

การวิเคราะห์การไหลแบบปั่นป่วนในท่อผสมรูปตัวที
ด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CFD ANALYSIS OF TURBULENCE PIPE FLOW IN MIXING T-JUNCTION



A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIRMENTS
FOR THE DEGREE OF BACHELOR IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACEDEMIC YEAR 2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง การวิเคราะห์การไหลแบบปั่นป่วนในท่อผสมรูปตัวทีด้วยพลศาสตร์ของไหล
เชิงคำนวณ
โดย นายติณณภพ ลำวัฒน์พร
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์
สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญาานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาานิพนธ์



..... ประธานกรรมการ
(ผศ.ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์)

..... กรรมการ
(อ.บุญชัย โชติวิริยวานิชย์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง	การวิเคราะห์การไหลแบบปั่นป่วนในท่อผสมรูปตัวทีด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
โดย	นายดิณณภพ ล้ำวัฒนพร
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์

บทคัดย่อ

ความล่าช้าเนื่องจากความร้อนสามารถเกิดขึ้นในท่อผสมรูปตัวทีที่ถูกใช้งานในการผสมน้ำสองสายที่มีอุณหภูมิที่แตกต่างกันได้เนื่องจากบริเวณดังกล่าวจะพบการแกว่งค่าของอุณหภูมิเนื่องจากการผสมที่ไม่สมบูรณ์กันของน้ำทั้งสองสายการไหล ปรากฏการณ์ดังกล่าวส่งผลให้ท่อผสมรูปตัวทีเกิดความเสียหายและมีอายุการใช้งานที่สั้นลง การนำตัวสนับสนุนความปั่นป่วน (Turbulence promoter) มาติดตั้ง ณ บริเวณท่อขาออก เพื่อสร้างการไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อ เป็นแนวคิดที่ช่วยในการผสมระหว่างน้ำทั้งสองอุณหภูมิ โดยในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ในการเปรียบเทียบพฤติกรรมการผสมของน้ำสองอุณหภูมิที่ถูกผสมด้วยท่อรูปตัวทีที่ไหลผ่านตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปทรงต่าง ๆ ประกอบด้วย สีเหลี่ยม สามเหลี่ยม และ วงกลม ซึ่งจุด leading edge ของแต่ละรูปทรงจะถูกติดตั้งไว้ทั้งหมดสามตำแหน่งภายในแนวตั้งฉากการไหล คือ $y=-25$ $y=0$ และ $y=25$ มิลลิเมตร (ตำแหน่ง $y=0$ มิลลิเมตร คือจุดกึ่งกลางท่อในแนวตั้งฉากกับการไหล) วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณถูกนำมาใช้ในการศึกษาผ่านโปรแกรม ANSYS FLUENT 14.5 เพื่อนำมาวิเคราะห์ถึงรูปทรงของตัวสนับสนุนความปั่นป่วนและตำแหน่งการวางที่มีความสามารถในการนำไปใช้ในการผสมของน้ำทั้งสองอุณหภูมิได้ดีที่สุดด้วยการศึกษาถึงผลของอุณหภูมิมixed ในแนวการไหลและแนวตั้งฉากกับการไหล รวมถึงศึกษาความเร็วในทิศตั้งฉากกับการไหลรอบตัวสนับสนุนความปั่นป่วนและค่าความดันลดเพื่อสนับสนุนผลการศึกษามixed จากผลการศึกษาพบว่าตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปวงกลมไม่มีความเหมาะสมในการนำมาใช้ผสมน้ำที่มีอุณหภูมิที่แตกต่างกัน เนื่องจากให้ผลลัพธ์ในการผสมที่แย่กว่าการผสมตามลักษณะปกติของท่อรูปตัวทีที่ไม่ได้ติดตั้งตัวสนับสนุนความปั่นป่วน ตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปสามเหลี่ยมที่ตำแหน่ง leading edge มีค่า $y=0$ มิลลิเมตรให้ผลลัพธ์ของการผสมที่ดีที่สุด รองลงมาคือตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปสี่เหลี่ยมที่ตำแหน่ง leading edge มีค่า $y=0$ มิลลิเมตร โดยผลศึกษาความเร็วในทิศตั้งฉากกับการไหลรอบตัวสนับสนุนความปั่นป่วนและค่าความดันลดก็ให้ผลลัพธ์ที่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับผลลัพธ์อุณหภูมิมixed

Report Title	CFD analysis of turbulent pipe flow in mixing T-junction
By	Mr. Tinnapob Lumwattanaporn
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2018
Advisor	Asst. Prof. Dr. Santi Wattananusorn

Abstract

Thermal fatigue in mixing flow T-junction pipes, which are used to mix two streams of water with different temperature, is caused by thermal fluctuation. This can damage pipes wall and reduce life cycle of pipes. Installing turbulence promoter is one of the idea to solve this problem. The object of this research is to compare the phenomena of mixing between two different water temperatures with triangle, square and circle turbulence promoter in three different leading edge positions of turbulence promoter in perpendicular flow axis. Three positions consists of top, middle and bottom positions of the pipe in vertical axis ($y=25$, $y=0$ and $y=-25$ mm. ; $y=0$ mm. is defined as middle of the pipe in perpendicular flow axis). Computational fluid dynamics (CFD) technique was used to help in this research. The Reynolds averaged equations with realizable k- ϵ turbulence model were used to simulate by ANSYS FLUENT 14.5 to compare the mixing temperature results. The study on mixing temperature in flow axis and perpendicular flow axis were made. Velocity in perpendicular flow axis around turbulence promoter and pressure drop were shown to support the temperature mixing results. The results showed that circle shape turbulence promoters are not appropriate to use for mixing two different temperature streams because they gave the worse result of mixing temperature more than mixing in blank T-junction pipe. Triangle shape at leading edge ($y=0$ mm.) gave the best results. The runner up is square at leading edge ($y=0$ mm.). The study on velocity in perpendicular flow axis around turbulence promoter and pressure drop said in the same way of the mixing results.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับความช่วยเหลือเป็นอย่างมากจาก คณะอาจารย์ บุคลากร ภายใน ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยทั้งนี้ผู้จัดทำ ปริญญาานิพนธ์ขออนุญาตขอขอบพระคุณคณะบุคคลที่มีส่วนร่วมที่ทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ ลุล่วง

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ ที่ให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ ในเรื่องกลศาสตร์ของไหล พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ การวิเคราะห์ผลการ ทดลอง วิธีการแก้ปัญหาระหว่างการทำปริญญาานิพนธ์ ตลอดจนการแก้ไข ตรวจสอบ เล่มปริญญา นิพนธ์ฉบับนี้ ให้สำเร็จลุล่วงไปได้

ขอขอบคุณ อ.บุญชัย โชติวิริยวานิชย์ คณะกรรมการสอบปริญญาานิพนธ์ สำหรับข้อเสนอ และความคิดเห็นเพิ่มเติมที่ช่วยทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ คณะรุ่นพี่ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง นายเอกราช บำรุงไทยไชยชาญ และนายศาดปัญญ์ ปภาธารินทร์ ที่ให้ ความช่วยเหลือในการติดตั้งโปรแกรม คำแนะนำในการใช้โปรแกรมและคำแนะนำในการวิเคราะห์ผล การทดลองในการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ คณะอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า คุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ในการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมีสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ ทหารลาดกระบัง ที่คอยดำเนินการความสะดวกด้านงานเอกสาร

ขอขอบคุณ เพื่อนร่วมรุ่นวิศวกรรมเคมี รุ่นที่ 22 ที่เป็นกำลังใจและคอยเชื่อเหลือกันมาตลอด ระยะเวลาในการทำปริญญาานิพนธ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งนายปกรณ์ ปลัดจี้ ที่ช่วยกันศึกษาพลศาสตร์ ของไหลเชิงคำนวณ

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ บิดา มารดาและครอบครัว ที่สนับสนุน อยู่เคียงข้างและเป็น กำลังใจที่สำคัญที่สุดเสมอมาในตลอดช่วงระยะเวลาในการศึกษาทั้งหมดที่ผ่านมา

ดิฉันทนภาพ ล้ำวัฒนพร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูปภาพ	VII
คำอธิบายสัญลักษณ์	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎี	4
2.1 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD)	4
2.2 สมการที่ใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับของไหล	6
2.3 ความปั่นป่วนและแบบจำลองความปั่นป่วน	9
2.4 การไหลผ่านวัตถุที่อยู่ในของไหล	16
บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน	19
3.1 คำอธิบายการดำเนินงาน	19
3.2 การศึกษาความถูกต้องของแบบจำลองทอรูปตัวทีในรูปแบบ 2 มิติ	19
3.3 การเปรียบเทียบการนำตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปสามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม และวงกลมมาใช้ในการย่นระยะที่อุณหภูมิน้ำใกล้เคียงกันตลอดทั้งหน้าตัด	21
บทที่ 4 ผลการจำลองและวิเคราะห์ผลการจำลอง	23
4.1 การหาความละเอียดของกริดที่มีความเหมาะสมในการจำลอง	23
4.2 การเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลองที่ใช้อ้างอิง	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 ผลของการติดตั้งตัวสนับสนุนความปั่นป่วนต่ออุณหภูมิผสมในทิศตั้งฉากการไหล	26
4.4 ผลของการติดตั้งตัวสนับสนุนความปั่นป่วนต่ออุณหภูมิในทิศแนวการไหล	33
4.5 ผลของการติดตั้งตัวสนับสนุนความปั่นป่วนต่อความเร็วของน้ำในแนวแกนตั้งฉากกับทิศทางการไหล	35
4.6 ความดันลดหลังจากการติดตั้งตัวสนับสนุนความปั่นป่วน	40
บทที่ 5 สรุปผลการจำลอง	41
5.1 สรุปผลการจำลอง	41
5.2 ข้อเสนอแนะ	42
เอกสารอ้างอิง	43
ภาคผนวก	44
ภาคผนวก ก คอนทัวร์ของอุณหภูมิภายในท่อ	45
ภาคผนวก ข ระเบียบวิธีการแบบ SIMPLE	49



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า	
ตารางที่ 2.1	ค่าคงที่ต่าง ๆ ในแบบจำลองความปั่นป่วน k-epsilon	16
ตารางที่ 3.1	การกำหนดสถานะขอบเขต	20
ตารางที่ 3.2	การตั้งค่าการจำลอง	20
ตารางที่ 3.3	คุณสมบัติของน้ำ	21
ตารางที่ 3.4	การตั้งค่ารูปแบบระเบียบการเชิงตัวเลข	21
ตารางที่ 3.5	ลักษณะรูปและการวางตัวสนับสนุนความปั่นป่วน	22
ตารางที่ 4.1	ค่า T^* ของตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปร่างและตำแหน่งต่าง ๆ	32
ตารางที่ 4.2	ค่า X^* ของตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปร่างและตำแหน่งต่าง ๆ ที่ทำให้ค่า T^* มีค่า 0.1	33
ตารางที่ 4.3	ตารางแสดงค่าความดันลดหลังติดตั้งตัวสนับสนุนความปั่นป่วน	40
ตารางที่ ก.1	คอนทัวร์รัศมีของกรณีต่าง ๆ ภายในท่อ	48
ตารางที่ ข.1	ค่าสัมประสิทธิ์การปรับแก้ความดัน	51



สารบัญญรูปภาพ

	หน้า	
รูปที่ 2.1	วิธีการคำนวณการไหลแบบปั่นป่วน	11
รูปที่ 3.1	ขนาดของท่อรูปตัวทีที่อ้างอิงจากงานวิจัยของ Kimura และคณะ	19
รูปที่ 3.2	กริดในช่วงท่อขาออกของท่อรูปตัวทีในโปรแกรม Gambit 2.4	20
รูปที่ 4.1	โปรไฟล์ความเร็ว (Velocity profile) ณ จุดที่กำหนด จากแบบจำลองที่มีจำนวนกริดแตกต่างกัน	23
รูปที่ 4.2	อุณหภูมิ ณ จุดที่กำหนดจากแบบจำลองที่มีจำนวนกริดต่างกัน	24
รูปที่ 4.3	การเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็ว ณ จุดที่กำหนดของผลการทดลองและผลการจำลอง	25
รูปที่ 4.4	การเปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ จุดที่กำหนดของผลการทดลองและผลการจำลอง	25
รูปที่ 4.5	อุณหภูมิภายในหน้าตัดท่อที่ระยะ 15D ของท่อเปล่าที่ไม่ได้ติดตั้งสันนํ้าวนปั่นป่วน	27
รูปที่ 4.6	อุณหภูมิภายในหน้าตัดท่อที่ระยะ 15D ของท่อเปล่าที่ติดตั้งสันนํ้าวนปั่นป่วนรูปสามเหลี่ยม	27
รูปที่ 4.7	อุณหภูมิภายในหน้าตัดท่อที่ระยะ 15D ของท่อเปล่าที่ติดตั้งสันนํ้าวนปั่นป่วนรูปสี่เหลี่ยม	29
รูปที่ 4.8	อุณหภูมิภายในหน้าตัดท่อที่ระยะ 15D ของท่อเปล่าที่ติดตั้งสันนํ้าวนปั่นป่วนรูปวงกลม	30
รูปที่ 4.9	การเปลี่ยนแปลงความเร็วในทิศตั้งฉากกับแนวการไหลของนํ้ารอบ ๆ ตัวสันนํ้าวนปั่นป่วนที่มีรูปร่างแตกต่างและตำแหน่ง leading edge เหมือนกัน	36
รูปที่ 4.10	การเปลี่ยนแปลงความเร็วในทิศตั้งฉากกับแนวการไหลของนํ้ารอบ ๆ ตัวสันนํ้าวนปั่นป่วนที่มีรูปร่างเหมือนกันและตำแหน่ง leading edge ต่างกัน	38
รูปที่ ข.1	ขั้นตอนของระเบียบวิธีแบบ SIMPLE	53

คำอธิบายสัญลักษณ์

สัญลักษณ์ตัวอักษรภาษาอังกฤษ

A	พื้นที่หน้าตัด
C_D	ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน
C_L	ค่าสัมประสิทธิ์แรงยก
D	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ
F_D	แรงต้าน
F_L	แรงยก
p	ความดัน
p^*	ความดันคาตเดา
p'	ความดันปรับแก้
S_M	เทอมของแหล่งโมเมนตัมอื่นๆ
S_k	เทอมแหล่งกำเนิดที่ผู้ใช้กำหนดชั้นของ k
S_ε	เทอมแหล่งกำเนิดที่ผู้ใช้กำหนดชั้นของ ε
T	อุณหภูมิของน้ำ
T'	อัตราส่วนระหว่างผลต่างอุณหภูมิต่อผลต่างระยะทางในทิศทางไหล
T^*	ค่าสัมบูรณ์ของผลต่างของอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งในหน้าตัดที่เทียบกับกับอุณหภูมิเฉลี่ยของหน้าตัด
t	เวลา
u	ความเร็วในแนวแกน x
u [*]	ความเร็วคาตเดาในแนวแกน x
u'	ความเร็วปรับแก้ในแนวแกน x
v	ความเร็วในแนวแกน y
v [*]	ความเร็วคาตเดาในแนวแกน y
v'	ความเร็วปรับแก้ในแนวแกน y
w	ความเร็วในแนวแกน z

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์ตัวอักษรภาษาอังกฤษ (ต่อ)

w^*	ความเร็วคาตเดาในแนวแกน z
w'	ความเร็วปรับแก้ในแนวแกน z
V_x	ความเร็วในทิศการไหล
V_M	ความเร็วเฉลี่ยในทิศการไหล
V_y	ความเร็วในทิศตั้งฉากกับทิศทางการไหล
V_y^*	ความเร็วเฉลี่ยในทิศตั้งฉากกับทิศทางการไหลในแต่ละหน้าตัดหารด้วยความเร็วขาเข้าท่อหลักของน้ำ
X	ระยะในทิศแนวการไหล
X^*	ระยะในแนวการไหลหลังตัวสนับสนุนความปั่นป่วนหารด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางท่อหลัก
X_2^*	ระยะทางในทิศการไหลจากจุดที่ก่อนถึง leading edge 36 มิลลิเมตร หารด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางท่อหลัก
y	ระยะในทิศตั้งฉากกับแนวการไหล

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์ตัวอักษรกรีก

ρ	ความหนาแน่น
ε	อัตราการสลายตัวของพลังงานจลล์ปั่นป่วน
f	ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน
λ	สัมประสิทธิ์ความหนืดอันดับสอง
μ	สัมประสิทธิ์ความหนืด
μ_{eff}	ค่าสัมประสิทธิ์
σ_k	ตัวเลขพรีนดเทิลปั่นป่วนสำหรับ k
σ_ε	ตัวเลขพรีนดเทิลปั่นป่วนสำหรับ ε
τ	ความเค้นเฉือน
φ	เวลาเฉลี่ยของคุณสมบัติการไหล
φ'	เวลาเฉลี่ยของคุณสมบัติการไหลแกว่ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1. ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ท่อรูปตัวที (T-junction pipe) เป็นอุปกรณ์สำคัญที่ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในระบบท่อ ลักษณะการถูกนำมาใช้งานของท่อรูปตัวทีคือการเชื่อมต่อทั้งหมดสามท่อเข้าด้วยกัน ซึ่งส่งผลทำให้ลักษณะการไหลของของไหลผ่านข้อรูปตัวทีเป็นไปได้ทั้งหมดสองรูปแบบหลักคือการรวมสายการไหล และการแยกสายการไหล โดยหนึ่งในลักษณะการใช้งานท่อรูปตัวทีที่จะทำให้ท่อรูปตัวทีเสื่อมสภาพเร็วขึ้นคือ การใช้รวมของไหลสองสายที่มีอุณหภูมิที่แตกต่างกัน จากการศึกษาพฤติกรรมการรวมสายการไหลของน้ำสองอุณหภูมิที่แตกต่างกันด้วยท่อรูปตัวทีที่แตกต่างกัน พบว่าช่วงระยะแรกของการไหลออก มีการแยกชั้นระหว่างน้ำสองอุณหภูมิ และเมื่อผ่านไประยะหนึ่งอุณหภูมิภายในท่อจะเริ่มปรับตัวให้เท่ากันทั่วทั้งหน้าตัดท่อ ซึ่งเป็นระยะที่ค่อนข้างไกล ลักษณะการใช้งานดังกล่าวสามารถพบได้ตามโรงงาน เช่น โรงงานพลังงานไฟฟ้านิวเคลียร์ ส่งผลให้ระบบท่อเกิดความล้าเนื่องจากความร้อน (Thermal fatigue) ที่จะเกิดขึ้นเมื่อวัสดุสัมผัสกับสภาวะที่มีการแกว่งค่าของอุณหภูมิ (Thermal fluctuation) ทำให้วัสดุเกิดความเสียหายและเสื่อมสภาพการใช้งานเร็วกว่าที่ควร เป็นผลให้ต้องหยุดกระบวนการผลิตเพื่อทำการซ่อมแซมในส่วนที่เกิดความเสียหาย

การศึกษาพฤติกรรมการผสมในบริเวณที่ของไหลผสมกันเป็นสิ่งสำคัญในการเข้าใจการเกิดความล้าเนื่องจากความร้อนในข้อต่อรูปตัวที ปัจจุบันมีการใช้วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics) หรือเทคนิค CFD มาศึกษาพฤติกรรมการผสมในบริเวณที่ของไหลผสมกัน เนื่องจากเป็นวิธีที่ประหยัดค่าใช้จ่ายและเวลาในการศึกษา มีความปลอดภัย และสามารถมองเห็นภาพสนามการไหลและกราฟคอนทัวร์ของอุณหภูมิได้อย่างชัดเจนและการศึกษาพฤติกรรมการผสมกันของของไหลสองอุณหภูมิด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในปัจจุบันนั้นแทบจะเป็นการจำลองด้วยรูปแบบสามมิติทั้งสิ้น โดยการศึกษาด้วยรูปแบบสามมิตินั้นให้ความแม่นยำที่สูงมาก แต่มีข้อจำกัดการจำลองคือต้องใช้โดเมน (Domain) ในการคำนวณเป็นจำนวนมาก ทำให้จำเป็นต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงในการคำนวณรวมถึงการใช้เวลาที่มากขึ้น การจำลองด้วยรูปแบบสองมิติถูกนำมาพิจารณาถึงความแม่นยำในการศึกษาพฤติกรรมการผสมในบริเวณที่ของไหลผสมกัน

การนำตัวสนับสนุนความปั่นป่วน (Turbulence promoter) มาติดตั้ง ณ บริเวณท่อขาออก เพื่อสร้างการไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อ เป็นแนวคิดที่ช่วยในการผสมระหว่างของไหลทั้งสองอุณหภูมิ

เพื่อลดการแกว่งค่าของอุณหภูมิของระบบท่อที่มีการใช้ท่อรูปตัวทีในการผสมของของไหลที่มีอุณหภูมิที่ต่างกัน โดยในการศึกษาครั้งนี้จะทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลของน้ำสองอุณหภูมิที่ถูกผสมด้วยท่อรูปตัวทีที่ไหลผ่านตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปทรงต่าง ๆ ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เพื่อที่จะนำมาวิเคราะห์ถึงรูปทรงของตัวสนับสนุนความปั่นป่วนที่มีความเหมาะสมที่สุดในการนำไปใช้ในการผสมน้ำทั้งสองอุณหภูมิ

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาการสร้างแบบจำลองท่อรูปตัวทีด้วยโปรแกรม Gambit 2.4.6 และศึกษาการจำลองลักษณะการไหลผ่านท่อรูปตัวทีด้วยโปรแกรม Fluent 14.5
2. เพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในรูปแบบ 2 มิติ กับผลการทดลอง
3. เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ของการผสมของน้ำที่ไหลผ่านตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปแบบต่าง ๆ ที่ถูกติดตั้ง ณ บริเวณท่อขาออกของท่อรูปตัวที

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. สร้างแบบจำลองข้อต่อรูปตัวที ในรูปแบบ 2 มิติ ด้วยโปรแกรม Gambit 2.4.6 และศึกษาการจำลองลักษณะการไหลผ่านท่อรูปตัวทีด้วยโปรแกรม Fluent 14.5 และเปรียบเทียบผลการจำลองด้วยการเปรียบเทียบค่าความเร็ว และอุณหภูมิของของไหล บริเวณขาออกของท่อรูปตัวทีกับงานวิจัยการทดลองที่นำมาเป็นต้นแบบในการจำลอง
2. ศึกษาอุณหภูมิของน้ำที่ไหลผ่านตัวสนับสนุนความปั่นป่วนที่ถูกติดตั้ง ณ บริเวณท่อขาออกของท่อรูปตัวทีในรูปแบบ 2 มิติ โดยจะใช้ตัวสนับสนุนความปั่นป่วนทั้งหมด 3 รูปทรง ประกอบด้วย สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม และวงกลม ที่ถูกติดตั้งไว้ ณ ตำแหน่งที่ leading edge มีค่า $y=25$ $y=0$ และ $y=-25$ มิลลิเมตร โดยนิยามตำแหน่ง $y=0$ คือจุดกึ่งกลางท่อในทิศตั้งฉากกับการไหลของท่อที่ตำแหน่งในแนวการไหลเดียวกัน
3. กำหนดให้ท่อและตัวสนับสนุนความปั่นป่วนเป็นผนังแบบอะเดียแบติก (Adiabatic) และน้ำมีสภาวะการไหล (Flow condition) ดังนี้
 - ตัวเลขเรย์โนลด์สของท่อหลักและท่อย่อยมีค่า 38,000 และ 6,600 ตามลำดับ
 - การไหลเป็นแบบคงตัว (Steady flow)
 - ของไหลเป็นแบบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible fluid)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
2. ความเข้าใจในการใช้โปรแกรม Gambit และ Fluent
3. ทราบถึงความแม่นยำในการใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ แบบ 2 มิติ มาใช้ในการทำนายพฤติกรรมการผสมในบริเวณที่ของไหลผสมกัน
4. ทราบถึงผลเปรียบเทียบในการนำตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปทรงต่าง ๆ ที่มีตำแหน่งการวางแตกต่างกันมาใช้ในลกระยะที่อุณหภูมิของน้ำผสมกันดี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics, CFD)

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเป็นสาขาของกลศาสตร์ของไหลที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบที่เกี่ยวข้องกับการไหลของของไหล การถ่ายเทความร้อน และปรากฏการณ์อื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น ปฏิกิริยาเคมี โดยใช้กฎสมมูลมวล กฎสมมูลพลังงาน และกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตัน เป็นหลักในการคำนวณประกอบกับระเบียบวิธีการทางคณิตศาสตร์ เพื่อเปลี่ยนสมการทางพลศาสตร์ของไหลที่เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยและไม่เป็นเชิงเส้นให้อยู่ในรูปสมการพีชคณิต คอมพิวเตอร์มีหน้าที่คำนวณการไหลบนโดเมนที่ต้องการศึกษาซึ่งถูกทำให้อยู่ในรูปแบบไม่ต่อเนื่อง หลังจากนั้นสามารถแสดงผลการคำนวณออกมาในรูปแบบต่าง ๆ เช่น คอนทัวร์ เวกเตอร์ เป็นต้น

โดยทั่วไปแล้วกระบวนการในการศึกษาด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณแบ่งได้เป็น 3 กระบวนการหลักคือ

1. กระบวนการก่อนการคำนวณ (Pre-processor) คือขั้นตอนการเตรียมความพร้อมก่อนการคำนวณ โดยการป้อนข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการคำนวณปัญหาการไหลในรูปแบบต่าง ๆ ให้กับโปรแกรมคำนวณ ในส่วนนี้ประกอบด้วยขั้นตอนดังนี้คือ
 - 1.1 นิยามรูปร่างขอบเขตที่สนใจ ซึ่งเป็นการกำหนดขอบเขตของปัญหาที่ต้องการคำนวณในขั้นตอนนี้ขอบเขดยังอยู่ในรูปต่อเนื่องตามธรรมชาติ
 - 1.2 เนื่องจากขอบเขตที่ต่อเนื่องนั้นยากที่จะคำนวณได้ในทุก ๆ จุดจึงต้องมีการแบ่งขอบเขตของปัญหาที่มีความต่อเนื่องนั้นให้เป็นส่วนเล็ก ๆ ที่ไม่ต่อเนื่องจำนวนมากและไม่เกิดความทับซ้อนกันที่เรียกว่า กริด (Grid) หรือ เมช (Mesh) ซึ่งการแบ่งดังกล่าวจะเป็นการละทิ้งความสวยงามของธรรมชาติเนื่องจากคำตอบของปัญหาการไหล (ความเร็ว ความดัน อุณหภูมิ เป็นต้น) จะถูกนิยามอยู่บนโหนด (Node) ภายในแต่ละเซลล์ (Cell) เท่านั้น
 - 1.3 เลือกสมการหรือแบบจำลองการคำนวณที่ใช้คำนวณปรากฏการณ์ธรรมชาติทั้งด้านกายภาพและเคมี ยกตัวอย่างเช่น ปรากฏการณ์การไหลแบบปั่นป่วนจำเป็นต้องใช้แบบจำลองความปั่นป่วนในการคำนวณการไหลเป็นต้น ส่วนสมการอื่น ๆ ยกตัวอย่างเช่น สมการสถานะ (Equation of state) สมการการถ่ายเทมวลสาร เป็นต้น
 - 1.4 นิยามคุณสมบัติของของไหล เช่น ความหนืด ความหนาแน่น เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.5 กำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่เหมาะสมกับขอบเขตของปัญหา
2. กระบวนการคำนวณ (Solver) คือ ส่วนของการคำนวณ ซึ่งเทคนิคในการคำนวณเชิงตัวเลขที่มีอยู่ 4 แบบด้วยกัน คือระเบียบวิธี Finite difference ระเบียบวิธี Finite element ระเบียบวิธี Spectral และระเบียบวิธี Finite volume
3. กระบวนการหลังการคำนวณ (Post-processor) คือ ส่วนแสดงผลที่ได้จากการคำนวณที่มีการพัฒนาเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งาน ด้วยความก้าวหน้าทางด้านงานวิศวกรรม ทำให้มีการแสดงผลแบบกราฟิกที่ดีขึ้น ซึ่งนำไปสู่ชุดโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่ประกอบด้วย เครื่องมือที่ใช้ดูข้อมูลแบบอนิเมชันประกอบด้วยการประกอบด้วยรูปแบบต่าง ๆ เช่น รูปทรงโดเมนและการแสดงกริด เวกเตอร์ เส้นและคอนทัวร์ พื้นผิว 2 มิติและ 3 มิติ การติดตามอนุภาค การจัดการภาพการมอง (การย้าย การหมุน การปรับ ฯลฯ)

ปัจจุบันนี้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเป็นเครื่องมือสำคัญทางวิศวกรรมที่มีความนิยมมาก เนื่องจากสามารถแสดงรายละเอียดการทำนายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับของไหลได้ และสามารถแสดงข้อมูลจำนวนมากโดยมีต้นทุนการดำเนินงานต่ำ โดยมีการใช้งานอย่างกว้างขวางในหลากหลายสาขาอาชีพ ยกตัวอย่างเช่น

- อากาศพลศาสตร์ของอากาศยานและยานพาหนะ: การหาแรงยกและแรงต้าน
- อุตุนิยมวิทยา: การพยากรณ์อากาศ
- วิศวกรรมเคมี: การไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์ เครื่องปั้นกวน และอุปกรณ์อื่น ๆ
- วิศวกรรมไฟฟ้า: การระบายความร้อนสำหรับวงจรไฟฟ้า
- วิศวกรรมเครื่องกล: การไหลภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
- วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม: การกระจายตัวของมลพิษในอากาศ
- วิศวกรรมชีวการแพทย์: การไหลภายในหลอดเลือด
- วิทยาศาสตร์การกีฬา: การออกแบบหมวกของนักปั่นจักรยาน

เนื่องจากว่าพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเป็นการจำลองปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับของไหล ดังนั้นเมื่อนำมาพิจารณากับการทดลองจริงพบว่ามีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกัน สำหรับข้อดีของการทดลองนั้นคือ ผลที่ได้สามารถนำมาวิเคราะห์โดยผ่านการคำนวณที่ไม่ซับซ้อนมากเกินไปและข้อมูลที่ได้อ่อนช้อยน่าเชื่อถือ สำหรับข้อเสียของการทดลองคือในกรณีที่ทำการทดลองเพื่อออกแบบอุปกรณ์จำเป็นต้องใช้งบประมาณ เวลาและทรัพยากรในการทำสูง ซึ่งข้อเสียของการทดลองสามารถแก้ปัญหาได้ด้วยการใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถคำนวณได้ปริมาณข้อมูลที่ละเอียด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาก ๆ มีความหลากหลาย ประหยัดทรัพยากรและเวลา อีกทั้งการประมาณค่าจากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริง ซึ่งเพียงพอต่อการนำไปวิเคราะห์ผลให้มีความแม่นยำและมีประสิทธิภาพ แต่การจำลองนั้นมีข้อจำกัดคือ ในกรณีที่ศึกษาการไหลที่ซับซ้อนมาก ๆ จำเป็นต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่มีคุณภาพสูงนั้นหมายความว่าทรัพยากรที่ใช้ก็จะมากขึ้นเช่นกัน และที่สำคัญการจำลองต้องมีการเปรียบเทียบกับผลการทดลองหรือทฤษฎีก่อนทุกครั้ง เพื่อยืนยันว่าแบบจำลองของเรามีความถูกต้องตามผลการทดลองหรือทฤษฎีแล้วจึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการทำนายผลหรือใช้ในการออกแบบต่อไปได้ ด้วยจุดเด่นของเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ประกอบกับความก้าวหน้าในปัจจุบัน จึงทำให้เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเป็นวิธีที่เหมาะสมอย่างยิ่งในด้านการวิจัยออกแบบและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์อันจะนำไปสู่ความก้าวหน้าทางอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีต่อไป

2.2 สมการที่ใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับของไหล

2.2.1 สมการควบคุม (Governing equation)

สมการควบคุมของไหลเป็นชุดสมการที่มาจากกฎการอนุรักษ์ทางฟิสิกส์ ประกอบด้วย กฎการอนุรักษ์มวลของของไหล กฎข้อที่สองของนิวตัน (อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมเท่ากับผลรวมของแรงต่อส่วนมูลฐานของไหล) และกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ (อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานเท่ากับผลรวมอัตราการเพิ่มความร้อนสุทธิที่เข้าสู่ส่วนมูลฐานของไหล และอัตราของงานสุทธิต่อส่วนมูลฐานของไหล)

2.2.1.1 สมการอนุรักษ์มวล (Mass conservation equation)

จากทฤษฎีกฎการอนุรักษ์มวลที่ว่า “มวลไม่สามารถทำให้หายหรือสร้างขึ้นใหม่ได้” สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการอนุกรมของส่วนมูลฐานของไหลได้ว่าอัตราการเพิ่มของมวลในส่วนมูลฐานของไหลเท่ากับอัตราการออกของมวลในส่วนมูลฐานของไหลหลังจากที่ตุลมวลในส่วนมูลฐานของไหลแล้วจัดรูปสมการ จะได้สมการอนุรักษ์มวลดังนี้

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

สำหรับสมการที่ 2.1 ถูกเรียกว่า สมการความต่อเนื่อง (Continuity equation)

สำหรับของไหลอัดตัวไม่ได้ (Incompressible fluid) สมการข้างต้นสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \text{ หรือ } \nabla \cdot (\rho \bar{u}) = 0 \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่	ρ	คือ ความหนาแน่น (Density)
	t	คือ เวลา (Time)
	U	คือ เวกเตอร์ความเร็ว (Velocity vector) โดยที่ $U = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}$
	u	คือ ความเร็วแนวแกน x
	v	คือ ความเร็วแนวแกน y
	w	คือ ความเร็วแนวแกน z

2.2.1.2 สมการโมเมนตัม (Momentum equation)

จากกฎข้อที่สองของนิวตันกล่าวไว้ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงส่วนมูลฐานของไหลเท่ากับผลรวมแรงที่กระทำต่อส่วนมูลฐานของไหล แรงที่มีผลต่อส่วนมูลฐานของไหลแบ่งออกได้เป็นสองประเภทคือ แรงที่กระทำต่อตัวของไหล (Body forces) เช่น แรงโน้มถ่วง แรงทางไฟฟ้า แรงหนีศูนย์กลาง และ แรงกระทำที่พื้นผิวของไหล (Surface forces) เช่น แรงเนื่องจากความดัน และ แรงเนื่องจากความหนืด

เมื่อคลสมการโมเมนตัมของส่วนมูลฐานของไหลและจัดรูปสมการสำหรับของไหลสถานะไม่คงตัวสามมิติ จะได้สมการโมเมนตัมในรูปแบบไม่อนุรักษ์ (Momentum equation in non-conservation form) ในทิศทาง x y และ z แสดงได้ดังนี้

$$\text{แนวแกน x : } \rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (2.3)$$

$$\text{แนวแกน y : } \rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \quad (2.4)$$

$$\text{แนวแกน z : } \rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + S_{Mz} \quad (2.5)$$

เมื่อจัดรูปสมการโมเมนตัมในรูปแบบไม่อนุรักษ์ใหม่และนำไปเชื่อมโยงกับกฎการอนุรักษ์มวลจะได้สมการโมเมนตัมในรูปแบบอนุรักษ์ (Momentum equation in conservation form) ในทิศทาง x y และ z แสดงได้ดังนี้

$$\text{แนวแกน x : } \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u U) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (2.6)$$

$$\text{แนวแกน y : } \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v U) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \quad (2.7)$$

$$\text{แนวแกน z : } \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w U) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + S_{Mz} \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่	p	คือ ความดัน (Pressure)
	τ	คือ ความเค้นเฉือน (Shear stress)
	S_M	คือ เทอมของแหล่งโมเมนตัมอื่น ๆ (Momentum source terms)

2.2.1.3 สมการพลังงาน (Energy equation)

จากกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์กล่าวว่าพลังงานไม่มีการสูญหายหรือสร้างขึ้นใหม่ได้ แต่พลังงานจะเปลี่ยนแปลงจากพลังงานรูปแบบหนึ่งไปเป็นพลังงานอีกรูปแบบหนึ่ง หลังจากที่คุณพลังงานของส่วนมูลฐานของไหลและจัดรูปสมการสำหรับการไหลสถานะไม่คงตัวในสามมิติจะได้สมการอนุรักษ์พลังงานแสดงได้ดังนี้

$$\rho \frac{dE}{dt} = -\nabla \cdot (\rho U) + \left[\frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} \right] + \nabla \cdot (k\nabla T) + S_E \quad (2.9)$$

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

2.2.1.4 สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes equation)

สมการนาเวียร์-สโตกส์ เป็นชุดสมการที่ถูกพัฒนาเพื่อใช้สำหรับคำนวณการไหลของของไหลแบบนิวโตเนียน (Newtonian fluids) โดยในปี ค.ศ.1845 Sir George Gabriel Stokes ได้ค้นพบความสัมพันธ์ที่ว่า

$$\tau_{xx} = \lambda(\nabla \cdot U) + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.10)$$

$$\tau_{yy} = \lambda(\nabla \cdot U) + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad (2.11)$$

$$\tau_{zz} = \lambda(\nabla \cdot U) + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \quad (2.12)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left[\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right] \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left[\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right] \quad (2.14)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left[\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right] \quad (2.15)$$

โดยที่ μ คือ สัมประสิทธิ์ความหนืด (Viscosity coefficient)

λ คือ สัมประสิทธิ์ความหนืดอันดับสอง (Second viscosity coefficient)

และ Sir George Gabriel Stokes ได้สร้างสมมติฐานขึ้นมาว่า

$$\lambda = -\frac{2}{3} \mu \quad (2.16)$$

แม้ว่าสมมติฐานของ Sir George Gabriel Stokes ยังไม่ได้รับการพิสูจน์ แต่ยังคงนิยมใช้มาจนถึงปัจจุบัน

เมื่อแทนค่าความเค้นเฉือนจากสมการข้างต้นลงในสมการโมเมนตัมในรูปแบบอนุกรม (Momentum equation in conservation form) และเขียนเทอมความเค้นเนื่องจากความหนืด (Viscous stress) และจัดรูปใหม่จะได้สมการนาเวียร์-สโตกส์ในระบบสามมิติในรู้อย่างง่ายได้ดังนี้

$$\text{แนวแกน } x : \quad \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u U) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nabla \cdot (\mu \nabla \cdot u) + S_{Mx} \quad (2.17)$$

$$\text{แนวแกน } y : \quad \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v U) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \nabla \cdot (\mu \nabla \cdot v) + S_{My} \quad (2.18)$$

$$\text{แนวแกน } z : \quad \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w U) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \nabla \cdot (\mu \nabla \cdot w) + S_{Mz} \quad (2.19)$$

สำหรับของไหลอัดตัวไม่ได้สมการนาเวียร์-สโตกส์จะสามารถเขียนได้ว่า

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + S_{Mx} \quad (2.20)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + S_{My} \quad (2.21)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial vw}{\partial y} + \frac{\partial w^2}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + S_{Mz} \quad (2.22)$$

2.3 ความปั่นป่วนและแบบจำลองความปั่นป่วน

รูปแบบการไหลตามธรรมชาติสามารถแบ่งได้ออกเป็น 3 รูปแบบคือ การไหลแบบราบเรียบ (Laminar) การไหลแบบทรานซิชัน (Transition) และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence) ทั้งสาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบการไหลสามารถแบ่งได้ด้วยตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number, Re) ซึ่งเป็นสัดส่วนระหว่าง แรงเฉื่อย (Inertia force) และ แรงเนื่องจากความหนืด (Viscous force) โดยสามารถแบ่งรูปแบบการไหลตามเกณฑ์ได้ว่า ถ้าการไหลมีเลขเรย์โนลด์ต่ำกว่าเลขเรย์โนลด์วิกฤต การไหลจะเป็นการไหลแบบราบเรียบ ชั้นของของไหลแต่ละชั้นจะไหลผ่านชั้นของของไหลอื่นตามลำดับ ถ้าสภาวะขอบเขตไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา การไหลจะเป็นการไหลแบบคงตัว (Steady) เรียกช่วงการไหลนี้ว่าการไหลแบบราบเรียบ ส่วนการไหลที่มีค่าเรย์โนลด์มากกว่าเลขเรย์โนลด์วิกฤต ความวุ่นวายจะเข้ามาแทนที่ เป็นสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงลักษณะการไหลอย่างรวดเร็ว ในที่สุดการไหลจะเป็นแบบสุมและวุ่นวาย แม้ว่าสภาวะขอบเขตคงที่การไหลก็เป็นแบบไม่คงที่ (Unsteady) ความเร็วและคุณสมบัติการไหล (Flow properties) อื่น ๆ จะมีลักษณะสุมและวุ่นวาย เรียกช่วงการไหลนี้ว่าการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow)

2.3.1 ลักษณะการไหลแบบปั่นป่วน

2.3.1.1 การไหลแบบปั่นป่วนมีความไม่คงตัวสูง (Highly unsteady) โดยคุณสมบัติการไหลเป็นฟังก์ชันของเวลา

2.3.1.2 การไหลแบบปั่นป่วนมีลักษณะไม่ปกติ (Irregularity) ลักษณะการไหลที่ไม่ปกติทำให้การหาผลเฉลี่ยแบบแม่นยำตรงเป็นไปไม่ได้ ดังนั้นจึงต้องใช้วิธีทางสถิติ (Statistical)

2.3.1.3 การแพร่กระจาย (Diffusivity) การไหลแบบปั่นป่วนต้องการแสดงลักษณะการแพร่กระจาย ถ้ารูปแบบการไหลมีลักษณะสุม แต่ไม่แสดงการแพร่กระจายตัวของคุณสมบัติของไหล จะไม่เรียกการไหลนี้ว่าการไหลแบบปั่นป่วน ลักษณะของการไหลแบบปั่นป่วนเป็นสาเหตุทำให้เกิดการผสมอย่างรวดเร็วและเพิ่มอัตราการถ่ายโอนของโมเมนตัมความร้อนและมวล

2.3.1.4 การไหลแบบปั่นป่วนเกิดขึ้นใน 3 มิติ (Three dimensional) การไหลแบบปั่นป่วนเป็นการไหลแบบ 3 มิติและมีการหมุนวน (Rotational) ของของไหล

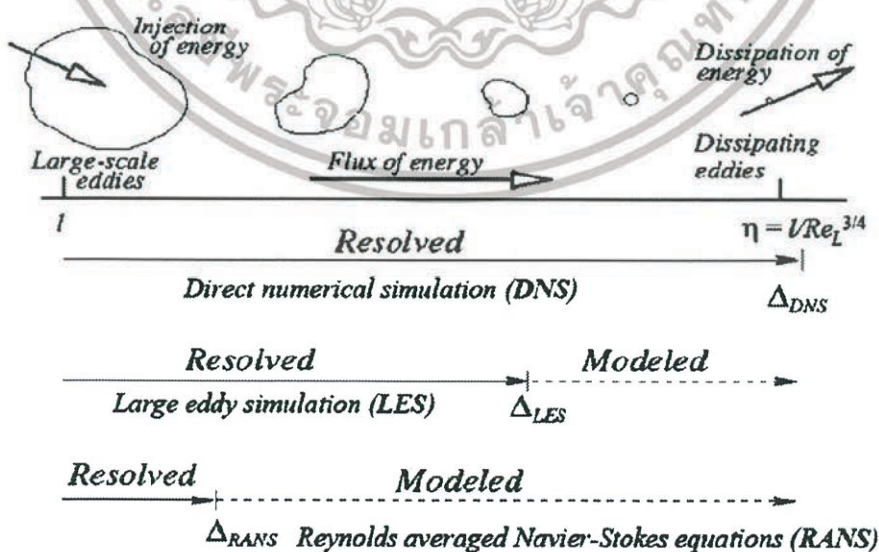
2.3.1.5 การสลายตัว (Dissipative) การไหลแบบปั่นป่วนสามารถสลายตัวได้ เช่น การใช้ซ็อนคนกาแพในถ้วยจนการไหลเป็นแบบปั่นป่วน เมื่อยกซ็อนออกจากถ้วยกาแพการไหลแบบปั่นป่วนจะเริ่มหายไป ในที่สุดกาแพในถ้วยจะหยุดนิ่ง

2.3.1.6 เลขเรย์โนลด์สูง (Higher Reynolds number) การไหลแบบปั่นป่วนส่วนใหญ่เกิดขึ้นเมื่อเลขเรย์โนลด์สูง แต่ไม่จำเป็นเสมอไปที่เลขเรย์โนลด์ต่ำก็สามารถเกิดการไหลแบบปั่นป่วนได้

2.3.2 แบบจำลองความปั่นป่วน

ด้วยความยากในการใช้สมการนาเวียร์-สโตกส์ที่เป็นสมการเชิงอนุพันธ์เพื่อคำนวณการไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วนเป็นเรื่องยากต่อการหาผลเฉลย จึงมีความจำเป็นต้องใช้การจำลองเชิงตัวเลขโดยตรง (Direct numerical simulation, DNS) ที่เป็นวิธีเชิงตัวเลขเพื่อช่วยหาผลเฉลยของสมการนาเวียร์-สโตกส์ การจำลองเชิงตัวเลขโดยตรงสามารถคำนวณการไหลแบบปั่นป่วนซึ่งประกอบไปด้วยการหมุนวน (Eddies) หลายขนาด การหมุนวนแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือการหมุนวนขนาดใหญ่ (Large-scale eddies) และการหมุนวนขนาดเล็ก (Small-scale eddies) เมฆที่สร้างต้องมีขนาดเล็กกว่าการหมุนวนขนาดเล็ก ทำให้ต้องใช้เมฆจำนวนมาก การคำนวณจึงจำเป็นต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงและระยะเวลาในการคำนวณยาวนาน ทำให้นักวิจัยเลือกที่จะคำนวณเฉพาะการหมุนวนขนาดใหญ่และจำลองการหมุนวนขนาดเล็ก เรียกว่าวิธีการนี้คือการจำลองการหมุนวนขนาดใหญ่ (Large eddy simulation, LES) อย่างไรก็ตามการคำนวณเช่นนี้ยังจำเป็นต้องใช้คอมพิวเตอร์ประสิทธิภาพสูงและระยะเวลาในการคำนวณที่นานอยู่

จากปัญหาที่ได้กล่าวไปข้างต้น ทำให้เกิดการพัฒนารูปแบบการคำนวณการไหลแบบปั่นป่วนโดยใช้วิธีทางสถิติ (Reynolds averaged Navier-Stokes equations, RANS) แต่วิธีการนี้ก็มีความยุ่งยากในการคำนวณองค์ประกอบความเร็วแกว่งที่อยู่ในเทอมความเค้นเฉือนเรย์โนลด์ (Reynolds stress) จึงเกิดการพัฒนารูปแบบจำลองความปั่นป่วนเพื่อแก้ปัญหาความยุ่งยากที่เกิดขึ้นจากการคำนวณองค์ประกอบความเร็วแกว่งโดยตรง ซึ่งวิธีการคำนวณการไหลแบบปั่นป่วนสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 วิธีการคำนวณการไหลแบบปั่นป่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2.1 สมการเรย์โนลด์เฉลี่ยนาเวียร์-สโตกส์ (Reynold averaged Navier-Stokes equation: RANS)

การไหลแบบปั่นป่วนสามารถคำนวณโดยวิธีทางสถิติ โดยคุณสมบัติการไหล
ฉับพลัน (φ) (Instantaneous flow property) เป็นผลรวมระหว่างคุณสมบัติของไหลเฉลี่ยตาม
เวลา ($\bar{\varphi}$) (Time-averaged flow property) และคุณสมบัติของของไหลแกว่ง (Fluctuating flow
property) สามารถแสดงได้ด้วยสมการ

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

กระบวนการข้างต้นถูกนำเสนอโดยออสบอร์น เรย์โนลด์ (Osborne Reynolds) ซึ่งถูกเรียกว่าวิธีการ
แยกเรย์โนลด์ (Reynolds decomposition) นิยามของเวลาเฉลี่ยของคุณสมบัติการไหล (φ) และ
เวลาเฉลี่ยของคุณสมบัติการไหลแกว่ง (φ') แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \varphi(t) dt \quad (2.24)$$

$$\bar{\varphi}' = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \varphi'(t) dt = 0 \quad (2.25)$$

พลังงานจลน์ต่อหน่วยมวล (k) ของความปั่นป่วนแสดงได้ดังนี้

$$k = \frac{1}{2} (u'^2 + v'^2 + w'^2) \quad (2.26)$$

ความเข้มข้นของความปั่นป่วน (Turbulence intensity: T_i) เป็นความเชื่อมโยงระหว่างพลังงานจลน์
ปั่นป่วนและความเร็วอ้างอิง (U_{ref}) คือ

$$T_i = \frac{(\frac{2}{3}k)^{1/2}}{U_{ref}} \quad (2.27)$$

การแยกเรย์โนลด์ของความดัน เวกเตอร์ความเร็วและองค์ประกอบความเร็ว ซึ่งประกอบด้วยความเร็ว
ในทิศทาง x ทิศทาง y ทิศทาง z สามารถแสดงได้ดังนี้

$$p(t) = \bar{p} + p'(t) \quad (2.28)$$

$$U(t) = \bar{U} + U'(t) \quad (2.29)$$

$$u(t) = \bar{u} + u'(t) \quad (2.30)$$

$$v(t) = \bar{v} + v'(t) \quad (2.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$w(t) = \bar{w} + w'(t) \quad (2.32)$$

อิทธิพลของการแกว่งที่มีต่อการไหลเฉื่อยสามารถหาได้จากการแทนสมการ (2.28) ถึง สมการ (2.32) ลงในสมการควบคุมและใช้นิยามของการเฉลี่ยคุณสมบัติการไหลตามเวลาดังแสดงในสมการ (2.24) และ (2.25) โดยจะทำให้สมการความต่อเนื่องของของไหลอัดตัวได้สำหรับการไหลเฉื่อยเป็นดังนี้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \bar{u}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \bar{v}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \bar{w}) = 0 \quad (2.33)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{U}) = 0 \quad (2.34)$$

สมการโมเมนตัมสำหรับการไหลเฉื่อยของของไหลอัดตัวไม่ได้ที่ความหนืดคงที่คือ :

องค์ประกอบ x :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \bar{u}^2) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \bar{u} \bar{v}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \bar{u} \bar{w}) \\ &= -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \\ &+ \left[-\frac{\partial}{\partial x}(\rho \overline{(u')^2}) - \frac{\partial}{\partial y}(\rho \overline{u'v'}) - \frac{\partial}{\partial z}(\rho \overline{u'w'}) \right] + S_{Mx} \end{aligned}$$

หรือ

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}) + \nabla \cdot (\rho \bar{u} \bar{U}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \nabla^2 \bar{u} \\ &+ \left[-\frac{\partial}{\partial x}(\rho \overline{(u')^2}) - \frac{\partial}{\partial y}(\rho \overline{u'v'}) - \frac{\partial}{\partial z}(\rho \overline{u'w'}) \right] + S_{Mx} \end{aligned} \quad (2.35)$$

องค์ประกอบ y :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{v}) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \bar{v} \bar{u}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \bar{v}^2) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \bar{v} \bar{w}) \\ &= -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \mu \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial z^2} \\ &+ \left[-\frac{\partial}{\partial x}(\rho \overline{u'v'}) - \frac{\partial}{\partial y}(\rho \overline{(v')^2}) - \frac{\partial}{\partial z}(\rho \overline{v'w'}) \right] + S_{My} \end{aligned}$$

หรือ

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{v}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{U}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \mu \nabla^2 \bar{v} \\ &+ \left[-\frac{\partial}{\partial x}(\rho \overline{u'v'}) - \frac{\partial}{\partial y}(\rho \overline{(v')^2}) - \frac{\partial}{\partial z}(\rho \overline{v'w'}) \right] + S_{My} \end{aligned} \quad (2.36)$$

องค์ประกอบ z :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{w}) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \bar{w} \bar{u}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \bar{w} \bar{v}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \bar{w}^2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial z^2} + \left[-\frac{\partial}{\partial x} (\rho \overline{u'w'}) - \frac{\partial}{\partial y} (\rho \overline{v'w'}) - \frac{\partial}{\partial z} (\rho \overline{w'^2}) \right] + S_{ME}$$

หรือ

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{w}) + \nabla \cdot (\rho \bar{w} \bar{U}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \mu \nabla^2 \bar{w} + \left[-\frac{\partial}{\partial x} (\rho \overline{u'w'}) - \frac{\partial}{\partial y} (\rho \overline{v'w'}) - \frac{\partial}{\partial z} (\rho \overline{w'^2}) \right] + S_{ME} \quad (2.37)$$

เรียกสมการ (2.33) ถึง (2.35) ว่าสมการเรย์โนลด์ (Reynolds equation) เทอมในวงเล็บที่เพิ่มขึ้นมาใหม่ซึ่งเกี่ยวข้องกับความเร็วแกว่งเนื่องจากการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent velocity fluctuation) ความเค้นปั่นป่วนพิเศษ (Extra turbulent stresses) สามารถอธิบายธรรมชาติของการแพร่ได้ ซึ่งเรียกความเค้นปั่นป่วนพิเศษว่า ความเค้นเรย์โนลด์ (Reynolds stresses) และเพื่อความสะดวก ในปี ค.ศ.1877 Boussinesq ได้เสนอสมการของความเค้นเรย์โนลด์ว่า

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.38)$$

เมื่อ μ_t คือ ความหนืดของความปั่นป่วน (Turbulent viscosity) หรือความหนืดหมุนวน (Eddy viscosity) ซึ่งขึ้นกับตำแหน่ง

ดังนั้นจากสมการที่ (2.36) จะทำให้สมการ (2.33) ถึง (2.35) สามารถเขียนให้อยู่ในรูป

$$\text{องค์ประกอบ } x : \quad \frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{u}) + \nabla \cdot (\rho \bar{u} \bar{U}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu_{eff} \nabla^2 \bar{u} + S_{Mx} \quad (2.39)$$

$$\text{องค์ประกอบ } y : \quad \frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{v}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{U}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \mu_{eff} \nabla^2 \bar{v} + S_{My} \quad (2.40)$$

$$\text{องค์ประกอบ } z : \quad \frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{w}) + \nabla \cdot (\rho \bar{w} \bar{U}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \mu_{eff} \nabla^2 \bar{w} + S_{Mz} \quad (2.41)$$

โดยที่ μ_{eff} คือค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดประสิทธิภาพ (Effective viscosity) ซึ่งสามารถแสดงค่าได้ตามสมการ

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (2.42)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2.2 แบบจำลองความปั่นป่วน k-epsilon

แบบจำลองความปั่นป่วน k-epsilon ถูกคิดค้น Launder และ Spalding เป็นแบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้สำหรับคำนวณการไหลแบบปั่นป่วนได้อย่างมีประสิทธิภาพและไม่ซับซ้อนมากเกินไป โดยแบบจำลองความปั่นป่วน k-epsilon ประกอบด้วยสมการการถ่ายโอนพลังงานจลน์ปั่นป่วน (Turbulent kinetic energy, k) และสมการการถ่ายโอนอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (Dissipation rate of turbulent kinetic energy: ε) ดังนี้

สมการการถ่ายโอนพลังงานจลน์ปั่นป่วน:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (2.43)$$

สมการการถ่ายโอนอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (2.44)$$

โดยที่ G_k คือ การเกิดพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากเกรเดียนต์ของความเร็วเฉลี่ย ซึ่งหาได้จากสมการ

$$G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (2.45)$$

โดยที่ G_b คือ การเกิดพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากแรงลอย ซึ่งหาได้จากสมการ

$$G_b = \beta g_i \frac{u_j}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (2.46)$$

Y_M คือ การสนับสนุนการขยายตัวที่ผันผวนในความปั่นป่วนที่อัดตัวได้ที่ส่งผลต่ออัตราการสลายตัวทั้งหมด ซึ่งหาได้จากสมการ

$$Y_M = 2\rho \varepsilon M_1^2 \quad (2.47)$$

เมื่อ $M_1 = \sqrt{\frac{k}{a^2}}$ เมื่อ a คือความเร็วเสียง

σ_k และ σ_ε เป็นตัวเลขพรีนดเทิลปั่นป่วนสำหรับ k และ ε

$C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ และ $C_{3\varepsilon}$ เป็นค่าที่ เมื่อ $C_{3\varepsilon} = \tanh \left| \frac{v}{u} \right|$

S_k และ S_ε คือเทอมที่ถูกกำหนดโดยผู้ใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับความหนืดความปั่นป่วน (μ_t) สามารถคำนวณได้ด้วยความสัมพันธ์กันระหว่างพลังงานจลน์ปั่นป่วน (k) และอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (ε) ดังสมการที่ 2.48

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.48)$$

โดยค่า C_μ เป็นค่าคงที่

และค่าคงที่ทั้งหมดในแบบจำลองความปั่นป่วน k-epsilon แสดงค่าตามตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่ต่าง ๆ ในแบบจำลองความปั่นป่วน k-epsilon

C_{1s}	C_{2s}	C_μ	σ_k	σ_ε
1.44	1.92	0.09	1.0	1.3

2.4 การไหลผ่านวัตถุที่อยู่ในของไหล

2.4.1 แรงต้านและแรงยก

วัตถุที่อยู่ในของไหลทั้งชิ้นจะเกิดแรงที่เกิดจากความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างวัตถุกับของไหลมากระทำสองแรงด้วยกัน ประกอบด้วย แรงยก (F_L) ซึ่งมีทิศตั้งฉากกับการไหลและแรงต้าน (F_D) ซึ่งมีทิศเดียวกับการไหล โดยแรงทั้งสองจะเกิดขึ้น ณ พื้นผิววัตถุ โดยสามารถอธิบายได้ด้วยเทอมของความเค้นเฉือน (τ_w) ที่เกิดจากความหนืดและความเค้นตั้งฉากที่เกิดจากความดัน (p) โดยทั้งความเค้นเฉือนแล้วความดันจะมีทิศทางและขนาดที่เปลี่ยนไปตลอดทางบนพื้นผิววัตถุ ผลรวมของการกระจายค่าของความเค้นเฉือนและความดันสามารถหาได้โดยการอินทิเกรตผลของปริมาณสองตัวนี้บนพื้นผิวของวัตถุ ในทิศ x และ y ดังสมการ

$$dF_x = (\rho dA) \cos \theta + (\tau_w dA) \sin \theta \quad (2.49)$$

$$F_D = C_{Df} \frac{1}{2} \rho U^2 b l \quad (2.50)$$

และ

$$dF_y = -(\rho dA) \sin \theta + (\tau_w dA) \cos \theta \quad (2.51)$$

$$F_L = \int_A dF_y = -\int_A p \sin \theta dA + \int_A \tau_w \cos \theta dA \quad (2.52)$$

โดยที่ A พื้นผิววัตถุฝั่งหน้าผู้สังเกตที่ขนานกับทิศการไหล

แต่โดยทั่วไปแล้วจะมีการนิยามค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านและค่าสัมประสิทธิ์แรงยกเพื่อค่าประมาณค่าเฉลี่ยของแรงยกและแรงต้าน ซึ่งค่าทั้งสองได้มาจากการคำนวณเชิงตัวเลขและการทดลอง โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านและค่าสัมประสิทธิ์แรงยกสามารถนิยามได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน} \quad C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad (2.53)$$

$$\text{ค่าสัมประสิทธิ์แรงยก} \quad C_L = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad (2.54)$$

โดยที่ U พื้นที่วัตถุฝั่งหน้าผู้สังเกตที่ตั้งฉากกับทิศการไหล

2.4.2 แรงต้านเนื่องจากแรงเสียดทาน

แรงต้านเนื่องจากแรงเสียดทานเป็นแรงต้านที่เกิดจากความเค้นเฉือนบนวัตถุโดยตรง โดยแรงต้านเนื่องจากแรงเสียดทานไม่ได้ขึ้นกับขนาดของความเค้นที่ผนังเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับรูปทรงของวัตถุที่ของไหลเจียดด้วยเช่นกัน โดยจะเห็นได้จากพจน์ $\tau_w \sin \theta$ ของสมการ 2.50 และยิ่งถ้าพื้นผิวขนานกับทิศการไหลจะทำให้แรงเค้นทั้งหมดสนับสนุนแรงต้านโดยตรง ในทางกลับกันแล้วถ้าพื้นผิว ตั้งฉากกับทิศทางการไหล ความเค้นก็จะมีผลอะไรต่อแรงต้านเลย

แรงต้านเนื่องจากแรงเสียดทานบนแผ่นเรียบที่มีความกว้าง b ยาว l ที่ขนานกับทิศการไหลสามารถคำนวณได้ได้จากสมการ

$$F_D = C_{D_f} \frac{1}{2} \rho U^2 b l \quad (2.55)$$

โดยที่ C_{D_f} คือค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านเนื่องจากแรงเสียดทาน โดยที่ค่าของ C_{D_f} เป็นฟังก์ชันของตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) ดังสมการ

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (2.56)$$

และค่า C_{D_f} ยังมีความสัมพันธ์กับความขรุขระของพื้นผิวอีกด้วยเช่นกัน

2.4.3 แรงต้านเนื่องจากความดัน

แรงต้านเนื่องจากความเป็นแรงต้านที่มาจากความดันบนวัตถุโดยตรง โดยเกิดความแตกต่างของความดันที่กระทำต่อพื้นที่ฉาย (Projected area) ของวัตถุให้เกิดแรงสุทธิที่กระทำต่อทรงกระบอกตามทิศทางการไหล แรงสุทธิเนื่องจากความดันแตกต่างก็จะกลายมาเป็นแรงต้านเนื่องจากความดัน ทำให้แรงต้านเนื่องจากความดันเป็นแรงต้านที่ขึ้นอยู่กับรูปร่างของวัตถุ โดยแรงต้านเนื่องจากความดันมีความสัมพันธ์กับค่าความดันและรูปทรงของวัตถุที่แรงดันไปกระทำ ยกตัวอย่างเช่น แรงดันที่กระทำบนวัตถุที่วางขนานกับการทิศการไหลจะมีค่ามากแต่ไม่ได้ไปช่วยทรงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสริมแรงด้านเนื่องจากมีทิศทางที่ตั้งฉากกัน แต่ในทางกลับแรงดันที่กระทำบนวัตถุที่ตั้งฉากกับทิศการไหลก็จะเป็นแรงต้านเกือบทั้งหมดที่กระทำต่อวัตถุแทน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน

3.1 คำอธิบายการดำเนินงาน

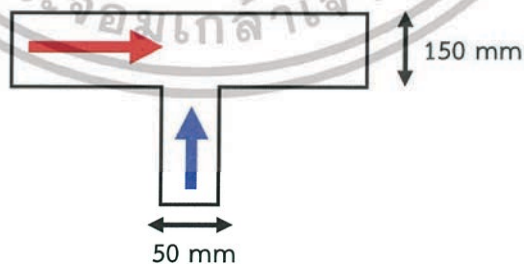
จากการศึกษาพฤติกรรมการรวมสายการไหลของน้ำสองอุณหภูมิที่แตกต่างกันด้วยท่อรูปตัวที พบว่าช่วงระยะแรกของท่อขาออก มีการแยกชั้นระหว่างน้ำสองอุณหภูมิ และเมื่อผ่านไประยะหนึ่ง อุณหภูมิภายในท่อจะเริ่มปรับตัวให้เท่ากันทั่วทั้งหน้าตัดท่อ ซึ่งเป็นระยะที่ค่อนข้างไกล การนำตัวสนับสนุนความปั่นป่วน มาใช้ในการช่วยการผสมเป็นหนึ่งในแนวคิดในการช่วยย่นระยะที่อุณหภูมิน้ำจะใกล้เคียงกันทั่วทั้งหน้าตัด โดยรูปทรงของ ตัวสนับสนุนความปั่นป่วน เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการผสมกันของอุณหภูมิ เนื่องจากรูปทรงที่ต่างกันของตัวสนับสนุนความปั่นป่วนมีผลต่อพฤติกรรมการไหลของของไหล

ในส่วนของงานวิจัยนี้จะแบ่งขั้นตอนการดำเนินงานไว้เป็นสองส่วนด้วยกัน ดังนี้

1. ศึกษาความถูกต้องของแบบจำลองท่อรูปตัวทีในรูปแบบ 2 มิติ ด้วยการสร้างแบบจำลองที่อ้างอิงจากงานวิจัยของ Kimura และคณะ (2009) และเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลที่ได้จากการจำลอง
2. เปรียบเทียบการนำตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปสามเหลี่ยม สีเหลี่ยม และวงกลม มาใช้ในการย่นระยะที่อุณหภูมิของน้ำใกล้เคียงกันตลอดทั้งหน้าตัด

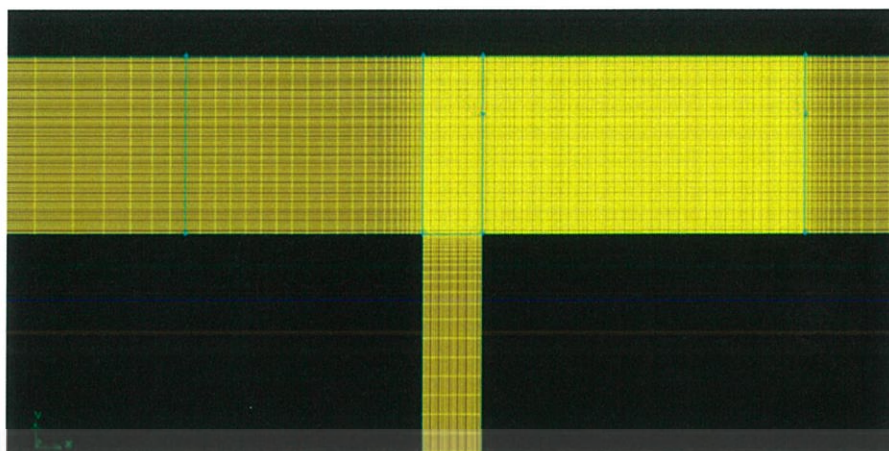
3.2 การศึกษาความถูกต้องของแบบจำลองท่อรูปตัวทีในรูปแบบ 2 มิติ

3.2.1 โครงสร้างของท่อรูปตัวที



รูปที่ 3.1 ขนาดของท่อรูปตัวทีที่อ้างอิงจากการวิจัยของ Kimura และคณะ

ท่อหลักมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร ท่อย่อยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.2 กริดในช่วงท่อขาออกของท่อรูปตัวทีในโปรแกรม Gambit 2.4.6

3.2.2 การกำหนดความละเอียดของกริดในแบบจำลอง

กริดมีความสำคัญอย่างมากในการจำลองด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ความละเอียดของกริดมีผลต่อความถูกต้องของการจำลอง ถ้ากริดมีความละเอียดที่น้อยเกินไปอาจจะส่งผลให้ความละเอียดไม่สัมพันธ์กับปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในขอบเขตที่จำลองส่งผลให้การจำลองนั้นเกิดความคลาดเคลื่อน แต่ในทางกลับกันหากกริดมีความละเอียดที่มากจนเกินไป จะทำให้เสียเวลาในการคำนวณโดยไม่มีผลจำเป็น ดังนั้นการทำ grid independent หรือการหากริดที่มีความเหมาะสมในการจำลองด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ในการศึกษาครั้งนี้ได้มีการหาความละเอียดของกริดที่มีความเหมาะสมทั้งหมด 4 ชุด โดยในแต่ละชุดนั้นจะมีจุดต่อบนโดเมนการไหล (Node) คือ 149,818 จุด 190,488 จุด 251,186 จุด และ 300,136 จุด

3.2.3 การกำหนดแบบจำลองและสภาวะขอบเขต

ตารางที่ 3.1 การกำหนดสภาวะขอบเขต

ขอบเขต	สภาวะขอบเขต
Main inlet	กำหนดความเร็วขาเข้า 1.46 m/s อุณหภูมิ 48 °C
Branch inlet	กำหนดความเร็วขาเข้า 1 m/s อุณหภูมิ 33 °C
Outlet	กำหนดความดันตามความดันบรรยากาศ
Wall	กำหนดให้เป็นผนังนิ่ง

ตารางที่ 3.2 การตั้งค่าแบบจำลอง

แบบจำลองความปั่นป่วน	Realizable k-epsilon
----------------------	----------------------

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของน้ำ

คุณสมบัติ	ค่าของตัวแปร
ความหนาแน่น	991.71 kg/m ³
ความหนืด	6.652×10 ⁻⁴ Pa·s
ค่าความจุความร้อนจำเพาะ	4.179×10 ⁻³ kJ/(kg·K)
ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน	0.628 (W/m·K)

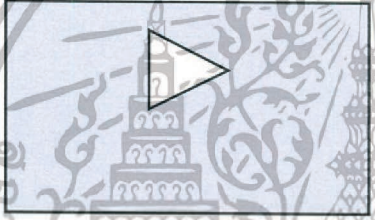
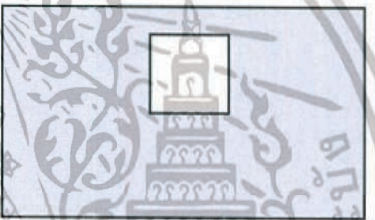
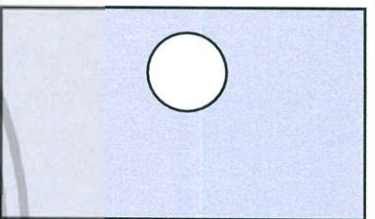


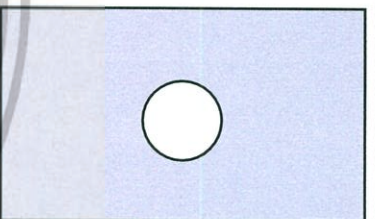


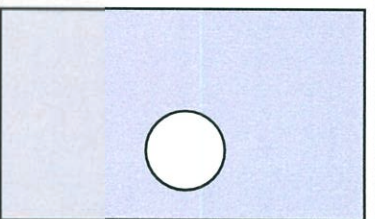
ตารางที่ 3.4 การตั้งค่ารูปแบบระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical schemes)

ประเภท	ระเบียบวิธีการ
Scheme	SIMPLE
Gradient	Least square cell based
Pressure	Standard
Momentum	Second order upwind
Turbulent kinetic energy	Second order upwind
Turbulent dissipation rate	Second order upwind

3.3 การเปรียบเทียบการนำตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปสามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม และวงกลมมาใช้ในการย่นระยะที่อุณหภูมิของน้ำใกล้เคียงกันตลอดทั้งหน้าตัด

ในการเปรียบเทียบการนำตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปสามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม และวงกลม มาใช้ในการย่นระยะที่อุณหภูมิของน้ำใกล้เคียงกันตลอดทั้งหน้าตัด โดยตำแหน่ง leading edge ของ ตัวสนับสนุนความปั่นป่วนแต่ละรูปทรงมีค่า $y=-25$ $y=0$ และ $y=25$ มิลลิเมตร ที่นิยามตำแหน่ง $y=0$ มิลลิเมตร คือจุดกึ่งกลางในทิศตั้งฉากกับการไหลของท่อ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะกำหนดให้ตำแหน่งการวางในทิศการไหลมีค่าเท่ากันทั้งเก้ากรณีและตัวสนับสนุนความปั่นป่วนทั้งสามรูปจะมีค่าความยาว projected length เท่ากันคือ $D/3$ (D คือเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ)

ตารางที่ 3.5 ลักษณะรูปทรงและการวางตัวสนับสนุนความปั่นป่วน

ตำแหน่ง leading edge /รูปทรง	สามเหลี่ยม	สี่เหลี่ยม	วงกลม
y=25 มิลลิเมตร			
y=0 มิลลิเมตร			
y=-25 มิลลิเมตร			

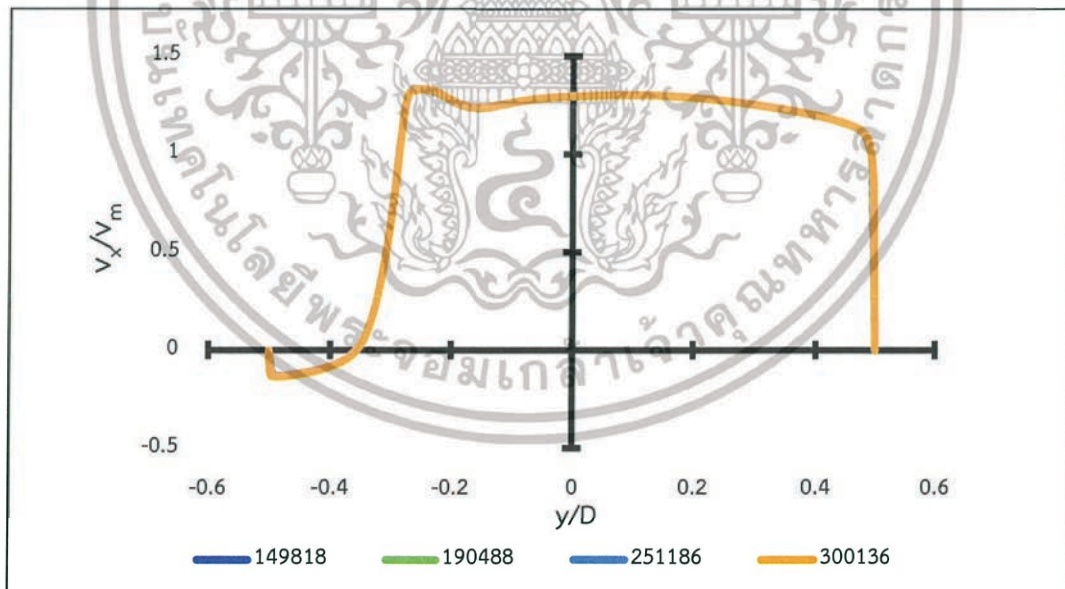
บทที่ 4

ผลการจำลองและวิเคราะห์ผลการจำลอง

4.1 การหาความละเอียดของกริดที่มีความเหมาะสมในการจำลอง

การหาความละเอียดกริดที่เหมาะสมในการจำลองเป็นสิ่งสำคัญในการจำลองด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เนื่องจากจะส่งผลต่อความแม่นยำของการจำลองและเวลาที่ต้องใช้ในการจำลอง ดังนั้นขั้นตอนในส่วนนี้จึงเป็นส่วนแรกที่ต้องทำในการวิจัย เพื่อค้นหากริดที่มีอิสระต่อคำตอบ (Grid independent) หรือจำนวนของกริดที่ทำให้ผลการจำลองไม่เปลี่ยนแปลง

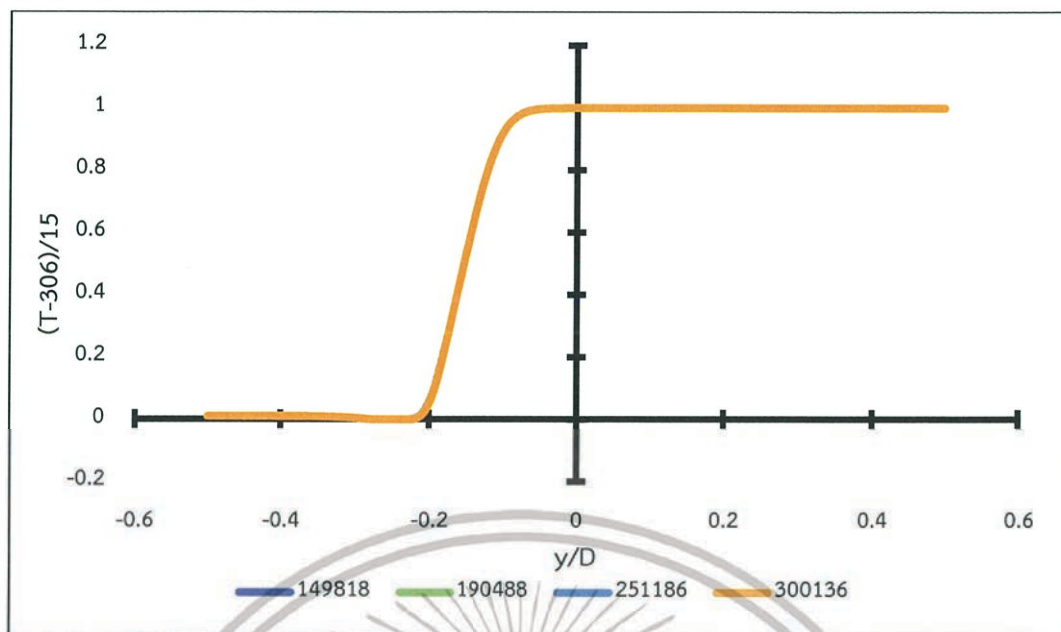
ข้อมูลจากการทดลองที่นำมาใช้ในการศึกษากริดที่มีอิสระต่อคำตอบคือ บริเวณท่อออกที่มีระยะห่างในทิศแกนการไหล 75 mm. จากจุดกึ่งกลางของท่อย่อย ซึ่งจะเปรียบเทียบความเร็วในทิศการไหลและอุณหภูมิของตำแหน่งที่กล่าวไปในแต่ละการจำลองด้วยจำนวนจุดต่อบนโดเมนที่ต่างกัน โดยในกราฟรูป 4.1 จะเป็นการศึกษากริดที่มีอิสระต่อการคำนวณเมื่อเปรียบเทียบความเร็ว โดยแกนตั้งคือความเร็วในทิศการไหลหาร ผนัง ตำแหน่งนั้น ๆ หารด้วยความเร็วเฉลี่ย แกนนอนคือระยะทางในทิศตั้งฉากกับการไหลหารด้วยรัศมีท่อหลัก



รูปที่ 4.1 โปรไฟล์ความเร็ว (Velocity profile) ณ จุดที่กำหนด จากแบบจำลองที่มีจำนวนกริดต่างกัน

กราฟรูป 4.2 จะเป็นการศึกษากริดที่มีอิสระต่อการคำนวณเมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิ โดยแกนตั้งคืออุณหภูมิ ณ ตำแหน่งนั้น ๆ หารด้วยอุณหภูมิขาเข้าของน้ำที่ท่อย่อยหารด้วยผลต่างของอุณหภูมิขาเข้าของน้ำที่ท่อหลักและท่อย่อย แกนนอนคือระยะทางในทิศตั้งฉากกับการไหลหารด้วยรัศมีท่อหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

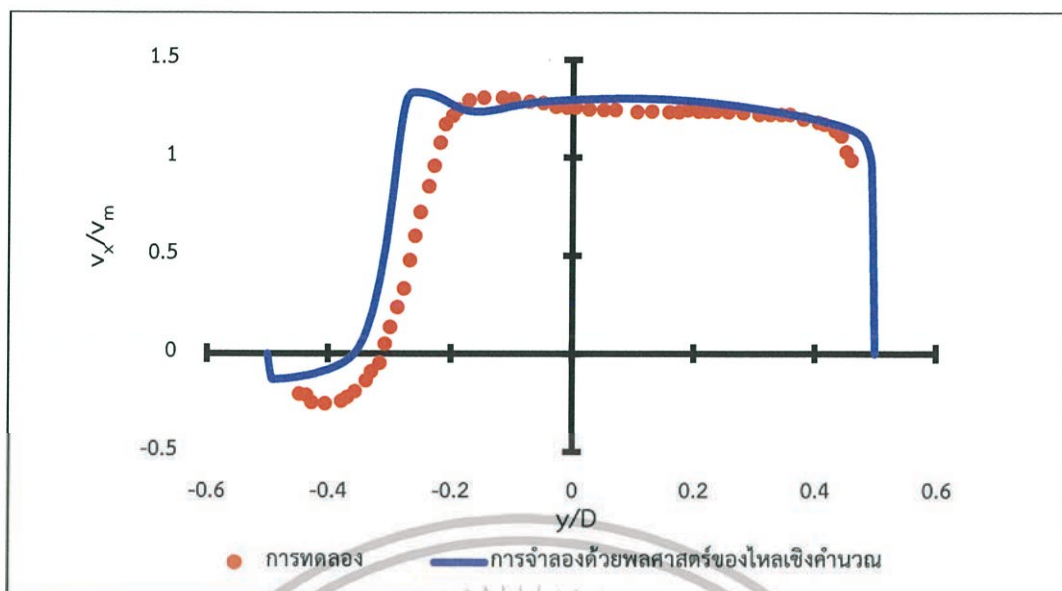


รูปที่ 4.2 อุณหภูมิ ณ จุดที่กำหนด จากแบบจำลองที่มีจำนวนกริดต่างกัน

จากรูปกราฟทั้งสองรูปแสดงให้เห็นว่าการปรับจำนวนกริดทั้งสิ้นชุดไม่ทำให้ข้อมูลมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยยะสำคัญ ทำให้ผู้ทำการวิจัยเลือกที่จะใช้กริดชุด 149,818 จุด ซึ่งมีจำนวนน้อยที่สุดในการทำการวิจัยเพื่อจะเป็นการประหยัดทรัพยากรในการทำงานวิจัย

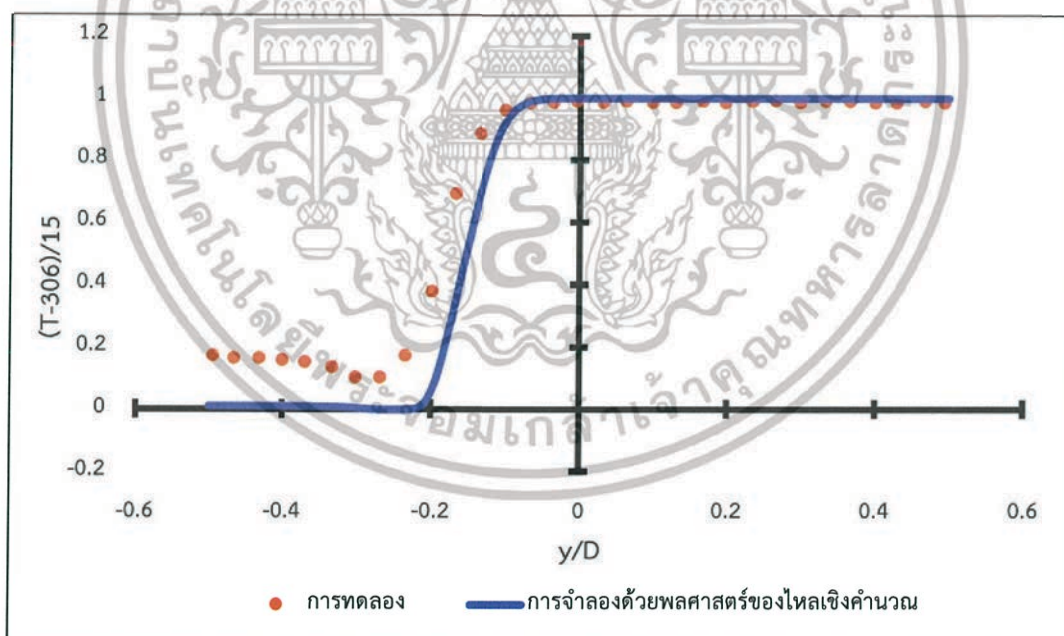
4.2 การเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลองที่ใช้อ้างอิง

ในการเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้อง จะใช้ผลการทดลองของ Kimura และคณะ โดยจะเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็วและอุณหภูมิ บริเวณท่อขาออกที่มีระยะห่างในทิศทางไหล 75 mm: จากจุดกึ่งกลางของท่อย่อย โดยในกราฟรูป 4.3 จะการเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลองที่ใช้อ้างอิงเมื่อเปรียบเทียบความเร็ว โดยแกนตั้งคือความเร็วในทิศทางไหลหาร ณ ตำแหน่งนั้น ๆ หารด้วยความเร็วเฉลี่ย แกนนอนคือระยะทางในทิศตั้งฉากกับการไหลหารด้วยรัศมีท่อหลัก



รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็ว ณ จุดที่กำหนดของผลการทดลองและผลการจำลอง

กราฟรูป 4.4 จะการเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลองที่ใช้อ้างอิงโดยแกนตั้งคือ อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งนั้น ๆ ลบด้วยอุณหภูมิขาเข้าของน้ำที่่อยยหารด้วยผลต่างของอุณหภูมิขาเข้าของน้ำที่หลักและที่่อยย แกนนอนคือระยะทางในทิศตั้งฉากกับการไหลหารด้วยรัศมีท่อหลัก



รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ จุดที่กำหนดของผลการทดลองและผลการจำลอง

จากการเปรียบเทียบผลการจำลองด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณกับผลการทดลอง พบว่าแบบจำลองจากการจำลองด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณให้ผลการทำนายที่แม่นยำใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

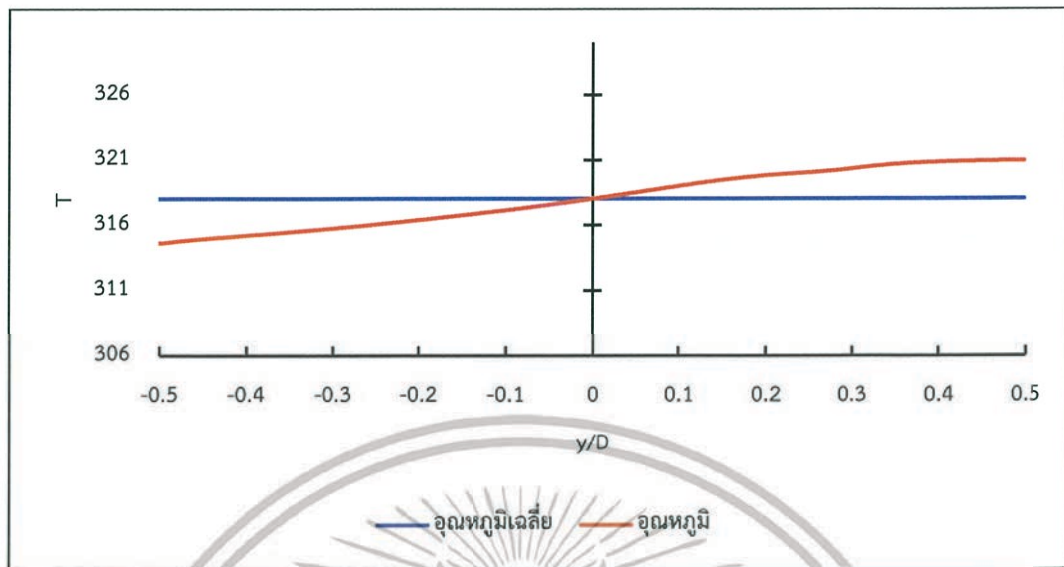
ระดับหนึ่ง มีค่าคลาดเคลื่อนเล็กน้อย สามารถยอมรับได้ และเพียงพอต่อการนำไปศึกษาต่อในขั้นตอนที่ถัดไป

4.3 ผลของการติดตั้งตัวสนับสนุนความปั่นป่วนต่ออุณหภูมิผสมในทิศตั้งฉากการไหล

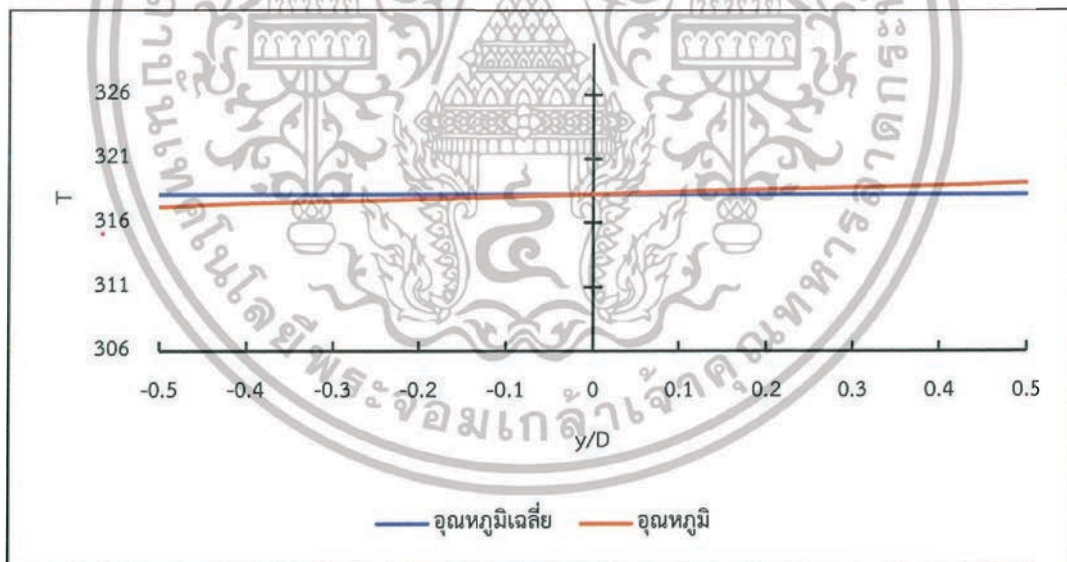
ผลของการติดตั้งตัวสนับสนุนความปั่นป่วนทั้งหมด 3 รูปร่าง 3 ตำแหน่งการวางในแนวตั้งฉากกับการไหลรวมทั้งหมด 9 กรณี และอีก 1 กรณีที่ไม่ติด ถูกนำมาเก็บข้อมูลที่ตำแหน่ง 2.25 เมตร หลังตัวสนับสนุนความปั่นป่วนในทิศแนวการไหล เนื่องจากเป็นบริเวณที่ความเร็วในทิศตั้งฉากกับแนวการไหลมีค่าใกล้เคียงศูนย์ ทำให้ไม่มีอิทธิพลของความเร็วในทิศตั้งฉากกับแนวการไหลเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยจะเก็บข้อมูลอุณหภูมิของน้ำ ณ หน้าตัดท่อที่ตำแหน่งดังกล่าว และนำข้อมูลอุณหภูมิมาสั่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง T และ y/D โดยที่ T คืออุณหภูมิ y คือระยะในทิศตั้งฉากกับการไหล โดยนิยาม $y=0$ มิลลิเมตร คือตำแหน่งจุดกึ่งกลางในทิศตั้งฉากกับการไหล และ D คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อหลัก โดยในกราฟความสัมพันธ์จะแสดงค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของหน้าตัดนั้น ๆ ในแต่ละกรณีเพื่อเส้นอุณหภูมิอ้างอิงในแต่ละกราฟและอุณหภูมิของน้ำตลอดหน้าตัดในทิศตั้งฉากการไหล โดยจะนิยามค่า T^* คือผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของผลต่างของอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งในหน้าตัดต่อกับอุณหภูมิเฉลี่ยของหน้าตัด ซึ่งจะเป็นการประมาณค่าพื้นที่ใต้กราฟที่บ่งบอกถึงการเบี่ยงเบนของอุณหภูมิตลอดหน้าตัดต่ออุณหภูมิเฉลี่ย โดยสามารถนำไปวิเคราะห์ได้ว่าการติดตั้งตัวสนับสนุนความปั่นป่วนกรณีใดที่ให้ค่า T^* ที่น้อยที่สุดก็จะกล่าวได้ว่าอุณหภูมิในหน้าตัดนั้นเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยน้อยที่สุด ซึ่งสามารถพูดในเชิงกายภาพได้ว่าการติดตั้งตัวสนับสนุนความปั่นป่วนกรณีใดที่ให้ค่า T^* ที่น้อยที่สุด อุณหภูมิในหน้าตัดนั้นจะมีความใกล้เคียงกันตลอดหน้าตัดมากที่สุดหรือให้ผลลัพธ์ในการผสมที่ดีที่สุด โดยกราฟความสัมพันธ์กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง T และ y/D ของทั้ง 10 กรณีนั้นสามารถแสดงได้ดังรูป 4.5 ถึง 4.8 และตารางสรุปผลค่า T^* จะแสดงได้ดังตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ท่อเปล่าที่ไม่ได้ติดตั้งสนับสนุนความปั่นป่วน



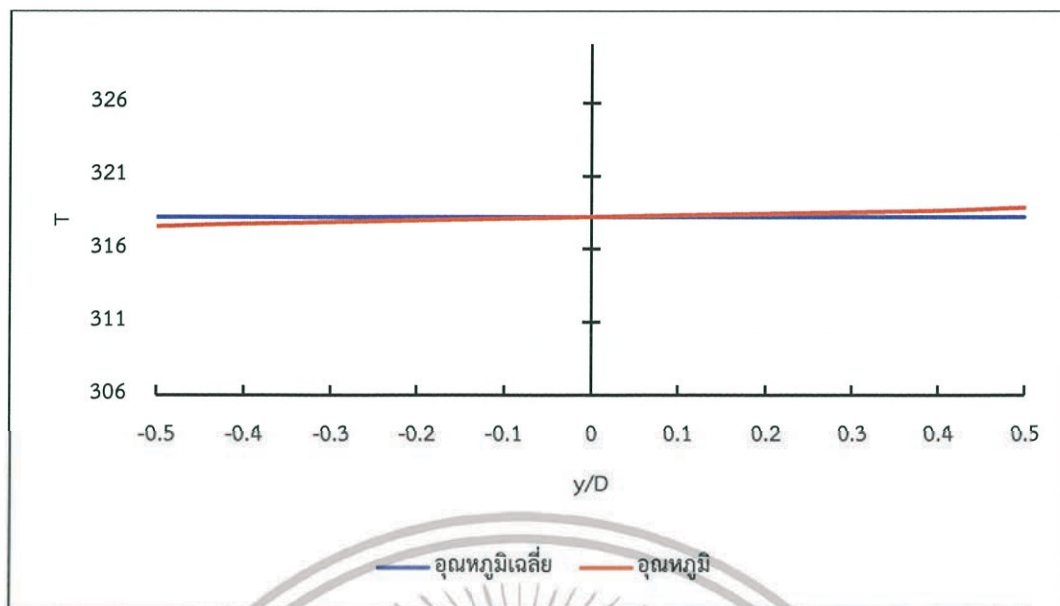
รูปที่ 4.5 อุณหภูมิภายในหน้าตัดท่อที่ระยะ 15D ของท่อเปล่าที่ไม่ได้ติดตั้งสนับสนุนความปั่นป่วน
ตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปสามเหลี่ยม



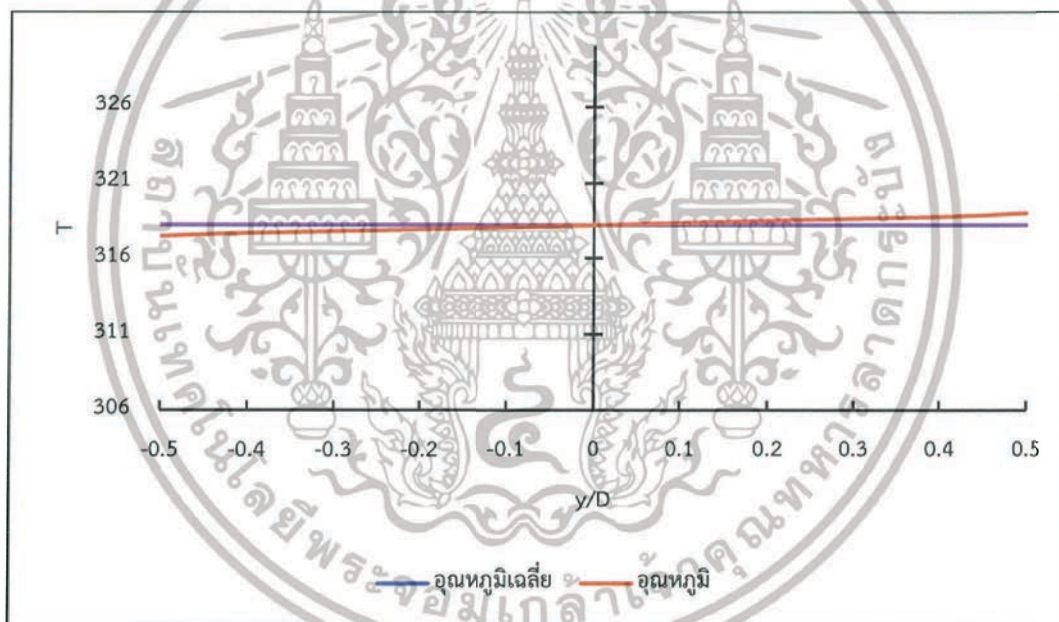
(ก) ตำแหน่ง leading edge ของตัวสนับสนุนความปั่นป่วนอยู่ที่ $y=25$ มิลลิเมตร

รูปที่ 4.6 อุณหภูมิภายในหน้าตัดท่อที่ระยะ 15D โดยใช้ตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปสามเหลี่ยม ที่
ตำแหน่ง leading edge ของตัวสนับสนุนความปั่นป่วนอยู่ที่ (ก) $y=25$ (ข) $y=0$
(ค) $y=-25$ มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) ตำแหน่ง leading edge ของตัวสนับสนุนความปั่นป่วนอยู่ที่ $y=0$ มิลลิเมตร

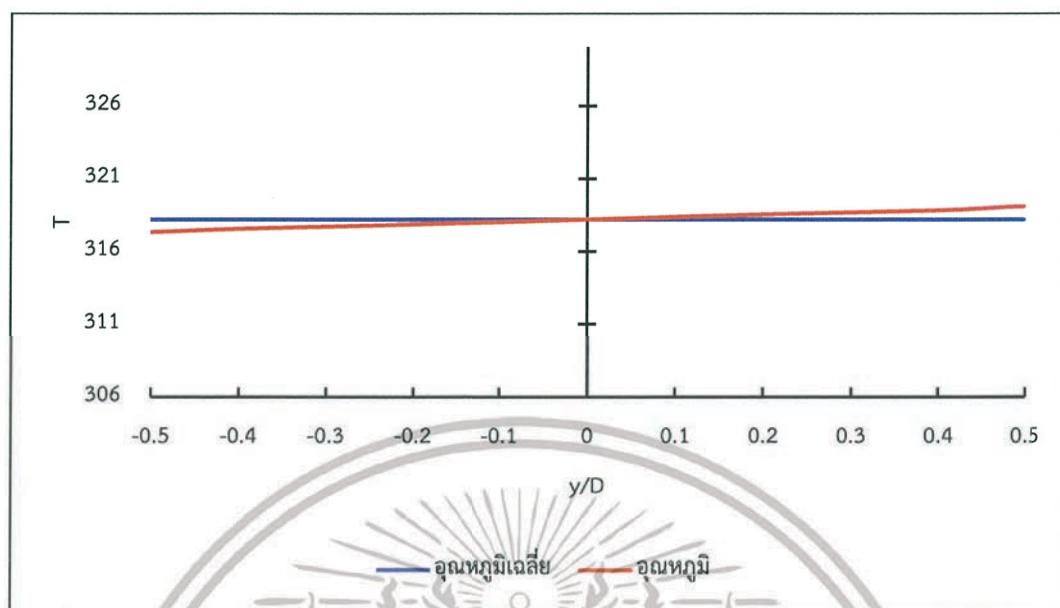


(ค) ตำแหน่ง leading edge ของตัวสนับสนุนความปั่นป่วนอยู่ที่ $y=-25$ มิลลิเมตร

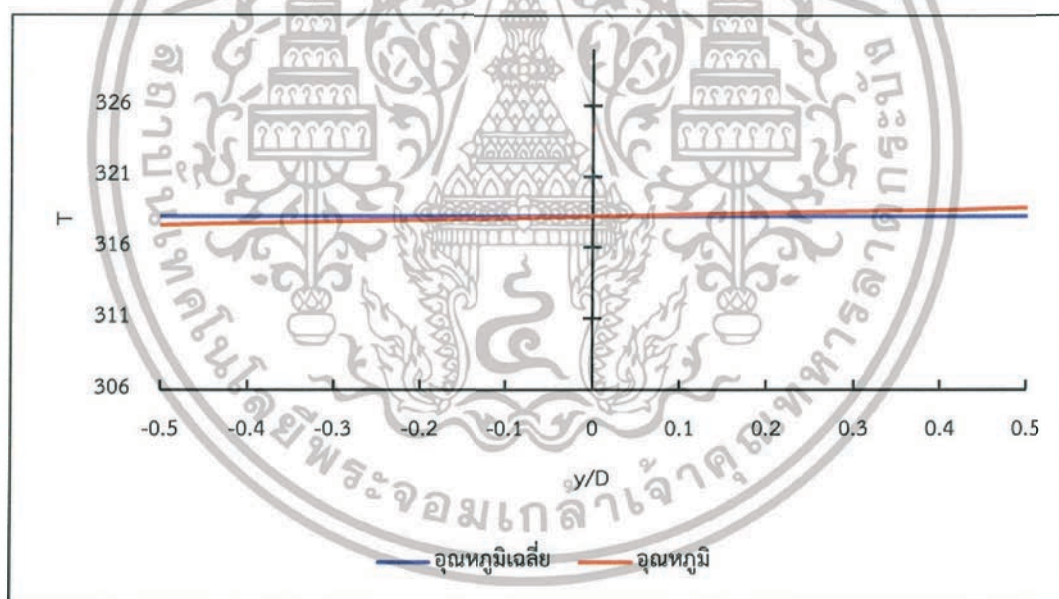
รูปที่ 4.6 (ต่อ) อุณหภูมิภายในหน้าตัดท่อที่ระยะ $15D$ โดยใช้ตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปสามเหลี่ยมที่ตำแหน่ง leading edge ของตัวสนับสนุนความปั่นป่วนอยู่ที่ (ก) $y=25$ (ข) $y=0$ (ค) $y=-25$ มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปสี่เหลี่ยม



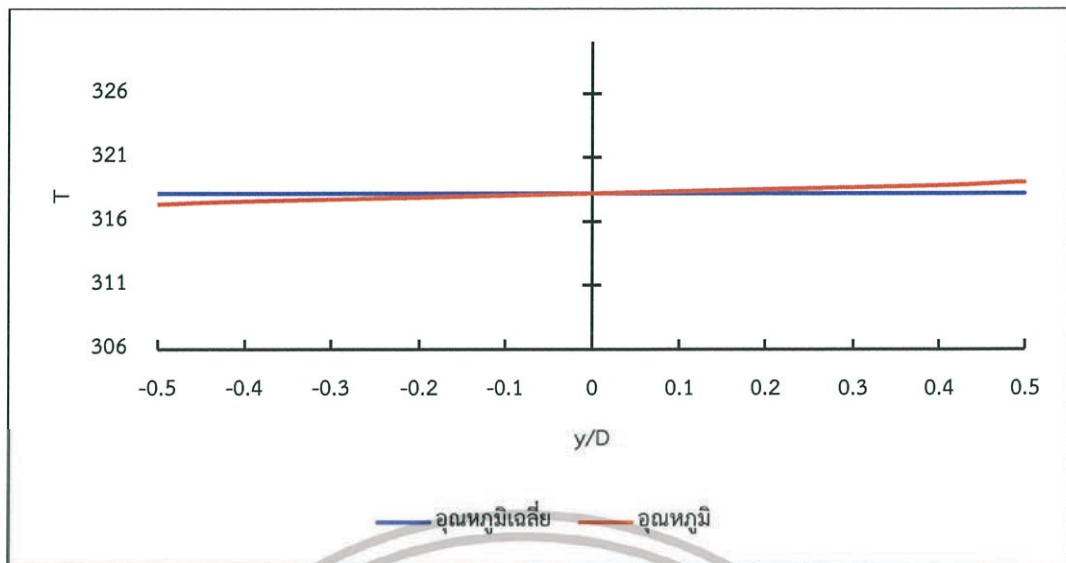
(ก) ตำแหน่ง leading edge ของตัวสนับสนุนความปั่นป่วนอยู่ที่ $y=25$ มิลลิเมตร



(ข) ตำแหน่ง leading edge ของตัวสนับสนุนความปั่นป่วนอยู่ที่ $y=0$ มิลลิเมตร

รูปที่ 4.7 อุณหภูมิภายในหน้าตัดท่อที่ระยะ $15D$ โดยใช้ตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปสี่เหลี่ยม ที่ตำแหน่ง leading edge ของตัวสนับสนุนความปั่นป่วนอยู่ที่ (ก) $y=25$ (ข) $y=0$ และ (ค) $y=-25$ มิลลิเมตร

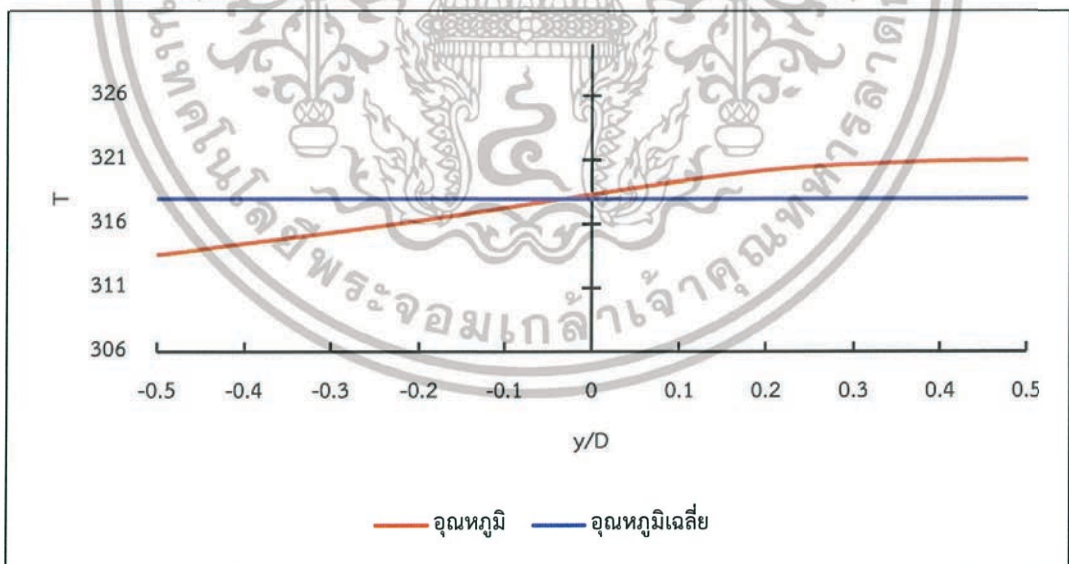
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) ตำแหน่ง leading edge ของตัวสนับสนุนความปั่นป่วนอยู่ที่ $y = -25$ มิลลิเมตร

รูปที่ 4.7 (ต่อ) อุณหภูมิภายในหน้าตัดท่อที่ระยะ $15D$ โดยใช้ตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปสี่เหลี่ยม
ที่ตำแหน่ง leading edge ของตัวสนับสนุนความปั่นป่วนอยู่ที่ (ก) $y = 25$ (ข) $y = 0$
และ (ค) $y = -25$ มิลลิเมตร

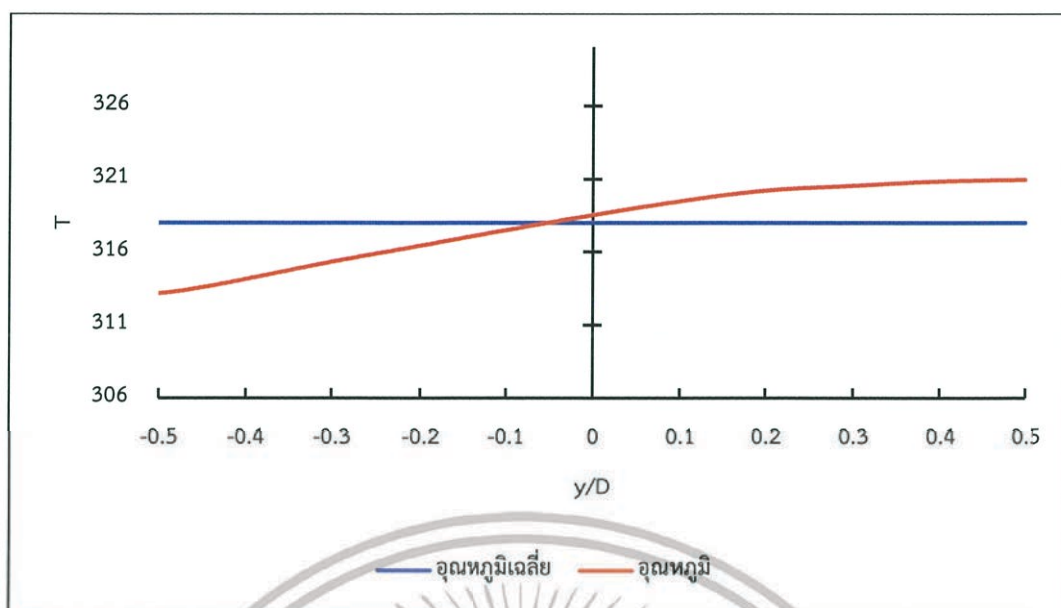
ตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปวงกลม



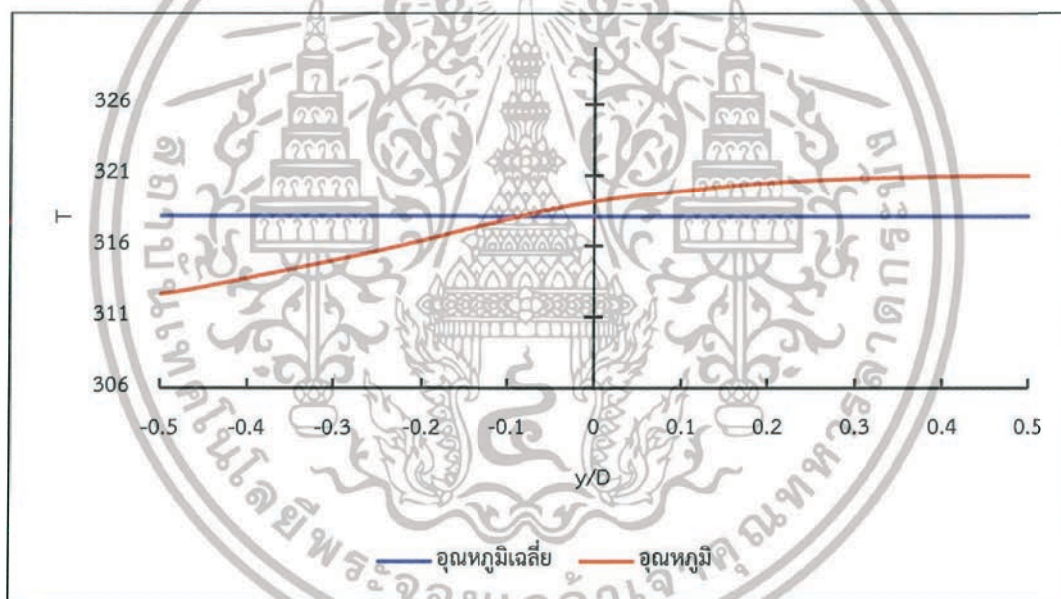
(ก) ตำแหน่ง leading edge ของตัวสนับสนุนความปั่นป่วนอยู่ที่ $y = 25$ มิลลิเมตร

รูปที่ 4.8 อุณหภูมิภายในหน้าตัดท่อที่ระยะ $15D$ โดยใช้ตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปวงกลม ที่
ตำแหน่ง leading edge ของตัวสนับสนุนความปั่นป่วนอยู่ที่ (ก) $y = 25$ (ข) $y = 0$ และ
(ค) $y = -25$ มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) ตำแหน่ง leading edge ของตัวสนับสนุนความปั่นป่วนอยู่ที่ $y=0$ มิลลิเมตร



(ค) ตำแหน่ง leading edge ของตัวสนับสนุนความปั่นป่วนอยู่ที่ $y=-25$ มิลลิเมตร

รูปที่ 4.8 (ต่อ) อุณหภูมิภายในหน้าตัดท่อที่ระยะ $15D$ โดยใช้ตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปวงกลม ที่ตำแหน่ง leading edge ของตัวสนับสนุนความปั่นป่วนอยู่ที่ (ก) $y=25$ (ข) $y=0$ และ (ค) $y=-25$ มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ค่า T^* ของตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปร่างและตำแหน่งต่าง ๆ

รูปร่างของตัวสนับสนุน ความปั่นป่วน	ตำแหน่ง leading edge	T^*
สามเหลี่ยม	$y = 25$	69.46
	$y = 0$	43.50
	$y = -25$	54.35
สี่เหลี่ยม	$y = 25$	63.18
	$y = 0$	46.31
	$y = -25$	59.51
วงกลม	$y = 25$	327.04
	$y = 0$	328.35
	$y = -25$	369.85
ท่อเปล่า	-	284.00

จากตารางที่ 4.1 พบว่าค่า T^* ของตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปร่างสามเหลี่ยม ณ ตำแหน่ง leading edge $y=0$ มิลลิเมตรให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด รองลงมาคือตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปร่างสี่เหลี่ยม ณ ตำแหน่ง leading edge $y=0$ มิลลิเมตรและเมื่อเปรียบเทียบระหว่างตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปร่างสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมที่ตำแหน่งการวาง turbulence promoter เดียวกันจะพบว่าให้ผลลัพธ์ที่ไม่ต่างกันมากอย่างมีนัยยะสำคัญ โดยตำแหน่ง leading edge $y=-25$ มิลลิเมตรทั้งสองรูปจะให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าที่ดีกว่าตำแหน่ง leading edge $y=25$ และจากผลการศึกษาจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปร่างวงกลมไม่เหมาะในการนำช่วยในการผสมอุณหภูมิเลย กลับกันยังทำให้ผลการผสมแย่กว่าการผสมด้วยท่อรูปตัวทีที่ไม่ได้ติดตั้งตัวสนับสนุนความปั่นป่วนด้วยซ้ำ สังเกตได้จากค่า T^* ของวงกลมทั้งสามตำแหน่งการวางที่มีค่าสูงกว่าค่า T^* ของท่อรูปตัวทีที่ไม่ได้ติดตั้งตัวสนับสนุนความปั่นป่วน โดยค่า T^* ของวงกลมนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อตำแหน่งการวางนั้นต่ำลง ซึ่งเป็นไปได้ว่าเกิดจากอิทธิพลของกระแสวน (Vortex) ที่เกิดขึ้นในท่อหลักบริเวณจุดเชื่อมระหว่างขาเข้าของท่อย่อยและมีอิทธิพลเฉพาะกับตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปร่างวงกลมเพียงรูปทรงเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลของการติดตั้งตัวสนับสนุนความปั่นป่วนต่ออุณหภูมิในทิศแนวการไหล

ตารางที่ 4.2 ค่า X^* ของ ตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปร่างและตำแหน่งต่าง ๆ ที่ทำให้ค่าสัมบูรณ์ของ T' มีค่า 0.1

ตำแหน่งการเก็บ ข้อมูลในท่อ	ตัวสนับสนุนความปั่นป่วน รูปสามเหลี่ยม			ตัวสนับสนุนความปั่นป่วน รูปสี่เหลี่ยม			ตัวสนับสนุนความปั่นป่วน รูปร่างกลม			ท่อเปล่าที่ไม่ได้ติด ตัวสนับสนุนความ ปั่นป่วน
	ตำแหน่ง leading edge			ตำแหน่ง leading edge			ตำแหน่ง leading edge			
	y=25 (กรณี1)	y=0 (กรณี2)	y=-25 (กรณี3)	y=25 (กรณี4)	y=0 (กรณี5)	y=-25 (กรณี6)	y=25 (กรณี7)	y=0 (กรณี8)	y=-25 (กรณี9)	
y=-50	22.11	18.91	20.62	22.16	20.38	22.66	72.36	80.18	90.61	50.41
y=-25	17.42	16.15	18.49	20.38	17.85	19.85	53.53	60.19	65.41	37.64
y=0	13.38	9.76	12.32	12.71	10.66	8.61	22.53	15.29	44.55	21.89
y=25	20.40	14.87	16.99	20.38	13.22	19.34	47.73	52.66	64.83	36.58
y=50	22.11	18.70	20.83	22.42	20.63	22.40	73.52	80.18	89.74	42.96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของการติดตั้งตัวสนับสนุนความปั่นป่วนต่ออุณหภูมิในทิศแนวการไหล สามารถนำไปเปรียบเทียบกับค่า T' ซึ่งถูกนิยามว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างผลต่างอุณหภูมิต่อผลต่างระยะทางในทิศการไหล ซึ่งหมายถึงความชันในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามแนวการไหล เพื่อหาระยะตามแนวการไหลที่ความชันมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ หรือมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่ำน้อยมากตามทิศการไหล โดยในงานวิจัยนี้กำหนดให้ค่าสัมบูรณ์ของความชันที่ยอมรับได้มีค่าน้อยกว่า 0.1 โดยสามารถแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง X_1^* และ T' โดยที่ X_1^* หมายถึงระยะในแนวการไหลหลังตัวสนับสนุนความปั่นป่วนหารด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางท่อหลัก และ T' หมายถึงอัตราส่วนระหว่างผลต่างอุณหภูมิต่อผลต่างระยะทางในทิศการไหล โดยจะเก็บข้อมูลเป็นอุณหภูมิตามทิศแนวการไหล ณ ตำแหน่งในทิศตั้งฉากกับการไหลทั้งหมด 5 ตำแหน่งภายในท่อประกอบด้วย ตำแหน่ง $y=-50$ $y=-25$ $y=0$ $y=25$ และ $y=50$ มิลลิเมตร เมื่อนิยามให้ตำแหน่ง $y=0$ มิลลิเมตร คือตำแหน่งกึ่งกลางท่อในทิศตั้งฉากกับแนวการไหล โดยจะทำการหาค่า X_1^* ในตำแหน่งแรกที่ T' มีค่าน้อยกว่า 0.1 ตลอดแนวการไหล ซึ่งค่า X_1^* สามารถนำมาสรุปเป็นตารางได้ดังแสดงในตารางที่ 4.2

จากตารางที่ 4.2 เป็นการแสดงค่า X_1^* จากข้อมูลดังกล่าวจะสามารถสรุปได้ว่าตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปสามเหลี่ยม ที่ตำแหน่ง leading edge $y=0$ มิลลิเมตร ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด รองลงมาเป็นตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปสามเหลี่ยม ที่ตำแหน่ง leading edge $y=0$ มิลลิเมตร โดยจะเห็นได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมที่ตำแหน่งการวางตัวสนับสนุนความปั่นป่วนเดียวกันจะให้ผลลัพธ์ที่ไม่ต่างกันมาก แต่ส่วนใหญ่แล้วตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปสามเหลี่ยมจะให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า ซึ่งเป็นเหตุจากลักษณะของรูปร่างตัวสนับสนุนความปั่นป่วนด้านหลังตัดการปะทะของตัวสนับสนุนความปั่นป่วนที่รูปสามเหลี่ยมเป็นลักษณะลู่ออกเข้าหาตำแหน่งกึ่งกลางตัวสนับสนุนความปั่นป่วนโดยจะส่งผลให้เกิดการผสมที่ดีกว่า และ เมื่อเปรียบเทียบตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยม ณ ตำแหน่งการวาง leading edge $y=-25$ มิลลิเมตร จะให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าตำแหน่ง leading edge $y=25$ มิลลิเมตร และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างกรณีตัวสนับสนุนความปั่นป่วนที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมกับรูปร่างที่เป็นวงกลม ค่า X_1^* ของตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปวงกลมจะมีค่ามากกว่ารูปเหลี่ยมมาก ยิ่งไปกว่านั้นท่อเปล่าที่ไม่ได้ติดตั้งตัวสนับสนุนความปั่นป่วนยังมีผลลัพธ์ที่ดีกว่าท่อที่ติดตั้งตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปวงกลม ซึ่งอาจจะเกิดจากเหตุผลที่ว่า การติดตั้งตัวสนับสนุนความปั่นป่วนไปเปลี่ยนรูปแบบการไหลตามปกติของท่อผสมรูปตัวทีซึ่งจะส่งผลต่อการผสมของอุณหภูมิ และตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปวงกลมนั้นเปลี่ยนรูปแบบการไหลที่ส่งผลให้การผสมของอุณหภูมินั้นแย่กว่าเดิม เนื่องจากการไม่สามารถสร้างความปั่นป่วนของ

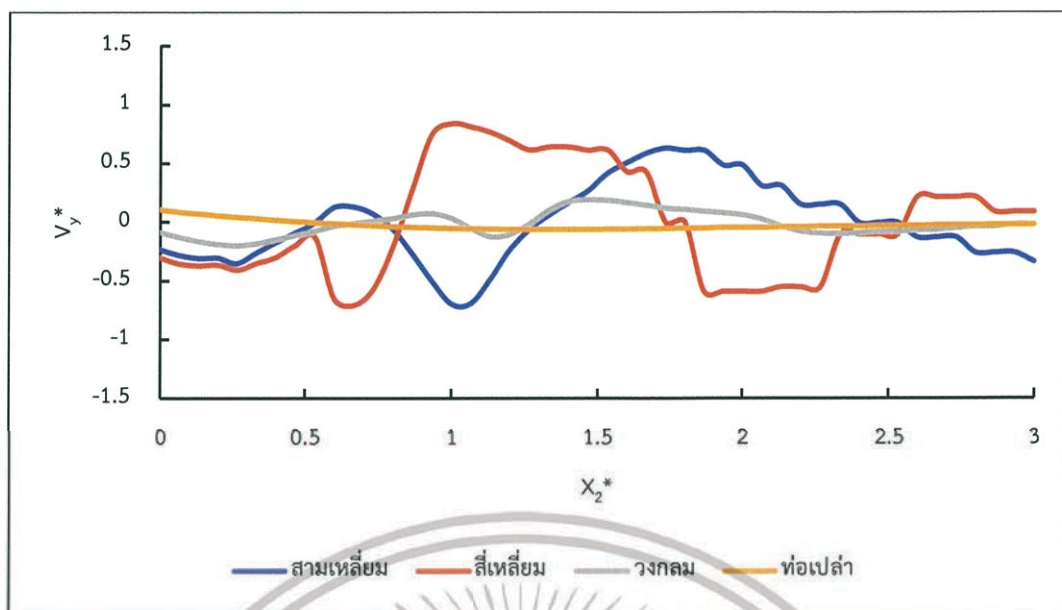
การไหลได้ดีเท่าตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยม และจากตารางที่ 4.2 ยังสังเกตได้อีกว่าในทุกกรณี อุณหภูมิตรงบริเวณกลางท่อ ($y=0$ มิลลิเมตร) มีค่า T' ที่เท่ากับ 0.1 ด้วยระยะทางที่สั้นที่สุด แล้วจะค่อยๆ ไกลขึ้นตามระยะห่างจากบริเวณกลางท่อ ซึ่งจะสอดคล้องกับธรรมชาติของการไหลภายในท่อที่ตำแหน่งตรงกลางสายการไหลภายในท่อ (Core flow) จะมีความปั่นป่วนมากกว่าบริเวณที่ใกล้ผนัง ส่งผลให้การผสมตรงบริเวณกลางท่อมีประสิทธิภาพมากกว่าบริเวณใกล้ผนัง โดยเป็นการช่วยยืนยันว่าผลการจำลองมีความสอดคล้องกับธรรมชาติของการไหลภายในท่อ

4.5 ผลของการติดตั้งตัวสนับสนุนความปั่นป่วนต่อความเร็วของน้ำในแนวแกนตั้งฉากกับทิศทางการไหล

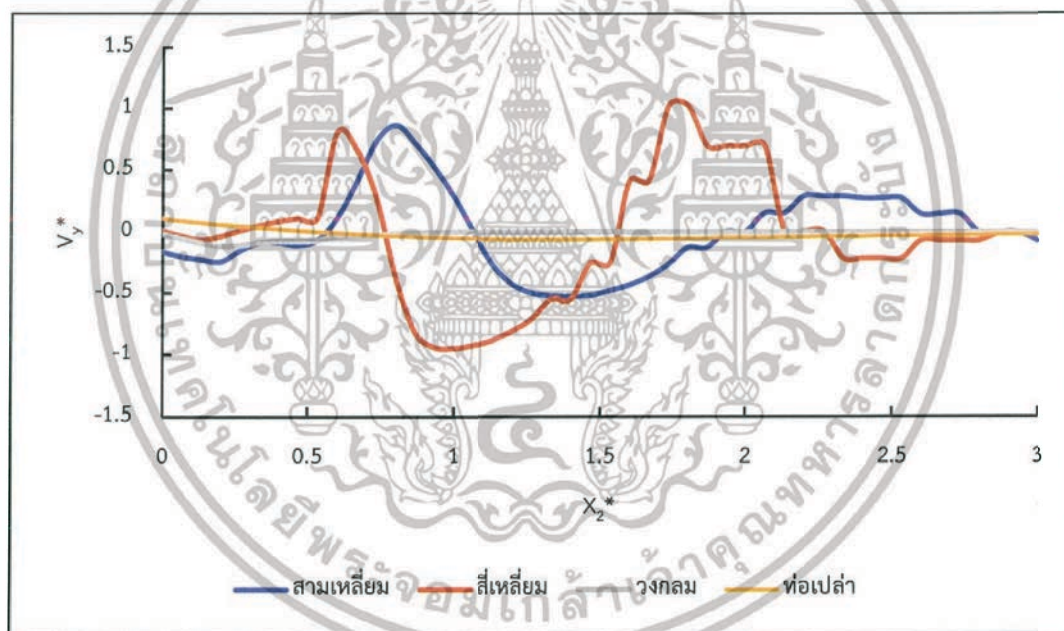
ผลของการติดตั้งตัวสนับสนุนความปั่นป่วนต่อความเร็วของน้ำในแนวแกนตั้งฉากกับทิศทางการไหล ทั้งหมด 9 กรณี สามารถนำไปเปรียบเทียบด้วยการแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง X_2^* และ V_y^* โดยที่ X_2^* หมายถึงระยะห่างในทิศการไหลจากจุดที่ก่อนถึง leading edge 36 มิลลิเมตร ทหารด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางท่อหลัก และ V_y^* หมายถึงความเร็วเฉลี่ยของน้ำในทิศตั้งฉากกับทิศทางการไหลในแต่ละหน้าตัดหารด้วยความเร็วขาเข้าท่อหลักของน้ำ และสามารถนำไปเปรียบเทียบได้เป็น 2 ประเด็น ประกอบด้วยผลของรูปทรงตัวสนับสนุนความปั่นป่วน ดังรูป 4.15 และผลของตำแหน่งการติดตั้งตัวสนับสนุนความปั่นป่วนในทิศตั้งฉากกับการไหล ดังรูป 4.16

4.5.1 ผลของรูปทรงตัวสนับสนุนความปั่นป่วนต่อความเร็วของน้ำในแนวแกนตั้งฉากกับทิศทางการไหล

ผลของรูปทรงตัวสนับสนุนความปั่นป่วนต่อความเร็วของน้ำในแนวแกนตั้งฉากกับทิศทางการไหลพบว่าเมื่อพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง X_2^* และ V_y^* ตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปวงกลมจะให้ค่าแอมพลิจูดของความเร็วในทิศตั้งฉากกับการไหลที่ต่ำที่สุด ส่วนตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปสี่เหลี่ยมจะให้ค่าแอมพลิจูดของค่าความเร็วในทิศตั้งฉากสูงกับการไหลที่สูงกว่ารูปสามเหลี่ยม แต่มีแนวโน้มรูปสี่เหลี่ยมมีแนวโน้มที่ค่า V_y^* จะลู่เข้า 0 ได้เร็วกว่ารูปสามเหลี่ยม



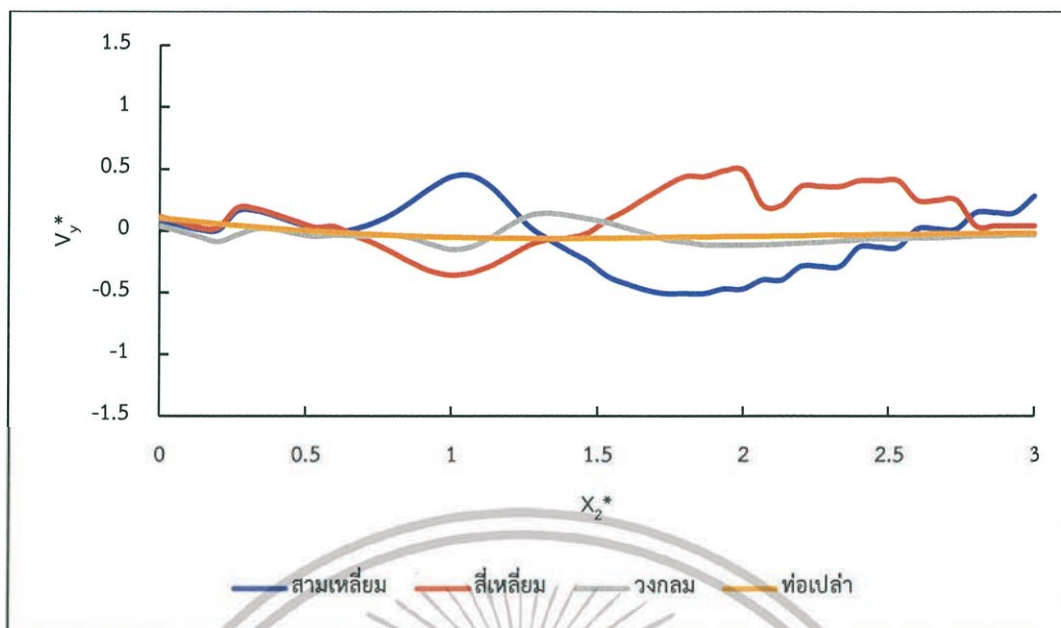
(ก) จุด leading edge ของตัวสนับสนุนความปั่นป่วนอยู่ที่ตำแหน่ง $y=25$ มิลลิเมตร



(ข) จุด leading edge ของตัวสนับสนุนความปั่นป่วนอยู่ที่ตำแหน่ง $y=0$ มิลลิเมตร

รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงความเร็วในทิศตั้งฉากกับแนวการไหลของน้ำรอบ ๆ ตัวสนับสนุนความปั่นป่วนที่มีรูปร่างแตกต่างและตำแหน่ง leading edge เหมือนกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

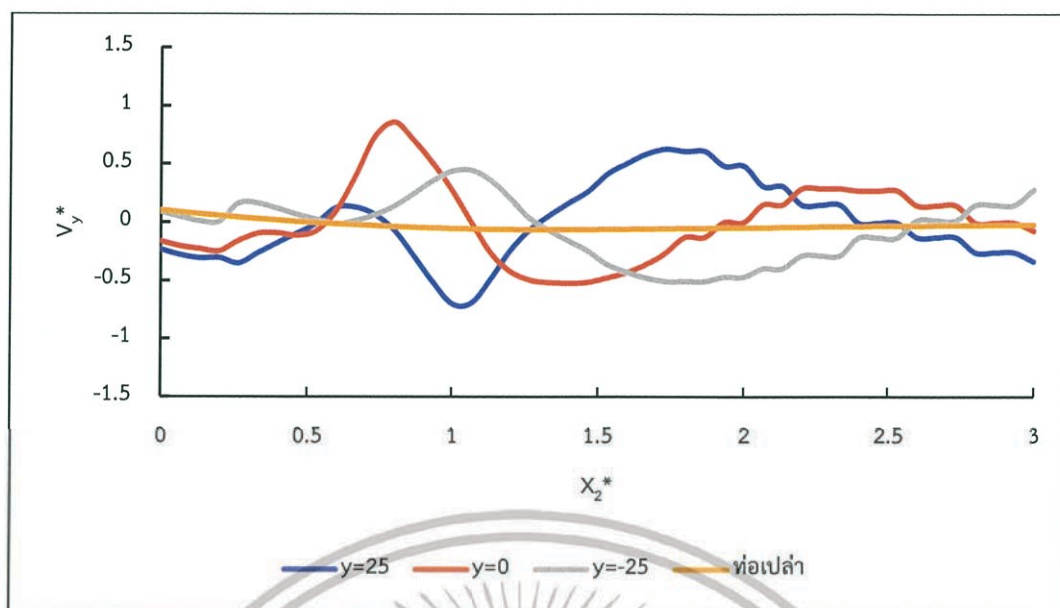


(ค) จุด leading edge ของตัวสนับสนุนความปั่นป่วนอยู่ที่ตำแหน่ง $y=-25$ มิลลิเมตร

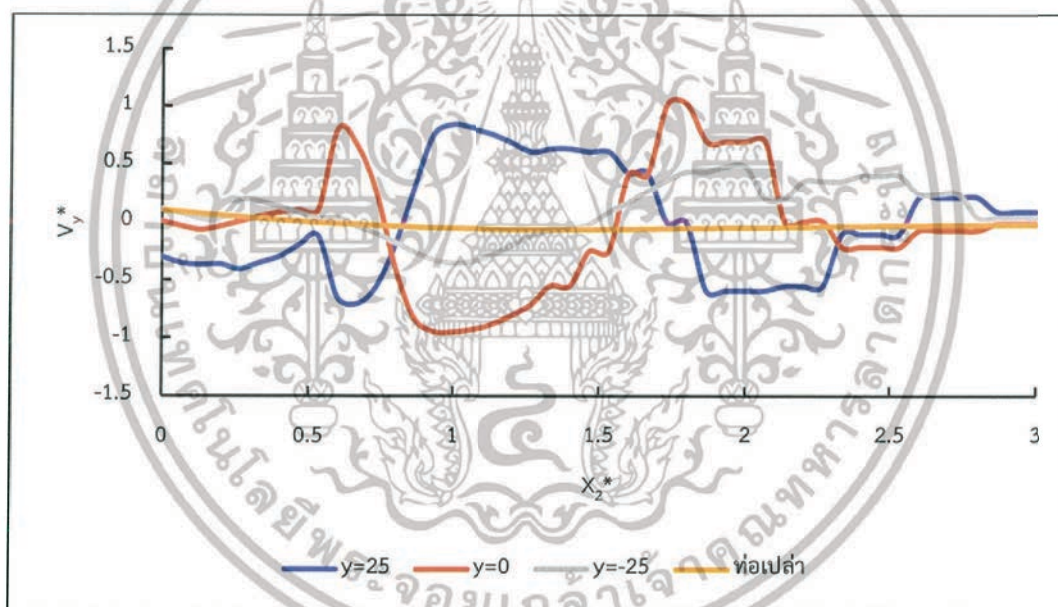
รูปที่ 4.9 (ต่อ) การเปลี่ยนแปลงความเร็วในทิศตั้งฉากกับแนวการไหลของน้ำรอบ ๆ ตัวสนับสนุนความปั่นป่วนที่มีรูปร่างแตกต่างและตำแหน่ง leading edge เหมือนกัน

4.5.2 ผลของตำแหน่งการติดตัวสนับสนุนความปั่นป่วนต่อความเร็วของน้ำในแนวแกนตั้งฉากกับทิศทางการไหล

ผลของตำแหน่งการติดตัวสนับสนุนความปั่นป่วนต่อความเร็วของน้ำในแนวแกนตั้งฉากกับทิศทางการไหลพบว่าเมื่อพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง X_2^* และ V_y^* ตัวสนับสนุนความปั่นป่วนพบว่าสำหรับตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยม ตำแหน่ง leading edge $y=0$ มิลลิเมตรจะให้ค่าแอมพลิจูดของความเร็วในทิศตั้งฉากกับการไหลที่สูงที่สุด รองลงมาเป็นที่ตำแหน่ง $y=25$ มิลลิเมตรและ $y=-25$ มิลลิเมตรตามลำดับและสำหรับตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปวงกลม ตำแหน่งที่สูงที่สุดคือ $y=25$ มิลลิเมตร รองลงมาเป็นที่ตำแหน่ง $y=-25$ มิลลิเมตรและ $y=0$ มิลลิเมตรตามลำดับ



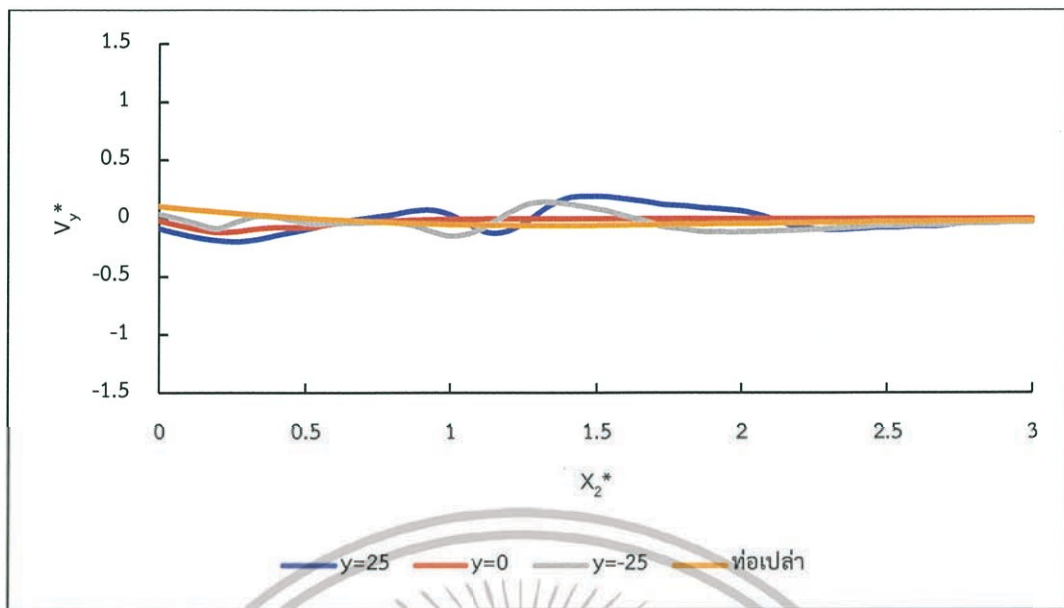
(ก) ตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปสามเหลี่ยม ที่มีตำแหน่ง leading edge ต่างกัน



(ข) ตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปสี่เหลี่ยม ที่มีตำแหน่ง leading edge ต่างกัน

รูปที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงความเร็วในทิศตั้งฉากกับแนวการไหลของน้ำรอบ ๆ ตัวสนับสนุนความปั่นป่วนที่มีรูปร่างเหมือนกันและตำแหน่ง leading edge ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) ตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูวงกลม ที่มีตำแหน่ง leading edge ต่างกัน

รูปที่ 4.10 (ต่อ) การเปลี่ยนแปลงความเร็วในทิศตั้งฉากกับแนวการไหลของน้ำรอบ ๆ ตัวสนับสนุนความปั่นป่วนที่มีรูปร่างเหมือนกันและตำแหน่ง leading edge ต่างกัน



4.6 ความดันลดหลังจากการติดตั้งตัวสนับสนุนความปั่นป่วน

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงค่าความดันลดหลังติดตั้งตัวสนับสนุนความปั่นป่วน

รูปร่างตัวสนับสนุนความปั่นป่วน	ตำแหน่ง leading edge	ค่าความดันลด (Pa)
สามเหลี่ยม	$y = 25$	7543
	$y = 0$	7385
	$y = -25$	6981
สี่เหลี่ยม	$y = 25$	6418
	$y = 0$	7705
	$y = -25$	5988
วงกลม	$y = 25$	2463
	$y = 0$	2188
	$y = -25$	2220
ท่อเปล่าที่ไม่ได้ติดตั้งตัวสนับสนุนความปั่นป่วน		2045

จากตารางที่ 4.3 เป็นการวัดค่าความดันลด ณ ตำแหน่งก่อน leading edge 356 มิลลิเมตร และตำแหน่งหลัง leading edge 59 มิลลิเมตร ซึ่งพบว่าค่าความดันลดของการติดตั้งตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปสี่เหลี่ยมที่ตำแหน่ง leading edge $y=0$ มิลลิเมตรมีค่าสูงที่สุด อันดับสองคือตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปสามเหลี่ยมที่ตำแหน่ง leading edge $y=25$ มิลลิเมตรและตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปวงกลมจะให้ค่าความดันลดที่ต่ำที่สุดในบรรดาสามรูปทรง ซึ่งก็สอดคล้องกับการที่ตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปวงกลมสร้างพื้นที่การไหลวนกลับไปมาของของไหลได้น้อยที่สุด และเป็นผลให้การผสมกันของอุณหภูมิด้วยตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปทรงกลมมีค่าต่ำที่สุด โดยตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปวงกลมจะให้ค่าความดันลดเพิ่มขึ้นมาเล็กน้อยเมื่อเทียบกับท่อเปล่า

บทที่ 5

สรุปผลการจำลอง

5.1 สรุปผลการจำลอง

1. จากการศึกษาการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนในท่อผสมรูปตัวที เริ่มจากการศึกษาจำนวนกริดที่ไม่ทำให้ผลการจำลองเปลี่ยนแปลง (Grid Independent) ด้วยการสร้างโครงสร้างท่อผสมรูปตัวที แบบ 2 มิติ ในโปรแกรม Gambit และใช้โปรแกรม FLUENT 14.5 ในการจำลองลักษณะการไหล โดยแต่ละกริดแต่จุดนั้นจะมีจุดต่อบนโดเมนการไหล คือ 149,818 จุด 190,488 จุด 251,186 จุด และ 300,136 จุด ผลลัพธ์ก็คือกริดทุกชุดให้ผลการจำลองเดียวกัน ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกกริดชุดที่มีจุดต่อโดเมนการไหลน้อยที่สุดเพื่อเป็นการประหยัดทรัพยากรในการจำลอง และเมื่อนำผลการจำลองไปเทียบกับผลการทดลองพบว่าผลการจำลองมีความคลาดเคลื่อนกับผลการทดลองเล็กน้อย แต่สามารถยอมรับได้และเพียงพอที่จะนำมาใช้ในการศึกษาต่อในขั้นตอนถัดไป

2. จากการศึกษาการผสมของน้ำหลังจากติดตั้งตัวสนับสนุนความปั่นป่วนทั้งหมดสามรูปทรง ประกอบด้วย สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม และวงกลม ที่ตำแหน่ง leading edge ของตัวสนับสนุนความปั่นป่วนทั้งหมดสามตำแหน่งในทิศตั้งฉากกับแนวการไหลประกอบไปด้วย $y=25$ $y=0$ และ $y=-25$ มิลลิเมตร และตำแหน่งในทิศแนวการไหลเดียวกัน ได้ผลลัพธ์ออกมาว่า ตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปวงกลมไม่เหมาะในการใช้ผสมน้ำให้มีอุณหภูมิเท่ากัน ซ้ำยังให้ผลลัพธ์ที่แย่กว่าท่อเปล่าที่ไม่ติดตั้งตัวสนับสนุนความปั่นป่วน แต่ตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมให้ผลลัพธ์ในการช่วยผสมทำให้อุณหภูมิเท่ากันภายในท่อเท่ากันทั่วทั้งหน้าตัดได้เร็วขึ้น โดยตำแหน่งในการวางตัวสนับสนุนความปั่นป่วนที่ดีที่สุดคือ ตำแหน่งการวาง leading edge ที่ $y=0$ มิลลิเมตร โดยของทั้งสองกรณี โดยรูปสามเหลี่ยมจะให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าเล็กน้อย และเมื่อศึกษาผลของการติดตั้งตัวสนับสนุนความปั่นป่วนต่ออุณหภูมิในทิศแนวการไหลพบว่า สามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยม ณ ตำแหน่งการวาง leading edge ที่ $y=0$ มิลลิเมตร ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด โดยสามเหลี่ยมจะให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าเล็กน้อย สอดคล้องกับผลของอุณหภูมิผสมในทิศตั้งฉากกับการไหล โดยจากรูปที่ 4.15 และ 4.16 เห็นได้ว่าตัวสนับสนุนความปั่นป่วนของรูปสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมให้ค่าแอมพลิจูดของกราฟความเร็วในแนวตั้งฉากกับแนวการไหลสูงที่ขึ้นมากเมื่อเทียบกับท่อเปล่า โดยในตำแหน่งการวาง leading edge ที่ $y=0$ มิลลิเมตรของตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมจะให้ค่าแอมพลิจูดที่สูงที่สุด และผลของการศึกษาความดันลดพบว่าการใช้ตัวสนับสนุนความปั่นป่วนของรูปสี่เหลี่ยมที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งการวาง leading edge ที่ $y=0$ มิลลิเมตรให้ค่าความดันลดที่เยอะที่สุด อันดับสองคือตัวสนับสนุนความปั่นป่วนของรูปสามเหลี่ยมที่ตำแหน่งการวาง leading edge ที่ $y=25$ มิลลิเมตร แต่สำหรับตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปวงกลมจะให้ค่าความดันลดที่แตกต่างจากท่อผสมรูปตัวทีที่ไม่มีการติดตั้งตัวสนับสนุนความปั่นป่วน ซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับตัวสนับสนุนความปั่นป่วนรูปสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยม

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากในการจำลองเป็นการจำลองด้วยระบบ 2 มิติ ทำให้ไม่สามารถทำนายลักษณะการไหลจริงได้อย่างถูกต้องทั้งหมด ดังนั้นการศึกษาในอนาคตสามารถทำการวิจัยในรูปแบบ 3 มิติได้เพื่อยืนยันความถูกต้องของงานได้มากยิ่งขึ้น

2. ในงานวิจัยนี้ยังไม่ได้ศึกษาถึงปัจจัยของขนาดของตัวสนับสนุนความปั่นป่วน ตำแหน่งการวางตัวสนับสนุนความปั่นป่วนในแนวการไหล และตัวเลขเรย์โนลด์ของการไหลภายในท่อ หรือปัจจัยอื่นซึ่งจะเป็นส่งผลต่อผลลัพธ์การผสมของอุณหภูมิน้ำสองสายการไหล โดยสามารถใช้เป็นประเด็นในการศึกษาภายในอนาคตได้

3. สามารถทำการเก็บข้อมูลให้ละเอียดมากกว่านี้ได้ที่จะสามารถใช้ยืนยันความถูกต้องของงานได้มากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. H. Ferziger and M. Peric, Computational Methods for Fluid Dynamics, Springer, 1996.
- [2] P. Wesseling, Principles of Computational Fluid Dynamics, Springer, 2001.
- [3] Celik, I.B., Introductory Turbulence Modeling, Morgantown: s.n., 1999.
- [4] ผศ.ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์. “เอกสารประกอบการสอน Fluid Mechanics”, 2016.
- [5] ANSYS, Inc., ANSYS FLUENT Theory Guide, 2012.
- [6] Shaoxiang Qiana, Shinichiro Kanamarua, Naoto Kasahara. “High-accuracy CFD prediction methods for fluid and structure temperature fluctuations at T-junction for thermal fatigue evaluation” *Nuclear Engineering and Design.*, 2015
- [7] Thomas Frank, C. Lifante, H.-M. Prasser, Florian Menter. “Simulation of turbulent and thermal mixing in T-junctions using URANS and scale-resolving turbulence models in ANSYS CFX” *Nuclear Engineering and Design.*, 2010
- [8] Olivier Braillard, Richard Howard, Kristian Angele, Afaq Shams, Nicolas Edh. “Thermal mixing in a T-junction: Novel CFD-grade measurements of the fluctuating temperature in the solid wall” *Nuclear Engineering and Design.*, 2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

คอนทัวร์ของอุณหภูมิภายในท่อ

ตารางที่ ก.1 คอนทัวร์อุณหภูมิของกรณีต่าง ๆ ภายในท่อ



ตารางที่ ก.1 (ต่อ) คอนทัวร์อุณหภูมิของกรณีต่าง ๆ ภายในท่อ



ภาคผนวก ข

ระเบียบวิธีการแบบ SIMPLE

(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations)

ระเบียบวิธีแบบ SIMPLE (Semi-Implicit method for pressure-linked equations) เป็นระเบียบวิธีการคำนวณเพื่อใช้สำหรับกระบวนการคาดเดาและปรับแก้สมการความดันบนกริดที่เชื่อมกันเนื่องจากไม่มีสมการโดยตรงที่หาค่าความดันโดยตรง จึงจำเป็นต้องใช้สมการโมเมนตัมในการหาค่าความดันแทน ซึ่งระเบียบวิธีการนี้ถูกนำเสนอโดย Patankar และ Spalding ในปี ค.ศ.1972 โดยพิจารณาสมการไหลราบเรียบ แบบคงตัวใน 2 มิติสำหรับระบบพิกัดฉาก ซึ่งสมการโมเมนตัมแยกสามารถแสดงได้ดังสมการ ข.1 และ ข.2

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

$$a_{i,j} v_{i,j} = \sum a_{nb} v_{nb} + (p_{i,j-1} - p_{i,j}) A_{i,j} + b_{i,j} \quad (\text{ข.2})$$

ในขั้นแรกจะคาดเดาค่าสนามความดัน p^* , u^* และ v^* แล้วแทนค่าในสมการโมเมนตัมแยกที่ ข.1 และ ข.2 จะได้เป็นสมการ ข.3 และ ข.4

$$a_{i,j} u'_{i,j} = \sum a_{nb} u'_{nb} + (p'_{i,j-1} - p'_{i,j}) A_{i,j} + b_{i,j} \quad (\text{ข.3})$$

$$a_{i,j} v'_{i,j} = \sum a_{nb} v'_{nb} + (p'_{i,j-1} - p'_{i,j}) A_{i,j} + b_{i,j} \quad (\text{ข.4})$$

โดยให้นิยามความดันจริง (Correct Pressure: p) เท่ากับผลรวมของความดันปรับแก้ (Pressure Correction: p') และความดันคาดเดา (Guessed Pressure: p^*) เมอจจัดให้อยู่ในรูปของความดันปรับแก้ดังนี้

$$p' = p - p^* \quad (\text{ข.5})$$

ในทำนองเดียวกันองค์ประกอบของการปรับแก้ความเร็วตามแนวแกน x และ แนวแกน y แสดงได้ดังนี้

$$u' = u - u^* \quad (\text{ข.6})$$

$$v' = v - v^* \quad (\text{ข.7})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่าสนามความดันจริง p ในสมการโมเมนตัมแยกจะได้ผลลัพธ์เป็นสนามความเร็วจริง (u, v) สมการโมเมนตัมแยกเชื่อมโยงกับสนามความเร็วจริงด้วยสนามความดันจริง
 ลบสมการ (ข.1) และ (ข.2) ด้วย (ข.3) และ (ข.4) ตามลำดับ จะได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$a_{i,j}(u_{i,j} - u_{i,j}^*) = \sum a_{nb}(u_{nb} - u_{nb}^*) + [(p_{i-1,j} - p_{i-1,j}^*) - (p_{i,j} - p_{i,j}^*)]A_{i,j} \quad (\text{ข.8})$$

$$a_{i,j}(v_{i,j} - v_{i,j}^*) = \sum a_{nb}(v_{nb} - v_{nb}^*) + [(p_{i,j-1} - p_{i,j-1}^*) - (p_{i,j} - p_{i,j}^*)]A_{i,j} \quad (\text{ข.9})$$

จากนิยามในสมการ (ข.5) (ข.6) และ (ข.7) เมื่อแทนค่าไปในสมการ (ข.8) และ (ข.9) จะได้

$$a_{i,j}u'_{i,j} = \sum a_{nb}u'_{nb} + (p'_{i-1,j} - p'_{i,j})A_{i,j} \quad (\text{ข.8})$$

$$a_{i,j}v'_{i,j} = \sum a_{nb}v'_{nb} + (p'_{i,j-1} - p'_{i,j})A_{i,j} \quad (\text{ข.9})$$

สมการ (ข.8) และ (ข.9) ถูกทำให้เป็นสมการอย่างง่ายโดยการตัดเทอม $\sum a_{nb}u'_{nb}$ และ $\sum a_{nb}v'_{nb}$ เพื่อให้ได้การปรับแก้ความเร็ว การลดรูปนี้เป็นแนวคิดหลักในการประมาณด้วยระเบียบวิธีแบบ SIMPLE ซึ่งสมการอย่างง่ายสามารถแสดงได้ใหม่ดังนี้

$$u'_{i,j} = d_{i,j}(p'_{i-1,j} - p'_{i,j}) \quad (\text{ข.10})$$

$$v'_{i,j} = d_{i,j}(p'_{i,j-1} - p'_{i,j}) \quad (\text{ข.11})$$

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

แทนสมการที่ (ข.10) และ (ข.11) กลับในสมการ (ข.6) และ (ข.7) จะได้เป็น

$$u_{i,j} = u_{i,j}^* + d_{i,j}(p'_{i-1,j} - p'_{i,j}) \quad (\text{ข.12})$$

$$v_{i,j} = v_{i,j}^* + d_{i,j}(p'_{i,j-1} - p'_{i,j}) \quad (\text{ข.13})$$

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

$$u_{i+1,j} = u_{i+1,j}^* + d_{i+1,j}(p'_{i,j} - p'_{i+1,j}) \quad (\text{ข.14})$$

$$v_{i,j+1} = v_{i,j+1}^* + d_{i,j+1}(p'_{i,j} - p'_{i,j+1}) \quad (\text{ข.15})$$

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

สนามความเร็วต้องสอดคล้องกับสมการความต่อเนื่อง ซึ่งสมการความต่อเนื่องแยกคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$[(\rho u A)_{i+1,j} - (\rho u A)_{i,j}] + [(\rho v A)_{i,j+1} - (\rho v A)_{i,j}] = 0 \quad (\text{ข.16})$$

แทนสมการที่ (ข.12) ถึง (ข.15) ในสมการความต่อเนื่องแยกได้เป็นสมการปรับแก้ความดัน (Pressure correction equation) ดังนี้

$$a_{i,j} p'_{i,j} = a_{i+1,j} p'_{i+1,j} + a_{i-1,j} p'_{i-1,j} + a_{i,j+1} p'_{i,j+1} + a_{i,j-1} p'_{i,j-1} + b'_{i,j} \quad (\text{ข.17})$$

โดยที่ $a_{i,j} = a_{i+1,j} + a_{i-1,j} + a_{i,j+1} + a_{i,j-1}$ และสัมประสิทธิ์อื่นสำหรับสมการปรับแก้ความดัน แสดงได้ดังตารางที่ ข.1

ตารางที่ ข.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการปรับแก้ความดัน

สัมประสิทธิ์	ค่า
$a_{i+1,j}$	$(pdA)_{i+1,j}$
$a_{i-1,j}$	$(pdA)_{i,j}$
$a_{i,j+1}$	$(pdA)_{i,j+1}$
$a_{i,j-1}$	$(pdA)_{i,j}$
$b'_{i,j}$	$(pu^* A)_{i,j} - (pu^* A)_{i+1,j} + (pv^* A)_{i,j} - (pv^* A)_{i,j+1}$

เทอม b' แทนความไม่สมดุลเนื่องจากสนามความเร็วคาดเดาไม่เหมาะสม คำวนสมการที่ (ข.17) จะได้สนามการปรับแก้ความดันทั้งสนามกรโหล เมื่อทราบสนามการปรับแก้ความดันแล้วจึงหาความดันจริงได้จากสมการที่ (ข.5) และองค์ประกอบความเร็วจากสมการที่ (ข.12) ถึง (ข.15) การตัดเทอม $\sum a_{nb} u'_{nb}$ และ $\sum a_{nb} v'_{nb}$ จะไม่ส่งผลต่อผลเฉลยสุดท้าย (ผลเฉลยลู่ออก) เนื่องจากการปรับแก้ความดันและการปรับแก้ความเร็วมีค่าเป็นศูนย์ ($p^* = p$, $u^* = u$ และ $v^* = v$)

อย่างไรก็ตามสมการปรับแก้ความดันอาจเกิดการลู่ออกของผลเฉลย ซึ่งปัญหานี้สามารถแก้ไขได้ด้วย Underrelaxation ระหว่างกระบวนการการคำนวณซ้ำ ซึ่งหาความดันใหม่ได้จาก

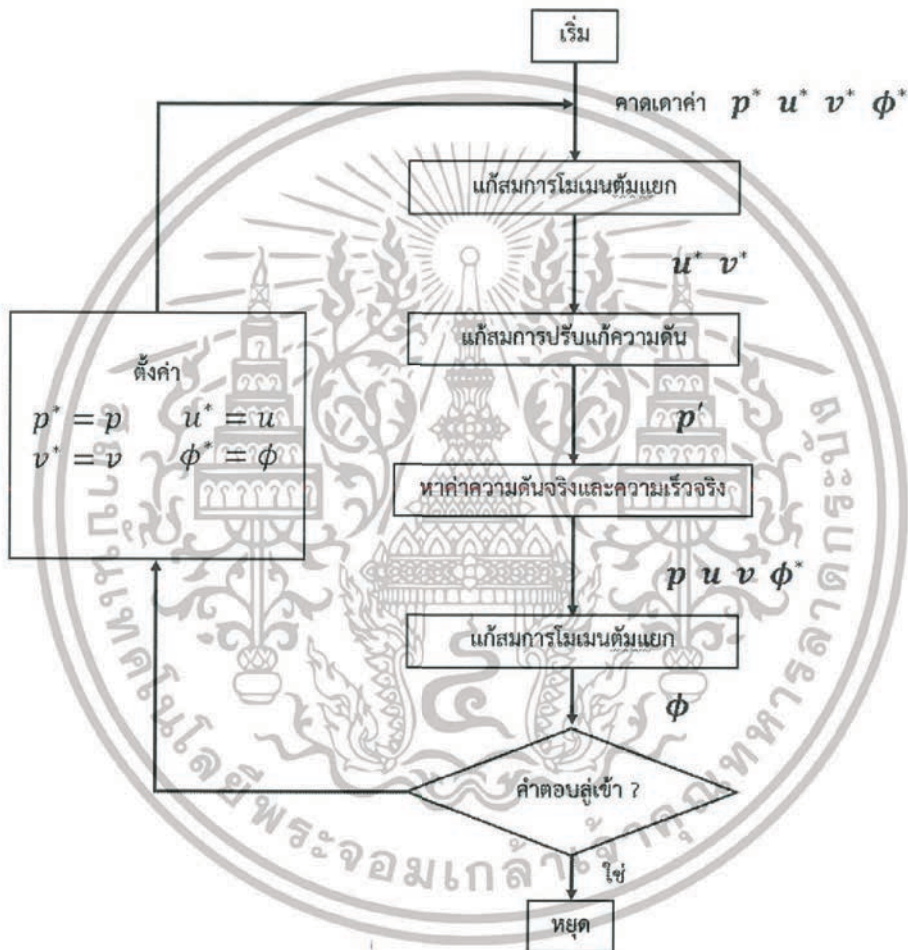
$$p^{nw} = p^* + \alpha_p p' \quad (\text{ข.18})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ α_p คือตัวประกอบได้การผ่อนปรนของความดัน

การตั้งค่าตัวประกอบได้การผ่อนปรนที่ถูกต้องจะช่วยประหยัดต้นทุนในการจำลอง การตั้งค่าสูงเกินไปจะทำให้ผลเฉลยลู่ออก แต่ถ้าตั้งค่าต่ำเกินไปจะทำให้ผลเฉลยลู่ออกอย่างช้า ๆ ซึ่งการตั้งค่าตัวประกอบได้การผ่อนปรนจะมีค่าต่างกันขึ้นกับกรณีของการไหล

ขั้นตอนของระเบียบวิธีแบบ SIMPLE สามารถสรุปได้ดังรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 ขั้นตอนของระเบียบวิธีแบบ SIMPLE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้