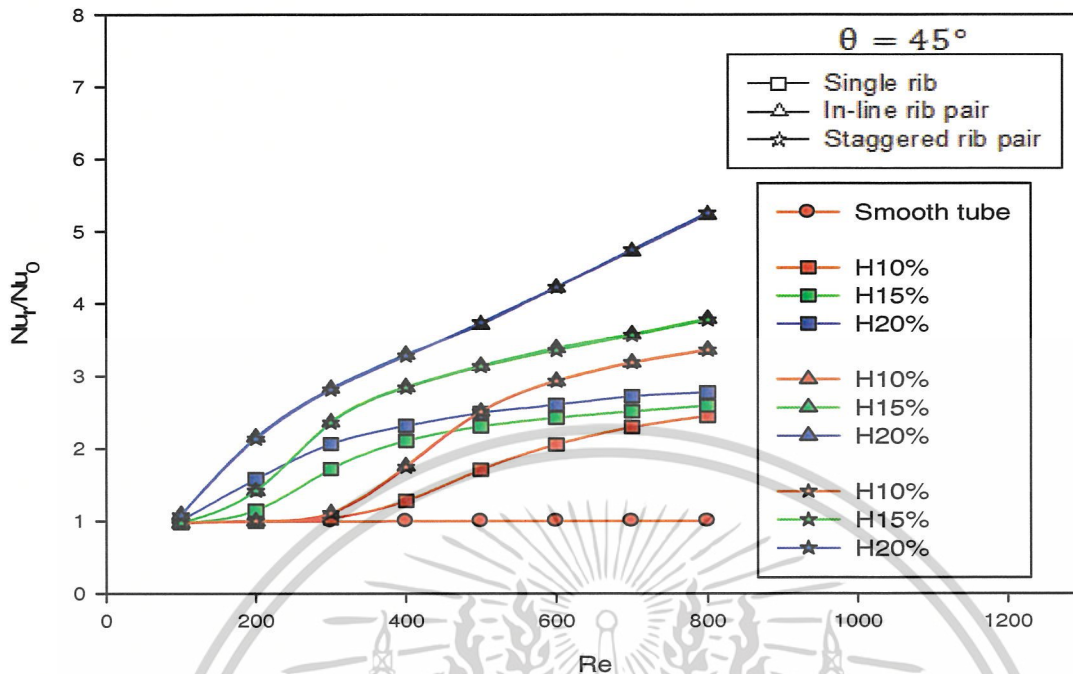
รูปที่ 5.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ส์กับประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของท่อกลมผิวเรียบ และท่อกลมมีครีบรูปตัววีมีมุมปะทะเท่ากับ 45° ซึ่งมีความสูง

เป็น 10%, 15%, 20% ของเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยแต่ละความสูงมีลักษณะการวางตัวของครีบบนแบบครีบเดี่ยว ครีบลูกวางตรงกัน ครีบลูกวางเอียงกัน ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟจะพบว่าเลขเรย์โนลด์ส์ที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีค่าประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนมากที่สุดอยู่ที่ความสูง 20% และลักษณะการวางตัวของครีบแบบครีบลูกวางตรงกัน โดยมีค่าประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนอยู่ที่ 2.43 และค่าประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนน้อยที่สุดอยู่ที่ความสูง 15% และลักษณะการวางตัวของครีบแบบครีบเดี่ยว โดยมีค่าอัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานอยู่ที่ 1.81

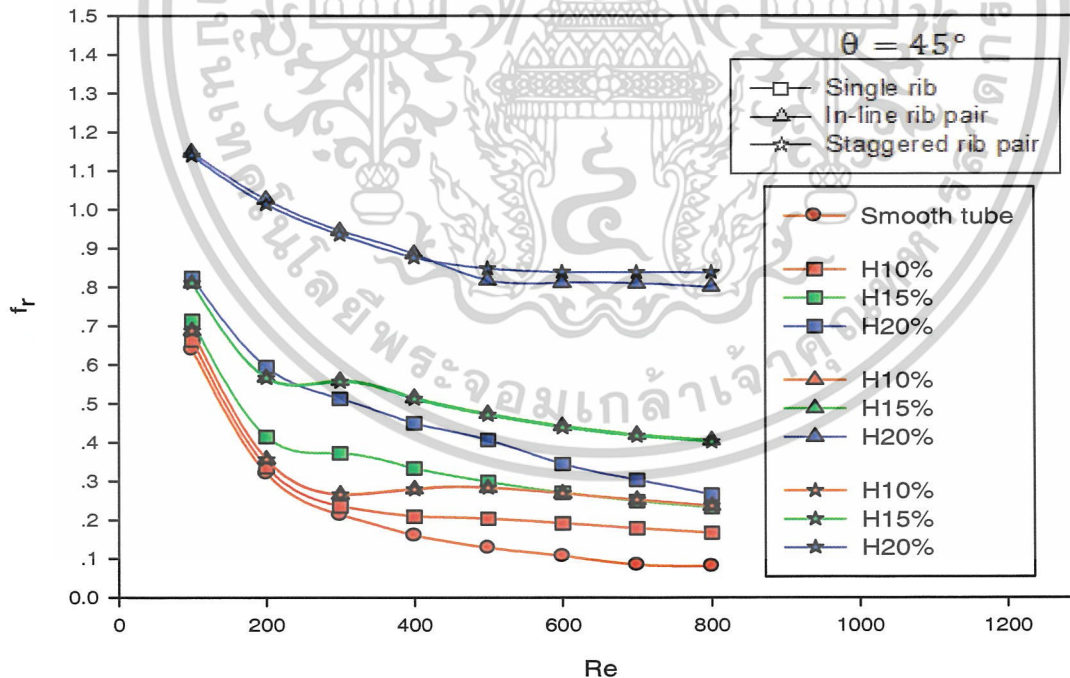


รูปที่ 5.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ Nu_r กรณีครีบบนมีมุมปะทะ 45°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

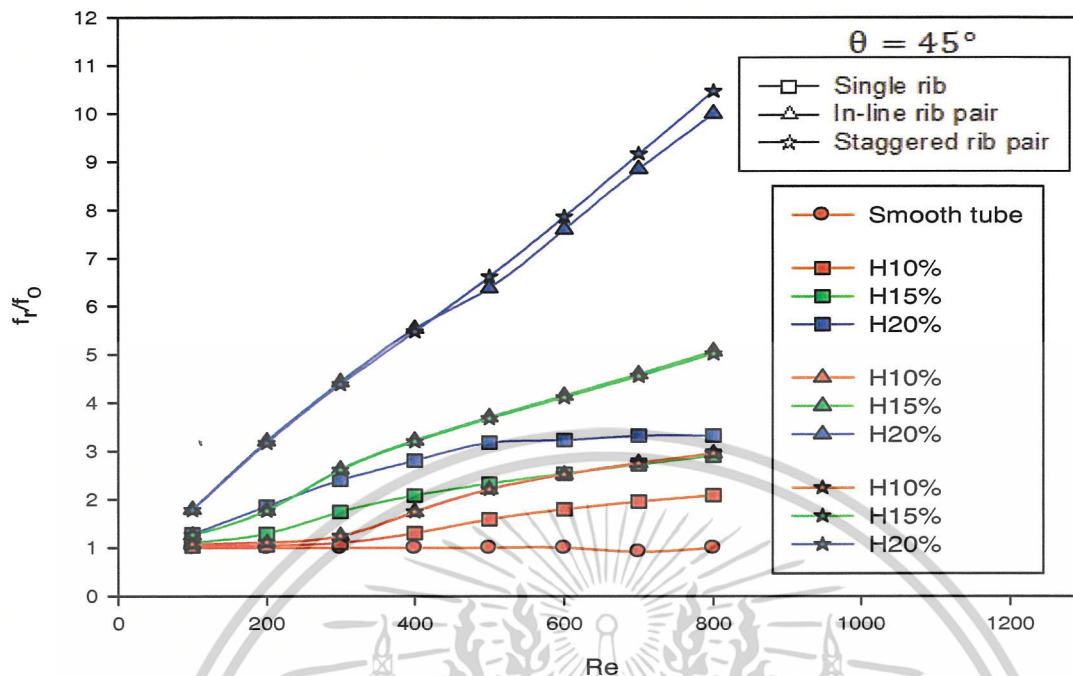


รูปที่ 5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ Nu_t/Nu_0 กรณีคี่รีบมีมุมปะทะ 45°

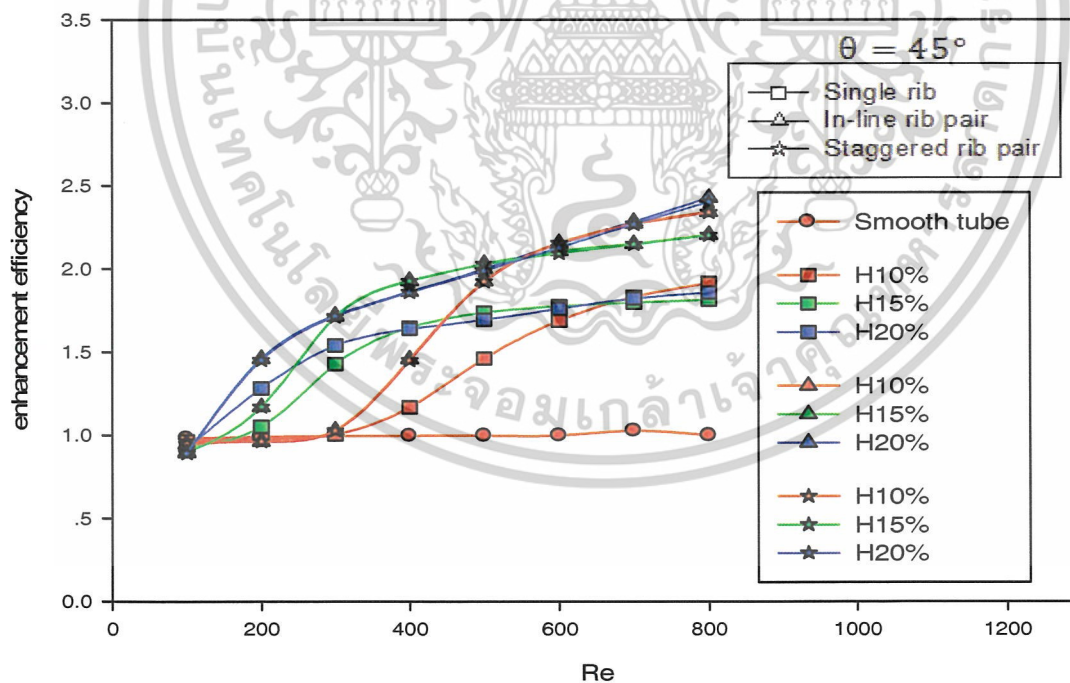


รูปที่ 5.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ f_r กรณีคี่รีบมีมุมปะทะ 45°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ f/f_0 กรณีครีบริบมุมปะทะ 45°



รูปที่ 5.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ enhancement efficiency กรณีครีบริบมุมปะทะ 45°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปได้ว่าสำหรับท่อกลมมีครีบริปรูปตัววีมีมุมปะทะเท่ากับ 45° ซึ่งมีความสูงเป็น 10%, 15%, 20% ของเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยแต่ละความสูงมีลักษณะการวางตัวของครีบริปเป็นแบบครีบริปเดี่ยว ครีบริปคู่ วางตรงกัน ครีบริปคู่วางเอียงกัน ดังนั้นการมีครีบริปทำให้มีประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น โดยมีค่าประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนมากที่สุดอยู่ที่ความสูง 20% และลักษณะการวางตัวของครีบริปแบบครีบริปคู่วางตรงกัน โดยมีค่าประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนอยู่ที่ 2.43 และค่าประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนน้อยที่สุดอยู่ที่ความสูง 15% และลักษณะการวางตัวของครีบริปแบบครีบริปเดี่ยว โดยมีค่าอัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานอยู่ที่ 1.81

5.5 ท่อกลมมีครีบริปรูปตัววีที่มีการเปลี่ยนแปลงความสูงของครีบริปและลักษณะการวางตัวของครีบริป โดยมุมปะทะของครีบริปมีค่าคงที่เท่ากับ 60°

จากผลที่ได้จากการจำลองการทำงานเมื่อกำหนดให้มุมปะทะของครีบริปมีค่าคงที่เท่ากับ 60° และมีการเปลี่ยนแปลงความสูงของครีบริปและลักษณะการวางตัวของครีบริป เพื่อหารูปแบบครีบริป ความสูงครีบริป และมุมของครีบริปรูปตัววี ที่ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนดีที่สุด

รูปที่ 5.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ส์กับเลขนัสเซิลท์ของท่อกลมผิวเรียบ และท่อกลมมีครีบริปรูปตัววีมีมุมปะทะเท่ากับ 60° ซึ่งมีความสูงเป็น 10%, 15%, 20% ของเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยแต่ละความสูงมีลักษณะการวางตัวของครีบริปเป็นแบบครีบริปเดี่ยว ครีบริปคู่วางตรงกัน ครีบริปคู่วางเอียงกัน ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟจะพบว่าเลขเรย์โนลด์ส์ที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลทำให้เลขนัสเซิลท์มีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีเลขนัสเซิลท์มากที่สุดอยู่ที่ความสูง 20% และลักษณะการวางตัวของครีบริปแบบครีบริปคู่วางเอียงกัน โดยมีเลขนัสเซิลท์อยู่ที่ 12.55 และเลขนัสเซิลท์น้อยที่สุดอยู่ที่ความสูง 10% และลักษณะการวางตัวของครีบริปแบบครีบริปเดี่ยว โดยมีเลขนัสเซิลท์อยู่ที่ 7.23

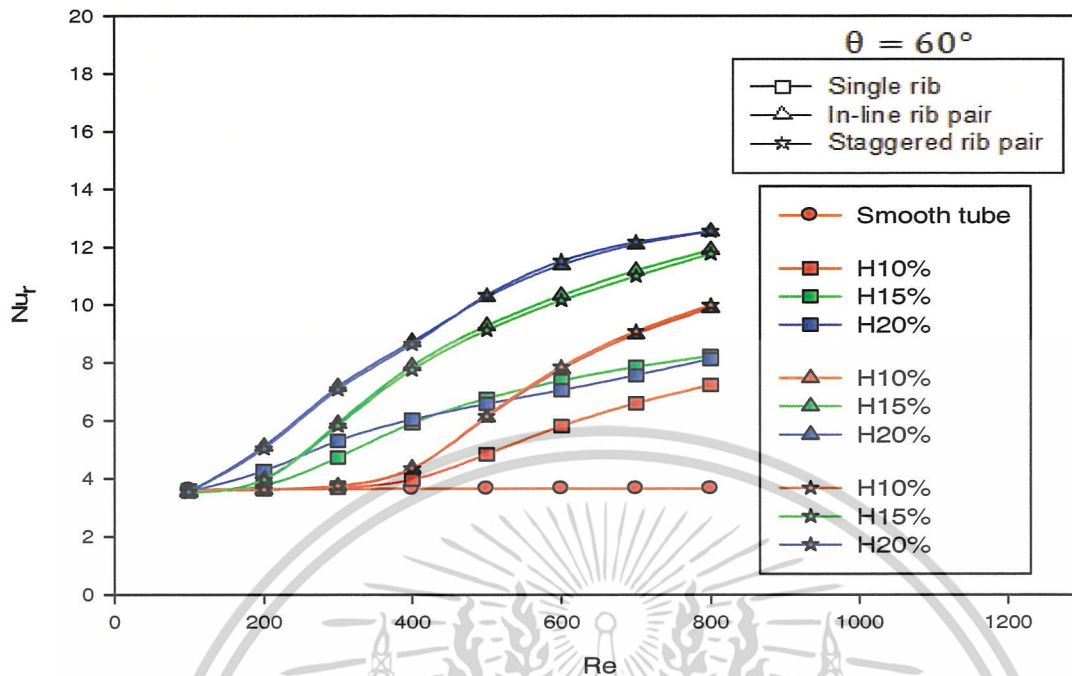
รูปที่ 5.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ส์กับอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์ของท่อกลมมีครีบริปต่อเลขนัสเซิลท์ของท่อกลมผิวเรียบ (Nu/Nu_0) โดยท่อกลมมีครีบริปรูปตัววีมีมุมปะทะเท่ากับ 60° ซึ่งมีความสูงเป็น 10%, 15%, 20% ของเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยแต่ละความสูงมีลักษณะการวางตัวของครีบริปเป็นแบบครีบริปเดี่ยว ครีบริปคู่วางตรงกัน ครีบริปคู่วางเอียงกัน ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟจะพบว่าเลขเรย์โนลด์ส์ที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลทำให้อัตราส่วนเลขนัสเซิลท์มีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์มากที่สุดอยู่ที่ความสูง 20% และลักษณะการวางตัวของครีบริปแบบครีบริปคู่วางเอียงกัน โดยมีอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์อยู่ที่ 3.43 และอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์น้อยที่สุดอยู่ที่ความสูง 10% และลักษณะการวางตัวของครีบริปแบบครีบริปเดี่ยว โดยมีอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์อยู่ที่ 1.98

รูปที่ 5.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ส์กับตัวประกอบความเสียดทานของท่อกลมผิวเรียบ และท่อกลมมีครีบริปรูปตัววีมีมุมปะทะเท่ากับ 60° ซึ่งมีความสูงเป็น 10%, 15%, 20% ของ

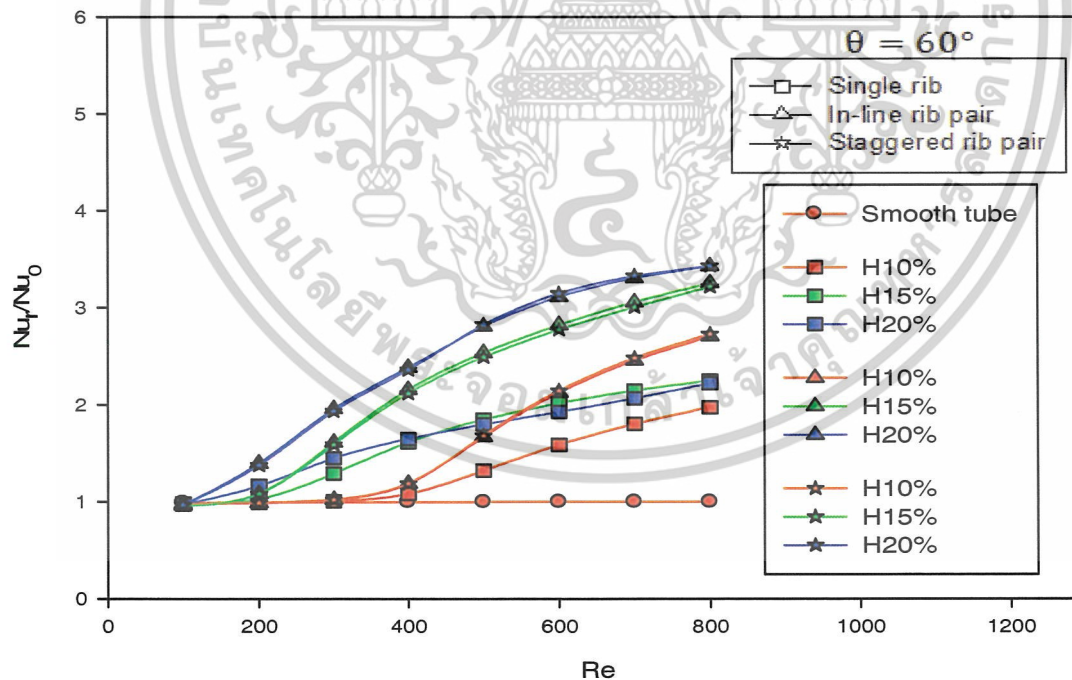
เส้นผ่านศูนย์กลาง โดยแต่ละความสูงมีลักษณะการวางตัวของครีบเป็นแบบครีบเดี่ยว ครีบคู่วางตรงกัน ครีบคู่วางเอียงกัน ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟจะพบว่าเลขเรย์โนลด์ส์ที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลทำให้ตัวประกอบความเสียดทานมีค่าลดลง โดยมีค่าตัวประกอบความเสียดทานมากที่สุดอยู่ที่ความสูง 20% และลักษณะการวางตัวของครีบแบบครีบคู่วางตรงกัน โดยมีค่าตัวประกอบความเสียดทานอยู่ที่ 0.44 และค่าตัวประกอบความเสียดทานน้อยที่สุดอยู่ที่ความสูง 10% และลักษณะการวางตัวของครีบแบบครีบเดี่ยวโดยมีค่าตัวประกอบความเสียดทานอยู่ที่ 0.14

รูปที่ 5.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ส์กับอัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานของท่อกลมมีครีบต่อตัวประกอบความเสียดทานของท่อกลมผิวเรียบ (f/f_0) โดยท่อกลมมีครีบรูปตัววีมีมุมปะทะเท่ากับ 60° ซึ่งมีความสูงเป็น 10%, 15%, 20% ของเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยแต่ละความสูงมีลักษณะการวางตัวของครีบเป็นแบบครีบเดี่ยว ครีบคู่วางตรงกัน ครีบคู่วางเอียงกัน ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟจะพบว่าเลขเรย์โนลด์ส์ที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลทำให้อัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีค่าอัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานมากที่สุดอยู่ที่ความสูง 20% และลักษณะการวางตัวของครีบแบบครีบคู่วางตรงกัน โดยมีค่าอัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานอยู่ที่ 5.48 และค่าอัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานน้อยที่สุดอยู่ที่ความสูง 10% และลักษณะการวางตัวของครีบแบบครีบเดี่ยว โดยมีค่าอัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานอยู่ที่ 1.69

รูปที่ 5.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ส์กับประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของท่อกลมผิวเรียบ และท่อกลมมีครีบรูปตัววีมีมุมปะทะเท่ากับ 60° ซึ่งมีความสูงเป็น 10%, 15%, 20% ของเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยแต่ละความสูงมีลักษณะการวางตัวของครีบเป็นแบบครีบเดี่ยว ครีบคู่วางตรงกัน ครีบคู่วางเอียงกัน ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟจะพบว่าเลขเรย์โนลด์ส์ที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีค่าประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนมากที่สุดอยู่ที่ความสูง 15% และลักษณะการวางตัวของครีบแบบครีบคู่วางตรงกัน โดยมีค่าประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนอยู่ที่ 2.11 และค่าประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนน้อยที่สุดอยู่ที่ความสูง 20% และลักษณะการวางตัวของครีบแบบครีบเดี่ยวโดยมีค่าอัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานอยู่ที่ 1.65

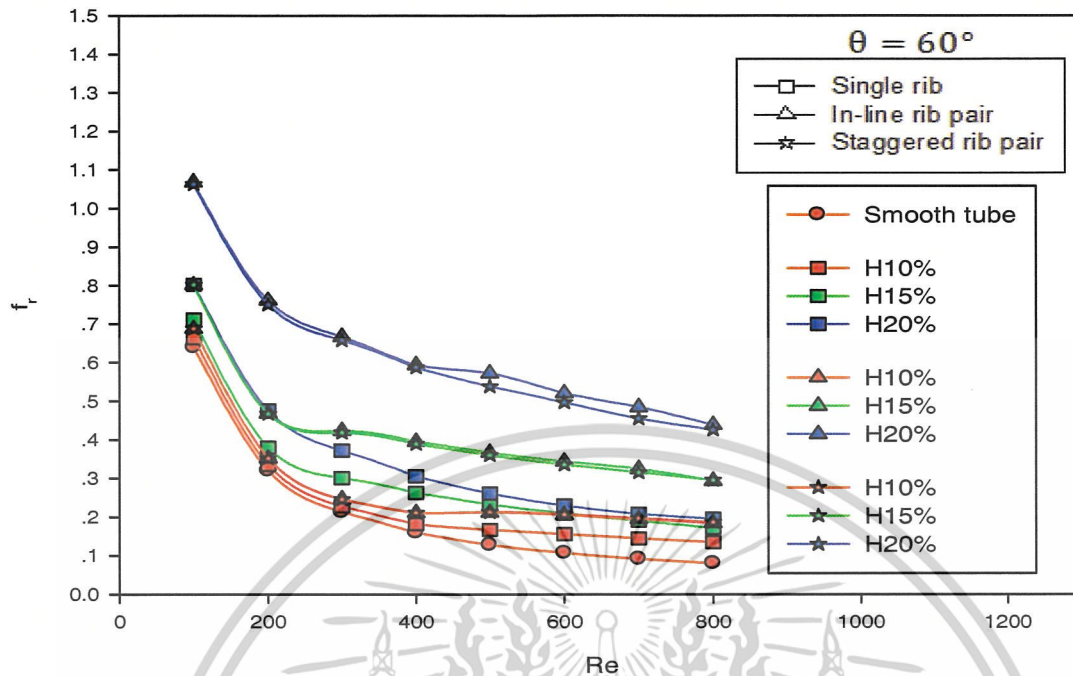


รูปที่ 5.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ Nu_f กรณีครีบริบมีมุมปะทะ 60°

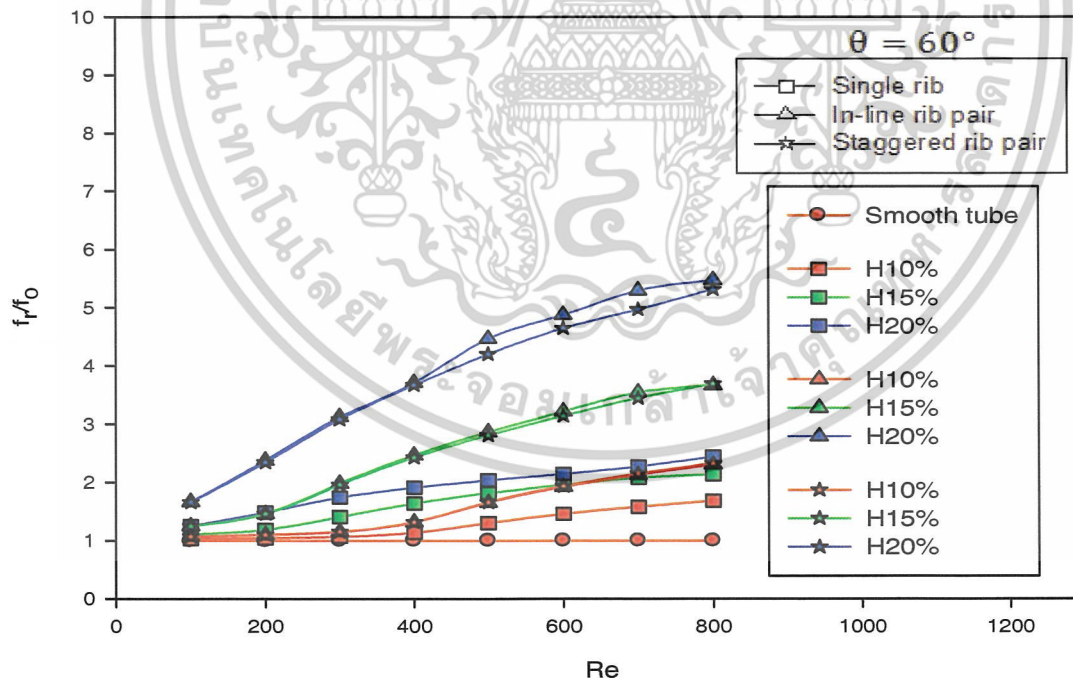


รูปที่ 5.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ Nu_f/Nu_0 กรณีครีบริบมีมุมปะทะ 60°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

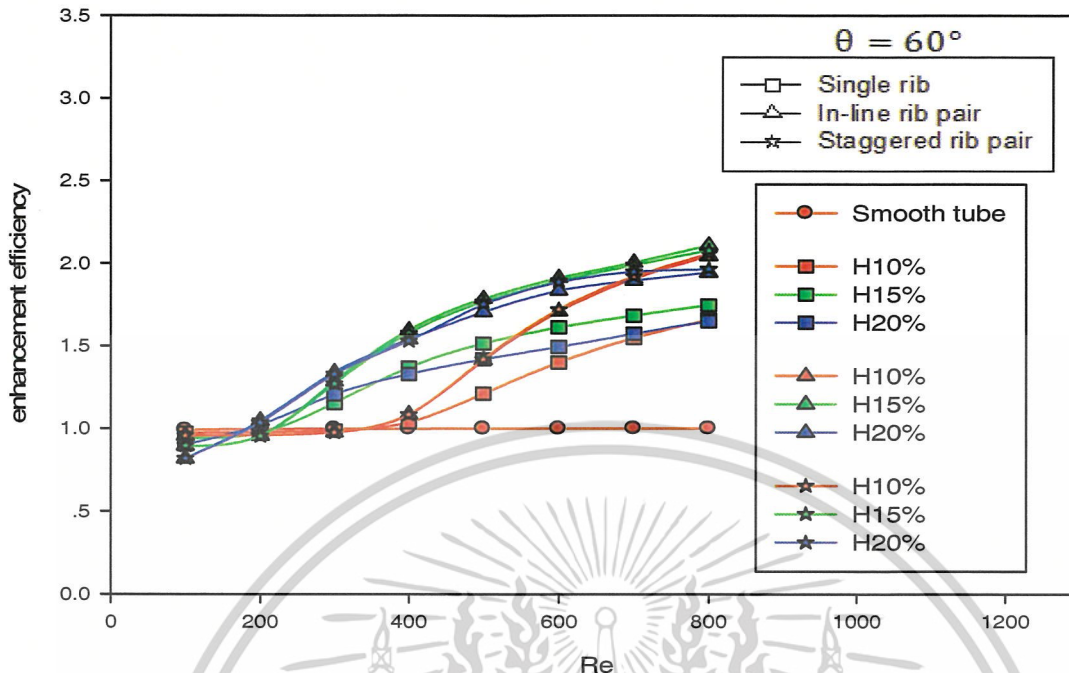


รูปที่ 5.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ f_r กรณีครีบริบมีมุมปะทะ 60°



รูปที่ 5.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ f_r/f_0 กรณีครีบริบมีมุมปะทะ 60°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ enhancement efficiency กรณีครีบบีมุมปะทะ 60°

สรุปได้ว่าสำหรับท่อกลมมีครีบบูปร่างตัววีมีมุมปะทะเท่ากับ 60° ซึ่งมีความสูงเป็น 10%, 15%, 20% ของเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยแต่ละความสูงมีลักษณะการวางตัวของครีบบนแบบครีบบนเดี่ยว ครีบบูปร่างตรงกัน ครีบบูปร่างเอียงกัน ดังนั้นการมีครีบบนทำให้มีประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น โดยมีค่าประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนมากที่สุดอยู่ที่ความสูง 15% และลักษณะการวางตัวของครีบบนแบบครีบบูปร่างตรงกัน โดยมีค่าประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนอยู่ที่ 2.11 และค่าประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนน้อยที่สุดอยู่ที่ความสูง 20% และลักษณะการวางตัวของครีบบนแบบครีบบนเดี่ยวโดยมีค่าอัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานอยู่ที่ 1.65

5.6 การเปรียบเทียบลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลของพารามิเตอร์

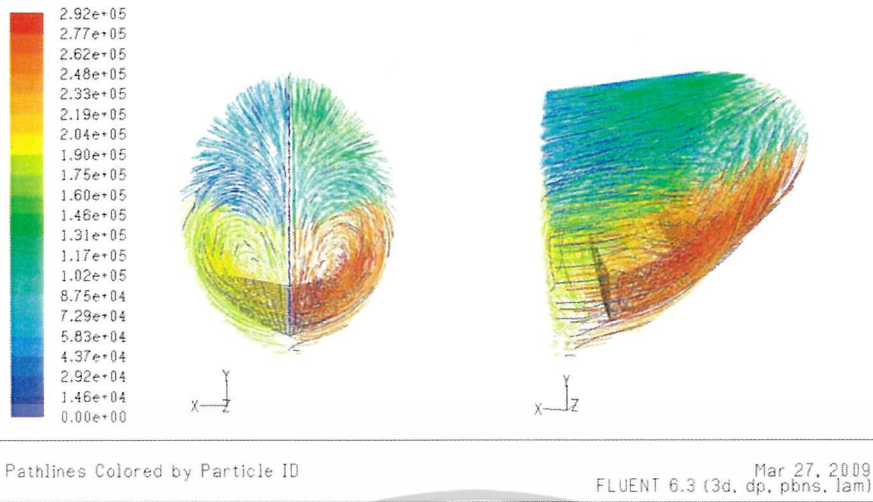
รูปที่ 5.18 แสดงการเปรียบเทียบเส้นทางของอนุภาคของของไหล (Path lines) ของท่อกลมมีครีบบูปร่างตัววีโดยมีขนาดของมุมปะทะของครีบบนค่าคงที่เท่ากับ 30° , ความสูงของครีบบนค่าคงที่เท่ากับ 20% ของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อกลม และลักษณะการวางตัวของครีบบนแตกต่างกัน ได้แก่ ครีบบนเดี่ยว ครีบบูปร่างตรงกัน ครีบบูปร่างเอียงกัน ซึ่งเมื่อพิจารณาจากรูปจะพบว่าอนุภาคของของไหลแบบครีบบนเดี่ยวจะเกิดการหมุนวนของอนุภาคเป็นวงกลมไหลจำนวน 2 วง และในส่วนของครีบบูปร่างตรงกันจะเกิดการหมุนวนของอนุภาคเป็นวงกลมไหลจำนวน 4 วง ซึ่งมีความใกล้เคียงกับครีบบูปร่างเอียงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

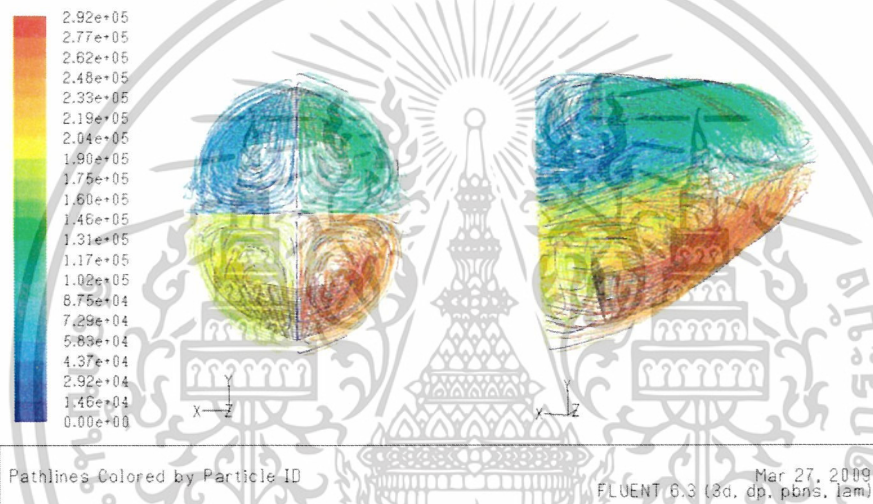
รูปที่ 5.19 แสดงการเปรียบเทียบเส้นทางของอนุภาคของของไหล (Path lines) ของท่อกลมมีครีบริปตัววีโดยมีขนาดของมุมปะทะของครีบริปมีค่าคงที่เท่ากับ 30° , ลักษณะการวางตัวของครีบริปเป็นแบบครีบริปคู่วางเอียงกัน และความสูงของครีบริปแตกต่างกันเป็น 10%, 15% และ 20% ของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อกลม ซึ่งเมื่อพิจารณาจากรูปจะพบว่าความสูงของครีบริปทั้ง 3 ระดับความสูงจะเกิดการหมุนวนของอนุภาคเป็นวงกลมไหลจำนวน 4 วงเหมือนกัน แต่มีความปั่นป่วนของการไหลแตกต่างกัน คือเมื่อครีบริปมีความสูงน้อยความปั่นป่วนของการไหลก็จะม่น้อย และจะมีความปั่นป่วนของการไหลมากขึ้นเมื่อครีบริปมีความสูงมากขึ้น

รูปที่ 5.20 แสดงการเปรียบเทียบเส้นทางของอนุภาคของของไหล (Path lines) ของท่อกลมมีครีบริปตัววีโดยมีความสูงของครีบริปมีค่าคงที่เท่า 20% ของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อกลม, ลักษณะการวางตัวของครีบริปเป็นแบบครีบริปคู่วางเอียงกัน และมีขนาดของมุมปะทะของครีบริปแตกต่างกันเป็น 30° , 45° และ 60° ซึ่งเมื่อพิจารณาจากรูปจะพบว่ามุมของครีบริปทั้ง 3 ขนาดจะเกิดการหมุนวนของอนุภาคเป็นวงกลมไหลจำนวน 4 วงเหมือนกัน แต่มีความปั่นป่วนของการไหลแตกต่างกัน คือเมื่อมุมปะทะมีขนาดเล็กความปั่นป่วนของการไหลก็จะม่น้อย และจะมีความปั่นป่วนของการไหลน้อยลงเมื่อครีบริปมีขนาดของมุมปะทะใหญ่ขึ้น

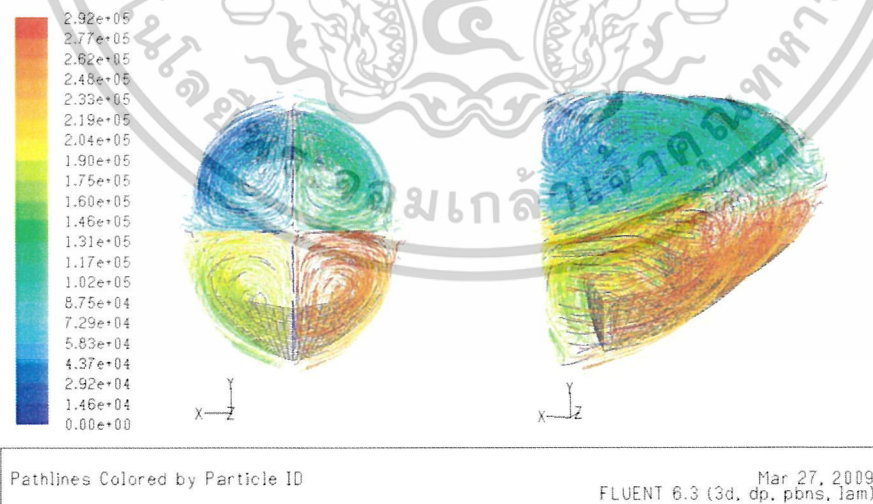
รูปที่ 5.21 แสดงเลขน้ทเชิร์ตของผิวท่อกลมและการกระจายตัวของความดันของท่อกลมมีครีบริปโดยมีขนาดของมุมปะทะของครีบริปมีค่าคงที่เท่ากับ 30° , ความสูงของครีบริปมีค่าคงที่เท่า 20% ของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อกลม และลักษณะการวางตัวของครีบริปเป็นแบบครีบริปคู่วางเอียงกัน และเลขเรย์โนลด์ส์เท่ากับ 800 พบว่าครีบริปจะมีผลทำให้เลขน้ทเชิร์ตของผิวท่อกลมมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ครีบริปซึ่งเข้าไปขวางการไหลทำให้เกิดความดันสูญเสียมากขึ้นด้วย



(a)



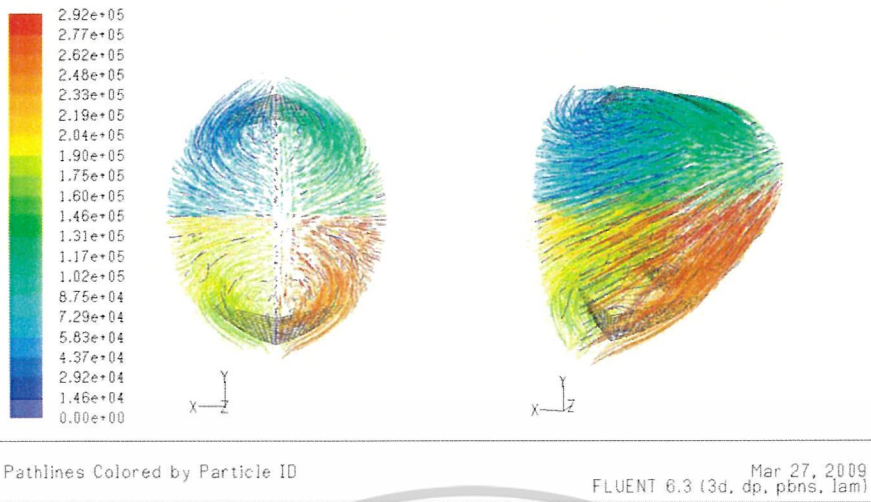
(b)



(c)

รูปที่ 5.18 แสดงการเปรียบเทียบเส้นทางของอนุภาคของของไหลกรณี มุมปะทะ = 30° , ความสูง = 20% โดยที่ (a) = ครีบเดี่ยว (b) = ครีบคู่วางตรงกัน (c) = ครีบคู่วางเอียงกัน

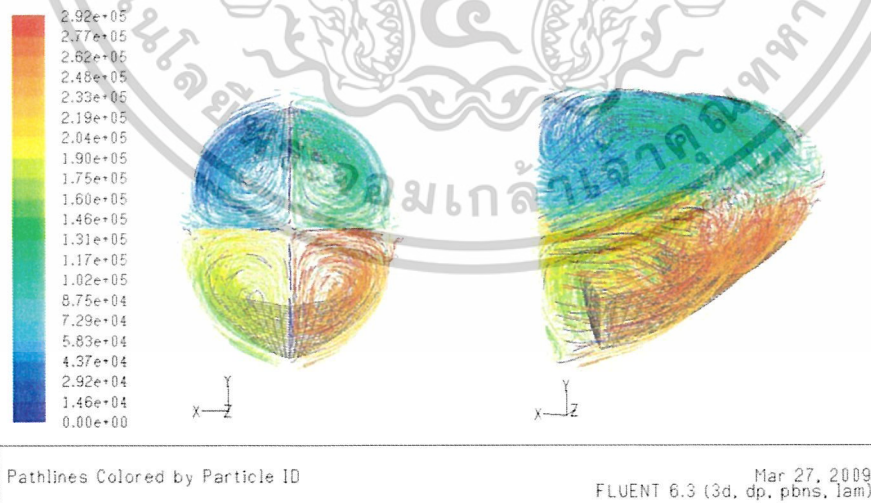
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



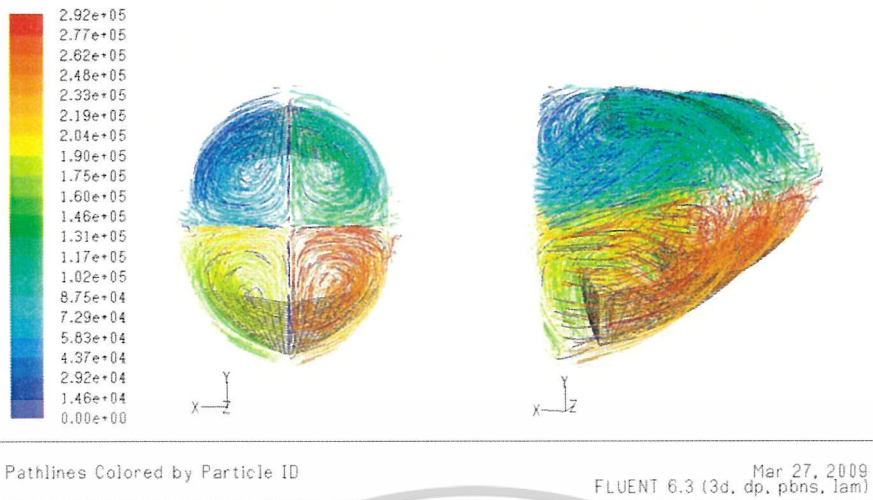
(b)



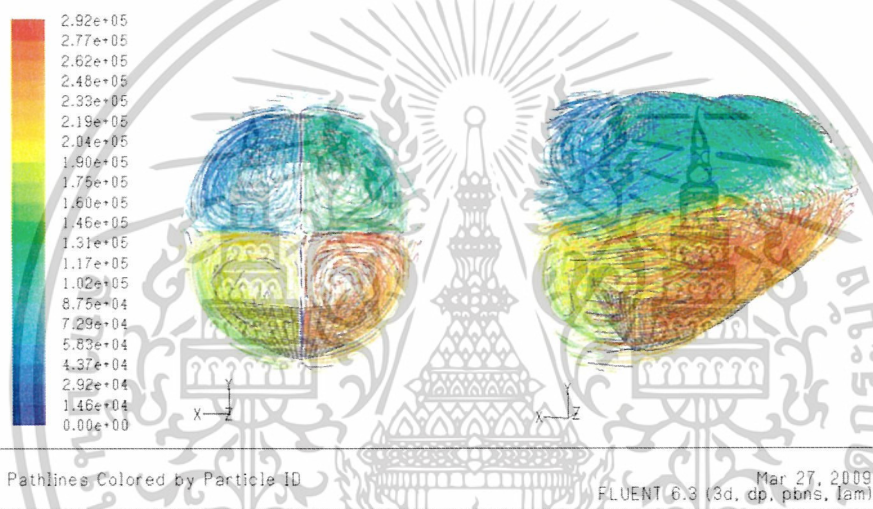
(c)

รูปที่ 5.19 แสดงการเปรียบเทียบเส้นทางของอนุภาคของของไหลกรณี มุมปะทะ = 30° ,
 ครีบลูกวางเอียงกัน โดยที่ (a) ความสูง = 10% (b) ความสูง = 15% (c) ความสูง = 20%

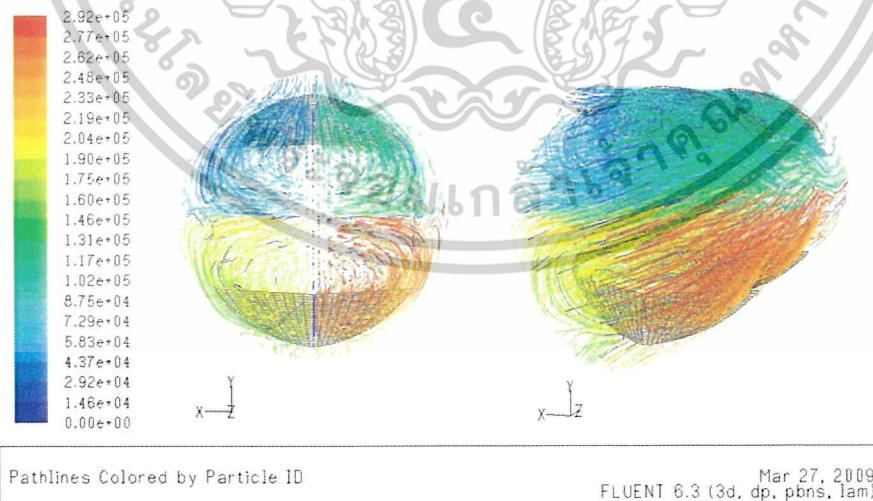
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



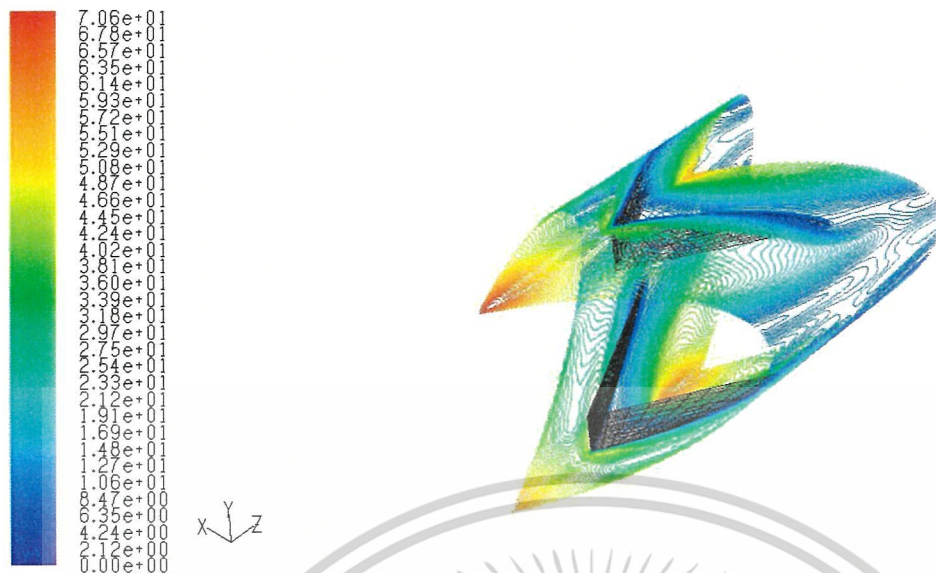
(b)



(c)

รูปที่ 5.20 แสดงการเปรียบเทียบเส้นทางของอนุภาคของของไหลกรณี ความสูง = 20%,
 ครีบกวางเอียงกัน โดยที่ (a) มุมปะทะ = 30° (b) มุมปะทะ = 45° (c) มุมปะทะ = 60°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Contours of Surface Nusselt Number

Mar 12, 2009
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, lam)

(a)

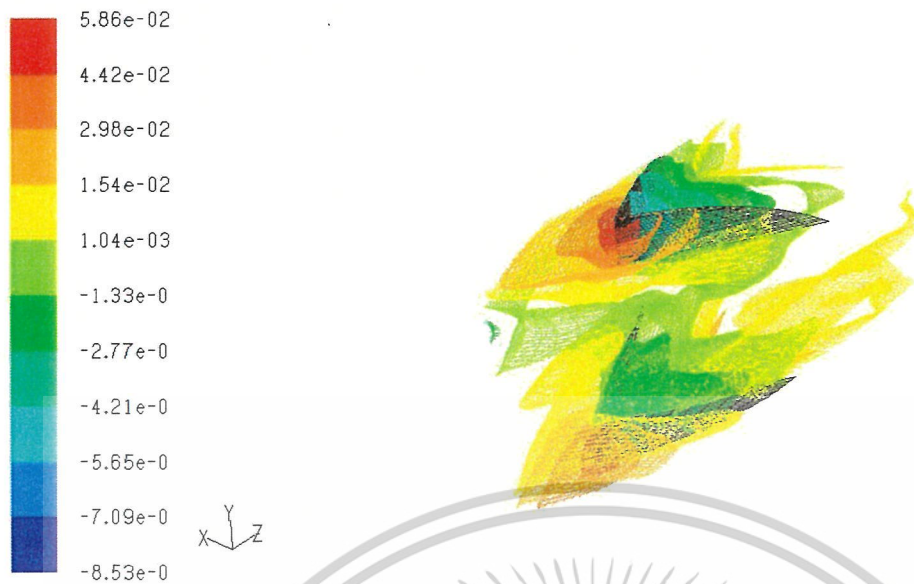


Contours of Static Pressure (pascal)

Mar 12, 2009
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, lam)

(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Contours of Static Pressure (pascal)

Mar 13, 2009
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, lam)

(c)

รูปที่ 5.21 (a) แสดงเลขนัสเซิลท์ของผิวท่อกลม

(b) แสดงการกระจายตัวของความดันที่ผิวท่อกลม

(c) การกระจายตัวของความดันภายในท่อกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

จากการจำลองการทำงานเพื่อศึกษาอิทธิพลของมุมปะทะของครีบริปตัววี ความสูงของครีบริป และลักษณะการวางตัวของครีบริปต่อการถ่ายเทความร้อนและการเพิ่มขึ้นของความเสียหายภายในท่อกลมสำหรับการไหลแบบราบเรียบที่แสดงไว้ข้างต้นนั้น สามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

1. ท่อกลมที่มีครีบริปตัววีจะช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อน 1.97 ถึง 5.92 เท่า และการเพิ่มขึ้นของความเสียหายเพิ่มขึ้น 1.69 ถึง 10.47 เท่า และเพิ่มประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนขึ้น 1.65 ถึง 2.80 เมื่อเปรียบเทียบกับท่อกลมผิวเรียบ

2. สำหรับท่อกลมที่มีการติดครีบริปตัววีนั้น ครีบริปที่มีขนาดของมุมปะทะเท่ากับ 30° มีความสูง 20% ของเส้นผ่านศูนย์กลาง และลักษณะการวางตัวของครีบริปเป็นแบบครีบริปคู่วางตรงกัน จะมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 21.67

3. สำหรับท่อกลมที่มีการติดครีบริปตัววีนั้น ครีบริปที่มีขนาดของมุมปะทะเท่ากับ 45° มีความสูง 20% ของเส้นผ่านศูนย์กลาง และลักษณะการวางตัวของครีบริปเป็นแบบครีบริปคู่วางเอียงกัน จะมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 0.84

4. สำหรับท่อกลมที่มีการติดครีบริปตัววีนั้น ครีบริปที่มีขนาดของมุมปะทะเท่ากับ 30° มีความสูง 20% ของเส้นผ่านศูนย์กลาง และลักษณะการวางตัวของครีบริปเป็นแบบครีบริปคู่วางเอียงกัน จะมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงสุด โดยมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเท่ากับ 2.80

การเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อนเป็นผลมาจากการหมุนวนของของไหลผ่านครีบริปตัววี ซึ่งจะทำให้เกิดการกวาดของอนุภาคของของไหลสู่บริเวณผิวของท่อกลมเป็นผลให้ของไหลบริเวณผิวของท่อกลมมีการกระจายตัวดีขึ้น แต่ในขณะเดียวกันการหมุนวนนี้จะเข้าขัดขวางการไหลของของไหลซึ่งทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของความเสียหายด้วยเช่นกัน

6.2 ข้อเสนอแนะ

การจำลองการถ่ายเทความร้อนโดยการติดตั้งครีบบรูปตัววีดังวิธีที่ได้นำเสนอไปแล้วนั้นอาจเป็นทางเลือกหนึ่งของการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนซึ่งอาจนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยทั่วไปได้ อย่างไรก็ตามยังมีข้อควรให้ความสนใจเกี่ยวกับการทดลองนี้อีกเล็กน้อยยกตัวอย่างเช่น

1. การทดลองนี้ขอบเขตในการกำหนดช่วงการไหลของของไหลแบบราบเรียบ แต่ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจำนวนมาก ช่วงการไหลของของไหลจะเป็นช่วงเทอร์บูเลนซ์ ดังนั้นควรมีการขยายขอบเขตงานวิจัยในครอบคลุมช่วงเทอร์บูเลนซ์ด้วย
2. ค่าของมุมปะทะของครีบบรูปตัววีควรมีการเปลี่ยนแปลงให้หลากหลายค่ามากขึ้น เพื่อหาค่าของมุมที่เหมาะสมมากที่สุด
3. ค่าความสูงของครีบบรูปตัววีควรมีการเปลี่ยนแปลงค่าความสูงที่มากกว่า 20% ด้วย เพื่อทดสอบว่าค่าความสูงที่มากขึ้น จะเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนได้มากขึ้นอีกหรือไม่
4. ลักษณะการวางตัวของครีบบรูปตัววีที่เป็นแบบครีบลูกว้างเยื้องกัน ควรมีการเปลี่ยนแปลงค่าความห่างของครีบลูกเยื้องกัน โดยให้มีค่าความห่างที่ต่างกันไป เพื่อหาค่าของระยะห่างครีบลูกที่เหมาะสมที่สุด
5. เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นเพียงแค่การจำลองการทำงานด้วยวิธีเชิงตัวเลข ค่าความผิดพลาดจากการปัดเศษ (Round-off Errors) ค่าความผิดพลาดจากรูปแบบการคำนวณ (Truncation Errors) เป็นค่าความผิดพลาดที่พบได้ทั่วไปในวิธีเชิงตัวเลขนี้ จึงควรมีการประเมินความน่าเชื่อถือจากผลการทดลองจริงด้วยเพื่อความถูกต้อง

บรรณานุกรม

- จารุวัตร เจริญสุข. **พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ**. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2549
- พงษ์เจต พรหมวงศ์. **การถ่ายเทความร้อน**. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2542
- มนตรี พิรุณเกษตร. 2542. **การถ่ายเทความร้อน**. พิมพ์ครั้งที่ 2, กรุงเทพมหานคร: บริษัทวิทย์พัฒน์ จำกัด.
- วีรชาติ นวรุ่งเรือง, อุคมเกียรติ นนทแก้ว และ โอนทัย สุขแสงพนมรุ่ง. 2545. “การจำลองสนามการไหลของอากาศผ่านครีบริบายความร้อนแบบเกร็ดด้วยเงื่อนไขที่ขอบเขตแบบพีรีออดิก.” **สัมมนาวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 16**. :206-210.
- วีรชาติ นวรุ่งเรือง. 2546. “การวิเคราะห์อิทธิพลลักษณะรูปทรงของครีบริบายความร้อนแบบเกล็ดที่มีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อน.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- Anderson, JD., et al. 1992. **Introduction to computational fluid dynamics**. New York: Springer-verlag.
- Bruce R. Munson, Donald F. Young and Theodore H. Okiishi. 2002. **Fundamental of Fluid Mechanics**. Singapore: John Wiley and Sons.
- Cengel, Yunus A. and Boles, Michael A. 1994. **Thermodynamics an engineering approach**. 2nd. USA:McGraw-Hill.
- Chang, Yu-Juei. And Wang, Chi-Chuam. 1997. “A generalized heat transfer correlation for louver fin geometry.” **International jour of heat and mass transfer**. 40(3) : 533-544.
- Chang, Yu-Juei., et al. 2000. “A Generalized friction correlation for louver fin geometry.” **International journal of heat and mass transfer**. 43 (3) : 2237-2243.
- Chapra, Steven C. and Canale, Raymond P. 1988. Numerical methods for engineers. Singapore: McGraw-hill.
- Chung, T.J. 2002 **Computation fluid dynamics**. Cambridge: Cambridge University Press.
- Currie, I.G. 1993. Fundamental mechanics of fluids. Singapore: McGraw-Hill.
- Dejong, N.C. and Jacobi, A.M. 2003. “Flow, heat transfer and pressure drop in near-wall region of louvered fin arrays.” **Experimetal thermal and fluid science**. 27 (2):273-250.
- Eric C. Guyer. 1989. **Hand book of applied thermal design**. USA:McGraw-Hill.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ferziger, J.H. and Peric M. 1999. **Computation methods for fluid dynamics**. 2nd ed.

Germany: Springer verlag Heldeberg.

Holman, J.P. 1990. Heat transfered. 7th ed. USA: McGraw-Hill.

Incropera, Dewitt, Bergmann and Lavine. 2007. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**.

6th ed. New York: John Wiley and Sons.

Panton, Ronald L. 1993. **Incompressible flow**. USA: A Wiley-Interscience publication.

Potter, Merle C. and Wiggert, David C. 1991. **Mechanics of fluids**. USA: Prentice-Hall.

Ralph L. Webb, Nae-Hyun Kim. 1991. **Principle of Enhanced Heat Transfer**. 2nd ed. USA:

Taylor & Francis.

Shames, Irving H. 1992. **Mechanics of fluids**. Singapore: McGraw-Hill.

SS. Mousavi, K. Hooman. "Heat and fluid flow in entrance region of channel with staggered

baffles." **Energy Conversion and Management** 47 (2006) 2011-2019. February, 2006.

pp. 2011-2019

Yan, Wei-Mon. and Sheen, Pay-Jen. 2000. "Heat transfer and friction characteristics of fin-and-tube

heat exchangers." **International journal of heat and mass transfer**. 43(2): 1651-1659.



ภาคผนวก

บทความประกอบการนำเสนอโครงการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การจำลองเชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมที่ติดตั้งครีบริบตัววี

พัฒนนะ กลิ่นนิ่มนวล², ภาณุมาศ พร้อมมูล², พงษ์เจต พรหมวงศ์³

คำย่อ

โครงการนี้นำเสนอผลจากการจำลองการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการไหลแบบราบเรียบภายในท่อกลมที่ติดตั้งครีบริบตัววีโดยจะศึกษาอิทธิพลของครีบริบ การเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ในการศึกษานี้จะเริ่มต้นสร้างแบบจำลองของท่อกลมโดยที่ผิวของท่อกลมมีอุณหภูมิผิวคงที่ จากนั้นครีบริบตัววีจะถูกตั้งเข้าไปภายใน ครีบริบที่ติดตั้งมีสามรูปแบบ รูปแบบแรกคือครีบริบเดี่ยว รูปแบบที่สองคือครีบริบคู่วางตรงกัน และรูปแบบที่สามครีบริบคู่วางเอียงกัน โดยทั้งหมูปแบบมีการเปลี่ยนค่าความสูงครีบริบ(10%, 15%, 20%ของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อกลม) และมุมปะทะของครีบริบตัววี (30°, 45°, 60°) หลังจากเริ่มการจำลองการทำงานโดยกำหนดให้มีการไหลในช่วงราบเรียบ(เลขเรย์โนลด์สอยู่ระหว่าง 100 ถึง 800) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อนและเพิ่มพลังงานการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลและท่อซึ่งวัดได้ในรูปการเพิ่มขึ้นของเลขนัสเซลท์ รวมถึงไม่เพิ่มการสูญเสียพลังงานการลจากความเสี่ยงตทานในรูปของการลดลงของความดันมากจนเกินไปซึ่งวัดได้ในรูปของการเพิ่มขึ้นของตัวประกอบความเสี่ยงตทาน

Abstract

This project presents the numerical simulated result of Laminar flow in a circular tube mounted with v-shaped ribs, by considering the influence of v-shaped ribs on enhancement of heat transfer. At the first, a model of the circular tube is produced at which its surface constant temperature and a v-shaped rib is placed into the circular tube. There are 3 pattern of ribs arrangement, first pattern is single rib, second pattern is in-line rib pair, and third pattern is staggered rib pair. By all pattern have to vary height value of ribs (10%, 15%, 20% of inner diameter of circular tube) and half angle of v-shaped ribs (30°, 45°, 60°). Then, the simulation is performed for flow in a laminar range (Reynolds number is between 100 to 800). The objective is to increase heat efficiency and heat transfer energy between the fluid and the tube that is measured of increasing Nusselt number and not to increase too much the flow energy loss in pressure drop which measured of increasing friction factor.

2008 Department of Mechanical Engineering, KMITL. All rights reserved

Keywords: v-shaped ribs; Reynolds number; Nusselt number; Friction factor; CFD

บทนำ

ในปัจจุบันการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้มีการพัฒนาเพื่อต้องการลดขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและต้นทุนในการผลิต ขณะที่อัตราการถ่ายเทความร้อนยังสูงอยู่ซึ่งตัวแปรสำคัญในการลดขนาดและค่าใช้จ่ายของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนคือการเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนให้สูงขึ้นในขณะที่สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าลดลง วิธีการเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยวิธีทำให้เกิดผิวขรุขระเช่นการติดตั้งครีบริบภายในท่อ เพื่อให้เกิดการไหลแบบหมุนวน

การสร้างและติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทดสอบความสามารถในการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมที่มีการติดตั้งครีบริบตัววีภายในท่อ เราต้องเสียค่าใช้จ่ายหรืออุปกรณ์สูง เสียเวลาและแรงงาน เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวเราจึงใช้โปรแกรมทางด้านซีเอฟดี(CFD) ที่สามารถวิเคราะห์แรงและพลังงานของของไหลที่ไหลผ่านสิ่งต่างๆ ได้มาช่วยในการจำลองการไหลของของไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งครีบริบอยู่ภายใน เพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานที่เกิดขึ้นกับของไหล

อังกฤษ "Numerical simulation of heat transfer in circular tube with v-shaped ribs"

นักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สจล. ห้อง 4G รหัส 48010607 และ 48010675 ตามลำดับ การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สจล., โทร. 0 2326 4197, อีเมล kssayam@kmitl.ac.th

ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์

A_c	พื้นที่หน้าตัดของท่อ	v	ความเร็วในทิศทาง y
C_p	ค่าความร้อนจำเพาะแบบความดันคงที่	w	ความเร็วในทิศทาง z
D	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ	$x_{d,i}$	ความยาวของท่อกลมช่วงบริเวณทางเข้าสำหรับสภาวะที่ปรับตัวคงที่แล้วของความร้อน
F	แรงทั้งหมดเนื่องจากมวลของไหล	Φ	ฟังก์ชันการสูญเสียพลังงานเนื่องจากความเสียดทานจากความหนืด
f	ตัวประกอบความเสียดทาน	ΔP	ความดันตกคร่อมภายใน
h	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย	ρ	ความหนาแน่นของของไหล
k	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน	μ	ความหนืดสัมบูรณ์ของของไหล
L	ความยาวท่อ	η	ประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน
Nu	เลขนัสเซลท์	อักษรห้อย	
P	แรงดันที่กระทำต่ออนุภาคของไหล	0	ท่อกลมเปล่า
Pr	เลขพลาตัน	r	ท่อกลมที่ติดครีป
Q_{conv}	อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ของไหลได้รับ	x	แกน x
Re	เลขเรย์โนลด์ส	y	แกน y
T_w	อุณหภูมิที่ผิว	z	แกน z
T_∞	อุณหภูมิของไหลอิสระ		
u	ความเร็วในทิศทาง x		
u_m	ความเร็วเฉลี่ยของของไหลภายในท่อกลม		

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

สำหรับโครงการนี้เราจะทำการศึกษาพฤติกรรมการแลกเปลี่ยนความร้อนของท่อกลม ที่ติดครีปรูปตัววีอยู่ใน

1. เพื่อศึกษาการใช้โปรแกรมแกมบิท (Gambit) ในการวาดรูปท่อกลมผิวเรียบ และท่อกลมที่มีการติดครีปรูปตัววีอยู่ในท่อกลม ที่เราจะใช้ในการจำลองการไหลผ่านของอากาศ

2. เพื่อศึกษาการใช้โปรแกรมฟลูเอนท์ (Fluent) จำลองการไหลของของไหลผ่านท่อกลมที่มีครีปรูปตัววีติดอยู่ใน

3. ศึกษาแบบครีป ความสูงครีป และมุมปะทะของครีปรูปตัววี ที่ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนดีที่สุด

4. ศึกษาค่าของเลขเรย์โนลด์ส (Reynolds Number) ของของไหลที่ทางเข้า ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน

5. ศึกษาผลกระทบของการเพิ่มขึ้นของความเสียดทานเมื่อติดตั้งครีปรูปตัววี

3. ลักษณะพื้นฐานการไหลภายในท่อ

พื้นฐานของการไหลของของไหลภายในท่อสามารถจำแนกได้โดยใช้เลขเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds Number) ซึ่งมีนิยามดังนี้

$$Re \equiv \frac{\rho u_m D}{\mu} \quad (1)$$

4. สมการควบคุมการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น การไหลของของไหลมีคุณสมบัติดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น การไหลของของไหลมีคุณสมบัติดังนี้

สำหรับการไหลสม่ำเสมอ อัตราการไหลสุทธิของสารที่เข้าไปในปริมาตรควบคุม หรือมวลที่ไหลเข้าลบกับมวลที่ไหลออก ต้องเท่ากับศูนย์ แสดงสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

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

สมการนี้เรียกว่าสมการความต่อเนื่อง (Continuity equation)

ผลรวมของแรงทั้งหมดที่กระทำต่อปริมาตรควบคุมต้องเท่ากับอัตราสุทธิของโมเมนตัมที่ออกจากปริมาตรควบคุมหรือโมเมนตัมที่ไหลออกไปลบกับโมเมนตัมที่ไหลเข้ามา โดยแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

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

โมเมนตัมแกน y ,

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

โมเมนตัมแกน z ,

$$\rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = F_z - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

สมการทั้งสองนี้เรียกว่าสมการโมเมนตัม (Momentum equation)

ผลรวมของอัตราพลังงานที่เข้าโดยการนำ อัตราพลังงานที่เข้าโดยแรงจากน้ำหนัก และอัตราพลังงานที่เข้าโดยความเค้นที่ผิวเท่ากับอัตราพลังงานที่เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น การไหลของของไหลมีคุณสมบัติดังนี้

Absolute ในช่อง Gradient option เลือกเป็น Green-Gauss Cell Based ในช่อง formulation เลือกเป็น Implicit ในช่อง Time เลือกเป็น Steady

4. เลือกให้มีการคำนวณสมการพลังงาน
5. การตั้งค่า Viscous Model ให้เลือกในช่อง Model เป็น Laminar
6. การกำหนดคุณสมบัติของไหล ซึ่งมีการกำหนดคุณสมบัติต่างๆ โดยเลือกใช้เป็นอากาศ มีความหนาแน่น 1.1614 kg/m^3 ความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ 1007 J/kg-K ค่าการนำความร้อน 0.0263 W/m-K ความหนืด $1.846(10^{-5}) \text{ kg/m-s}$

7. กำหนดเงื่อนไขของการปฏิบัติงานให้มีความดัน 101325 Pa ที่ระยะอ้างอิงที่พิกัด $X = 0, Y = 0$ และ $Z = 0$ ใน Operating Conditions

8. การปรับค่าคุณสมบัติของผนังให้เลือก Zone ชื่อ Wall ในแบบจำลองหลังจากนั้นเลือกที่ Thermal และเลือกที่ Temperature ในช่อง Thermal Conditions หลังจากนั้นทำการตั้งค่าอุณหภูมิให้มีค่า 310 K

9. การปรับค่าคุณสมบัติของครีปให้เลือก Zone ชื่อ rib ในแบบจำลองหลังจากนั้นเลือกที่ Thermal และเลือกที่ Heat flux ในช่อง Thermal Conditions หลังจากนั้นตั้งค่า Heat flux ให้มีค่าเท่ากับ 0

10. การปรับค่า Periodic Conditions โดยกำหนดอัตราการไหลของอากาศให้สอดคล้องกับค่าเลขเรย์โนลด์ส์ในช่อง Mass Flow Rate ใน Periodic Conditions โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าเลขเรย์โนลด์ส์กับอัตราการไหลของมวลมีค่าดังตารางที่ 1 และทำการกำหนดทิศทางการไหลของอากาศในช่อง Flow Direction โดยปรับค่าให้ค่า $Z = 1$ ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ส์กับอัตราการไหลของมวลเข้า

Re	Mass Flow Rate
100	$7.24923(10^{-5})$
200	$1.08738(10^{-4})$
300	$2.17477(10^{-4})$
400	$2.89969(10^{-4})$
500	$3.62461(10^{-4})$
600	$4.34954(10^{-4})$
700	$5.07446(10^{-4})$
800	$5.79938(10^{-4})$

11. การตั้งค่า Solution Controls ในช่อง Under-Relaxation Factor ปรับค่า Pressure เป็น 0.285, Momentum เป็น 0.65 และ Energy เป็น 0.98 และในช่อง Discretization โดยกำหนดให้ Pressure, Momentum และ Energy เลือกการคำนวณสมการเป็นแบบ Second Order, Power Law และ QUICK ตามลำดับ

12. การปรับค่า Residual Monitors คือการตั้งค่าจุดสิ้นสุดของการคำนวณ ในช่อง Absolute Criteria ตั้งค่าของ Continuity, x-velocity, y-velocity, z-velocity เป็น 1×10^{-6} และตั้งค่าของ Energy เป็น 1×10^{-9}

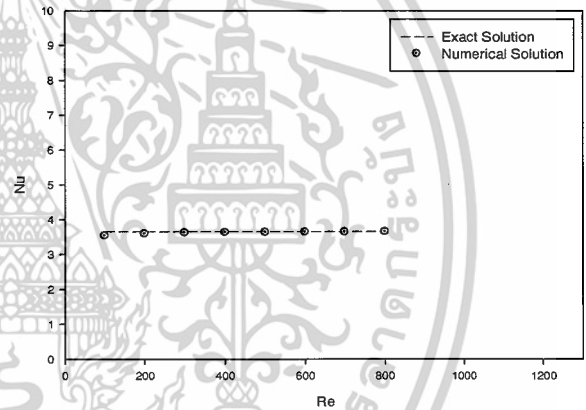
13. เดาค่าเริ่มต้นให้ความดันเป็น 0 Pa ความเร็วแกน x เป็น 0 m/s ความเร็วแกน y เป็น 0 m/s ความเร็วแกน z เป็น 0 m/s และอุณหภูมิเป็น 300 K

14. เริ่มการคำนวณสมการโดยวิธีทำซ้ำจนกว่าผลการคำนวณจะลู่เข้าหาค่าตอบ

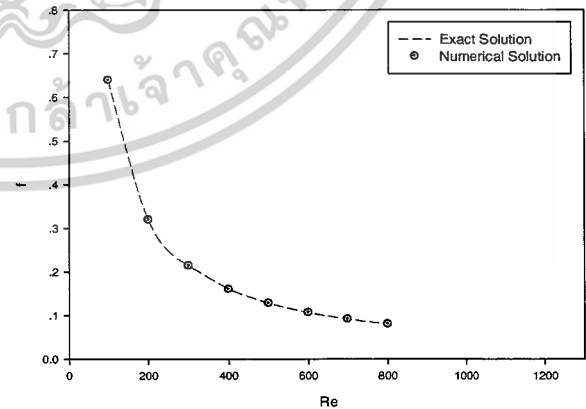
15. แสดงการรายงานผลโดยเลือกให้มีการรายงานผลในส่วนของ Surface Nusselt Number และ Pressure Gradient

9. ผลการทดลอง

ผลที่ได้จากการจำลองการทำงาน(Numerical Solution) นำมาเปรียบเทียบกับทฤษฎี(Exact Solution) ในกรณีท่อกลมผิวเรียบ โดยให้ความสนใจที่ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ผลการเปรียบเทียบมีดังต่อไปนี้



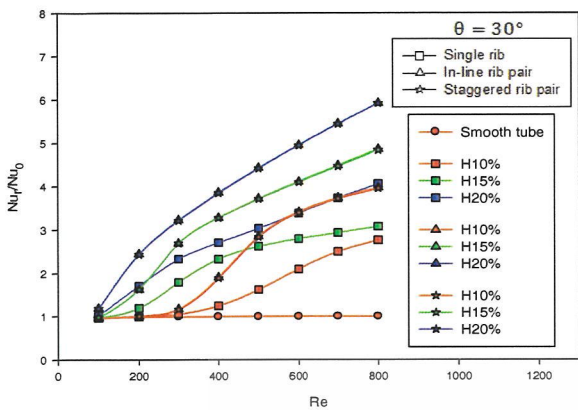
รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ Nu ของท่อกลมผิวเรียบ



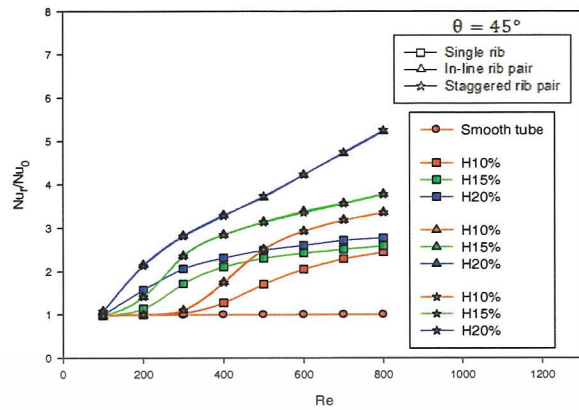
รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ f ของท่อกลมผิวเรียบ

ผลการเปรียบเทียบจากการจำลองการทำงานกับทฤษฎีในกรณีท่อกลมผิวเรียบ โดยให้ความสนใจที่ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน โดยผลที่ได้จากการจำลองการทำงาน ได้ผลดังต่อไปนี้

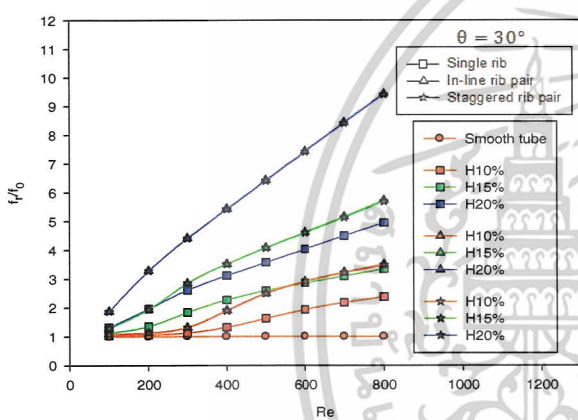
เมื่อทำกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและสิ่งอื่นใดซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการใช้งานนำไปใช้



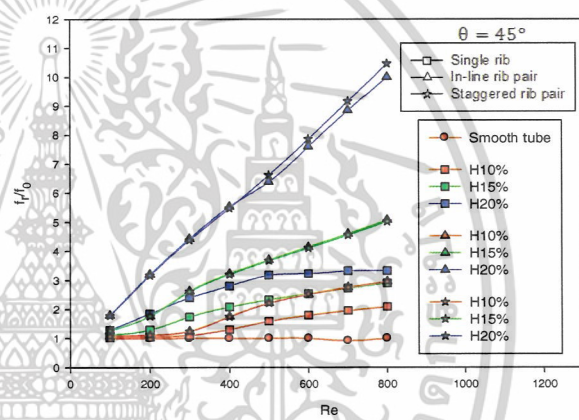
รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ Nu_p/Nu_0 กรณีครีบริมมีมุมปะทะ 30°



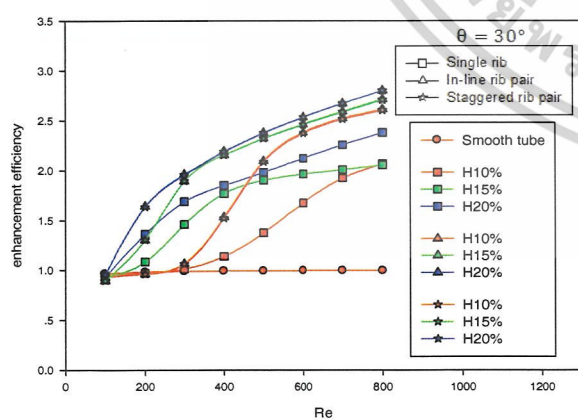
รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ Nu_p/Nu_0 กรณีครีบริมมีมุมปะทะ 45°



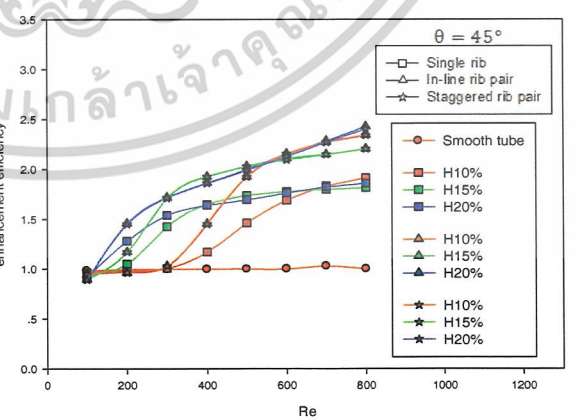
รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ f_p/f_0 กรณีครีบริมมีมุมปะทะ 30°



รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ f_p/f_0 กรณีครีบริมมีมุมปะทะ 45°

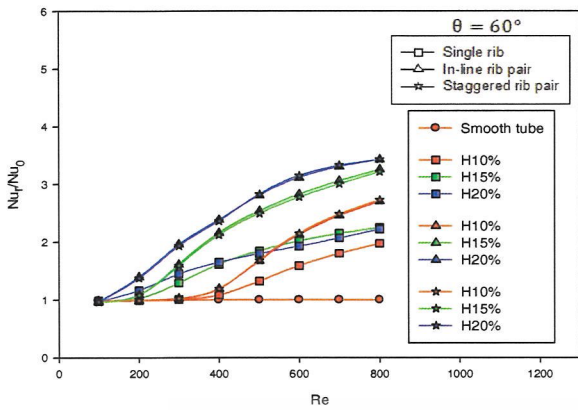


รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ enhancement efficiency กรณีครีบริมมีมุมปะทะ 30°

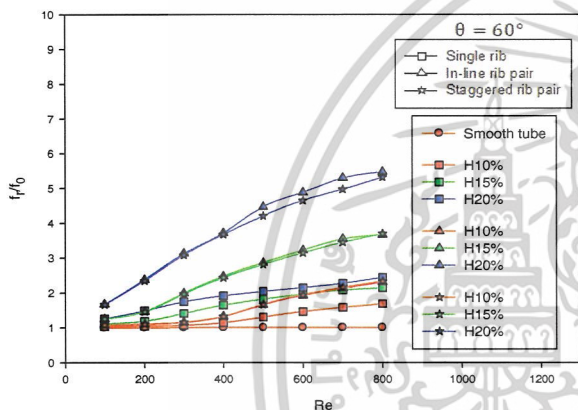


รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ enhancement efficiency กรณีครีบริมมีมุมปะทะ 45°

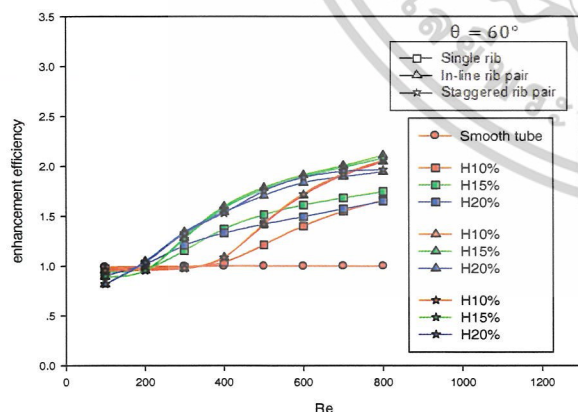
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ Nu_r/Nu_0 กรณีครีบริบมีมุมปะทะ 60°



รูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ f_r/f_0 กรณีครีบริบมีมุมปะทะ 60°



รูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ enhancement efficiency กรณีครีบริบมีมุมปะทะ 60°

ความเสียดทานเพิ่มขึ้น 1.69 ถึง 10.47 เท่า และเพิ่มประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนขึ้น 1.65 ถึง 2.80 เมื่อเปรียบเทียบกับท่อกลมผิวเรียบ

สำหรับท่อกลมที่มีการติดครีบริบตัววีนั้น ครีบริบที่มีขนาดของมุมปะทะเท่ากับ 30° มีความสูง 20% ของเส้นผ่านศูนย์กลาง และลักษณะการวางตัวของครีบริบเป็นแบบครีบริบคู่วางตรงกัน จะมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 21.67

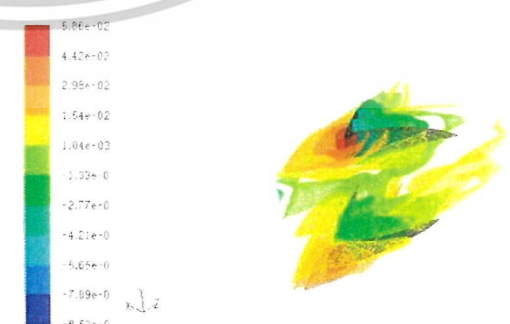
สำหรับท่อกลมที่มีการติดครีบริบตัววีนั้น ครีบริบที่มีขนาดของมุมเท่ากับ 45° มีความสูง 20% ของเส้นผ่านศูนย์กลาง และลักษณะการวางตัวของครีบริบเป็นแบบครีบริบคู่วางเอียงกัน จะมีค่าตัวประกอบความเสียดทานสูงที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 0.84

สำหรับท่อกลมที่มีการติดครีบริบตัววีนั้น ครีบริบที่มีขนาดของมุมเท่ากับ 30° มีความสูง 20% ของเส้นผ่านศูนย์กลาง และลักษณะการวางตัวของครีบริบเป็นแบบครีบริบคู่วางเอียงกัน จะมีประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด โดยมีประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนเท่ากับ 2.80



Contours of Surface Nusselt Number Mar 12, 2009 FLUENT 6.3 (3d, dp, ptns, lam)

รูปที่ 13 แสดงนทเซอร์ที่มุมเบอร์ของผิวท่อกลมมีครีบริบตัววีน (มุมปะทะ = 30° , ความสูง = 20%, ครีบริบคู่วางเอียงกัน)



Contours of Static Pressure (Pascal) Mar 13, 2009 FLUENT 6.3 (3d, dp, ptns, lam)

รูปที่ 14 การกระจายตัวของความดันภายในท่อกลมมีครีบริบตัววีน (มุมปะทะ = 30° , ความสูง = 20%, ครีบริบคู่วางเอียงกัน)

10. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า ท่อกลมที่มีครีบริบตัววีนจะช่วยให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น 1.97 ถึง 5.92 เท่า และการเพิ่มขึ้นของ

ความเสียดทานเพิ่มขึ้น 1.69 ถึง 10.47 เท่า และเพิ่มประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนขึ้น 1.65 ถึง 2.80 เมื่อเปรียบเทียบกับท่อกลมผิวเรียบ

สำหรับการศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติมเกี่ยวกับเรื่องนี้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ท่านนำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

เอกสารอ้างอิง

| พงษ์เจต พรหมวงศ์ “การถ่ายเทความร้อน”, สถาบันเทคโนโลยีพระ
มเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2542
| Eric C. Guyer “Hand book of applied thermal design”, Mc
aw Hill, 1989

[3] Incropera, Dewitt, Bergmann, Lavine “Fundamentals of Heat
and Mass Transfer” , John Wiley and Sons 2007

[4] Bruce R. Munson, Donald F. Young, Theodore H. Okiishi.
“Fundamental of Fluid Mechanics”, John Wiley and Sons 2002

[5] Ralph L. Webb ,Nae-Hyun Kim “Principles of Enhanced Heat
Transfer”, Taylor and Francis



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้จัดทำ

นายพัฒนะ กลิ่นนันทนวล

เกิด ๑๕ มิถุนายน พ.ศ.๒๕๒๕

สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษา โรงเรียนระยองวิทยาคม สาขาวิทย์-คณิต

การศึกษาในปัจจุบัน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอม

เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

นายภานุมาศ พร้อมมูล

เกิด ๒๖ พฤศจิกายน พ.ศ.๒๕๒๕

สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษา โรงเรียนรัตนราษฎร์บำรุง สาขาวิทย์-คณิต

การศึกษาในปัจจุบัน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอม

เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้