

การศึกษาการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันในท่อทรงกระบอก
ที่ติดตั้งแผ่นกันเจาะรูภายในท่อด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

การศึกษาการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันในท่อทรงกระบอก
ที่ติดตั้งแผ่นกั้นเจาะรูภายในท่อด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS STUDY
OF HEAT TRANSFER AND PRESSURE LOSS IN CYLINDRICAL TUBE
INSERTED WITH PERFORATED PLATES



A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง

การศึกษาการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดัน
ในท่อทรงกระบอกที่ติดตั้งแผ่นกั้นเจาะรูภายในท่อ
ด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

โดย

นาย ณัฐพล ณะขว้าง

อาจารย์ที่ปรึกษา

อ.บุญชัย โชติวิริยวาณิชย์

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ผศ.ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์


.....ประธานกรรมการ

(อ.บุญชัย โชติวิริยวาณิชย์)


.....กรรมการ

(รศ.ดร.เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์)


.....กรรมการ

(ผศ.ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง

การศึกษาการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดัน
ในท่อทรงกระบอกที่ติดตั้งแผ่นกั้นเจาะรูภายในท่อ
ด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

โดย

นาย ญัฐพล ณะขวั้ง

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

ปีการศึกษา

2559

อาจารย์ที่ปรึกษา

อ.บุญชัย โชติวิริยวาณิชย์

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ผศ.ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์

บทคัดย่อ

สำหรับโครงการนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันภายในท่อทรงกระบอกที่ติดตั้งแผ่นกั้นเจาะรูด้วยเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ อิทธิพลของลักษณะความแตกต่างของแผ่นกั้นเจาะรู และอัตราส่วนของระยะห่างของแผ่นกั้นต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (1 2 และ 3) ที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบความเสียดทาน ในการจำลองจะกำหนดให้ค่าฟลักซ์ความร้อนที่ผิวท่อมี่ค่าคงที่และตัวเลขเรย์โนลด์อยู่ ในช่วง 5,000 ถึง 25,000 แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Realizable k-epsilon ถูกนำมาใช้เพื่อจำลองความปั่นป่วนภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ความสัมพันธ์ของค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบความเสียดทานภายในท่อทรงกระบอกที่ติดตั้งแผ่นกั้นเจาะรู สามารถแสดงในเทอมของตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อน ผลการจำลองพบว่าลักษณะของแผ่นกั้นเจาะรูแบบ B และอัตราส่วนของระยะห่างของแผ่นกั้นต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ 1 จะได้ค่าตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุด

Report Title	The computational fluid dynamics study of heat transfer and pressure loss in cylindrical tube inserted with perforated plates
By	Mr. Natthaphon Thanakhwang
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Chemical Engineering
Academic year	2559
Advisor	Mr. Boonchai Chotiviriyavanich
Co-advisor	Asst. Prof. Dr. Santi Wattananusorn

Abstract

The present report aims to study heat transfer performance enhancement and pressure loss in a cylindrical tube by using computational fluid dynamics. The tube inserted with perforated plates. Effects of two types of perforated plates, namely A and B, and ratio of the distance between the perforated plates and tube diameter (1, 2, and 3) were investigated on heat transfer performance and pressure loss. There was constant supplied heat flux on the tube and air flow through the tube at Reynolds number between 5,000 – 25,000. The realizable k-epsilon turbulence model was employed to simulate the turbulence inside the heat exchanger. The ratio heat transfer coefficient and friction factor in the cylindrical tube with the perforated plates was shown as a thermal performance factor. It was found that the perforated plates type B at the ratio of the distance between the perforated plates and tube diameter of 1 had the highest thermal performance factor.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท อ.บุญชัย โชติวิริยวาณิช และ ผศ.ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์ ที่ให้ความรู้ รวมถึงให้คำชี้แนะแนวทางแก้ไขปัญหา การออกแบบและวิเคราะห์ผลการจำลอง ในโครงการนี้ให้ผ่านพ้นไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ นายเอกราช บำรุงไทยชัยชาญ ที่ให้ความรู้ในด้านทฤษฎีและการปฏิบัติ ให้คำแนะนำสำหรับการประยุกต์ใช้เทคนิคในการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ รวมถึงให้คำชี้แนะแนวทางแก้ไขปัญหา การออกแบบและวิเคราะห์ผลการจำลอง ในโครงการนี้ให้ผ่านพ้นไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา อาจารย์ และคณะกรรมการสอบปริญญาโททุกท่าน ขอบคุณเพื่อนและน้องๆ ร่วมภาควิชาวิศวกรรมเคมี ที่ให้กำลังใจและสนับสนุนตลอดมา รวมถึงภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ทำงานโครงการนี้ ให้ลุล่วงไปได้ด้วยดี ถ้ามีข้อผิดพลาดประการใดในงานโครงการนี้ ผู้จัดทำขอน้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้

ณัฐพล ธนะขว้าง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	3
2.1 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ.....	3
2.1.1 กระบวนการก่อนการคำนวณ.....	3
2.1.2 กระบวนการคำนวณ.....	4
2.1.3 กระบวนการหลังการคำนวณ.....	4
2.2 สมการที่ใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์การไหล.....	4
2.2.1 สมการควบคุม.....	4
2.2.1.1 สมการอนุรักษ์มวล.....	4
2.2.1.2 สมการโมเมนตัม.....	5
2.2.1.3 สมการพลังงาน.....	5
2.2.2 สมการนาเวียร์-สโตกส์.....	6
2.3 ลักษณะการไหลแบบปั่นป่วน.....	7
2.3.1 สมการนาเวียร์-สโตกส์เฉลี่ยเรย์โนลด์.....	8
2.3.2 แบบจำลองความปั่นป่วน k-epsilon.....	10
2.4 ระเบียบวิธีแบบ SIMPLE.....	11
2.5 ตัวแปรที่สนใจสำหรับการศึกษาโครงการ.....	15
2.5.1 ตัวประกอบความเสียดทาน.....	15
2.5.2 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและเลขนัสเซลล์ท์.....	15
2.5.3 ตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อน.....	16

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานโครงการ	18
3.1 ลักษณะของของท่อทรงกระบอกที่ติดตั้งแผ่นกั้นเจาะรูภายในท่อ	18
3.2 แผ่นกั้นและระยะห่างของแผ่นกั้น	18
3.3 กระบวนการจำลอง.....	19
3.4 การวิเคราะห์ผลการจำลอง	20
บทที่ 4 ผลและการวิเคราะห์ผลการจำลอง.....	22
4.1 ผลการเปรียบเทียบผลการจำลองกับการทดลองอ้างอิง	22
4.2 ผลการศึกษาค่าการสูญเสียความดันภายในท่อและตัวประกอบความเสียดทาน.....	23
4.3 ผลการศึกษาความสัมพันธ์การพาความร้อนและเลขนัสเซิลท์	24
4.4 ผลการศึกษาค่าตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อน	25
บทที่ 5 สรุปผลการจำลอง.....	27
เอกสารอ้างอิง	28
ภาคผนวก.....	29
ภาคผนวก ก. การกำหนดภาวะขอบเขตและวิธีการคำนวณในโปรแกรม	30
ภาคผนวก ข. ผลที่ได้จากการจำลอง.....	32

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการปรับแก้ความดัน.....	13
ตารางที่ 3.1 ค่าความเร็วขาเข้า (U_{inlet}) และฟลักซ์ความร้อน (q) ในแต่ละเลขเรย์โนลด์.....	19
ตารางที่ ก.1 ภาวะขอบเขตและวิธีการคำนวณในโปรแกรมคอมพิวเตอร์	30
ตารางที่ ข.1 ค่าของความดันที่สูญเสียจากการจำลอง	32
ตารางที่ ข.2 ค่าของอุณหภูมิจากการจำลอง.....	32



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ความเร็วของการไหลแบบปั่นป่วน.....	7
รูปที่ 2.2 ขั้นตอนระเบียบวิธีแบบ SIMPLE.....	14
รูปที่ 3.1 ลักษณะท่อทรงกระบอกที่ติดตั้งแผ่นกั้นเจาะรูภายในท่อ.....	18
รูปที่ 3.2 ลักษณะของแผ่นกั้นเจาะรู.....	19
รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบผลของค่าตัวประกอบความเสียดทานของท่อเปล่าไม่ใส่แผ่นกั้น ระหว่างการจำลองและผลจากสมการอ้างอิง.....	22
รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบผลของเลขนัสเซลล์ท์ของท่อเปล่าไม่ใส่แผ่นกั้น ระหว่างการจำลองและผลการทดลองอ้างอิง.....	22
รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าของการสูญเสียความดันภายในท่อที่เลขเรย์โนลด์ต่างๆ.....	23
รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบค่าของตัวประกอบความเสียดทานที่เลขเรย์โนลด์ต่างๆ.....	24
รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบค่าของเลขนัสเซลล์ท์ที่เลขเรย์โนลด์ต่างๆ.....	24
รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าอัตราส่วนระหว่างตัวประกอบความเสียดทาน และตัวประกอบความเสียดทานในกรณีท่อเปล่าไม่ใส่แผ่นกั้นที่เลขเรย์โนลด์ต่างๆ.....	25
รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบค่าอัตราส่วนระหว่างเลขนัสเซลล์ท์ และเลขนัสเซลล์ท์ในกรณีท่อเปล่าไม่ใส่แผ่นกั้นที่เลขเรย์โนลด์ต่างๆ.....	26
รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบค่าของตัวประกอบสมรรถนะด้านความร้อนที่เลขเรย์โนลด์ต่างๆ.....	26

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีความสำคัญทั้งในชีวิตประจำวันและในภาคอุตสาหกรรม ดังนั้นการใช้ประโยชน์จากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพการส่งถ่ายความร้อน ขนาด ตลอดจนรูปแบบการใช้งานที่ถูกต้องและเหมาะสม โดยปกติในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะประกอบด้วยของไหลที่ทำหน้าที่แลกเปลี่ยนความร้อนของไหลนี้จะถูกทำให้เกิดการไหลทั้งแบบธรรมชาติแล้วแบบบังคับ ซึ่งในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้กันอย่างแพร่หลายจะมีลักษณะโดยให้ของไหลไหลในท่อซึ่งนำความร้อน โดยความร้อนจะถูกส่งเข้าหรือออกจากของไหลผ่านผิวท่อและถูกส่งต่อไปยังส่วนที่นำความร้อนไปใช้งานหรือส่วนที่ต้องการนำความร้อนออกไป

การพัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีด้วยกันหลายแนวทาง เช่น การเพิ่มการไหลแบบปั่นป่วนของของไหลกับผิวท่อโดยการใส่แผ่นกั้นขวางการไหลของของไหลในท่อทรงกระบอก เพื่อให้การไหลของของไหลเกิดความปั่นป่วน ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเพิ่มขึ้น ซึ่งวิธีนี้เป็นการลดหรือการรบกวนชั้นขอบเขตทางความร้อน (Thermal boundary layer) แต่การที่มีแผ่นกั้นขวางการไหลของของไหลในท่อทำให้แรงเสียดทานในท่อเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

เนื่องด้วยการศึกษาปรับปรุงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต้องใช้งบประมาณและเวลามาก วิธีการที่ใช้ในการศึกษาและปรับปรุงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอาจทำโดยการการสร้างแบบจำลองด้วยหลักการพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางกายภาพของงานนั้นๆ ก่อน แล้วนำผลที่ได้จากการจำลองมาทำการวิเคราะห์หาแนวทางการแก้ไขปัญหาและปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นตามหลักทางทฤษฎี โดยข้อดีของการสร้างแบบจำลองจากหลักการพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ คือ ช่วยประหยัดเวลา และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการก่อนที่จะแก้ไขปัญหาและปรับปรุงจริงโดยผลการจำลองสามารถบอกถึงแนวโน้มลักษณะทางกายภาพที่อาจจะเกิดขึ้นได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริง

ด้วยความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีด้านคอมพิวเตอร์ในปัจจุบัน ทำให้การคำนวณผลมีประสิทธิภาพและแม่นยำมากขึ้น ดังนั้นการศึกษาวิจัยรวมถึงการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมโดยใช้เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจึงมีความนิยมมากขึ้น

โครงการนี้ศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันในท่อทรงกระบอกที่ติดตั้งแผ่นกั้นเจาะรูภายในท่อ โดยการใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. เพื่อการศึกษาการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนให้อากาศในท่อทรงกระบอกมีแผ่นกั้นเจาะรูอยู่ภายในโดยการใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
2. เพื่อการศึกษาการสูญเสียความดันในท่อทรงกระบอกมีแผ่นกั้นเจาะรูอยู่ภายในโดยการใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
3. เปรียบเทียบประสิทธิภาพของผลการศึกษาการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันของท่อทรงกระบอกที่ติดตั้งแผ่นกั้นเจาะรูภายในท่อกับกรณีที่ไม่มีแผ่นกั้นอยู่ภายใน

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. สร้างแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันในท่อทรงกระบอกมีแผ่นกั้นอยู่ภายในโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์
2. การถ่ายเทความร้อนเป็นแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่
3. ศึกษาอิทธิพลของลักษณะของแผ่นกั้นที่แตกต่างกัน
4. ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนของระยะห่างของแผ่นกั้นต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อที่ 1, 2 และ 3
5. ศึกษาอิทธิพลของความเร็วของอากาศโดยแสดงเป็นเลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วงระหว่าง 5,000 ถึง 25,000

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความเข้าใจในหลักการพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
2. สามารถใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เกี่ยวข้องการโครงการนี้ในการแก้ปัญหาต่างๆได้
3. สามารถนำผลจากการศึกษานี้ไปต่อยอดเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของท่อแลกเปลี่ยนความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎี

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการศึกษา การถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันในท่อทรงกระบอกมีแผ่นกั้นอยู่ภายใน และงานวิจัยที่ เกี่ยวข้อง

2.1 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD)

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเป็นสาขาหนึ่งของกลศาสตร์ของไหลที่ใช้วิเคราะห์และแก้ปัญหา ที่เกี่ยวข้องกับการไหลของของไหล โดยอาศัยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อแก้สมการทางพลศาสตร์ ของไหลที่เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยและไม่เป็นเชิงเส้นให้อยู่ในรูปสมการพีชคณิต เพื่อให้ คอมพิวเตอร์สามารถคำนวณการไหลบนโดเมนที่เราสนใจ จากนั้นสามารถแสดงผลออกมาในรูปแบบ ต่างๆเช่น คอนทัวร์หรือเวกเตอร์ เป็นต้น เพื่อใช้สำหรับวิเคราะห์และแก้ปัญหการไหลในรูปแบบ ต่างๆอย่างมีประสิทธิภาพและค่อนข้างแม่นยำ

โดยทั่วไปแล้วการทำงานของโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ กระบวนการก่อนการคำนวณ (Pre-processor) กระบวนการคำนวณ (Solver) และกระบวนการหลัง การคำนวณ (Post-processor) แสดงรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนได้ดังต่อไปนี้

2.1.1 กระบวนการก่อนการคำนวณ (Pre-processor)

เป็นกระบวนการที่ประกอบด้วยกำหนดข้อมูลที่จำเป็นในการคำนวณปัญหา การไหลให้กับโปรแกรมคำนวณมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- การสร้างโดเมนของการคำนวณ (Computational domain)
- การสร้างเมช (Mesh) หรือกริด (Grid) เป็นกระบวนการแบ่งโดเมนของการคำนวณ ให้เป็นส่วนเล็กๆจำนวนมาก
- เลือกสมการหรือแบบจำลองที่จำเป็นต่อการคำนวณปรากฏการณ์ที่สนใจ
- กำหนดคุณสมบัติของของไหล (Fluid properties)
- กำหนดสภาวะขอบเขต (Boundary conditions)

2.1.2 กระบวนการคำนวณ (Solver)

เป็นการหาคำตอบด้วยวิธีการเชิงตัวเลขซึ่งในที่นี้จะใช้วิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite Volume Method: FVM) ในการคำนวณเชิงตัวเลขมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การอินทิเกรตการสมการควบคุมของการไหลของของไหลตลอดปริมาตรควบคุมทั้งโดเมน
- การแปลงสมการเชิงอนุพันธ์ (Differential equations) ให้เป็นสมการพีชคณิต (Algebraic equations) ด้วยวิธีเชิงตัวเลข
- หาคำตอบของสมการพีชคณิตด้วยวิธีการกระทำซ้ำ

2.1.3 กระบวนการหลังการคำนวณ (Post-processor)

เป็นกระบวนการแสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ โดยผลลัพธ์เหล่านี้สามารถแสดงให้อยู่ในรูปแบบต่างๆ เช่น เวกเตอร์ คอนทัวร์ รูปทรงโดเมนและการแสดงกริด พื้นผิว 2 มิติ และ 3 มิติ

2.2 สมการที่ใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์การไหล

2.2.1 สมการควบคุม (Governing equation)

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมีหลักการมาจากสมการควบคุมของกลศาสตร์ของไหลโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์เป็นตัวแทนของกฎการอนุรักษ์ทางฟิสิกส์ซึ่งได้แก่ กฎการอนุรักษ์มวล (Mass conservation) กฎข้อที่สองของนิวตัน (Newton's second law) และกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ (First law of thermodynamics) [1]

2.2.1.1 สมการอนุรักษ์มวล (Mass conservation)

จากคำกล่าวที่ว่า “มวลไม่สามารถสร้างหรือทำลายได้” มีความหมายว่า “อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในชั้นของไหลจะเท่ากับอัตราการไหลสุทธิของมวลที่เข้าไปในชั้นของไหล” ซึ่งสามารถเขียนสมการอนุรักษ์มวลหรือที่เรียกว่าสมการความต่อเนื่อง (Continuity equation) ได้ดังสมการที่ (2.1) [1]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad \text{หรือ} \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (2.1)$$

โดย ρ คือ ความหนาแน่น
 t คือ เวลา
 \vec{u} คือ เวกเตอร์ความเร็ว โดย $\vec{u} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}$
 u คือ ความเร็วในแกน x
 v คือ ความเร็วในแกน y
 w คือ ความเร็วในแกน z

2.2.1.2 สมการโมเมนตัม (Momentum equation)

จากกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตันสามารถสรุปได้ว่า “อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของอนุภาคของไหลจะเท่ากับผลรวมของแรงที่กระทำต่ออนุภาคของไหล” โดยสามารถแบ่งประเภทของแรงออกเป็น 2 ประเภทด้วยกันคือ แรงที่กระทำต่อพื้นผิวของไหล (Surface force) ได้แก่ แรงดัน (Pressure force) และแรงเนื่องจากความหนืด (Viscous force) และแรงกระทำต่อปริมาตรของไหล (Body force) ได้แก่ แรงโน้มถ่วง (Gravity force) แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal force) ฯลฯ ซึ่งสมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum conservation equation) เป็นดังสมการที่ (2.2) ถึง (2.4) [1]

$$\text{แกน } x : \quad \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \bar{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (2.2)$$

$$\text{แกน } y : \quad \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \bar{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \quad (2.3)$$

$$\text{แกน } z : \quad \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \bar{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + S_{Mz} \quad (2.4)$$

โดย p คือ ความดัน
 τ คือ ความเค้นเฉือน (Shear stress)
 S_M คือ เทอมของแหล่งโมเมนตัมอื่นๆ (Momentum source terms)

2.2.1.3 สมการพลังงาน (Energy equation)

จากกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์สามารถสรุปได้ว่า “อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานของอนุภาคของไหลจะเท่ากับอัตราการเพิ่มความร้อนสุทธิไปยังอนุภาคของไหลรวมกับอัตราของงานสุทธิที่กระทำต่ออนุภาคของไหล” สามารถเขียนสมการอนุรักษ์พลังงานได้ดังสมการที่ (2.5) [1]

$$\rho \frac{DE}{Dt} = -\nabla \cdot (p \bar{u}) + \left[\frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} \right] + \nabla \cdot (k \nabla T) + S_E \quad (2.5)$$

โดย E คือ พลังงานจำเพาะของของไหล
 k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน
 T คือ อุณหภูมิ
 S_E คือ แหล่งพลังงานอื่นๆ (Energy source terms)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes equations)

สมการนาเวียร์-สโตกส์เป็นสมการควบคุมพื้นฐานสำหรับของไหลหนืดโดยนำกฎข้อที่สองของนิวตันมาประยุกต์ใช้ซึ่งรูปแบบการไหลสำหรับของไหลต่าง ๆ นั้น ความเค้นเนื่องจากความหนืด (Viscous stress) เป็นฟังก์ชันของอัตราการเปลี่ยนรูปร่าง (Deformation) หรืออัตราความเครียด (Strain rate) สำหรับกรณีของไหลประเภทนิวโตเนียน (Newtonian fluids) ความเค้นเนื่องจากความหนืดจะแปรผันตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง โดยสโตกส์ได้เสนอความเค้นเนื่องจากความหนืดดังต่อไปนี้ [2]

$$\tau_{xx} = \lambda(\nabla \cdot \vec{u}) + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.6)$$

$$\tau_{yy} = \lambda(\nabla \cdot \vec{u}) + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad (2.7)$$

$$\tau_{zz} = \lambda(\nabla \cdot \vec{u}) + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \quad (2.8)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (2.9)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (2.10)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (2.11)$$

โดย μ คือ สัมประสิทธิ์ความหนืด (Viscosity Coefficient)

λ คือ สัมประสิทธิ์ความหนืดอันดับสอง (Second Viscosity Coefficient)

โดยสโตกส์กำหนดให้ $\lambda = -\frac{2}{3}\mu$

จากสมการความเค้นเนื่องจากความหนืด (2.6) ถึง (2.11) นำไปแทนในสมการอนุรักษ์มวลโมเมนตัมจะได้สมการนาเวียร์-สโตกส์ในระบบสามมิติดังต่อไปนี้

สมการความต่อเนื่อง :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (2.12)$$

สมการโมเมนตัม :

$$\text{แกน } x : \quad \frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nabla \cdot (\mu \nabla \cdot \vec{u}) + S_{Mx} \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

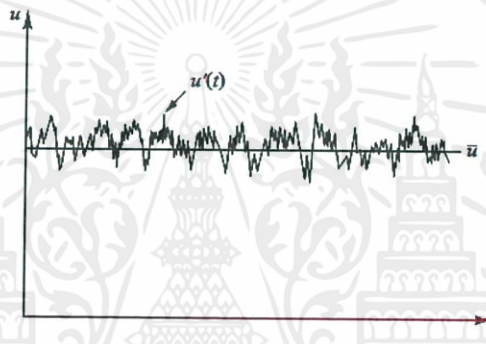
$$\text{แกน } y : \quad \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \bar{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \nabla(\mu \nabla \cdot v) + S_{My} \quad (2.14)$$

$$\text{แกน } z : \quad \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \bar{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \nabla(\mu \nabla \cdot w) + S_{Mz} \quad (2.15)$$

2.3 ลักษณะการไหลแบบปั่นป่วน (Characteristics of the turbulent flow)

รูปแบบการไหลของของไหลในท่อประกอบด้วย การไหลแบบราบเรียบ (Laminar) การไหลแบบทรานซิชัน (Transition) และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence) ตัวแปรไร้มิติที่เป็นตัวกำหนดสภาวะรูปแบบการไหลก็คือ เลขเรย์โนลด์ (Reynolds number)

1. การไหลแบบปั่นป่วนมีความไม่คงตัวสูง (Highly Unsteady) โดยคุณสมบัติการไหลเป็นฟังก์ชันของเวลาแสดงได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ความเร็วของการไหลแบบปั่นป่วน [2]

2. การไหลแบบปั่นป่วนมีลักษณะไม่ปกติ (Irregularity) จะใช้วิธีทางสถิติ (Statistical) ในการช่วยหาผลเฉลี่ยแบบแม่นยำเนื่องจากมีความไม่สม่ำเสมอของการไหล

3. การแพร่กระจาย (Diffusivity) การไหลแบบปั่นป่วนต้องแสดงลักษณะการแพร่กระจายและลักษณะของการไหลแบบปั่นป่วนเป็นสาเหตุทำให้เกิดการผสมกันอย่างรวดเร็วและเพิ่มอัตราการถ่ายโอนของโมเมนตัม ความร้อนและมวล

4. ตัวเลขเรย์โนลด์สูง (Higher Reynolds Number) การไหลแบบปั่นป่วนส่วนใหญ่เกิดขึ้นเมื่อมีเลขเรย์โนลด์สูงซึ่งสาเหตุเกิดจากปฏิสัมพันธ์ที่ซับซ้อนกันระหว่างแรงเนื่องจากความหนืด (Viscous force) กับแรงเฉื่อย (Inertia force) แต่ไม่จำเป็นเสมอไปที่ เลขเรย์โนลด์ต่ำก็สามารถเกิดการไหลแบบปั่นป่วนได้

5. การสลายตัว (Dissipative) พลังงานจลน์สามารถเปลี่ยนเป็นความร้อนได้เนื่องจากความเค้นเฉือนของความหนืดและการไหลแบบปั่นป่วนจะสลายไปอย่างรวดเร็วเมื่อไม่มีพลังงานมาเพิ่มเติม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. การไหลแบบปั่นป่วนเกิดขึ้นในสามมิติ (Three Dimensional) การไหลแบบปั่นป่วนเป็นการไหลแบบ 3 มิติและของไหลมีการหมุนวน (Rotational)

เนื่องด้วยสมการนาเวียร์-สโตกส์เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่ไม่เป็นเชิงเส้น ในการคำนวณการไหลแบบปั่นป่วนจึงยากมาก ทำให้มีการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเข้ามาช่วยเพื่อหาคำตอบโดยการจำลองเชิงตัวเลขโดยตรง (Direct Numerical Simulation: DNS) ซึ่งจะให้ความสำคัญกับการหมุนวนขนาดใหญ่ (Large-scale eddies) ไปจนถึงการหมุนวนขนาดเล็ก (Small-scale eddies) ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีการคำนวณการไหลแบบปั่นป่วนที่ใช้ทรัพยากรในการคำนวณมากซึ่งต่อมาได้มีการพัฒนาสมการเชิงตัวเลขเพื่อคำนวณเฉพาะการหมุนวนขนาดใหญ่ส่วนการหมุนวนขนาดเล็กจะทำการจำลองขึ้นมาวิธีนี้เรียกว่าการจำลองการหมุนวนขนาดใหญ่ (Large Eddy Simulation: LES) แต่อย่างไรก็ตามการคำนวณก็ยังสิ้นเปลืองทรัพยากรอยู่ดี

จากปัญหาดังกล่าวทำให้มีการพัฒนาสมการในการคำนวณการไหลแบบปั่นป่วนโดยวิธีทางสถิติซึ่งเป็นการเพิ่มระดับการจำลองให้มากขึ้นแต่วิธีนี้จะมียอดค่าประกอบความเร็วแกว่งที่อยู่ในเทอมความเค้น-เรย์โนลด์ (Reynolds Stress) เรียกสมการนี้ว่าสมการนาเวียร์-สโตกส์เฉลี่ยเรย์โนลด์ (Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations, RANS) [3]

2.3.1 สมการนาเวียร์-สโตกส์เฉลี่ยเรย์โนลด์ (Reynolds Averaged Navier-Stokes Equation: RANS)

จากการไหลแบบปั่นป่วนสามารถคำนวณด้วยวิธีทางสถิติโดยมีนำเสนอการแยกเรย์โนลด์ (Reynolds decomposition) ได้กำหนดให้คุณสมบัติการไหลฉับพลัน (Instantaneous flow property, ϕ) เป็นผลรวมระหว่างคุณสมบัติของไหลเฉลี่ยตามเวลา (Time-averaged flow property, $\bar{\phi}$) และคุณสมบัติของของไหลแกว่ง (Fluctuating flow property, ϕ') สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.16) [3]

$$\phi(t) = \bar{\phi} + \phi'(t) \quad (2.16)$$

โดยที่

$$\bar{\phi} = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \phi(t) dt \quad (2.17)$$

$$\bar{\phi}' = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \phi'(t) dt \equiv 0 \quad (2.18)$$

สำหรับการแยกเรย์โนลด์ของความดัน เวกเตอร์ความเร็วและองค์ประกอบความเร็วของแกน x, y และ z เป็นดังสมการต่อไปนี้

$$p(t) = \bar{p} + p'(t) \quad (2.19)$$

$$\vec{u}(t) = \bar{\vec{u}} + \vec{u}'(t) \quad (2.20)$$

$$u(t) = \bar{u} + u'(t) \quad (2.21)$$

$$v(t) = \bar{v} + v'(t) \quad (2.22)$$

$$w(t) = \bar{w} + w'(t) \quad (2.23)$$

แทนสมการ (2.19) ถึง (2.23) ในสมการควบคุมและใช้นิยามเวลาเฉลี่ยของสมการ (2.17) และ (2.18) ทำให้ได้สมการทำนายการไหลที่ได้รับอิทธิพลของการแกว่งที่มีต่อการไหลเฉลี่ยดังต่อไปนี้

สมการความต่อเนื่องสำหรับการไหลเฉลี่ยของของไหลอัดตัวได้คือ :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \bar{v})}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \bar{w})}{\partial z} = 0 \text{ หรือ } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{\vec{u}}) = 0 \quad (2.24)$$

สมการโมเมนตัมสำหรับการไหลเฉลี่ยของของไหลอัดตัวได้ที่ความหนืดคงที่คือ :

แกน x :

$$\frac{\partial(\rho \bar{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u} \bar{\vec{u}}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \nabla^2 \cdot \bar{\vec{u}} + \left[\frac{\partial(\overline{\rho(u')^2})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{\rho u' v'})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{\rho u' w'})}{\partial z} \right] + S_{Mx} \quad (2.25)$$

แกน y :

$$\frac{\partial(\rho \bar{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{\vec{u}}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \mu \nabla^2 \cdot \bar{\vec{v}} + \left[\frac{\partial(\overline{\rho u' v'})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{\rho(v')^2})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{\rho v' w'})}{\partial z} \right] + S_{My} \quad (2.26)$$

แกน z :

$$\frac{\partial(\rho \bar{w})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{w} \bar{\vec{u}}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \mu \nabla^2 \cdot \bar{\vec{w}} + \left[-\frac{\partial(\overline{\rho u' w'})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{\rho v' w'})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{\rho(w')^2})}{\partial z} \right] + S_{Mz} \quad (2.27)$$

และ Boussinesq ได้เสนอความเค้นเรย์โนลด์ให้มีการคำนวณง่ายขึ้นเป็นดังสมการ (2.28)

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (2.28)$$

โดย μ_t คือความหนืดปั่นป่วน (Turbulent viscosity) หรือความหนืดหมุนวน (Eddy viscosity) จากสมการ (2.28) นำไปแทนในสมการ (2.25) ถึง (2.27) สามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{แกน } x : \quad \frac{\partial(\rho\bar{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\bar{u}\bar{u}) = -\frac{\partial\bar{p}}{\partial x} + \mu_{eff} \nabla^2 \cdot \bar{u} + S_{Mx} \quad (2.29)$$

$$\text{แกน } y : \quad \frac{\partial(\rho\bar{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\bar{v}\bar{u}) = -\frac{\partial\bar{p}}{\partial y} + \mu_{eff} \nabla^2 \cdot \bar{v} + S_{My} \quad (2.30)$$

$$\text{แกน } z : \quad \frac{\partial(\rho\bar{w})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\bar{w}\bar{u}) = -\frac{\partial\bar{p}}{\partial z} + \mu_{eff} \nabla^2 \cdot \bar{w} + S_{Mz} \quad (2.31)$$

$$\text{โดยที่} \quad \mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (2.32)$$

โดย μ_{eff} คือค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดประสิทธิภาพ (Effective viscosity)

2.3.2 แบบจำลองความปั่นป่วน k-epsilon

เป็นแบบจำลองปั่นป่วนที่มีประสิทธิภาพและมีความซับซ้อนในการคำนวณไม่มาก จนเกินไปจึงเป็นที่นิยมในการนำมาใช้ภาคอุตสาหกรรมและในงานวิจัยซึ่งแบบจำลองนี้ได้มีการพัฒนาและปรับแก้ให้มีการทำนายที่มีความแม่นยำและหลากหลายมากขึ้นในปัจจุบันนี้

แบบจำลองความปั่นป่วน Realizable k-epsilon

แบบจำลองความปั่นป่วน Realizable k-epsilon ได้มีการแก้ไขจุดอ่อนในสมการอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (ϵ) ที่ขึ้นอยู่กับสมการจลนศาสตร์ของค่าเฉลี่ยของการหมุนวนผันผวนยกกำลังสองและมีการแก้ไขสูตรการคำนวณตัวแปร C_μ ซึ่งส่งผลต่อสมการที่คำนวณความหนืดปั่นป่วน ทำให้แบบจำลองความปั่นป่วน Realizable k-epsilon นั้นมีความเสมือนจริงมากยิ่งขึ้นโดยมีความสามารถในการทำนายลักษณะกระแสการไหลที่มีความโค้งมากและการหมุนวน อีกทั้งยังสามารถทำนายการไหลที่มีการแยกไหล (Separated flow) การไหลแบบเจ็ต (Jet flow) และรูปแบบการไหลทุติยภูมิ (Secondary flow) ที่มีความซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพอีกด้วย [1,4]

• สมการถ่ายโอนสำหรับแบบจำลองความปั่นป่วน Realizable k-epsilon

พลังงานจลน์ปั่นป่วน (k) และอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (ϵ) หาได้จากสมการถ่ายโอนที่ (2.32) และ (2.33) ตามลำดับ

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (2.32)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + \rho C_1 S_\epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b + S_\epsilon \quad (2.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $C_1 = \max\left[0.43, \frac{\eta}{\eta+5}\right]$, $\eta = S \frac{k}{\varepsilon}$, $S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$ และพจน์ G_k, G_b และ Y_M มีสมการคำนวณเหมือนกับแบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon

- แบบจำลองความหนืดปั่นป่วน

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.34)$$

โดย C_μ คำนวณได้จากสมการ (2.35)

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^*}{\varepsilon}} \quad (2.35)$$

โดยที่

$$U^* \equiv \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}} \quad (2.36)$$

กำหนดให้ $\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk}\omega_k$ และ $\Omega_{ij} = \bar{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk}\omega_k$

โดย $\bar{\Omega}_{ij}$ คือ เทนเซอร์ของอัตราการหมุนเฉลี่ยที่มองในกรอบอ้างอิงเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเชิงมุม ω_k ซึ่งมีค่า $A_0 = 4.04$ และ $A_s = \sqrt{6} \cos \phi$

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

จากสมการ (2.35) จะเห็นได้ว่า C_μ เป็นฟังก์ชันของ อัตราการหมุนและความเครียดเฉื่อย ความเร็วเชิงมุมของระบบที่มีการหมุน และสนามความปั่นป่วน (k และ ε) โดยที่ $C_\mu = 0.09$ สำหรับชั้นย่อยเฉื่อยในชั้นขอบเขตสมดุล

- ค่าคงที่ของแบบจำลอง

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

2.4 ระเบียบวิธีแบบ SIMPLE

ระเบียบวิธีแบบ SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) เป็นระเบียบวิธีการคำนวณเพื่อใช้สำหรับกระบวนการคาดเดาและปรับแก้การคำนวณความดันบนกริดที่เหลื่อมกันเนื่องจากไม่มีสมการโดยตรงที่ใช้หาค่าความดันโดยตรงจึงต้องอาศัยการหาค่าความดันผ่านสมการโมเมนตัมแทน ซึ่งระเบียบวิธีนี้ถูกนำเสนอโดย Patankar และ Spalding ในปี ค.ศ. 1972 [3] โดยการพิจารณาสมการการไหลราบเรียบแบบคงตัวใน 2 มิติสำหรับระบบพิกัดฉาก ซึ่งสมการโมเมนตัมแยกสามารถแสดงได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$a_{i,j}u_{i,j} = \sum a_{nb}u_{nb} + (p_{I-1,j} - p_{I,j})A_{i,j} + b_{i,j} \quad (2.37)$$

$$a_{I,j}v_{I,j} = \sum a_{nb}v_{nb} + (p_{I,j-1} - p_{I,j})A_{I,j} + b_{I,j} \quad (2.38)$$

ในขั้นตอนแรกของระเบียบวิธีนี้จะทำการคาดเดาค่าสนามความดัน p^* u^* และ v^* แล้วแทนค่าในสมการโมเมนตัมแยกที่ (2.37) และ (2.38) จะได้ตั้งสมการ (2.39) และ (2.40)

$$a_{i,j}u_{i,j}^* = \sum a_{nb}u_{nb}^* + (p_{I-1,j}^* - p_{I,j}^*)A_{i,j} + b_{i,j} \quad (2.39)$$

$$a_{I,j}v_{I,j}^* = \sum a_{nb}v_{nb}^* + (p_{I,j-1}^* - p_{I,j}^*)A_{I,j} + b_{I,j} \quad (2.40)$$

ให้นิยามความดันจริง (Correct pressure: p) เท่ากับผลรวมของความดันปรับแก้ (Pressure correction: p') และความดันคาดเดา (Guessed pressure: p^*) สามารถจัดให้อยู่ในรูปของความดันปรับแก้ได้ตั้งสมการ (2.41)

$$p' = p - p^* \quad (2.41)$$

ในทำนองเดียวกันองค์ประกอบของการปรับแก้ความเร็วตามแนวแกน x และแนวแกน y แสดงได้ดังนี้

$$u' = u - u^* \quad (2.42)$$

$$v' = v - v^* \quad (2.43)$$

แทนค่าสนามความดันจริง p ในสมการโมเมนตัมแยกจะได้ผลลัพธ์เป็นสนามความเร็วจริง (u , v) สมการโมเมนตัมแยกเชื่อมโยงกับสนามความเร็วจริงด้วยสนามความดันจริงลบสมการที่ (2.37) และ (2.38) ด้วยสมการที่ (2.39) และ (2.40) ตามลำดับ จะได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$a_{i,j}(u_{i,j} - u_{i,j}^*) = \sum a_{nb}(u_{nb} - u_{nb}^*) + [(p_{I-1,j} - p_{I-1,j}^*) - (p_{I,j} - p_{I,j}^*)]A_{i,j} \quad (2.44)$$

$$a_{I,j}(v_{I,j} - v_{I,j}^*) = \sum a_{nb}(v_{nb} - v_{nb}^*) + [(p_{I,j-1} - p_{I,j-1}^*) - (p_{I,j} - p_{I,j}^*)]A_{I,j} \quad (2.45)$$

จากนิยามในสมการ (2.41) ถึง (2.43) เมื่อแทนค่าในสมการ (2.44) และ (2.45) จะได้เป็น

$$a_{i,j}u'_{i,j} = \sum a_{nb}u'_{nb} + (p'_{I-1,j} - p'_{I,j})A_{i,j} \quad (2.46)$$

$$a_{I,j}v'_{I,j} = \sum a_{nb}v'_{nb} + (p'_{I,j-1} - p'_{I,j})A_{I,j} \quad (2.47)$$

สมการที่ (2.46) และ (2.47) ถูกทำให้เป็นสมการอย่างง่ายโดยการตัดเทอม $\sum a_{nb}u'_{nb}$ และ $\sum a_{nb}v'_{nb}$ เพื่อให้ได้การปรับแก้ความเร็ว การลดรูปนี้เป็นแนวคิดหลักในการประมาณด้วยระเบียบวิธีแบบ SIMPLE ซึ่งสมการอย่างง่ายสามารถแสดงได้ใหม่ดังนี้

$$u'_{i,j} = d_{i,j}(p'_{I-1,j} - p'_{I,j}) \quad (2.48)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v'_{I,j} = d_{I,j}(p'_{I,j-1} - p'_{I,j}) \quad (2.49)$$

$$\text{โดยที่ } d_{i,j} = \frac{A_{i,j}}{a_{i,j}} \text{ และ } d_{I,j} = \frac{A_{I,j}}{a_{I,j}}$$

แทนสมการที่ (2.48) และ (2.49) ในสมการที่ (2.42) และ (2.43) ได้ผลลัพธ์เป็น

$$u_{i,j} = u_{i,j}^* + d_{i,j}(p'_{i-1,j} - p'_{i,j}) \quad (2.50)$$

$$v_{I,j} = v_{I,j}^* + d_{I,j}(p'_{I,j-1} - p'_{I,j}) \quad (2.51)$$

ในการทำงานเดียวกัน $u_{i+1,j}$ และ $v_{I,j+1}$ สามารถแสดงได้ดังนี้

$$u_{i+1,j} = u_{i+1,j}^* + d_{i+1,j}(p'_{i,j} - p'_{i+1,j}) \quad (2.52)$$

$$v_{I,j+1} = v_{I,j+1}^* + d_{I,j+1}(p'_{I,j} - p'_{I,j+1}) \quad (2.53)$$

$$\text{โดยที่ } d_{i+1,j} = \frac{A_{i+1,j}}{a_{i+1,j}} \text{ และ } d_{I,j+1} = \frac{A_{I,j+1}}{a_{I,j+1}}$$

สนามความเร็วต้องสอดคล้องกับสมการความต่อเนื่องซึ่งสมการความต่อเนื่องแยกคือ

$$[(\rho u A)_{i+1,j} - (\rho u A)_{i,j}] + [(\rho v A)_{I,j+1} - (\rho v A)_{I,j}] = 0 \quad (2.54)$$

แทนสมการที่ (2.50) ถึง (2.53) ในสมการความต่อเนื่องแยกได้เป็นสมการปรับแก้ความดัน (Pressure Correction Equation) ดังนี้

$$a_{I,j} p'_{I,j} = a_{I+1,j} p'_{I+1,j} + a_{I-1,j} p'_{I-1,j} + a_{I,j+1} p'_{I,j+1} + a_{I,j-1} p'_{I,j-1} + b'_{I,j} \quad (2.55)$$

โดยที่ $a_{I,j} = a_{I+1,j} + a_{I-1,j} + a_{I,j+1} + a_{I,j-1}$ และสัมประสิทธิ์อื่นสำหรับสมการปรับแก้ความดันแสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการปรับแก้ความดัน

สัมประสิทธิ์	ค่า
$a_{I+1,j}$	$(\rho d A)_{i+1,j}$
$a_{I-1,j}$	$(\rho d A)_{i,j}$
$a_{I,j+1}$	$(\rho d A)_{I,j+1}$
$a_{I,j-1}$	$(\rho d A)_{I,j}$
$b'_{I,j}$	$(\rho u^* A)_{i,j} - (\rho u^* A)_{i+1,j} + (\rho v^* A)_{I,j} - (\rho v^* A)_{I,j+1}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทอม b' แทนความไม่สมดุลเนื่องจากสนามความเร็วคาดเดาไม่เหมาะสม คำวนสมการที่ (2.55) จะได้สนามการปรับแก้ความดันทั้งสนามการไหล เมื่อทราบสนามการปรับแก้ความดันแล้วจึงหาความดันจริงได้จากสมการที่ (2.40) และองค์ประกอบความเร็วจากสมการที่ (2.50) ถึง (2.53) การตัดเทอม $\sum a_{nb}u'_{nb}$ และ $\sum a_{nb}v'_{nb}$ จะไม่ส่งผลต่อผลเฉลยสุดท้าย (ผลเฉลยลู่เข้า) เนื่องจากการปรับแก้ความดันและการปรับแก้ความเร็วมีค่าเป็นศูนย์ ($p^* = p$ $u^* = u$ และ $v^* = v$) อย่างไรก็ตามสมการปรับแก้ความดันอาจเกิด

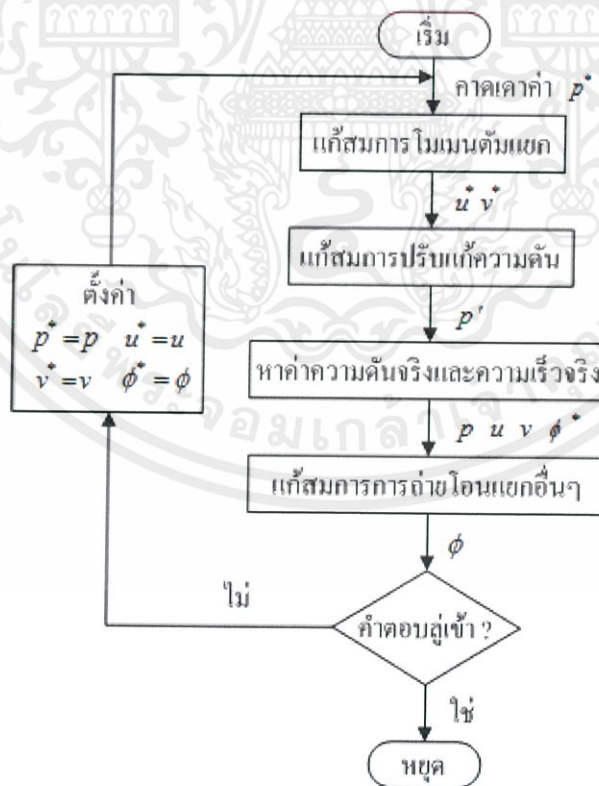
การลู่ออกของผลเฉลย ซึ่งปัญหานี้สามารถแก้ไขได้ด้วย Underrelaxation ระหว่างกระบวนการคำนวณซ้ำ ซึ่งหาความดันใหม่ได้จาก

$$p^{new} = p^* + \alpha_p p' \tag{2.56}$$

โดยที่ α_p คือ ตัวประกอบได้การผ่อนปรนของความดัน

การตั้งค่าตัวประกอบได้การผ่อนปรนที่ถูกต้องจะช่วยประหยัดต้นทุนในการจำลอง การตั้งค่าสูงเกินไปจะทำให้ผลเฉลยลู่ออก แต่ถ้าตั้งค่าต่ำเกินไปจะทำให้ผลเฉลยลู่เข้าอย่างช้าๆ ซึ่งการตั้งค่าตัวประกอบได้การผ่อนปรนจะมีค่าต่างกันขึ้นกับกรณีของการไหล

ขั้นตอนของระเบียบวิธีแบบ SIMPLE สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนระเบียบวิธีแบบ SIMPLE [3]

2.5 ตัวแปรที่สนใจสำหรับการศึกษาโครงการงาน

ตัวแปรที่สนใจสำหรับการศึกษาโครงการงานนี้โดยการใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ คือ ตัวประกอบความเสียดทาน (Friction factor, f) และเลขนัสเซลท์ (Nusselt number, Nu)

2.5.1 ตัวประกอบความเสียดทาน

ตัวประกอบความเสียดทาน (Friction factor, f) สามารถคำนวณโดยใช้การสูญเสียความดันภายในท่อ (Pressure drop, ΔP) ที่ได้จากพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ แทนลงในสมการ

$$f = \frac{\Delta P}{\left[\left(\frac{L}{D}\right) \times \left(\frac{\rho \bar{u}^2}{2}\right)\right]} \quad (2.57)$$

โดย ΔP คือ การสูญเสียความดันภายในท่อ
 ρ คือ ความหนาแน่นของของไหลภายในท่อ
 L คือ ความยาวท่อ
 D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ
 \bar{u} คือ ความเร็วเฉลี่ยของของไหลภายในท่อ

ค่าตัวประกอบความเสียดทานที่ได้นั้นสามารถนำมาเปรียบเทียบกับความสัมพันธ์สำหรับท่อผิวเรียบของ Petukhov [5] แสดงดังสมการ

$$f = (0.790 \ln Re_D - 1.64)^{-2} \quad (2.58)$$

โดยใช้ช่วงค่าของเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) ที่ $3000 \leq Re_D \leq 5 \times 10^6$

2.5.2 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและเลขนัสเซลท์

สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (heat transfer coefficient, h) และเลขนัสเซลท์ (Nusselt number, Nu) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$h = \left[\frac{\dot{m} C_p (T_{Out} - T_{in})}{A (T_{Wall} - T_{Bulk})} \right] \quad (2.59)$$

$$Nu = \frac{h \cdot D}{k} \quad (2.60)$$

โดย \dot{m} คือ อัตราการไหลของอากาศ
 T_{Wall} คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของพื้นที่ผิวของท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- T_{Bulk} คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศภายในท่อ
 T_{Out} คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศขาออก
 T_{in} คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศขาเข้า
 k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหล
 C_p คือ ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ
 A คือ พื้นที่ผิวของท่อ

ค่าของเลขนัสเซลท์ที่ได้นั้นสามารถนำมาเปรียบเทียบกับความสัมพันธ์สำหรับท่อผิวเรียบของ DittusBoelter [5] แสดงดังสมการ

$$Nu = 0.023Re_D^{0.8}Pr^n \quad (2.61)$$

โดย Re_D คือ เลขเรย์โนลด์

Pr คือ เลขพรันด์เทิล

$n = 0.4$ สำหรับการให้ความร้อนแก่ของไหล ($T_{Wall} > T_{Bulk}$)

$n = 0.3$ สำหรับการให้ความเย็นแก่ของไหล ($T_{Wall} < T_{Bulk}$)

ขอบเขตการใช้สมการ $\left[\begin{array}{l} 0.5 < Pr < 120 \\ 6,000 < Re_D < 10^7 \\ 60 < L/D \end{array} \right]$

2.5.3 ตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อน (Thermal performance factor, TPF)

ตัวประกอบสมรรถนะด้านความร้อน (Thermal performance factor, TPF) สามารถคำนวณโดยใช้ตัวประกอบความเสียดทาน (Friction factor, f) และ เลขนัสเซลท์ (Nusselt number, Nu) ที่ได้จากสมการ (2.57) และ (2.59) ตามลำดับ แทนลงในสมการ

$$TPF = \left[\frac{(Nu/Nu_{ETP})}{(f/f_{ETP})^{1/3}} \right] \quad (2.62)$$

โดย TPF คือ ตัวประกอบสมรรถนะด้านความร้อน

Nu คือ เลขนัสเซลท์

Nu_{ETP} คือ เลขนัสเซลท์ของท่อเปล่า

f คือ ตัวประกอบความเสียดทาน

f_{ETP} คือ ตัวประกอบความเสียดทานของท่อเปล่า

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Alok Kumar, Sunil Chamoli และ Manoj Kumar ได้ทำการทดลองเพิ่มการถ่ายโอนความร้อนโดยการสร้างความปั่นป่วนของการไหลของอากาศภายในท่อทรงกระบอก โดยใช้แผ่นกั้นที่มีลักษณะเป็นวงแหวนไว้ภายในท่อ อัตราส่วนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางรูเปิดของวงแหวนต่อเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ (DR) ที่ใช้คือ 0.6, 0.7 และ 0.8 และอัตราส่วนของระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นต่อขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ (PR) ที่ใช้คือ 1, 2, 3 และ 4 การทดลองจะดำเนินการในช่วงเลขเรย์โนลด์ จาก 6500 ถึง 23,000 การทดสอบใช้ความยาวท่อ 1.4 เมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (D) 68 มิลลิเมตร ทดลองโดยมีค่าฟังก์ชันความร้อนคงที่ จากการทดลองพบว่าเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้มากที่สุดที่ 4.45 เท่า ในกรณีของ PR = 1 และ DR = 0.6 และตัวประกอบสมรรถนะความร้อนเพิ่มมากที่สุดเป็น 1.4 ในกรณีของ PR = และ DR = 0.8 เมื่อเทียบกับการถ่ายเทความร้อนในท่อเปล่าที่ไม่มีแผ่นกั้น

Alok Kumar, Sunil Chamoli และ Manoj Kumar ได้ทำการทดลองคล้ายแบบเดิม โดยครั้งนี้ใส่แผ่นกั้นที่มีลักษณะเป็นวงแหวนที่มีการเจาะรูกลมที่วง ทำการทดลองในการไหลของอากาศภายในท่อแบบปั่นป่วน ภายในช่วงเลขเรย์โนลด์ 6,500 ถึง 23,000 ใช้ความยาวท่อ 1.4 เมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (D) 68 มิลลิเมตร อัตราส่วนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางรูเปิดของวงแหวนต่อเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ (DR) ที่ใช้คือ 0.6, 0.7 และ 0.8 ดังเดิม มีการเพิ่มดัชนีพื้นที่ของรูกลมของวงแหวนต่อพื้นที่ของวงแหวนทั้งหมด (PI) เป็น 8%, 16%, 24% จากการทดลองพบว่าเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้มากที่สุดที่ 4 เท่า ในกรณีของ PI = 8% และ DR = 0.6 และตัวประกอบสมรรถนะความร้อนเพิ่มมากที่สุดเป็น 1.4 ในกรณีของ PR = 24% และ DR = 0.8 เมื่อเทียบกับการถ่ายเทความร้อนในท่อเปล่าที่ไม่มีแผ่นกั้นภายในท่อ

V. Kongkaitpaiboon, K. Nanan และ S. Eiamsa-ard ได้ทำการทดลอง เพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนในท่อทรงกระบอกเมื่อใส่แผ่นกั้นทรงกลมซึ่งเจาะรูตรงกลางไว้ภายใน โดยศึกษาตัวแปรต่างๆ เช่น อัตราส่วนของรัศมีรูตรงกลางแผ่นกั้นต่อรัศมีท่อ (DR) เป็น 0.5, 0.6 และ 0.7 และอัตราส่วนระยะห่างของแผ่นกั้นต่อรัศมีท่อ (PR) เป็น 6, 8 และ 12 ทดลองภายในช่วงเลขเรย์โนลด์ 4,000 ถึง 20,000 ผลการทดลองพบว่า ยิ่งค่า PR และ DR น้อยลง จะทำให้การถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันในท่อเพิ่มขึ้น

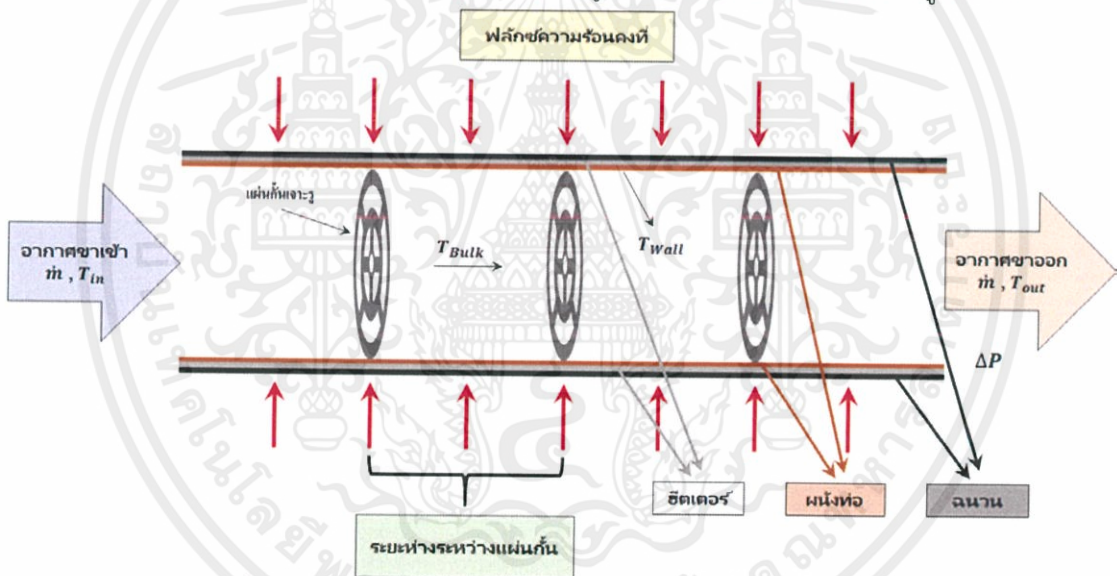
บทที่ 3

วิธีการดำเนินโครงการ

โครงการนี้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันของท่อทรงกระบอกที่ติดตั้งแผ่นกั้นเจาะรูภายในท่อ โดยจะแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนหลักๆ ขั้นตอนแรก คือ กระบวนการจำลองท่อทรงกระบอก และในขั้นตอนที่สอง คือ การวิเคราะห์ข้อมูลจากการจำลอง

3.1 ลักษณะของของท่อทรงกระบอกที่ติดตั้งแผ่นกั้นเจาะรูภายในท่อ

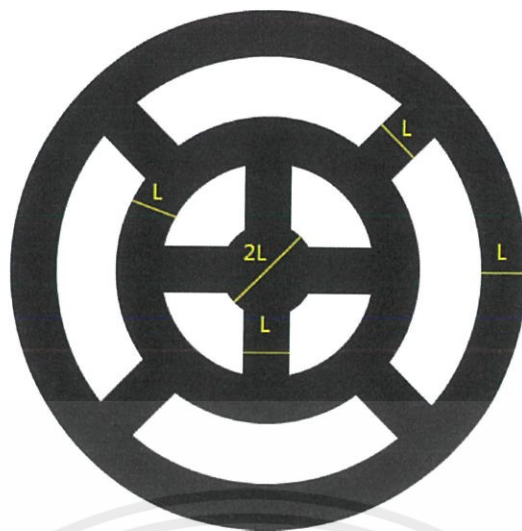
โดยในการจำลองท่อทรงกระบอกที่ติดตั้งแผ่นกั้นเจาะรูภายในท่อนั้น จะสร้างแบบจำลองโดยใช้ขนาดความยาวของท่อเท่ากับ 1.2 เมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ 50.8 มิลลิเมตร ลักษณะของของท่อทรงกระบอกที่ติดตั้งแผ่นกั้นเจาะรูภายในท่อสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ลักษณะท่อทรงกระบอกที่ติดตั้งแผ่นกั้นเจาะรูภายในท่อ

3.2 แผ่นกั้นและระยะห่างของแผ่นกั้น

ลักษณะของแผ่นกั้นจะแบ่งเป็น 2 แบบ คือแบบ A และ B โดยที่แผ่นกั้นแบบ A มีพื้นที่ถูกเจาะรูเท่ากับ 36% ของพื้นที่หน้าตัดท่อ และ แผ่นกั้นแบบ B มีพื้นที่ถูกเจาะรูเท่ากับ 49% ของพื้นที่หน้าตัดท่อ แสดงลักษณะได้ดังรูปที่ 3.2 และระยะห่างของแผ่นกั้นจะแสดงเป็นค่าอัตราส่วนของระยะห่างของแผ่นกั้นต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ หรือ PR ดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.2 ลักษณะของแผ่นกั้นเจาะรู

ตารางที่ 3.1 ลักษณะของแผ่นกั้นที่แตกต่างกัน (A และ B) และอัตราส่วนของระยะห่างของแผ่นกั้นต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (PR)

ชนิดของแผ่นกั้น และ PR	L (mm)	ชนิดของแผ่นกั้น	พื้นที่ถูกเจาะรู (% ต่อพื้นที่หน้าตัดท่อ)	PR
A-PR1	4.6	A	36	1
A-PR2				2
A-PR3				3
B-PR1	3.5	B	49	1
B-PR2				2
B-PR3				3
ท่อเปล่าไม่มีใส่แผ่นกั้น	0	ETP	100	-

3.3 กระบวนการจำลอง

ในกระบวนการจำลองของท่อทรงกระบอกที่ติดตั้งแผ่นกั้นเจาะรูภายในท่อ สามารถแบ่ง 3 ขั้นตอน ตามหลักการทำงานของโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

3.3.1 กระบวนการก่อนการคำนวณ

กระบวนการนี้เป็นกระบวนการเตรียมความพร้อมก่อนการคำนวณโดยขั้นตอนของกระบวนการนี้ประกอบไปด้วย

1. กำหนดบริเวณที่สนใจหรือโดเมนของการคำนวณ (Computational domain)
2. สร้างเมช (Mesh) หรือกริด (Grid) เป็นกระบวนการแบ่งโดเมนของการคำนวณให้เป็นส่วนเล็ก ๆ จำนวนมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เลือกสมการหรือแบบจำลองที่จำเป็นต่อการคำนวณปรากฏการณ์ที่สนใจ
4. กำหนดคุณสมบัติของของไหล (Fluid properties)
5. กำหนดสภาวะขอบเขต (Boundary conditions)

3.3.2 กระบวนการคำนวณ

คำนวณโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ที่มีระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบ Finite Volume ใช้สมการแบบจำลองความปั่นป่วน Realizable k-epsilon คำนวณการเชื่อมโยงของความเร็วและความดัน (Pressure-Velocity Coupling) ด้วยระเบียบวิธี SIMPLE และใช้รูปแบบการประมาณค่า Gradient แบบ Least Squares cell based ใช้การประมาณค่าเชิงตัวเลขแบบ Second order upwind ในการคำนวณหา ความดัน และโมเมนตัม

3.3.3 กระบวนการหลังการคำนวณ

เป็นกระบวนการแสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณจากการจำลอง
 หมายเหตุ : ในการจำลองจะมีการปรับเปลี่ยนค่าความละเอียดของเมชให้ได้จำนวนเมชที่เหมาะสม กล่าวคือหากใช้จำนวนเมชที่มากจนเกินไปจะทำให้สิ้นเปลืองเวลาในการจำลอง หรือหากจำนวนเมชน้อยเกินไปจะทำให้ผลการจำลองคลาดเคลื่อน

3.4 การวิเคราะห์ผลการจำลอง

ผลจากกระบวนการจำลองจะได้ค่า ความดันที่สูญเสีย (ΔP) อุณหภูมิเฉลี่ยของผนังท่อ (T_{Wall}) อุณหภูมิเฉลี่ยขาเข้า (T_{In}) อุณหภูมิเฉลี่ยขาออก (T_{Out}) และอุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศภายในท่อ (T_{Bulk}) ซึ่งค่าเหล่านี้จะนำไปใช้ในการคำนวณค่าตัวประกอบความเสียดทาน และเลขนัสเซลท์

3.4.1 การคำนวณหาค่าตัวประกอบความเสียดทาน (Friction factor, f)

การคำนวณหาค่าตัวประกอบความเสียดทานสามารถหาได้จากการแทนค่า ความดันที่สูญเสีย (ΔP) ที่ได้จากกระบวนการจำลอง แทนลงในสมการ (2.57)

$$f = \frac{\Delta P}{\left[\left(\frac{L}{D}\right) \times \left(\frac{\rho \bar{u}^2}{2}\right)\right]} \quad (2.57)$$

3.4.2 การคำนวณหาเลขนัสเซลท์ (Nusselt number, Nu)

การคำนวณหาเลขนัสเซลท์ (Nu) สามารถหาได้จากการแทนค่า อุณหภูมิเฉลี่ยของผนังท่อ (T_{Wall}) อุณหภูมิเฉลี่ยขาเข้า (T_{In}) อุณหภูมิเฉลี่ยขาออก (T_{Out}) และอุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศภายในท่อ (T_{Bulk}) ที่ได้จากกระบวนการจำลอง แทนลงในสมการ (2.59) เพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) ไปแทนลงในสมการ (2.60)

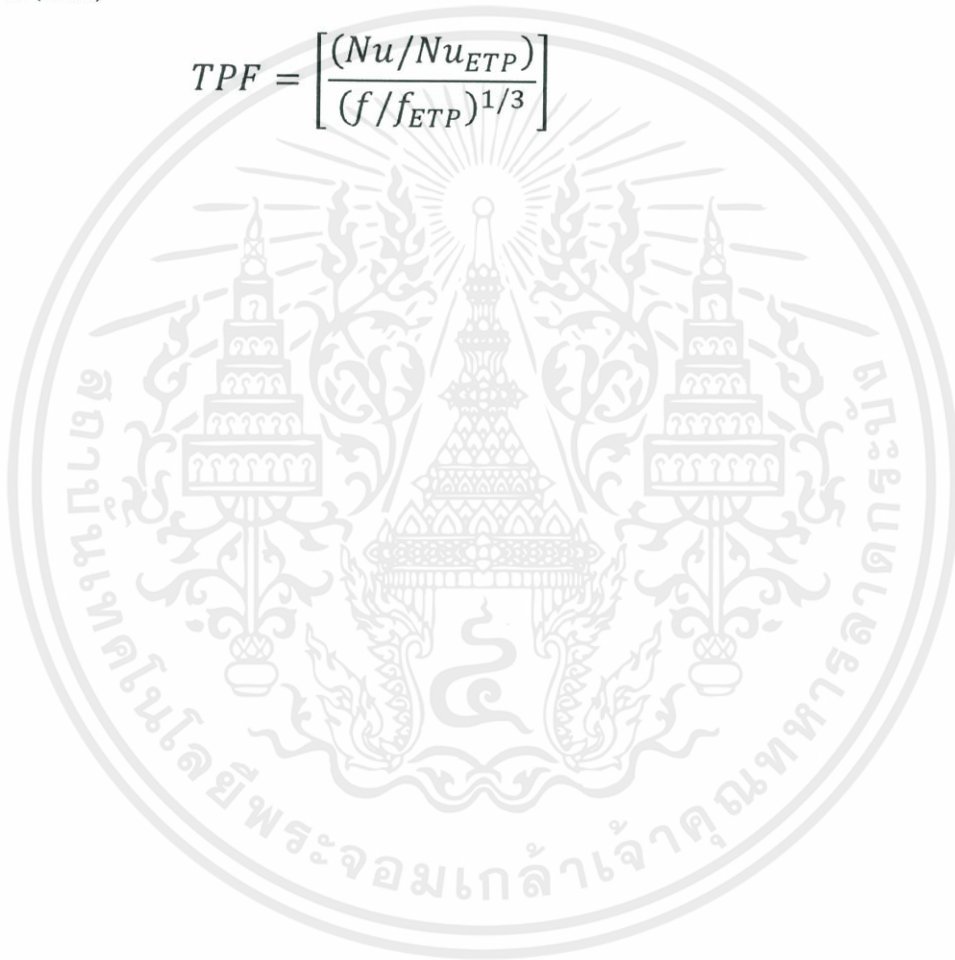
$$h = \frac{\dot{m}C_p(T_{Out}-T_{In})}{A(T_{Wall}-T_{Bulk})} \quad (2.59)$$

$$Nu = \frac{h \cdot D}{k} \quad (2.60)$$

3.4.3 การคำนวณหาตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อน (Thermal performance factor, TPF)

ตัวประกอบสมรรถนะด้านความร้อน (TPF) สามารถคำนวณโดยใช้ตัวประกอบความเสียดทาน (f) และ เลขนัสเซิลท์ (Nu) ที่ได้จากข้อ 3.4.1 และ 3.4.2 ตามลำดับ แทนลงในสมการ (2.62)

$$TPF = \left[\frac{(Nu/Nu_{ETP})}{(f/f_{ETP})^{1/3}} \right] \quad (2.62)$$

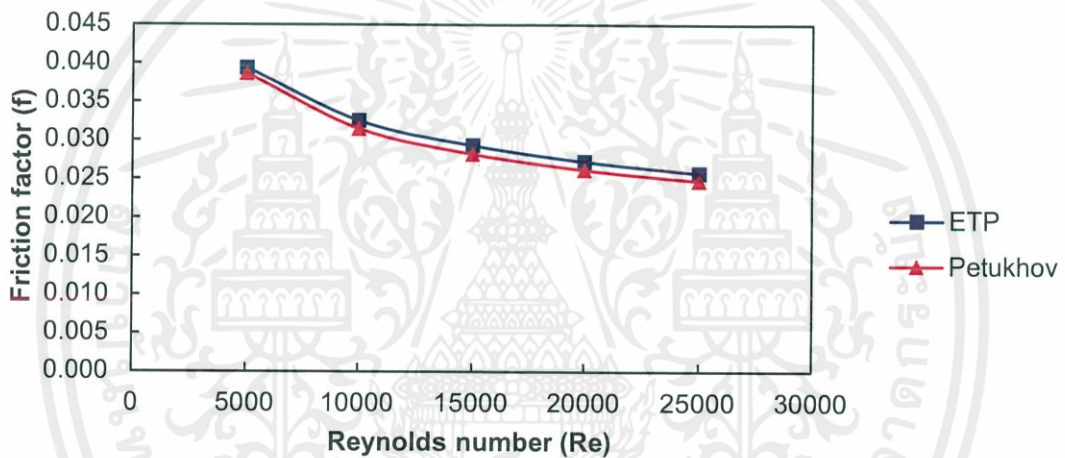


บทที่ 4

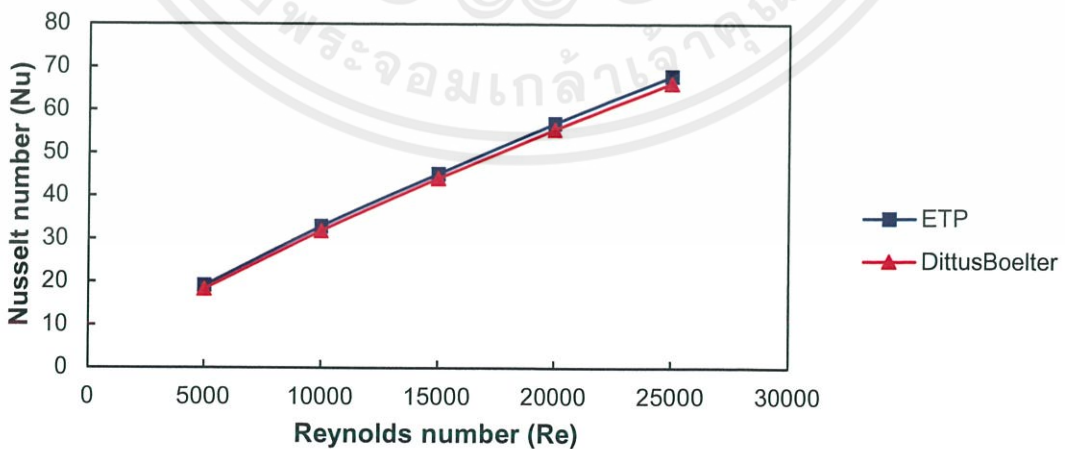
ผลและการวิเคราะห์ผลการจำลอง

4.1 ผลการเปรียบเทียบผลการจำลองกับสมการการอ้างอิง

สำหรับผลการจำลองท่อเปล่าไม่ใส่แผ่นกั้น จะมีการเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลจากการคำนวณโดยใช้สมการอ้างอิง พบว่าผลการจำลองค่าตัวประกอบความเสียดทาน มีค่าใกล้เคียงกับผลจากสมการการอ้างอิง Petukhov (สมการที่ 2.58) แสดงดังรูปที่ 4.1 และค่าเลขนีสเซลล์ท์ มีค่าใกล้เคียงกับผลจากสมการการอ้างอิง DittusBoelter (สมการที่ 2.61) แสดงดังรูปที่ 4.2 ซึ่งผลการเปรียบเทียบอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้



รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบผลของค่าตัวประกอบความเสียดทานของท่อเปล่าไม่ใส่แผ่นกั้น ระหว่างการจำลองและผลจากสมการอ้างอิง



รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบผลของเลขนีสเซลล์ท์ของท่อเปล่าไม่ใส่แผ่นกั้น ระหว่างการจำลองและผลจากสมการอ้างอิง

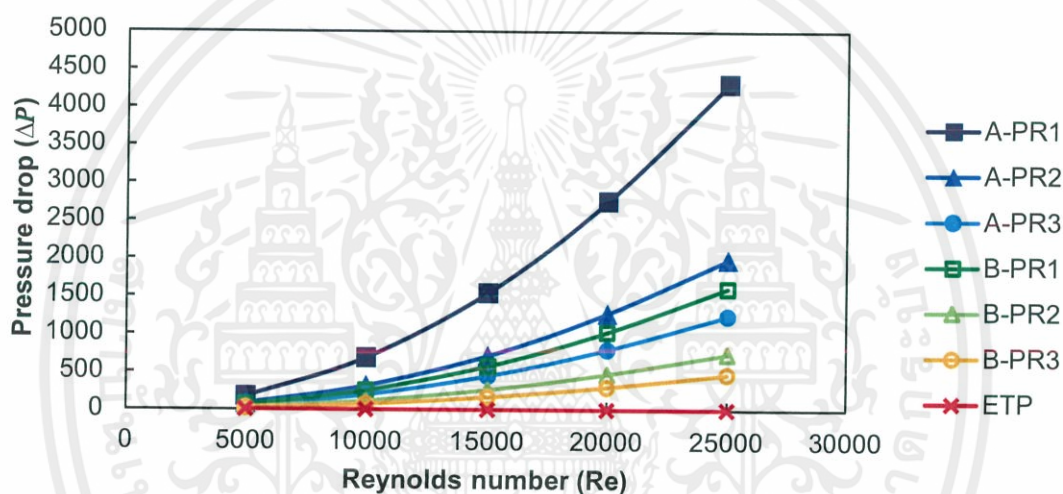
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการศึกษาความดันที่สูญเสียและตัวประกอบความเสียดทาน

จากการศึกษาอิทธิพลของลักษณะแผ่นกั้นที่แตกต่างกัน (A และ B) และอัตราส่วนของระยะห่างของแผ่นกั้นต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (PR) ที่มีผลต่อค่าความดันที่สูญเสียภายในท่อ แสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่า เมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความดันที่สูญเสียภายในท่อเพิ่มขึ้น

ลักษณะของแผ่นกั้นแบบ A จะมีค่าความดันที่สูญเสียมากกว่าแผ่นกั้นแบบ B เนื่องจากแผ่นกั้นแบบ A มีพื้นที่ที่ขวางทางการไหลอากาศมากกว่าแผ่นกั้นแบบ B

อัตราส่วนของระยะห่างของแผ่นกั้นต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อที่ $PR = 1$ มีค่าความดันที่สูญเสียมากกว่าที่ $PR = 2$ และที่ $PR = 2$ มากกว่าที่ $PR = 3$ เนื่องจากระยะระหว่างแผ่นกั้นที่ใกล้กัน โดยเฉพาะที่ $PR = 1$ จึงมีจำนวนของแผ่นกั้นตลอดความยาวท่อในช่วงที่จำลองมากกว่าในกรณีที่ $PR = 2$ และ $PR = 3$ ด้วยจำนวนของแผ่นกั้นที่มากขึ้นจึงส่งผลให้ค่าความดันที่สูญเสียมากขึ้น

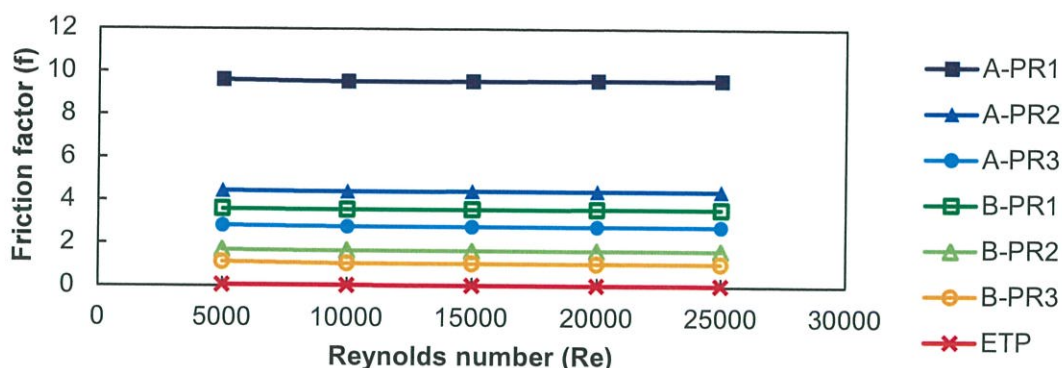


รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าของการสูญเสียความดันภายในท่อที่เลขเรย์โนลด์ต่างๆ

จากผลของการสูญเสียความดันภายในท่อ สามารถคำนวณค่าตัวประกอบความเสียดทานได้จากสมการ (2.57) แสดงดังรูปที่ 4.4 พบว่าเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น ค่าตัวประกอบความเสียดทานเปลี่ยนแปลงน้อยมาก เนื่องจากค่าตัวประกอบความเสียดทานเป็นความสัมพันธ์ของอัตราส่วนของค่าความดันที่สูญเสียในท่อและความเร็วเฉลี่ยของอากาศในท่อ การเพิ่มขึ้นของทั้งสองค่า ส่งผลให้ค่าตัวประกอบความเสียดทานเปลี่ยนแปลงน้อยมากในช่วงของเลขเรย์โนลด์ที่จำลอง

ลักษณะของแผ่นกั้นแบบ A จะมีค่าตัวประกอบความเสียดทานมากกว่าแผ่นกั้นแบบ B เนื่องจากแผ่นกั้นแบบ A มีพื้นที่ที่ขวางทางการไหลอากาศมากกว่าแผ่นกั้นแบบ B

อัตราส่วนของระยะห่างของแผ่นกั้นต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อที่ $PR = 1$ มีค่าตัวประกอบความเสียดทานมากกว่าที่ $PR = 2$ และที่ $PR = 2$ มากกว่าที่ $PR = 3$ เนื่องจากระยะระหว่างแผ่นกั้นที่ใกล้กัน โดยเฉพาะที่ $PR = 1$ จึงมีจำนวนของแผ่นกั้นตลอดความยาวท่อในช่วงที่จำลองมากกว่าในกรณีที่ $PR = 2$ และ $PR = 3$ ด้วยจำนวนของแผ่นกั้นที่มากขึ้นจึงส่งผลให้ค่าตัวประกอบความเสียดทานมากขึ้น



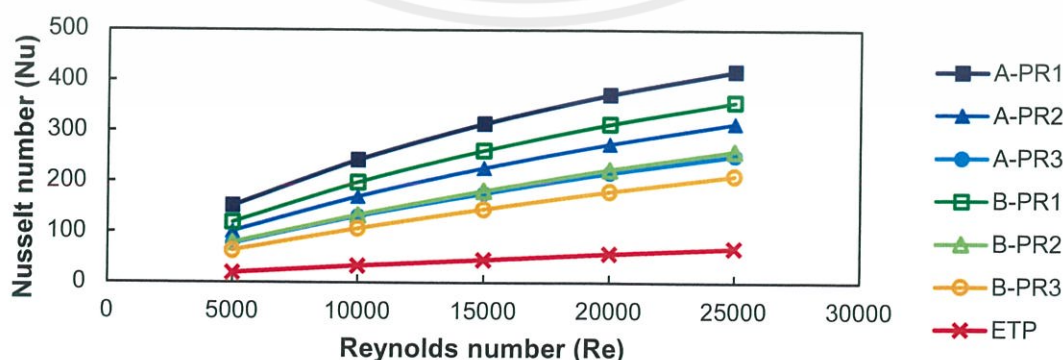
รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบค่าของตัวประกอบความเสียดทานที่เลขเรย์โนลด์ต่างๆ

4.3 ผลการศึกษาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและเลขนัสเซลท์

จากการศึกษาอิทธิพลของลักษณะแผ่นกั้นที่แตกต่างกัน (A และ B) และอัตราส่วนของระยะห่างของแผ่นกั้นต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (PR) ที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและเลขนัสเซลท์สามารถคำนวณด้วยสมการ (2.59) และ สมการ (2.60) แสดงดังรูปที่ 4.5 พบว่า เมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและเลขนัสเซลท์เพิ่มขึ้น เพราะเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น ทำให้ความปั่นป่วนของอากาศภายในท่อเพิ่มมากขึ้น ซึ่งความปั่นป่วนของอากาศภายในท่อที่เพิ่มมากขึ้นนี้ ส่งผลให้เลขนัสเซลท์มากขึ้น

ลักษณะของแผ่นกั้นแบบ A จะมีเลขนัสเซลท์มากกว่าแผ่นกั้นแบบ B เนื่องจากแผ่นกั้นแบบ A มีพื้นที่ที่ขวางทางการไหลอากาศมากกว่าแผ่นกั้นแบบ B ทำให้ความปั่นป่วนของอากาศภายในท่อเพิ่มมากขึ้น ซึ่งความปั่นป่วนของอากาศภายในท่อที่เพิ่มมากขึ้นนี้ ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและเลขนัสเซลท์มากขึ้น

อัตราส่วนของระยะห่างของแผ่นกั้นต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อที่ $PR = 1$ มีเลขนัสเซลท์มากกว่าที่ $PR = 2$ และที่ $PR = 2$ มากกว่าที่ $PR = 3$ เนื่องจากระยะระหว่างแผ่นกั้นที่ใกล้กันโดยเฉพาะที่ $PR = 1$ จึงมีจำนวนของแผ่นกั้นตลอดความยาวท่อในช่วงที่จำลองมากกว่าในกรณีที่ $PR = 2$ และ $PR = 3$ ด้วยจำนวนของแผ่นกั้นที่มากขึ้นทำให้อากาศภายในท่อเกิดความปั่นป่วนเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้เลขนัสเซลท์มากขึ้น



รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบค่าของเลขนัสเซลท์ที่เลขเรย์โนลด์ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

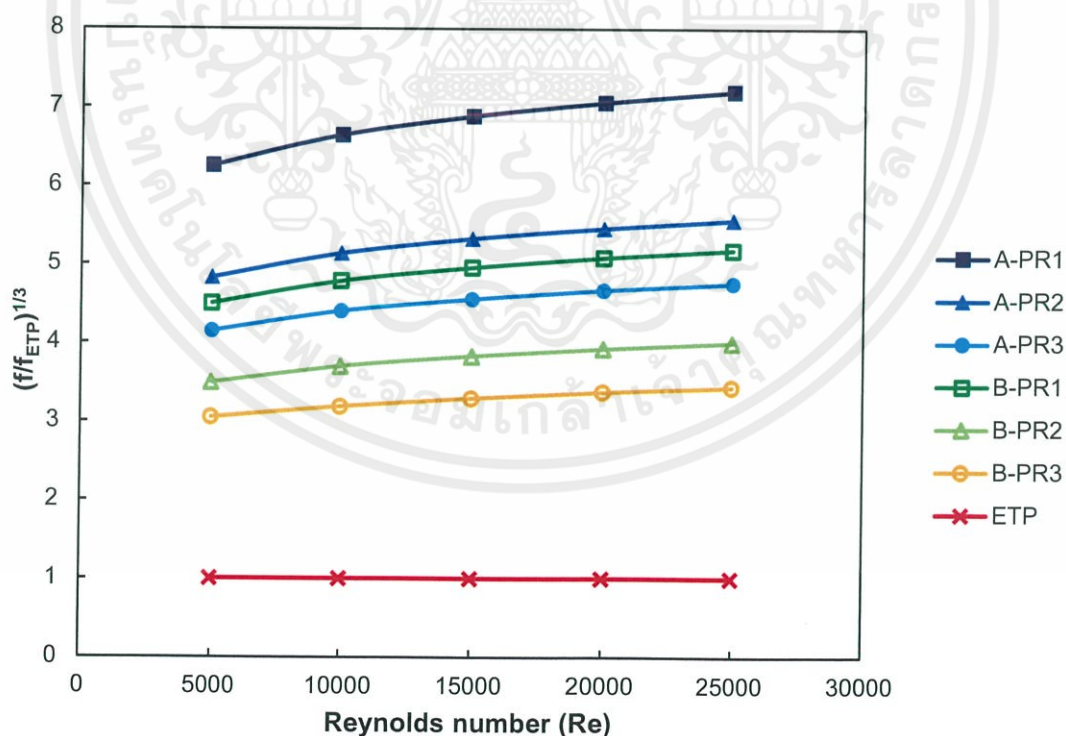
4.4 ผลการศึกษาตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อน

จากการศึกษาอิทธิพลของลักษณะแผ่นกั้นที่แตกต่างกัน (A และ B) และอัตราส่วนของระยะห่างของแผ่นกั้นต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (PR) ที่มีผลต่อค่าตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อน สามารถคำนวณด้วยสมการ (2.62) แสดงดังรูปที่ 4.5 พบว่า เมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและเลขนัสเซิลต์ลดลง เนื่องจากเมื่อเลขเรย์โนลด์สูงขึ้นเทอมของค่าอัตราส่วนระหว่างเลขนัสเซิลต์และเลขนัสเซิลต์ในกรณีท่อเปล่าไม่ใส่แผ่นกั้นลดลง แสดงดังรูปที่ 4.6 และพร้อมกันนั้นเทอมของค่าอัตราส่วนระหว่างตัวประกอบความเสียดทานและตัวประกอบความเสียดทานในกรณีท่อเปล่าไม่ใส่แผ่นกั้นเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.7 ส่งผลให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนลดต่ำลง

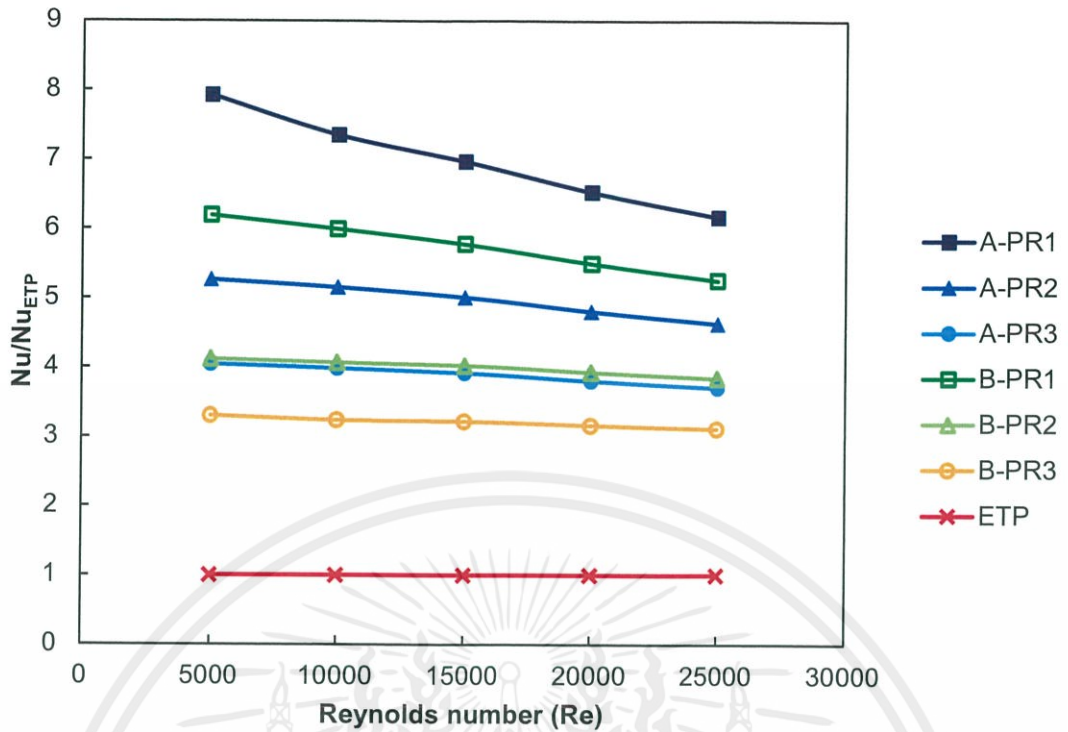
ลักษณะของแผ่นกั้นแบบ B จะมีค่าตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อนมากกว่าแผ่นกั้นแบบ A และที่อัตราส่วนของระยะห่างของแผ่นกั้นต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อที่ $PR = 1$ มีค่าตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อนมากกว่าที่ $PR = 2$ และที่ $PR = 2$ มากกว่าที่ $PR = 3$

เนื่องด้วยค่าของเลขนัสเซิลต์ในกรณีแผ่นกั้นแบบ B ที่ไม่ห่างจากแบบ A มากนัก และด้วยค่าตัวประกอบความเสียดทานในกรณีแผ่นกั้นแบบ A ห่างจากแบบ B จึงทำให้ค่าตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อนในกรณีแผ่นกั้นแบบ B มีค่ามากกว่าแผ่นกั้นแบบ A

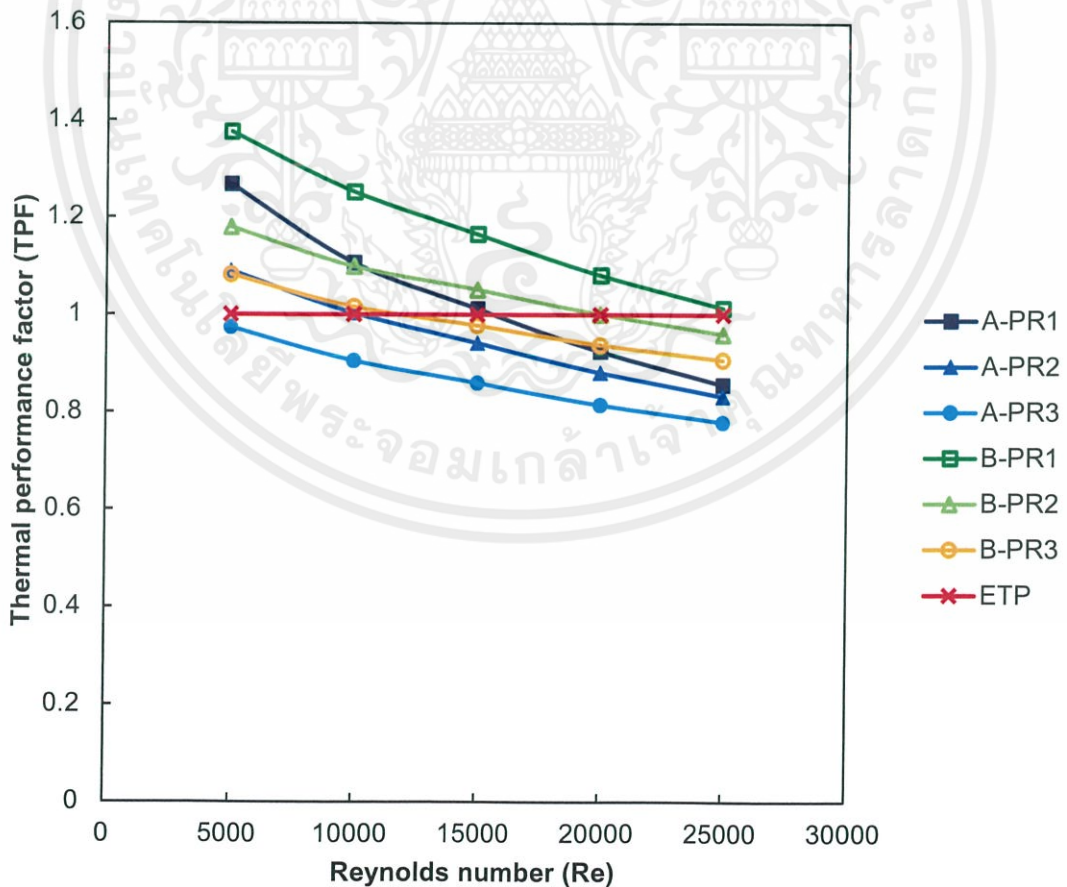
โดยที่กรณีที่ให้ค่าตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุด คือ แผ่นกั้นแบบ B อัตราส่วนของระยะห่างของแผ่นกั้นต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อที่ $PR = 1$



รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าอัตราส่วนระหว่างตัวประกอบความเสียดทานและตัวประกอบความเสียดทานในกรณีท่อเปล่าไม่ใส่แผ่นกั้นที่เลขเรย์โนลด์ต่างๆ



รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบค่าอัตราส่วนระหว่างเลขนัสเซลท์ และเลขนัสเซลท์ในกรณีท่อเปล่าไม่ใส่แผ่นกั้นที่เลขเรย์โนลด์ต่างๆ



รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบค่าของตัวประกอบสมรรถนะด้านความร้อนที่เลขเรย์โนลด์ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการจำลอง

จากผลการจำลองสามารถสรุปได้เป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

1. ผลการเปรียบเทียบผลการจำลองกับสมการการอ้างอิง

สำหรับการจำลองท่อเปล่าไม่ใส่แผ่นกั้น ตัวประกอบความเสียหาย และเลขนัสเซลล์ที่ได้จากการจำลอง มีค่าใกล้เคียงกับผลจากการคำนวณโดยใช้สมการการอ้างอิง

2. ผลการศึกษาความดันที่สูญเสียและตัวประกอบความเสียหาย

2.1 เมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น ค่าความดันที่สูญเสียภายในท่อจะเพิ่มขึ้น และค่าตัวประกอบความเสียหายเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

2.2 แผ่นกั้นแบบ A จะมีค่าความดันที่สูญเสียและค่าตัวประกอบความเสียหายมากกว่าแผ่นกั้นแบบ B

2.3 เมื่ออัตราส่วนของระยะห่างของแผ่นกั้นต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความดันที่สูญเสียและค่าตัวประกอบความเสียหายมีแนวโน้มลดลง

3. ผลการศึกษาความสัมพันธ์การพาความร้อนในเทอมเลขนัสเซลล์

3.1 เมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น เลขนัสเซลล์เพิ่มขึ้น

3.2 แผ่นกั้นแบบ A จะมีเลขนัสเซลล์มากกว่าแผ่นกั้นแบบ B

3.3 เมื่ออัตราส่วนของระยะห่างของแผ่นกั้นต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อมีค่าเพิ่มขึ้น เลขนัสเซลล์มีแนวโน้มลดลง

4. ผลการศึกษาค่าตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อน

4.1 เมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น ค่าตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อนลดลง

4.2 แผ่นกั้นแบบ B จะมีค่าตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อนมากกว่าแผ่นกั้นแบบ A

4.3 เมื่ออัตราส่วนของระยะห่างของแผ่นกั้นต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อนมีแนวโน้มลดลง

4.4 โดยที่กรณีที่ทำให้ค่าตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุด คือ แผ่นกั้นแบบ B อัตราส่วนของระยะห่างของแผ่นกั้นต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อที่ $PR = 1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ณัฐวัตร ไจกกลม. "การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของสมรรถนะการผสมแบบเจ็ตในถังผสมหลายรูปแบบ" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2557
- [2] H. K. Versteeg and W. Malalasekera. *An introduction to computational fluid dynamics : The finite volume method*. New York : Longman Scientific & Technical. 1995.
- [3] เอกราช บำรุงไทยชัยชาญ. *พื้นฐานพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ*. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง : ห้องปฏิบัติการพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ สาขาวิศวกรรมเคมี. 2556.
- [4] ANSYS, Inc. *ANSYS FLUENT 14.5 Theory Guide*. 2012.
- [5] Frank Kreith, Raj M. Manglik, Mark S. Bohn. (2011). *Principle of heat transfer (7thed)*. Cengage Learning.
- [6] Alok Kumar, Sunil Chamoli, Manoj Kumar. (2016). *Experimental investigation on thermal performance and fluid flow characteristics in circular cylindrical tube with circular perforated ring inserts*. *Experimental Thermal and Fluid Science Journal*.
- [7] Smith Eiamsa-ard, Chinaruk Thianpong, Petpices Eiamsa-ard, Pongjet Promvonge. (2009). *Convective heat transfer in a circular tube with short-length twisted tape insert*. *International Communications in Heat and Mass Transfer Journal*.
- [8] V. Kongkaitpaiboon, K. Nanan, S. Eiamsa-ard. (2010). *Experimental investigation of convective heat transfer and pressure loss in a round tube fitted with circular-ring turbulators*. *International Communications in Heat and Mass Transfer Journal*.
- [9] N. Piriyarungrod, S. Eiamsa-ard, C. Thianpong, M. Pimsarn, K. Nanan. (2015). *Heat transfer enhancement by tapered twisted tape inserts*. *Chemical Engineering and Processing Journal*.
- [10] Sompol Skullong, Pongjet Promvonge, Nuthvipa Jayranaiwachira, Chinaruk Thianpongb. (2016). *Experimental and numerical heat transfer investigation in a tubular heat exchanger with delta-wing tape inserts*. *Chemical Engineering and Processing Journal*.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

การกำหนดภาวะขอบเขตและวิธีการคำนวณในโปรแกรม

ในการจำลองเพื่อการศึกษาการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันต่อทรงกระบอกที่ติดตั้งแผ่นกั้นเจาะรูภายในท่อในรูปแบบสามมิติด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ มีการกำหนดภาวะขอบเขตและวิธีการคำนวณในโปรแกรม ดังตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 ภาวะขอบเขตและวิธีการคำนวณในโปรแกรมคอมพิวเตอร์

General	Mesh	Scale : mm												
	Solver	Type : Pressure-Based												
		Velocity Formulation : Absolute												
		Time : Steady												
Gravity	z : -9.81 m/s ²													
Models	Viscous	Realizable k-epsilon												
	Energy	Energy equation												
Materials	Fluid	Air คุณสมบัติแปรผันตามอุณหภูมิ												
	Solid	Copper คุณสมบัติแปรผันตามอุณหภูมิ												
Boundary Conditions	Inlet	Type : Velocity Inlet												
		Velocity Magnitude (m/s)												
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Re</th> <th>Velocity (m/s)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>5,000</td> <td>1.5433</td> </tr> <tr> <td>10,000</td> <td>3.0866</td> </tr> <tr> <td>15,000</td> <td>4.6299</td> </tr> <tr> <td>20,000</td> <td>6.1732</td> </tr> <tr> <td>25,000</td> <td>7.7165</td> </tr> </tbody> </table>	Re	Velocity (m/s)	5,000	1.5433	10,000	3.0866	15,000	4.6299	20,000	6.1732	25,000	7.7165
		Re	Velocity (m/s)											
		5,000	1.5433											
		10,000	3.0866											
		15,000	4.6299											
20,000	6.1732													
25,000	7.7165													

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 (ต่อ) ภาวะขอบเขตและวิธีการคำนวณในโปรแกรมคอมพิวเตอร์

Boundary Conditions	Inlet	Turbulent intensity	
		Re	Turbulent intensity (%)
		5,000	5.5176
		10,000	5.0596
		15,000	4.8096
		20,000	4.6397
	25,000	4.5121	
		Hydraulic diameter : 0.0508 m	
	Outlet	Type : Pressure Outlet	
	Wall	Type : Wall	
		Wall motion : Stationary wall	
		Shear condition : No slip	
		Heat Flux	
		Re	Heat Flux (w/m ²)
	5,000	292.3470	
	10,000	584.6939	
	15,000	877.0409	
	20,000	1,169.3879	
	25,000	1,461.7348	
Solution Method	Pressure-Velocity Coupling	Scheme : SIMPLE	
	Spatial Discretization	Gradient : Least Squares Cell Based	
		Pressure : Second Order	
		Momentum : Second Order Upwind	
		Turbulent Kinetic Energy : Second Order Upwind	
		Turbulent Dissipation Rate : Second Order Upwind	
	Energy : Second Order Upwind		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ผลที่ได้จากการจำลอง

ตารางที่ ข.1 ค่าของความดันลดจากการจำลอง

Re	ΔP (Pa)						
	ETP	A-PR1	A-PR2	A-PR3	B-PR1	B-PR2	B-PR3
5,000	1.3343	172.7133	79.5960	50.5178	64.4385	30.1065	20.0443
10,000	4.4110	685.3692	316.8176	199.3263	256.0764	118.2014	75.5180
15,000	8.9394	1,544.5239	713.9914	447.7700	576.7199	265.8257	168.9935
20,000	14.7721	2,754.5868	1,271.4386	796.1371	1,027.4764	473.3491	299.9135
25,000	21.7921	4,308.1756	1,984.6672	1,241.5329	1,605.2283	739.2561	467.0266

ตารางที่ ข.2 ค่าของอุณหภูมิจากการจำลอง

	Re	T_{Wall} (K)	T_{in} (K)	T_{out} (K)	T_{Bulk} (K)
ETP	5,000	337.1766	300.0000	315.3389	307.3863
	10,000	342.0056	300.0000	315.3493	307.3945
	15,000	345.2954	300.0000	315.3568	307.4002
	20,000	347.5022	300.0000	315.3627	307.4043
	25,000	349.4978	300.0000	315.3831	307.4158
A-PR1	5,000	312.0118	300.0000	315.3394	308.2517
	10,000	313.0078	300.0000	315.3501	308.2971
	15,000	313.8436	300.0000	315.3579	308.4019
	20,000	314.6053	300.0000	315.3640	308.4609
	25,000	315.3566	300.0000	315.3304	308.5501
A-PR2	5,000	314.1018	300.0000	315.3393	308.4415
	10,000	315.2875	300.0000	315.3501	308.5707
	15,000	316.1865	300.0000	315.3579	308.6221
	20,000	316.9900	300.0000	315.3640	308.6472
	25,000	317.7711	300.0000	315.3887	308.6747

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 (ต่อ) ค่าของอุณหภูมิจากการจำลอง

	Re	T _{Wall} (K)	T _{In} (K)	T _{Out} (K)	T _{Bulk} (K)
A-PR3	5,000	315.9066	300.0000	315.3392	308.5355
	10,000	317.3947	300.0000	315.3500	308.7091
	15,000	318.4580	300.0000	315.3579	308.7834
	20,000	319.3701	300.0000	315.3640	308.8266
	25,000	320.2317	300.0000	315.3886	308.8664
B-PR1	5,000	313.0855	300.0000	315.3438	308.2723
	10,000	314.1214	300.0000	315.3509	308.3443
	15,000	314.9398	300.0000	315.3587	308.3772
	20,000	315.6916	300.0000	315.3648	308.3935
	25,000	316.4280	300.0000	315.3886	308.4107
B-PR2	5,000	315.6528	300.0000	315.3401	308.4215
	10,000	317.0745	300.0000	315.3508	308.5587
	15,000	318.0422	300.0000	315.3586	308.6259
	20,000	318.8687	300.0000	315.3647	308.6613
	25,000	319.6533	300.0000	315.3885	308.6943
B-PR3	5,000	317.5046	300.0000	315.3400	308.4763
	10,000	319.3569	300.0000	315.3507	308.6583
	15,000	320.5277	300.0000	315.3585	308.7520
	20,000	321.4937	300.0000	315.3646	308.8080
	25,000	322.3825	300.0000	315.3884	308.8579

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้